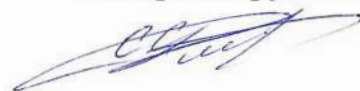


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г.И.НОСОВА»

На правах рукописи



Рыжевол Сергей Сергеевич

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Николаев Александр Аркадьевич

Магнитогорск - 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ АЛГОРИТМОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ УСТАНОВОК КОВШ-ПЕЧЬ	18
1.1. Анализ состава электрооборудования и технологических режимов установок ковш-печь различного класса и мощности	19
1.2. Существующие подходы к управлению электрическими режимами установок ковш-печь.....	23
1.3. Анализ структуры и алгоритмов систем автоматического управления электрическими режимами установок ковш-печь	27
1.4. Выводы по главе 1.....	35
ГЛАВА 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАЗЛИЧНЫХ УСТАНОВОК КОВШ-ПЕЧЬ.	38
2.1. Экспериментальные исследования электрических режимов УКП №1 180 т и УКП №2 120 т	38
2.1.1. Описание электрооборудования исследуемых УКП.....	40
2.1.2. Результаты опытов короткого замыкания исследуемых УКП	45
2.1.3. Результаты экспериментальных исследований регулировочных характеристик гидроприводов перемещения электродов исследуемых УКП....	55
2.1.4. Результаты экспериментальных исследований существующих алгоритмов и параметров систем управления электрическими режимами исследуемых УКП.....	61
2.2. Разработка математических моделей электротехнических комплексов «Питающая сеть – электрический контур УКП» для исследуемых УКП.....	69
2.3. Расчет электрических и технологических характеристик исследуемых УКП ..	82
2.4. Результаты экспериментальных исследований скоростей нагрева жидкой стали в исследуемых УКП.....	88
2.5. Анализ временных и энергетических показателей исследуемых УКП.....	91
2.6. Выводы по главе 2.....	94

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗМЕНЕНИЯ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ТОКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДУГ В УКП В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМОВ АРГОННОЙ ПРОДУВКИ И ШЛАКОВЫХ РЕЖИМОВ	96
3.1. Результаты экспериментальных исследований влияния шлаковых режимов на гармонический состав токов электрических дуг	99
3.2. Результаты экспериментальных исследований поведения поверхности жидкого металла и шлака в УКП при различных режимах аргонной продувки	101
3.3. Результаты экспериментальных исследований влияния режимов аргонной продувки на гармонический состав токов электрических дуг	114
3.4. Обоснование предлагаемых подходов к управлению электрическими режимами УКП.....	117
3.4. Выводы по главе 3.....	122
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ УКП С ДИНАМИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИЕЙ УСТАВОК ИМПЕДАНСА ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТУРА УКП И СТУПЕНЕЙ РПН ПЕЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА.....	124
4.1. Разработка методики задания оптимальных электрических режимов УКП с учетом расположения оборудования аргонной продувки	124
4.2. Разработка алгоритма автоматического управления электрическими режимами УКП с динамической адаптацией уставок импеданса вторичного электрического контура УКП и ступеней РПН печного трансформатора.....	130
4.3. Разработка методики определения граничных значений коэффициента шлака для алгоритма автоматического управления электрическими режимами УКП.....	135
4.4. Выводы по главе 4.....	138
ГЛАВА 5. РЕАЛИЗАЦИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ УКП.....	139

5.1. Реализация усовершенствованных электрических режимов УКП за счет изменения параметров САУЭР и ПЭ на исследуемых агрегатах	141
5.2. Реализация усовершенствованных алгоритмов автоматического управления электрическими режимами УКП с динамической адаптацией уставок импеданса вторичного электрического контура УКП и ступеней РПН печного трансформатора	147
5.3. Результаты экспериментальных исследований и анализ эффективности работы алгоритмов управления электрическими режимами УКП в реальных производственных условиях	161
5.4. Выводы по главе 5	173
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	175
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	177
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	193
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	217

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В настоящее время черная металлургия является одной из ключевых отраслей российской экономики, существенно влияющей 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, Северсталь, Новолипецкий металлургический комбинат, Оскольский электрометаллургический комбинат, Уральская сталь, Выксунский металлургический завод, Ревдинский метизно-металлургический завод. Основой электрометаллургического производства являются электротехнические комплексы с дуговыми сталеплавильными печами (ДСП) и установками ковшепечь (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 металлошихты и получения жидкого полупродукта, который затем доводят в УКП до требуемых параметров (окончательное раскисление металла, удаление серы, легирование и поддержание требуемой температуры). 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 эф-

фективность 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 системы управления электрическими режимами УКП существенно влияет на уровень энергопотребления.

Современные электротехнические комплексы на базе УКП оснащены системами управления электрическими режимами, установленными заводами-изготовителями такими как: ARCOS, Simelt, Melt Expert (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 (Ferrotron, Германия) и DigitArc (AMI, Мексика). Однако функциональные возможности этих систем управления для УКП ограничены. В большинстве систем заданные параметры регулирования (полное сопротивление фазы $Z_{2\phi}$, активное сопротивление дуг R_d или полные проводимости фаз $Y_{2\phi}$) рассчитываются заранее для различных сочетаний ступеней напряжения печного трансформатора ($N_{тр}$) и рабочих кривых ($N_{рк}$), определяющих длину электрической дуги. Выбор необходимых рабочих кривых и ступеней напряжения трансформатора осуществляется вручную технологическим персоналом. Таким образом, можно сделать вывод о том, что в современных системах управления электрическими режимами УКП отсутствует автоматическая адаптация электрических режимов к изменяющимся режимам аргонной продувки, а также шлаковым режимам, от которых зависит степень экранирования электрических дуг и их тепловой КПД.

В связи с этим особую актуальность приобретает разработка интеллектуальных систем автоматического управления электрическими режимами УКП с функцией динамической адаптации длин электрических дуг к текущему шлаковому режиму и режиму аргонной продувки с учетом расположения возмущений (зеркал металла) на поверхности жидкой ванны относительно электродов фаз

УКП, создаваемых работой продувочных блоков в днище стальковша или аварийной фурмы.

Степень разработанности. Исследования, направленные на снижение энергопотребления электросталеплавильных агрегатов, к которым также относятся УКП, проводятся многими отечественными и зарубежными учёными. Среди зарубежных авторов следует выделить работы Krüger K [1], Bowman B. [2] и Köhle S [3, 4], а среди отечественных – работы Ю.М. Миронова [5], А.Н. Макарова [6], А.А. Николаева [7-17], Р.А. Бикеева [18], А.Н. Шпигановича [19], С. М. Нехамина [20], И.А. Якимова [21], П.Г. Тулупова [22-24], В.А. Кудрина [25,26], В.П. Рубцова [27], В.А. Серикова [28], Л.А. Кучумова [29], А.Н. Черенко и других. При этом фундаментальные основы данного направления исследований были заложены в работах А.Д. Свенчанского [30], М.Я. Смелянского [31], Ю.Н. Тулуевского [32], И.Ю. Зинурова [33], Р.В. Минеева [34] и Ю.А. Гудима [35].

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 УКП 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, расположенные в электросталеплавильных цехах отечественных предприятий черной металлургии, ПАО «ММК» и ПАО «Северсталь».

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

Целью диссертационной работы является улучшение энергетических показателей УКП 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.

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 стальковше.

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 РПН 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 изме-

нения длин электрических дуг и вторичного напряжения печного трансформатора.

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

Решение поставленных задач осуществлялось на агрегатах внепечной обработки стали отечественных предприятий черной металлургии ПАО «ММК» и ПАО «Северсталь».

В первой главе проведен анализ состава электрооборудования и технологических режимов электротехнических комплексов с У КП различных классов и мощностей. Проведен анализ структуры и алгоритмов систем автоматического управления электрическими режимами У КП, получивших наибольшее распространение в России и в мире. Показаны функциональные возможности систем управления в части задания электрических режимов У КП. Также рассмотрены возможности задания несимметричных электрических режимов. Рассмотрена имеющаяся в некоторых современных системах управления У КП динамическая адаптация уставок импеданса вторичного электрического контура, которая является ограниченной и не может обеспечить качественной подстройки электрических режимов к текущим условиям аргонной продувки и шлаковым режимам. Важной технологической особенностью У КП является необходимость перемешивания жидкой стали в стальковшах инертным газом. Работа продувочных блоков создает возмущения на поверхности жидкого металла, которые негативно сказываются на энергоэффективности работы агрегата. Проанализированы существующие алгоритмы и параметры систем управления электрическими режимами и перемещением электродов ArCOS. Установлено, что управление электрическими режимами осуществляется сталеварами вручную и зачастую с использованием ограниченного набора ступеней напряжения печного трансформатора $N_{\text{ТР}}$ и рабочих кривых $N_{\text{РК}}$. Таким образом в современных системах управления электрическими режимами отсутствует автоматическая адаптация к

условиям плавки (аргонная продувка, шлаковый режим). 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 и ступеней Р ПН печного трансформатора, используя суммарный коэффициент гармонических составляющих тока K_I (THD_I) в качестве критерия для изменения электрического режима.

Во второй главе представлены результаты экспериментальных исследований электрических режимов на У КП, функционирующих на отечественных предприятиях черной металлургии. Выполнен сбор данных об электрооборудовании, системах электроснабжения и управления. Выявлены особенности систем электроснабжения: наличие С Т К и параллельная работа с Д С П на ПАО «ММК», отсутствие С Т К 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 Р ПН печных трансформаторов и рабочих кривых. Также на основании полученных зависимостей выполнена оценка адекватности разработанных математических моделей исследуемых агрегатов. На основе полученных экспериментальных данных и известных методик разработаны математические модели электротехнических комплексов «Питающая сеть – электрический контур У КП» для исследуемых установок, включающие модели питающей сети, печного трансформатора, короткой сети, нелинейной электрической дуги (на основе уравнения Касси) и системы перемещения электродов. Проведена проверка адекватности разработанных математических моделей путем сравнения расчетных рабочих точек с экс-

периментальными данными. Статистический анализ подтвердил адекватность моделей: расчетные точки попадают в доверительные интервалы математических ожиданий экспериментальных массивов по токам и мощностям. С использованием разработанных математических моделей исследуемых УКП рассчитаны подробные электрические и технологические характеристики ($P_1=f(I_D)$, $Q_1=f(I_D)$, $S_1=f(I_D)$, $P_D=f(I_D)$, $K_{II}=f(I_D)$, $K_{IIN}=f(I_D)$) для различных ступеней напряжения и рабочих кривых, что позволило оценить текущие режимы работы. В частности, выявлены недозагрузка печных трансформаторов и потенциал для оптимизации электрических режимов. Таким образом, в данной главе был подготовлен необходимый инструментарий для теоретических исследований, а также для расчетов электрических режимов.

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_I (THD_I). Показано, что экранирование дуг шлаком существенно повышает их стабильность горения и тепловой КПД, снижая коэффициент K_I (THD_I). Напротив, работа с неэкранированными дугами приводит к значительным тепловым потерям и высокому K_I (THD_I). Показан процесс образования зеркал жидкого металла, возникающих в результате работы продувочных блоков, которые приводят к оголению электрических дуг находящихся вблизи продувочных блоков, что негативно сказывается на их стабильности горения, тепловом КПД и приводит к росту K_I (THD_I). Установлено, что уменьшение длины электрической дуги в условиях интенсивной аргонной продувки способствует повышению стабильности горения, повышению теплового КПД дуг и снижению K_I (THD_I). На основании этих исследований доказана возможность улучшения энергетических показателей УКП за счет применения специальных электрических режимов с динамической коррекцией уставок импеданса вторичного электрического контура УКП и ступеней РПН печного трансформатора.

В четвертой главе разработана методика задания оптимальных электрических режимов У КП с учетом расположения оборудования аргонной продувки, обеспечивающая нахождение значений 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. 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 повышение КПД электрических дуг и снижение удельного расхода электроэнергии электротехнического комплекса «Питающая сеть - У КП».

В пятой главе приведена реализация несимметричных электрических режимов и усовершенствованных алгоритмов автоматического управления электрическими режимами У КП с динамической адаптацией уставок импеданса вторичного электрического контура и ступеней РПН печного трансформатора. Представлены результаты экспериментальных исследований эффективности усовершенствованного алгоритма автоматического управления электрическими режимами У КП с динамической адаптацией уставок импеданса вторичного электрического контура и ступеней РПН печного трансформатора. Проведен анализ технического эффекта, который показал снижение удельного расхода электроэнергии $W_{уд}$ на 2,46% для У КП№1 180т ПАО «ММК» и на 2,2% для У КП№2 120т ПАО «Северсталь», что подтверждает эффективность разработанных подходов.

В заключении приводятся основные выводы по совокупности результатов, достигнутых в ходе выполнения диссертационной работы.

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 РПН печного трансформатора на основании 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 сталевом ковше.

3. Разработаны усовершенствованные алгоритмы автоматического управления электрическими режимами У КП, отличающиеся от известных тем, что имеют динамическую адаптацию уставок импеданса вторичного электрического контура У КП и ступеней РПН печного трансформатора, что обеспечивает повышение КПД электрических дуг и снижение удельного расхода электроэнергии электро-технического 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 до-

казанный 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 РПН 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 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 управления. 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 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 УКП за счет применения специальных электрических режимов с динамической коррекцией уставок импеданса вторичного электрического контура и ступеней РПН печного трансформатора на основании анализа уровня высших гармоник токов дуг.

2. Методика задания оптимальных электрических режимов УКП, учитывающая расположение оборудования аргонной продувки и позволяющая находить значения уставок импедансов вторичного электрического контура, задающих наилучшую несимметрию длин дуг, которая обеспечивает увеличение КПД дуг в фазах, расположенных в непосредственной близости к зеркалам жидкого металла на поверхности ванны в стальковше.

3. Усовершенствованные алгоритмы автоматического управления электрическими режимами УКП, с динамической адаптацией уставок импеданса вторичного электрического контура УКП и ступеней РПН печного трансформатора, обеспечивающие повышение КПД электрических дуг и снижение удельного расхода электроэнергии электротехнического комплекса «Питающая сеть - УКП».

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

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается правомерностью исходных положений и предположений; корректным использованием методов математического моделирования на ЭВМ, соответствием полученных в работе результатов представленным в научных трудах по схожей тематике других авторов, также результатами экспериментальных исследований разработанных алгоритмов управления электрическими режимами УКП с динамической адаптацией длин электрических дуг и

вторичного напряжения печного трансформатора в промышленных условиях на агрегатах отечественных предприятий ПАО «ММК» и ПАО «Северсталь», доказывающими наличие технического эффекта по уменьшению удельного расхода электроэнергии.

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 электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования; п.3. Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления).

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 (Ural-Con) (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 государственных заданий 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 №FZRU-2023-0008).

В 2021-2023 гг. экспериментальные исследования, разработка и внедрение выполнялись в рамках двух коммерческих 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 регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора. Все результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. Автором получены результаты экспериментальных исследований изменений гармонического состава токов дуг однопозиционных УКП, 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 УКП, 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 стальковше. Также были разработаны усовершенствованные алгоритмы автоматического управления электрическими режимами УКП, обеспечивающие динамическую адаптацию длин электрических дуг и вторичного напряжения печного трансформатора. Автором проведен анализ технического эффекта по уменьшению удельного расхода электроэнергии от применения усовершенствованного алгоритма автоматического управления электрическими режимами УКП.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ АЛГОРИТМОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ УСТАНОВОК КОВШ-ПЕЧЬ

В настоящее время электрометаллургия является перспективным технологическим направлением. Из-за высоких технико-экономических показателей, по сравнению с другими способами выплавки стали, на предприятиях черной металлургии все большее распространение получают электросталеплавильные комплексы с дуговыми сталеплавильными печами (ДСП) и установками ковш-печь (УКП). В электрометаллургии ДСП используются как основной агрегат для расплавления твердой металлошихты и получения жидкого полупродукта, который затем доводят в УКП до требуемых параметров (окончательное раскисление металла, удаление серы, легирование и поддержание требуемой температуры). Современные УКП характеризуются следующими показателями: удельная мощность печного трансформатора в диапазоне 0,14 – 0,3 МВА/т, продолжительность цикла плавки – около 60 минут, масса выплавляемой стали – от 100 до 250 т.

Однако несмотря на преимущества электросталеплавильных комплексов с ДСП и УКП они обладают высоким энергопотреблением, вносящим значительный вклад в себестоимость конечной продукции. Поэтому проводятся различные исследования, посвященные уменьшению себестоимости электростали. Большинство проводимых исследований направлены на разработку новых технологий ведения плавки (шахтные печи, печи с технологией непрерывной подачи лома в жидкую ванну (технология Consteel), использование альтернативных источников энергии, вспененного шлака, жидкого чугуна, применение новых способов управления электрическими режимами ДСП и т.д. Все эти исследования направлены на уменьшение энергопотребления ДСП, при этом способы оптимизации энергопотребления УКП в литературе описаны недостаточно подробно, хотя, на долю УКП может приходиться до 15% потребления электроэнергии всего электросталеплавильного комплекса. Также стоит отметить, что благодаря высокой производительности, гибкости производственного цикла и

точности получаемого химического состава выпускаемой стали, У КП находит применение не только в электросталеплавильных цехах, но и в цехах с другими способами производства стали, например, в кислородно-конвертерных цехах. В результате, доля У КП в общем объеме потребления электроэнергии на металлургическом предприятии может достигать 10%. В связи с этим оптимизация энергопотребления У КП заслуживает отдельного исследования.

1.1. Анализ состава электрооборудования и технологических режимов установок ковш-печь различного класса и мощности

Электроснабжение электросталеплавильных комплексов с установками ковш-печь обычно осуществляется от сетей с напряжением 10 – 110 кВ.

Опыт эксплуатации электросталеплавильных комплексов с дуговыми сталеплавильными печами (ДСП) показывает, что приемлемое качество напряжения в узле нагрузки сохраняется при условии, что мощность короткого замыкания питающей сети ($S_{кз}$) в 80–100 раз превышает мощность печного трансформатора ($S_{пт}$) [36]. В электросталеплавильных комплексах с ДСП широко используется схема косвенной компенсации реактивной мощности [9,10,11,12]. Она включает в себя фильтрокомпенсирующие цепи (ФКЦ), настроенные на подавление высших гармоник, и регулируемую индуктивность — тиристорно-реакторную группу (ТРГ). Параллельная работа ДСП и У КП от одной питающей сети относительно небольшой мощности (условие $S_{кз}/S_{пт} = 80–100$ не выполняется) при отсутствующих, либо неработающих компенсаторах реактивной мощности негативно влияет на временные и энергетические показатели агрегата внепечной обработки ввиду повышенных значений отклонения напряжения сети.

В случаях, когда электроснабжение установки ковш-печь осуществляется независимо от ДСП, устройства компенсации реактивной мощности, как правило, не используются. Это связано с относительно небольшой мощностью печного трансформатора У КП и характером нагрузки, который не имеет явно выраженного резко переменного характера и несимметричных режимов, аналогичных ДСП.

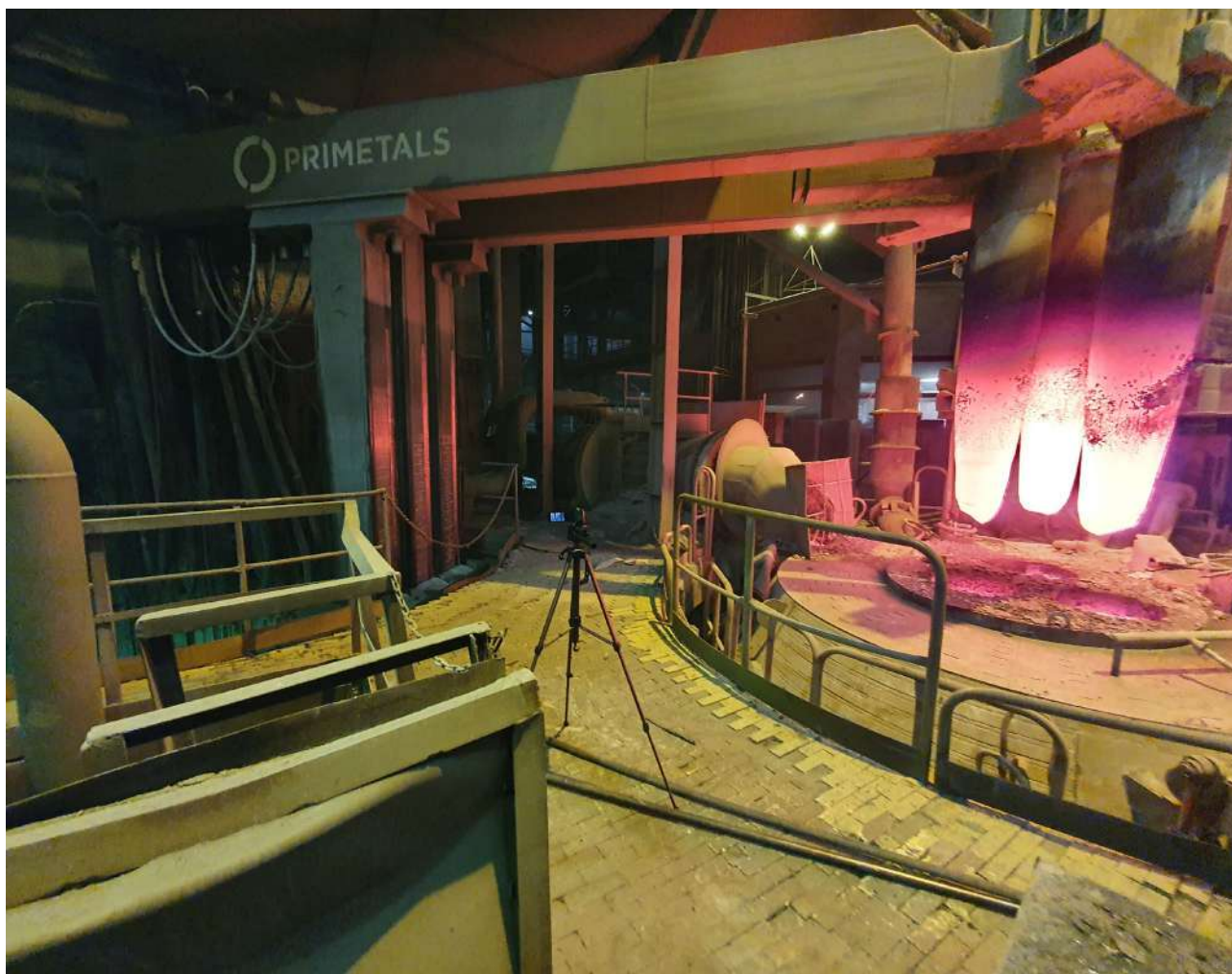


Рис. 1.1 – Общий вид УКП

Установки ковш-печь оснащаются печными трансформатором (ПТ) с номинальной мощностью 25 - 56 МВА, при этом номинальное первичное напряжение печного трансформатора зависит от напряжения питающей сети и как правило находится в диапазоне 10 – 110 кВ. Печные трансформаторы в обязательном порядке имеют регулировку вторичного напряжения, которая может осуществляться как под нагрузкой, если ПТ оснащен устройством РПН, так и с обязательным отключением нагрузки, в случае применения ПБВ. Количество ступеней напряжения зависит от модели применяемого печного трансформатора и находится в пределах 9 – 26, при этом отношение минимального значения вторичного напряжения к максимальному составляет 0,3 – 0,7.

Соединение вторичной обмотки печного трансформатора с рукавами электродов осуществляется посредством гибкой подвески, выполненной из водоохлаждаемых кабелей. Необходимость водяного охлаждения обусловлена

значительными величинами токов, проходящих по кабельной линии, которые составляют примерно 20–56 кА. Кабельная линия вместе с рукавами электродов формирует так называемую короткую сеть. Транспозиция проводников в короткой сети может быть реализована двумя способами: компланарным или триангулированным расположением проводников.



Рис.1.2 – Общий вид короткой сети У КП.

Важной технологической особенностью установок ковш-печь является необходимость перемешивания жидкой стали в стальковшах для выравнивания температуры, растворения и равномерного распределения химических веществ. Перемешивание осуществляется инертным газом, который подается через продувочные блоки, расположенные в днище стальковша или через аварийную фурму, в случае неработоспособности донной продувки. Однопозиционные

УКП можно классифицировать по конструктивному признаку следующим образом:

- 1) с одной продувочной пробкой;
- 2) с двумя продувочными пробками, расположенными с одной стороны;
- 3) с двумя продувочными пробками, расположенными по диагонали.

Диапазон изменения мгновенного расхода аргона, составляет 250 – 2000 л/мин в зависимости от стадии и технологии обработки жидкой стали, а задание расхода аргона может формироваться независимо на каждую пробку. Для наглядности, на рис.1.3 представлены схемы каждой из обозначенных разновидностей однопозиционных УКП, с расположением основного технологического оборудования.

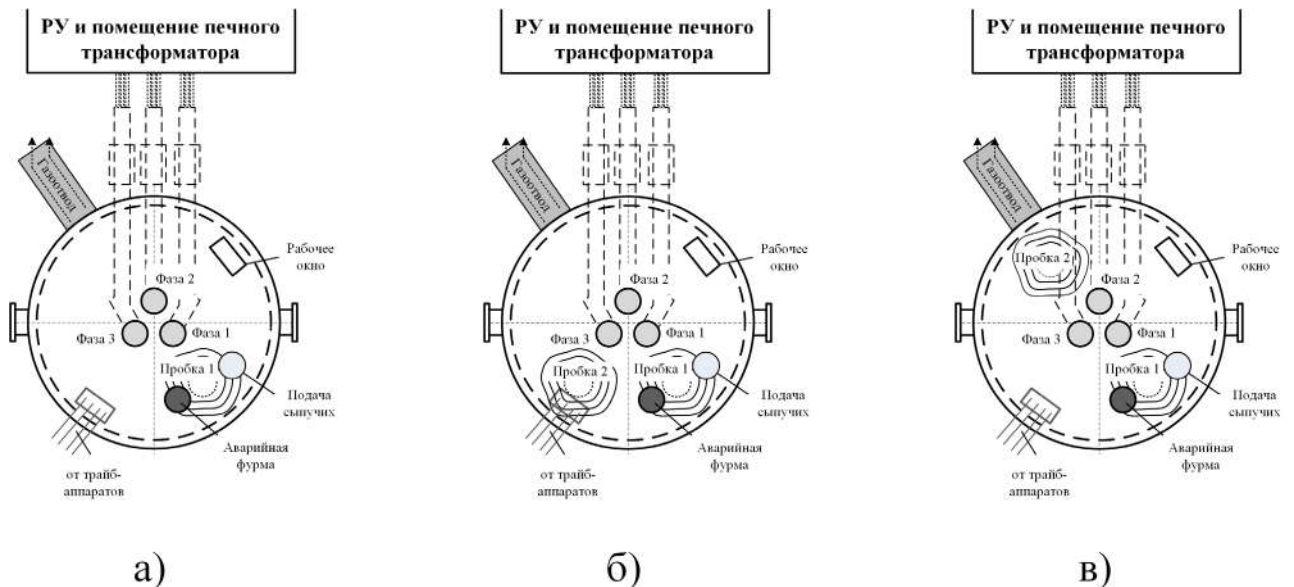


Рис.1.3 - Схемы основных наиболее распространённых конструктивных исполнений УКП: а – с одной продувочной пробкой; б – с двумя продувочными пробками на одной стороне сталковша; в – с двумя продувочными пробками, расположенными по диагонали

Работа продувочных блоков вызывает возмущения на поверхности жидкого металла (рис.1.4), что негативно влияет на эффективность электросталеплавильного агрегата. При расходе аргона выше определенного порогового значения происходит разрыв шлаковой плёнки (рис.1.4. б) (появляется так называемое зеркало жидкого металла), что приводит к оголению и, как след-

ствие, к снижению теплового КПД электрической дуги. Дальнейшее увеличение расхода аргона может вызвать образование сильных волн и всплесков на поверхности жидкого металла, что создаёт риск возникновения эксплуатационных коротких замыканий. Стоит также отметить, что помимо работы продувочных блоков к оголению электрических дуг может приводить недостаточная высота шлакового слоя. Это также приводит к уменьшению теплового КПД электрических дуг и негативно влияет на эффективность электросталеплавильного агрегата.



Рис. 1.4. - Возмущения на поверхности жидкого металла, создаваемые работой продувочных блоков: где Эл.1 и Эл.2 – графитированные электроды У КП

1.2. Существующие подходы к управлению электрическими режимами установок ковш-печь

В настоящее время ведущие фирмы производители электросталеплавильных агрегатов (компании Primetals Technologies (ранее Siemens VAI), Danieli, SMS Group, Tenova и др.) оснащают электросталеплавильные агрегаты системами управления собственного производства (регуляторы Melt Expert, ArCOS, Simelt, Q-REG, HI-REG, Ferrotron - DECTEQ), либо используют регуляторы других компаний, например, AMI (DigitARC), Amec Spie (A.R.C.E.L.E.C и E.M.P.E.R.E) и др. Все существующие системы управления ДСП и У КП являются двухуровневыми. На втором уровне формируется задание ступени напряжения печного трансформатора $N_{ТР}$, реактора N_R и рабочей кривой $N_{РК}$. Для всех систем управления второй уровень представляет собой матрицу уставок,

где каждому сочетанию ступени напряжения печного трансформатора, реактора и номера рабочей кривой соответствует заранее рассчитанное значение уставки регулируемого параметра, в качестве которого может выступать полное сопротивление фазы $Z_{\text{ф}}$, сопротивление электрической дуги $R_{\text{д}}$, полная проводимость фазы $Y_{\text{ф}}$, а также значение напряжения электрической дуги $U_{\text{д}}$. В случае с ДСП, изменение $N_{\text{ТР}}$ и $N_{\text{РК}}$ выполняется автоматически с использованием профиля плавки, где электрические режимы изменяются в зависимости от стадии плавления металлошихты, косвенно определяемой на основании текущего расхода электроэнергии (абсолютного или удельного) или времени работы под током. В случае с УКП профили плавок, как правило, не используются. Управление электрическими и технологическими режимами осуществляется вручную. Для обеспечения необходимой скорости нагрева или поддержания температуры жидкой стали, сталевар УКП, в соответствии с действующими в цехе технологическими инструкциями осуществляет выбор необходимого сочетания ступени напряжения трансформатора и рабочей кривой.

Для наглядности сказанного, в таблице 1.1 представлена доля работы УКП на различных сочетаниях $N_{\text{ТР}}$ и $N_{\text{РК}}$ за трехмесячный период. Как видно из представленной таблицы большую часть времени работы агрегата используется первая ступень печного трансформатора $N_{\text{ТР}} = 1$, которой соответствует максимальное значение вторичного напряжения, при этом изменение номера рабочей кривой $N_{\text{РК}}$, определяющей длину электрической дуги при выбранном вторичном напряжении трансформатора, не осуществляется, используется фиксированное значение $N_{\text{РК}} = 2$, что в данном случае соответствует средней длине дуги. При необходимости выполнения операций разжижения шлака или усреднительной продувки применяются ступени трансформатора с пониженным вторичным напряжением, в представленном примере это $N_{\text{ТР}} = 5$ и $N_{\text{ТР}} = 7$.

Также, для демонстрации существующих подходов к управлению электрическими режимами УКП, на рис. 1.5 представлены осциллограммы изменения основных электрических и технологических параметров УКП в процессе плавки. Из них видно, что основная часть плавки происходит на ступени

трансформатора $N_{\text{ТР}} = 2$, для разжижения шлака сталевар использует $N_{\text{ТР}} = 5$, при этом, как отмечалось ранее, используется фиксированное значение длины электрической дуги для каждой используемой ступени напряжения.

Таблица 1.1 – Анализ длительности работы на различных сочетаниях $N_{\text{ТР}}$ и $N_{\text{РК}}$

$N_{\text{ТР}}$	Доля работы $N_{\text{ТР}}$, %	Доля времени работы $N_{\text{РК}}$ для каждой ступени РПН ПТ, %						Доля работы на различных сочетаниях $N_{\text{ТР}}/N_{\text{РК}}$, %
		1	2	3	4	5	6	
1	90,09	-	97,00	2,99	-	-	-	1/2 – 87,39 2/2 – 3,96 1/3 – 2,69 5/2 – 1,79
2	4,03	-	98,26	1,74	-	-	-	
3	0,73	-	98,25	1,75	-	-	-	
5	1,85	-	96,86	3,14	-	-	-	
7	2,18	-	93,99	6,01	-	-	-	

Таким образом, на сегодняшний день, в системах управления У КП отсутствует динамическая адаптация электрических режимов к изменяющимся режимам аргонной продувки, а также шлаковым режимам, от которых зависит степень экранирования электрических дуг и их тепловой КПД. Это приводит к ухудшению показателей работы У КП (время работы под током и расход электроэнергии). Таким образом, одним из направлений оптимизации энергопотребления У КП является разработка и внедрение на действующем производстве интеллектуальных систем автоматического управления электрическими режимами У КП с функцией динамической адаптации длин дуг и ступеней напряжения печного трансформатора к текущему шлаковому режиму и режиму аргонной продувки. В качестве критерия, по которому осуществляется динамическая коррекция электрических режимов У КП, может выступать гармонический состав токов дуг, определяемый суммарным коэффициентом гармонических составляющих тока K_1 (в зарубежной терминологии – параметр Total Harmonic Distortion или THD_1). Значение коэффициента K_1 имеет сильную корреляцию с текущими условиями горения дуг в шлаковом слое У КП, что делает возможным применение данного параметра в алгоритме автоматического переключения рабочих кривых и ступеней напряжения печного трансформатора.

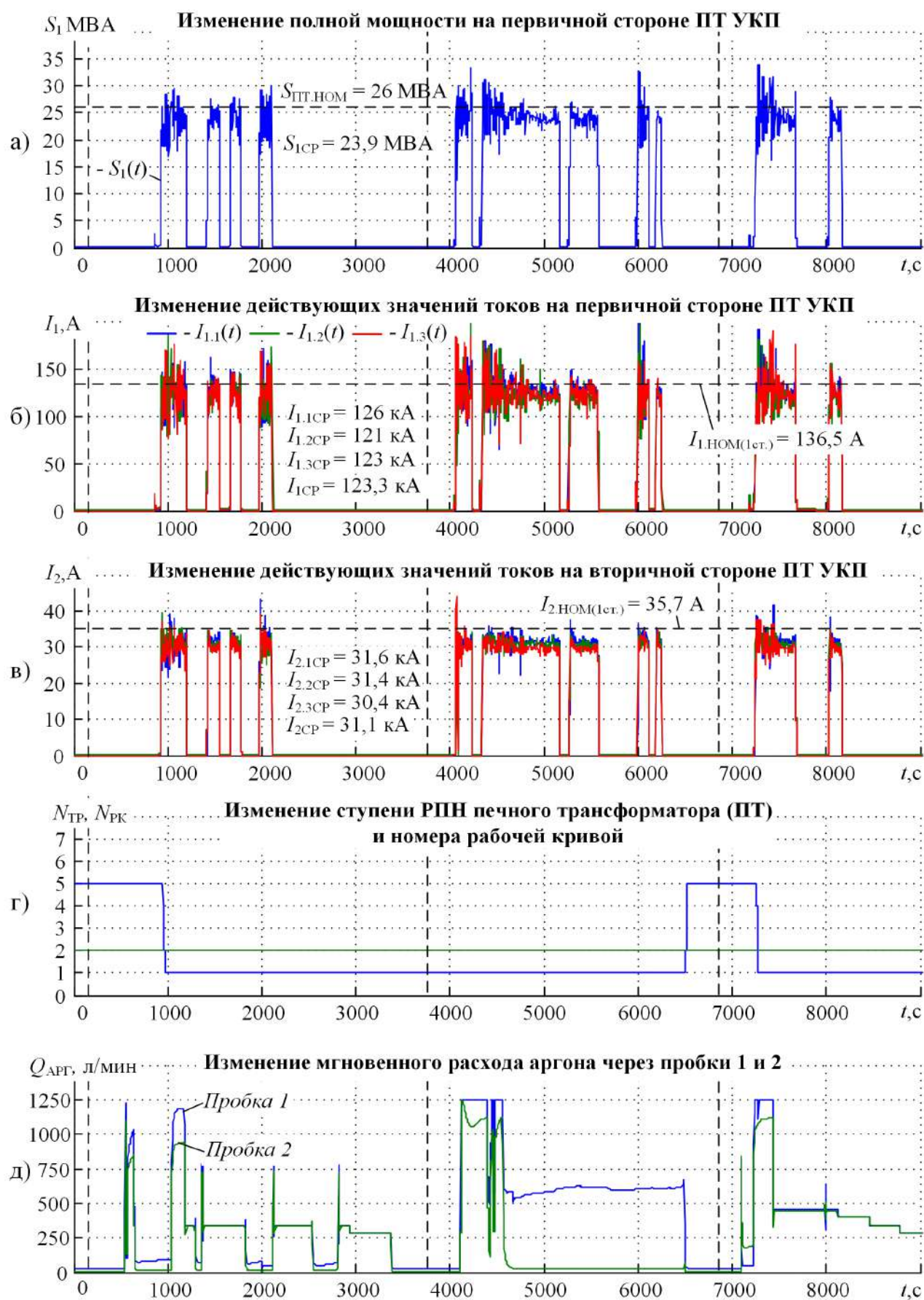


Рис.1.5 - Изменение основных электрических и технологических параметров УКП

1.3. Анализ структуры и алгоритмов систем автоматического управления электрическими режимами установок ковш-печь

Как было сказано в предыдущем параграфе, все существующие системы управления ДСП и У КП являются двухуровневыми, где на втором уровне формируется задание ступени напряжения печного трансформатора $N_{\text{ТР}}$ и номера рабочей кривой $N_{\text{РК}}$. Затем на первом уровне системы управления осуществляется выбор значения регулируемого параметра в соответствии с матрицей уставок. Задачей регулятора и системы перемещения электродов является обеспечение заданного значения регулируемого параметра с минимальной ошибкой регулирования. Функционируя в составе У КП (работа на жидкую ванну) и имея корректную настройку параметров, все регуляторы способны обеспечить приемлемое качество регулирования. Также на первом уровне системы управления электрическими режимами находятся вспомогательные функции: блоки розжига электрической дуги, устранения резонанса, компенсации отклонения напряжения, защиты от короткого замыкания, ограничения рабочих токов дуг. Функциональная схема системы управления электрическими режимами и перемещением электродов (САУЭР и ПЭ) в общем виде показана на рис. 1.6.

Рассмотрим наиболее распространенные системы управления электрическими режимами У КП, применяемые на российских предприятиях черной металлургии, ими являются ARCOS, Melt Expert (Primetals Technologies, Германия) Q-REG, HI-REG (Danieli, Италия), также встречается устаревшая A.R.C.E.L.E.C (Amec Spie, Франция). Внешний вид шкафов с оборудованием упомянутых систем, представлен на рис.1.7. Также стоит отметить, что особенности и структура регуляторов упомянутых систем управления подробно рассмотрены в исследованиях А.А. Николаева [38], а также в диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук П.Г. Тулупова [39] и в рамках данного диссертационного исследования подробно рассматриваться не будут. Тем не менее, на сегодняшний день в литературе отсутствует описание способов задания регулируемого параметра, а также не приводится анализ возможности и способов формирования несимметричных электрических режимов в современных системах управления.

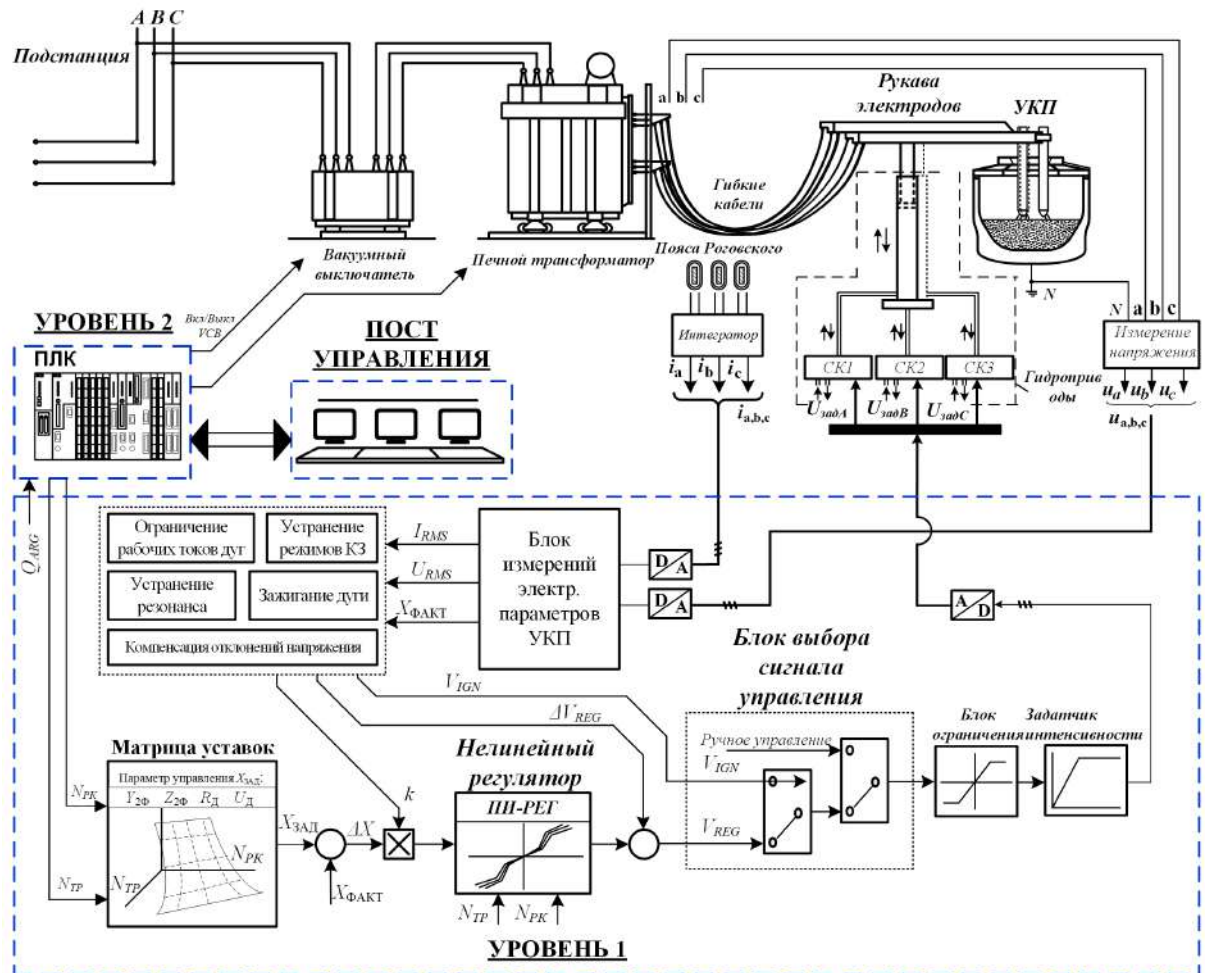


Рис. 1.6 – Функциональная схема системы управления электрическими режимами и перемещением электродов

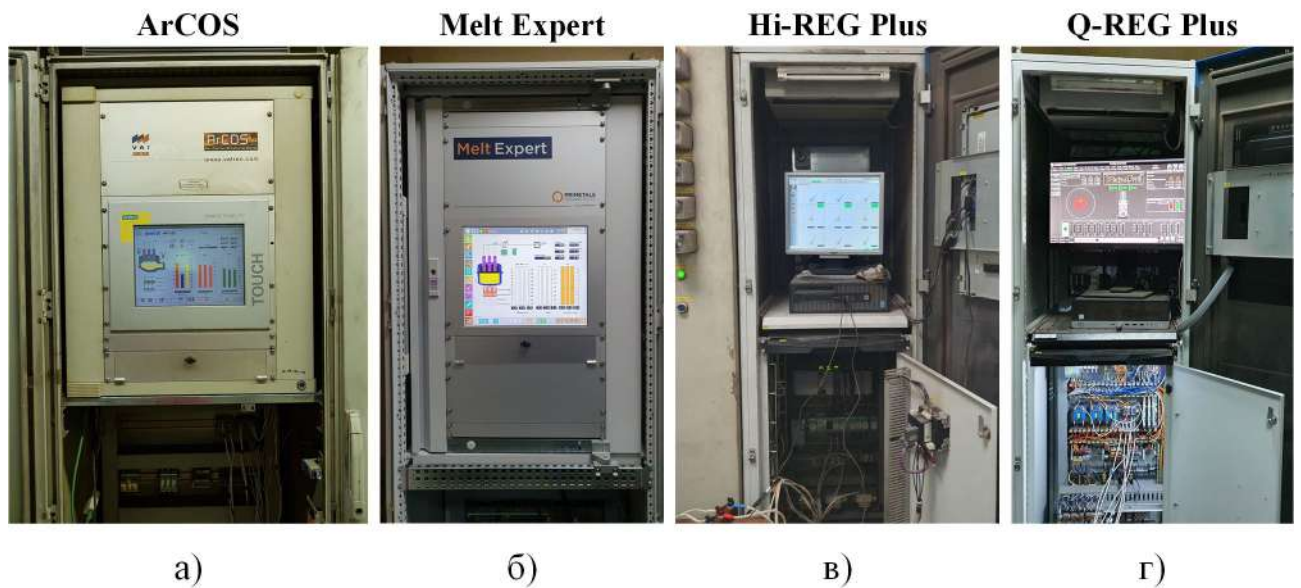


Рис. 1.7 - Внешний вид шкафов с оборудованием наиболее распространенных в России систем автоматического управления электрическими режимами и перемещением электродов ДСП и УКП.

Одной из распространённых систем управления электрическими режимами ДСП и УКП в России является ArCOS. В ней предусмотрена возможность регулирования по трём основным параметрам: напряжение электрической дуги U_d , сопротивление электрической дуги R_d и полный импеданс фазы $Z_{2ф}$. При этом значения параметра регулирования задаются независимо для каждой фазы. Таким образом в этой системе управления блок хранения уставок представляет собой трехмерную матрицу, где каждому сочетанию $N_{ТР}$ и $N_{РК}$ соответствует три значения параметра регулирования. Данная особенность наделяет систему управления необходимым функционалом для формирования несимметричных режимов, но при этом отсутствует возможность задания больше шести рабочих кривых, что ограничивает возможности формирования индивидуальных электрических режимов. Меню задания уставок регулируемого параметра системы управления ArCOS Light NT представлено на рис.1.8.

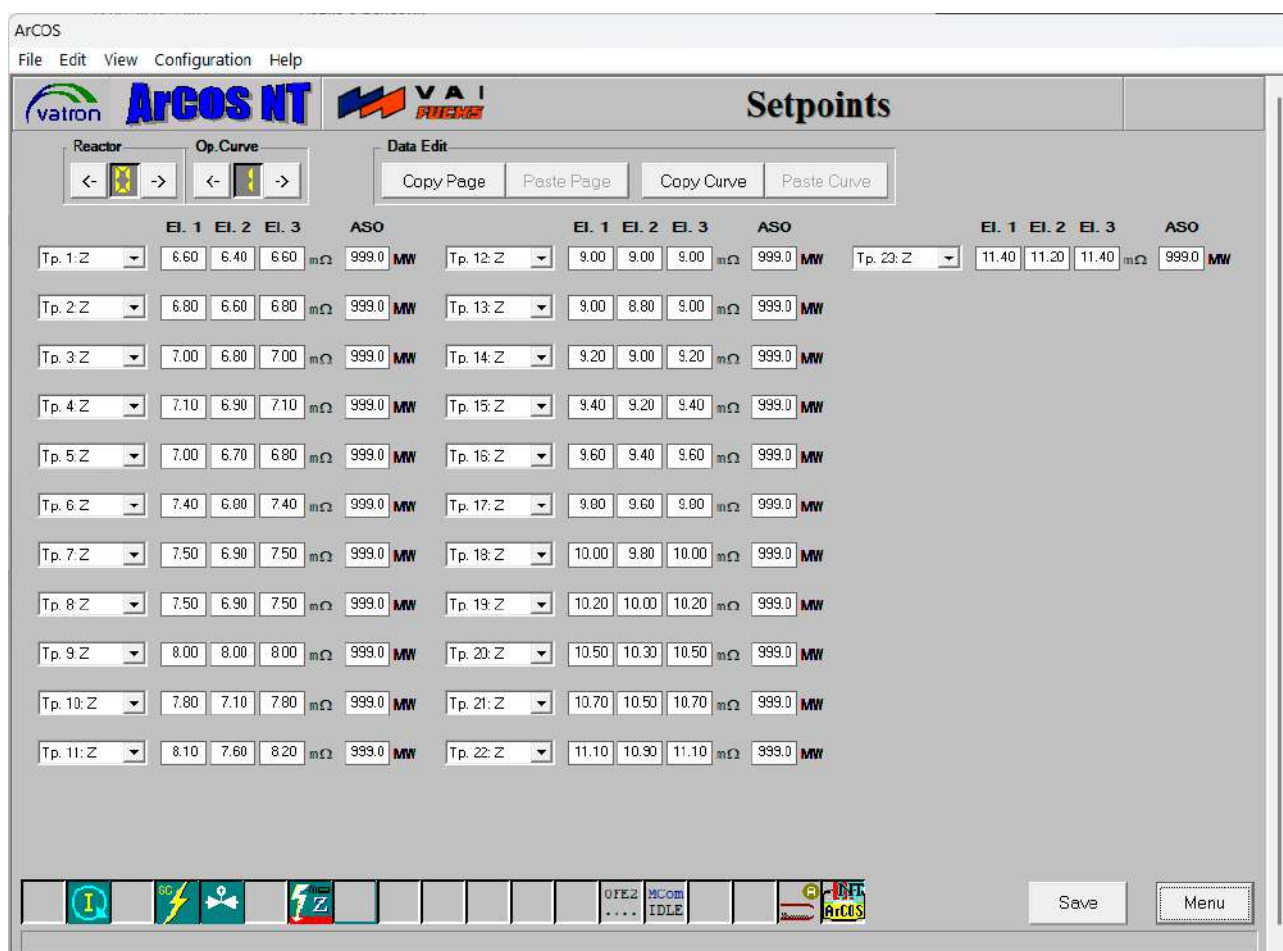


Рис. 1.8 – Меню задания уставок регулируемого параметра
в системе управления ArCOS Light NT

Важно отметить наличие в данной системе управления функций динамической коррекции уставки регулируемого параметра: 1) Adaptive Setpoint Optimization (ASO); 2) Dynamic Setpoint Control. Функция адаптивной оптимизации обеспечивает постоянство активной мощности на вторичной стороне печного трансформатора при изменении эксплуатационного реактивного сопротивления электрического контура в процессе плавки. Меню заданных значений (рис.1.8) содержит одно дополнительное значение мощности ASO, которое используется для контроллера ASO. Общая потребляемая мощность усредняется в циклах, обычно продолжительностью 10 секунд, и всякий раз, когда потребляемая мощность превышает заданное значение, корректирующий коэффициент, применяемый к уставкам регулируемого параметра, изменяется небольшими шагами, таким образом, чтобы уменьшить ток электрических дуг [40-41]. Также функция адаптивной оптимизации позволяет задать несимметричный режим горения электрических дуг путем изменения корректирующего коэффициента для каждой фазы, изменение осуществляется в процентном отношении к величине шага корректирующего коэффициента.

Блок динамической адаптации позволяет корректировать уставку импеданса в соответствии с текущим суммарным коэффициентом гармонических искажений тока THD_I . Коррекция производится по 5 характерным точкам. Выбор корректирующего коэффициента осуществляется каждые 10 секунд по следующему алгоритму:

$$\begin{cases} THD_I < C_ZDYN_THD[1] \rightarrow C_ZDYN_MUL[1] \\ C_ZDYN_THD[i] < THD_I < C_ZDYN_THD[i+1] \rightarrow C_ZDYN_MUL[i+1] \\ THD_I > C_ZDYN_THD[5] \rightarrow C_ZDYN_MUL[6] \end{cases} \quad (1.1)$$

где THD_I – значение суммарного коэффициента гармонических искажений тока; C_ZDYN_THD – граничные значения суммарного коэффициента гармонических искажений тока; C_ZDYN_MUL – корректирующий коэффициент.

Представленный алгоритм работает следующим образом: если THD_I ниже граничного значения $C_ZDYN_THD [1]$ то к уставке регулируемого параметра применяется корректирующий коэффициент $C_ZDYN_MUL [1]$. В случае, если

THD_1 находится в коридоре значений, то применяется соответствующий данному коридору корректирующий коэффициент. При значениях THD_1 выше максимального заданного граничного значения применяется корректирующий коэффициент C_ZDYN_MUL [5].

Функциональная схема формирования уставок в системе управления ArCOS представлена на рис.1.9.

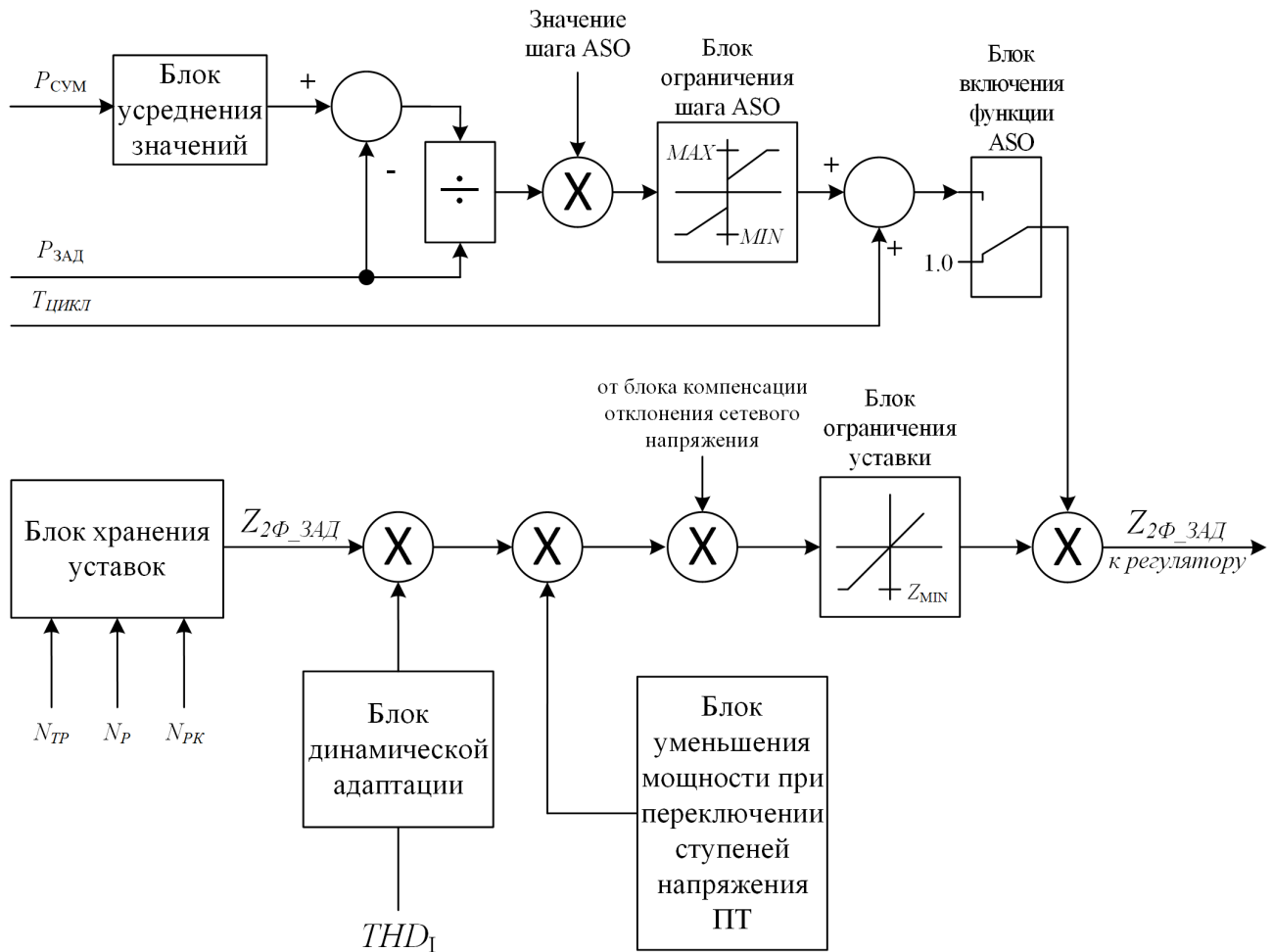


Рис.1.9 – Функциональная схема формирования уставок
в системе управления ArCOS

Система управления ArCOS обладает широкими возможностями задания уставок регулируемого параметра и их адаптации, в том числе с использованием информации о гармоническом составе токов THD_1 электрических дуг. Тем не менее, имеющиеся в системе управления средства динамической адаптации с использованием информации о THD_1 допускают только симметричное изменение длин электрических дуг. Более того, коэффициенты адаптации и граничные

значения задаются однократно и действуют для всех сочетаний $N_{\text{ТР}}$ и $N_{\text{РК}}$. Также в системе управления отсутствуют функциональные возможности для автоматического переключения ступеней напряжения печного трансформатора $N_{\text{ТР}}$ и рабочих кривых $N_{\text{РК}}$.

Подводя итог вышесказанному, можно заключить, что несмотря на достаточную гибкость задания уставок регулируемого параметра система управления ArCOS сильно ограничена в функциях автоматической адаптации длин электрических дуг к режимам аргонной продувки и шлаковым режимам УКП.

Следующим шагом развития системы управления ArCOS стала система управления Melt Expert. Среди нововведений отметим возможность выбирать в качестве регулируемого параметра, помимо тех, что были доступны в ArCOS, полную проводимость фазы $Y_{2\phi}$ и ток электрической дуги $I_{\text{д}}$. Также была добавлена возможность формирования несимметричных электрических режимов через задание балансовых коэффициентов фаз для каждого сочетания $N_{\text{ТР}}$ и $N_{\text{РК}}$. При использовании такого способа задания несимметричных электрических режимов, для каждого сочетания $N_{\text{ТР}}$ и $N_{\text{РК}}$ задается среднее значение уставки регулируемого параметра (для этого используется параметр REGm, доступный при активации параметра COMM.SYM. рис.1.9), затем к каждой фазе применяется данная уставка с учетом балансового коэффициента. Ниже, для наглядности, приведен пример формирования уставок параметра регулирования с использованием балансовых коэффициентов фаз:

$$\begin{cases} X_{\text{Зад.А}} = K_{\text{В_А}} \times X_{\text{Зад.СР}} \\ X_{\text{Зад.В}} = K_{\text{В_В}} \times X_{\text{Зад.СР}} \\ X_{\text{Зад.С}} = K_{\text{В_С}} \times X_{\text{Зад.СР}} \end{cases} \quad (1.2)$$

где $X_{\text{Зад.А}}$, $X_{\text{Зад.В}}$, $X_{\text{Зад.С}}$ – заданные значения регулируемого параметра для фаз А, В и С соответственно; $K_{\text{В_А}}$, $K_{\text{В_В}}$, $K_{\text{В_С}}$, – значения балансового коэффициента для фаз А, В и С соответственно; $X_{\text{Зад.СР}}$ – среднее значение регулируемого параметра для определенного сочетания $N_{\text{ТР}}$ и $N_{\text{РК}}$.

Важно отметить, что, получив данное нововведение система управления сохранила возможность задания регулируемого параметра аналогично ArCOS,

т.е. непосредственное задание уставки для каждой фазы. Также, относительно ArCOS добавилась возможность задать больше 6 рабочих кривых. В новой системе управления может быть задано до 16 рабочих кривых. Таким образом новая система управления приобрела еще большую гибкость в части задания электрических режимов в том числе несимметричных. Меню задания уставки регулируемого параметра представлено на рис.1.10, меню задания балансовых коэффициентов показано на рис.1.11.

Аналогично системе управления ArCOS, система управления Melt Expert оснащена функциями динамической коррекции уставки регулируемого параметра. Функциональные схемы, алгоритмы работы, а также набор параметров данных функций полностью идентичны таковым в системе управления ArCOS.

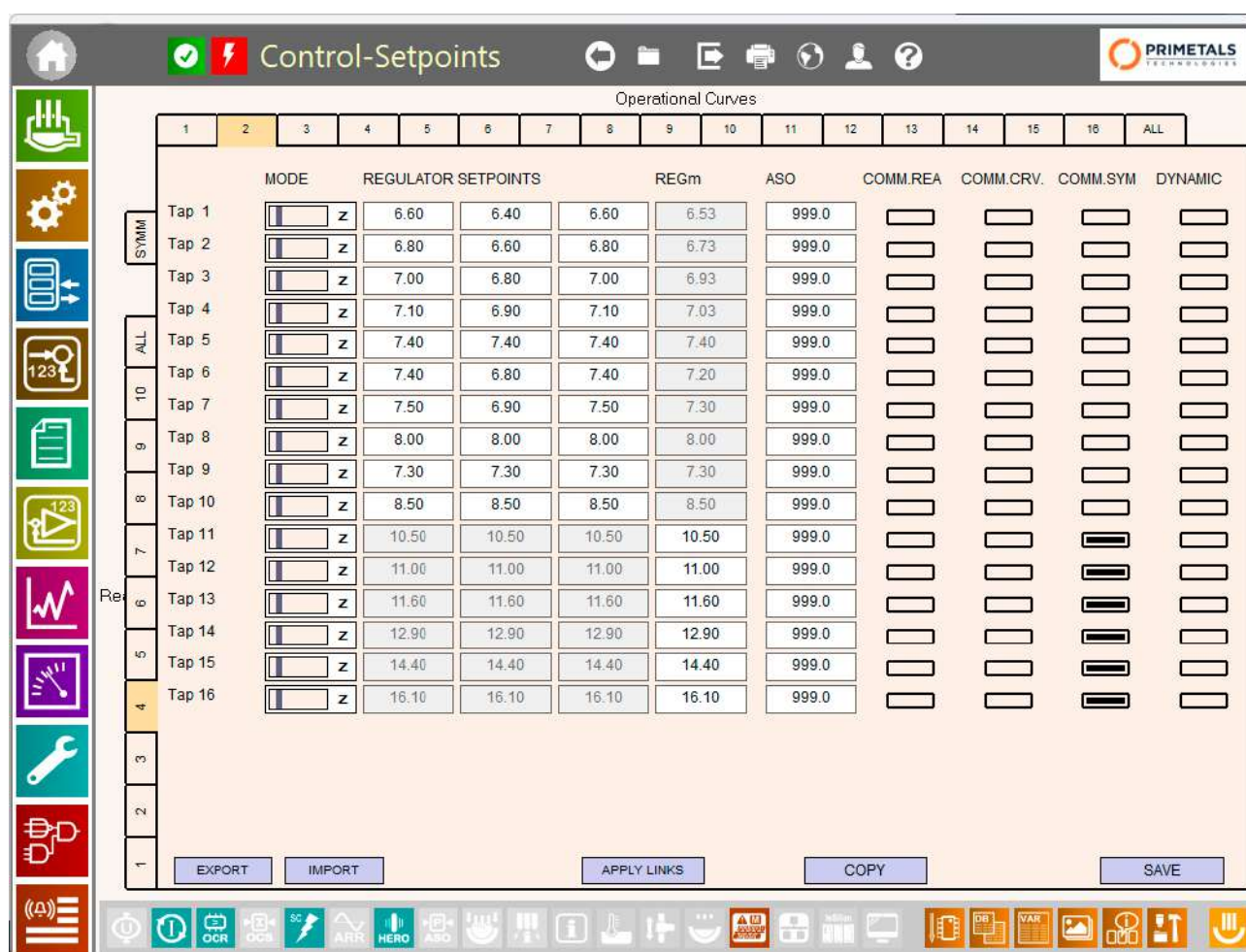


Рис. 1.10 – Меню задания уставок регулируемого параметра
в системе управления Melt Expert

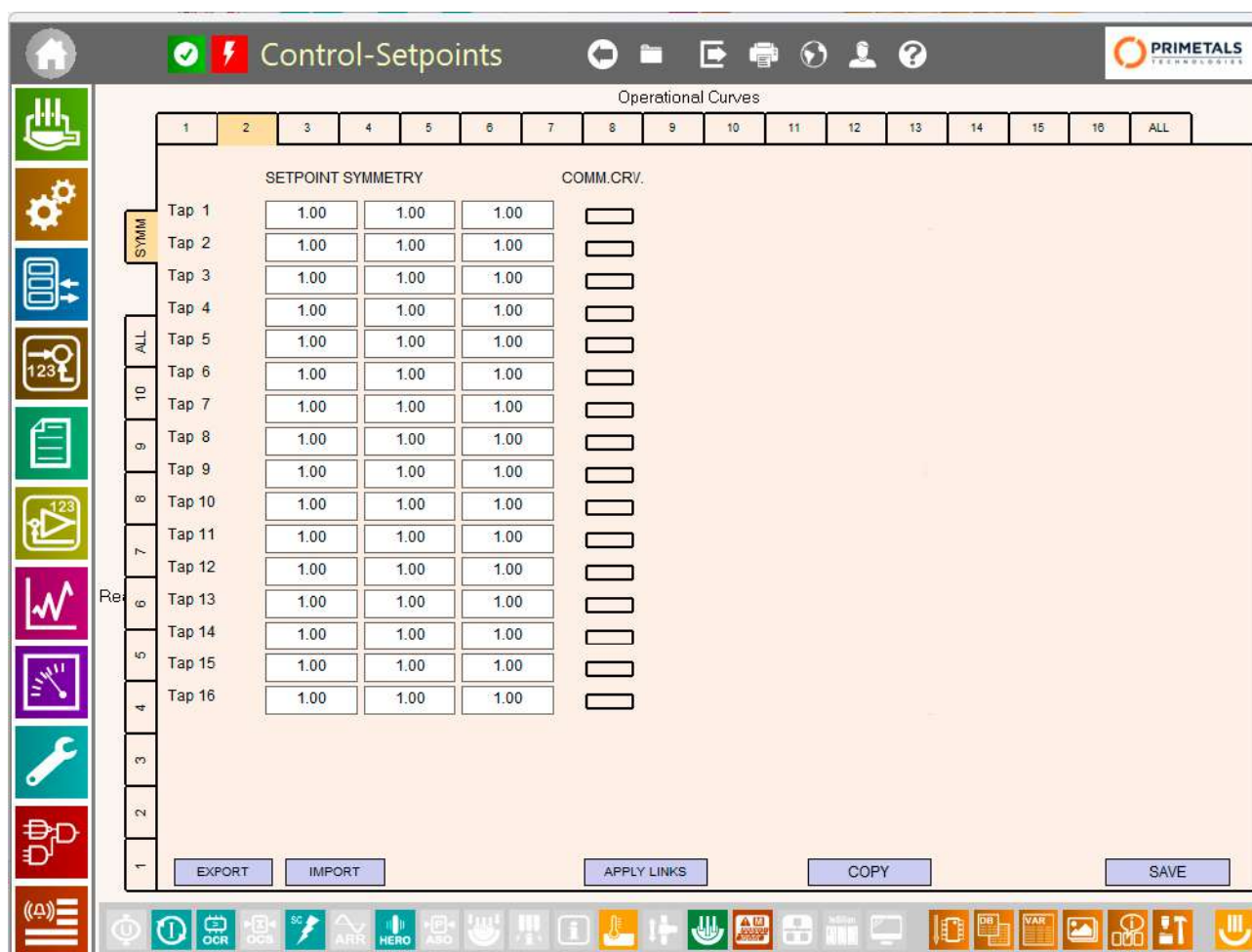


Рис. 1.11 – Меню задания балансовых коэффициентов
в системе управления Melt Expert

Системы управления HI-REG и Q-REG наряду с системами ArCOS и Melt Expert также являются одними из наиболее распространённых систем управления. В этой системе управления в качестве регулируемого параметра может быть выбрано: полная проводимость фазы $Y_{2\Phi}$, напряжение U_d или ток I_d электрической дуги. В этих системах управления для каждой ступени напряжения печного трансформатора задается значение регулируемого параметра, при этом номер рабочей кривой представляет собой коэффициент, выраженный в процентах, который корректирует заданное значение. Важно отметить, что коэффициенты рабочих кривых задаются однократно и одинаково действуют на все сочетания ступеней трансформатора и реактора. Для наглядности на рис.1.12 (а) представлено меню задания уставок адмиттанса и коэффициентов рабочих кривых (б).

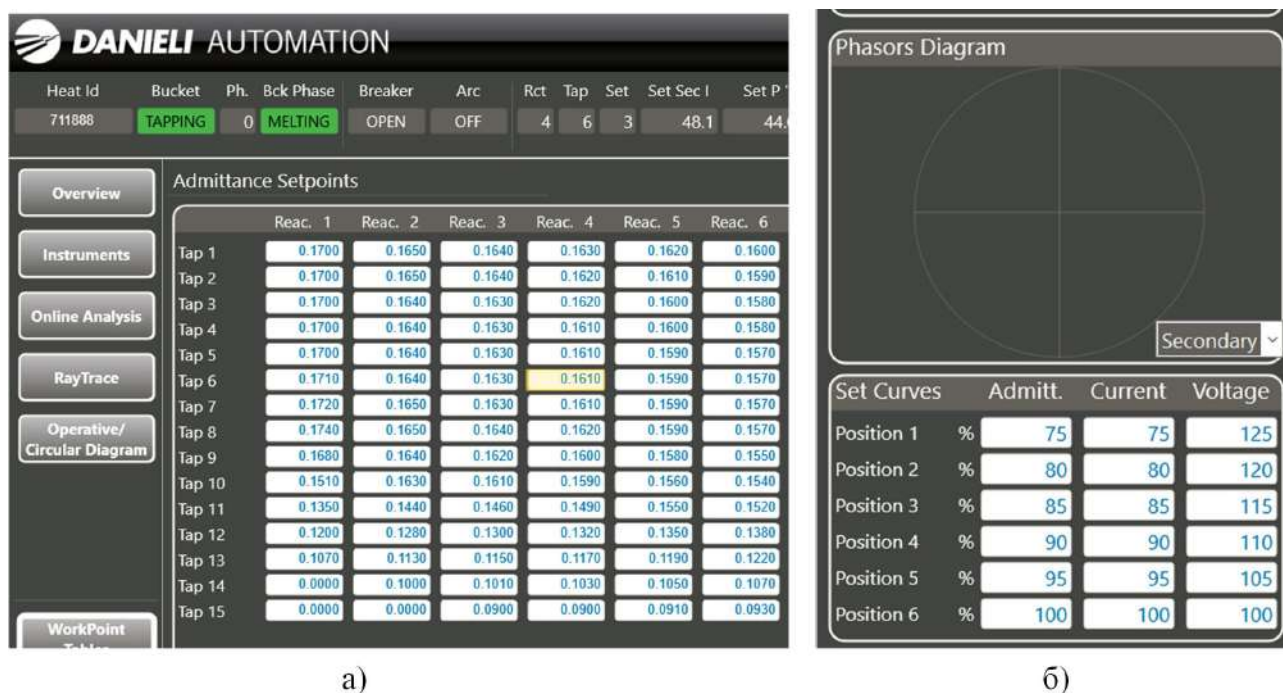


Рис. 1.12 – Меню задания уставок адмиттанса и рабочих кривых в системе управления Q-REG

Также в данных системах управления имеется возможность изменения коэффициентов балансировки фаз (параметры Phase Balance), которые используются в системе управления Q-REG и HI-REG для задания оптимального несимметричного режима горения дуг. Балансовые коэффициенты задаются однократно и одинаково действуют на все сочетания ступеней трансформатора и рабочих кривых. Таким образом, данные системы управления накладывают серьезные ограничения на формирование индивидуальных электрических режимов, также в системе управления отсутствует возможность формирования несимметричных режимов горения дуг для различных рабочих кривых.

1.4. Выводы по главе 1

1. Выполнен анализ проводимых исследований, направленных на улучшение энергоэффективности электросталеплавильных комплексов с УКП. Большинство проводимых исследований направлены на уменьшение энергопотребления ДСП, при этом способы оптимизации энергопотребления УКП в литературе описаны недостаточно подробно, хотя, на долю УКП может приходиться до 15% потребления электроэнергии электросталеплавильного комплекса и до 10% всего металлургического предприятия. В связи с этим оптимизация энергопотребления УКП заслуживает отдельного исследования.

2. Проведен анализ состава электрооборудования и технологических режимов установок ковш-печь различного класса и мощности. Важной технологической особенностью установок ковш-печь является необходимость перемешивания жидкой стали в стальковшах инертным газом, например аргоном. Работа продувочных блоков создает возмущения на поверхности жидкого металла, которые негативно сказываются на энергоэффективности работы электросталеплавильного агрегата. Таким образом, для повышения энергоэффективности У КП необходима адаптация к текущим условиям аргонной продувки, более того необходимо учитывать расположение продувочных блоков.

3. Проведен анализ структуры и алгоритмов систем автоматического управления электрическими режимами У КП, получивших наибольшее распространение в России и в мире. Показаны функциональные возможности систем управления в части задания электрических режимов У КП. Также рассмотрены возможности задания несимметричных электрических режимов. Не все современные системы управления обладают необходимой гибкостью настроек для задания индивидуальных электрических режимов. Также имеющаяся в некоторых современных системах управления У КП динамическая адаптация длин электрических дуг является ограниченной и не может обеспечить качественной подстройки электрических режимов к текущим условиям аргонной продувки и шлаковым режимам.

4. Одним из способов повышения энергоэффективности установок-ковш-печь является применение усовершенствованных алгоритмов автоматического управления электрическими режимами с динамической адаптацией длин электрических дуг и вторичного напряжения печного трансформатора. В качестве критерия, по которому будет осуществляться автоматическое управление электрическими режимами возможно использовать суммарный коэффициент гармонических составляющих тока K_I (в зарубежной терминологии – параметр Total Harmonic Distortion или THD_I), если по результатам исследований данный параметр покажет высокую взаимосвязь со стабильностью процессов, происходящих в ванне печи.

5. Повышение энергоэффективности установок ковш-печь с использованием усовершенствованных алгоритмов автоматического управления электрическими режимами является актуальной задачей. Для ее решения были сформулированы задачи диссертационного исследования:

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;

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 стальковше;

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 РПН печного трансформатора к текущим условиям аргонной продувки и шлаковым режимам;

6) разработка методики определения граничных значений для разработанного алгоритма автоматического управления электрическими режимами У КП позволяющая осуществлять своевременные изменения длин электрических дуг и вторичного напряжения печного трансформатора;

7) оценка эффективности усовершенствованного алгоритма автоматического управления электрическими режимами У КП с динамической адаптацией длин электрических дуг и вторичного напряжения печного трансформатора, а также усовершенствованных электрических режимов У КП.

ГЛАВА 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАЗЛИЧНЫХ УСТАНОВОК КОВШ-ПЕЧЬ

В данной главе представлены результаты экспериментальных исследований, электрических режимов исследуемых У КП с целью получения данных, необходимых для разработки и верификации математической модели электротехнического комплекса, включающего питающую сеть и электрический контур У КП. Создание адекватной математической модели позволит провести анализ различных режимов работы, выполнить оптимизацию системы управления и повысить энергоэффективность электросталеплавильного комплекса с У КП.

Важно отметить, что исследования и последующая реализация проводились на пяти различных однопозиционных У КП, работающих на российских предприятиях черной металлургии ПАО «ММК» и ПАО «Северсталь», но для сокращения объема работы в качестве примера будут представлены данные по двум агрегатам разной конфигурации.

2.1. Экспериментальные исследования электрических режимов У КП №1 180 т и У КП №2 120 т

В данном параграфе представлен обширный экспериментальный материал, полученный на действующих однопозиционных У КП.

Приведено описание состава электрооборудования и систем электроснабжения исследуемых установок, приведены результаты опытов короткого замыкания, позволившие определить параметры электрического контура короткой сети. Также представлены результаты исследования регулировочных характеристик гидроприводов перемещения электродов, необходимые для моделирования контура регулирования. Проведен анализ существующих алгоритмов и параметров систем управления электрическими режимами, а также экспериментально исследованы скорости нагрева жидкой стали и проанализированы временные и энергетические показатели работы У КП. Полученные экспериментальные данные являются основой для построения и верификации мате-

матических моделей исследуемых УПК, которые станут инструментом для дальнейшего анализа, оптимизации и совершенствования работы агрегатов.

Для наглядности на рис 2.1. и рис.2.2 представлены фотографии исследуемых агрегатов.



Рис.2.1 – Общий вид УПК№1 емкостью 180 тонн функционирующей в ПАО «ММК»



Рис.2.2 – Общий вид УПК№2 емкостью 120 тонн функционирующей в ПАО «Северсталь»

2.1.1. Описание электрооборудования исследуемых У КП

На первом этапе проведения экспериментальных исследований был выполнен сбор исходной информации об электрическом оборудовании У КП, применяемых системах управления электрическими режимами, а также изучены режимы электроснабжения агрегатов.

Электросталеплавильный комплекс ПАО «ММК» включает в себя две ДСП емкостью 180 тонн с мощностью печных трансформаторов 150 МВА и одну однопозиционную У КП с печным трансформатором мощностью 25 МВА. Электроснабжение комплекса осуществляется от секции шин ЗРУ (рис.2.3) напряжением 35 кВ. Питание шин среднего напряжения 35 кВ осуществляется от трех трансформаторов Т1, Т2 и Т3 номинальной мощностью 250 МВА 220/35 кВ. В нормальном режиме электроснабжения работают трансформаторы Т1 и Т3, а трансформатор Т2 является резервным. Электроснабжение У КП №1 180 т. осуществляется от секций шин ЗРУ-35 кВ с питанием от сетевого трансформатора Т1. Также с этой же секции шин осуществляется электроснабжение ДСП №1. Таким образом, ДСП №1 и У КП, работают параллельно, а ДСП №2 получает отдельное питание от трансформатора Т3. Важной особенностью системы электроснабжения сталеплавильного комплекса является использование двух статических тиристорных компенсатора (СТК) номинальной мощностью 180 МВАр обеспечивающих качественную стабилизацию напряжения на секциях шин 35 кВ. При отключенных СТК значения мощности короткого замыкания $S_{кз}$ на секциях ЗРУ-35 кВ составляют 932-1015 МВА, при которых эквивалентное сопротивление питающей сети 35 кВ равно $X_s \approx Z_s = 1,26$ Ом. Параллельная работа ДСП и У КП при неработающих СТК негативно сказывается на временных и энергетических показателях работы агрегата внепечной обработки. При отключенных СТК работа ДСП вызывает значительные отклонения напряжения в питающей сети 35 кВ [36, 37], из-за чего происходит изменение электрического режима У КП, сопровождающееся снижением скорости нагрева, увеличением времени работы под током и увеличением расхода электроэнергии.

На УКП№1 180 т используется печной трансформатор с номинальной мощностью $S_{\text{ПТ.НОМ}} = 25 \text{ МВА}$ и номинальным первичным напряжением $U_{1\text{НОМ}} = 35 \text{ кВ}$. Трансформатор оборудован устройством регулирования вторичного напряжения под нагрузкой (РПН) и имеет 12 ступеней регулирования вторичного напряжения в диапазоне $U_{2\text{НОМ}} = 283,1 - 412,4 \text{ В}$, что соответствует рабочему диапазону номинальных вторичных токов $I_{2\text{НОМ}} = 36,14 - 41,29 \text{ кА}$. Параметры печного трансформатора УКП№1 180 т приведены в таблице 2.1.

Электросталеплавильный комплекс ПАО «Северсталь» включает в себя две ДСП, одна из которых шахтного типа (ШП), и две однопозиционные УКП. Электроснабжение комплекса осуществляется от главной понизительной подстанции ГПП-3. В состав ГПП-3 входит четыре сетевых трансформатора: Т1, Т2, Т5 и Т8. Трансформаторы Т1 и Т2 имеют номинальную мощность 100 МВА 220/35 кВ, а трансформаторы Т5 и Т8 — 160 МВА 220/35 кВ. Электроснабжение УКП№2 120 т. осуществляется от секций шин РУ-35 кВ (рис. 2.4). В нормальном режиме электроснабжение УКП №2 осуществляется от трансформатора Т2 главной понизительной подстанции. Важной особенностью электроснабжения комплекса является отсутствие действующих устройств компенсации реактивной мощности на ГПП-3, что приводит к значительному диапазону изменения напряжения на секциях 35 кВ во время работы ДСП. Значительные отклонения напряжения питающей сети негативно сказываются на электрических режимах УКП и приводят к ухудшению временных и энергетических показателей работы агрегата.

На УКП№2 120т. используется печной трансформатор с номинальной мощностью $S_{\text{ПТ.НОМ}} = 25 \text{ МВА}$ и номинальным первичным напряжением $U_{1\text{НОМ}} = 35 \text{ кВ}$. Применяемый трансформатор оснащен устройством регулирования вторичного без возбуждения (ПБВ) и имеет 23 ступени вторичного напряжения. Диапазон изменения вторичного линейного напряжения составляет $U_{2\text{НОМ}} = 417 - 131 \text{ В}$. Рабочий вторичный ток печного трансформатора одинаковый для всех ступеней напряжения $I_{2\text{НОМ}} = 34,6 \text{ кА}$. Параметры печного трансформатора УКП№2 120 т приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.1 - Технические данные печного трансформатора УКП№1 180 т.
ПАО «ММК» при различных ступенях вторичного напряжения

№ ступе- ни	U ₁ , кВ	U ₂ , В	I ₁ , А	I ₂ , кА	S ₁ , МВА	K _T	U _{K%}
1	35	240	283,1	41,29	17,16	145,83	18,26
2		255	300,2	41,29	18,20	137,25	17,24
3		262	309,6	41,29	18,77	133,59	16,21
4		280	330,1	41,29	20,01	125,00	15,19
5		290	341,5	41,29	20,70	120,69	14,17
6		311	366,7	41,29	22,23	112,54	13,14
7		323	380,8	41,29	23,08	108,36	12,12
8		336	396,0	41,29	24,01	104,17	11,09
9		350	412,4	41,29	25,00	100,00	10,07
10		365	412,4	39,57	25,00	95,89	9,05
11		381	412,4	37,86	25,00	91,86	8,02
12		400	412,4	36,14	25,00	87,50	7,00

Таблица 2.2 - Технические данные печного трансформатора УКП№2 120 т.
ПАО «Северсталь» при различных ступенях вторичного напряжения

№ ступе- ни	U ₁ , кВ	U ₂ , В	I ₁ , А	I ₂ , кА	S ₁ , МВА	K _T	U _{K%}
1	35	417	412	34,6	25,0	83,93	7,70
2		404	399,1	34,6	24,22	86,63	8,75
3		391	386,2	34,6	23,44	89,51	9,79
4		378	374,2	34,6	22,66	92,59	10,84
5		365	361,3	34,6	21,88	95,89	11,88
6		352	348,4	34,6	21,10	99,43	12,93
7		339	335,5	34,6	20,32	103,24	13,97
8		326	322,6	34,6	19,54	107,36	15,02
9		313	309,8	34,6	18,76	111,82	16,06
10		300	296,9	34,6	17,98	116,67	17,11
11		287	284	34,6	17,22	121,95	18,16
12		274	271,1	34,6	16,42	127,74	19,20
13		261	258,2	34,6	15,64	134,10	20,25
14		248	245,2	34,6	14,68	141,13	21,29
15		235	232,3	34,6	14,08	148,94	22,34
16		222	219,4	34,6	13,30	157,66	23,38
17		209	206,5	34,6	12,52	167,46	24,43
18		196	193,6	34,6	11,74	178,57	25,47
19		183	180,8	34,6	10,96	191,26	26,52
20		170	167,9	34,6	10,18	205,88	27,56
21		157	155	34,6	9,40	222,93	28,61
22		144	142,1	34,6	8,62	243,06	29,66
23		131	129,2	34,6	7,84	267,18	30,70

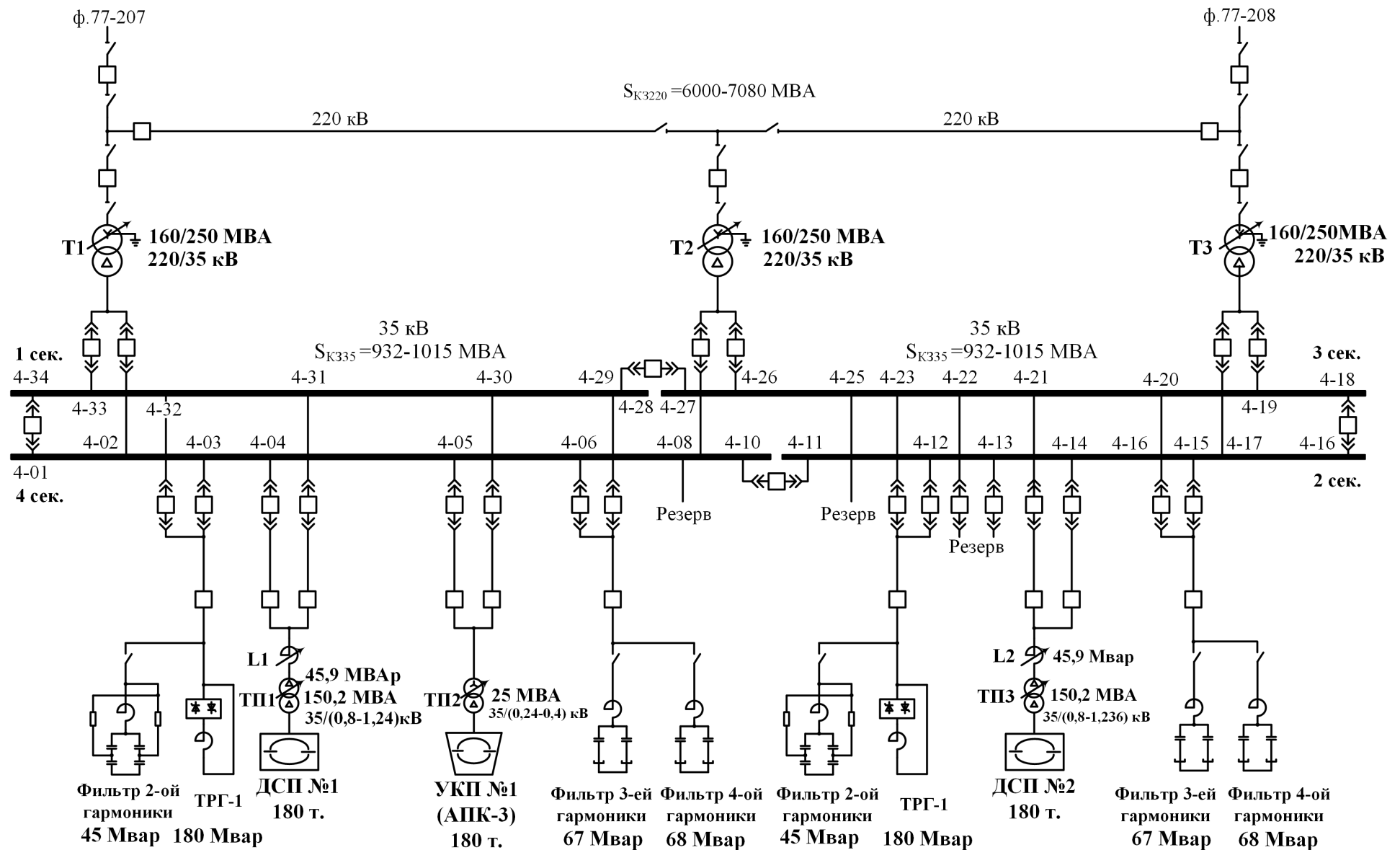


Рис.2.3 – Однолинейная схема электроснабжения УПК№1 емкостью 180 тонн ПАО «ММК»

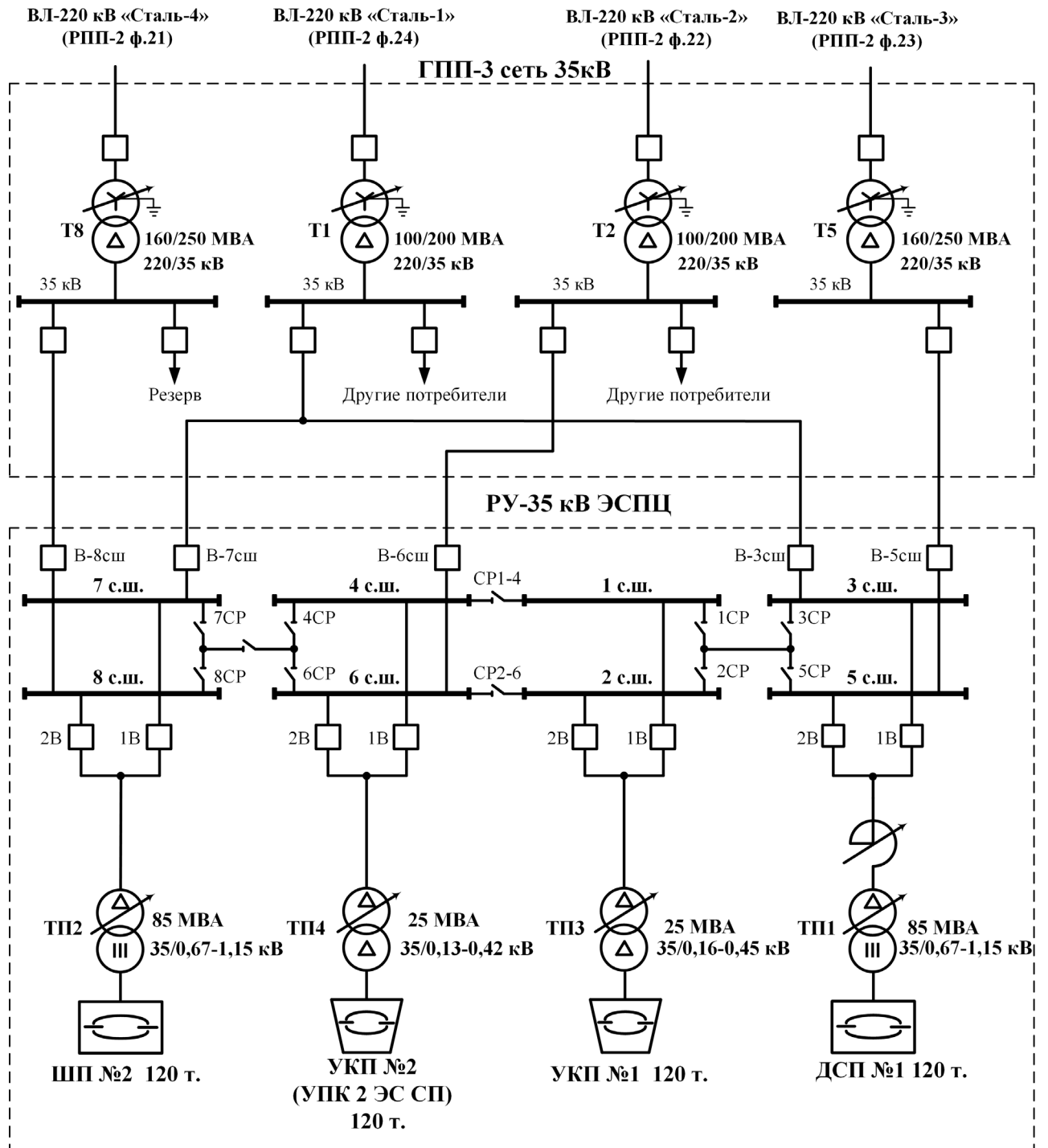


Рис.2.4 – Однолинейная схема электроснабжения УПК№2 емкостью 120 тонн
ПАО «Северсталь»

Исследуемые установки ковш-печь оснащены одинаковыми по своему функционалу системами автоматического управления электрическими режимами и перемещением электродов ArCOS. Системы управления обеспечивают поддержание заданных значений полных сопротивлений (импедансов) вторичных электрических контуров УКП в соответствии с выбранной ступенью вто-

ричного напряжения печного трансформатора $N_{\text{ТР}}$ и номера рабочей кривой $N_{\text{РК}}$, задаваемых в ручном режиме с визуализации сталевара УКП.

Анализ существующих электрических режимов исследуемых УКП показал, что на агрегатах не используется динамическая адаптация длин электрических дуг, изменение несимметричных режимов горения дуг и вторичного напряжения печных трансформаторов к изменяющимся режимам аргонной продувки, а также шлаковым режимам. Это создает условия для улучшения энергетических, временных и технологических показателей за счет применения интеллектуальных алгоритмов управления электрическими режимами, в которых осуществляется идентификация условий горения дуг за счет анализа гармонического состава токов.

2.1.2. Результаты опытов короткого замыкания исследуемых УКП

Для разработки математических моделей электрических контуров исследуемых УКП необходимо располагать достоверными значениями сопротивлений короткой сети агрегатов. Данное требование обусловлено необходимой точностью получаемых математических моделей, с помощью которых будет выполняться теоретический анализ электрических режимов, а также расчет оптимальных параметров для систем управления. В связи с этим, расчет сопротивлений с допущением в виде отсутствия взаимного влияния фаз является недопустимым, поскольку даёт значительную погрешность, вызванную существенным влиянием эффекта переноса мощности между фазами, а также смещением нейтральной точки на векторной диаграмме. Таким образом наиболее обоснованной методикой определения значений сопротивлений короткой сети является расчет, проведенный на основании результатов серии опытов короткого замыкания [42-43].

В соответствии с методикой, для расчета значений сопротивлений короткой сети УКП, необходимо получить значения фазных напряжений и токов электрических дуг при двух- и трехфазных коротких замыканиях. Для этого при проведении опытов осуществлялась запись мгновенных значений фазных напряжений и токов электрических дуг. Для записи использовался зарегистри-

рованный в Государственном реестре средств измерений и допущенный к применению в РФ регистратор электрических событий РЭС-3 (свидетельство RU.C.34.005.A № 31157) производства ООО «Прософт-Системы». Мобильная версия регистратора электрических событий РЭС-3 оснащена 16 аналоговыми входами с гальванической развязкой. Входы разделены на две группы: 1) 8 входов для записи мгновенных значений тока с диапазоном входных напряжений ± 150 мВ; 2) 8 входов для записи мгновенных значений напряжения с диапазоном входных напряжений ± 500 В.

При проведении опытов, для записи мгновенных значений фазных напряжений и токов электрических дуг регистратор подключался к вторичным цепям измерительных трансформаторов напряжения и выходам интегрирующих цепей системы измерения тока на базе поясов Роговского. В таблице 2.1 приведены параметры измерительных аппаратов, использованных при проведении электрических измерений. На рис. 2.1-2.4 приведены фотографии подключенного измерительного комплекса к клеммным блокам систем управления.

Таблица 2.3 - Параметры измерительных трансформаторов напряжения и систем измерения тока на базе поясов Роговского, использованных при записи мгновенных значений напряжений и токов на вторичной стороне печных трансформаторов УКП№1 180 т. и УКП№2 120 т. при проведении опытов короткого замыкания

Исследуемая УКП	Измерительные трансформаторы напряжения	Система измерения тока на базе поясов Роговского	Точка подключения измерительного комплекса
УКП№1 180 тонн	400/100 В	50кА/14мА Преобразователи тока SMK AD-TV 513 GA	Клеммные блоки системы управления ArCOS
УКП№2 120 тонн	500/100 В	50кА/14мА Преобразователи тока SMK AD-TV 513 GA	Клеммные блоки системы управления ArCOS



Рис.2.5 - Подключение измерительного комплекса на базе многоканального регистратора электрических сигналов РЭС-3 к измерительным цепям напряжения и тока системы управления ArCOS УКПН₁ 180 т. ПАО «ММК»



Рис.2.6 - Подключение измерительного комплекса на базе многоканального регистратора электрических сигналов РЭС-3 к измерительным цепям напряжения и тока системы управления ArCOS УКПН₂ 120 т. ПАО «Северсталь»

При проведении опытов короткого замыкания использовались ступени печного трансформатора с наименьшими значениями вторичного напряжения. В связи с этим, перед проведением опытов, устройства РПН и ПБВ печных трансформаторов были переведены в соответствующие положения: 1) для УКП№1 180 т. ПАО «ММК» – $N_{\text{ТР}} = 1$; 2) УКП№2 120т ПАО «Северсталь» – $N_{\text{ТР}} = 23$.

Процесс проведения серии опытов двухфазных коротких замыканий заключается в поочередном погружении различных пар электродов (фазы «1-2», «2-3», «3-1») в расплав на глубину 400мм. Для этого управление перемещением электродов осуществлялось в ручном режиме.

Нужно отметить, что во время проведения опытов короткого замыкания на УКП№1 180 т. ПАО «ММК» на ДСП№1 осуществлялась плавка, что привело к колебаниям напряжения на вторичной стороне печного трансформатора УКП и, соответственно, колебаниям токов.

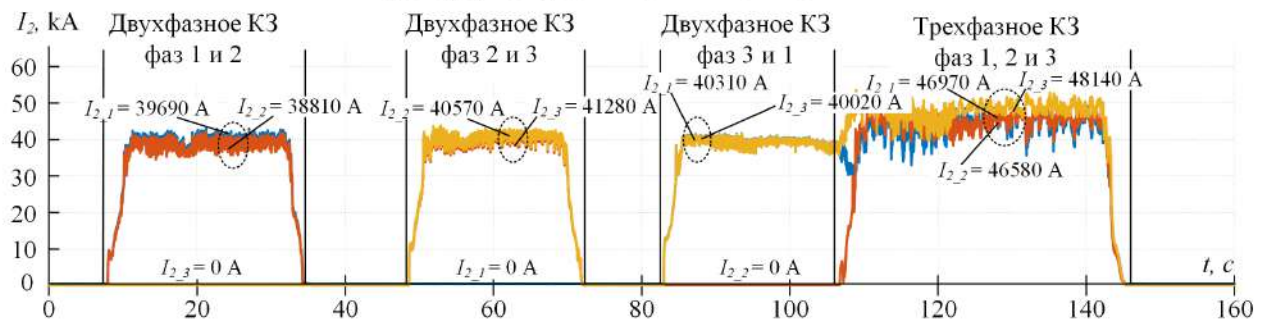
Обработка полученных мгновенных значений фазных напряжений и токов дуг осуществлялась в программной среде MATLAB с использованием пакета прикладного моделирования Simulink [42, 43].

На рис. 2.7 и рис. 2.8 приведены графики изменения электрических параметров вторичных электрических контуров исследуемых УКП, таких как действующие значения вторичных токов I_2 , вторичных фазных $U_{2\text{ф}}$ и линейных напряжений $U_{2\text{л}}$, а также активных мощностей фаз P_2 , полученные при выполнении опытов короткого замыкания.

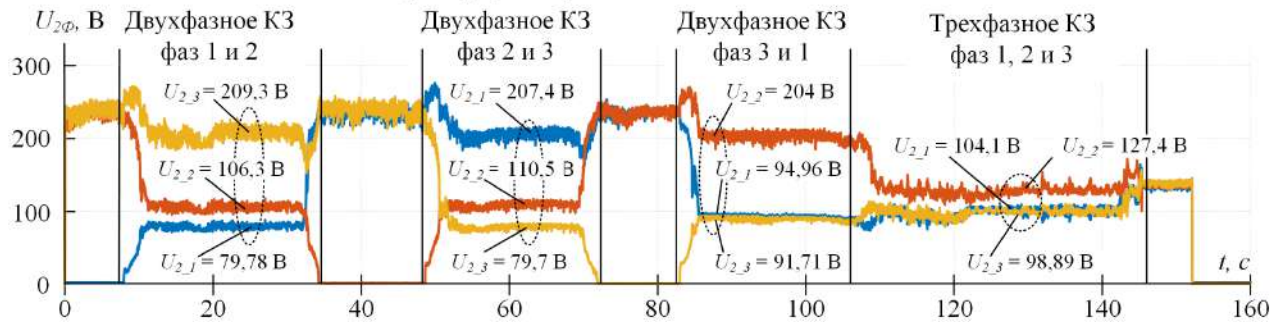
Результаты опытов коротких замыканий показаны в таблицах 2.4 – 2.7 для УКП№1 180 т. и в таблицах 2.8 – 2.11 для УКП№2 120 т.

На основании вышеперечисленных параметров с использованием известных формул, учитывающих влияние напряжения смещения нейтрали и наличие взаимной индуктивности между фазами, были рассчитаны полные, активные и индуктивные сопротивления фаз вторичного электрического контура [44,45]. Результаты вычислений приведены в таблице 2.12.

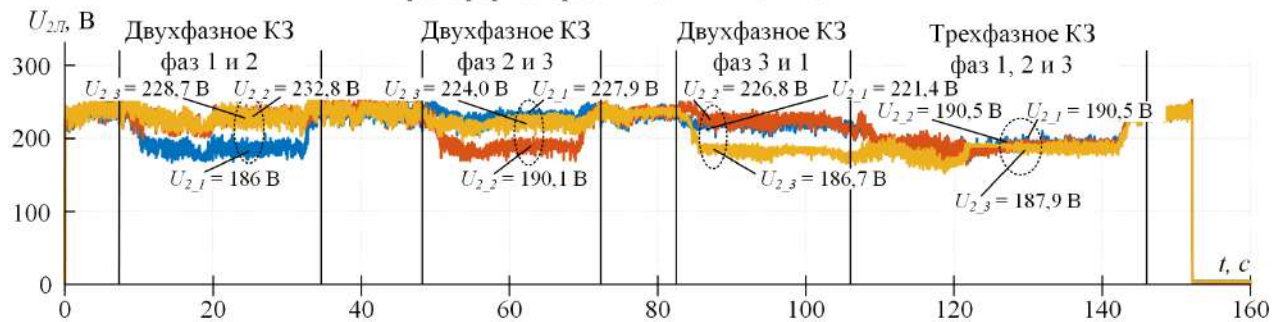
Действующие значения токов на вторичной стороне печного трансформатора УКПН№1 180 т. ПАО «ММК»



Действующие значения фазных напряжений на вторичной стороне печного трансформатора УКПН№1 180 т. ПАО «ММК»



Действующие значения линейных напряжений на вторичной стороне печного трансформатора УКПН№1 180 т. ПАО «ММК»



Активные мощности фаз УКПН№1 180 т. ПАО «ММК», измеренные на вторичной стороне печного трансформатора

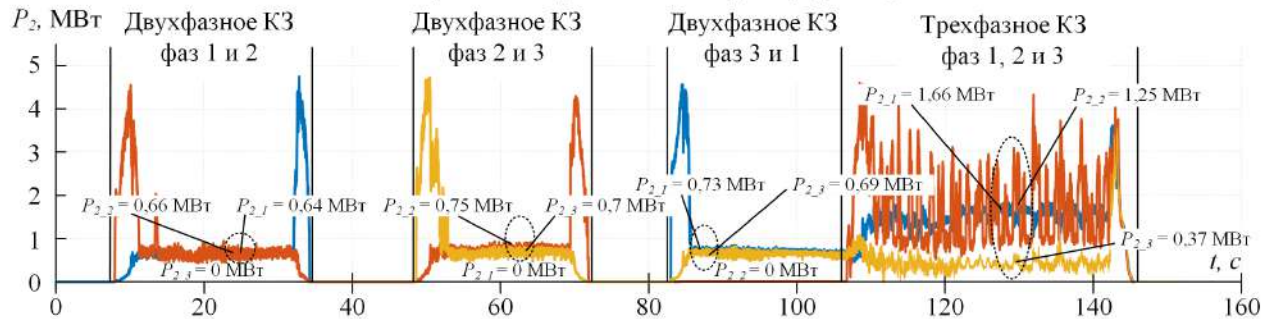


Рис. 2.7 - Графики изменения электрических параметров вторичного электрического контура УКПН№1 180 т. ПАО «ММК», полученные при проведении опытов короткого замыкания

**Результаты опытов двухфазного и трехфазного короткого замыкания
для УКПН№1 180 т. ПАО «ММК»**

Таблица 2.4 – Двухфазное КЗ при погружении фаз 1 и 2

Наименование параметра	Номер фазы		
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3
1. Действующее значение тока на вторичной стороне ПТ I_2 , кА	39,69	38,81	0,0
2. Действующее значение фазного напряжения на вторичной стороне ПТ $U_{2ф}$, В	79,78	106,3	209,3
3. Действующее значение линейного напряжения на вторичной стороне ПТ $U_{2л}$, В	186,0	232,8	228,7
4. Активная мощность фазы на вторичной стороне ПТ P_2 , МВт	0,64	0,66	0,0

Таблица 2.5 – Двухфазное КЗ при погружении фаз 2 и 3

Наименование параметра	Номер фазы		
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3
1. Действующее значение тока на вторичной стороне ПТ I_2 , кА	0,0	40,57	41,28
2. Действующее значение фазного напряжения на вторичной стороне ПТ $U_{2ф}$, В	207,4	110,5	79,7
3. Действующее значение линейного напряжения на вторичной стороне ПТ $U_{2л}$, В	227,9	190,1	224,0
4. Активная мощность фазы на вторичной стороне ПТ P_2 , МВт	0,0	0,75	0,7

Таблица 2.6 – Двухфазное КЗ при погружении фаз 1 и 3

Наименование параметра	Номер фазы		
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3
1. Действующее значение тока на вторичной стороне ПТ I_2 , кА	40,31	0,0	40,2
2. Действующее значение фазного напряжения на вторичной стороне ПТ $U_{2ф}$, В	94,96	204,0	91,71
3. Действующее значение линейного напряжения на вторичной стороне ПТ $U_{2л}$, В	221,4	226,8	186,7
4. Активная мощность фазы на вторичной стороне ПТ P_2 , МВт	0,73	0,0	0,69

Таблица 2.7 – Трехфазное КЗ при одновременном погружении фаз 1, 2 и 3

Наименование параметра	Номер фазы		
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3
1. Действующее значение тока на вторичной стороне ПТ I_2 , кА	46,97	46,58	48,14
2. Действующее значение фазного напряжения на вторичной стороне ПТ $U_{2ф}$, В	104,1	127,4	98,89
3. Действующее значение линейного напряжения на вторичной стороне ПТ $U_{2л}$, В	190,5	190,5	187,9
4. Активная мощность фазы на вторичной стороне ПТ P_2 , МВт	1,66	1,25	0,37

Ниже приведен расчет индуктивных и активных сопротивлений короткой сети УКП№1 180 т. ПАО «ММК»:

$$Z_{2_12} = \frac{U_{2Л_12}}{0,5 \cdot (I_{2_1} + I_{2_2})} = \frac{186}{0,5 \cdot (39690 + 38810)} = 4,739 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad (2.1)$$

$$Z_{2_23} = \frac{U_{2Л_23}}{0,5 \cdot (I_{2_2} + I_{2_3})} = \frac{190,1}{0,5 \cdot (40570 + 41280)} = 4,645 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad (2.2)$$

$$Z_{2_31} = \frac{U_{2Л_31}}{0,5 \cdot (I_{2_3} + I_{2_1})} = \frac{186,7}{0,5 \cdot (40310 + 40200)} = 4,638 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad (2.3)$$

$$R_{2_12} = \frac{P_{2_1} + P_{2_2}}{[0,5 \cdot (I_{2_1} + I_{2_2})]^2} = \frac{(0,64 + 0,66) \cdot 10^6}{(0,5 \cdot (39690 + 38810))^2} = 0,844 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad (2.4)$$

$$R_{2_23} = \frac{P_{2_2} + P_{2_3}}{[0,5 \cdot (I_{2_2} + I_{2_3})]^2} = \frac{(0,75 + 0,75) \cdot 10^6}{(0,5 \cdot (40570 + 41280))^2} = 0,866 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad (2.5)$$

$$R_{2_31} = \frac{P_{2_3} + P_{2_1}}{[0,5 \cdot (I_{2_3} + I_{2_1})]^2} = \frac{(0,73 + 0,69) \cdot 10^6}{(0,5 \cdot (40310 + 40200))^2} = 0,876 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad (2.6)$$

$$Z_{2_1} = \frac{Z_{2_12} + Z_{2_31} - Z_{2_23}}{2} = \frac{(4,739 + 4,638 - 4,645) \cdot 10^{-3}}{2} = 2,366 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad (2.7)$$

$$Z_{2_2} = \frac{Z_{2_12} + Z_{2_23} - Z_{2_31}}{2} = \frac{(4,739 + 4,645 - 4,638) \cdot 10^{-3}}{2} = 2,373 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad (2.8)$$

$$Z_{2_3} = \frac{Z_{2_23} + Z_{2_31} - Z_{2_12}}{2} = \frac{(4,645 + 4,638 - 4,739) \cdot 10^{-3}}{2} = 2,272 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad (2.9)$$

$$R_{2_1} = \frac{R_{2_12} + R_{2_31} - R_{2_23}}{2} = \frac{(0,844 + 0,876 - 0,866) \cdot 10^{-3}}{2} = 0,427 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad (2.10)$$

$$R_{2_2} = \frac{R_{2_12} + R_{2_23} - R_{2_31}}{2} = \frac{(0,844 + 0,866 - 0,876) \cdot 10^{-3}}{2} = 0,417 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad (2.11)$$

$$R_{2_3} = \frac{R_{2_23} + R_{2_31} - R_{2_12}}{2} = \frac{(0,866 + 0,876 - 0,844) \cdot 10^{-3}}{2} = 0,449 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad (2.12)$$

$$X_{2_1} = \sqrt{Z_{2_1}^2 - R_{2_1}^2} = \sqrt{(2,366 \cdot 10^{-3})^2 - (0,427 \cdot 10^{-3})^2} = 2,327 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad (2.13)$$

$$X_{2_2} = \sqrt{Z_{2_2}^2 - R_{2_2}^2} = \sqrt{(2,373 \cdot 10^{-3})^2 - (0,417 \cdot 10^{-3})^2} = 2,336 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad (2.14)$$

$$X_{2_3} = \sqrt{Z_{2_3}^2 - R_{2_3}^2} = \sqrt{(2,272 \cdot 10^{-3})^2 - (0,449 \cdot 10^{-3})^2} = 2,227 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}. \quad (2.15)$$

Среднее значения активного и индуктивного сопротивлений для вторичного электрического контура УКП№1 180 т. ПАО «ММК» равны:

$$X_{2,CP} = (X_{2_1} + X_{2_2} + X_{2_3}) / 3 = (2,327 + 2,336 + 2,227) \cdot 10^{-3} / 3 = 2,297 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad (2.16)$$

$$R_{2,CP} = (R_{2_1} + R_{2_2} + R_{2_3}) / 3 = (0,427 + 0,417 + 0,449) \cdot 10^{-3} / 3 = 0,431 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}. \quad (2.17)$$

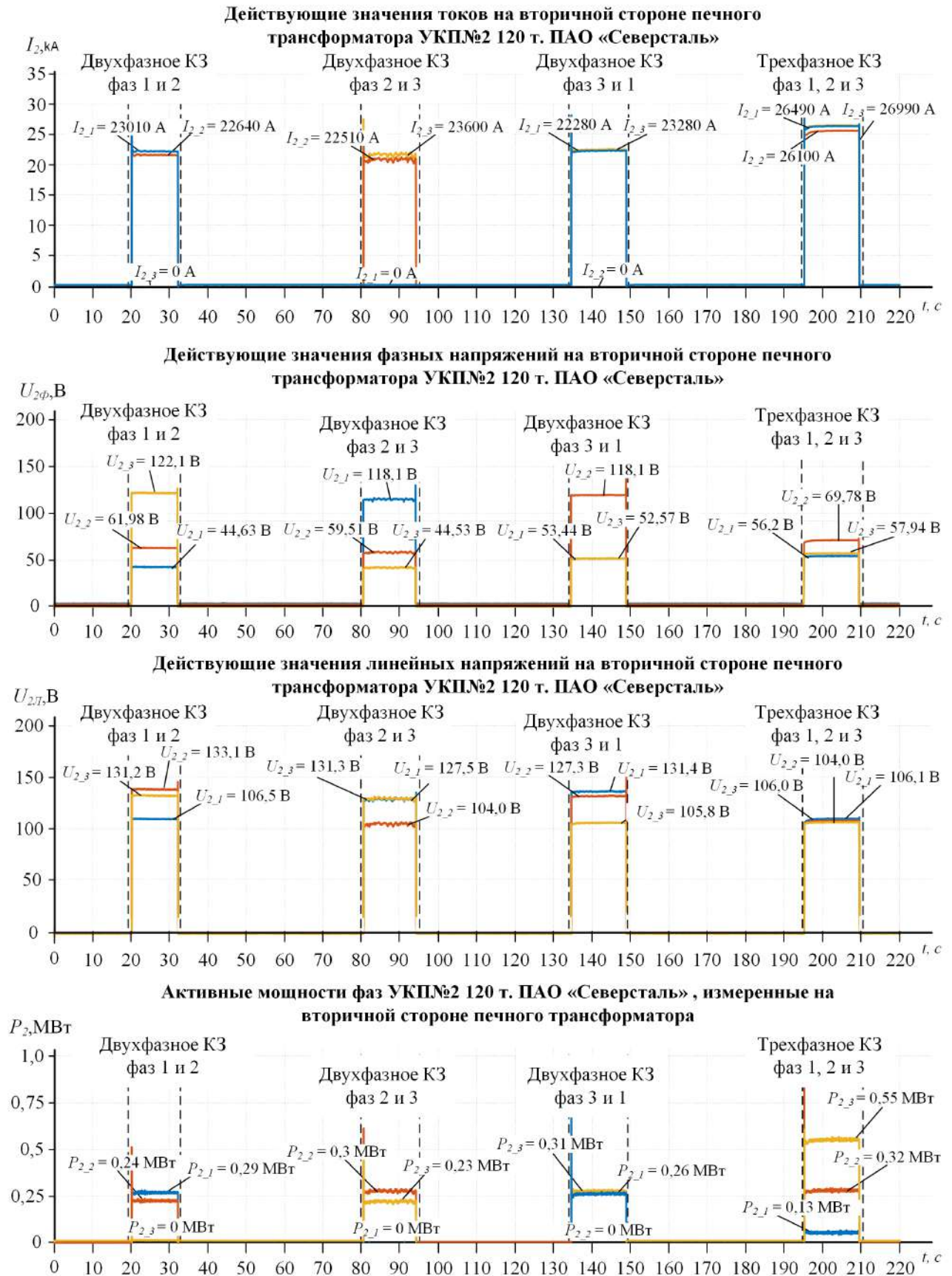


Рис. 2.8 - Графики изменения электрических параметров вторичного электрического контура УКП №2 120 т. ПАО «Северсталь», полученные при проведении опытов короткого замыкания

**Результаты опытов двухфазного и трехфазного короткого замыкания
для УКП №2 120 т. ПАО «Северсталь»**

Таблица 2.8 – Двухфазное КЗ при погружении фаз 1 и 2

Наименование параметра	Номер фазы		
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3
1. Действующее значение тока на вторичной стороне ПТ I_2 , кА	23,08	22,57	0
2. Действующее значение фазного напряжения на вторичной стороне ПТ $U_{2ф}$, В	44,57	63,15	123,4
3. Действующее значение линейного напряжения на вторичной стороне ПТ $U_{2л}$, В	107,6	134,5	132,3
4. Активная мощность фазы на вторичной стороне ПТ P_2 , МВт	0,2	0,22	0,0

Таблица 2.9 – Двухфазное КЗ при погружении фаз 2 и 3

Наименование параметра	Номер фазы		
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3
1. Действующее значение тока на вторичной стороне ПТ I_2 , кА	0,0	21,86	22,42
2. Действующее значение фазного напряжения на вторичной стороне ПТ $U_{2ф}$, В	116,8	58,49	43,94
3. Действующее значение линейного напряжения на вторичной стороне ПТ $U_{2л}$, В	126,3	102,4	129,8
4. Активная мощность фазы на вторичной стороне ПТ P_2 , МВт	0,0	0,22	0,22

Таблица 2.10 – Двухфазное КЗ при погружении фаз 1 и 3

Наименование параметра	Номер фазы		
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3
1. Действующее значение тока на вторичной стороне ПТ I_2 , кА	23,15	0,0	23,24
2. Действующее значение фазного напряжения на вторичной стороне ПТ $U_{2ф}$, В	53,63	119,5	53,59
3. Действующее значение линейного напряжения на вторичной стороне ПТ $U_{2л}$, В	133,3	128,3	106,9
4. Активная мощность фазы на вторичной стороне ПТ P_2 , МВт	0,22	0,0	0,24

Таблица 2.11 – Трехфазное КЗ при одновременном погружении фаз 1, 2 и 3

Наименование параметра	Номер фазы		
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3
1. Действующее значение тока на вторичной стороне ПТ I_2 , кА	27,18	26,54	27,15
2. Действующее значение фазного напряжения на вторичной стороне ПТ $U_{2ф}$, В	56,29	71,26	59,11
3. Действующее значение линейного напряжения на вторичной стороне ПТ $U_{2л}$, В	107,8	105,2	107,5
4. Активная мощность фазы на вторичной стороне ПТ P_2 , МВт	0,05	0,24	0,55

Далее, как и в первом случае, проведен расчет индуктивных и активных сопротивлений короткой сети УКП№2 120 т. ПАО «Северсталь»

$$Z_{2_12} = \frac{U_{2Л_12}}{0,5 \cdot (I_{2_1} + I_{2_2})} = \frac{107,6}{0,5 \cdot (23080 + 22570)} = 4,714 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad (2.18)$$

$$Z_{2_23} = \frac{U_{2Л_23}}{0,5 \cdot (I_{2_2} + I_{2_3})} = \frac{102,4}{0,5 \cdot (21860 + 22420)} = 4,625 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad (2.19)$$

$$Z_{2_31} = \frac{U_{2Л_31}}{0,5 \cdot (I_{2_3} + I_{2_1})} = \frac{106,9}{0,5 \cdot (23150 + 23240)} = 4,609 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad (2.20)$$

$$R_{2_12} = \frac{P_{2_1} + P_{2_2}}{[0,5 \cdot (I_{2_1} + I_{2_2})]^2} = \frac{(0,2 + 0,22) \cdot 10^6}{(0,5 \cdot (23080 + 22570))^2} = 0,806 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad (2.21)$$

$$R_{2_23} = \frac{P_{2_2} + P_{2_3}}{[0,5 \cdot (I_{2_2} + I_{2_3})]^2} = \frac{(0,22 + 0,22) \cdot 10^6}{(0,5 \cdot (21860 + 22420))^2} = 0,898 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad (2.22)$$

$$R_{2_31} = \frac{P_{2_3} + P_{2_1}}{[0,5 \cdot (I_{2_3} + I_{2_1})]^2} = \frac{(0,22 + 0,24) \cdot 10^6}{(0,5 \cdot (23150 + 23240))^2} = 0,855 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad (2.23)$$

$$Z_{2_1} = \frac{Z_{2_12} + Z_{2_31} - Z_{2_23}}{2} = \frac{(4,714 + 4,609 - 4,625) \cdot 10^{-3}}{2} = 2,349 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad (2.24)$$

$$Z_{2_2} = \frac{Z_{2_12} + Z_{2_23} - Z_{2_31}}{2} = \frac{(4,714 + 4,625 - 4,609) \cdot 10^{-3}}{2} = 2,365 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad (2.25)$$

$$Z_{2_3} = \frac{Z_{2_23} + Z_{2_31} - Z_{2_12}}{2} = \frac{(4,625 + 4,609 - 4,714) \cdot 10^{-3}}{2} = 2,260 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad (2.26)$$

$$R_{2_1} = \frac{R_{2_12} + R_{2_31} - R_{2_23}}{2} = \frac{(0,806 + 0,855 - 0,898) \cdot 10^{-3}}{2} = 0,382 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad (2.27)$$

$$R_{2_2} = \frac{R_{2_12} + R_{2_23} - R_{2_31}}{2} = \frac{(0,806 + 0,898 - 0,855) \cdot 10^{-3}}{2} = 0,424 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad (2.28)$$

$$R_{2_3} = \frac{R_{2_23} + R_{2_31} - R_{2_12}}{2} = \frac{(0,898 + 0,855 - 0,806) \cdot 10^{-3}}{2} = 0,473 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad (2.29)$$

$$X_{2_1} = \sqrt{Z_{2_1}^2 - R_{2_1}^2} = \sqrt{(2,349 \cdot 10^{-3})^2 - (0,382 \cdot 10^{-3})^2} = 2,318 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad (2.30)$$

$$X_{2_2} = \sqrt{Z_{2_2}^2 - R_{2_2}^2} = \sqrt{(2,365 \cdot 10^{-3})^2 - (0,424 \cdot 10^{-3})^2} = 2,327 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad (2.31)$$

$$X_{2_3} = \sqrt{Z_{2_3}^2 - R_{2_3}^2} = \sqrt{(2,260 \cdot 10^{-3})^2 - (0,473 \cdot 10^{-3})^2} = 2,210 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}. \quad (2.32)$$

Среднее значения активного и индуктивного сопротивлений для вторичного электрического контура УКП№2 120 т. ПАО «Северсталь» равны:

$$X_{2,CP} = (X_{2_1} + X_{2_2} + X_{2_3}) / 3 = (2,318 + 2,327 + 2,210) \cdot 10^{-3} / 3 = 2,285 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}; \quad (2.33)$$

$$R_{2,CP} = (R_{2_1} + R_{2_2} + R_{2_3}) / 3 = (0,382 + 0,424 + 0,473) \cdot 10^{-3} / 3 = 0,426 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}. \quad (2.34)$$

Таблица 2.12 - Расчетные значения сопротивлений вторичного электрического контура УКП№1 180 т. ПАО «ММК» и УКП№2 120 т. ПАО «Северсталь», определенных на основании опытов КЗ

Параметр вторичного электрического контура	Значение параметра	
	Расчет на основании показаний РЭС-3 при серии опытов КЗ УКП№1 180 т. ПАО «ММК»	Расчет на основании показаний РЭС-3 при серии опытов КЗ УКП№2 120 т. ПАО «Северсталь»
$Z_{2\ 1}, Z_{2\ 2}, Z_{2\ 3}, \text{ мОм}$	2,366, 2,373, 2,272	2,349, 2,365, 2,260
$X_{2\ 1}, X_{2\ 2}, X_{2\ 3}, \text{ мОм}$	2,327, 2,336, 2,227	2,318, 2,327, 2,210
$R_{2\ 1}, R_{2\ 2}, R_{2\ 3}, \text{ мОм}$	0,427, 0,417, 0,449	0,382, 0,424, 0,473
$Z_{2.\text{CP.}}, \text{ мОм}$	2,337	2,320
$X_{2.\text{CP.}}, \text{ мОм}$	2,297	2,285
$R_{2.\text{CP.}}, \text{ мОм}$	0,431	0,426
$X_{M12}, X_{M23}, X_{M31}, \text{ мОм}$	0,368, 0,399, 0,036	0,435, 0,363, 0,016

2.1.3. Результаты экспериментальных исследований регулировочных характеристик гидроприводов перемещения электродов исследуемых УКП

Эффективность работы УКП в значительной степени зависит от точности и стабильности поддержания электрического режима, в частности, импеданса фазы. При этом система автоматического управления перемещением электродов, играет ключевую роль в регулировании импеданса. Таким образом при разработке оптимальных электрических режимов актуальной задачей является анализ показателей качества регулирования.

В рамках экспериментальных исследований систем автоматического управления электрическими режимами УКП были проведены опыты по определению регулировочных характеристик гидроприводов перемещения электродов. Полученные характеристики необходимы для построения адекватных математических моделей, поскольку гидроприводы и система перемещения электродов являются неотъемлемыми частями УКП. Необходимость в получении актуальных регулировочных характеристик обусловлена также необходимостью проведения анализа динамических показателей регулирования импеданса фаз.

Ввиду отсутствия датчиков положения консолей электродов на исследуемых УКП, определение установившейся скорости перемещения электродов выполнялось по специальной методике: на колонны консолей электродов была нанесена разметка длина которой для УКП№1 180 т. ПАО «ММК» составляла 1,5 метра, а для УКП№2 120 т. ПАО «Северсталь» 1 метр. Шаг разметки во всех случаях составлял 10 сантиметров (рис.2.9 и рис.2.10). Оператор, в ручном режиме, путем изменения параметров Manual Lifting Speed (Normal)» и «Manual Lowering Speed (Normal)» в сервисном меню системы управления ArCOS, последовательно выполнял операции подъема и опускания каждого электрода, меняя сигнал задания на скорость перемещения электродов в диапазоне от -100% до +100% с различным шагом. Длительность каждой операции составляла 5 секунд. Процесс перемещения электродов, осуществляемый оператором, фиксировался на видеокамеру. Затем по видеозаписи определялось время прохождения консолю каждого интервала разметки и рассчитывалась установившаяся скорость перемещения электрода $V_{ЭЛ}$ для каждого значения сигнала задания $V_{ЭЛ.Зад.}$. Для наглядности данные полученные с УКП№1 180 т. представлены в таблице 2.13, в таблице 2.14 представлены данные полученные для УКП№2 120 т. Регулировочная характеристика строилась в виде зависимости $V_{ЭЛ} = f(V_{ЭЛ.Зад.}, I_{ЭЛ.Зад.})$, где $I_{ЭЛ.Зад.}$ уровень аналоговых сигналов управления. Сами регулировочные характеристики показаны на рис. 2.11 и рис. 2.12.

Анализ полученных экспериментальных данных выявил существенные различия в регулировочных характеристиках гидроприводов разных фаз УКП№2 120 т. ПАО «Северсталь». Наиболее значительное отличие наблюдалось в поведении гидропривода фазы "2". Учитывая, что коэффициенты пропорциональной части ПИ-регуляторов заданные в системе управления ArCOS одинаковы для всех фаз, выявленное различие в поведении гидропривода фазы «2» является причиной ухудшения динамических показателей качества регулирования импеданса для данной фазы.

Анализ полученных экспериментальных данных УКП№1 180 т. показал, что регулировочные характеристики отдельных фаз имеют линейный характер

в широком диапазоне изменения сигнала задания (до $\pm 80\%$) и максимально приближены друг к другу, что свидетельствует о хорошей согласованности работы гидроприводов.

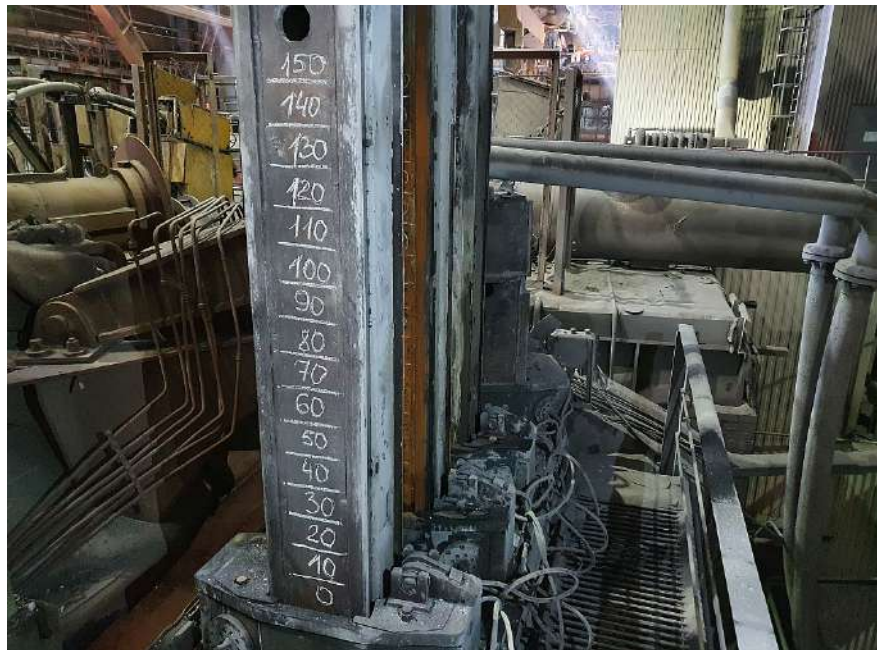


Рис. 2.9 - Искусственная разметка, нанесенная на колонны консолей электродов УКП №1 180 т. ПАО «ММК», используемая для снятия регулировочных характеристик гидроприводов при отсутствии датчиков положения



Рис. 2.10 - Искусственная разметка, нанесенная на колонны консолей электродов УКП №2 120 т. ПАО «Северсталь», используемая для снятия регулировочных характеристик гидроприводов при отсутствии датчиков положения

Таблица 2.13 - Результаты замеров скорости перемещения консолей с электродами УКП №1 180 т. ПАО «ММК» при различных значениях выходных сигналов управления системы ArCOS

№ опыта	Фаза №1			Фаза №2			Фаза №3		
	$V_{\text{ЭЛ.ЗАД.1}}$ %	$I_{\text{ЗАД.}}$ мА	$V_{\text{ЭЛ.ФАКТ.1}}$ мм/с	$V_{\text{ЭЛ.ЗАД.1}}$ %	$I_{\text{ЗАД.}}$ мА	$V_{\text{ЭЛ.ФАКТ.1}}$ мм/с	$V_{\text{ЭЛ.ЗАД.1}}$ %	$I_{\text{ЗАД.}}$ мА	$V_{\text{ЭЛ.ФАКТ.1}}$ мм/с
1	-100	-20	-135,1	-100	-20	-135,8	-100	-20	-132,0
2	-90	-18	-125,8	-90	-18	-127,2	-90	-18	-125,3
3	-80	-16	-110,5	-80	-16	-114,8	-80	-16	-116,3
4	-70	-14	-102,8	-70	-14	-96,9	-70	-14	-104,6
5	-60	-12	-83,9	-60	-12	-83,8	-60	-12	-88,6
6	-50	-10	-72,2	-50	-10	-71,6	-50	-10	-70,8
7	-40	-8	-58,0	-40	-8	-56,1	-40	-8	-58,4
8	-30	-6	-45,1	-30	-6	-43,9	-30	-6	-44,8
9	-20	-4	-33,2	-20	-4	-32,7	-20	-4	-35,3
10	-10	-2	-19,2	-10	-2	-17,3	-10	-2	-22,0
11	-5	-1	-11,2	-5	-1	-10,3	-5	-1	-14,2
12	0	0	0,0	0	0	0,0	0	0	0,0
13	5	1	7,2	5	1	8,4	5	1	3,7
14	10	2	14,8	10	2	15,9	10	2	13,2
15	20	4	28,1	20	4	31,9	20	4	27,3
16	30	6	39,4	30	6	42,7	30	6	36,7
17	40	8	53,6	40	8	53,8	40	8	46,4
18	50	10	67,2	50	10	69,6	50	10	61,5
19	60	12	78,7	60	12	81,5	60	12	72,7
20	70	14	95,5	70	14	96,5	70	14	88,6
21	80	16	102,7	80	16	112,7	80	16	107,1
22	90	18	119,9	90	18	123,3	90	18	120,9
23	100	20	128,6	100	20	130,5	100	20	127,5

Примечание: изменение сигналов задания осуществлялось в ручном режиме путем последовательного изменения параметров «Manual Lifting Speed (Normal)» и «Manual Lowering Speed (Normal)» системы управления перемещением электродов ArCOS Light в диапазоне $\pm 100\%$, при этом значения $\pm 100\%$ соответствуют уровням ± 20 мА аналоговых сигналов управления; измерение скорости перемещения консолей выполнялось с использованием искусственной разметки на штоке гидроцилиндра с последующей видеозаписью процессов перемещения электродов.

Таблица 2.14 - Результаты замеров скорости перемещения консолей с электродами УКП№2 120 т. ПАО «Северсталь» при различных значениях выходных сигналов управления системы ArCOS

№ опыта	Фаза 1			Фаза 2			Фаза 3		
	$V_{\text{ЭЛ.ЗАД.1, \%}}$	$I_{\text{ЗАД., мА}}$	$V_{\text{ЭЛ.ФАКТ.1, мм/с}}$	$V_{\text{ЭЛ.ЗАД.2, \%}}$	$I_{\text{ЗАД., мА}}$	$V_{\text{ЭЛ.ФАКТ.2, мм/с}}$	$V_{\text{ЭЛ.ЗАД.3, \%}}$	$I_{\text{ЗАД., мА}}$	$V_{\text{ЭЛ.ФАКТ.3, мм/с}}$
1	-100	-20	-155,0	-100	-20	-220,7	-100	-20	-185,2
2	-90	-18	-151,7	-90	-18	-216,9	-90	-18	-165,8
3	-80	-16	-147,9	-80	-16	-214,3	-80	-16	-158,0
4	-70	-14	-130,4	-70	-14	-197,4	-70	-14	-127,7
5	-60	-12	-108,7	-60	-12	-167,8	-60	-12	-108,3
6	-50	-10	-85,0	-50	-10	-134,6	-50	-10	-86,5
7	-40	-8	-65,5	-40	-8	-104,3	-40	-8	-68,9
8	-30	-6	-47,8	-30	-6	-78,7	-30	-6	-54,1
9	-20	-5	-32,6	-20	-5	-56,7	-20	-5	-35,8
10	-15	-4	-25,3	-15	-4	-39,7	-15	-4	-29,5
11	-10	-3	-16,9	-10	-3	-28,6	-10	-3	-18,2
12	-5	-2	-9,6	-5	-2	-16,3	-5	-2	-8,0
13	0	0	0,6	0	0	0,5	0	0	0,5
14	5	2	12,7	5	2	17	5	2	10,9
15	10	3	19,2	10	3	30,9	10	3	21,8
16	15	4	27,6	15	4	46,3	15	4	32,3
17	20	5	34,2	20	5	62,5	20	5	44,2
18	30	6	50,9	30	6	93,8	30	6	60,4
19	40	8	71,4	40	8	123,8	40	8	78,8
20	50	10	93,2	50	10	151,5	50	10	101,7
21	60	12	111,1	60	12	176,3	60	12	125,8
22	70	14	129,0	70	14	200	70	14	160,4
23	80	16	142,9	80	16	201,8	80	16	176,5
24	90	18	145,0	90	18	203,7	90	18	191,1
25	100	20	147,9	100	20	204,3	100	20	199,6

Примечание: изменение сигналов задания осуществлялось в ручном режиме путем последовательного изменения параметров «Manual Lifting Speed (Normal)» и «Manual Lowering Speed (Normal)» системы управления перемещением электродов ArCOS Light в диапазоне $\pm 100\%$, при этом значения $\pm 100\%$ соответствуют уровням ± 20 мА аналоговых сигналов управления; измерение скорости перемещения консолей выполнялось с использованием искусственной разметки на штоке гидроцилиндра с последующей видеозаписью процессов перемещения электродов.

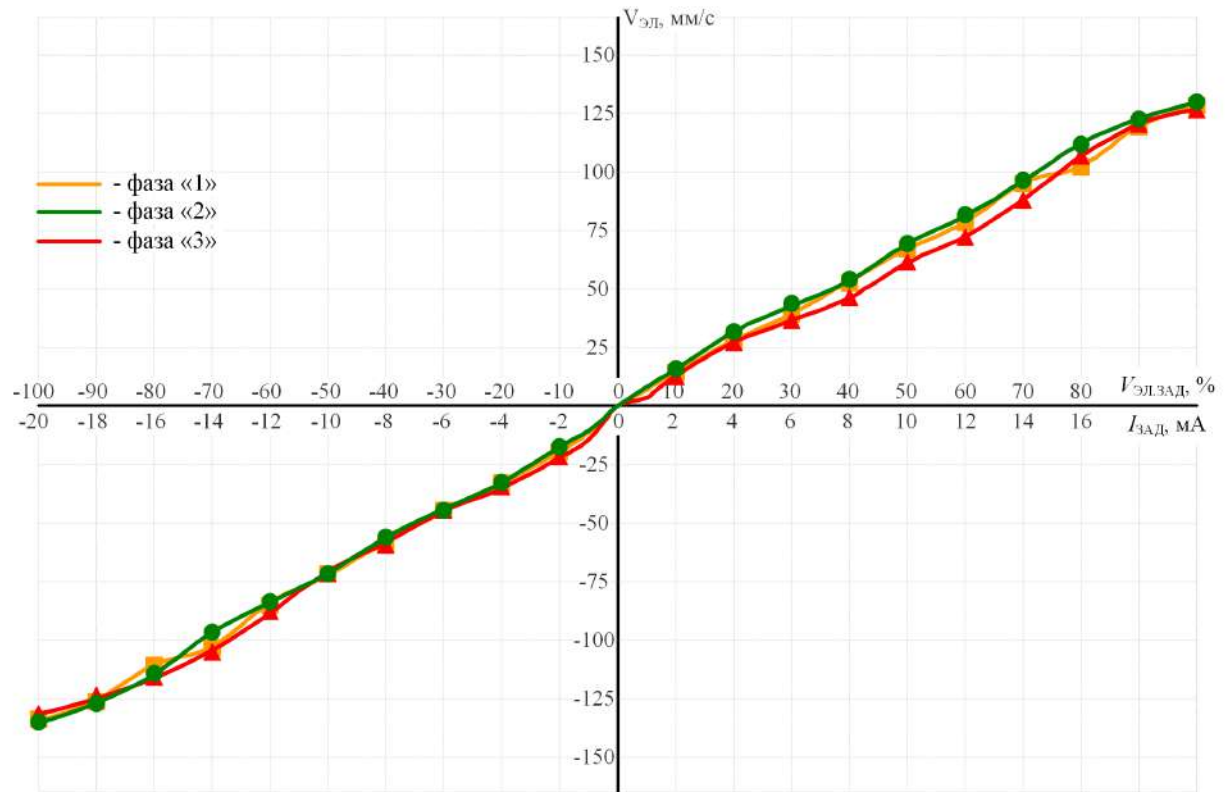


Рис. 2.11 - Экспериментальные регулировочные характеристики гидроприводов перемещения электродов УКП№1 180 т. ПАО «ММК»

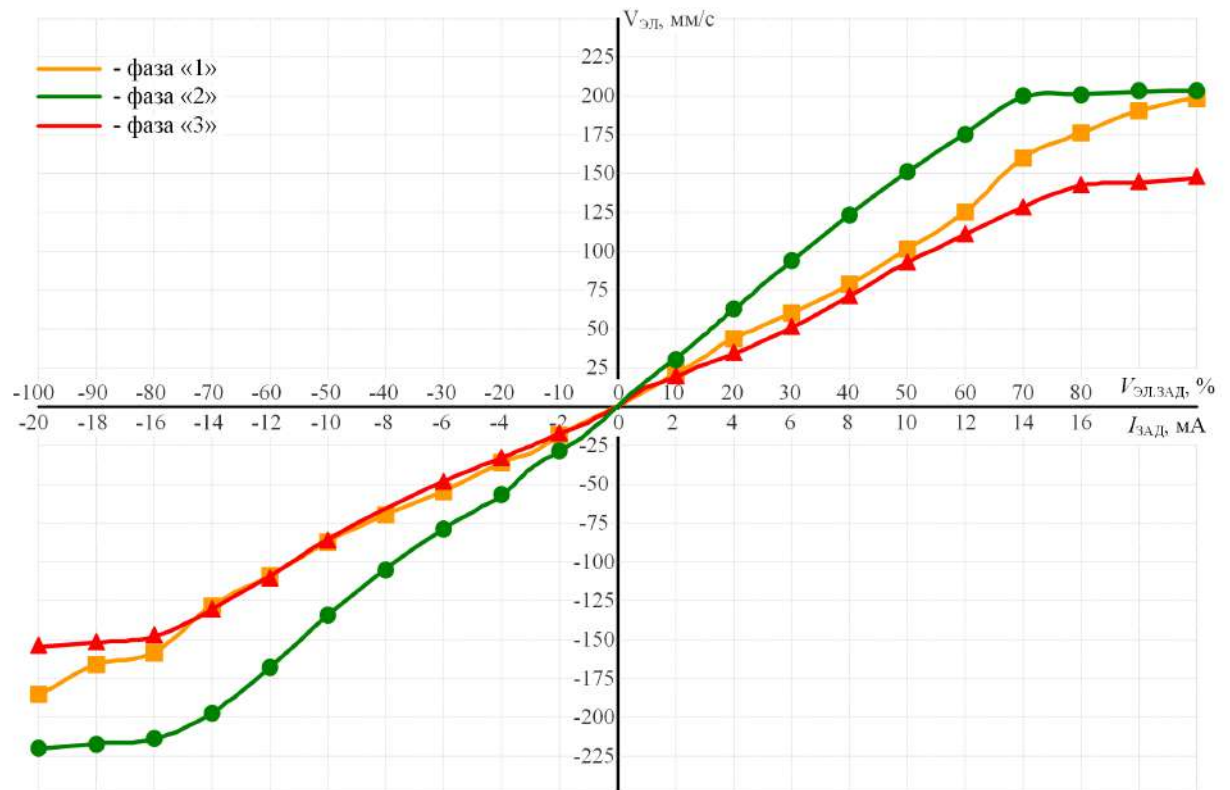


Рис. 2.12 - Экспериментальные регулировочные характеристики гидроприводов перемещения электродов УКП№2 120 т. ПАО «Северсталь»

2.1.4. Результаты экспериментальных исследований существующих алгоритмов и параметров систем управления электрическими режимами исследуемых У КП

Проведение данного экспериментального исследования было обусловлено необходимостью оценки эффективности существующих алгоритмов и параметров систем управления электрическими режимами исследуемых У КП, а также для выявления потенциальных резервов повышения производительности и оптимизации электрических режимов. Для на У КП №2 120 т. ПАО «Северсталь» осуществлялась регистрация мгновенных значений токов и напряжений на высокой стороне печного трансформатора с использованием мобильного регистратора электрических событий РЭС-3 производства ООО «Прософт-Системы». Данные фиксировались в течение нескольких тестовых плавов, проводимых в соответствии с действующими технологическими программами без существенных отклонений от установленных правил и операций. Наряду с записями мгновенных значений напряжений и токов на первичной стороне ПТ, использовались данные, получаемые от систем сбора и анализа технологических данных ИВА. Важно отметить, что в случае с У КП №1 180 т. ПАО «ММК» запись мгновенных значений напряжений и токов не проводилась, а для построения графиков совместно с данными системы ИВА использовались данные цеховой программы сбора и анализа данных Trend X. Полученные данные позволили построить графики изменения основных электрических (полная мощность, действующие значения токов на первичной и вторичной сторонах, номер ступени РПН и номер рабочей кривой) и технологических (расход аргона) параметров за несколько циклов обработки жидкой стали. Важно отметить, что запись мгновенных значений напряжений и токов позволяет рассчитать значения активной, реактивной и полной мощности, а также коэффициент мощности.

Результаты анализа показали, что существующие системы управления не обеспечивают автоматическую адаптацию электрических режимов к изменяющимся условиям проведения плавки, таким как режимы аргонной продувки и

шлаковые режимы. Выявлено, что сталевары преимущественно используют ограниченный набор значений ступеней напряжения ПТ и рабочих кривых., не реализуя в полной мере возможности управления электрическими режимами агрегата. На УКП№1 180 т. сталевары используют фиксированную ступень РПН печного трансформатора $N_{\text{ТР}} = 10$, при этом изменение номера рабочей кривой $N_{\text{РК}}$, определяющей длину электрической дуги при выбранном вторичном напряжении трансформатора, не выполняется, применяется фиксированное значение $N_{\text{РК}} = 2$, соответствующее средней длине электрической дуги; при выполнении операций разжижения шлака и усреднительной продувки применяются пониженные ступени напряжения, чаще всего $N_{\text{ТР}} = 5$. На УКП№2 120 т. производительной ступенью напряжения, используемой для нагрева металла, является $N_{\text{ТР}} = 2$, для поддержания температуры, а также операций разжижения шлака и усреднительной продувки используется $N_{\text{ТР}} = 12$. Изменение номера рабочей кривой $N_{\text{РК}}$, определяющей длину электрической дуги при выбранном вторичном напряжении трансформатора, осуществляется в рамках трех рабочих кривых, где $N_{\text{РК}} = 1$ соответствует коротким электрическим дугам, $N_{\text{РК}} = 3$ – дугам средней длины, а $N_{\text{РК}} = 4$ длинным электрическим дугам.

Изменения основных электрических параметров исследуемых УКП в процессе работы приведены на рис. 2.13 – 2.15. Исследуемыми параметрами в данном случае являлись: 1) активные, реактивные и полные мощности на первичной стороне печного трансформатора $P_1(t)$, $Q_1(t)$, $S_1(t)$ (в случае с УКП№1 180 т. только полная мощность); 2) коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi(t)$; 3) действующие значения токов на первичной стороне печного трансформатора $I_{1.1}(t)$, $I_{1.2}(t)$, $I_{1.3}(t)$; 4) действующие значения токов на вторичной стороне печного трансформатора $I_{2.1}(t)$, $I_{2.2}(t)$, $I_{2.3}(t)$; 4) номер ступени напряжения печного трансформатора $N_{\text{ТР}}$ и номер рабочей кривой $N_{\text{РК}}$. Кроме графиков изменения электрических параметров на рис. 2.13 – 2.15 показаны тренды изменения мгновенного расхода аргона через продувочные блоки.

Расчет всех электрических параметров с использованием записей мгновенных значений напряжений и токов выполнялся в среде Matlab-Simulink. Расчет осуществлялся с применением встроенных блоков определения действующих и средних значений, а также блоков расчета составляющих полной мощности трехфазной электрической нагрузки, учитывающих несимметрии напряжений и токов, также наличие высших гармоник. При построении графиков использовалось усреднение значений параметров на интервалах 0,1 с и 10 с, для удобной визуальной оценки быстрых и медленных изменений анализируемых сигналов. Анализ математических ожиданий мощностей, токов и напряжений для различных ступеней РПН печных трансформаторов и рабочих кривых осуществлялся на основании массива из 20-ти миллисекундных значений рассчитанных параметров.

Кроме вышеперечисленных параметров были построены и проанализированы экспериментальные зависимости $P_{\text{УКП}} = f(I_{1.\text{CP}})$ и $Q_{\text{УКП}} = f(I_{1.\text{CP}})$ для основных рабочих ступеней РПН печных трансформаторов и рабочих кривых (рис. 2.16 и рис. 2.17). На основании электрических характеристик $P_{\text{УКП}} = f(I_{1.\text{CP}})$, $Q_{\text{УКП}} = f(I_{1.\text{CP}})$ и рабочих точек на них были сделаны предварительные заключения об оптимальности используемых электрических режимов. Также на основании полученных зависимостей будет выполнена оценка адекватности разработанных математических моделей исследуемых агрегатов.

Анализ таблиц уставок импеданса в системах управления электрическими режимами и перемещением электродов (САУЭР и ПЭ) ArCOS (таблицы 2.15 – 2.16) показал, что для УКП№1 180 т. ПАО «ММК» в блоке хранения уставок внесены значения только для трех рабочих кривых. При этом токи дуг являются симметричными, что также не является оптимальным решением с точки зрения обеспечения максимальной стабильности и эффективности процесса нагрева жидкой стали. Также стоит отметить, что коэффициенты загрузки печных трансформаторов занижены (коэффициент загрузки по полной мощности УКП№1 180 т. составляет K_{3S1} 0,84, а для УКП№2 120 т. $K_{3S1} = 0,818$), что свидетельствует о наличии резервов для интенсификации процесса.

Таблица 2.15 – Исходные значения таблицы уставок задания на импеданс («Setpoints») УКП№1 180 т. ПАО «ММК»

N_{TP}	$N_{PK} = 1$			$N_{PK} = 2$			$N_{PK} = 3$			$N_{PK} = 4$			$N_{PK} = 5$			$N_{PK} = 6$		
	$Z_{2\Phi1}$ МОМ	$Z_{2\Phi2}$ МОМ	$Z_{2\Phi3}$ МОМ	$Z_{2\Phi1}$ МОМ	$Z_{2\Phi2}$ МОМ	$Z_{2\Phi3}$ МОМ	$Z_{2\Phi1}$ МОМ	$Z_{2\Phi2}$ МОМ	$Z_{2\Phi3}$ МОМ	$Z_{2\Phi1}$ МОМ	$Z_{2\Phi2}$ МОМ	$Z_{2\Phi3}$ МОМ	$Z_{2\Phi1}$ МОМ	$Z_{2\Phi2}$ МОМ	$Z_{2\Phi3}$ МОМ	$Z_{2\Phi1}$ МОМ	$Z_{2\Phi2}$ МОМ	$Z_{2\Phi3}$ МОМ
Исходные значения уставок импеданса вторичного электрического контура																		
1	5,50	5,60	5,10	5,60	5,70	5,20	5,70	5,80	5,30	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	5,10	5,20	4,70	5,20	5,30	4,80	5,30	5,40	4,90	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	4,90	5,00	4,50	5,00	5,10	4,60	5,10	5,20	4,70	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	4,60	4,70	4,20	4,70	4,80	4,30	4,80	4,90	4,40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	4,40	4,50	4,00	4,50	4,60	4,10	4,60	4,70	4,20	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	4,70	4,80	4,30	4,80	4,90	4,40	4,90	5,00	4,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	4,90	5,00	4,50	5,00	5,10	4,60	5,10	5,20	4,70	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	5,20	5,30	4,80	5,30	5,40	4,90	5,40	5,50	5,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	5,40	5,50	5,00	5,50	5,60	5,10	5,60	5,70	5,20	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	5,60	5,70	5,20	5,70	5,80	5,30	5,80	5,90	5,40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	6,50	6,60	6,10	6,60	6,70	6,20	6,70	6,80	6,30	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	6,90	7,00	6,50	7,00	7,10	6,60	7,10	7,20	6,70	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 2.16 – Исходные значения таблицы уставок задания на импеданс («Setpoints») УКП№2 120 т. ПАО «Северсталь»

N_{TP}	$N_{PK} = 1$			$N_{PK} = 2$			$N_{PK} = 3$			$N_{PK} = 4$			$N_{PK} = 5$			$N_{PK} = 6$		
	$Z_{2\Phi1}$ МОМ	$Z_{2\Phi2}$ МОМ	$Z_{2\Phi3}$ МОМ	$Z_{2\Phi1}$ МОМ	$Z_{2\Phi2}$ МОМ	$Z_{2\Phi3}$ МОМ	$Z_{2\Phi1}$ МОМ	$Z_{2\Phi2}$ МОМ	$Z_{2\Phi3}$ МОМ	$Z_{2\Phi1}$ МОМ	$Z_{2\Phi2}$ МОМ	$Z_{2\Phi3}$ МОМ	$Z_{2\Phi1}$ МОМ	$Z_{2\Phi2}$ МОМ	$Z_{2\Phi3}$ МОМ	$Z_{2\Phi1}$ МОМ	$Z_{2\Phi2}$ МОМ	$Z_{2\Phi3}$ МОМ
Исходные значения уставок импеданса вторичного электрического контура																		
1	7,20	6,90	7,10	7,35	7,05	7,25	7,50	7,30	7,40	7,65	7,45	7,55	7,75	7,55	7,65	7,85	7,65	7,75
2	7,05	6,75	6,95	7,20	6,90	7,10	7,35	7,15	7,25	7,45	7,25	7,35	7,55	7,35	7,45	7,65	7,45	7,55
3	6,85	6,60	6,75	7,05	6,75	6,95	7,15	6,95	7,05	7,25	7,05	7,15	7,35	7,15	7,25	7,45	7,25	7,35
4	6,70	6,45	6,60	6,90	6,60	6,80	6,95	6,75	6,85	7,05	6,85	6,95	7,15	6,95	7,05	7,25	7,05	7,15
5	6,55	6,30	6,45	6,65	6,45	6,55	6,75	6,55	6,65	6,85	6,65	6,75	6,95	6,75	6,85	7,05	6,85	6,95
6	6,40	6,20	6,30	6,50	6,30	6,40	6,60	6,40	6,50	6,70	6,50	6,60	6,80	6,60	6,70	6,90	6,70	6,80
7	6,20	6,00	6,10	6,35	6,15	6,25	6,40	6,20	6,30	6,50	6,30	6,40	6,60	6,40	6,50	6,70	6,50	6,60
8	6,05	5,85	5,95	6,20	5,90	6,10	6,20	6,00	6,10	6,30	6,10	6,20	6,40	6,20	6,30	6,50	6,30	6,40
9	5,90	5,70	5,80	6,00	5,80	5,90	6,10	5,90	6,00	6,20	6,00	6,10	6,30	6,10	6,20	6,40	6,20	6,30
10	5,80	5,60	5,70	5,90	5,70	5,80	6,00	5,80	5,90	6,10	5,90	6,00	6,20	6,00	6,10	6,30	6,10	6,20
11	5,75	5,55	5,65	5,85	5,65	5,75	5,95	5,75	5,85	6,05	5,85	5,95	6,15	5,95	6,05	6,25	6,05	6,15
12	5,70	5,50	5,60	5,80	5,60	5,70	5,90	5,70	5,80	6,00	5,80	5,90	6,10	5,90	6,00	6,20	6,00	6,10
13	5,72	5,52	5,62	5,82	5,62	5,72	5,92	5,72	5,82	6,02	5,82	5,92	6,12	5,92	6,02	6,22	6,02	6,12
14	5,75	5,55	5,65	5,85	5,65	5,75	5,95	5,75	5,85	6,05	5,85	5,95	6,15	5,95	6,05	6,25	6,05	6,15
15	5,80	5,60	5,70	5,90	5,70	5,80	6,00	5,80	5,90	6,10	5,90	6,00	6,20	6,00	6,10	6,30	6,10	6,20
16	5,82	5,62	5,72	5,92	5,72	5,82	6,02	5,82	5,92	6,12	5,92	6,02	6,20	6,02	6,12	6,32	6,12	6,22
17	5,85	5,65	5,75	5,95	5,75	5,85	6,05	5,85	5,95	6,15	5,95	6,05	6,25	6,05	6,15	6,35	6,15	6,25
18	5,90	5,70	5,80	6,00	5,80	5,90	6,10	5,90	6,00	6,20	6,00	6,10	6,30	6,10	6,20	6,40	6,20	6,30
19	5,95	5,75	5,85	6,05	5,85	5,95	6,15	5,95	6,05	6,25	6,05	6,15	6,35	6,15	6,25	6,45	6,25	6,35
20	6,00	5,80	5,90	6,10	5,90	6,00	6,20	6,00	6,10	6,30	6,10	6,20	6,40	6,20	6,30	6,50	6,30	6,40
21	6,10	6,10	6,00	6,20	6,00	6,10	6,30	6,10	6,20	6,40	6,20	6,30	6,50	6,30	6,40	6,60	6,40	6,50
22	6,20	6,00	6,10	6,30	6,10	6,20	6,40	6,20	6,30	6,50	6,30	6,40	6,60	6,40	6,50	6,70	6,50	6,60
23	6,40	6,20	6,30	6,50	6,30	6,40	6,60	6,40	6,50	6,70	6,50	6,60	6,80	6,60	6,70	6,90	6,70	6,80

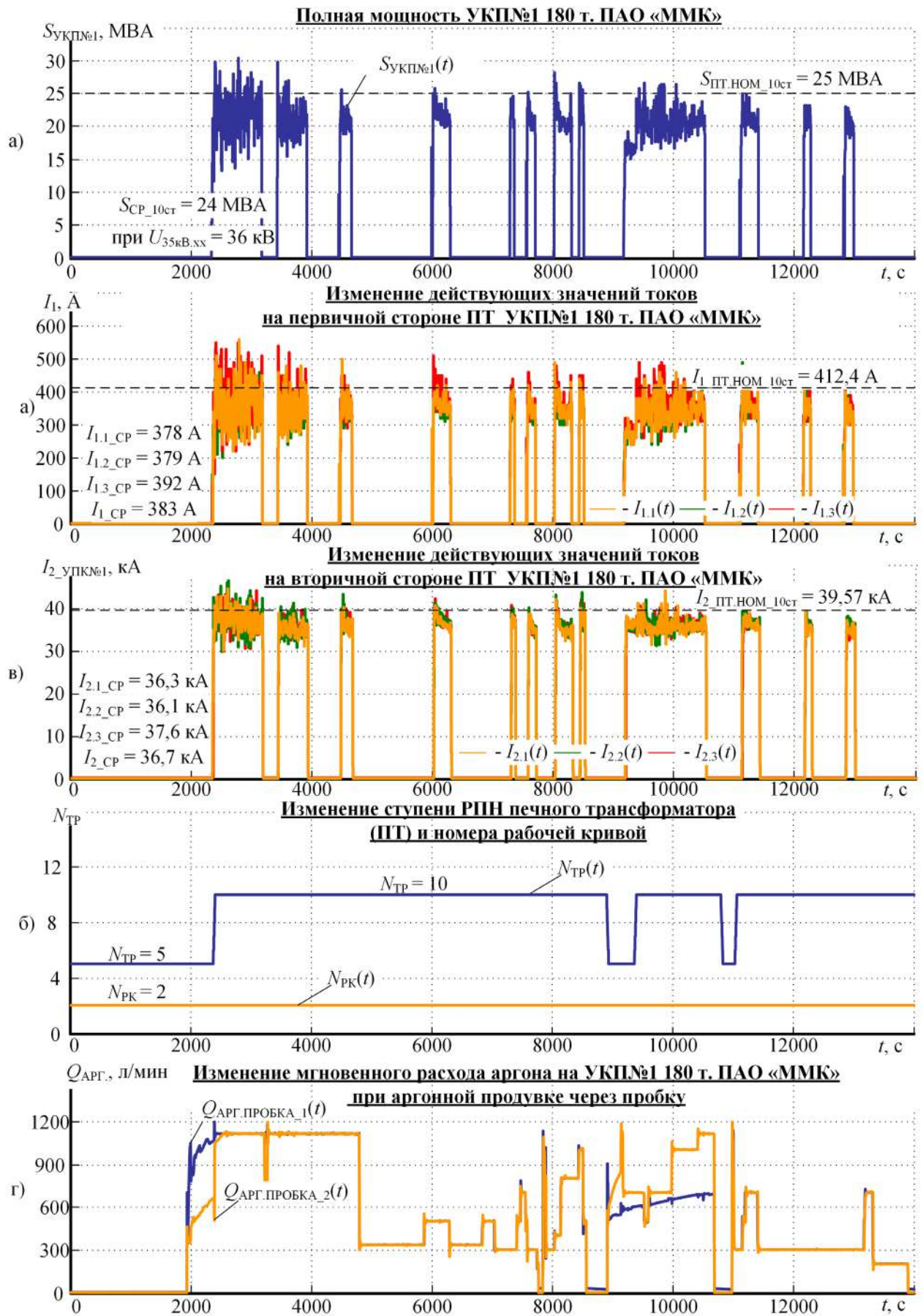


Рис. 2.13 - Изменение основных электрических и технологических параметров УКП№1 180 т. ПАО «ММК»

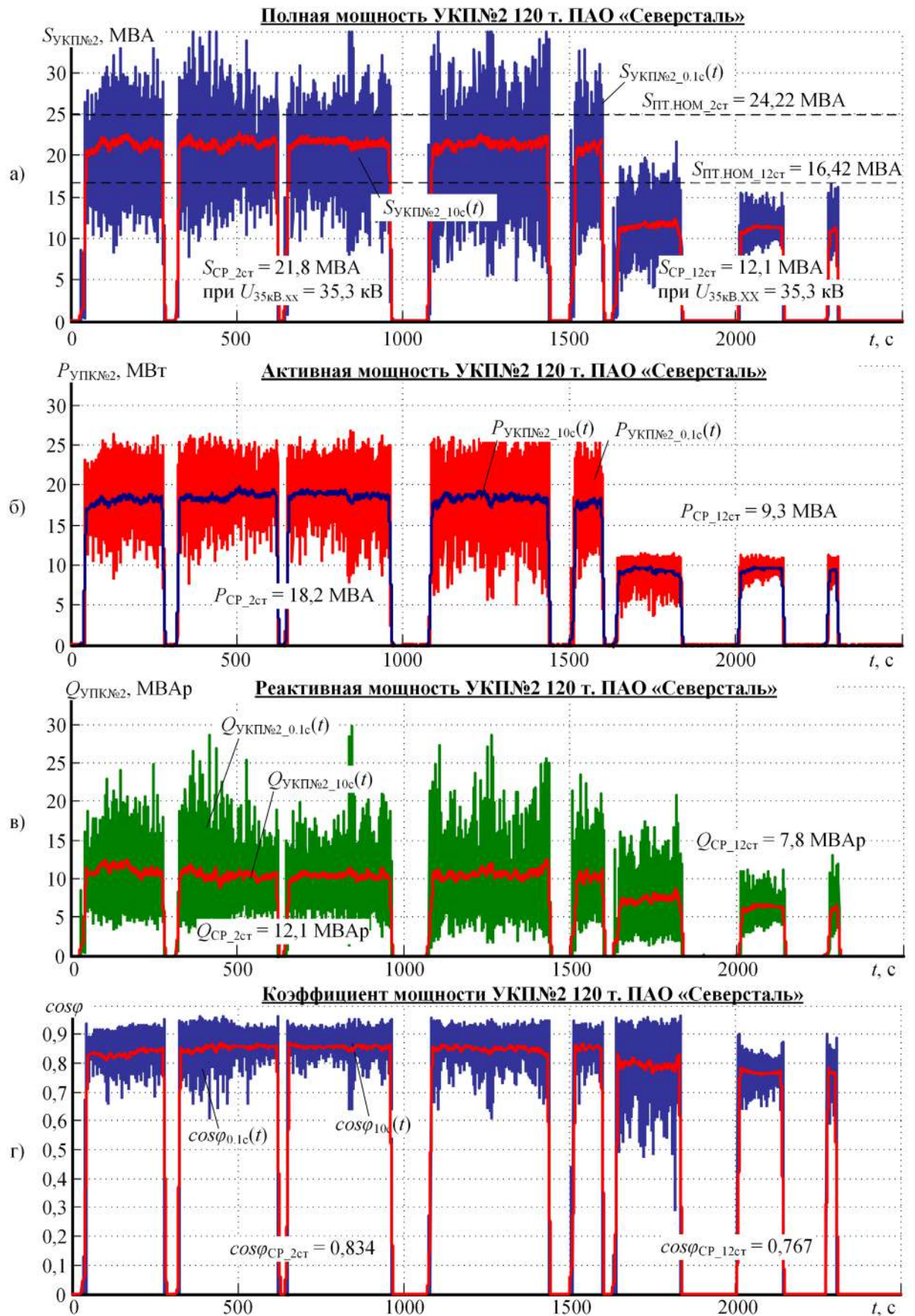


Рис. 2.14 - Изменение основных электрических и технологических параметров УКП№2 120 т. ПАО «Северсталь»

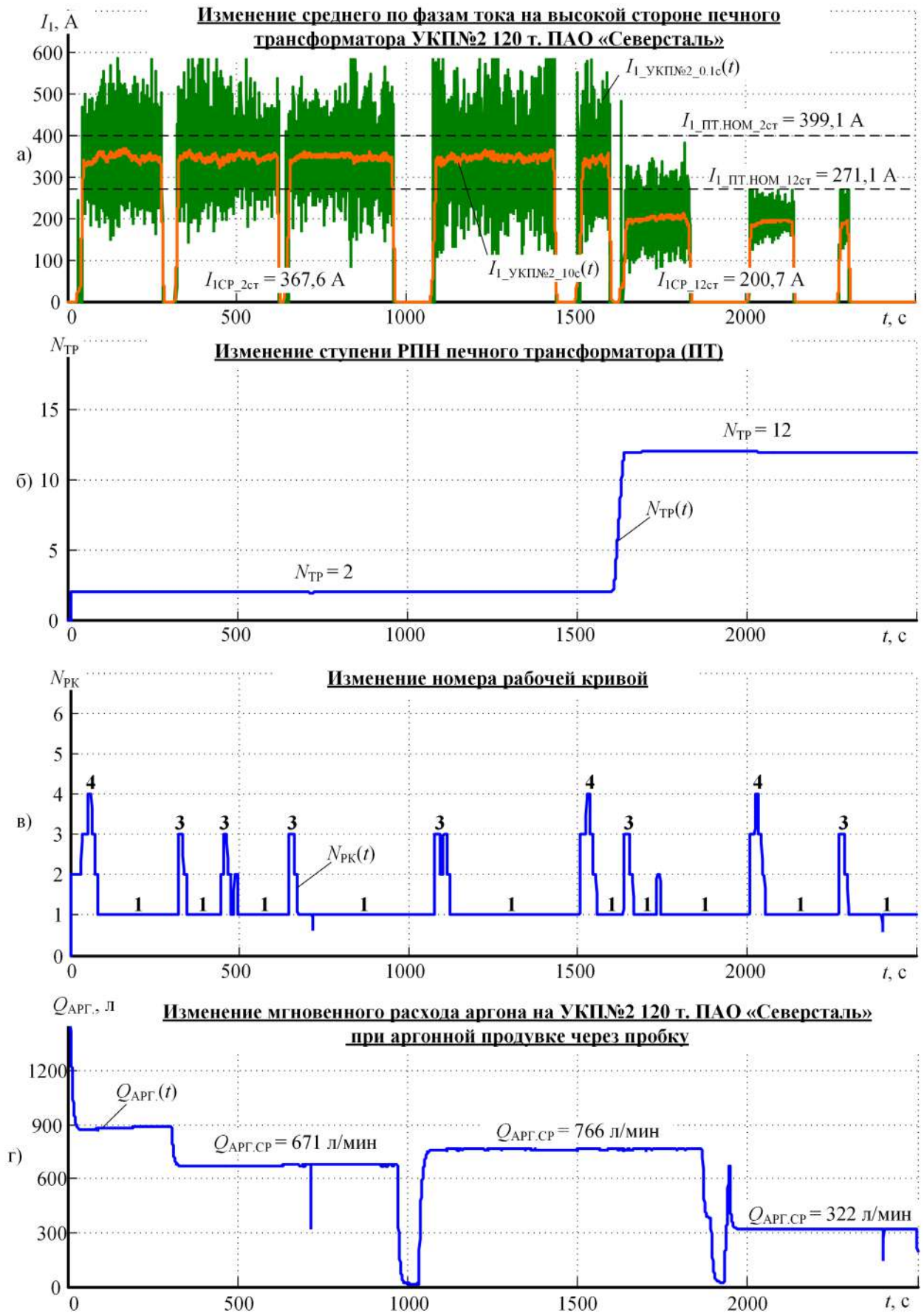


Рис. 2.15 - Изменение основных электрических и технологических параметров УКП№2 120 т. ПАО «Северсталь»

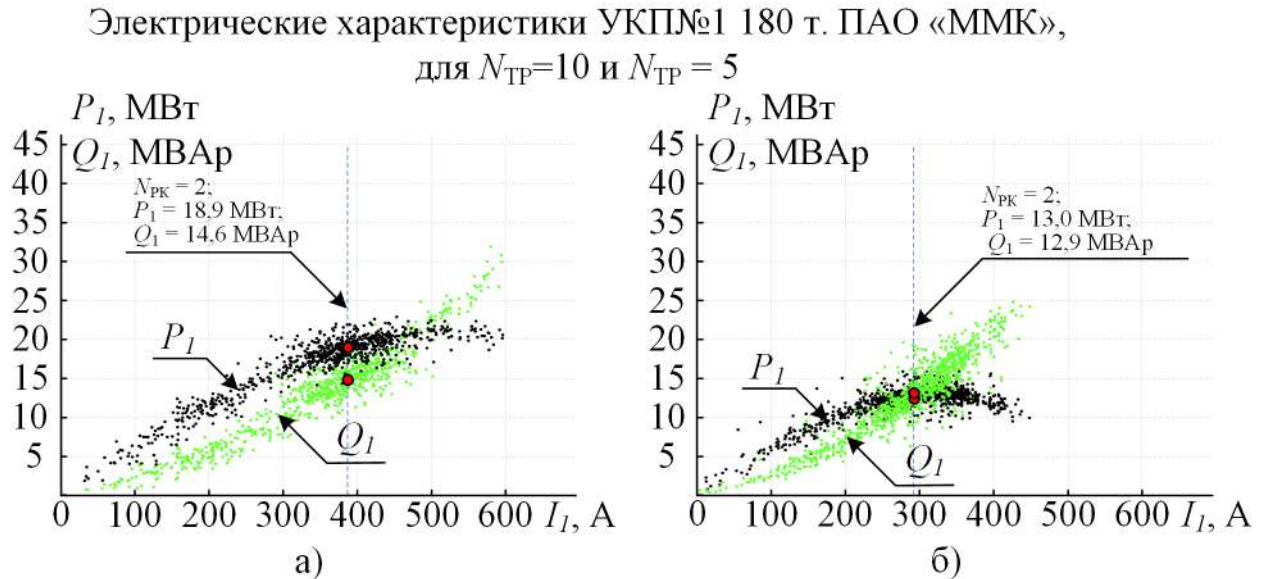


Рис. 2.16 - Экспериментальные зависимости $P_{УКП} = f(I_{1CP.})$ и $Q_{УКП} = f(I_{1CP.})$, полученные с использованием фактических областей рабочих точек УКП №1 180 т. ПАО «ММК»

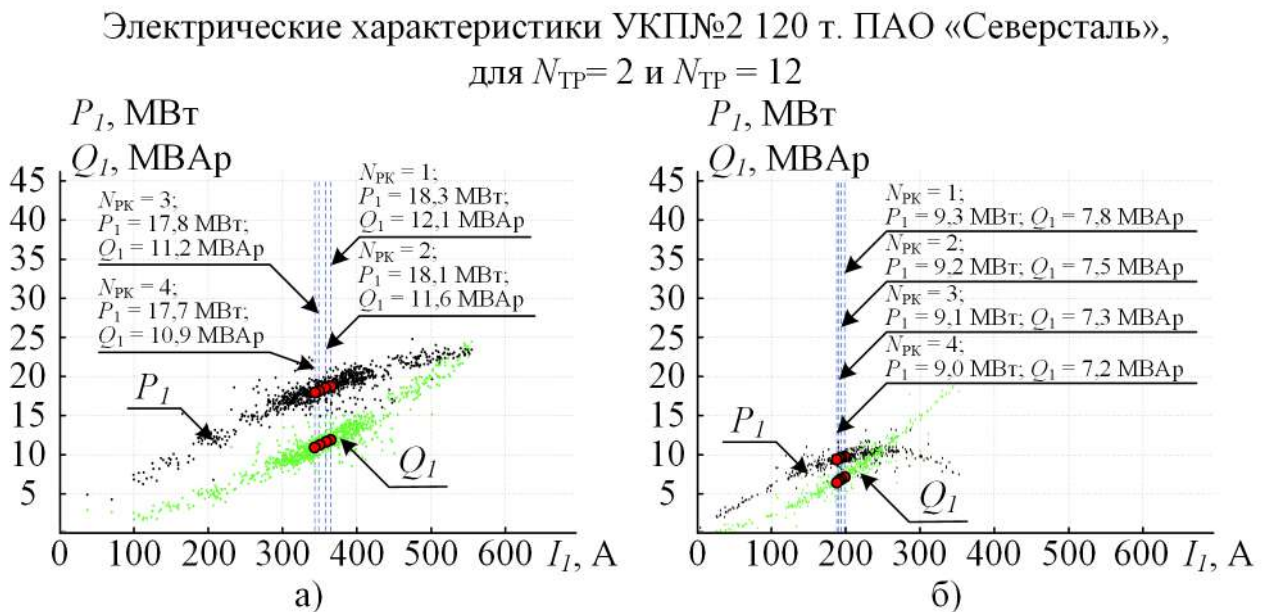


Рис. 2.17 - Экспериментальные зависимости $P_{УКП} = f(I_{1CP.})$ и $Q_{УКП} = f(I_{1CP.})$, полученные с использованием фактических областей рабочих точек УКП №2 180 т. ПАО «Северсталь»

Таким образом, исследование выявило, что на всех исследуемых УКП управление осуществляется в ручном режиме, при этом отсутствует динамическая адаптация электрических режимов к режимам аргонной продувки и шлаковому режиму [46]. Также определило направления для оптимизации: коррекция параметров существующих систем автоматического управления [47-50], а

также разработка и внедрение алгоритмов автоматического переключения ступеней РПН и рабочих кривых, учитывающих текущие условия проведения плавки, такие как аргонная продувка и шлаковый режим [51-54]. Однако, для полной оценки эффективности электрических режимов необходимо дополнительно провести анализ основных технологических характеристик исследуемых У КП с использованием математической модели.

2.2. Разработка математических моделей электротехнических комплексов «Питающая сеть – электрический контур У КП» для исследуемых У КП

Математические модели исследуемых У КП представляют собой важнейший исследовательский инструмент позволяющий детально анализировать процессы, протекающие в электрической части установки, прогнозировать поведение системы при различных режимах и разрабатывать усовершенствованные электрические режимы и алгоритмы управления, направленные на улучшение технико-экономических показателей. Таким образом моделирование электрического контура У КП должно осуществляться с учетом нелинейных свойств электрической дуги и условий ее горения, обеспечивая высокую точность прогнозирования.

Трёхфазный электрический контур У ПК включает в себя следующие структурные компоненты: эквивалентную питающую сеть, печной трансформатор, короткую сеть и непосредственно электрические дуги. Наиболее наглядным представлением электрического контура У ПК является схема замещения, представленная на рис. 2.18 [44,55,56].

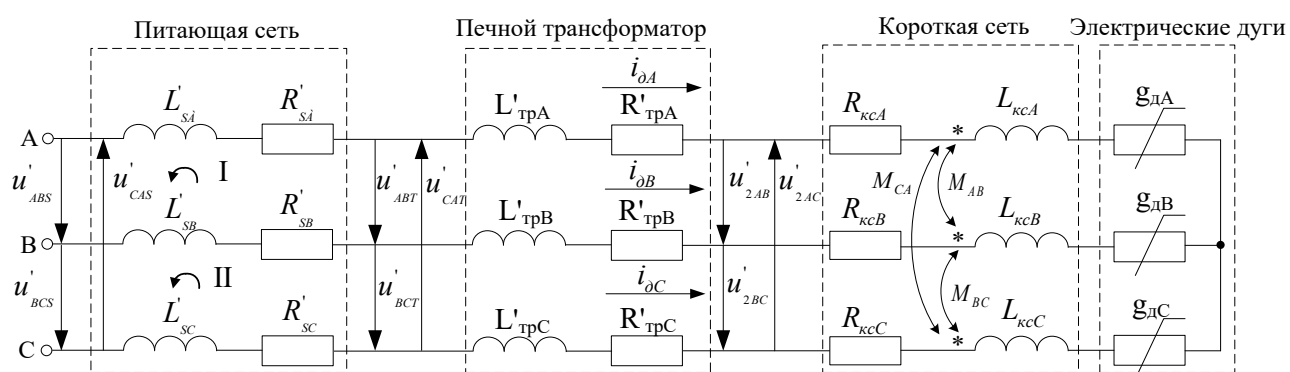


Рис.2.18 - Унифицированная схема замещения электрического контура У ПК

Для разработки математических моделей электрических контуров исследуемых УКП необходимо определить значения основных параметров их схем замещения (приведённых ко вторичной стороне печного трансформатора), таких как индуктивность и активное сопротивление питающей сети L'_S и R'_S , индуктивность и активное сопротивление обмотки печного трансформатора L'_{TP} и R'_{TP} , а также индуктивность и активное сопротивление участка короткой сети L'_{KC} и R'_{KC} . [56].

Величины R_S и X_S рассчитаем исходя из данных, полученных в ходе эксперимента короткого замыкания:

1. При питании от трансформатора 1Т 100 МВА:

$$I_{K3.CP} = \frac{I_{K3.MIN} + I_{K3.MAX}}{2} = \frac{12,8 + 8,28}{2} = 10,54 \text{ кА}, \quad (2.35)$$

$$X_S = \frac{U_{ЛНОМ}}{\sqrt{3} I_{K3.CP}} = \frac{35000}{\sqrt{3} \cdot 10540} = 1,92 \text{ Ом}, \quad (2.36)$$

$$R_S = 0,1 \cdot X_S = 0,1 \cdot 1,92 = 0,192 \text{ Ом} \quad (2.37)$$

Приведение параметров X_S и R_S к стороне низкого напряжения производится по формулам:

$$X'_S = \frac{X_S}{k_{TP}^2}, \quad (2.38)$$

$$R'_S = \frac{R_S}{k_{TP}^2}, \quad (2.39)$$

где X'_S и R'_S – индуктивное и активное сопротивления участка короткой сети, приведённые к вторичной стороне, k_{TP} – коэффициент трансформации [58].

Величина приведённой к вторичной стороне индуктивности участка короткой сети L'_S рассчитывается по формуле:

$$L'_S = \frac{X'_S}{2\pi f}, \quad (2.40)$$

где f – частота питающей сети (при расчётах принимается равной 50 Гц).

Расчёт параметров печного трансформатора производится на основании паспортных данных с использованием следующих формул для каждой отдельно взятой ступени [59]:

$$X_{TP} = \frac{U_{K\%} \cdot U_{ЛНОМ}^2 \cdot 10}{S_{НОМ}}, \quad (2.41)$$

где X_{TP} [Ом] - индуктивное сопротивление обмотки печного трансформатора (приведённое к первичной стороне), $U_{K\%}$ [%] – напряжение короткого замыкания, $U_{ЛНОМ}$ [кВ] – номинальное линейное напряжение на первичной стороне, $S_{НОМ}$ [кВА] – полная мощность;

$$R_{TP} = \frac{\Delta P_{K3} \cdot U_{ЛНОМ}^2 \cdot 1000}{S_{НОМ}^2}, \quad (2.42)$$

где R_{TP} [Ом] – активное сопротивление обмотки печного трансформатора (приведённое к первичной стороне), ΔP_{K3} [кВт] – величина потерь активной мощности в меди трансформатора в режиме КЗ [56].

Приведение значений R_{TP} , X_{TP} и L_{TP} к вторичной обмотке печного трансформатора осуществляется аналогично формулам 2.38 - 2.40.

Параметры L'_{KC} и R'_{KC} были рассчитаны на основании результатов серии опытов короткого замыкания. Результаты расчета представлены в таблице 2.12.

Для построения математической модели электрического контура УПК на основании первого и второго законов Кирхгофа для схемы замещения на рис.2.17 запишем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} u_{ABS}(t) = -i_{oA}(t)(R'_{SA} + R'_{TP_A} + R_{KC_A}) - \frac{di_{oA}(t)}{dt}(L'_{SA} + L'_{TP_A} + L_{KC_A}) + \frac{di_{oA}(t)}{dt}M_{AB} + \\ + i_{oB}(t)(R'_{SB} + R'_{TP_B} + R_{KC_B}) + \frac{di_{oB}(t)}{dt}(L'_{SB} + L'_{TP_B} + L_{KC_B}) - \frac{di_{oB}(t)}{dt}M_{AB} - u_{oA}(t) + u_{oB}(t) \\ u_{BCS} = -i_{oB}(t)(R'_{SB} + R'_{TP_B} + R_{KC_B}) - \frac{di_{oB}(t)}{dt}(L'_{SB} + L'_{TP_B} + L_{KC_B}) + \frac{di_{oB}(t)}{dt}M_{BC} + \\ + i_{oC}(t)(R'_{SC} + R'_{TP_C} + R_{KC_C}) + \frac{di_{oC}(t)}{dt}(L'_{SC} + L'_{TP_C} + L_{KC_C}) - \frac{di_{oC}(t)}{dt}M_{BC} - u_{oB}(t) + u_{oC}(t) \\ i_{oB}(t) = -i_{oA}(t) - i_{oC}(t) \end{cases} \quad (2.43)$$

Тогда структурная схема питающей сети 35 кВ и электрического контура будет иметь вид, представленный на рис.2.19.

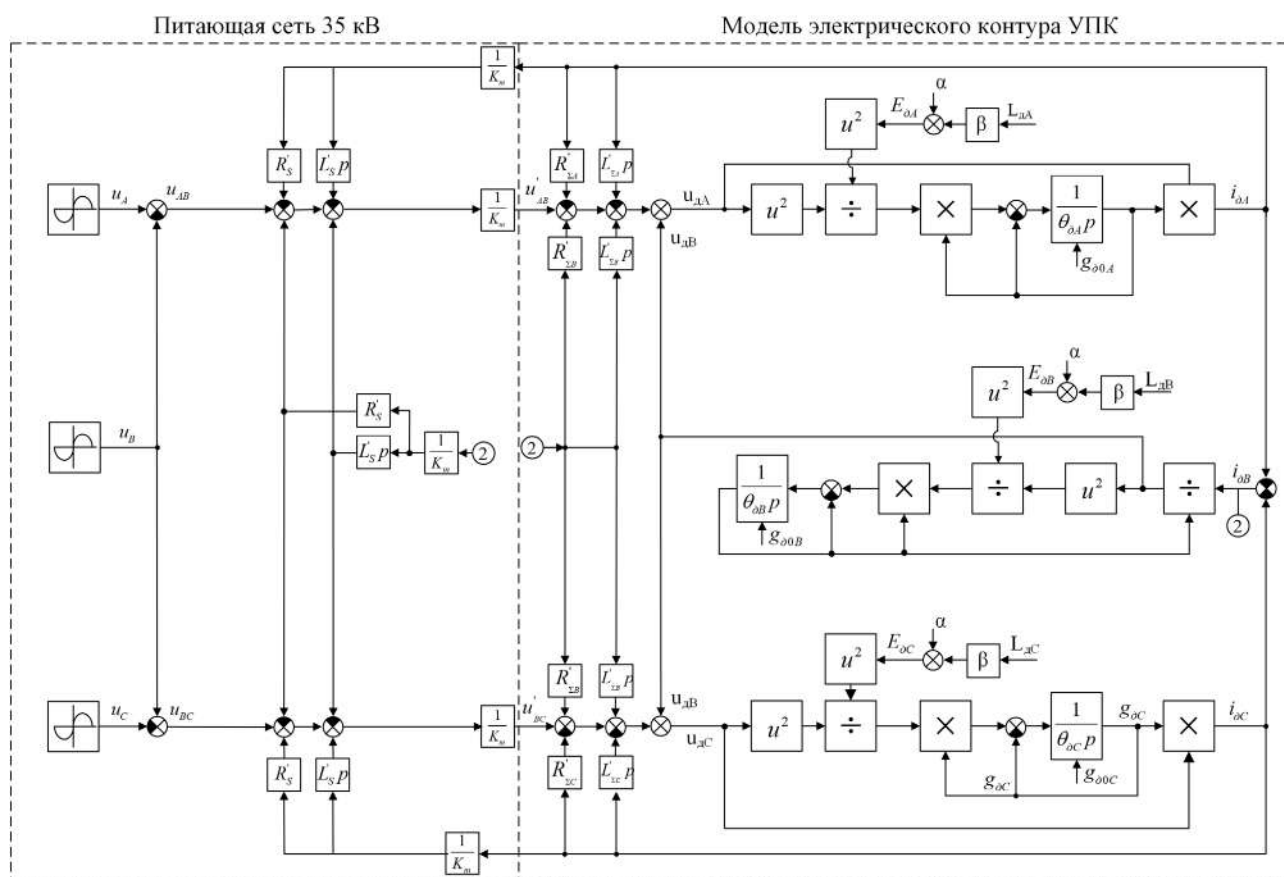


Рис. 2.19 - Универсальная структурная схема электрического контура УПК и питающей сети

При моделировании электросталеплавильных комплексов наибольшие трудности вызывает представление электрической дуги. В настоящее время сложилось три основных подхода к представлению электрической дуги:

1. Представление дуги переменным активным сопротивлением (R_d) [30,60]. Наиболее простой метод, использующий упрощенную однофазную схему замещения электрического контура печи. На основе этой схемы и векторной диаграммы выводятся аналитические формулы для расчета основных электрических параметров печи в зависимости от тока дуги. Однако этот метод базируется на серьезных допущениях, таких как симметрия горения дуг и синусоидальность токов и напряжений, что ограничивает его точность и не позволяет анализировать несимметричные или нелинейные режимы. Для повышения точности эту модель дополняют эмпирическими формулами для индуктивного сопротивления дуги (X_d) – моделями Боумана [2,61], Кёле [3,4] и Селада [62].

При этом в соответствии с исследованиями немецких ученых [2] модель Селада является наиболее точной из трех рассмотренных вариантов.

2. Представление напряжения дуги за время ее горения постоянным значением предложенный С.И. Тельным [57]. Данный метод представляет электрическую дугу как источник постоянного напряжения (противо-ЭДС E_d) в течение полупериода ее горения. Величина этой ЭДС зависит от падения напряжения у электродов и градиента напряжения вдоль столба дуги, умноженного на ее длину. Такой подход лучше учитывает несимметрию фаз и "вентильные" свойства дуги. Он также помогает понять явление неустойчивости дуги: при слишком большой длине дуги (и, следовательно, высоком E_d) и недостаточной индуктивности контура могут возникать прерывания тока (бестоковые паузы), что объясняет необходимость применения реакторов для стабилизации горения.

3. Представление электрической дуги нелинейным звеном описываемым нелинейным дифференциальным уравнением Касси [7, 59, 63-65]. Уравнение Касси связывает мгновенные значения проводимости дуги, напряжения на ней и противо-ЭДС.

$$\theta_d \frac{dg(t)}{dt} = \left(\frac{u_d^2(t)}{E_d^2} - 1 \right) g(t), \quad (2.44)$$

где θ_d - тепловая постоянная времени дуги, которая для УКП изменяется в течение плавки в пределах 3-5,5 мс [59, 64-66]; $g_d(t)$ – мгновенное значение проводимости дуги; $u_d(t)$ – мгновенное значение напряжения дуги [67].

Противо-ЭДС дуги E_d вычисляется по формуле:

$$E_d = \alpha + \beta L_d, \quad (2.45)$$

где α – падение напряжения в приэлектродных областях, β – градиент напряжения дугового столба, L_d – длина электрической дуги [мм] [68-72].

Отличительной особенностью данного уравнения является наличие в нем тепловой постоянной времени дуги (θ_d), которая отражает тепловую инерцию дугового столба и изменяется в зависимости от стадии плавки. Это позволяет моделировать динамические характеристики дуги с учетом условий ее горения.

Уравнение Касси, выведенное из энергетического баланса дуги, встраивается в общую систему дифференциальных уравнений, описывающих весь электрический контур печи, что дает возможность проводить наиболее полное и точное моделирование нелинейных и переходных процессов.

Таким образом, система уравнений, описывающая универсальную полную математическую модель электрического контура У КП, имеет следующую форму:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{\partial A}(t) = -u'_{ABS} - i_{\partial A}(t)(R'_{SA} + R'_{TP_A} + R_{KC_A}) - \frac{di_{\partial A}(t)}{dt}(L'_{SA} + L'_{TP_A} + L_{KC_A}) + \frac{di_{\partial A}(t)}{dt}M_{AB} + \\ + i_{\partial B}(t)(R'_{SB} + R'_{TP_B} + R_{KC_B}) + \frac{di_{\partial B}(t)}{dt}(L'_{SB} + L'_{TP_B} + L_{KC_B}) - \frac{di_{\partial B}(t)}{dt}M_{AB} + u_{\partial B}(t) \\ u_{\partial C}(t) = u'_{BCS} + i_{\partial B}(t)(R'_{SB} + R'_{TP_B} + R_{KC_B}) + \frac{di_{\partial B}(t)}{dt}(L'_{SB} + L'_{TP_B} + L_{KC_B}) - \frac{di_{\partial B}(t)}{dt}M_{BC} - \\ - i_{\partial C}(t)(R'_{SC} + R'_{TP_C} + R_{KC_C}) - \frac{di_{\partial C}(t)}{dt}(L'_{SC} + L'_{TP_C} + L_{KC_C}) + \frac{di_{\partial C}(t)}{dt}M_{BC} + u_{\partial B}(t) \\ i_{\partial B}(t) = -i_{\partial A}(t) - i_{\partial C}(t) \\ U_{\partial B}(t) = \frac{i_{\partial B}(t)}{g_{\partial B}(t)} \\ \theta_{\partial A} \frac{dg_{\partial A}(t)}{dt} = \left(\frac{U_{\partial A}^2(t)}{E_{\partial A}^2} - 1 \right) g_{\partial A}(t) \\ \theta_{\partial B} \frac{dg_{\partial B}(t)}{dt} = \left(\frac{U_{\partial B}^2(t)}{E_{\partial B}^2} - 1 \right) g_{\partial B}(t) \\ \theta_{\partial C} \frac{dg_{\partial C}(t)}{dt} = \left(\frac{U_{\partial C}^2(t)}{E_{\partial C}^2} - 1 \right) g_{\partial C}(t) \\ E_{\partial A} = \alpha_A + \beta_A L_{\partial A} \\ E_{\partial B} = \alpha_B + \beta_B L_{\partial B} \\ E_{\partial C} = \alpha_C + \beta_C L_{\partial C} \end{array} \right. \quad (2.46)$$

Помимо модели электрического контура и питающей сети для адекватной оценки статических и динамических характеристик У КП необходимо разработать математические модели систем управления электрическим режимом и перемещением электродов с учетом нелинейных свойств гидроприводов.

Один из подходов к моделированию основан на фундаментальных законах гидравлики и механики [22, 73-78]. В этом случае система описывается набором дифференциальных уравнений, учитывающих основные физические процессы, при этом вводится ряд допущений: а) сервоклапан рассматривается как однокас-

кадный; б) не учитываются волновые процессы в трубопроводе между аккумулятором, сервоклапаном и гидроцилиндром; в) не учитываются нелинейные характеристики сервоклапана (кроме основной характеристики расхода); г) зоной нечувствительности сервоклапана пренебрегаем; д) не учитывается сухое трение в механических элементах; е) давление в трубопроводе постоянно; ж) объем поршневой полости постоянен. С учетом принятых допущений математическая модель гидропривода описывается тремя линеаризованными дифференциальными уравнениями:

1. Уравнение расхода: описывает баланс расхода жидкости в поршневой полости гидроцилиндра, учитывая движение поршня, сжимаемость жидкости (через объемный модуль упругости) и возможные утечки, пропорциональные давлению.

$$Q' = S_{\Gamma} \frac{dS_{\Pi}}{dt} + \frac{V_{\Pi\Pi}}{E} \frac{dP_{\Gamma}}{dt} + k_y P_{\Gamma} \quad (2.47)$$

где S_{Γ} – площадь поршня гидроцилиндра; S_{Π} – положение поршня гидроцилиндра; $V_{\Pi\Pi}$ – объем поршневой полости при положении поршня принятого за начальное; E – объемный модуль упругости рабочей жидкости; P_{Γ} – давление в поршневой полости; k_y – коэффициент утечек, при условии, что расход вследствие утечек пропорционален давлению в поршневой полости.

2. Линеаризованное уравнение сервоклапана: моделирует динамику сервоклапана, связывая управляющее напряжение с фактическим расходом рабочей жидкости. Используется модель первого порядка с постоянной времени, учитывающая инерционность клапана, и его регулировочная характеристика (зависимость расхода от управляющего сигнала).

$$T_{CK} \frac{dQ'}{dt} + Q' = Q(u_v) \quad (2.48)$$

где T_{CK} – постоянная времени сервоклапана; u_v – напряжение управления (напряжение на входе усилителя, задающего управляющий ток в электромагнитную катушку сервоклапана); $Q(u_v)$ – нелинейная регулировочная характеристика сер-

воклапана, полученная экспериментальным способом или принятая из паспортных данных гидропривода; Q' – фактический расход рабочей жидкости.

3. Уравнение усилий механических элементов гидропривода: представляет собой применение второго закона Ньютона к подвижным частям системы (электрод, шток поршня, приведенная масса жидкости). Оно уравнивает силу давления жидкости в гидроцилиндре с силами инерции (учитывающими суммарную массу) и силами вязкого трения, пропорциональными скорости перемещения.

$$P_{\Gamma} S_{\Gamma} = m_{\Sigma} \frac{d^2 S_{\Pi}}{dt^2} + b \frac{dS_{\Pi}}{dt} + G_{\Sigma, \text{мех}} \quad (2.49)$$

где m_{Σ} – суммарная масса электрода, поршневого элемента, а также масса жидкости в трубопроводе от аккумулятора до гидроцилиндра, приведенная к площади поршня; b – коэффициент вязкого трения, определяющий величину силы трения, пропорциональной скорости перемещения поршня гидроцилиндра и возникающий между стенками гидроцилиндра и поршнем.

Для составления структурной схемы гидропривода перемещения электродов уравнения (2.47) – (2.49) записываются в операторной форме и получается следующая система уравнений:

$$\begin{cases} Q'(p) = \frac{Q'(u_y(p))}{T_{\text{ск}} p + 1} \\ P_{\Gamma}(p) = \frac{1/k_y (Q'(p) - S_{\Pi}(p) S_{\Gamma} p)}{(V_{\text{мн}}/k_y) p + 1} \\ S_{\Pi}(p) = \frac{1/b (P_{\Gamma}(p) S_{\Gamma} - Q'(p))}{p \left(\frac{m_{\Sigma}}{b} p + 1 \right)} \end{cases} \quad (2.50)$$

Эта система уравнений позволяет построить структурную схему гидропривода, наглядно представляющую взаимосвязи между его элементами и сигналами. Структурная схема гидропривода перемещения электродов, построенная в соответствии с системой уравнений (2.50), представлена на рис.2.20.

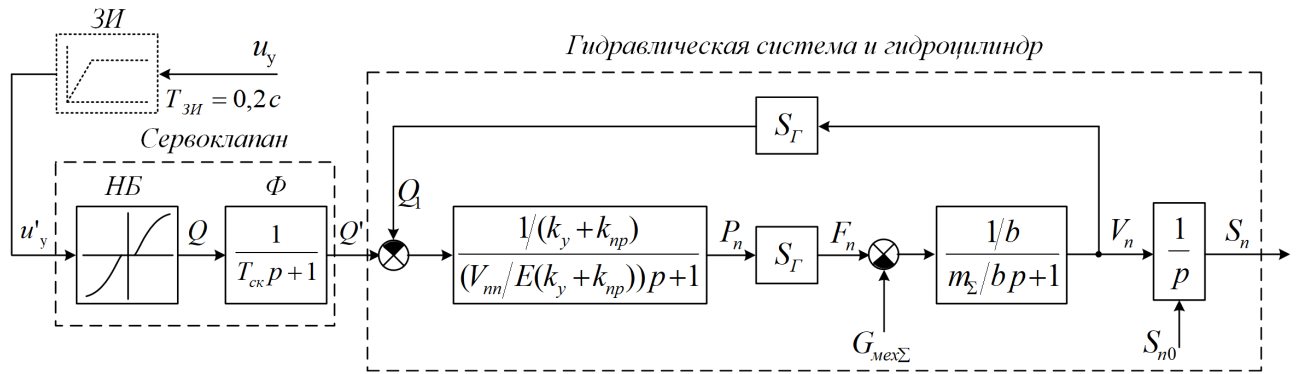


Рис. 2.20 - Структурная схема гидропривода перемещения электродов УКП

Для многих практических задач может применяться упрощенный подход к моделированию [22,73-78]. Он базируется на экспериментально полученной статической характеристике гидропривода перемещения электродов, связывающей скорость перемещения электрода с управляющим сигналом $V_{эл} = f(u_y)$. Используя данную экспериментальную характеристику, можно существенно упростить структурную схему гидропривода перемещения электрода (рис. 2.21).

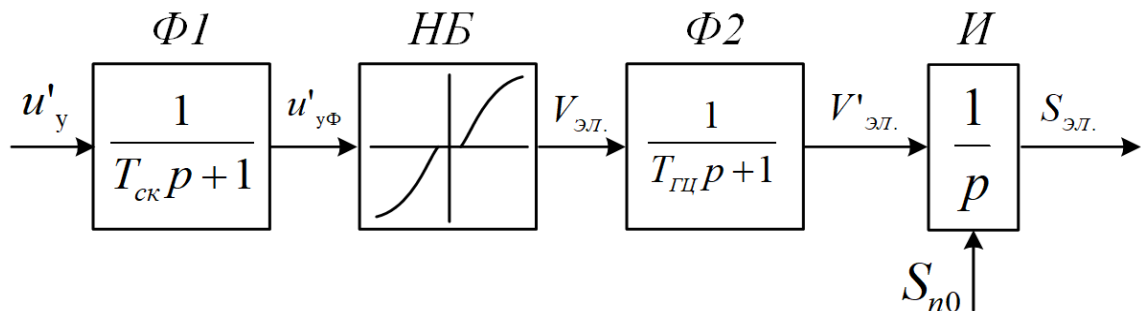


Рис. 2.21 - Упрощенная модель гидропривода перемещения электрода

В данном случае в структурной схеме используются два апериодических звена первого порядка $\Phi 1$ и $\Phi 2$ с постоянными времени $T_{ск}$ и $T_{ГЦ}$, учитывающие инерционные свойства сервоклапана и гидроцилиндра, а также интегрирующее звено $И$, осуществляющее преобразование скорости электрода $V_{эл}$ в его перемещение $S_{эл}$. Апериодическое звено $\Phi 2$ получается путем эквивалентного преобразования исходной структурной схемы гидравлической системы и гидроцилиндра (рис.2.20), в результате которого за счет пренебрежения малыми постоянными времени полинома знаменателя результирующего динамического звена можно прийти к апериодическому звену первого порядка с постоянной времени $T_{ГЦ}$. Данный подход существенно упрощает задачу математического моделирования гидропривода и обеспечивает приемлемую точность рас-

четов при исследовании систем автоматического управления перемещением электродов.

Поскольку математические модели исследуемых У КП являются важным исследовательским инструментом и к ним предъявляется требование точного прогнозирования электрических режимов электросталеплавильных агрегатов, то необходимо выполнить проверку адекватности разработанных математических моделей.

Адекватность разработанных моделей может быть подтверждена результатами статистической оценки. В частности, проверкой гипотезы о том, что моделируемая рабочая точка попадает в доверительный интервал оценки математического ожидания экспериментального массива как по среднему значению токов, так и по суммарным значениям активной и реактивной мощностей на первичной стороне печного трансформатора.

С этой целью с помощью моделей были получены характеристики зависимостей суммарной активной и реактивной мощностей от значения первичного тока $(P_1, Q_1) = f(I_1)$. На графики этих зависимостей были нанесены моделируемые рабочие точки, после чего на них накладывались экспериментальные массивы данных (рис.2.22 – 2.25).

Объемы выборок для анализа составили:

1) Для У КП №1 (180 т, ПАО «ММК»): $n=522$ для ступени напряжения $N_{TP}=10$ и $n=566$ для $N_{TP}=5$.

2) Для У КП №2 (120 т, ПАО «Северсталь»): $n=252$ для $N_{TP}=2$ и $n=273$ для $N_{TP}=12$.

Границы доверительного интервала были определены в соответствии со следующими выражениями:

$$\bar{P}_{1.CP} - z_{\alpha} \frac{\sigma_P}{\sqrt{n}} < \mu_P < \bar{P}_{1.CP} + z_{\alpha} \frac{\sigma_P}{\sqrt{n}}, \quad (2.51)$$

$$\bar{Q}_{1.CP} - z_{\alpha} \frac{\sigma_Q}{\sqrt{n}} < \mu_Q < \bar{Q}_{1.CP} + z_{\alpha} \frac{\sigma_Q}{\sqrt{n}}, \quad (2.52)$$

$$\bar{I}_{1.CP} - z_{\alpha} \frac{\sigma_I}{\sqrt{n}} < \mu_I < \bar{I}_{1.CP} + z_{\alpha} \frac{\sigma_I}{\sqrt{n}}, \quad (2.53)$$

где $\bar{P}_{1.CP}$, $\bar{Q}_{1.CP}$, $\bar{I}_{1.CP}$ - несмещённая оценка математического ожидания экспериментального массива по суммарным значениям активной и реактивной мощ-

ностей и среднему току; Z_{α} – критическое значение стандартного нормального распределения (для уровня значимости $\alpha=0,05$ составляет 1,96); n – объём выборки; μ_P , μ_Q , μ_I – математическое ожидание экспериментального массива по суммарным значениям активной и реактивной мощностей и среднему току.

В результате, для $N_{TP}=10$ и $N_{PK}=2$ УКП №1 ПАО «ММК» получены следующие доверительные интервалы для экспериментального массива данных:

$$18,74 \text{ МВт} < \mu_P < 19,01 \text{ МВт}, \quad (2.54)$$

$$14,34 \text{ МВАр} < \mu_Q < 14,89 \text{ МВАр}, \quad (2.55)$$

$$378,41 \text{ А} < \mu_I < 388,04 \text{ А}. \quad (2.56)$$

Для сочетания $N_{TP}=5$ и $N_{PK}=2$, получены следующие доверительные интервалы:

$$12,88 \text{ МВт} < \mu_P < 13,03 \text{ МВт}, \quad (2.57)$$

$$12,65 \text{ МВАр} < \mu_Q < 13,09 \text{ МВАр}, \quad (2.58)$$

$$293,65 \text{ А} < \mu_I < 299,39 \text{ А}. \quad (2.59)$$

Для $N_{TP}=2$ и $N_{PK}=1$ УКП №2 ПАО «Северсталь» получены следующие доверительные интервалы для экспериментального массива данных:

$$18,09 \text{ МВт} < \mu_P < 18,51 \text{ МВт}, \quad (2.60)$$

$$11,85 \text{ МВАр} < \mu_Q < 12,39 \text{ МВАр}, \quad (2.61)$$

$$362,24 \text{ А} < \mu_I < 372,90 \text{ А}. \quad (2.62)$$

Для сочетания $N_{TP}=12$ и $N_{PK}=1$, получены следующие доверительные интервалы:

$$9,17 \text{ МВт} < \mu_P < 9,37 \text{ МВт}, \quad (2.63)$$

$$7,56 \text{ МВАр} < \mu_Q < 8,00 \text{ МВАр}, \quad (2.64)$$

$$197,27 \text{ А} < \mu_I < 204,09 \text{ А}. \quad (2.65)$$

Для наглядности, на рис.2.22-2.25 показаны характеристики, полученные на математических моделях исследуемых УКП с наложением экспериментально полученного массива точек, также на графики были нанесены границы доверительных интервалов и рабочие точки. Как видно из представленных графиков, рабочие точки находятся в границах рассчитанных доверительных интервалов, что свидетельствует об адекватности разработанных математических моделей.

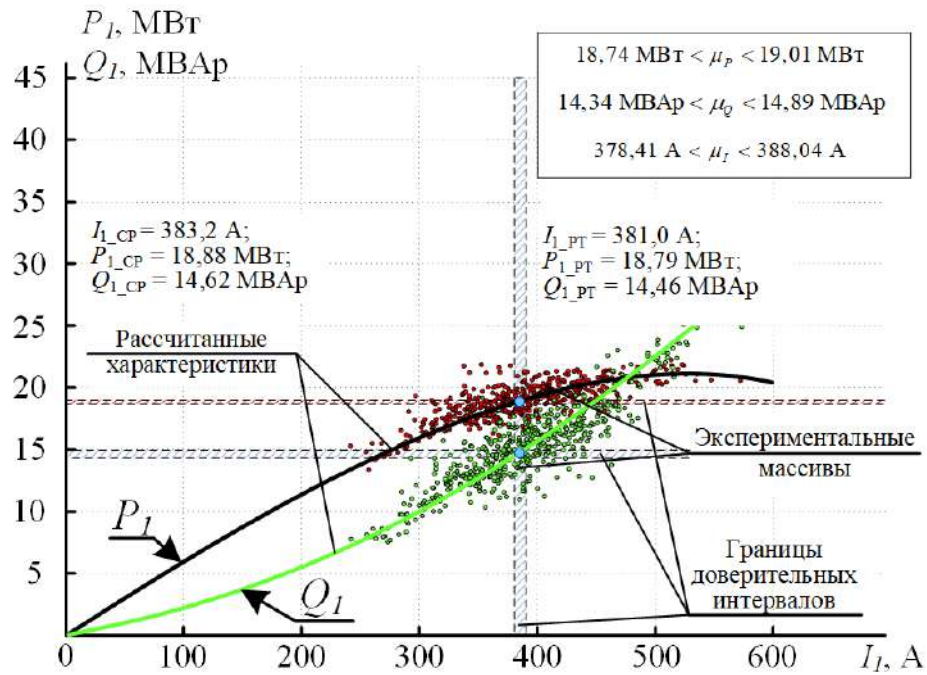


Рис.2.22 - Характеристики $P_I(I_I)$ и $Q_I(I_I)$ с рабочими точками, полученными на математической модели, с нанесением фактических областей распределения рабочих точек и доверительных интервалов

для $N_{TP}=10$ и $N_{PK}=2$ УКП №1 180т ПАО «ММК»

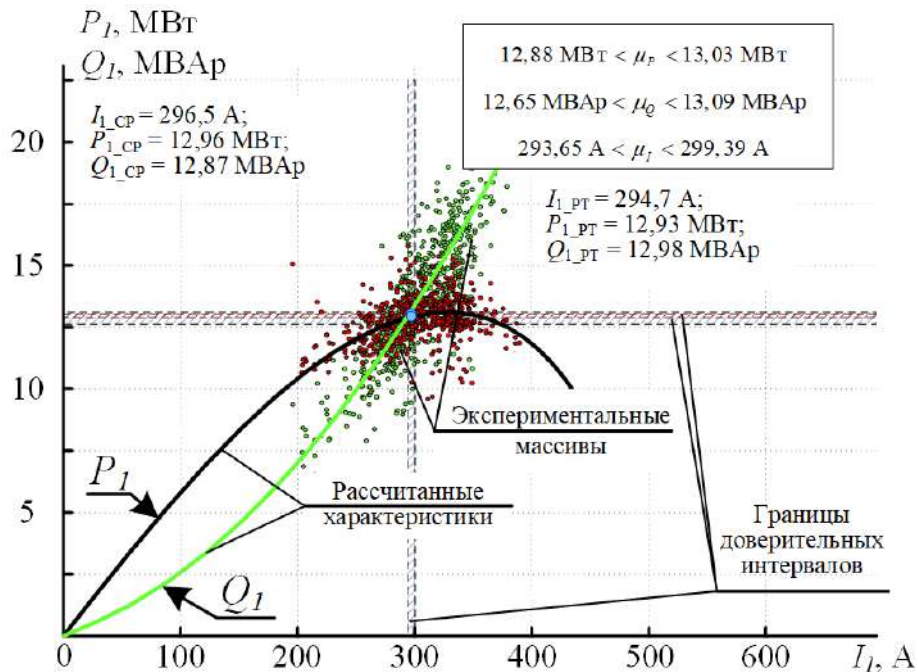


Рис.2.23 - Характеристики $P_I(I_I)$ и $Q_I(I_I)$ с рабочими точками, полученными на математической модели, с нанесением фактических областей распределения рабочих точек и доверительных интервалов

для $N_{TP}=5$ и $N_{PK}=2$ УКП №1 180т ПАО «ММК»

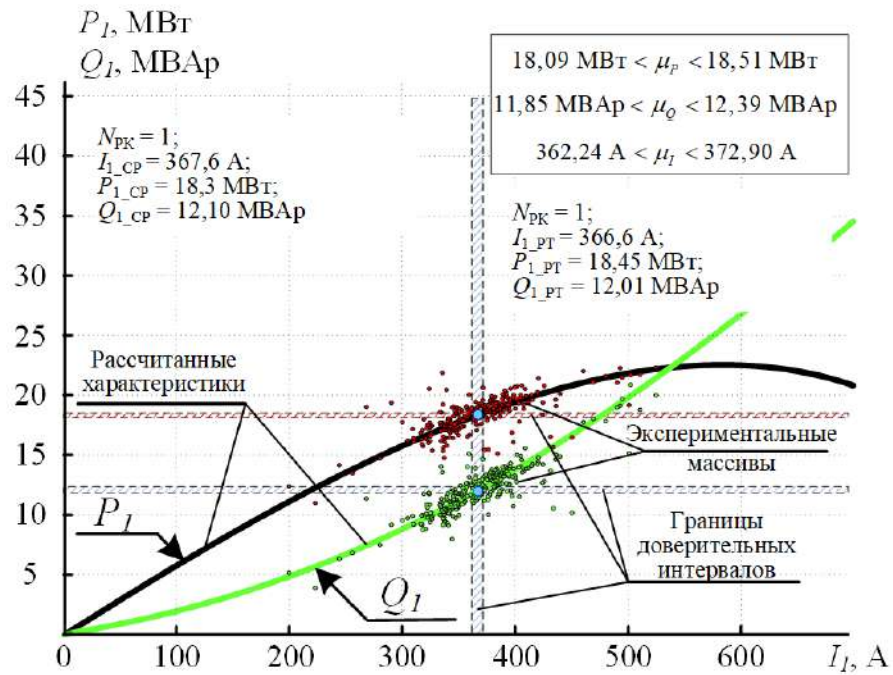


Рис.2.24 - Характеристики $P_I(I_I)$ и $Q_I(I_I)$ с рабочими точками, полученными на математической модели, с нанесением фактических областей распределения рабочих точек и доверительных интервалов

для $N_{TP}=2$ и $N_{PK}=1$ УКП №2 120т ПАО «Северсталь»

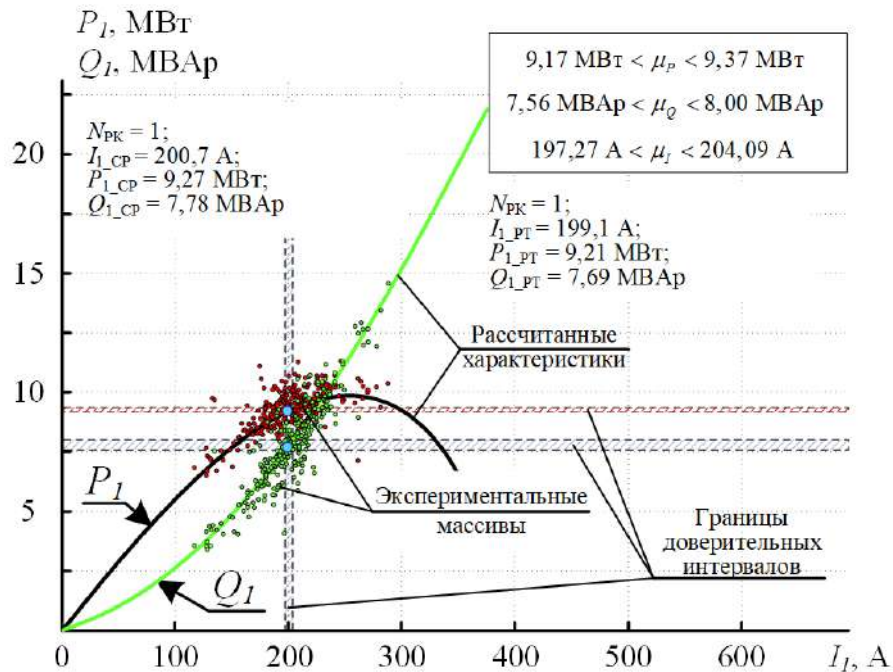


Рис.2.25 - Характеристики $P_I(I_I)$ и $Q_I(I_I)$ с рабочими точками, полученными на математической модели, с нанесением фактических областей распределения рабочих точек и доверительных интервалов

для $N_{TP}=12$ и $N_{PK}=1$ УКП №2 120т ПАО «Северсталь»

2.3. Расчет электрических и технологических характеристик исследуемых УКП

Разработанные математические модели исследуемых агрегатов имеют достаточную точность и позволяют провести детальный анализ имеющихся электрических режимов исследуемых агрегатов.

Для заданных значений уставок (таблица 2.15 и таблица 2.16) был проведён расчёт электрических характеристик печи $P_I=f(I_D)$, $Q_I=f(I_D)$, $S_I=f(I_D)$, $\Delta P_I=f(I_D)$, $P_D=f(I_D)$, $KI=f(I_D)$ и $KIH=f(I_D)$ на математической модели с последующим нанесением рабочих точек (рис.2.26 – 2.34). Значения основных электрических и технологических параметров для каждой рабочей точки представлены в приложении 1.

В случае представления электрической дуги нелинейным звеном, описываемым уравнением Касси, ток дуги, также, как и ток, потребляемый из сети, становятся несинусоидальными. При этом расчет основных параметров электрического контура для одной фазы ДСП выполняют следующим образом [7, 30, 60, 79-82]:

Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора определяется по формуле:

$$S = U'_{1\phi} I_D = \sqrt{P^2 + Q_s^2} = \sqrt{P_1^2 + (Q_{(1)}^2 + T^2)}, \quad (2.66)$$

где $U'_{1\phi}$ и I_D – действующие (среднеквадратичные) значения приведенного питающего напряжения и тока дуги; Q_s – эквивалентная реактивная мощность контура; $Q_{(1)}$ – реактивная мощность, вычисленная по первым гармоникам напряжения и тока; T – мощность искажений, обусловленная высшими гармониками тока; Q_s – эквивалентная реактивная мощность контура.

Активная мощность на первичной стороне ПТ определяется по формуле:

$$P_1 = \frac{1}{T} \int_0^T U'_{1\phi}(t) I_D(t) dt, \quad (2.67)$$

где $U'_{1\phi}(t)$ и $I_d(t)$ – мгновенные значения фазного напряжения на первичной стороне ПТ и тока дуги; T – период (для промышленной частоты 50 Гц составляет 0,02 с).

Активная мощность электрической дуги P_d определяется по формуле:

$$P_d = \frac{1}{T} \int_0^T U_d(t) I_d(t) dt = P_2 - \Delta P, \quad (2.68)$$

где $U_d(t)$ и $I_d(t)$ – мгновенные значения напряжения и тока электрической дуги; P_2 – активная мощность на вторичной стороне печного трансформатора; ΔP – потери активной мощности на участке короткой сети; T – период (для промышленной частоты 50 Гц составляет 0,02 с).

Параметры P_2 и ΔP определяются в соответствии со следующими выражениями:

$$P_2 = \frac{1}{T} \int_0^T U_{2\phi}(t) I_d(t) dt, \quad (2.69)$$

$$\Delta P = I_d^2 \cdot R_{КС}, \quad (2.70)$$

где $U_{2\phi}(t)$ – мгновенное значение фазного напряжения на вторичной стороне печного трансформатора, $I_d(t)$ – мгновенное значение тока электрической дуги; T – период (для промышленной частоты 50 Гц составляет 0,02 с).

Коэффициент излучения КИ определяется в соответствии со следующим выражением:

$$КИ = P_d U_d, \quad (2.71)$$

где U_d и P_d – действующие (среднеквадратичные) значения активной мощности и напряжения электрической дуги.

В свою очередь, коэффициент интенсивности нагрева КИН определяется следующим образом:

$$КИН = P_d I_d, \quad (2.72)$$

Ниже, на рис 2.26 – 2.34 приведены графики основных электрических и технологических характеристик исследуемых агрегатов для основных ступеней напряжения ПТ при исходных электрических режимах.

Расположение рабочих точек на электрических характеристиках
УКП№1 180 т ПАО «ММК»,
для $N_{TP}=5$ при $N_{PK}=1 \div 3$, при исходных настройках

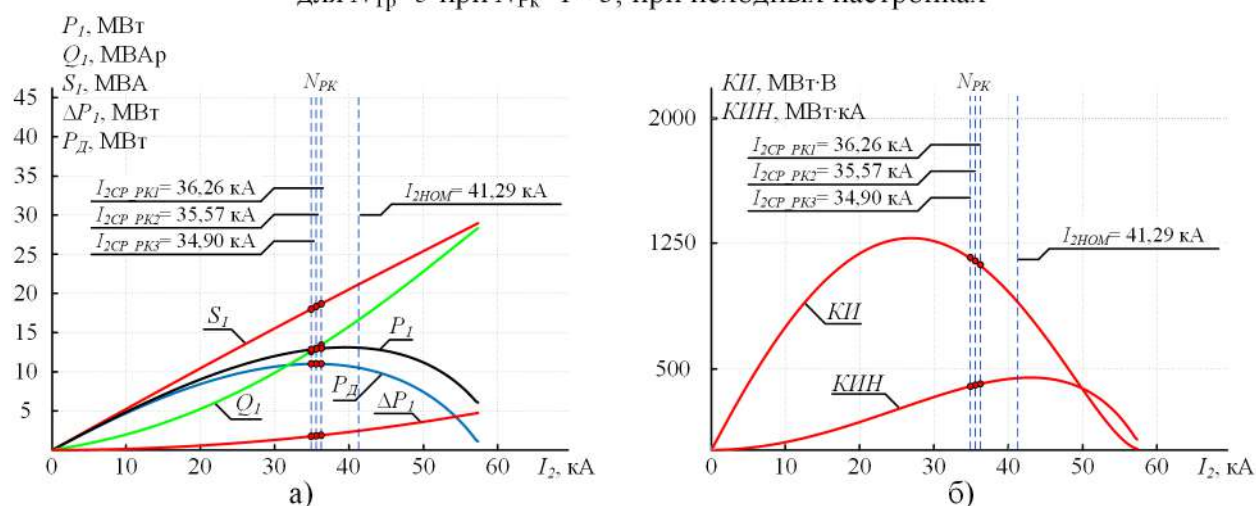


Рис.2.26 – Графики основных электрических характеристик с расположением рабочих точек, полученные на математической модели, для $N_{TP}=5$ и $N_{PK}=1 - 3$ УКП№1 180т ПАО «ММК»

Расположение рабочих точек на электрических характеристиках
УКП№1 180 т ПАО «ММК»,
для $N_{TP}=8$ при $N_{PK}=1 \div 3$, при исходных настройках

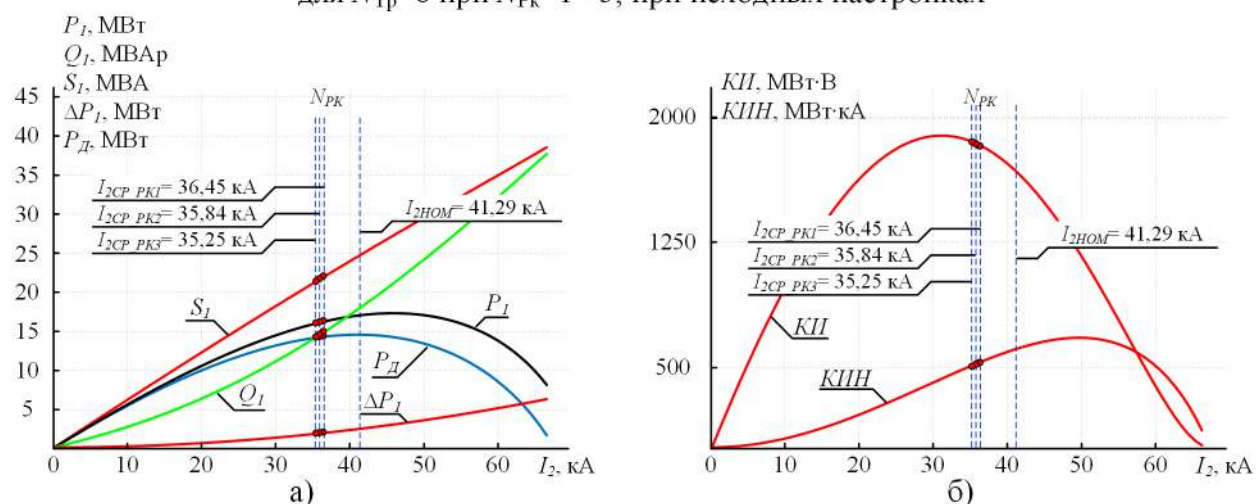


Рис.2.27 – Графики основных электрических характеристик с расположением рабочих точек, полученные на математической модели, для $N_{TP}=8$ и $N_{PK}=1 - 3$ УКП№1 180т ПАО «ММК»

Расположение рабочих точек на электрических характеристиках
УКП №1 180 т ПАО «ММК»,
для $N_{TP}=9$ при $N_{PK}=1 \div 3$, при исходных настройках

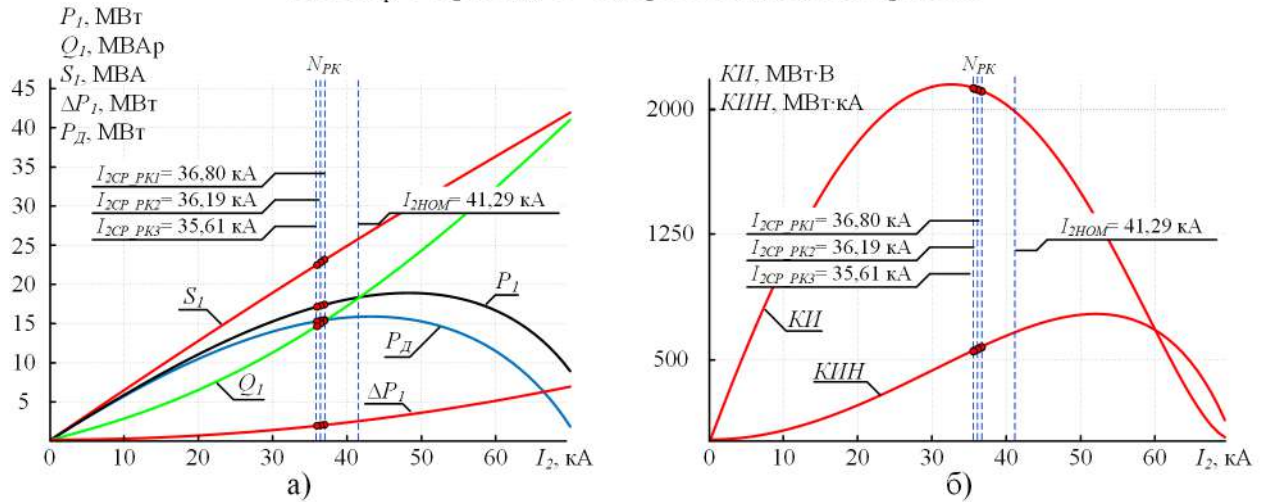


Рис.2.28 – Графики основных электрических характеристик с расположением рабочих точек, полученные на математической модели, для $N_{TP}=9$ и $N_{PK}=1 - 3$
УКП №1 180т ПАО «ММК»

Расположение рабочих точек на электрических характеристиках
УКП №1 180 т ПАО «ММК»,
для $N_{TP}=10$ при $N_{PK}=1 \div 3$, при исходных настройках

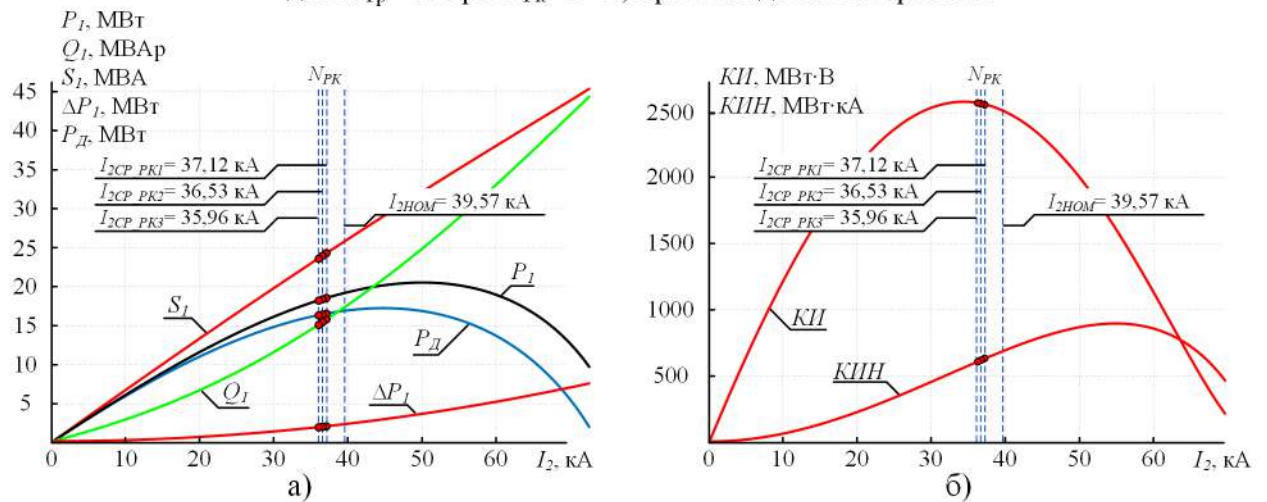


Рис.2.29 – Графики основных электрических характеристик с расположением рабочих точек, полученные на математической модели, для $N_{TP}=10$ и $N_{PK}=1 - 3$
УКП №1 180т ПАО «ММК»

Представленные графики наглядно демонстрируют, что исходные электрические режимы УКП №1 ПАО «ММК» сформированы по классической методике. Такая настройка предполагает расположение рабочих точек вблизи пи-

ка активной мощности электрических дуг, что, как правило, считается оптимальным для работы УКП.

Расположение рабочих точек на электрических характеристиках
УКП №2 120 т ПАО «Северсталь»,
для $N_{TP}=2$ при $N_{PK}=1 \div 6$, при исходных настройках

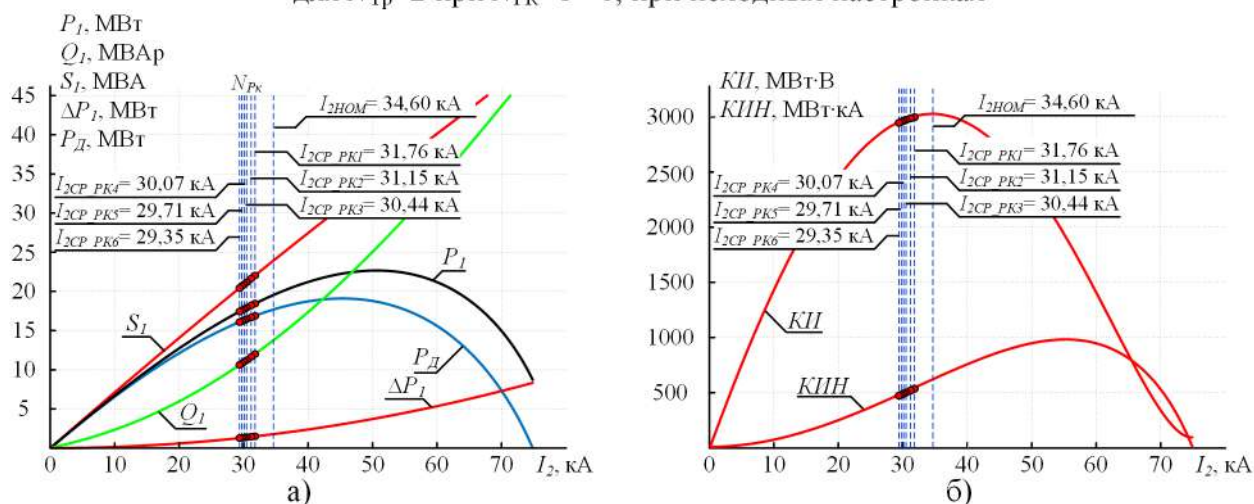


Рис.2.30 – Графики основных электрических характеристик с расположением рабочих точек, полученные на математической модели, для $N_{TP}=2$ и $N_{PK}=1 - 6$
УКП №2 120т ПАО «Северсталь»

Расположение рабочих точек на электрических характеристиках
УКП №2 120 т ПАО «Северсталь»,
для $N_{TP}=3$ при $N_{PK}=1 \div 6$, при исходных настройках

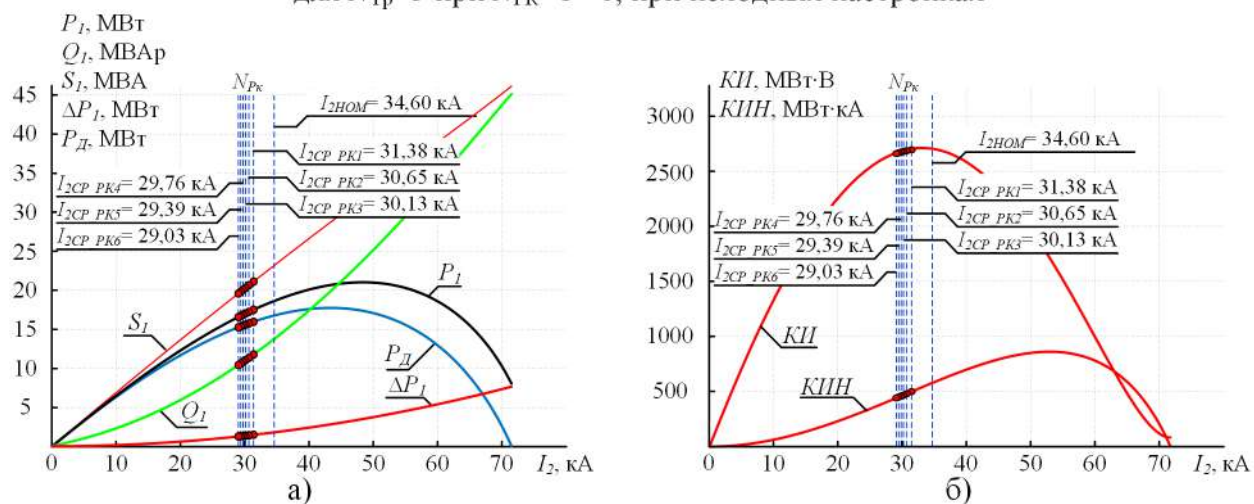


Рис.2.31 – Графики основных электрических характеристик с расположением рабочих точек, полученные на математической модели, для $N_{TP}=3$ и $N_{PK}=1 - 6$
УКП №2 120т ПАО «Северсталь»

Расположение рабочих точек на электрических характеристиках
УКП№2 120 т ПАО «Северсталь»,
для $N_{TP}=4$ при $N_{PK}=1 \div 6$, при исходных настройках

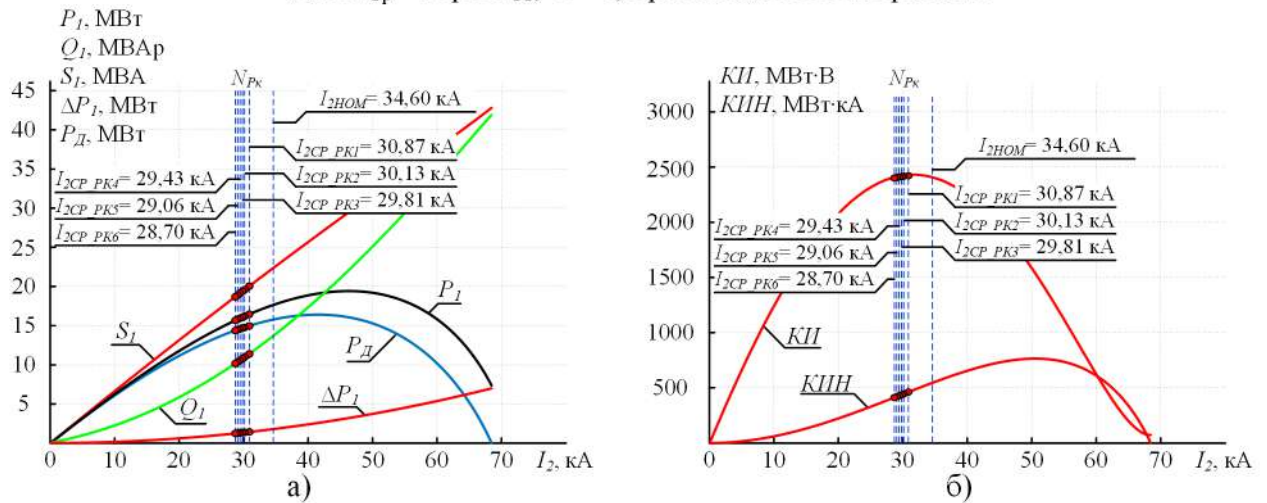


Рис.2.32 – Графики основных электрических характеристик с расположением рабочих точек, полученные на математической модели, для $N_{TP}=4$ и $N_{PK}=1 - 6$

УКП№2 120т ПАО «Северсталь»

Расположение рабочих точек на электрических характеристиках
УКП№2 120 т ПАО «Северсталь»,
для $N_{TP}=5$ при $N_{PK}=1 \div 6$, при исходных настройках

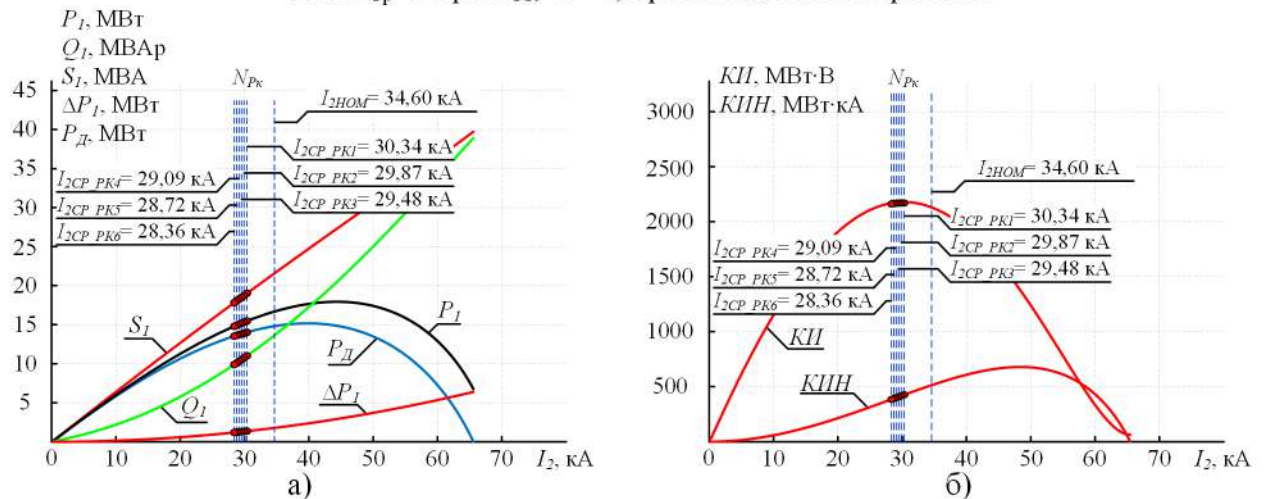


Рис.2.33 – Графики основных электрических характеристик с расположением рабочих точек, полученные на математической модели, для $N_{TP}=5$ и $N_{PK}=1 - 6$

УКП№2 120т ПАО «Северсталь»

Расположение рабочих точек на электрических характеристиках
УКП №2 120 т ПАО «Северсталь»,
для $N_{TP}=12$ при $N_{PK}=1 \div 6$, при исходных настройках

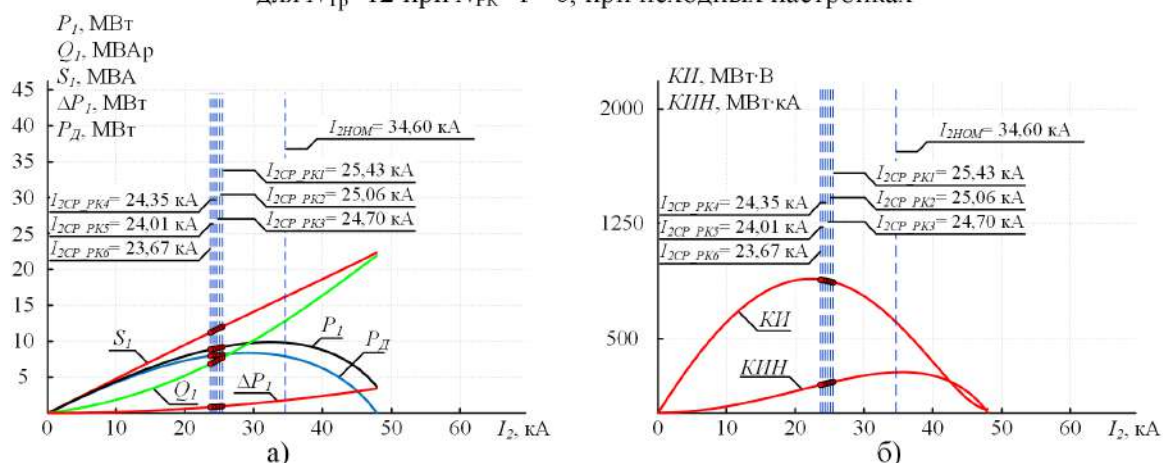


Рис.2.34 – Графики основных электрических характеристик с расположением рабочих точек, полученные на математической модели, для $N_{TP}=12$ и $N_{PK}=1 - 6$ УКП №2 120т ПАО «Северсталь»

Из представленных графиков видно, что рабочие точки располагаются на восходящей части характеристик и находятся в зоне максимального излучения K_{II} . Также важно отметить, что на производственных ступенях напряжения ПТ ($N_{PK} = 2 - 5$) достижение максимальной мощности электрических дуг и уменьшение K_{II} является невозможным ввиду ограничения максимального тока дуг. Данный факт обусловлен недостаточным индуктивным сопротивлением вторичного электрического контура УКП и должен быть учтен при разработке новых электрических режимов.

2.4. Результаты экспериментальных исследований скоростей нагрева жидкой стали в исследуемых УКП

С целью установления базового значения скорости нагрева, необходимого для последующей оценки эффективности усовершенствованных режимов, направленных на снижение расхода электроэнергии исследуемых УКП, было проведено экспериментальное исследование скоростей нагрева жидкой стали при использовании существующих электрических режимов.

Исследование проводилось на нескольких последовательных плавках на УКП №1 180т. ПАО «ММК». Процедура проведения эксперимента для каждой плавки начиналась с операции разжижения шлака в поступившем на агрегат сталеразливочном ковше. Эта операция включала в себя усреднительную про-

дувку аргоном и электронагрев длительностью 2-3 минуты. По завершении операции разжижения шлака измерялись исходная температура металла и толщина шлака. Затем, по согласованию со сталеваром, в ходе плавки выделялись периоды для проведения тестовых нагревов. Эти тесты включали два или четыре пятиминутных интервала нагрева с использованием основных производственных ступеней РПН печного трансформатора. Для УКП№1 180т. ПАО «ММК» использовались ступени РПН ПТ $N_{\text{ТР}} = 9$ и $N_{\text{ТР}} = 10$. На протяжении тестовых нагревов поддерживался постоянный заданный расход аргона при донной продувке на уровне 1000 л/мин. Непосредственно до начала и сразу после окончания каждого пятиминутного интервала нагрева выполнялись сдвоенные замеры температуры с интервалом в 30 секунд для повышения точности. Для обеспечения чистоты эксперимента, во время проведения тестовых нагревов строго исключалась подача сыпучих материалов в ковш и работа трайбаппаратов. Также, для обеспечения сопоставимости результатов все измерения температуры проводились с использованием термопарных блоков и жезлов одного производителя и марки. К экспериментам допускались только сталеразливочные ковши со стойкостью футеровки более 10 плавов, не использовавшиеся под горелкой и не имеющие остатков металла от предыдущих плавов. Фиксация всех временных интервалов операций осуществлялась по секундомеру с допустимыми отклонениями ± 5 секунд для нагрева и ± 10 секунд для замеров. После завершения всех тестовых интервалов плавка заканчивалась в штатном режиме.

На основе полученных данных для каждой плавки рассчитывались средние значения температуры жидкого металла до и после каждого пятиминутного нагрева, что позволило определить прирост температуры за каждый интервал и вычислить скорость нагрева. Анализ результатов показал, что при использовании ступени РПН ПТ $N_{\text{ТР}} = 10$ печного трансформатора средняя скорость нагрева жидкой стали в УКП№1 180т. ПАО «ММК» составила 4,55 °С/мин. Данное значение принято в качестве базовой величины для сравнительного анализа и оценки эффективности будущих усовершенствованных электрических режимов работы УКП№1 180т. ПАО «ММК», разработка которых преследует цели экономии электроэнергии.

Важно отметить, что аналогичные эксперименты проводились для всех исследуемых агрегатов, однако ввиду схожести результатов, с целью сокраще-

ния объема представляемого материала будет показан только для УКП№1 180т. ПАО «ММК».

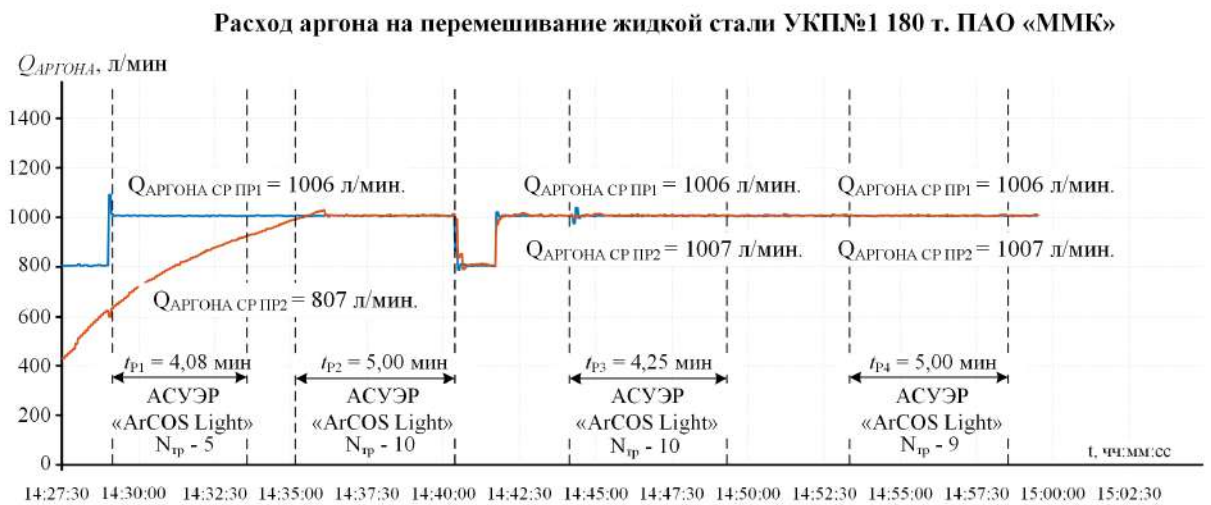
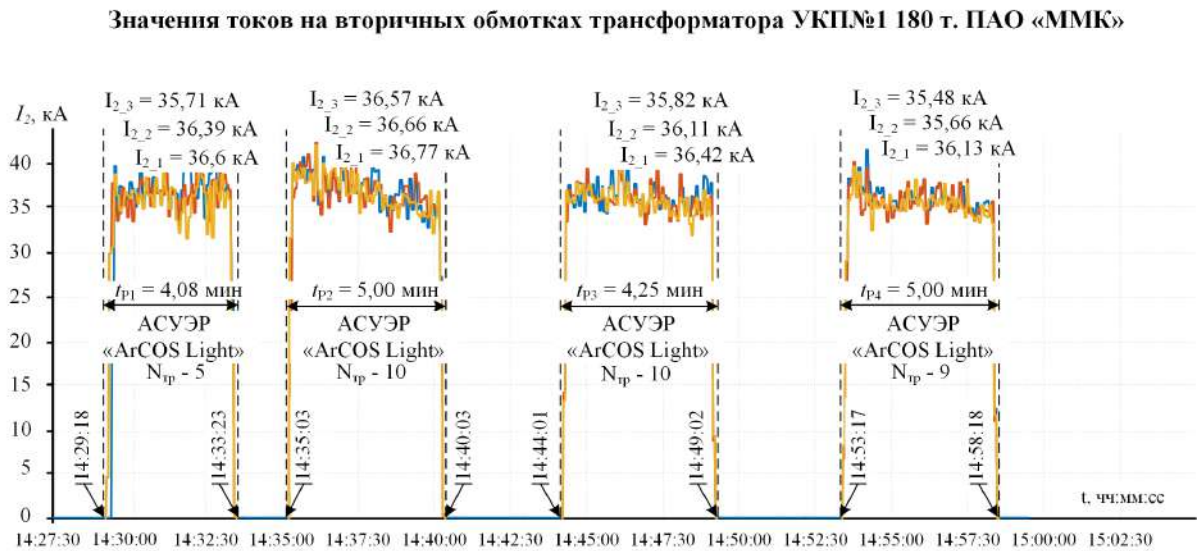
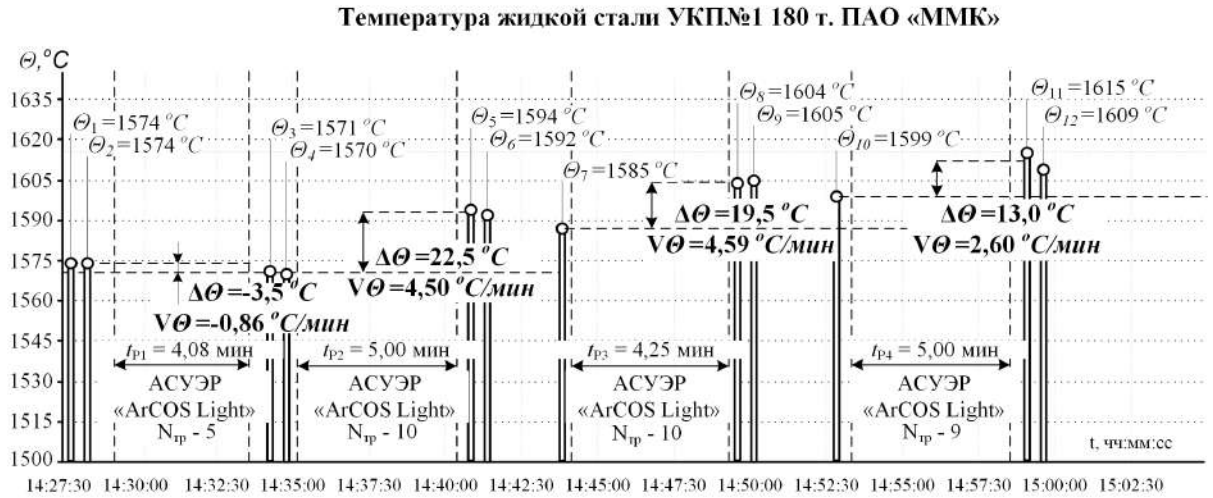


Рис.2.35 – Графики температуры жидкой стали, значений токов на вторичной обмотке печного трансформатора и расхода аргона на перемешивание жидкой стали на агрегате УКП№1 180 т. ПАО «ММК»

Таблица 2.17 – Результаты тестовых нагревов стали на агрегате УКП№1 180Т. ПАО «ММК» с использованием различных ступеней РПН печных трансформаторов

Ступень печного трансформатора	Действующие значения токов в фазах 1-3			Средний уровень расхода аргона, пробка 1	Средний уровень расхода аргона, пробка 2	Изменение температуры жидкой стали за периоды нагрева				
	$I_A, \text{кА}$	$I_B, \text{кА}$	$I_C, \text{кА}$	$Q_{\text{АРГ.СР}}, \text{л/мин.}$	$Q_{\text{АРГ.СР}}, \text{л/мин.}$	$t_{\text{нагрева}}, \text{мин}$	$\theta_{\text{НАЧ.}}, ^\circ\text{C}$	$\theta_{\text{КОН.}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta\theta, ^\circ\text{C}$	$V\theta, ^\circ\text{C}$
5	36,60	36,39	35,71	1006	807	4,08	1574	1570,5	-3,5	0,00
10	36,77	36,66	36,57	1006	1007	5,00	1570,5	1593	22,5	4,50
10	36,42	36,11	35,82	1006	1007	4,25	1585	1604,5	19,5	4,59
9	36,13	35,66	35,48	1006	1007	5,00	1599	1612	13	4,00

2.5. Анализ временных и энергетических показателей исследуемых УКП

На основе данных электронных паспортов плавок (предоставленных специалистами предприятий в формате электронных таблиц) были рассчитаны средние значения временных, энергетических и технологических показателей работы исследуемых УКП. Эти значения, представленные в таблице 2.18, будут использованы в дальнейшем в качестве базовых величин для сравнительного анализа эффективности усовершенствованных электрических режимов агрегатов [83,84].

Таблица 2.18 – Средние значения временных, энергетических и технологических показателей исследуемых УКП

Наименование параметра	УКП№1 180Т ПАО «ММК»	УКП№2 120Т ПАО «Северсталь»
1.Время обработки $t_{\text{ОБР}}, \text{мин}$	111,15	56,94
2.Время работы под током $t_{\text{РТ}}, \text{мин}$	29,2	27,03
4.Удел. расход ЭЭ на жидкую сталь $W_{\text{уд}}, \text{кВт}\cdot\text{ч/т}$	69,13	47,46
5. Расход аргона $Q_{\text{АРГ}}, \text{м}^3$	138,27	40,05
6.Начальная температура $T_{\text{НАЧ.}}, ^\circ\text{C}$	1557,29	1561,49
7.Величина нагрева $\Delta T_{\text{НАГ.}}, ^\circ\text{C}$	31,15	22,26
9.Средний вес плавки, $G_{\text{ПЛАВКИ}}, \text{т}$	176,29	124,7
10. Расход извести, $G_{\text{ИЗВЕСТЬ}}, \text{кг}$	1794,4	250,37

Дополнительно был выполнен детальный расчет средних значений активной мощности P_1 и удельного расхода электроэнергии $W_{\text{уд}}$ за репрезентативный период. Этот расчет проводился с использованием ранее разработанных

математических моделей У КП и данных о времени работы агрегатов на различных сочетаниях ступеней напряжения трансформатора $N_{\text{ТР}}$ и рабочих кривых $N_{\text{РК}}$.

Первым шагом этого анализа стал расчет долей времени работы агрегатов на различных сочетаниях ступеней $N_{\text{ТР}}$ и $N_{\text{РК}}$. Расчет основан на анализе трендов системы ИВА за трехмесячный период (данные предоставлены специалистами предприятий). Результаты для У КП №1 (180 т, ПАО «ММК») приведены в таблице 2.19.

Таблица 2.19 – Анализ времени работы различных $N_{\text{ТР}}$ и $N_{\text{РК}}$ У КП №1 180т. ПАО «ММК»

$N_{\text{ТР}}$	Доля работы $N_{\text{ТР}}$, %	Доля времени работы $N_{\text{РК}}$ для каждой ступени РПН ПТ, %						Доля работы на различных сочетаниях $N_{\text{ТР}}/N_{\text{РК}}$, %
		1	2	3	4	5	6	
5	5,52	3,56	91,08	5,37	-	-	-	10/2 – 84,07
6	0,79	2,52	91,24	6,24	-	-	-	5/2 – 5,03
7	1,25	3,89	88,41	7,70	-	-	-	10/1 – 2,43
8	1,98	1,31	94,83	3,86	-	-	-	8/2 – 1,87
9	1,72	2,06	88,59	9,35	-	-	-	9/2 – 1,53
10	88,73	2,74	94,75	2,51	-	-	-	7/2 – 1,11
								6/2 – 0,72

Как видно из таблицы, 84,07% времени агрегат работает на производительной ступени напряжения ПТ $N_{\text{ТР}}=10$ и $N_{\text{РК}}=2$. Второе по времени использования сочетание $N_{\text{ТР}}=5$, $N_{\text{РК}}=2$, составляющее 5,03% времени, применяется для операций разжижения шлака и усреднительной продувки. Стоит отметить, что аналогичное преобладание нескольких основных режимов характерно и для других исследуемых У КП.

Затем, используя рассчитанные доли времени работы и значения основных показателей для каждого сочетания $N_{\text{ТР}}$ и $N_{\text{РК}}$, полученных с помощью разработанных математических моделей исследуемых У КП, была рассчитана средневзвешенная активная мощность (P_{1_CP}) за анализируемый период по формуле:

$$P_{1_CP} = \sum (P_{1_ik} \times d_{ik}) \quad (2.73)$$

где P_{1_ik} – активная мощность для i -ой ступени напряжения ПТ $N_{\text{ТР}}$ и k -ой рабочей кривой $N_{\text{РК}}$ (рассчитанная по мат. модели); d_{ik} – доля времени работы на сочетании i -ой ступени $N_{\text{ТР}}$ и k -ой рабочей кривой $N_{\text{РК}}$.

Результаты детального расчета по каждому режиму и итоговое значение P_{1_CP} для УКПН№1 180т. ПАО «ММК» представлены в таблице 2.20.

Таблица 2.20 - Рассчитанные значения основных энергетических параметров для УКПН№1 180т. ПАО «ММК»

N_{TP}	N_{PK}	U_1 , кВ	Доля работы агрега- та на сочета- нии N_{TP}/N_{PK}	Значения параметров, рассчитанных с использованием математической модели							Вклад режима в сред- нюю мощ- ность, МВт
				U_2 , В	I_1 , А	I_2 , кА	P_1 , МВт	Q_1 , МВАр	S_1 , МВА		
5	1	35,49	0,00197	155,16	299,29	36,12	12,90	13,30	18,53	0,03	
	2	35,50	0,05031	155,74	293,58	35,43	12,83	12,88	18,18	0,65	
	3	35,71	0,00296	157,18	289,69	34,96	12,90	12,63	18,05	0,04	
6	1	35,48	0,00020	168,10	325,02	36,58	14,56	13,90	20,13	0,00	
	2	35,45	0,00721	168,46	318,77	35,87	14,42	13,47	19,73	0,10	
	3	35,33	0,00049	168,36	311,94	35,11	14,21	12,98	19,25	0,01	
7	1	35,46	0,00049	176,06	338,80	36,71	15,54	14,10	20,99	0,01	
	2	35,48	0,01108	176,62	332,92	36,08	15,43	13,71	20,64	0,17	
	3	35,64	0,00097	177,85	328,53	35,60	15,43	13,44	20,46	0,01	
8	1	35,49	0,00026	185,27	349,00	36,36	16,51	14,01	21,65	0,00	
	2	35,49	0,01874	185,67	343,02	35,73	16,36	13,62	21,29	0,31	
	3	35,47	0,00076	185,94	337,04	35,11	16,18	13,24	20,91	0,01	
9	1	35,43	0,00036	194,11	366,52	36,65	17,63	14,32	22,71	0,01	
	2	35,42	0,01528	194,42	360,30	36,03	17,45	13,93	22,33	0,27	
	3	35,39	0,00161	194,61	354,07	35,41	17,25	13,54	21,93	0,03	
10	1	35,43	0,02431	203,32	385,78	36,99	18,84	14,73	23,92	0,46	
	2	35,47	0,84073	203,89	379,95	36,43	18,69	14,39	23,59	15,72	
	3	35,46	0,02229	204,17	373,78	35,84	18,49	14,01	23,20	0,41	
Среднее рассчитанное значение активной мощности за период, $P_{1\text{ ср.расч.}}$, МВт: 18,23											

На заключительном этапе, используя рассчитанную среднюю мощность $P_{1_CP} = 18,23$ МВт и средние значения времени работы под током t_{PT_CP} и веса жидкой стали $G_{Ж.СТАЛИ_CP}$ из таблицы 2.18, был рассчитан удельный расход электроэнергии $W_{уд}$ для анализируемого периода по формуле:

$$W_{уд} = \frac{P_{1_CP} \times t_{PT_CP}}{G_{Ж.СТАЛИ_CP}} \quad (2.74)$$

где $W_{уд}$ – значение рассчитываемого удельного расхода электроэнергии для анализируемого периода; P_{1_CP} – значение средней мощности для анализируемого периода; t_{PT_CP} – среднее значение времени работы под током для анализи-

руемого периода; $G_{\text{Ж.СТАЛИ_СР}}$ – среднее значение веса жидкой стали для анализируемого периода.

Результат расчета $W_{\text{уд}}$ представлен в таблице 2.21.

Таблица 2.21 – Результаты расчета удельного расхода электроэнергии УКП №1 180 т. ПАО «ММК» с использованием рассчитанных значений основных энергетических параметров

Среднее значение активной мощности, рассчитанное для анализируемого периода P_1 , МВт	Среднее значение времени работы под током в анализируемом периоде $t_{\text{РТ}}$, мин	Среднее значение веса плавки в анализируемом периоде $G_{\text{Ж.СТАЛЬ}}$, тонн	Рассчитанное значение удельного расхода ЭЭ для анализируемого периода $W_{\text{уд}}$, кВт·ч/т
18,23	29,2	176,29	50,33

Следует отметить, что рассчитанное значение $W_{\text{уд}}$ (50,33 кВт·ч/т) отличается от среднего значения, приведенного в таблице 2.18 (69,13 кВт·ч/т). Это расхождение связано с различиями в методологиях расчета (прямое усреднение паспортных данных плавов в таблице 2.18 против расчета на основе моделирования режимов и усреднения мощности в таблице 2.21), а также особенностями выборок данных.

2.6. Выводы по главе 2

1. Проведены экспериментальные исследования электрических режимов на УКП, функционирующих на отечественных предприятиях черной металлургии. Выполнен сбор данных об электрооборудовании, системах электроснабжения и управления. Выявлены особенности систем электроснабжения: наличие СТК и параллельная работа с ДСП на ПАО «ММК», отсутствие СТК и значительные колебания напряжения на ПАО «Северсталь». Выполнены серии опытов короткого замыкания на исследуемых УКП, позволившие с высокой точностью определить параметры вторичного электрического контура (активные, индуктивные, полные сопротивления фаз и взаимные индуктивности), учитывающие взаимное влияние фаз и смещение нейтрали, что необходимо для построения адекватных математических моделей. Экспериментально определены регулировочные характеристики гидроприводов перемещения электродов. Для УКП №1 180 т ПАО «ММК» характеристики линейны и близки друг к другу. Для УКП №2 120 т ПАО «Северсталь» выявлены существенные различия в ха-

рактеристиках по фазам, что негативно влияет на качество регулирования импеданса при одинаковых настройках регуляторов.

2. Проанализированы существующие алгоритмы и параметры систем управления ArCOS. Установлено, что управление электрическими режимами осуществляется сталеварами вручную с использованием ограниченного набора ступеней напряжения печного трансформатора $N_{\text{ТР}}$ и рабочих кривых $N_{\text{РК}}$, отсутствует автоматическая адаптация к условиям плавки (аргонная продувка, шлаковый режим). Выявлены недозагрузка печных трансформаторов и потенциал для оптимизации электрических режимов.

3. Разработаны математические модели электротехнических комплексов «Питающая сеть – электрический контур У КП» для исследуемых установок, включающие модели питающей сети, печного трансформатора, короткой сети, нелинейной электрической дуги (на основе уравнения Касси) и системы перемещения электродов. Проведена проверка адекватности разработанных математических моделей путем сравнения расчетных рабочих точек с экспериментальными данными. Статистический анализ подтвердил адекватность моделей: расчетные точки попадают в доверительные интервалы математических ожиданий экспериментальных массивов по токам и мощностям. С использованием разработанных математических моделей исследуемых У КП рассчитаны подробные электрические и технологические характеристики ($P_1=f(I_{\text{Д}})$, $Q_1=f(I_{\text{Д}})$, $S_1=f(I_{\text{Д}})$, $P_{\text{Д}}=f(I_{\text{Д}})$, $KИ=f(I_{\text{Д}})$, $KИН=f(I_{\text{Д}})$) для различных ступеней напряжения и рабочих кривых, что позволило оценить текущие режимы работы.

4. Экспериментально определена базовая скорость нагрева жидкой стали в исследуемых У КП. 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 будут использованы в дальнейшем для сравнительного анализа эффективности усовершенствованных электрических режимов агрегатов. Выполнен детальный расчет средневзвешенной активной мощности и удельного расхода электроэнергии с учетом долей времени работы на различных режимах, полученных из анализа трендов ИВА, и параметров, рассчитанных с помощью математических моделей.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗМЕНЕНИЯ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ТОКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДУГ В У КП В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМОВ АРГОННОЙ ПРОДУВКИ И ШЛАКОВЫХ РЕЖИМОВ

Одним из направлений повышения энергоэффективности электросталеплавильных комплексов является оптимизация электрических режимов, влияющая на коэффициент полезного действия (КПД) электрической дуги. Разработка усовершенствованных алгоритмов управления, способных динамически адаптироваться к изменяющимся условиям, таким как режимы аргонной продувки и шлаковым режимам, требует глубокого понимания физико-химических процессов в рабочей зоне печи. Обоснование эффективности таких методов строится на анализе факторов, определяющих перенос энергии от дуги к металлу и минимизацию тепловых потерь.

Фундаментальные исследования, проведенные такими учеными, как Ю.М. Миронов [5, 85], А.Н. Макаров [6], А.Д. Свенчанский [30], М.Я. Смелянский [31], Н. Pfeifer [86, 87], D. Ameling и J. Petry [88] заложили основу для понимания энергетического баланса электросталеплавильных агрегатов, теплофизические свойства шлаков и распределение тепловых потоков. В их работах было показано, что для обеспечения устойчивого горения дуги и, что критически важно, для уменьшения тепловых потерь на нагрев футеровки стен, свода и сходящими газами, толщина слоя шлака должна быть достаточной для экранирования электрических дуг.

Современные подходы к оптимизации энергопотребления электросталеплавильных агрегатов, представленные, в частности, в трудах Prof. Dr.-Ing. Н. Pfeifer [86,87] (RWTH Aachen University) на международном семинаре "International Seminar Electrical Engineering of Arc Furnaces"[89], подчеркивают важность создания и поддержания вспененного шлака, полностью покрывающего электрические дуги. Благодаря этому происходит увеличение КПД дуги, поскольку энергия дуги преимущественно поглощается ванной (металлом и шла-

ком), а не излучается на водоохлаждаемые элементы и футеровку, что продлевает срок службы огнеупоров. Также отмечается, что горение дуги, экранированной шлаком, становится более стабильным, снижаются флуктуации напряжения и тока. На рис. 3.1 приведена зависимость теплового КПД электрической дуги в зависимости от степени ее экранирования шлаком.

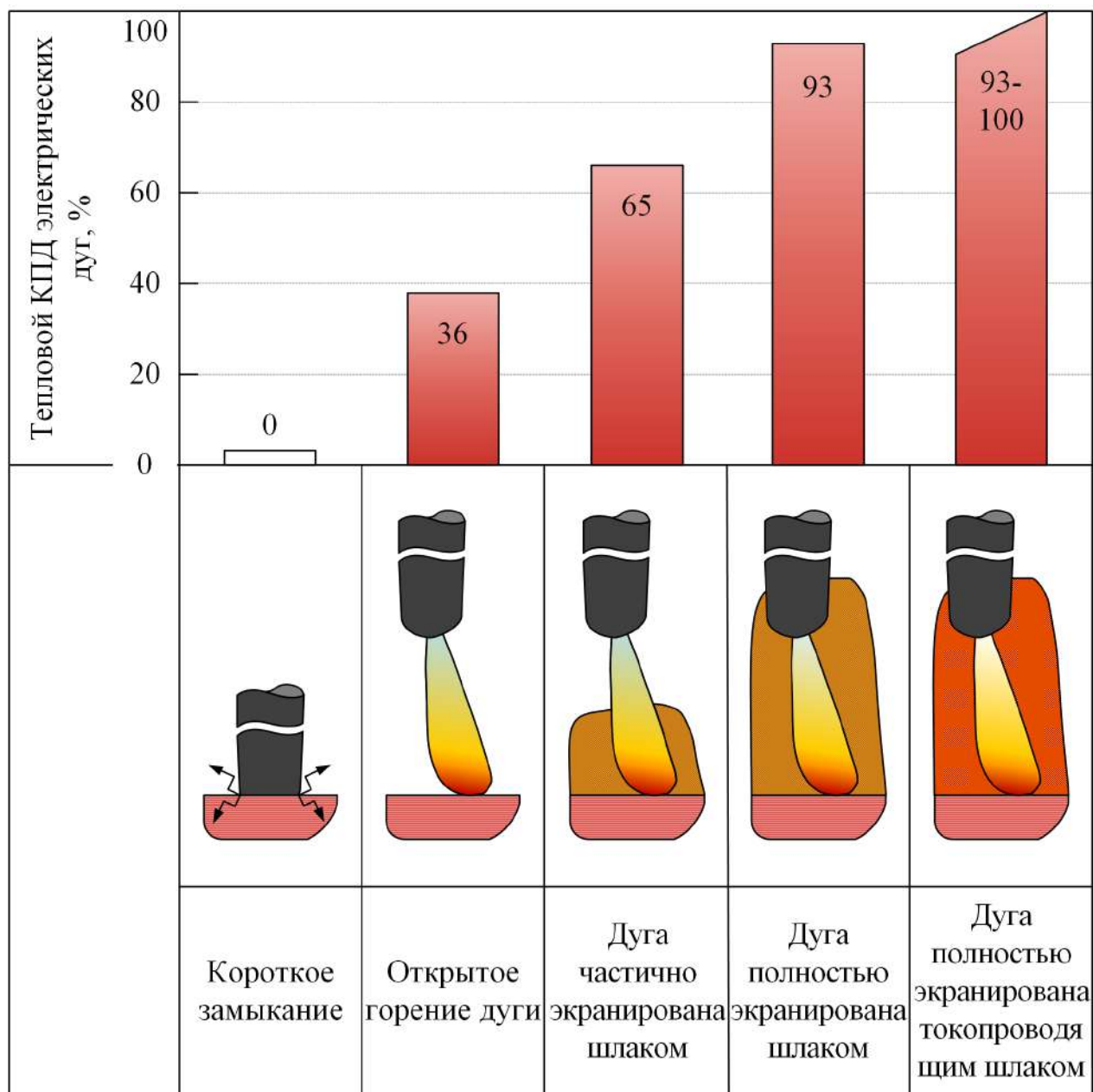


Рис.3.1 – Зависимость теплового КПД электрических дуг от степени их экранирования шлаком представленная D. Ameling и J. Petry [86-88].

Как отмечается в работах М. Abel и Н. Pfeifer, представленных на международном семинаре "International Seminar Electrical Engineering of Arc Furnaces"

[89], использование шлаков, обладающих электропроводимостью, позволяет достичь теплового КПД электрических дуг 93-100% в зависимости от степени электропроводимости шлака.

По данным, приводимым в различных источниках, включая работы упомянутых ученых, для эффективного экранирования высота шлакового слоя должна на 20-25% перекрывать длину электрической дуги. Это согласуется с практикой работы на современных ДСП и У КП с использованием технологий наведения шлака.

Немаловажным аспектом в поведении шлака, и, как следствие, в тепловом КПД электрических дуг является процесс аргонной продувки расплава в У КП. Интенсивная продувка создает разрыв шлакового слоя в районе продувочного блока (образование зеркала жидкого металла), что приводит к оголению электрических дуг в фазах, находящихся в непосредственной близости к продувочному блоку. Таким образом, для повышения энергоэффективности электросталеплавильного агрегата необходимо оптимизировать длину дуги и рабочее напряжение так, чтобы максимизировать передачу энергии в металл, учитывая текущие свойства шлака и режимы аргонной продувки. Следовательно, усовершенствованные алгоритмы управления электрическими режимами У КП должны поддерживать оптимальное соотношение между длиной дуги, толщиной шлакового слоя и интенсивностью аргонной продувки. Это позволит максимизировать долю энергии, передаваемой непосредственно металлу, стабилизировать горение дуг и снизить тепловые потери, что в совокупности ведет к повышению общего КПД печного агрегата.

Поскольку в качестве критерия, по которому будет осуществляться управление, может выступать суммарный коэффициент гармонических составляющих токов электрических дуг, то целесообразно начать разработку с проведения экспериментальных исследований изменения гармонического состава токов электрических дуг У КП в зависимости от режимов аргонной продувки и шлаковых режимов.

3.1. Результаты экспериментальных исследований влияния шлаковых режимов на гармонический состав токов электрических дуг

Как было сказано ранее, шлаковый слой оказывает значительное влияние на тепловой КПД электрических дуг. Также ранее отмечалось, что коэффициент гармонических искажений токов дуг может выступать в качестве параметра для управления электрическими режимами печи, обеспечивая динамическую адаптацию к изменяющимся шлаковым режимам и режимам аргонной продувки. В таком случае целесообразным является проведение исследования, позволяющего установить достоверную связь коэффициента гармонических искажений токов дуг со степенью их экранирования шлаком, и, как следствие, с тепловым КПД.

На основании паспортов плавов для исследуемых УСП, предоставленных специалистами предприятий, и архивных трендов IBA PDA, были отобраны плавки, в которых первичный нагрев проводился при минимальной толщине шлакового слоя. Факт проведения первичного нагрева при минимальной толщине шлакового слоя достоверно устанавливался по параметру в паспорте плавки, указывающему на ее статус «переливная». При переливной плавке по технологическим причинам жидкая сталь из 375-тонного сталковша конвертерного цеха переливается в 120-тонные сталковши электросталеплавильного цеха для последующей обработки на 120-тонных УСП. Важно отметить, что такой перелив, приводит к почти полной потере шлака. Таким образом, первичный нагрев подобных плавов осуществляется с неэкранированными дугами и на низких ступенях вторичного напряжения печного трансформатора.

Дополнительным важным условием отбора анализируемых плавов являлось одинаковое значение аргонной продувки при нагреве в условиях минимальной толщины шлакового слоя и при нагреве после наведения шлака.

На основании полученных данных были построены временные зависимости среднего по фазам значения тока на первичной стороне печного трансформатора и коэффициента гармонических искажений токов дуг (рис.3.2).

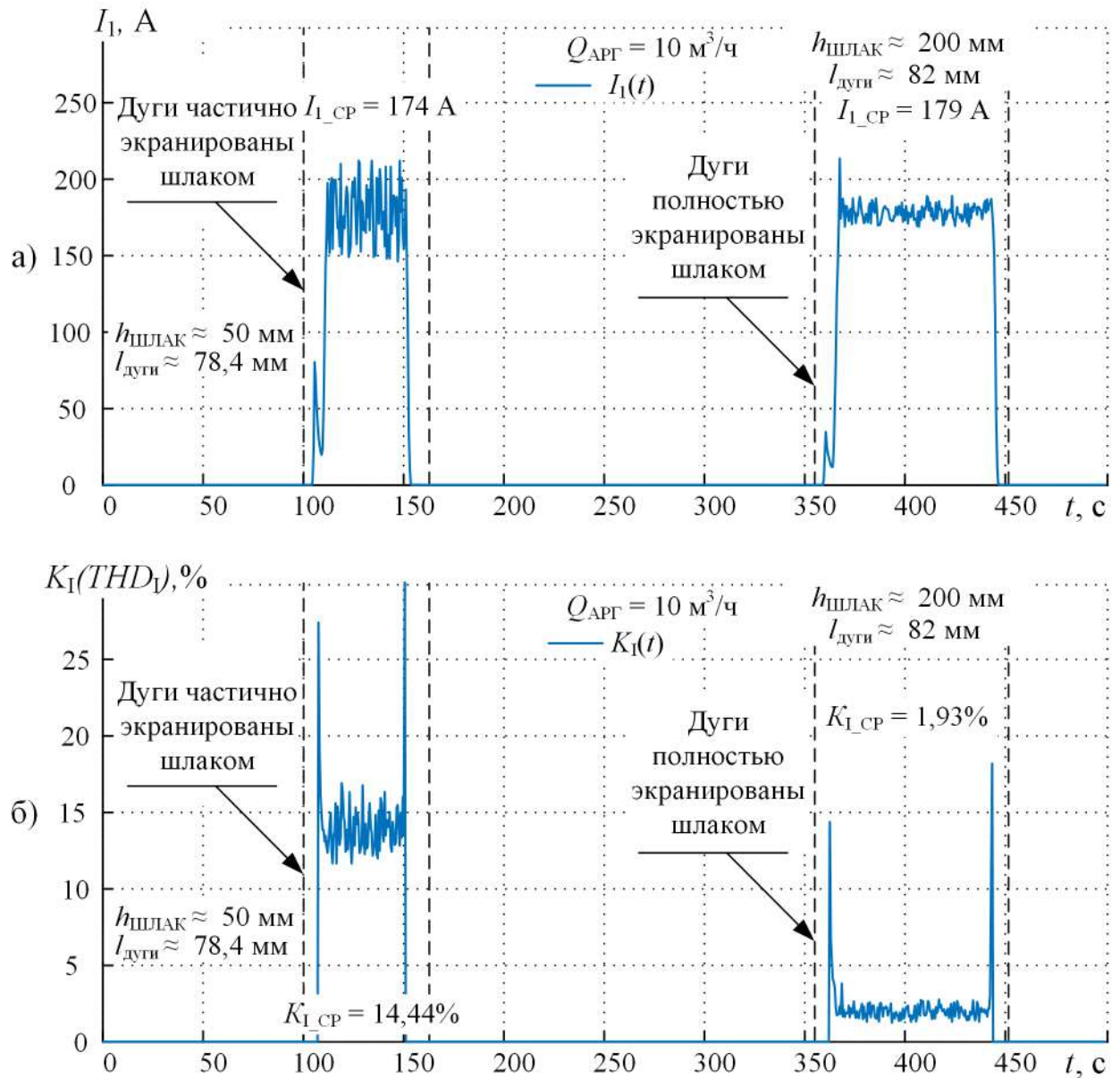


Рис. 3.2 - Экспериментальное исследование влияния экранирования электрической дуги на коэффициент гармонических искажений тока

Как видно из представленного рисунка, экранирование электрической дуги шлаком выражается прежде всего в заметном повышении стабильности горения дуги, сопровождающемся значительным уменьшением флуктуаций как геометрической длины дугового разряда, так и падения напряжения на нем. Прямым следствием этих улучшений являются снижение дисперсии тока дуги и уменьшение уровня нелинейных искажений в форме кривой тока, что соответственно приводит к снижению суммарного коэффициента искажения синусоидальности кривой тока K_I .

3.2. Результаты экспериментальных исследований поведения поверхности жидкого металла и шлака в УКП при различных режимах аргонной продувки

Экспериментальные исследования поведения поверхности жидкого металла и шлака в установках ковш-печь проводились для изучения влияния различных режимов аргонной продувки на состояние слоя шлака и режимы горения электрических дуг. Для исследований применялось видеооборудование, установленное напротив рабочих окон агрегата. Схемы агрегатов с расположением основного технологического оборудования, а также с обозначением мест съемки при проведении эксперимента показаны на рис. 3.3. Во время проведения экспериментов при отключенном автоматическом выключателе осуществлялось опускание электродов в расплав с целью точного определения взаимного расположения фаз и формирующихся, в результате работы продувочных блоков зеркал жидкого металла. В ходе проведения экспериментов контролировался фактический расход аргона ($Q_{\text{АРГ}}$), а также учитывались температура жидкой стали и толщина шлака. Исследования охватывали как режимы донной продувки через стационарные продувочные блоки, расположенные в днище стальковша, так и продувку с использованием аварийной фурмы.

Обработанные фрагменты видеосъемки использовались для определения геометрических параметров образующихся зеркал жидкого металла, при различных значениях фактического расхода аргона. Одновременно фиксировалось наличие волн и брызг, способных закорачивать фазы, наиболее близко расположенные к работающим продувочным блокам. Эксперименты проводились в рамках одной плавки при двух различных температурных режимах жидкой стали, что позволяло оценить влияние степени разжижения шлака.

Важно отметить, что при проведении экспериментальных исследований на УКП№2 120т ПАО «Северсталь» в качестве контролируемого параметра было выбрано фактическое давление аргона в подающей линии $P_{\text{АРГ.ФАКТ.}}$, фикси-

руемое с помощью манометра на рабочей площадке УКП. Данная необходимость обусловлена тем, что режим донной продувки на данном агрегате выставляется вручную подручным сталевара с визуальной оценкой степени перемешивания металла через рабочее окно. В данном случае подручный использует величину давления аргона как основной задающий параметр. Контроль фактического расхода аргона $Q_{\text{АРГ.ФАКТ.}}$ осуществляется с помощью датчиков. Определение соотношения давления аргона в подающей линии $P_{\text{АРГ.ФАКТ.}}$ с фактическим расходом аргона $Q_{\text{АРГ.ФАКТ.}}$ не выполнялось, ввиду невозможности достижения приемлемой точности устанавливаемых соотношений.

Исследования поверхности жидкого металла проводились при заниженной толщине шлака, составлявшей $h_{\text{Ш}} = 100$ мм. Для каждого агрегата были выполнены по две серии экспериментов: первая при пониженной температуре жидкой стали и вторая – при повышенной. Состояние поверхности жидкого металла при различных режимах аргонной продувки показаны:

для УКП№1 180т ПАО «ММК» на рис. 3.4 и рис. 3.6;

для УКП№2 120т ПАО «Северсталь» на рис. 3.8 и рис. 3.9.

На приведённых фрагментах видеосъемки поверхности жидкой ванны хорошо прослеживается процесс образования зеркала металла, увеличение его диаметра, а также появление волн и брызг.

Посредством компьютерного анализа набора фотокадров с использованием основных оптических характеристик видеоаппаратуры (угол и высота расположения камеры, значение оптического зума и т.д.) были восстановлены геометрические параметры зеркала жидкого металла с последующим построением зависимостей $D_3 = f(Q_{\text{АРГ}})$ (для УКП№2 $D_3 = f(P_{\text{АРГ.ФАКТ.}})$). Для каждой зависимости было получено уравнение регрессии. Порядок и вид уравнения выбирались исходя из максимального значения коэффициента достоверности аппроксимации R^2 . Приемлемая точность математической модели диаметра зеркала достигалась при $R^2 > 0,95$. Полученные аппроксимирующие выражения

могут быть в дальнейшем использованы при совершенствовании алгоритмов автоматического управления электрическими режимами УКП.

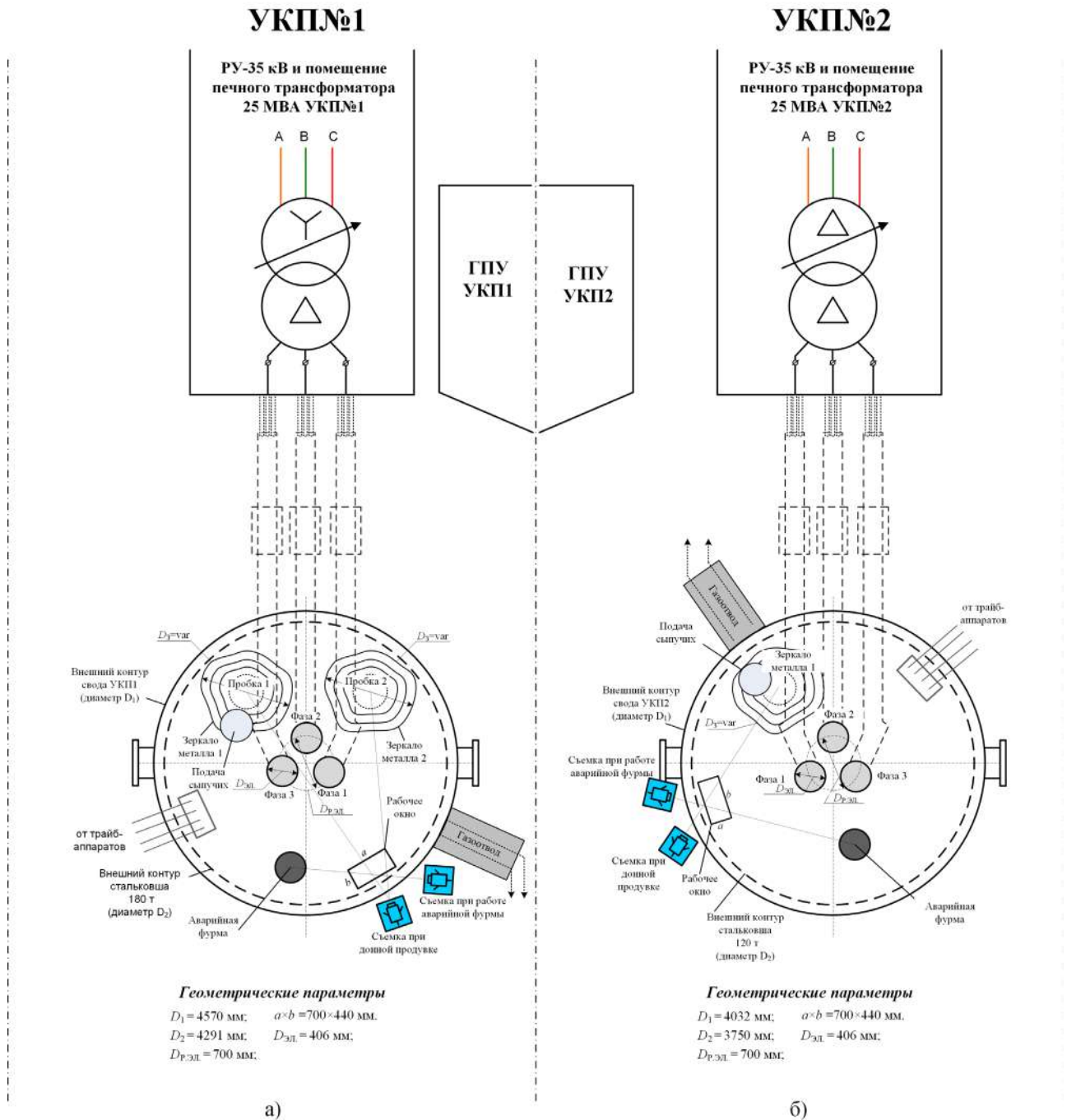


Рис.3.3 - Схема расположения основного технологического оборудования и специализированной видеоаппаратуры на рабочих площадках УКП№1 180т. ПАО «ММК» (а) и УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» (б) для записи поведения поверхности жидкого металла при донной продувке и работе аварийной фурмы

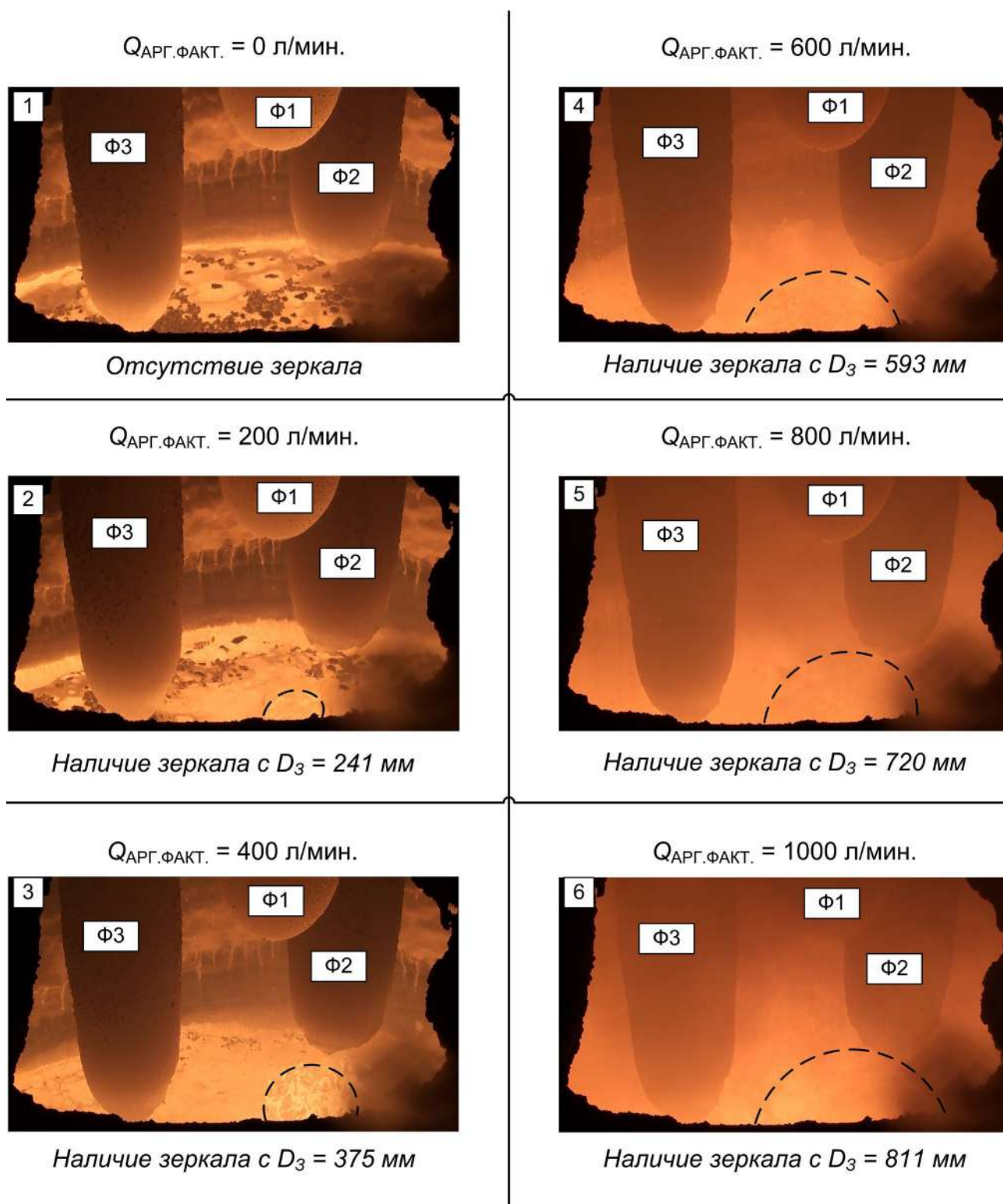


Рис.3.4 - Исследование зеркала жидкого металла на УКП№1 180т. ПАО «ММК» при различных режимах аргонной продувки
 (донная продувка; температура перед проведением эксперимента $T = 1675 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
 толщина шлака $h_{\text{Ш}} = 100 \text{ мм}$)

Таблица 3.1 - Результаты измерений геометрических параметров зеркала жидкого металла для УКП№1 180т. ПАО «ММК» при различных режимах аргоновой продувки

Номер опыта	Расход аргона $Q_{\text{АРГ.ФАКТ.}}$, л/мин.	Диаметр зеркала жидкого металла D_3 , мм	Наличие волн (брызг) жидкого металла, периодически закорачивающих фазу 2	Наличие волн (брызг) жидкого металла, периодически закорачивающих фазу 3
1	0	0	-	-
2	200	241	-	-
3	400	375	+	-
4	600	593	+	+
5	800	720	+	+
6	1000	811	+	+

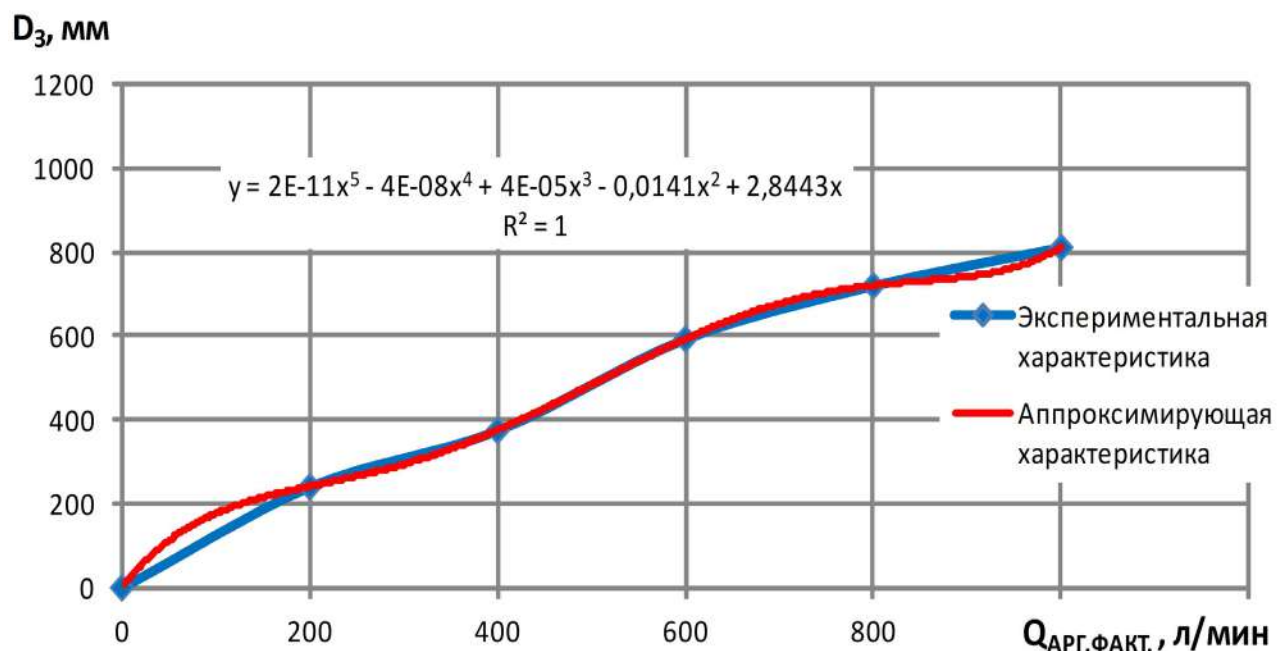


Рис.3.5 - Экспериментальные зависимости диаметра зеркала жидкого металла на УКП№1 180т. ПАО «ММК» при донной продувке и температуре металла $T = 1675^\circ\text{C}$

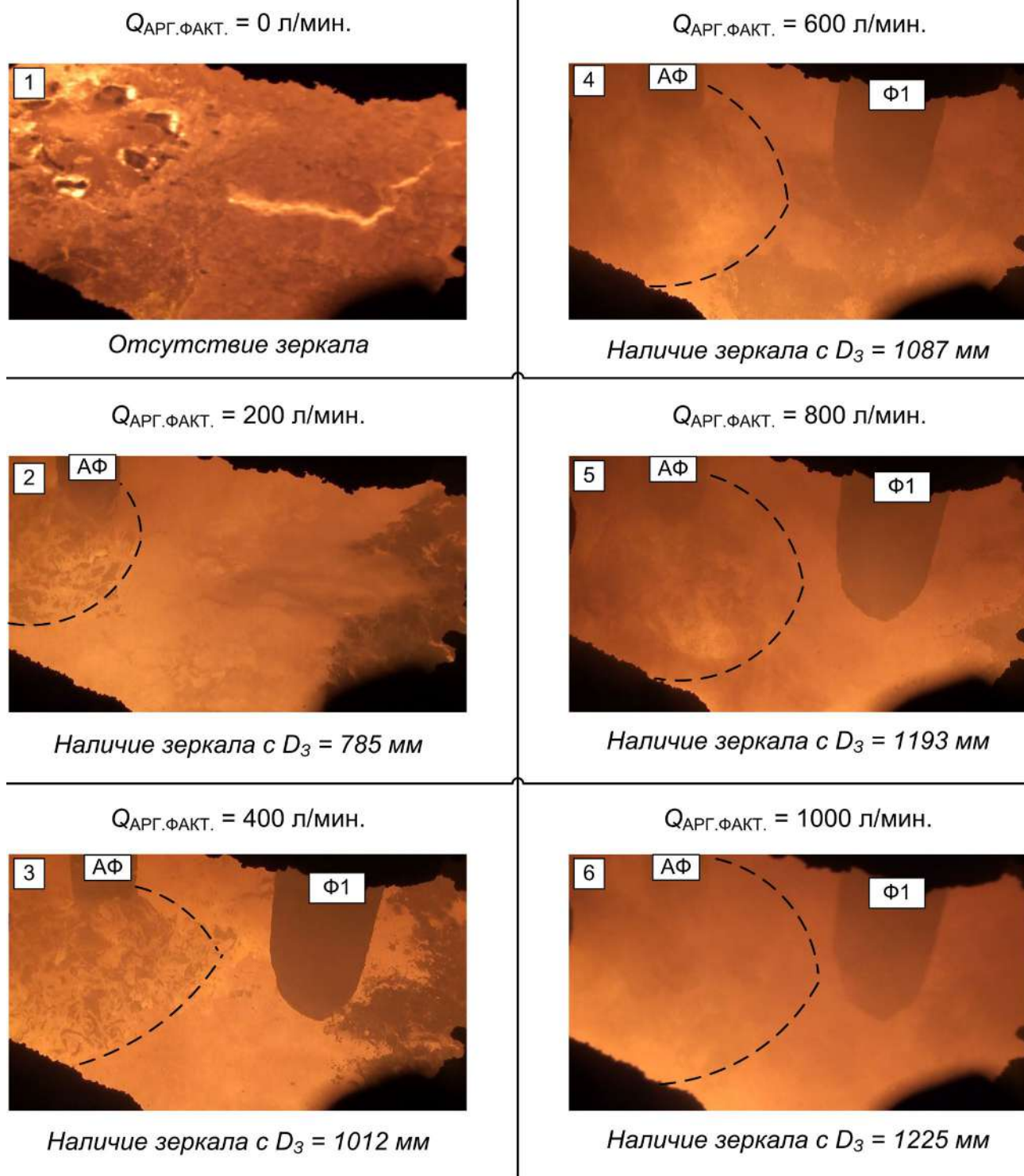


Рис.3.6 - Исследование зеркала жидкого металла на УКП №1 180т. ПАО «ММК» при различных режимах аргонной продувки (продувка через аварийную фурму; температура перед проведением эксперимента $T = 1610 \text{ }^{\circ}\text{C}$; толщина шлака $h_{\text{Ш}} = 150 \text{ мм}$)

Таблица 3.2 - Результаты измерений геометрических параметров зеркала жидкого металла для УКПН№1 180т. ПАО «ММК» при различных режимах аргонной продувки

Номер опыта	Расход аргона $Q_{\text{АРГ.ФАКТ.}}$, л/мин.	Диаметр зеркала жидкого металла D_3 , мм	Наличие волн (брызг) жидкого металла, периодически закорачивающих фазу 1
1	0	0	-
2	200	785	+
3	400	1012	+
4	600	1087	+
5	800	1193	+
6	1000	1225	+

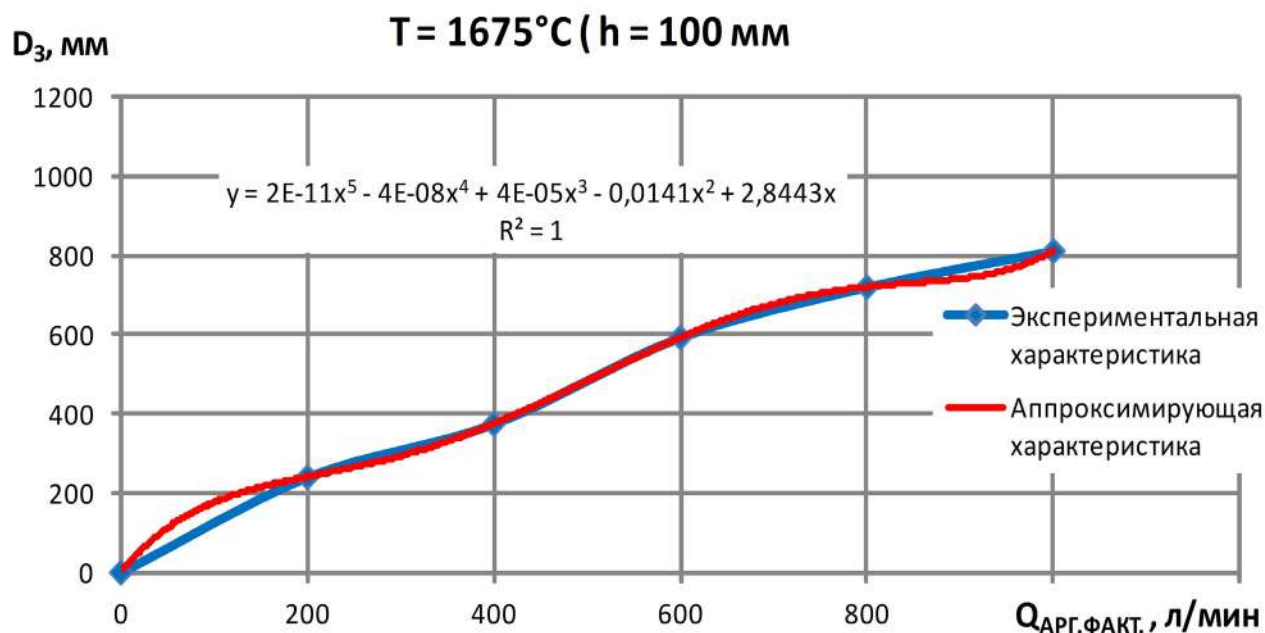


Рис.3.7 - Экспериментальные зависимости диаметра зеркала жидкого металла на УКПН№1 180т. ПАО «ММК» при продувке через аварийную фурму (температура металла $T = 1610^{\circ}\text{C}$)

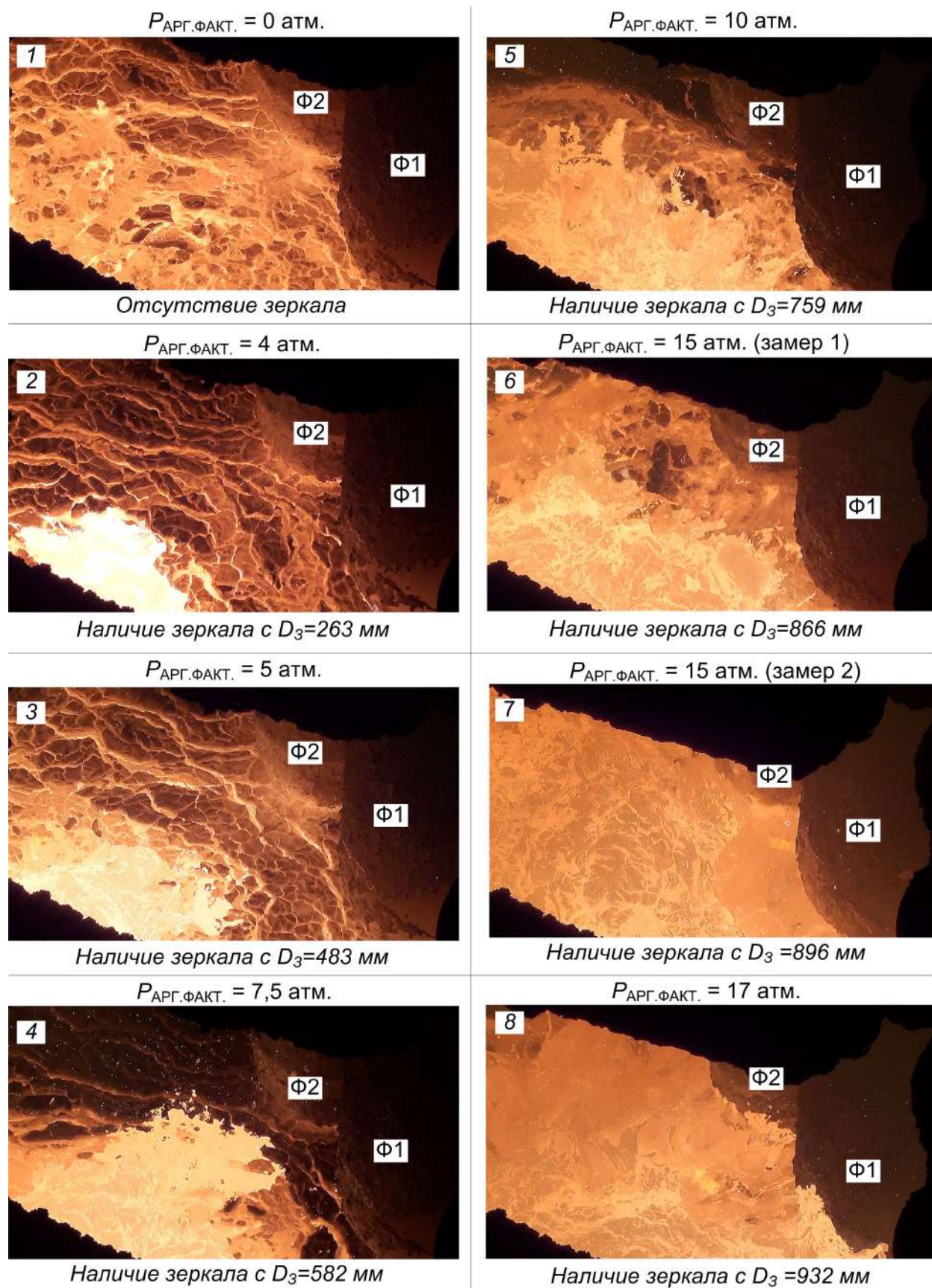


Рис. 3.8 - Исследование зеркала жидкого металла на УПК№2 120т ПАО «Северсталь» при различных режимах аргонной продувки (температура перед проведением эксперимента $T = 1518 \text{ }^{\circ}\text{C}$; толщина шлака $h_{\text{Ш}} = 100 \text{ мм}$)

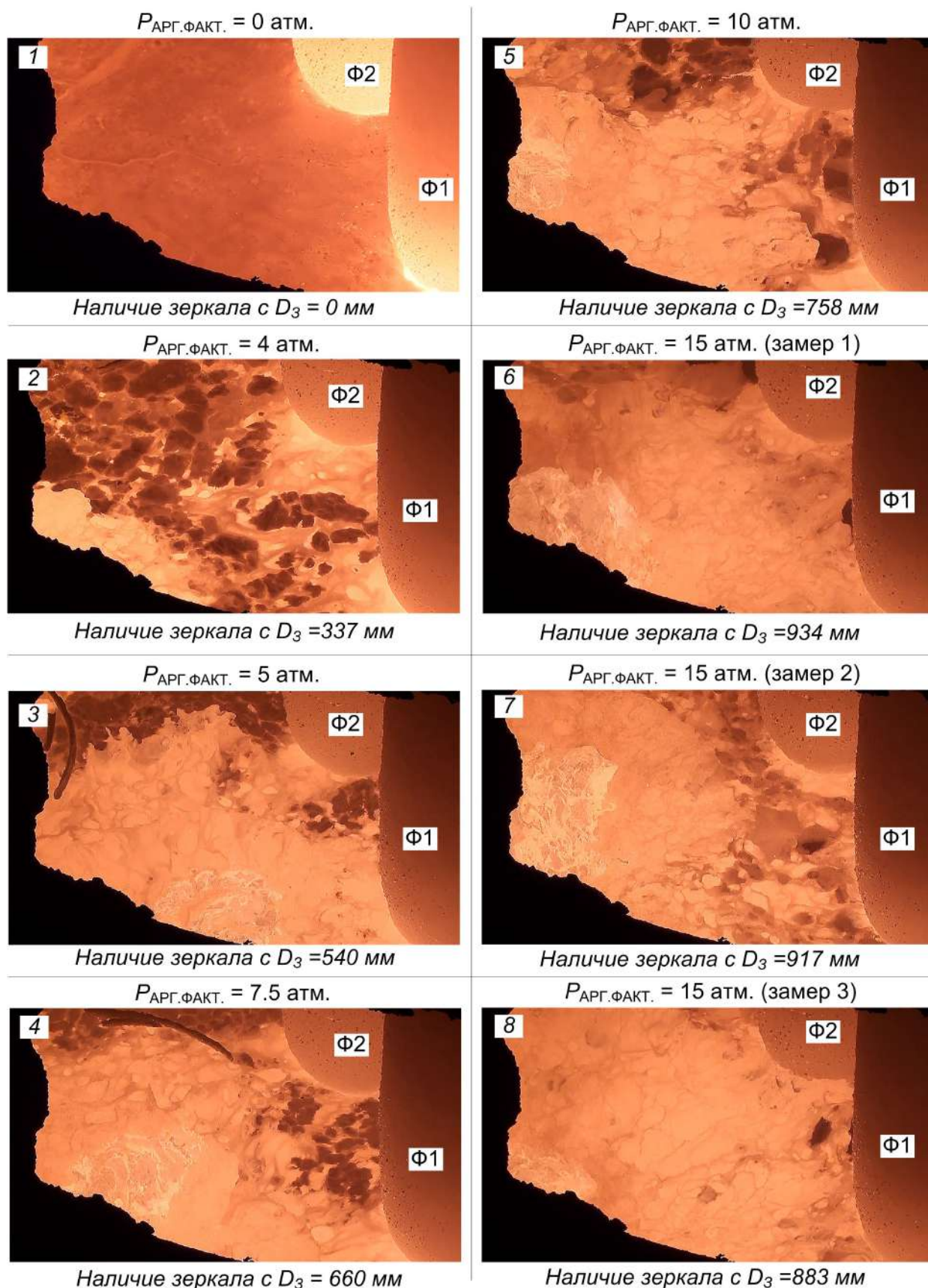


Рис. 3.9 - Исследование зеркала жидкого металла на УПК№2 120т ПАО «Северсталь» при различных режимах аргонной продувки (температура перед проведением эксперимента $T = 1643 \text{ }^{\circ}\text{C}$; толщина шлака $h_{\text{ш}} = 100 \text{ мм}$)

Таблица 3.3 - Результаты измерений геометрических параметров зеркала жидкого металла для УПК№2 120т ПАО «Северсталь» при различных режимах аргонной продувки (серия измерений соответствующая пониженной температуре жидкой стали)

Номер опыта	Давление аргона $P_{\text{АРГ.ФАКТ.}}$, атм.	Диаметр зеркала жидкого металла D_3 , мм	Наличие волн (брызг) жидкого металла, периодически закорачивающих фазу 1	Наличие волн (брызг) жидкого металла, периодически закорачивающих фазу 2
1	0,0	0	-	-
2	4,0	263	-	-
3	5,0	483	-	-
4	7,5	582	-	-
5	10,0	759	-	-
6	15,0	881	-	+
7	17,0	932	+	+

Таблица 3.4 - Результаты измерений геометрических параметров зеркала жидкого металла для УПК№2 120т ПАО «Северсталь» при различных режимах аргонной продувки (серия измерений соответствующая повышенной температуре жидкой стали)

Номер опыта	Давление аргона $P_{\text{АРГ.ФАКТ.}}$, атм.	Диаметр зеркала жидкого металла D_3 , мм	Наличие волн (брызг) жидкого металла, периодически закорачивающих фазу 1	Наличие волн (брызг) жидкого металла, периодически закорачивающих фазу 2
1	0,0	0	-	-
2	4,0	337	-	-
3	5,0	540	-	-
4	7,5	660	-	-
5	10,0	758	-	-
6	15,0	917	+	+

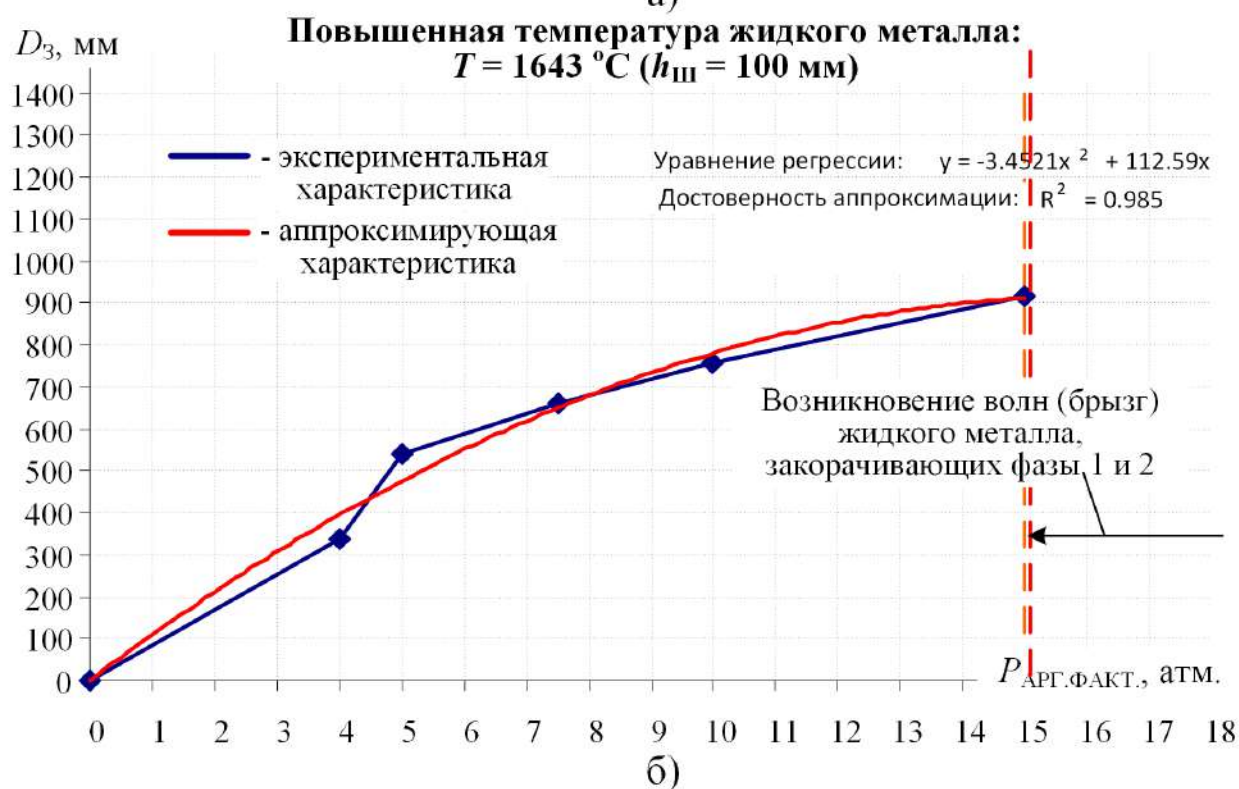
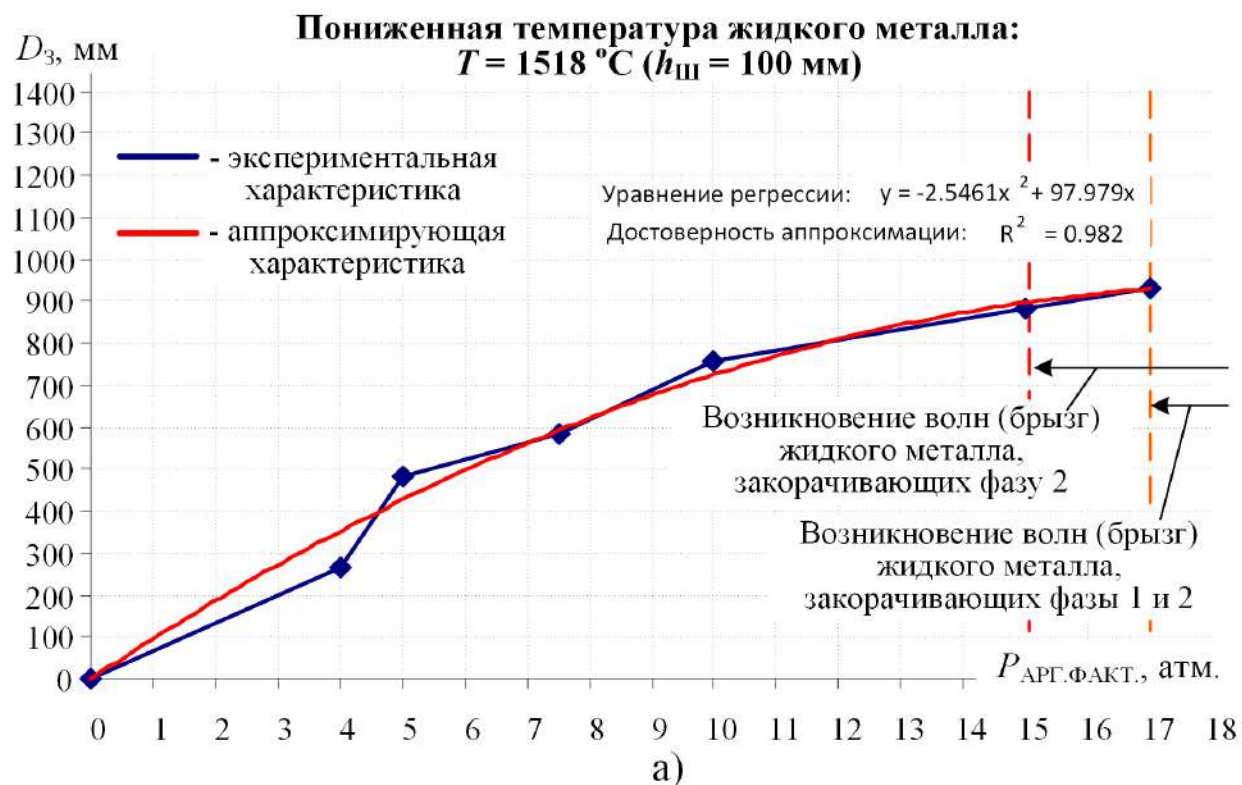


Рис. 3.10 - Экспериментальные зависимости диаметра зеркала жидкого металла на УПК№2 120т ПАО «Северсталь» при различных режимах аргонной продувки и температуры металла: а – при $T_1 = 1518\text{ }^{\circ}\text{C}$; б – при $T_2 = 1643\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Анализ экспериментальных данных (табл. 3.1 - 3.4) показал, что характер поведения зеркала жидкого металла при изменении режима аргонной продувки аналогичен для различных агрегатов. Также необходимо отметить, что на поведение зеркала жидкого металла может также оказывать влияние тип продувочного блока и его угол установки. Так, на УКП№2 было отмечено небольшое смещение положения зеркала относительно электродов фаз 1-3, что, вероятно, обусловлено различным углом установки продувочных блоков на стальковшах.

На УКП№2 было установлено, что при интенсивных продувках зеркало жидкого металла оказывает наибольшее воздействие на фазу «2». На агрегате УКП№1 возмущения на поверхности жидкого металла при донной продувке оказывали основное влияние на режимы горения дуг в фазе «1». В случае же работы аварийной фурмы основное воздействие зеркала металла распространялось на фазы «2» и «3».

Во всех исследованных случаях, зависимости диаметра зеркала металла от фактического расхода аргона $D_3 = f(Q_{\text{АРГ}})$ являлись нелинейными. Для всех исследуемых УКП при использовании донной продувки был определен диапазон граничных значений мгновенного расхода аргона (для УКП№2 давление в подающей линии $P_{\text{АРГ.ФАКТ.}}$) при котором зеркала металла начинают вызывать ухудшение стабильности горения дуг в расположенных рядом фазах:

для УКП№1 180т ПАО «ММК» $Q_{\text{АРГ}} = 400 - 600$ л/мин;

для УКП№2 120т ПАО «Северсталь» $P_{\text{АРГ.ФАКТ.}} = 15$ атм.

Важно отметить, что на УКП№1 в случае продувки с использованием аварийной фурмы возмущения на поверхности жидкого металла начинали оказывать влияние на ближайшую фазу уже при сравнительно небольших значениях $Q_{\text{АРГ}} \geq 200$ л/мин.

Необходимо также отметить, что в ряде случаев в зависимостях $D_3 = f(Q_{\text{АРГ}})$ для УКП№1 присутствовали так называемые «мертвые зоны», обусловленные отсутствием продувки в одном или обоих продувочных блоках, а также в аварийной фурме. Дополнительный анализ графиков задания $Q_{\text{АРГ.ЗАД}}$ и фактического расхода $Q_{\text{АРГ.ФАКТ.}}$ аргона (рис. 3.11) показал, что режимы несиммет-

ричной продувки с неодинаковым значением $Q_{\text{АРГ.ФАКТ}}$ для различных продувочных блоков возникают достаточно часто. Это обстоятельство требует учета при разработке оптимальных несимметричных режимов горения дуг и алгоритмов автоматического управления электрическими режимами УКП.

Также стоит отметить, что увеличение температуры металла и связанное с этим снижение вязкости шлака вызывали подъем экспериментальной характеристики $D_3 = f(P_{\text{АРГ.ФАКТ.}})$, то есть приводили к увеличению диаметра зеркала при аналогичных значениях давления аргона.

Так на УКП№2 при повышенной температуре $T = 1643^\circ\text{C}$ значение критического давления $P_{\text{АРГ.крит.}} = 15$ атм., при котором возникало негативное влияние на дуги, оказалось одинаковым для фаз «1» и «2». В то же время, при пониженной температуре $T = 1518^\circ\text{C}$ значение $P_{\text{АРГ.крит.}}$ для фазы «1» составило 17 атм., что на 2 атм. выше, чем для фазы «2», подтверждая заключение о большем влиянии зеркала ванны на фазу «2» УПК2 ЭС. Также на УКП№1 при повышенной температуре жидкой стали образование зеркала происходило при меньших значениях $Q_{\text{АРГ.}}$, что объясняется различной вязкостью шлакового слоя.

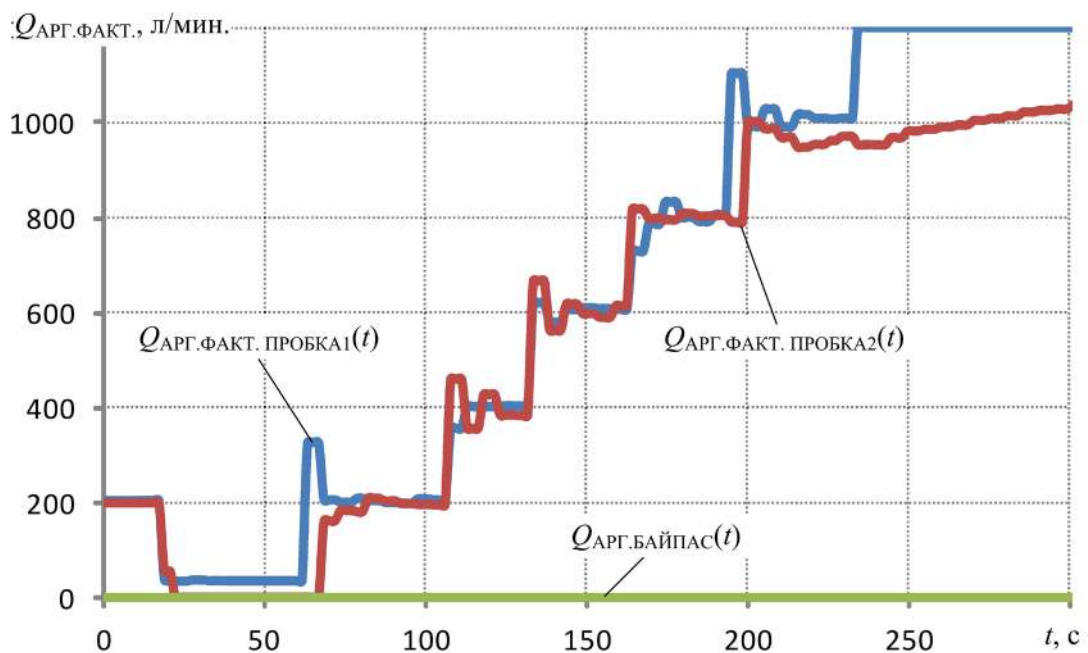


Рис. 3.11 - Фактический расход аргона для АПК-3 при различных режимах аргонной продувки (серия измерений №6, соответствующая донной продувке)

3.3. Результаты экспериментальных исследований влияния режимов аргонной продувки на гармонический состав токов электрических дуг

Ранее было установлено, что интенсивная продувка расплава аргоном приводит к разрыву слоя шлака, что, в свою очередь, приводит к оголению электрических дуг, расположенных в непосредственной близости от продувочных блоков. Следствием оголения дуг является снижение теплового КПД электрических дуг, что негативно сказывается на энергоэффективности печи. Ранее отмечалось, что коэффициент гармонических искажений токов электрических дуг может выступать в качестве параметра для управления электрическими режимами печи, обеспечивая динамическую адаптацию к изменяющимся шлаковым режимам и режимам аргонной продувки. В таком случае целесообразным является проведение исследования для точного установления характера влияния режимов аргонной продувки на величину суммарного коэффициента гармонических искажений токов дуг.

Эксперимент по установлению влияния интенсивности аргонной продувки на суммарный коэффициент гармонических искажений токов дуг проводился в условиях реальной плавки. Ключевым условием его проведения было поддержание неизменных параметров электрического режима печи: ступени вторичного напряжения печного трансформатора $N_{\text{ТР}}$ и номера рабочей кривой $N_{\text{РК}}$. Таким образом, единственным варьируемым параметром являлся расход аргона $Q_{\text{АРГ}}$, подаваемого в расплав через продувочные блоки. Изменение расхода аргона осуществлялось ступенчато, с выдержкой на каждом уровне, достаточной для стабилизации процессов в ванне печи. Важно отметить, что на момент начала эксперимента высота слоя шлака составляла ориентировочно 150 мм, что обеспечивало исходно стабильное горение дуг под слоем шлака.

В ходе проведения эксперимента осуществлялась запись мгновенных значений сигналов токов на первичной стороне печного трансформатора с использованием регистратора электрических событий РЭС-3, производства ООО «Прософт-Системы», с частотой дискретизации 4 кГц.

Полученные мгновенные значения сигналов токов дуг обрабатывались в среде математического моделирования MATLAB Simulink, где выполнялся рас-

чѐт суммарного коэффициента гармонических искажений K_I (THD_I) с использованием встроенной функции вычисления THD функционирующей по формуле:

$$K_I(THD_I) = \frac{\sqrt{I_{RMS}^2 - I_0^2 - I_1^2}}{I_1} \cdot 100\%, \quad (3.1)$$

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

На основании полученных данных были построены временные зависимости среднего по фазам значения тока на первичной стороне печного трансформатора, коэффициента гармонических искажений токов дуг и расхода аргона (рис.3.12).

Из представленных графиков видно, что изменение расхода аргона также приводит к изменению значения коэффициента гармонических искажений токов электрических дуг. Так, при среднем значении расхода аргона $Q_{АРГ.} = 53,6$ м³/ч коэффициент гармонических искажений токов составил $K_I = 10,06\%$, при среднем значении расхода аргона $Q_{АРГ.} = 40,9$ м³/ч коэффициент гармонических искажений токов составил $K_I = 7,02\%$, а при среднем значении расхода аргона $Q_{АРГ.} = 27,7$ м³/ч коэффициент гармонических искажений токов составил $4,88\%$. Таким образом, наблюдается прямая зависимость коэффициента гармонических искажений тока от расхода аргона. Механизм этого явления связывается с физическим воздействием аргонной продувки на шлаковый слой. При низких значениях расхода аргона диаметр зеркала жидкого металла сравнительно небольшой и, вкупе с мениском, частично экранирует горящую дугу. Однако с увеличением интенсивности продувки увеличивается зеркало жидкого металла, что приводит к оголению электрических дуг, расположенных вблизи продувочных блоков. Горение электрической дуги на открытом пространстве менее стабильно, характеризуется большими флуктуациями длины и напряжения, что и приводит к увеличению нелинейных искажений в форме кривой тока, и, как следствие, к росту K_I . Дальнейшее увеличение интенсивности аргонной продувки приводит к образованию волн и брызг жидкого металла, способных приводить в закорачиванию электрических дуг, и вызывающие еще больший рост K_I .

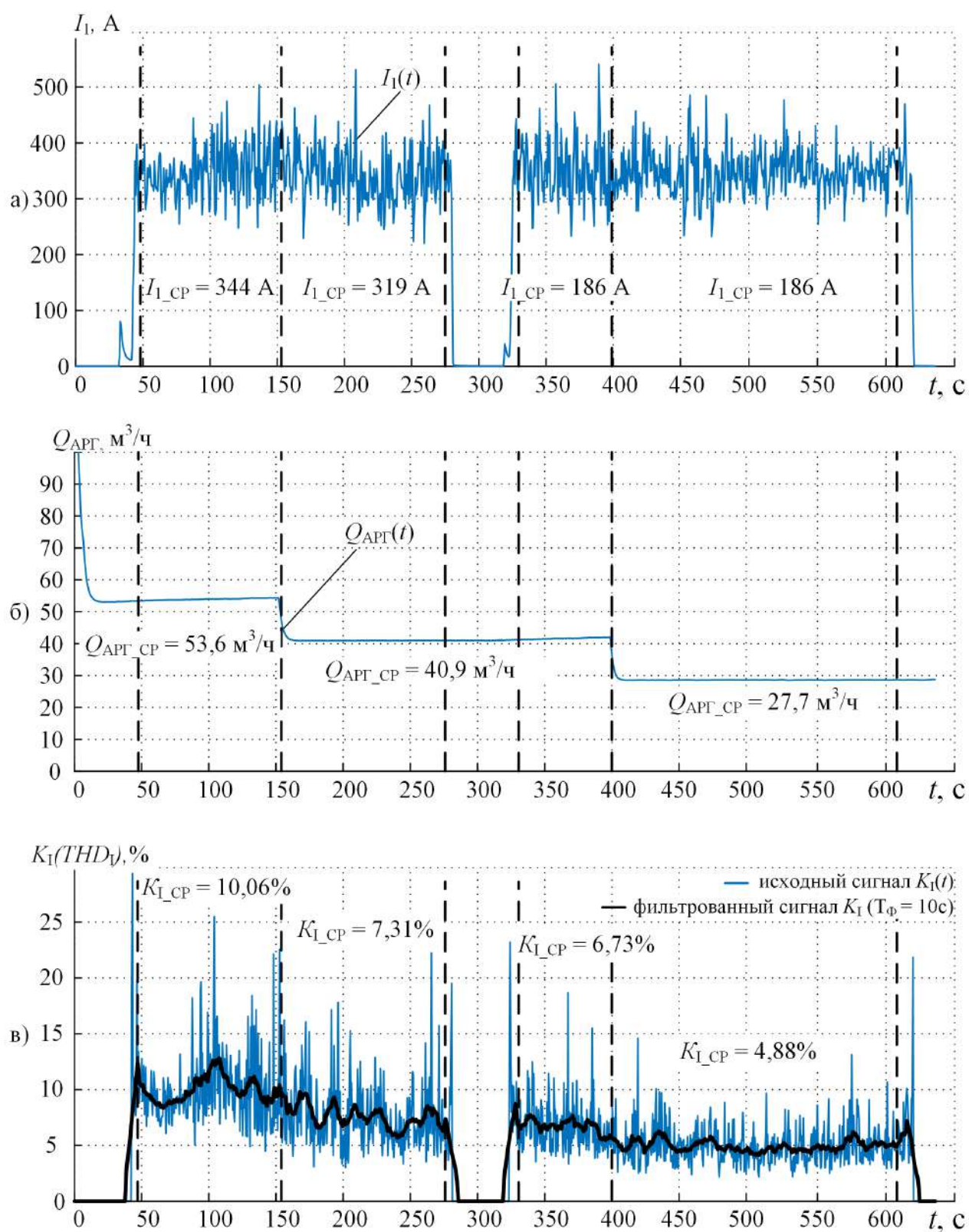


Рис. 3.12 - Изменение суммарных коэффициентов гармонических искажений токов на первичной стороне печного трансформатора УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» при изменении расхода аргона

3.4. Обоснование предлагаемых подходов к управлению электрическими режимами УКП

В ходе проведения экспериментальных исследований было установлено, что при интенсивной аргонной продувке уменьшение длины электрической дуги оказывает положительное влияние на ее эксплуатационные характеристики. Это выражается прежде всего в заметном повышении стабильности горения дуги, сопровождающемся значительным уменьшением флуктуаций как геометрической длины дугового разряда, так и падения напряжения на нем. Прямым следствием этих улучшений является снижение дисперсии тока дуги и уменьшение уровня нелинейных искажений в форме кривой тока.

Наглядная демонстрация описанного эффекта представлена на рис. 3.13. На данном рисунке представлены графики изменения среднего по трем фазам значения тока, измеряемого на первичной стороне печного трансформатора; средних по трем фазам фактического и заданного значений импеданса; а также средних по трем фазам значений коэффициентов суммарных гармонических искажений токов электрических дуг. Для объективной количественной оценки степени стабильности горения дуг при использовании различных рабочих кривых, и, следовательно, различных длин дуг, были рассчитаны коэффициенты вариации для значений тока и импеданса. Так, при работе на $N_{PK} = 6$ коэффициент вариации тока составил $V_{I_{1_CP}} = 0,0257$ при среднем значении тока $I_{1_CP} = 339$ А, а коэффициент вариации импеданса фаз $V_{Z_{2_CP}} = 0,0312$. Как отмечалось ранее, с уменьшением длины дуги повышается стабильность ее горения, что выражается в уменьшении дисперсии токов и фактических значений импеданса фаз и, соответственно, в снижении их коэффициентов вариации. Так, при работе на более коротких дугах с использованием $N_{PK} = 2$ коэффициент вариации тока составил $V_{I_{1_CP}} = 0,0114$ при среднем значении тока $I_{1_CP} = 347$ А, а коэффициент вариации импеданса фаз $V_{Z_{2_CP}} = 0,0129$.

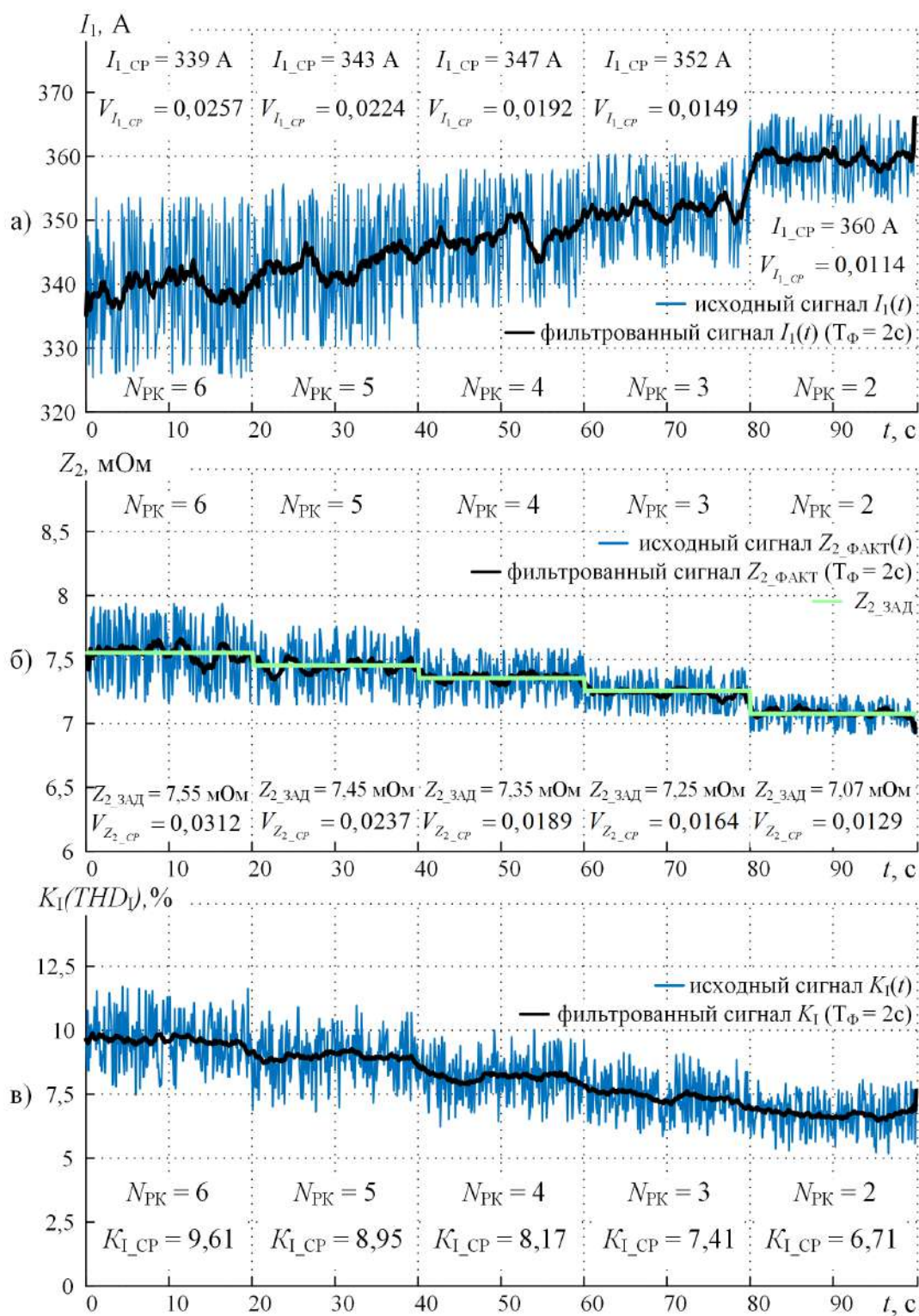


Рис. 3.13 - Экспериментальное исследование качества регулирования импеданса при изменении длины электрической дуги (УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» при $Q_{АРГ.ФАКТ.} = 1600 \text{ л/мин}$)

Следует подчеркнуть, что во время проведения исследования, толщина слоя шлака находилась на уровне $\approx 150 \text{ мм}$, а также осуществлялась интенсивная аргонная продувка с постоянным уровнем расхода аргона. Именно сочета-

ние этих условий, особенно интенсивной и неизменяемой аргонной продувки, доказывает обоснованность предлагаемого подхода к управлению электрическими режимами У КП.

Данный эффект обусловлен усилением электродинамических явлений в электрических дугах и жидком металле при увеличении силы тока. Увеличившиеся электродинамические силы противодействуют захлестыванию дуги волнами жидкого металла, которые возникают в результате интенсивной аргонной продувки. Также электрическая дуга создает на поверхности жидкого металла характерную лунку (мениск) увеличивающуюся пропорционально силе тока. При этом электрическая дуга погружается в образовавшийся мениск за счет чего происходит экранирование дуги жидким металлом. Необходимо подчеркнуть, что толщина шлака не влияет на глубину заглубления дуги в металл. По результатам исследований [5,6], величина этого заглубления составляет около 3 мм/кА, а высота заглубления определяется по формуле:

$$h_m = 3 \cdot 10^{-3} \cdot I_d, \quad (3.2)$$

где h_m – высота заглубления электрической дуги в жидкий металл, I_d – сила тока электрической дуги.

Поскольку длина электрической дуги имеет прямую связь с уровнем вторичного напряжения печного трансформатора, то эффект экранирования дуги мениском будет более выражен при меньших уровнях вторичного напряжения печного трансформатора.

$$l_d = \frac{U_d - a}{b} = \frac{(\sqrt{U_{2\phi}^2 - (I_d \cdot x)^2} - I_d \cdot r) - a}{b} \quad (3.3)$$

где a – сумма падений напряжений у катода и анода, которые по данным Н.В. Огорокова, А.В. Егорова, В. Швабе составляет 40В [68-72]; b – градиент напряжения в столбе дуги, при горении дуг на жидкий металл = 1В/мм [68-72]; U_d – напряжение на электрической дуге; $U_{2\phi}$ – фазное напряжение вторичного электрического контура; I_d – ток электрической дуги; x , r – средние активные и реактивные сопротивления фаз.

Данный эффект подтверждается экспериментальными осциллограммами представленными на рис. 3.14.

Изложенные экспериментальные данные обосновывают применение несимметричных электрических режимов, суть которых заключается в целенаправленном уменьшении заданных значений импедансов вторичного электрического контура в фазах, находящихся под влиянием зеркал жидкого металла создаваемых работой продувочных блоков. Уменьшение заданного значения импеданса вторичного электрического контура и, как следствие, длины дуги способствует использованию эффекта ее погружения в мениск жидкого металла, что, как было установлено, приводит к экранированию дуги и заметному повышению стабильности ее горения и повышению теплового КПД. При этом ключевым аспектом является сохранение среднего по фазам действующего значения тока при фиксированной средней уставке импеданса фаз, достигаемое за счет соответствующей коррекции уставок импеданса отдельных фаз. Подобное управление позволяет целенаправленно минимизировать негативное воздействие интенсивной продувки на стабильность горения дуг и на их тепловой КПД.

Наряду с применением несимметричных электрических режимов, необходима разработка алгоритма, который будет осуществлять динамическую адаптацию электрических режимов к текущим шлаковым режимам и условиям аргонной продувки. Такой алгоритм должен учитывать изменяющиеся условия в ванне У КП, включая интенсивность продувки и состояние шлакового покрова, динамически корректируя параметры работы, в том числе степень несимметрии длин дуг. В качестве критерия, используемого данным алгоритмом для динамической адаптации, предлагается коэффициент суммарных гармонических искажений тока дуги. Обоснованность выбора этого показателя подтверждается его тесной связью как со шлаковыми режимами, так и с режимами аргонной продувки, поскольку он обладает высокой чувствительностью к стабильности горения дуги и флуктуациям электрических параметров. Следовательно, непрерывный мониторинг и анализ коэффициента гармонических искажений тока позволит системе управления своевременно корректировать длины дуг по фазам, обеспечивая поддержание оптимальных условий работы У КП.

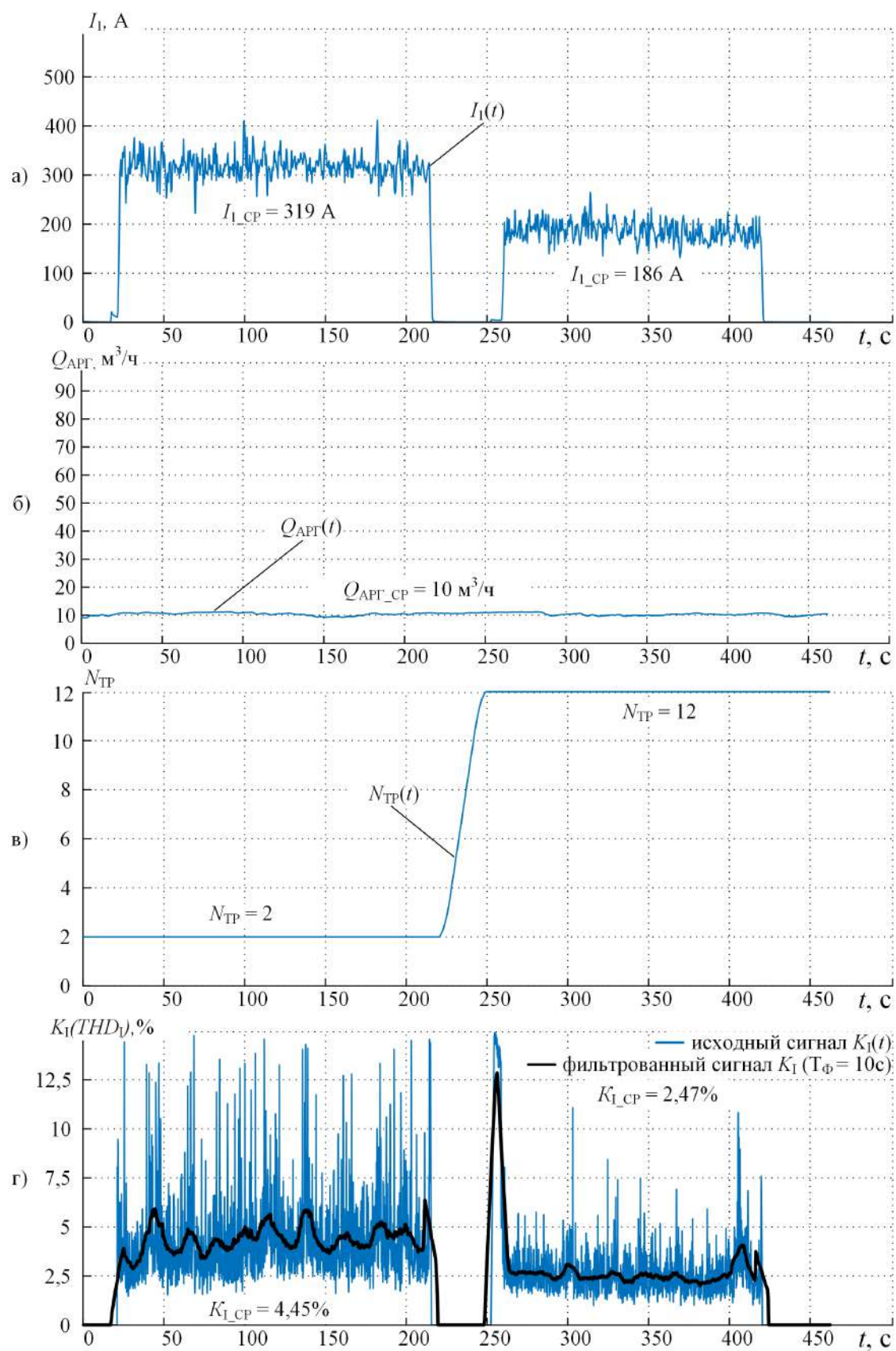


Рис. 3.14 - Экспериментальное исследование качества регулирования импеданса при изменении длины электрической дуги (УКП №2 120т. ПАО «Северсталь»)

3.4. Выводы по главе 3

1. На основании исследований, проведенных такими учеными как Ю.М. Миронов, А.Н. Макаров, А.Д. Свенчанский, М.Я. Смелянский, Н. Pfeifer, D. Ameling и J. Petry было показано, что для обеспечения устойчивого горения дуги и, что критически важно, для уменьшения теплотерь на нагрев футеровки стен, свода и с отходящими газами, толщина слоя шлака должна быть достаточной для экранирования электрических дуг.

2. Экспериментально подтверждено, что степень экранирования электрических дуг шлаком оказывает существенное влияние на стабильность их горения и, как следствие, на гармонический состав токов. Экранирование дуг шлаком способствует повышению их теплового КПД, и приводит к снижению суммарного коэффициента искажения синусоидальности кривой тока $K_1(THD_1)$. Напротив, работа с неэкранированными дугами характеризуется значительными тепловыми потерями на футеровку и свод, сниженным тепловым КПД и высоким уровнем K_1 .

3. Экспериментально подтверждено влияние аргонной продувки на геометрию поверхности жидкого металла, показан процесс образования зеркала жидкого металла. Установлены нелинейные зависимости диаметра зеркала жидкого металла от расхода аргона и типов продувки (донная или аварийная фурма). Показано, что увеличение температуры металла способствует снижению вязкости шлака и, как следствие, увеличению диаметра зеркала металла при тех же параметрах продувки. Выявлено, что при определенных значениях расхода аргона образующееся зеркало жидкого металла приводит к оголению дуг в фазах, находящихся вблизи продувочных блоков, оказывая негативное влияние на стабильность их горения и снижая тепловой КПД. Отмечена специфика влияния продувки на разные фазы в зависимости от конструкции УКП и расположения продувочных блоков. Установлена прямая зависимость между интенсивностью аргонной продувки и коэффициентом гармонических искажений K_1 токов электрических дуг. Увеличение расхода аргона, приводящее к уве-

личению диаметра зеркала металла и оголению дуг, снижает их тепловой КПД и вызывает рост K_1 из-за снижения стабильности горения дуг.

4. Экспериментально подтверждено, что уменьшение длины электрической дуги в условиях интенсивной аргонной продувки приводит к повышению стабильности горения дуг. Это обусловлено погружением дуги в мениск жидкого металла, что обеспечивает ее частичное экранирование, способствуя локальному улучшению теплопередачи в металл (и, следовательно, теплового КПД дуги), и снижает негативное воздействие волн и брызг, что в свою очередь снижает K_1 .

5. Представленные экспериментальные подтверждения взаимосвязи между шлаковыми режимами, параметрами аргонной продувки, стабильностью горения дуг, их тепловым КПД и гармоническим составом токов дают обоснование для разработки и внедрения несимметричных электрических режимов и усовершенствованных алгоритмов автоматического управления электрическими режимами с динамической адаптацией длин электрических дуг и вторичного напряжения печного трансформатора с целью повышения энергоэффективности У КП.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ УКП С ДИНАМИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИЕЙ УСТАВОК ИМПЕДАНСА ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТУРА УКП И СТУПЕНЕЙ РПН ПЕЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

4.1. Разработка методики задания оптимальных электрических режимов УКП с учетом расположения оборудования аргонной продувки

Как отмечалось в предыдущей главе, в ходе исследований было установлено, что при интенсивной аргонной продувке укорачивание электрической дуги приводит к повышению стабильности горения дуги, уменьшению дисперсии тока и повышению теплового КПД дуги. На этом основании был предложен подход к заданию несимметричных электрических режимов УКП, при которых длины дуг фаз, находящихся в нестабильной зоне печи, следует уменьшать при сохранении среднего по фазам действующего значения тока при фиксированной средней уставке импеданса фаз.

Основной проблемой при разработке методики формирования несимметричных электрических режимов является отсутствие четких критериев оптимальности. При этом разрабатываемая методика должна быть универсальной и применимой к УКП любых конфигураций, учитывая расположение продувочных пробок и аварийной фурмы [90-92].

Рассмотрим основные показатели, которые будут применяться в ходе дальнейшего анализа:

1. Для связи между процессом нагрева ванны и электрическим режимом будет использоваться эмпирический коэффициент интенсивности нагрева металла $K_{ИН}$, содержащий все параметры, от которых зависит нагрев металла дугами.

$$K_{ИН} = P_d I_d, \quad (4.1)$$

где I_d – действующее значение тока электрической дуги; P_d – мощность электрической дуги

Важно отметить, что $KИИ$ характеризует степень полезного использования дуги лишь косвенным образом и не учитывает толщину слоя шлака и степень экранирования дуги.

2. Коэффициент излучения дуг $KИ$, определяемый по формуле:

$$KИ = P_d U_d \quad (4.2)$$

где U_d и P_d – действующие (среднеквадратичные) значения активной мощности и напряжения электрической дуги.

Основными положениями при задании несимметричных режимов горения дуг являются: 1) дополнительное уменьшение коэффициентов излучений $KИ$ дуг фаз находящихся под влиянием зеркал жидкого металла создаваемых работой продувочных блоков в днище стальной ванны или работой аварийной фурмы; 2) сохранение среднего по фазам действующего значения тока $I_{d,ср}$ при фиксированной средней уставке импеданса фаз 1-3; 3) суммарное значение коэффициента интенсивности нагрева жидкой стали $KИИ$ должен соответствовать заданному, рассчитываемому на основании технологически необходимой скорости нагрева жидкой стали; 4) достижение меньшего значения коэффициента излучений дуг $KИ$.

С учётом обозначенных требований, методика определения оптимальных значений уставок параметров регулирования (импедансов вторичного электрического контура У КП $Z_{2ф.А.ЗАд}$, $Z_{2ф.В.ЗАд}$, $Z_{2ф.С.ЗАд}$) примет следующий вид:

1. Установить степень влияния зеркал жидкого металла на фазы в соответствии с конструкцией У КП.

2. Определить электрическую принадлежность фаз и сопоставить их с обозначениями в системе управления.

3. Рассчитать заданное значение коэффициента интенсивности нагрева $KИИ_{ЗАд}$ на основе технологически необходимой скорости нагрева.

4. Определить требуемое количество рабочих кривых и их соответствие длинам дуг.

5. Сформировать режим горения коротких дуг с максимальной несимметрией, обеспечивающей минимальную длину дуг в фазах, расположенных вблизи зеркал жидкого металла.

Для режима коротких дуг целесообразно обеспечить достижение заданного суммарного по трем фазам коэффициента интенсивности нагрева и минимизировать коэффициенты теплового излучения дуг. При этом важно, чтобы ток укорачиваемых дуг не превышал максимальное допустимое значение вторичного тока для данной ступени РПН печного трансформатора. Также средние значения вторичного тока по трем фазам не должны превышать номинальный вторичный ток для этой же ступени РПН. Следовательно, наряду с укорачиванием дуг фаз, расположенных вблизи зеркал жидкого металла, необходимо увеличивать длину дуг фаз, удаленных от продувочных блоков и не подверженных влиянию зеркал. Это увеличение должно быть таким, чтобы суммарные энергетические параметры по всем трем фазам оставались неизменными. Важным условием также является поддержание в фазах с удлиненными дугами такой длины дуги, чтобы слой шлака был на 20% больше её. Это, совместно с минимизацией коэффициента излучения фаз, находящихся под действием зеркал, положительно сказывается на тепловом КПД дуг.

Система критериев для режима работы с короткими дугами имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{2\phi_КОР} > 1,3 \cdot Z_{2\phi_КЗ} \\ I_{Д_КОР_МАКС} < \lambda \cdot I_{2НОМ} \\ I_{Д_СР} \leq I_{2НОМ} \\ КИ_{КОР} \rightarrow \min \\ l_{Д_ДЛ} \leq 1,2 \cdot h_{Ш} \\ I_{Д_ДЛ} \geq I_{Д_МИН} \\ КИН_{\Sigma} = КИН_{3АД} \end{array} \right. \quad (4.3)$$

где $Z_{2\Phi_КОР}$ – значение уставки импеданса для укорачиваемой дуги; $Z_{2\Phi_КЗ}$ – значение импеданса фазы; $I_{Д_КОР_МАКС}$ – максимальное допустимое значение тока короткой дуги; λ – перегрузочная способность печного трансформатора; $I_{2_НОМ}$ – значение номинального вторичного тока печного трансформатора; $KИ_{КОР}$ – коэффициент излучения укорачиваемой дуги; $l_{Д_ДЛ}$ – 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); $KИИ_{\Sigma}$ – суммарное расчетное значение коэффициента интенсивности нагрева; $KИИ_{ЗАД}$ – расчётное заданное значение коэффициента интенсивности нагрева.

Значения балансовых коэффициентов для коротких дуг найдутся следующим образом:

$$K_{b_КОР} = \frac{Z_{2\Phi_КОР}}{Z_{2\Phi_СР}} \quad (4.4)$$

где $Z_{2\Phi_КОР}$ – значение уставки импеданса для укорачиваемой дуги; $Z_{2\Phi_СР}$ – среднее значение уставки импеданса фаз 1-3.

Значения балансовых коэффициентов для длинных дуг найдутся следующим образом:

$$K_{b_ДЛИН} = \frac{Z_{2\Phi_ДЛИН}}{Z_{2\Phi_СР}} \quad (4.5)$$

где $Z_{2\Phi_ДЛИН}$ – значение уставки импеданса для удлиняемой дуги; $Z_{2\Phi_СР}$ – среднее значение уставки импеданса фаз 1-3.

Электрический режим, который соответствует системе критериев (4.3), следует задавать в том случае, когда зеркала жидкого металла оказывают влияние на одну дугу или одинаковое влияние на две дуги. В первом случае критериям для укорачиваемой дуги должна соответствовать одна фаза, а критериям для удлиняемой дуги две другие. Во втором случае, когда зеркало жидкого металла оказывает одинаковое влияние на 2 фазы они должны соответствовать критериям для укорачиваемых дуг, а оставшаяся фаза должна соответствовать критерию для удлиняемой дуги.

В случае, когда зеркала металла оказывают неодинаковое влияние на две фазы, для фазы с наибольшим влиянием зеркала жидкого металла следует максимально укорачивать дуги, тогда дуги, на которые зеркала металла оказывают меньшее воздействие следует задавать средней длины. Таким образом, две дуги укорачиваются в разной степени, а одна дуга удлиняется.

Тогда система критериев примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{2\Phi_КОР} > 1,3 \cdot Z_{2\Phi_КЗ} \\ I_{Д_КОР_МАКС} < \lambda \cdot I_{2НОМ} \\ КИ_{КОР} \rightarrow \min \\ Z_{2\Phi_КОР} < Z_{2\Phi_СР_д} < Z_{2\Phi_ДЛ} \\ I_{Д_МИН} < I_{Д_СР_д} < \lambda \cdot I_{2НОМ} \\ КИ_{СР_д} \rightarrow \min \\ I_{Д_ДЛ} \geq I_{Д_МИН} \\ l_{Д_ДЛ} \leq 1,2 \cdot h_{Ш} \\ КИН_{\Sigma} = КИН_{ЗДЛ} \end{array} \right. \quad (4.6)$$

$Z_{2\Phi_СР_д}$ – значение уставки импеданса для дуги средней длины; $Z_{2\Phi_ДЛ}$ – значение уставки импеданса для удлиняемой дуги; $I_{Д_СР_д}$ – значение тока дуги средней длины; $КИ_{СР_д}$ – коэффициент излучения дуги средней длины; $l_{Д_ДЛ}$ – длина электрической дуги.

Значение балансового коэффициента для короткой дуги найдется следующим образом:

$$K_{b_КОР} = \frac{Z_{2\Phi_КОР}}{Z_{2\Phi_СР}} \quad (4.7)$$

где $Z_{2\Phi_КОР}$ – значение уставки импеданса для укорачиваемой дуги; $Z_{2\Phi_СР}$ – среднее значение уставки импеданса фаз 1-3.

Значение балансового коэффициента для дуги средней длины найдется следующим образом:

$$K_{b_СР_д} = \frac{Z_{2\Phi_СР_д}}{Z_{2\Phi_СР}} \quad (4.8)$$

где $Z_{2\Phi_СР_д}$ – значение уставки импеданса для дуги средней длины; $Z_{2\Phi_СР}$ – среднее значение уставки импеданса фаз 1-3.

Значение балансового коэффициента для длинной дуги найдется следующим образом:

$$K_{b_длин} = \frac{Z_{2\phi_длин}}{Z_{2\phi_ср}} \quad (4.9)$$

где $Z_{2\phi_длин}$ – значение уставки импеданса для удлиняемой дуги; $Z_{2\phi_ср}$ – среднее значение уставки импеданса фаз 1-3.

6. Сформировать режим горения длинных симметричных 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%, также ток дуг не должен быть ниже граничного значения, за которым теряется устойчивость горения.

$$\begin{cases} Z_{2\phi_A} = Z_{2\phi_B} = Z_{2\phi_C} \\ I_{д_мин} \leq I_{д} < I_{2ном} \\ l_{д} \leq 1,2 \cdot h_{ш} \end{cases} \quad (4.10)$$

где $Z_{2\phi_A}$, $Z_{2\phi_B}$, $Z_{2\phi_C}$ – значение уставки импеданса для дуг фаз 1-3; $I_{д}$ – среднее значение тока дуг фаз 1-3.

7. Сформировать режим горения 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:

$$I_{д_шаг} = \frac{I_{д_длин} - I_{д_кор}}{n + 1} \quad (4.11)$$

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.

Затем определяется среднее по трем фазам значение тока дуги на рабочей кривой:

$$I_{Д_CP_n} = I_{Д_КОР} + n \cdot I_{Д_ШАГ} \quad (4.12)$$

где $I_{Д_ШАГ}$ – 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 режимом горения коротких дуг (максимальная несимметрия) и симметричным режимом.

8. Уточнить рассчитанные параметры в ходе проведения тестовых плавов. 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.

4.2. Разработка алгоритма автоматического управления электрическими режимами УКП с динамической адаптацией уставок импеданса вторичного электрического контура УКП и ступеней РПН печного трансформатора

Для реализации автоматической адаптации электрических режимов УКП к меняющимся условиям работы необходимо использование специализированного параметра, адекватно отражающего режимы горения электрических дуг. В главе 3 были представлены экспериментальные подтверждения взаимосвязи между шлаковыми режимами, параметрами аргонной продувки, стабильностью горения дуг, их тепловым КПД и гармоническим составом токов. Таким образом управление электрическими режимами может осуществляться с использованием информации о гармоническом составе токов дуг. Необходимо отметить, что данный подход используется зарубежными компаниями – производителями электросталеплавильных агрегатов и систем автоматического управления элек-

трическими режимами, такими как Primetals Technologies (бывший Siemens VAI), Danieli и др. В частности, в системах управления ДСП на основании высших гармоник тока рассчитываются коэффициенты вспенивания шлака, служащие исходными параметрами для систем автоматического управления инжекторами углерода. Необходимо отметить, что коэффициент гармонических искажений также используется и на УКП в блоках динамической адаптации (рис.1.9).

Поскольку разрабатываемые алгоритмы предназначены для динамической адаптации к режимам аргонной продувки и шлаковым режимам, то для удобства управления, а также для наглядности и понимания процессов технологическим персоналом целесообразно ввести величину, отражающую фактическое состояние слоя шлака и зависящую от гармонического состава токов электрических дуг. В качестве такого критерия предлагается использовать коэффициент шлака $K_{\text{ШЛАК}}$, который является аналогом коэффициента вспенивания шлака, используемого в ДСП, для автоматического управления инжекторами УСМ.

В системах управления ДСП коэффициент вспенивания шлака $K_{\text{ШЛАК}}$ может быть определен как обратная величина от K_I с учетом масштабного коэффициента a [93-94]. Для наглядного объяснения взаимосвязи $K_{\text{ШЛАК}} = f(K_I)$ на рис. 4.1 приведена зависимость изменения коэффициента шлака от среднего по фазам коэффициента суммарных гармонических искажений токов дуг. Коэффициенты $K_{\text{ШЛАК}}$ и K_I рассчитывались в системе автоматического управления электрическими режимами и перемещением электродов ArCOS. Как видно из рисунка $K_{\text{ШЛАК}}$ с достаточно высокой статистической точностью ($R^2 = 0,875$) описывается выражением:

$$K_{\text{ШЛАК}} = \frac{a}{K_I} \quad (4.13)$$

При этом коэффициент a может быть определен как произведение 100 на минимальное значение $K_{I_{\min}}$, зафиксированное за цикл плавки при существующей электрической дуге ($I_D > 0$):

$$a = 100 K_{I_{\min}}. \quad (4.14)$$

При корректном расчете параметра a максимальное значение $K_{\text{ШЛАК.}}$, равное 100 единицам, будет соответствовать наиболее стабильному режиму горения электрической дуги с максимальным тепловым КПД.

Коэффициент гармонических искажений тока K_I может быть рассчитан по следующей формуле:

$$K_I = \frac{\sqrt{I^2 - I_{(1)}^2 - I_{(0)}^2}}{I_{(1)}} \cdot 100\% = \frac{I_{\text{ВГ.}}}{I_{(1)}} \cdot 100\%, \quad (4.15)$$

где I - действующее (среднеквадратическое) значение тока; $I_{(1)}$ - действующее значение тока 1-ой гармоники; $I_{(0)}$ - постоянная составляющая тока; $I_{\text{ВГ.}}$ - действующее значение высших гармоник тока.

Использование параметра $K_{\text{ШЛАК.}}$ в алгоритмах автоматического переключения рабочих кривых и ступеней РПН печных трансформаторов позволяет адаптировать электрические режимы У КП с учетом переменной толщины шлака, режимов аргонной продувки, операций подачи материалов в ковш при нагреве и т.д.[95-102].

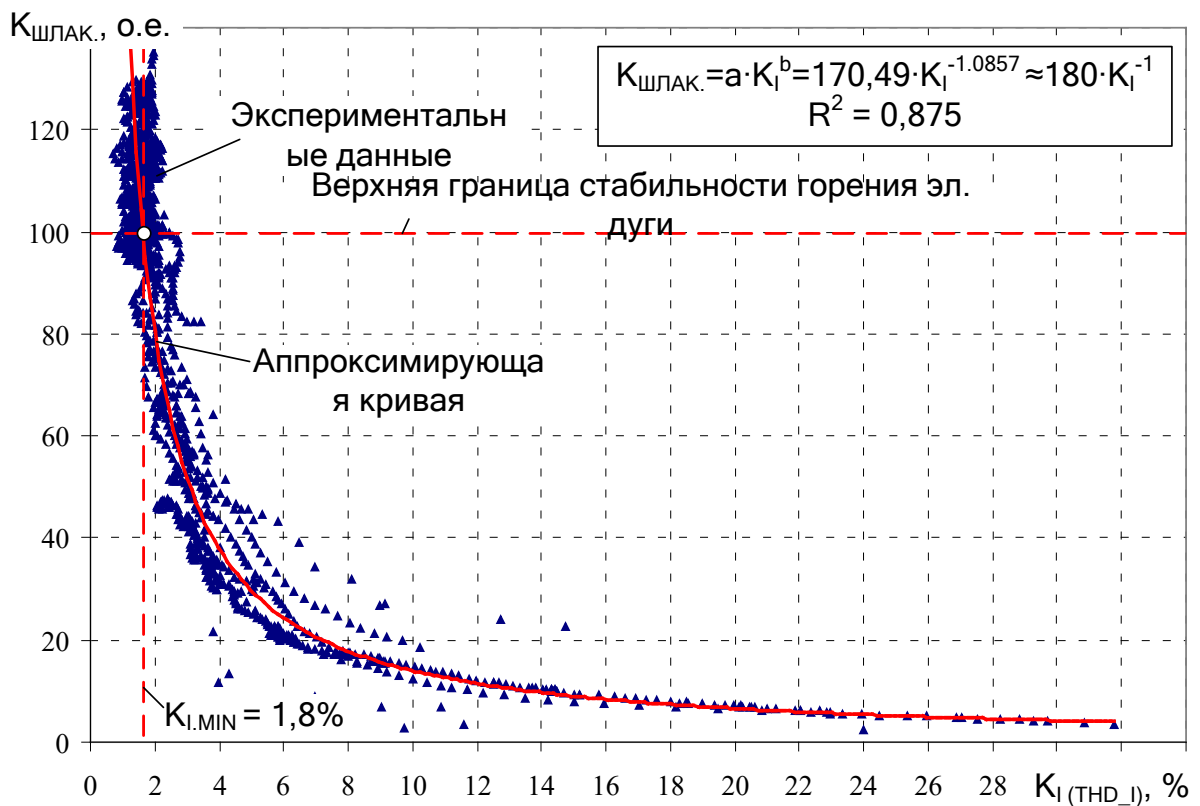


Рис. 4.1 - Экспериментальная зависимость изменения коэффициента шлака от среднего по фазам коэффициента суммарных гармонических искажений токов дуг

Основным принципом управления, положенным в основу алгоритма автоматического управления электрическими режимами, является уменьшение длин дуг при снижении $K_{\text{ШЛАК}}$. В случае если поддержание приемлемого $K_{\text{ШЛАК}}$ на самых коротких дугах не обеспечивается, тогда выполняется автоматическое понижение рабочей ступени печного трансформатора. Напротив, при большом значении $K_{\text{ШЛАК}}$ при работе на максимально длинных дугах формируется сигнал на увеличение ступени трансформатора с целью повышения мощностей дуг и коэффициента интенсивности нагрева $K_{\text{ИН}}$.

На рис.4.2 представлена обобщённая блок-схема алгоритма автоматической адаптации электрического режима к текущим условиям плавки. Данная блок-схема отражает принцип работы только для одного режима работы агрегата (например, одного вида продувки).

Работа алгоритма иллюстрируется графиками, представленными на рис.4.3. В целях упрощения на графиках смоделировано поведение фильтрованного значения $K_{\text{ШЛАК}}$ с возрастающим и спадающим участками. При достижении граничных коэффициентов шлака $K_{\text{ГР1.1}}$, $K_{\text{ГР2.1}}$ осуществляется увеличение длины электрической дуги и изменение степени несимметрии горения дуг с учетом расположения возмущения на поверхности жидкого металла. Для повышения устойчивости работы алгоритма и исключения автоколебаний при переключении $N_{\text{РК}}$, в алгоритм введены дублирующие значения граничных коэффициентов, работающие на понижение номера рабочей кривой: $K_{\text{ГР1}}$, $K_{\text{ГР2}}$. Данное решение обеспечивает гистерезис управляющего воздействия и обеспечивает стабильную работу при значениях $K_{\text{ШЛАК}}$ близких к граничным.

Важно отметить, что для расчета $K_{\text{ШЛАК}}$ необходимо использовать информацию о гармоническом составе токов дуг, находящихся в нестабильной зоне печи. В случае, когда измерение коэффициента гармонических искажений осуществляется на первичной стороне печного трансформатора, следует учитывать схему соединения обмоток печного трансформатора, а также измерительных цепей.

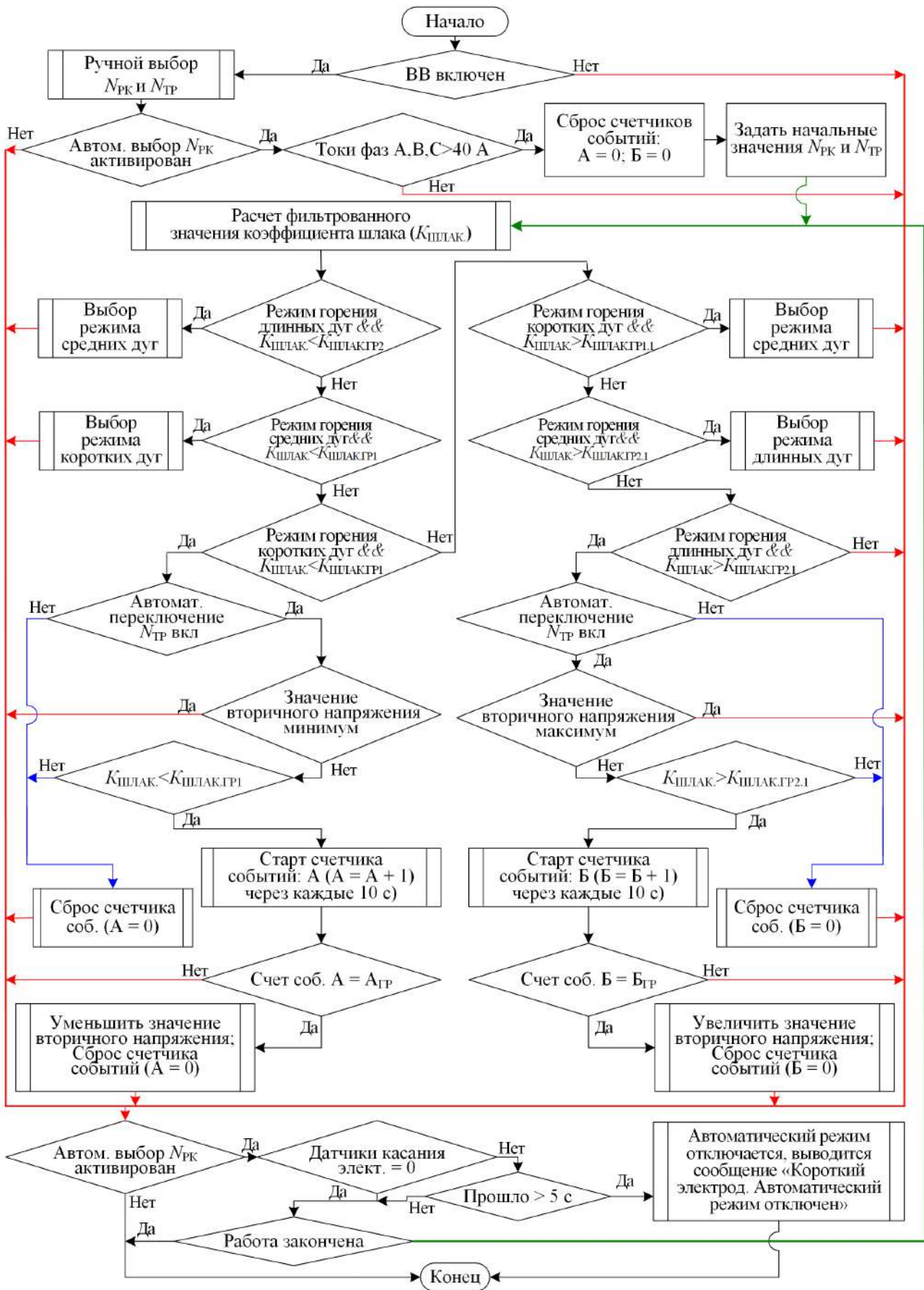


Рис. 4.2 – Блок-схема алгоритма автоматической адаптации электрических режимов к текущим условиям аргонной продувки и шлаковым режимам

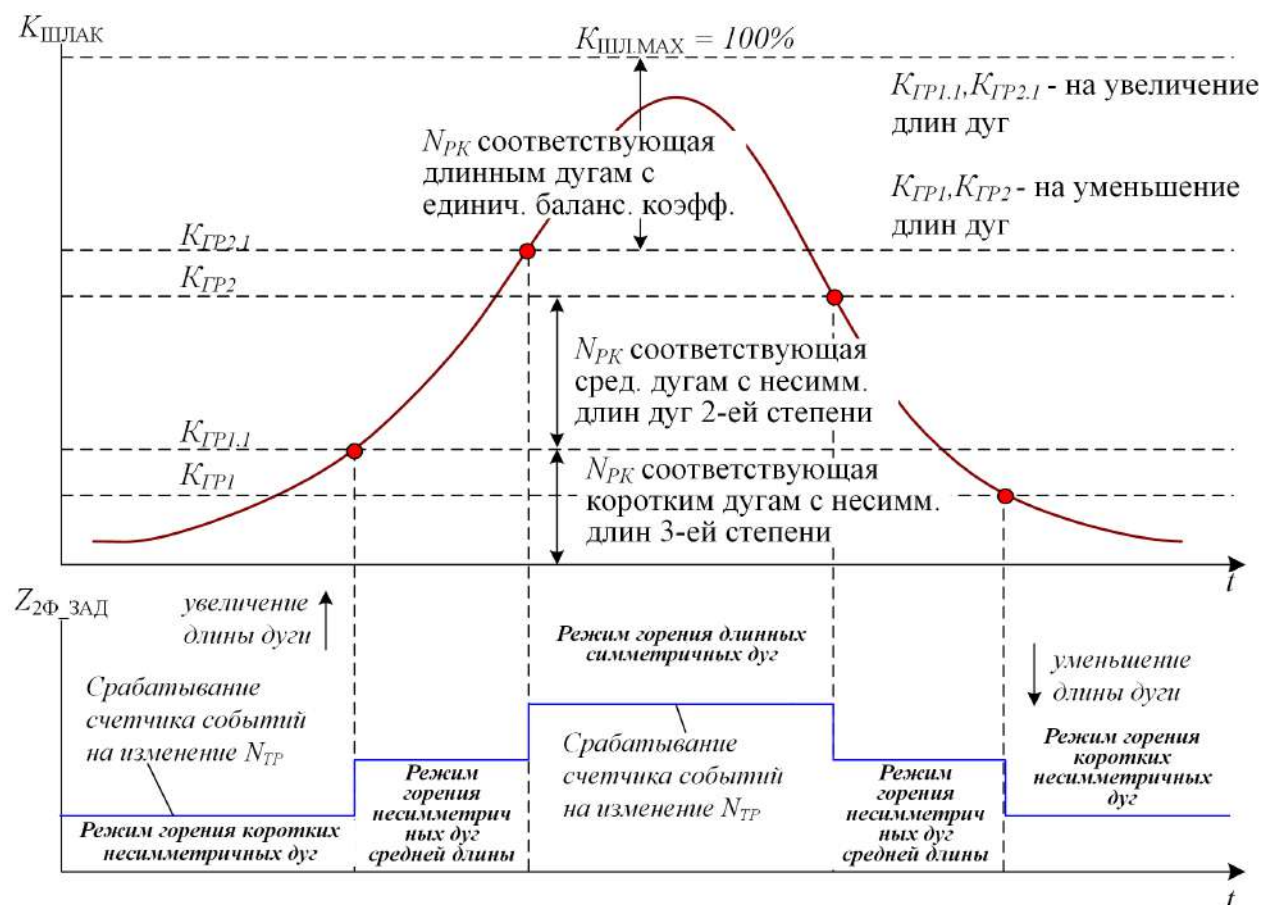


Рис. 4.3 – Пояснение работы алгоритма автоматической адаптации электрических режимов к текущим условиям аргонной продувки и шлаковым режимам в зависимости от уровня коэффициента шлака $K_{\text{ШЛАК}}$

4.3. Разработка методики определения граничных значений коэффициента шлака для алгоритма автоматического управления электрическими режимами УКП

Как отмечалось ранее, алгоритм автоматической адаптации электрических режимов к текущим условиям аргонной продувки и шлаковым режимам использует в качестве критерия коэффициент шлака $K_{\text{ШЛАК}}$, зависящий от гармонического состава токов дуг. Как видно из рис. 4.2 и рис. 4.3, для работы алгоритма используются граничные значения коэффициента шлака, $K_{\text{ГР}}$, при достижении которых осуществляется изменение степени несимметрии и длин электрических дуг. Поэтому для достижения максимального технического эффекта от применения алгоритма автоматического управления электрическими режимами с динамической адаптацией к текущим режимам аргонной продувки

и шлаковым режимам необходимо корректно задать несимметричные режимы, в соответствии с критериями оптимальности изложенными в п.4.1, а также произвести точную настройку самого алгоритма.

Для правильного функционирования алгоритма необходимо корректно рассчитать значение масштабного коэффициента a для формулы определения $K_{\text{ШЛАК}}$ (4.13 и 4.14).

Количество граничных значений $K_{\text{ГР}}$, необходимых для работы алгоритма в определенном режиме агрегата (например, режим продувки или позиция для двухпозиционных агрегатов), на единицу меньше количества рабочих кривых $N_{\text{РК}}$ для данного режима:

$$n_{K_{\text{ГР}}} = 2 \cdot (n_{N_{\text{РК}}} - 1) \quad (4.16)$$

где $n_{K_{\text{ГР}}}$ - необходимое количество граничных значений коэффициента шлака для данного режима работы агрегата; $n_{N_{\text{РК}}}$ - количество рабочих кривых для данного режима работы агрегата.

Для работы алгоритма необходимо задать граничные значения коэффициента шлака $K_{\text{ГР}}$, в соответствии с которыми будет выбираться оптимальный электрический режим: длина электрических дуг, степень несимметрии и уровень вторичного напряжения печного трансформатора. От правильности задания $K_{\text{ГР}}$ будет зависеть качество осуществляемых алгоритмом переключений номеров рабочих кривых $N_{\text{РК}}$ и ступеней напряжения печного трансформатора $N_{\text{ТР}}$.

Граничное значение $K_{\text{ГР1}}$, используемое для перехода к режиму горения коротких дуг с максимальной несимметрией, а также для понижения ступени напряжения печного трансформатора, определяется исходя из условия открытого горения электрических дуг. При открытом горении дуг наблюдается максимальное значение коэффициента гармонических искажений тока. В этом случае значение $K_{\text{ШЛАК}}$ будет близко к минимальному. Эмпирически, в ходе внедрения данных алгоритмов, для этого режима был получен диапазон значений $K_{\text{ШЛАК}}$ от 15 до 25 о.е.

Граничное значение $K_{ГР1.1}$ служит для перехода от режима коротких дуг к дугам средней длины. Его значение также устанавливается эмпирически и должно формировать такой коридор (гистерезис), который обеспечит надежное переключение рабочих кривых $N_{РК}$ без ложных срабатываний и исключит появление автоколебаний $N_{РК}$. Ширину этого коридора следует задать с 10% превышением относительно диапазона колебаний значения $K_{ШЛАК}$.

На следующем этапе необходимо определить верхнее граничное значение $K_{ШЛАК}$. Оно соответствует максимально стабильному процессу горения дуг, когда дуги полностью экранированы шлаком. Это значение (например, $K_{ГР3.1}$) используется для перехода к режиму длинных симметричных дуг и для повышения вторичного напряжения печного трансформатора. Граничное значение для перехода от длинных симметричных дуг к более коротким (например, $K_{ГР3}$) определяется ранее заданным коридором значений (гистерезисом).

Для промежуточных граничных значений коэффициента шлака используется середина диапазона между минимальным и максимальным граничными коэффициентами. Если среднему диапазону соответствует несколько граничных значений, то интервал между минимальным и максимальным значениями делится на равные участки. Тогда выражение для нахождения промежуточного граничного значения примет вид:

$$K_{ГР2} = \frac{K_{ГР1} + K_{ГР3}}{2}, \quad (4.17)$$

где $K_{ГР1}$ – граничное значение $K_{КШЛАК}$, служащее для перехода к режиму горения коротких дуг с максимальной несимметрией; $K_{ГР3.1}$ – граничное значение $K_{ШЛАК}$, служащего для перехода к режиму горения длинных симметричных дуг.

$$K_{ГР2.1} = \frac{K_{ГР1.1} + K_{ГР3.1}}{2} \quad (4.18)$$

где $K_{ГР1.1}$ – граничное значение $K_{КШЛАК}$, служащее для перехода к режиму горения коротких дуг с максимальной несимметрией; $K_{ГР3.1}$ – граничное значение $K_{ШЛАК}$, служащего для перехода к режиму горения длинных симметричных дуг.

4.4. Выводы по главе 4

1. Разработана методика задания оптимальных несимметричных электрических режимов для установок ковш-печь, учитывающая влияние расположения оборудования аргонной продувки на стабильность горения дуг. Методика основана на принципах уменьшения длины дуг в нестабильных зонах, сохранения среднего тока, достижения заданного коэффициента интенсивности нагрева $K_{ИН}$ и минимизации коэффициента излучения $K_{И}$. Определены критерии и предложены формулы для расчета балансовых коэффициентов при формировании режимов коротких, средних и длинных дуг с различной степенью несимметрии.

2. Разработан алгоритм автоматического управления электрическими режимами У КП с динамической адаптацией длин дуг и вторичного напряжения печного трансформатора. В качестве параметра, на основании которого будет осуществляться работа алгоритма, принят коэффициент шлака $K_{ШЛАК}$, рассчитываемый с использованием информации о гармоническом составе токов дуг. Данный коэффициент позволяет косвенно оценивать состояние шлакового покрова и стабильность горения дуг, обеспечивая адаптацию режимов к изменяющимся условиям плавки (толщина слоя шлака, интенсивность продувки).

3. Разработана методика определения граничных значений коэффициента шлака $K_{ГР}$, необходимых для корректной работы алгоритма автоматического управления электрическими режимами У КП с динамической адаптацией к изменяющимся режимам аргонной продувки и толщины слоя шлака. Методика включает определение пороговых значений для переключения рабочих кривых и ступеней трансформатора, основываясь на эмпирических данных для условий открытого горения дуг и максимально стабильного горения под слоем шлака, а также обеспечивая необходимый гистерезис.

4. Комплекс предложенных методик и алгоритмов направлен на повышение эффективности работы У КП за счет оптимизации электрических режимов в реальном времени, повышения теплового КПД дуг и адаптации к динамически изменяющимся условиям плавки, что в конечном итоге должно способствовать снижению энергопотребления.

ГЛАВА 5. РЕАЛИЗАЦИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ УКП

Настоящая глава посвящена реализации, внедрению и оценке эффективности разработанных подходов к энергоэффективному управлению электрическими режимами УКП на действующих агрегатах металлургических предприятий с учетом индивидуальных особенностей каждого агрегата. Вначале были рассчитаны и реализованы несимметричные электрические режимы. Затем, на базе головных ПЛК были реализованы алгоритмы автоматического управления электрическими режимами с динамической адаптацией к толщине слоя шлака и режимам аргонной продувки. В заключение были проведены экспериментальные исследования эффективности усовершенствованного алгоритма автоматического управления электрическими режимами УКП с динамической адаптацией длин электрических дуг и вторичного напряжения печного трансформатора, доказывающие наличие технического эффекта по уменьшению удельного расхода электроэнергии.

В исследуемых УКП используются системы управления электрическими режимами и перемещением электродов ArCOS. Как было показано в главе 1, данная система управления позволяет задавать несимметричные электрические режимы путем независимого задания уставки регулируемого параметра для каждой фазы, при этом система управления имеет ограничение на количество рабочих кривых – не более 6. Также в системе управления отсутствуют встроенные средства измерения гармонического состава токов дуг K_I . Данные факторы следует учитывать при разработке и внедрении усовершенствованных электрических режимов и алгоритмов автоматического управления электрическими режимами с динамической адаптацией к условиям аргонной продувки и шлаковым режимам.



Рис. 5.1 - Рабочее место при наладке электрических режимов и усовершенствованных алгоритмов автоматического управления электрическими режимами
УПК№1 180т. ПАО «ММК»

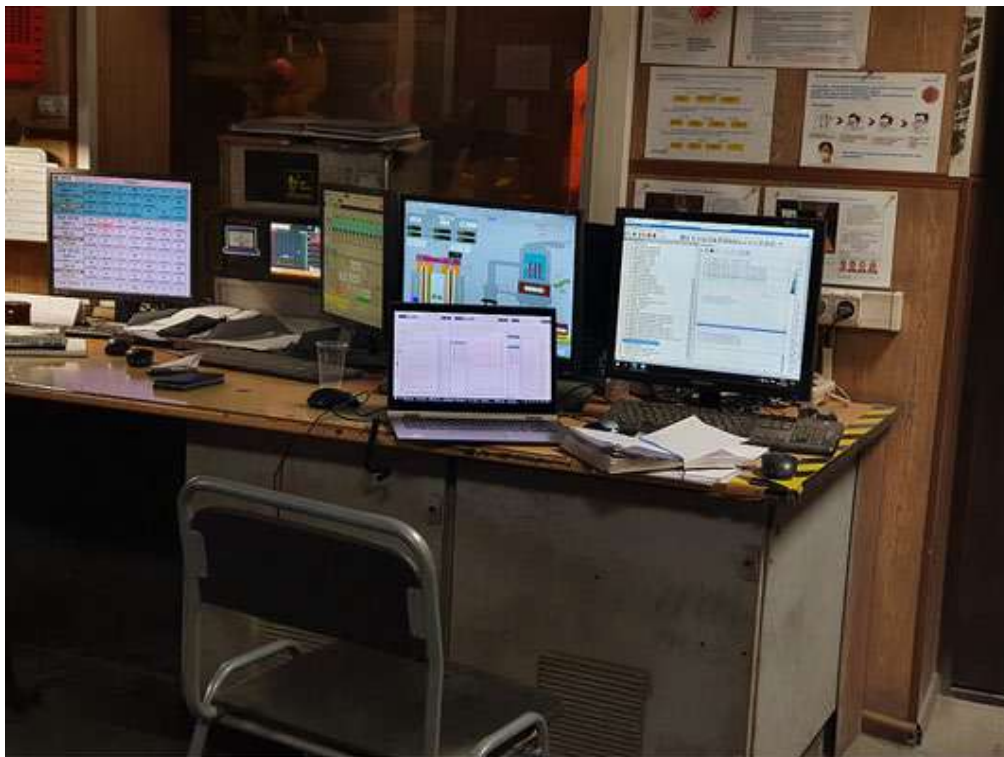


Рис. 5.2 - Рабочее место при наладке электрических режимов и усовершенствованных алгоритмов автоматического управления электрическими режимами
УПК№2 120т. ПАО «Северсталь»

5.1. Реализация усовершенствованных электрических режимов УКП за счет изменения параметров САУЭР и ПЭ на исследуемых агрегатах

На основании изложенных в главе 4 критериев оптимальности, для исследуемых агрегатов были рассчитаны и внедрены новые электрические режимы с реализацией оптимальных несимметричных режимов горения дуг. Задание новых электрических режимов осуществлялось путем изменения параметров системы автоматического управления электрическим режимом (САУЭР) в меню «Setpoints».

В новых электрических режимах рабочие кривые N_{PK} были дифференцированы по назначению и характеристикам:

1) N_{PK} 1 и 6 задают режим горения коротких дуг с наибольшей асимметрией, для наиболее неблагоприятных режимов работы в режиме донной продувки и аварийной фурмы соответственно;

2) N_{PK} 2 и 5 - задают режим горения дуг средней длины со средней несимметрией, для промежуточных режимов работы в режиме донной продувки и аварийной фурмы соответственно;

3) N_{PK} 3 - задает режим горения дуг средней длины с низкой степенью несимметрии, для промежуточных режимов работы в режиме донной продувки. При этом дуги длиннее, чем при $N_{PK} = 2$;

4) N_{PK} 4 - задает режим горения длинных симметричных дуг, для наиболее спокойных режимов работы как в режиме донной продувки, так и при использовании аварийной фурмы.

Важно отметить, что для $N_{TR} = 5$ УКП №1 180т. ПАО «ММК» данные условия не соблюдались в полной мере, поскольку данная ступень напряжения печного трансформатора используется только при технологических операциях разжижения шлака, усреднительной продувки и поддержания заданной температуры жидкой стали без роста температуры, причем только в ручном режиме. Для данной ступени напряжения были сформированы несимметричные режимы горения дуг, но при этом среднее по фазам значение уставки импеданса для $N_{PK} = 1, 2, 5$ и 6 равны между собой, но отличаются степенью несимметрии, а также режимом продувки, для которого они предназначены. Средние по фазам значения уставки импеданса для $N_{PK} = 3$ и 4 также равны между собой, но отличаются друг от друга степенью несимметрии [103-104].

Изменения, внесенные в таблицы уставок задания на импеданс УКП№1 180т. ПАО «ММК» показаны в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Изменения, внесенные в таблицы уставок задания на импеданс («Setpoints») УКП№1 180 т. ПАО «ММК»

N_{TP}	$N_{PK} = 1$			$N_{PK} = 2$			$N_{PK} = 3$			$N_{PK} = 4$			$N_{PK} = 5$			$N_{PK} = 6$		
	$Z_{2\Phi1}$ МОМ	$Z_{2\Phi2}$ МОМ	$Z_{2\Phi3}$ МОМ	$Z_{2\Phi1}$ МОМ	$Z_{2\Phi2}$ МОМ	$Z_{2\Phi3}$ МОМ	$Z_{2\Phi1}$ МОМ	$Z_{2\Phi2}$ МОМ	$Z_{2\Phi3}$ МОМ	$Z_{2\Phi1}$ МОМ	$Z_{2\Phi2}$ МОМ	$Z_{2\Phi3}$ МОМ	$Z_{2\Phi1}$ МОМ	$Z_{2\Phi2}$ МОМ	$Z_{2\Phi3}$ МОМ	$Z_{2\Phi1}$ МОМ	$Z_{2\Phi2}$ МОМ	$Z_{2\Phi3}$ МОМ
5	4,36	4,17	4,36	4,34	4,21	4,34	4,42	4,36	4,42	4,40	4,40	4,40	4,27	4,36	4,27	4,24	4,43	4,24
8	5,02	4,80	5,02	5,15	5,00	5,15	5,23	5,15	5,23	5,30	5,30	5,30	5,06	5,18	5,06	4,88	5,10	4,88
9	5,08	4,85	5,08	5,25	5,10	5,25	5,43	5,35	5,43	5,50	5,50	5,50	5,16	5,28	5,16	4,93	5,15	4,93
10	5,28	5,04	5,28	5,45	5,29	5,45	5,63	5,54	5,63	5,70	5,70	5,70	5,36	5,48	5,36	5,12	5,36	5,12

Для оценки предлагаемых электрических режимов с помощью разработанных ранее математических моделей исследуемых УКП были построены графики основных электрических характеристик. Для УКП№1 180т. ПАО «ММК» графики представлены на рис.5.3 -5.6, также на этих рисунках показаны графики основных электрических характеристик для исходных режимов. Для УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» графики представлены на рис.5.7 -5.10.

Изменения, внесенные в таблицы уставок задания на импеданс УКП№2 120т. ПАО «Северсталь», показаны в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Изменения, внесенные в таблицы уставок задания на импеданс («Setpoints») УКП№2 120 т. ПАО «Северсталь»

N_{TP}	$N_{PK} = 1$			$N_{PK} = 2$			$N_{PK} = 3$			$N_{PK} = 4$			$N_{PK} = 5$			$N_{PK} = 6$		
	$Z_{2\Phi1}$ МОМ	$Z_{2\Phi2}$ МОМ	$Z_{2\Phi3}$ МОМ	$Z_{2\Phi1}$ МОМ	$Z_{2\Phi2}$ МОМ	$Z_{2\Phi3}$ МОМ	$Z_{2\Phi1}$ МОМ	$Z_{2\Phi2}$ МОМ	$Z_{2\Phi3}$ МОМ	$Z_{2\Phi1}$ МОМ	$Z_{2\Phi2}$ МОМ	$Z_{2\Phi3}$ МОМ	$Z_{2\Phi1}$ МОМ	$Z_{2\Phi2}$ МОМ	$Z_{2\Phi3}$ МОМ	$Z_{2\Phi1}$ МОМ	$Z_{2\Phi2}$ МОМ	$Z_{2\Phi3}$ МОМ
3	6,20	6,20	7,39	6,60	6,60	7,21	6,88	6,88	7,30	7,28	7,28	7,28	6,82	7,10	6,69	6,45	6,97	6,06
4	6,06	6,06	7,23	6,45	6,45	7,05	6,74	6,74	7,16	7,08	7,08	7,08	6,68	6,95	6,55	6,34	6,85	5,96
5	5,93	5,93	7,06	6,31	6,31	6,89	6,58	6,58	6,98	6,88	6,88	6,88	6,51	6,77	6,38	6,20	6,70	5,82
12	5,80	5,80	6,91	6,19	6,19	6,76	6,43	6,43	6,83	6,73	6,73	6,73	6,36	6,62	6,23	6,07	6,56	5,70

Следует подчеркнуть, что представленные в таблицах значения уставок являются итоговыми, полученными после уточнения параметров в результате проведения тестовых плавок. Стоит отметить, что при проведении тестовых плавок, в случае необходимости внесения изменений, коррекции подвергались только рабочие кривые, коррекция которых требовалась, как правило это крайние рабочие кривые, т.е. рабочие кривые, отвечающие за самые короткие, либо самые длинные дуги. Графики характеристик построены также с учетом коррекции уставок выполненных в результате проведения наладочных работ.

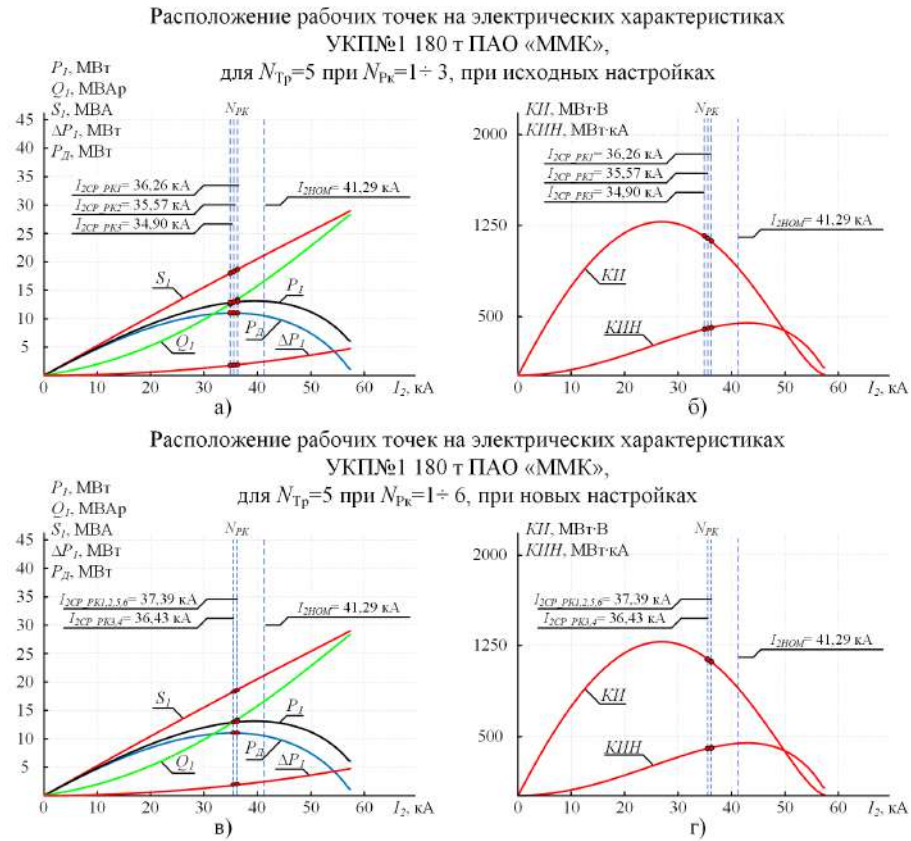


Рис.5.3 - Расположение рабочих точек на электрических характеристиках УКП №1 180т. для $N_{TP} = 5$ и $N_{PK} = 1 \div 6$ при исходных и новых настройках

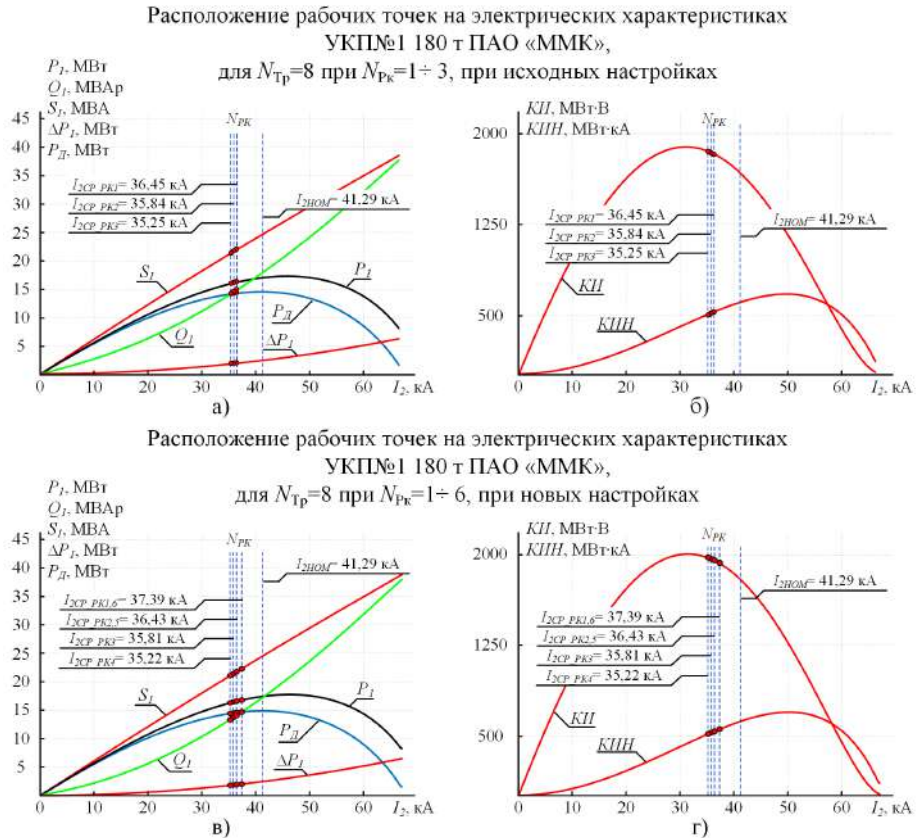


Рис.5.4 - Расположение рабочих точек на электрических характеристиках УКП №1 180т. для $N_{TP} = 8$ и $N_{PK} = 1 \div 6$ при исходных и новых настройках

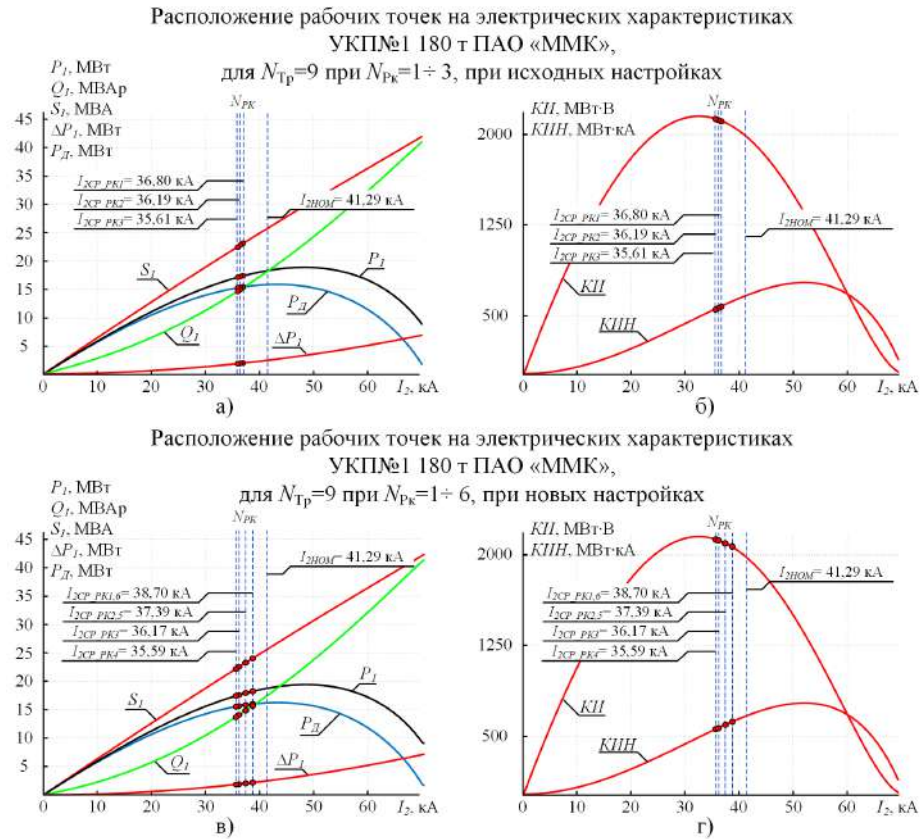


Рис.5.5 - Расположение рабочих точек на электрических характеристиках УКП №1 180т. для $N_{TP} = 9$ и $N_{PK} = 1 \div 6$ при исходных и новых настройках

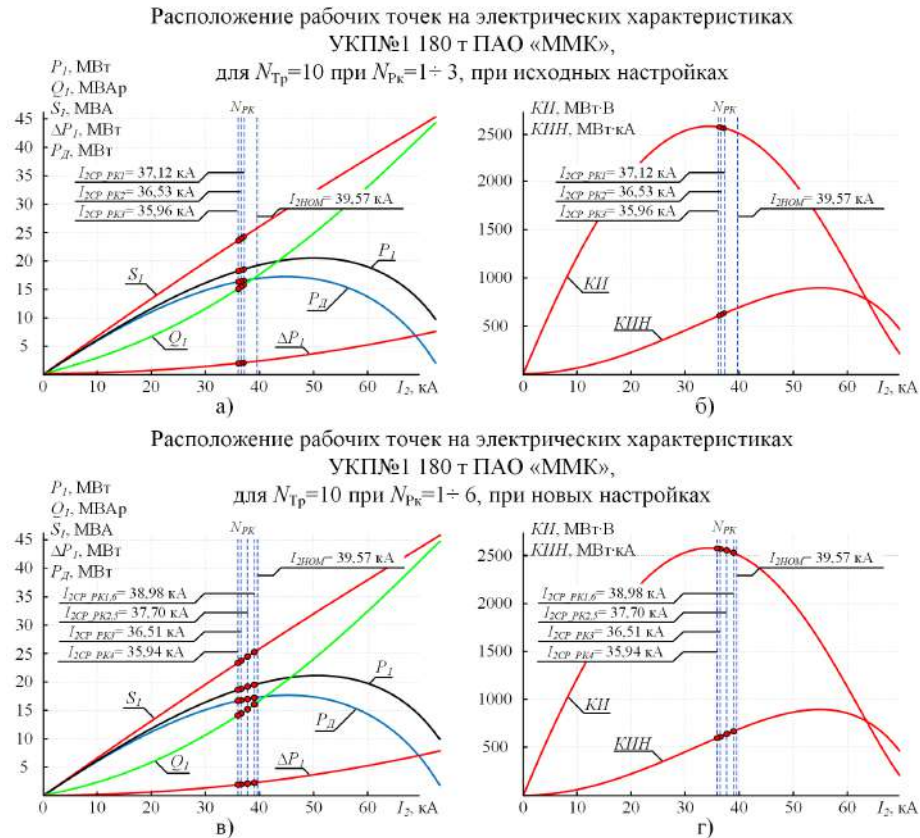


Рис.5.6 - Расположение рабочих точек на электрических характеристиках УКП №1 180т. для $N_{TP} = 10$ и $N_{PK} = 1 \div 6$ при исходных и новых настройках

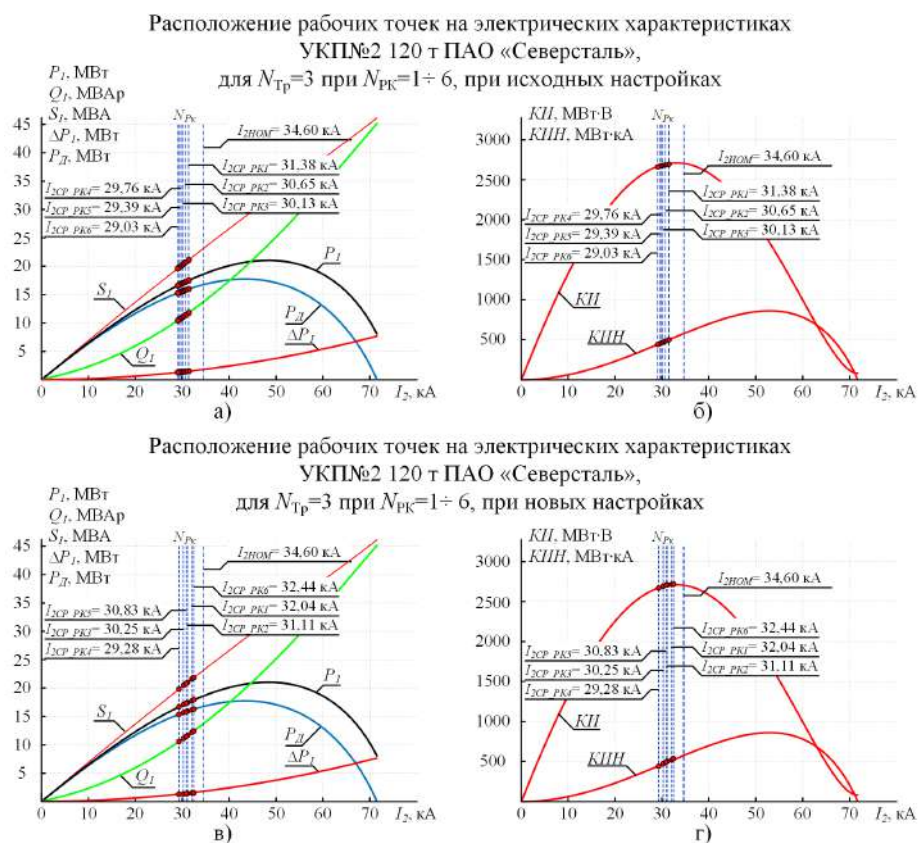


Рис.5.7 - Расположение рабочих точек на электрических характеристиках УКП№2 120т. для $N_{TP} = 3$ и $N_{PK} = 1 \div 6$ при исходных и новых настройках

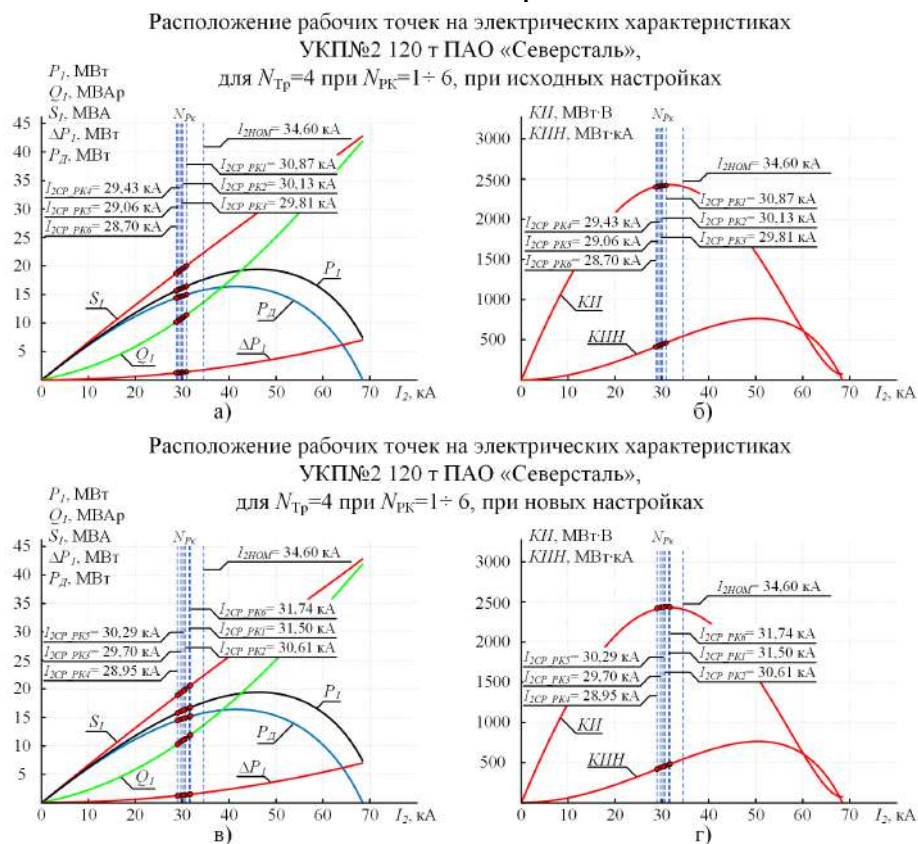


Рис.5.8 - Расположение рабочих точек на электрических характеристиках УКП№2 120т. для $N_{TP} = 4$ и $N_{PK} = 1 \div 6$ при исходных и новых настройках

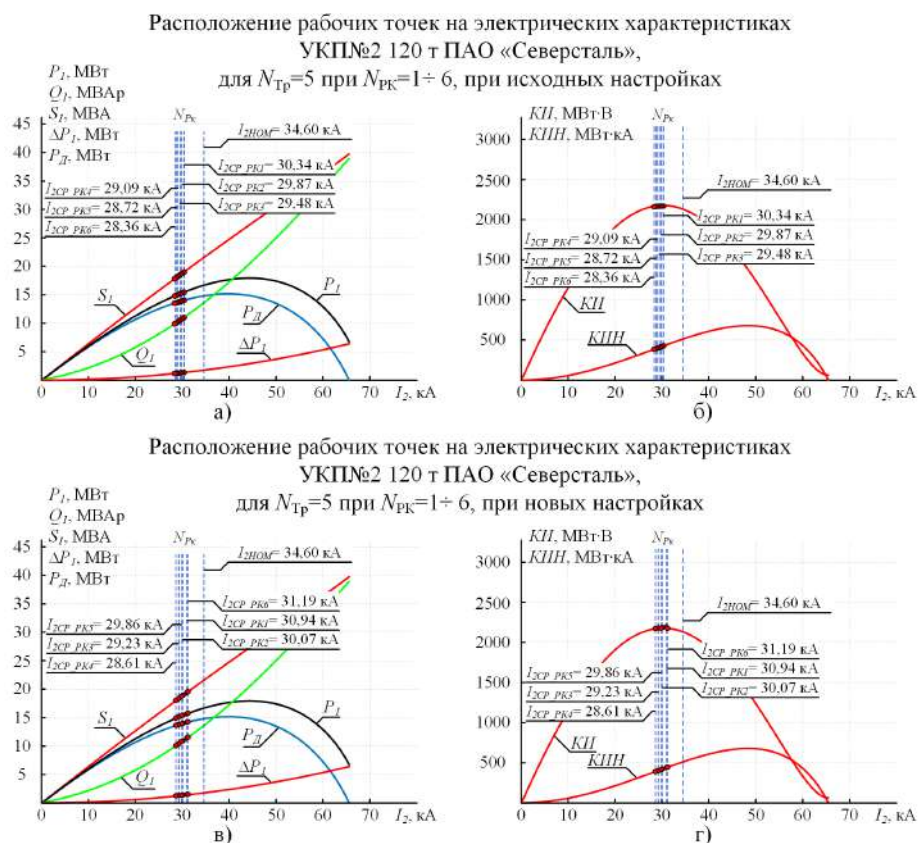


Рис.5.9 - Расположение рабочих точек на электрических характеристиках УКП№2 120т. для $N_{Tr} = 5$ и $N_{PK} = 1 \div 6$ при исходных и новых настройках

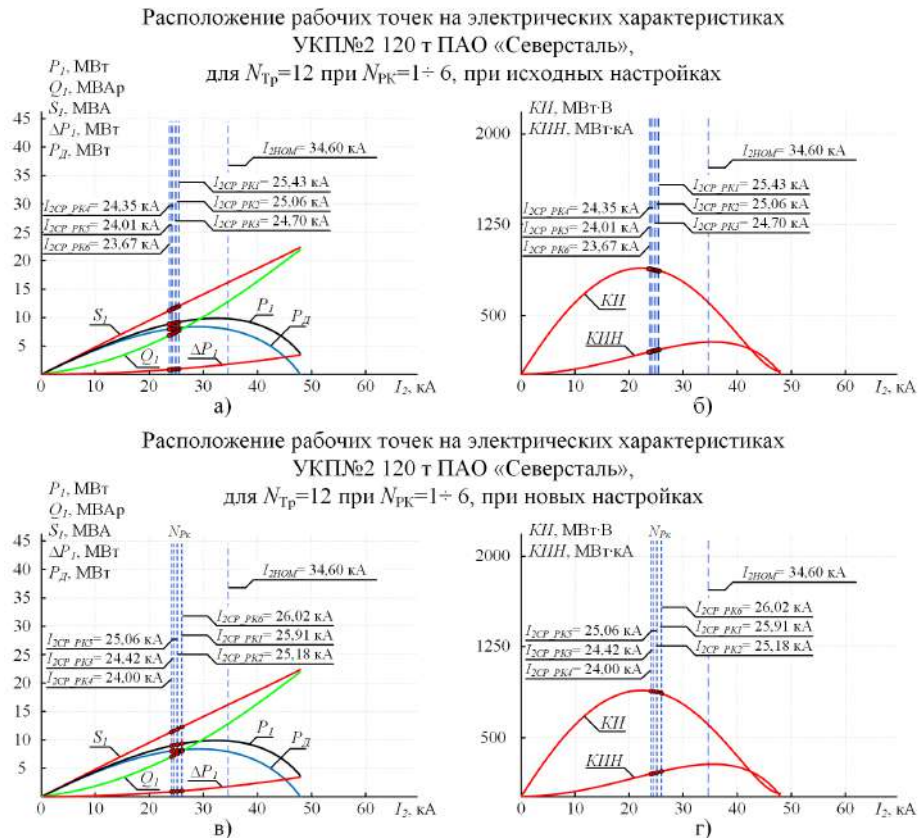


Рис.5.10 - Расположение рабочих точек на электрических характеристиках УКП№2 120т. для $N_{Tr} = 12$ и $N_{PK} = 1 \div 6$ при исходных и новых настройках

5.2. Реализация усовершенствованных алгоритмов автоматического управления электрическими режимами У КП с динамической адаптацией уставок импеданса вторичного электрического контура У КП и ступеней Р ПН печного трансформатора

На следующем этапе исследований были реализованы усовершенствованные алгоритмы автоматического переключения рабочих кривых, обеспечивающие автоматическую адаптацию электрических режимов У КП №1 180т. ПАО «ММК» и У КП №2 120т. ПАО «Северсталь» в зависимости от режима аргонной продувки и шлакового режима. Блок-схемы алгоритмов представлены на рис. 5.11 для У КП №1 180т. ПАО «ММК» и на рис. 5.12 для У КП №2 120т. ПАО «Северсталь». Стоит отметить, что алгоритм, реализованный на У КП №2 120т. не имеет функции переключения ступеней напряжения печного трансформатора, поскольку у установленного печного трансформатора отсутствует возможность переключения ступеней напряжения под нагрузкой (используется устройство переключения без возбуждения – ПБВ).

Для исследуемых У КП рабочие кривые $N_{РК} = 1 - 4$ соответствуют донной продувке, где $N_{РК} = 1$ обеспечивает режим работы на коротких дугах с третьей степенью несимметрии длин дуг l_d , расположенных вблизи зеркала жидкого металла, $N_{РК} = 2$ и 3 – работа на средних дугах со второй и первой степенью несимметрии l_d соответственно, $N_{РК} = 4$ – обеспечивает симметричный режим горения дуг повышенной длины. Соответствующим образом рабочие кривые $N_{РК} = 4 - 6$ настроены для продувки с использованием аварийной фурмы.

Для подтверждения принадлежности фаз на первичной и вторичной сторонах печного трансформатора исследуемых У КП был выполнен анализ соответствия токов $I_{1.1}, I_{1.2}, I_{1.3}, I_{2.1}, I_{2.2}, I_{2.3}$.

Для У КП №1 180т. ПАО «ММК» фазой с наибольшим влиянием зеркала при использовании донной продувки является фаза 2. Анализ показал, что характер изменения тока $I_{2.2}$ проявляется на высокой стороне трансформатора наиболее сильно в фазах 2 и 3, поэтому, при донной продувке, коэффициент шлака $K_{ШЛАК}$ для У КП №1 180т. ПАО «ММК» желательно рассчитывать как

среднее арифметическое значение коэффициентов шлака фаз 2 и 3. При использовании аварийной фурмы под влиянием зеркала оказываются фазы 1 и 3, в данном случае характер изменения пары токов $I_{2,1}$ и $I_{2,3}$ проявляется на высокой стороне трансформатора наиболее сильно в токе $I_{1,1}$. По этой причине при использовании аварийной фурмы для расчета $K_{\text{ШЛАК}}$ желательно использовать первичный ток фазы 1.

В алгоритме автоматического управления электрическими режимами УКП №2 120т. ПАО «Северсталь» для режима донной продувки коэффициент шлака $K_{\text{ШЛАК}12}$ рассчитывается как среднее арифметическое значение коэффициентов шлака фаз 1 и 2 (2 и 1 по первичной стороне ПТ). Для режима работы аварийной фурмы рассчитывается значение $K_{\text{ШЛАК}23}$ как среднее арифметическое значение коэффициентов шлака фаз 1 и 3 (2 и 3 по первичной стороне ПТ). Также в формулу расчета коэффициента шлака введен дополнительный весовой коэффициент $K_{\text{ВЕС.}}$, учитывающий влияние уровня напряжения на вторичной стороне ПТ на фактическое значение коэффициента шлака. Для выбора текущей рабочей кривой в режиме донной продувки определены диапазоны $K_{\text{ШЛАК}}$, ограниченные значениями $K_{\text{ГР}1}$, $K_{\text{ГР}1,1}$, $K_{\text{ГР}2}$, $K_{\text{ГР}2,1}$, $K_{\text{ГР}3}$, $K_{\text{ГР}3,1}$, где $K_{\text{ГР}1,1}$, $K_{\text{ГР}2,1}$, $K_{\text{ГР}3,1}$ – граничные значения, при достижении которых осуществляется увеличение $N_{\text{РК}}$ (увеличение длины дуги), $K_{\text{ГР}1}$, $K_{\text{ГР}2}$, $K_{\text{ГР}3}$ – граничные значения, при достижении которых осуществляется уменьшение $N_{\text{РК}}$ (уменьшение длины дуги).

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_I . Для УКП №1 180т. ПАО «ММК» использовался анализатор мощности SATEC PM130EH PLUS. Поскольку, УКП №1 180т. имеет разные измерительные цепи для каждого ввода по линии 35 кВ расположенные в разных ШУ, то для него было установлено 2 анализатора мощности.

Схемы подключения измерителей мощности показаны на рис. 5.13 для УКП №1 180т. ПАО «ММК» и рис. 5.14 для УКП №2 120т. ПАО «Северсталь».

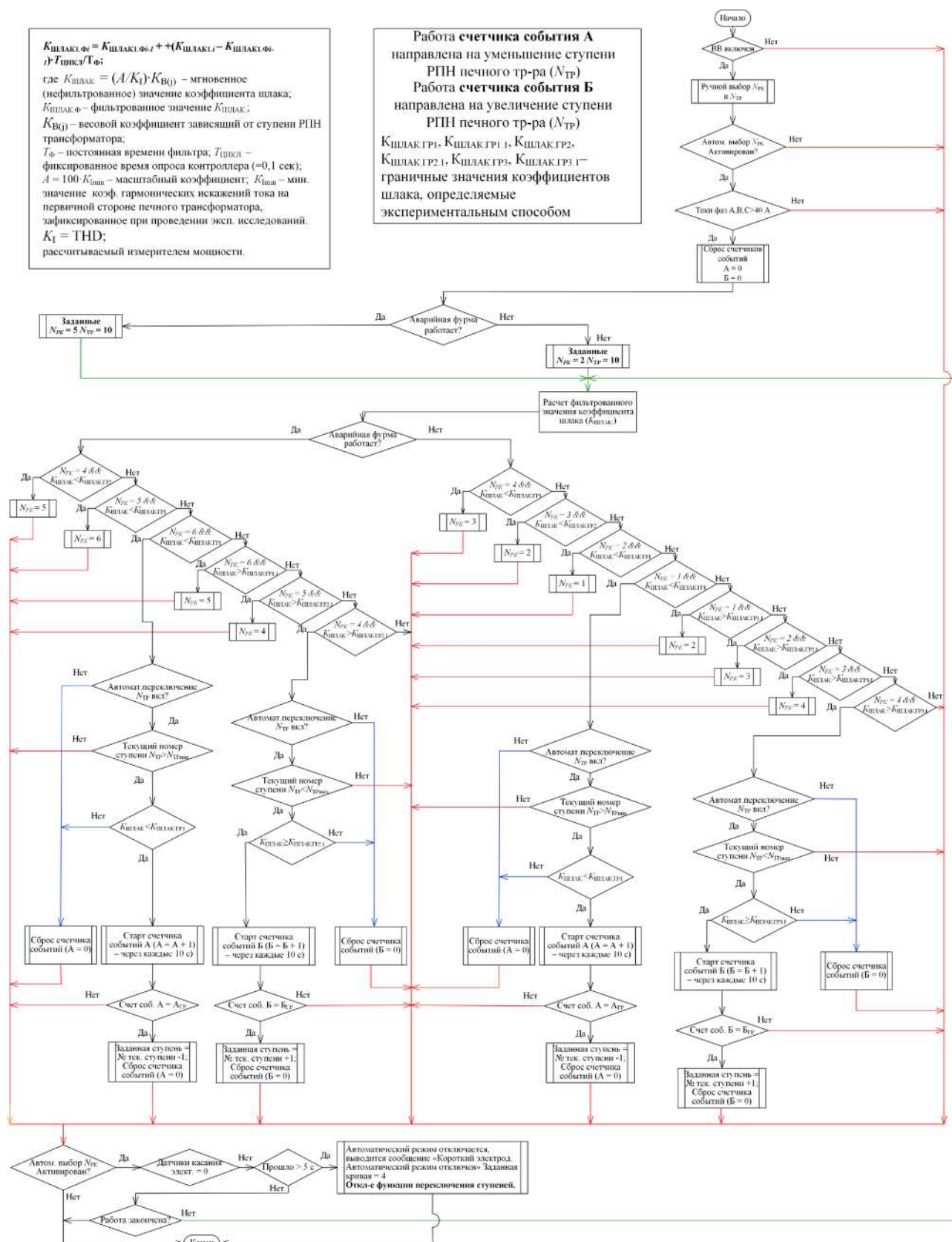


Рис.5.11 – Блок-схема алгоритма автоматического управления электрическими режимами УКП№1 180т. ПАО «ММК» с динамической адаптацией длин электрических дуг и вторичного напряжения печного трансформатора

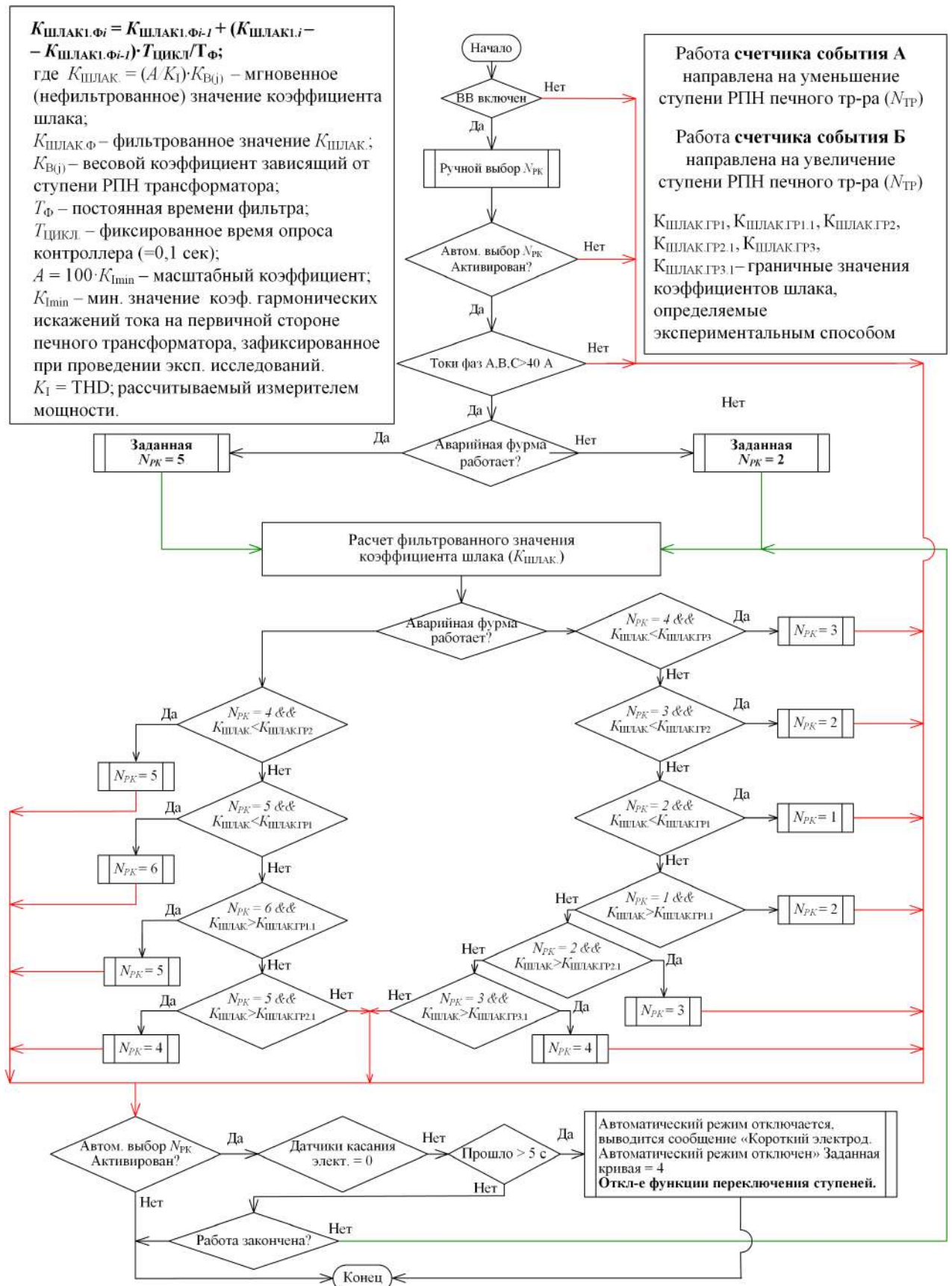


Рис.5.12 – Блок-схема алгоритма автоматического управления электрическими режимами УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» с динамической адаптацией длин электрических дуг и вторичного напряжения печного трансформатора

На рис. 5.15 и 5.16 показаны фотографии используемых анализаторов мощности установленные в шкафах управления исследуемых агрегатов.

Необходимо отметить, что при исходных настройках измерителя мощности Siemens Simeas P, установленного в ШУ УКП№2 120т. ПАО «Северсталь», передача параметров K_I (THD_I) по умолчанию недоступна и для активации данной возможности необходима коррекция специализированных конфигурационных GSD-файлов и их интеграция в головной ПЛК, что может являться сложно

реализуемой задачей. При невозможности ее решения в качестве альтернативного варианта могут быть использованы модифицированные упрощенные формулы расчета K_I с использованием доступной информации о нечетных гармониках:

$$K_I = \frac{\sqrt{I_{(5)}^2 + I_{(7)}^2 + I_{(11)}^2 + I_{(13)}^2 + I_{(17)}^2}}{I} \cdot 100\%, \quad (5.1)$$

где I - действующее значение тока анализируемой фазы (используется из-за отсутствия сигнала действующего значения первой гармоники).

При использовании упрощенной формулы расчета K_I для получения приемлемого уровня $K_{ШЛАК}$ необходимо уменьшить коэффициент приведения a в формуле расчета.

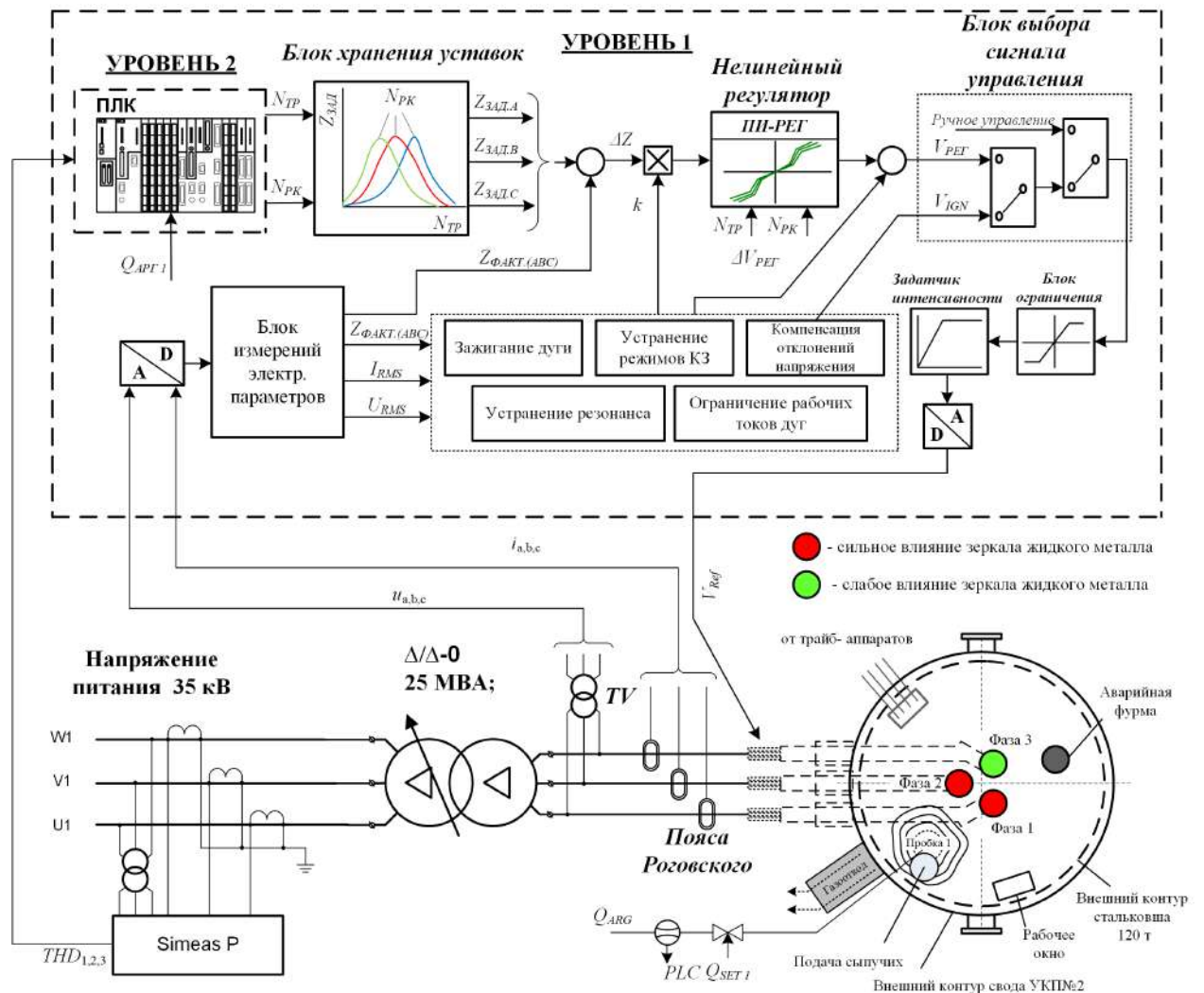


Рис.5.14 – Функциональная схема САУЭР и ПЭ УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» с установленным анализатором мощности Simeas P



Рис. 5.15 – Анализатор мощности Satec установленный в ШУ
УКП№1 180т. ПАО «ММК»



Рис. 5.16 – Анализатор мощности SIMEAS P установленный в ШУ
УКП№2 120т. ПАО «Северсталь»

Для оперативной настройки разработанных алгоритмов управления было предусмотрено добавление на визуализации сталеваров исследуемых УКП дополнительных меню с параметрами алгоритмов. Прототипы меню настроек показаны на рис. 5.17 для УКП№1 180т. и на рис. 5.18 для УКП№2 120т. В меню настройки алгоритма задаются следующие параметры: 1) граничные значения коэффициента шлака $K_{ГР1}, K_{ГР1.1}, K_{ГР2}, K_{ГР2.1}, K_{ГР3}, K_{ГР3.1}$, при которых происходит переключение $N_{РК}$ и, в случае с УКП№1 180т. $N_{ТР}$; 2) весовые коэффициенты $K_{В(i)}$, учитывающие влияние изменения вторичного напряжения ПТ при переключении ступеней РПН на уровни высших гармоник тока; 3) постоянная времени фильтра $T_{Ф}$, для получения фильтрованного значения $K_{ШЛАК}$, используемого в алгоритме автоматического управления электрическими режимами; 4) минимальное значение тока для исключения работы алгоритма в режиме холостого хода. Фактическая реализация данных меню на действующих рабочих станциях сталеваров УКП№1 180т. и УКП№2 120т. приведена на рис. 5.19-5.21.

Меню настройки алгоритма автоматического переключения рабочих кривых на УПК№1 180т. ПАО «ММК»

Параметры алгоритма авт. корр. эл. режима УКП			
25	Пост. времени фильтра $T_{Ф}$	10	Счетчик А
40	Миним. знач. втор. тока	10	Счетчик Б
3,0	Миним. значение $K_I (TND_I)$		
Донная продувка			
1	$N_{ТР} \min$	3	$N_{ТР} \max$
10	$N_{ТР} \text{ начальная}$	2	$N_{РК} \text{ начальный}$
Аварийная фурма			
1	$N_{ТР} \min$	3	$N_{ТР} \max$
10	$N_{ТР} \text{ начальная}$	5	$N_{РК} \text{ начальный}$
Донная продувка			
$K_{ГР1}$	15	$K_{ГР1.1}$	25
$K_{ГР2}$	40	$K_{ГР2.1}$	50
$K_{ГР3}$	65	$K_{ГР3.1}$	75
Аварийная фурма			
$K_{ГР1}$	15	$K_{ГР1.1}$	25
$K_{ГР2}$	45	$K_{ГР2.1}$	50
Весовые коэффициенты к $K_{ШЛАК}$.			
$K_{В(1)}$	0,25	$K_{В(2)}$	0,38
$K_{В(3)}$	0,45	$K_{В(4)}$	0,53
$K_{В(5)}$	0,61	$K_{В(6)}$	0,69
$K_{В(7)}$	0,77	$K_{В(8)}$	0,84
$K_{В(9)}$	0,92	$K_{В(10)}$	1,00
$K_{В(11)}$	0,48	$K_{В(12)}$	0,25
Автомат. режим <math>N_{РК}</math>		Автомат. режим <math>N_{ТР}</math>	

Рис.5.17 - Меню настройки алгоритма автоматического переключения рабочих кривых на визуализации сталевара УКП№1 180т. ПАО «ММК»

**Меню настройки алгоритма автоматического
переключения рабочих кривых на
УКП№2 120т. ПАО «Северсталь»**

Параметры алгоритма авт. корр. эл. режима УКП

25 Пост. времени фильтра Тф

40 Миним. знач. втор. тока

3,0 Миним. значение K_I (THD_I)

Продувка

Донная			
$K_{ГР1}$	15	$K_{ГР1.1}$	25
$K_{ГР2}$	40	$K_{ГР2.1}$	50
$K_{ГР3}$	65	$K_{ГР3.1}$	75

Аварийная фурма			
$K_{ГР1}$	15	$K_{ГР1.1}$	25
$K_{ГР2}$	45	$K_{ГР2.1}$	50

Автомат. режим $N_{РК}$

Весовые коэффициенты к Кшлак.

$K_{В(1)}$	1,19	$K_{В(2)}$	1,09	$K_{В(3)}$	1,00	$K_{В(4)}$	0,85
$K_{В(5)}$	0,77	$K_{В(6)}$	0,74	$K_{В(7)}$	0,63	$K_{В(8)}$	0,61
$K_{В(9)}$	0,55	$K_{В(10)}$	0,51	$K_{В(11)}$	0,48	$K_{В(12)}$	0,45
$K_{В(13)}$	0,43	$K_{В(14)}$	0,41	$K_{В(15)}$	0,39	$K_{В(16)}$	0,38
$K_{В(17)}$	0,36	$K_{В(18)}$	0,34	$K_{В(19)}$	0,34	$K_{В(20)}$	0,32
$K_{В(21)}$	0,30	$K_{В(22)}$	0,28	$K_{В(23)}$	0,25		

Рис.5.18 - Меню настройки алгоритма автоматического переключения рабочих кривых на визуализации сталевара УКП№2 120т. ПАО «Северсталь»

Данные: МНДЗ-1 МНДЗ-2 МНДЗ-5

Питание - Электрообеспечение сталевозов

Параметры алгоритма автоматической коррекции электрического режима АПК-3

Параметры алгоритма авт. корр. эл. режима

12 Пост. времени фильтра Тф

5 Миним. знач. втор. тока

1,0 Миним. значение K_I (THD_I)

Донная продувка

8 Nтр min

10 Nтр max

1 Nрк начальная

25 Kгр 1

39 Kгр 2

53 Kгр 3

32 Kгр 1.1

46 Kгр 2.1

60 Kгр 3.1

Аварийная фурма

8 Nтр min

10 Nтр max

6 Nрк начальная

25 Kгр 1

46 Kгр 2

60 Kгр 2.1

Состояние трансформатора

2 № кр.

10 № ст.

365,0 В

1,00 Весовой коэффициент

0 Коэффициент шлака фаза 1

1 Коэффициент шлака фаза 2

0 Коэффициент шлака фаза 3

Автомат. Режим Nтр

Автомат. Режим Nрк

Изменение установки ступени РПН разрешено

Изменение установки рабочей кривой разрешено

Весовые коэффициенты к Кшлак.

0,25 Kв1

0,38 Kв2

0,45 Kв3

0,53 Kв4

0,61 Kв5

0,69 Kв6

0,77 Kв7

0,86 Kв8

0,98 Kв9

1,00 Kв10

1,05 Kв11

1,09 Kв12

Автомат. Режим Nтр

Автомат. Режим Nрк

Изменение установки ступени РПН разрешено

Изменение установки рабочей кривой разрешено

Автомат. Режим Nтр

Автомат. Режим Nрк

Изменение установки ступени РПН разрешено

Изменение установки рабочей кривой разрешено

Рис. 5.19 - Меню настройки автоматического переключения рабочих кривых и ступеней РПН печного трансформатора для УКП№1 180т. ПАО «ММК»

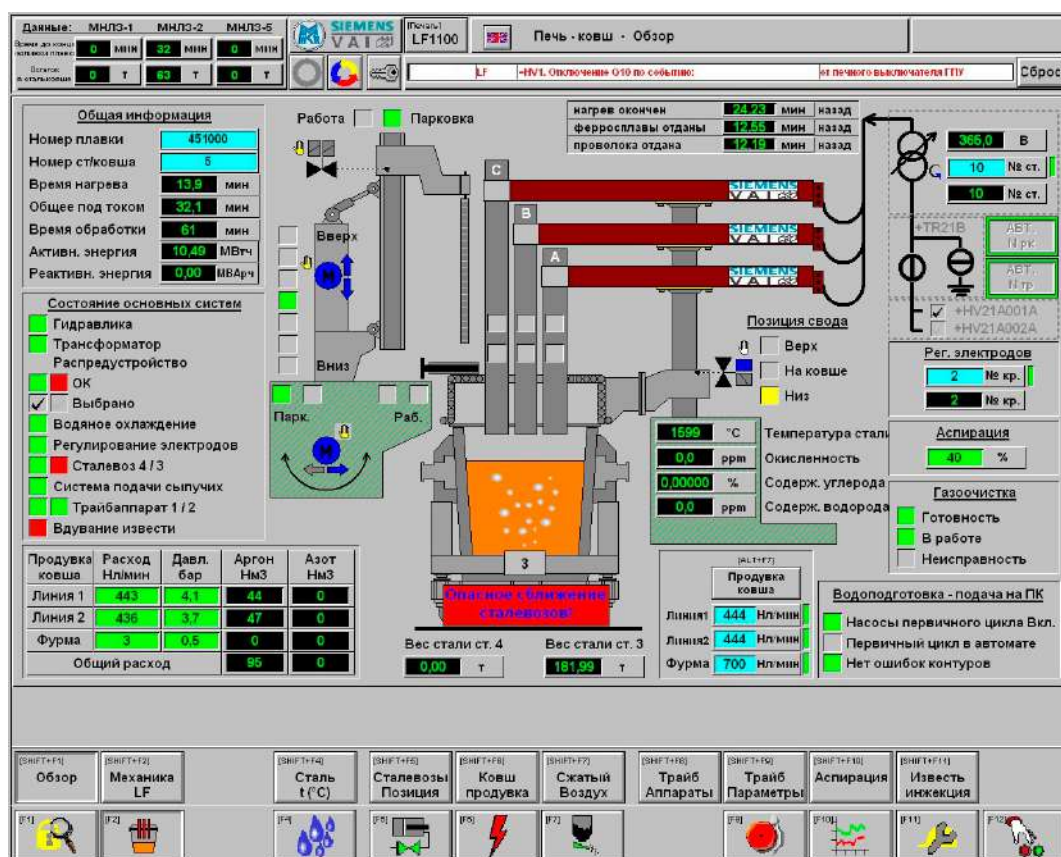


Рис. 5.20 - Главное окно визуализации сталевара с добавленными кнопками активации режимов работы алгоритма УКПН[№]1 180т. ПАО «ММК»

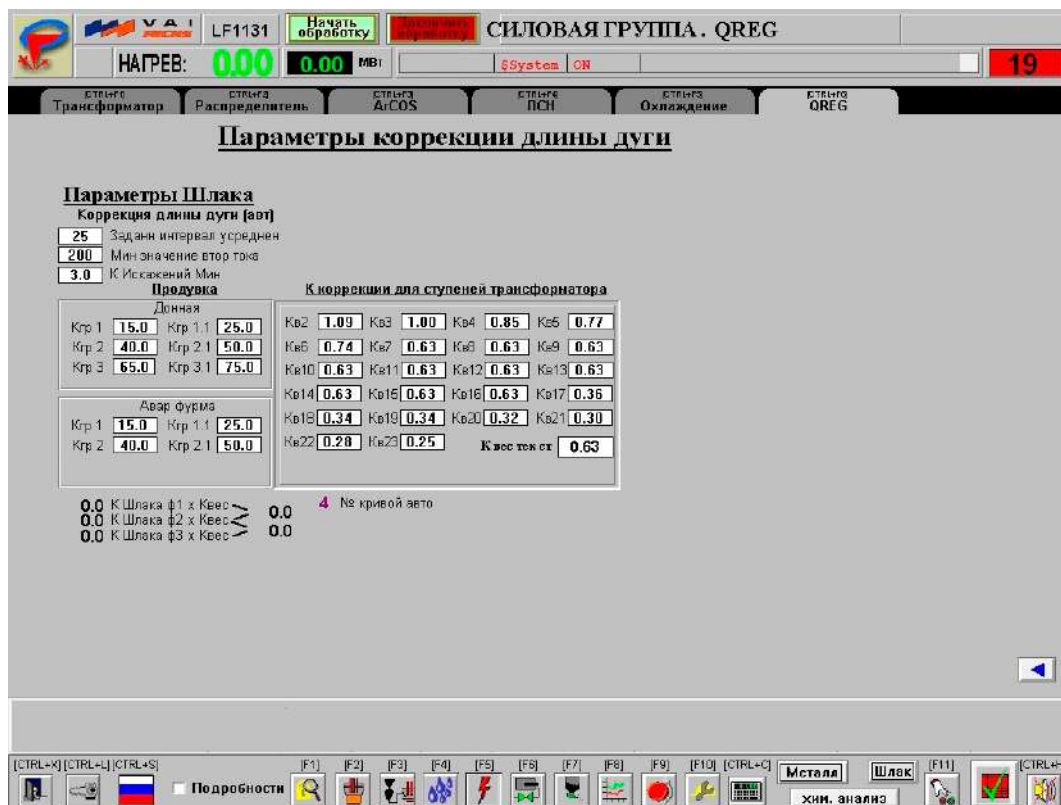


Рис. 5.21 - Меню настройки автоматического переключения рабочих кривых и ступеней РПН печного трансформатора для УКПН[№]2 120т. ПАО «Северсталь»

Для усовершенствованных алгоритмов определены уставки граничных значений коэффициентов шлака. Для повышения точности работы алгоритмов были выполнены дополнительные исследования влияния ступени РПН печного трансформатора на значение коэффициента шлака. Исследование показало значительное влияние уровня напряжения на $K_{\text{ШЛАК}}$ при одинаковых условиях горения электрических дуг. Ввиду этого, для повышения точности работы алгоритма, для каждой ступени напряжения печного трансформатора требуются свой набор граничных значений. Более рациональным в таком случае будет привести значение $K_{\text{ШЛАК}}$ к значениям основной ступени напряжения, для которой осуществлялся расчет граничных значений коэффициентов шлака. Для этого предлагается ввести весовой коэффициент к значению $K_{\text{ШЛАК}}$ для каждой ступени напряжения печного трансформатора $K_{\text{В}}$, приводящий значение $K_{\text{ШЛАК}}$ к значениям основной ступени, для которой выполнялся расчет граничных значений.

Перед настройкой алгоритмов управления отдельно для УКП№1 180т. ПАО «ММК и УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» были проведены дополнительные экспериментальные исследования по определению предварительных весовых коэффициентов $K_{\text{В}}$, используемых в формулах для расчета коэффициентов шлака $K_{\text{ШЛАК}}$. Результаты экспериментов показаны для агрегата УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» и приведены в таблице 5.3. Также на основании полученных эмпирических данных были построены зависимости $K_{\text{ШЛАК}} = f(N_{\text{ТР}})$ и $K_{\text{ВЕС}} = f(N_{\text{ТР}})$, данные зависимости представлены на рис. 5.22. Важно отметить, что данное исследование проводилось для всех исследуемых агрегатов. При настройке алгоритмов предварительные значения коэффициентов корректировались для достижения оптимальной работы алгоритма. Параметры алгоритмов автоматического переключения рабочих кривых и ступеней напряжения печного трансформатора для исследуемых УКП, используемые по результатам тестовых плавов, приведены в таблицах 5.4 и П.5.5.

Окончательная наладка несимметричных электрических режимов и алгоритмов автоматического переключения $N_{\text{РК}}$ и $N_{\text{ТР}}$ осуществлялась в реальных производственных условиях на протяжении двух недель после внедрения и первичной наладки, выполненной в рамках проведения тестовых плавов.

Таблица 5.3 – Экспериментальное определение значений весовых коэффициентов к $K_{\text{ШЛАК}}$ для УКП №2 120т. ПАО «Северсталь»

$N_{\text{Т}}$ Р	$N_{\text{Р}}$ К	$Q_{\text{АРГ}}$, МЗ/ч	$U_{\text{Л.СЕ}}$ ТИ, кВ	$I_{2.1}$, кА	$I_{2.2}$, кА	$I_{2.3}$, кА	$I_{2\text{СР}}$, кА	$I_{1.1,\text{А}}$	$I_{1.2,\text{А}}$	$I_{1.3,\text{А}}$	$I_{1\text{СР}}$, А	S_1 , МВ А	P_1 , МВ Т	Q_1 , МВ Ар	$\cos\varphi$	$K_{\text{Ш1}}$	$K_{\text{Ш2}}$	$K_{\text{Ш3}}$	$K_{\text{Ш.СР}}$	$K_{\text{Б}}$ $K_{\text{ЕС}}$
3	2	52,0	34,7	30,7	32,6	32,0	31,7	368,3	341,1	354,0	354,4	19,1	16,3	9,9	0,85	19,02	18,40	23,90	20,44	1,00
4	2	52,3	34,9	30,7	32,5	31,6	31,6	350,7	326,6	339,2	338,8	19,1	15,7	10,9	0,82	24,01	21,49	26,26	23,92	0,85
5	2	52,4	34,7	30,2	31,9	31,0	31,1	341,5	324,8	334,8	333,7	18,7	15,0	11,2	0,80	24,88	25,30	29,48	26,55	0,77
6	2	52,2	34,6	29,8	31,7	30,8	30,8	322,3	299,5	313,8	311,9	18,4	13,9	12,1	0,76	25,89	22,03	32,04	26,65	0,77
7	2	52,0	34,6	32,1	33,3	33,8	33,1	337,9	322,9	338,5	333,1	19,8	14,3	13,7	0,72	33,49	28,03	36,41	32,64	0,63
8	2	51,9	34,4	28,8	30,9	30,4	30,1	290,8	274,3	290,8	285,3	17,9	12,6	12,7	0,70	32,77	30,36	37,33	33,49	0,61
12	2	44,8	33,5	25,1	26,7	26,2	26,0	212,2	197,1	207,2	205,5	15,1	8,8	12,2	0,58	43,03	44,01	50,56	45,87	0,45
22	2	44,9	35,3	11,6	11,0	12,4	11,7	47,7	47,8	51,6	49,0	7,1	2,2	6,8	0,31	83,4	58,6	75,5	72,5	0,28

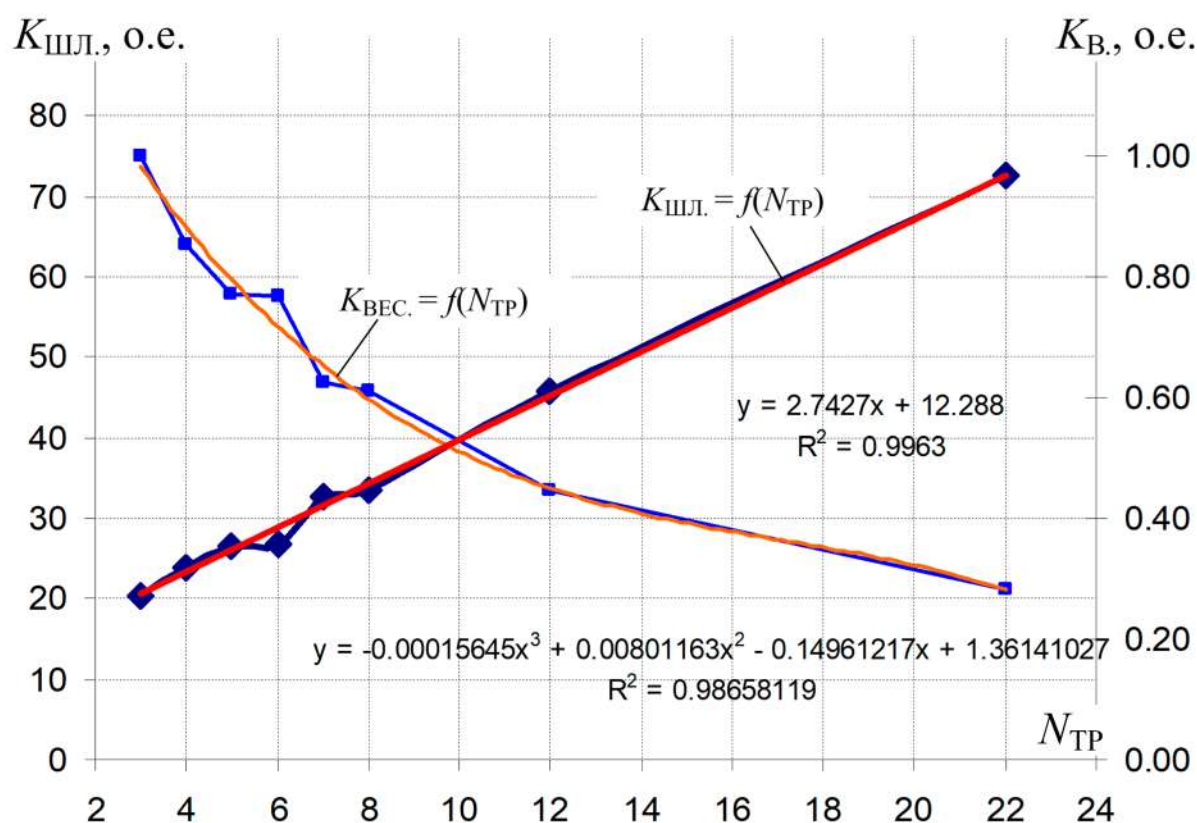


Рис. 5.22 - Экспериментальные зависимости, используемые для определения предварительных значений весовых коэффициентов $K_{\text{Б.}}$ к коэффициентам шлака для УКП №2 120т. ПАО «ММК»

Таблица 5.4 - Параметры алгоритма автоматического переключения ступеней РПН ПТ и рабочих кривых УКП№1 180т. ПАО «ММК»

Наименование параметра	Значение
Общие параметры	
Постоянная времени фильтра T_{Φ}	12,0
Минимальное значение вторичного тока	5,0
Минимальное значение $K_I(THD_I)$	1,0
Предел счетчика А	35
Предел счетчика Б	18
Весовой коэффициент №1 к $K_{ШЛАК}, K_{В(1)}$	0,25
Весовой коэффициент №2 к $K_{ШЛАК}, K_{В(2)}$	0,38
Весовой коэффициент №3 к $K_{ШЛАК}, K_{В(3)}$	0,45
Весовой коэффициент №4 к $K_{ШЛАК}, K_{В(4)}$	0,53
Весовой коэффициент №5 к $K_{ШЛАК}, K_{В(5)}$	0,61
Весовой коэффициент №6 к $K_{ШЛАК}, K_{В(6)}$	0,69
Весовой коэффициент №7 к $K_{ШЛАК}, K_{В(7)}$	0,77
Весовой коэффициент №8 к $K_{ШЛАК}, K_{В(8)}$	0,96
Весовой коэффициент №9 к $K_{ШЛАК}, K_{В(9)}$	0,98
Весовой коэффициент №10 к $K_{ШЛАК}, K_{В(10)}$	1,00
Весовой коэффициент №11 к $K_{ШЛАК}, K_{В(11)}$	1,05
Весовой коэффициент №12 к $K_{ШЛАК}, K_{В(12)}$	1,08
Донная продувка	
Минимальная ступень РПН ПТ, $N_{ТР_MIN}$	8
Максимальная ступень РПН ПТ, $N_{ТР_MAX}$	10
Начальная рабочая кривая, $N_{РК_НАЧАЛЬНАЯ}$	1
Граничное значение коэффициента шлака, $K_{ГР1}$	25
Граничное значение коэффициента шлака, $K_{ГР1.1}$	32
Граничное значение коэффициента шлака, $K_{ГР2}$	39
Граничное значение коэффициента шлака, $K_{ГР2.1}$	46
Граничное значение коэффициента шлака, $K_{ГР3}$	53
Граничное значение коэффициента шлака, $K_{ГР3.1}$	60
Аварийная фурма	
Минимальная ступень РПН ПТ, $N_{ТР_MIN}$	8
Максимальная ступень РПН ПТ, $N_{ТР_MAX}$	10
Начальная рабочая кривая, $N_{РК_НАЧАЛЬНАЯ}$	6
Граничное значение коэффициента шлака, $K_{ГР1}$	25
Граничное значение коэффициента шлака, $K_{ГР1.1}$	32
Граничное значение коэффициента шлака, $K_{ГР2}$	46
Граничное значение коэффициента шлака, $K_{ГР2.1}$	60

Таблица 5.5 - Параметры алгоритма автоматического переключения ступеней РПН ПТ и рабочих кривых УКП №2 120т. ПАО «Северсталь»

Наименование параметра	Значение
1. Минимальное значение $K_I(THD_I)$	3,0
2. Постоянная времени фильтра T_Φ	25,0
3. Граничное значение коэф. шлака $K_{ГР.1}$, о.е.	15,0
4. Граничное значение коэф. шлака $K_{ГР.2}$, о.е.	40,0
5. Граничное значение коэф. шлака $K_{ГР.3}$, о.е.	65,0
6. Граничное значение коэф. шлака $K_{ГР.1.1}$, о.е.	25,0
7. Граничное значение коэф. шлака $K_{ГР.2.1}$, о.е.	50,0
8. Граничное значение коэф. шлака $K_{ГР.3.1}$, о.е.	75,0
9. Граничное значение коэф. шлака $K_{ГР.1}$, о.е.	15,0
10. Граничное значение коэф. шлака $K_{ГР.2}$, о.е.	40,0
11. Граничное значение коэф. шлака $K_{ГР.3}$, о.е.	65,0
12. Граничное значение коэф. шлака $K_{ГР.1.1}$, о.е.	25,0
13. Граничное значение коэф. шлака $K_{ГР.2.1}$, о.е.	50,0
14. Граничное значение коэф. шлака $K_{ГР.3.1}$, о.е.	75,0
15. Значения весовых коэффициентов $K_{ВЕС.}$, о.е.	
– при использовании $N_{ТР} = 2$	1,09
– при использовании $N_{ТР} = 3$	1,00
– при использовании $N_{ТР} = 4$	0,85
– при использовании $N_{ТР} = 5$	0,77
– при использовании $N_{ТР} = 6$	0,74
– при использовании $N_{ТР} = 7$	0,63
– при использовании $N_{ТР} = 8$	0,63
– при использовании $N_{ТР} = 9$	0,63
– при использовании $N_{ТР} = 10$	0,63
– при использовании $N_{ТР} = 11$	0,63
– при использовании $N_{ТР} = 12$	0,63
– при использовании $N_{ТР} = 13$	0,63
– при использовании $N_{ТР} = 14$	0,63
– при использовании $N_{ТР} = 15$	0,63
– при использовании $N_{ТР} = 16$	0,63
– при использовании $N_{ТР} = 17$	0,36
– при использовании $N_{ТР} = 18$	0,34
– при использовании $N_{ТР} = 19$	0,34
– при использовании $N_{ТР} = 20$	0,32
– при использовании $N_{ТР} = 21$	0,30
– при использовании $N_{ТР} = 22$	0,28
– при использовании $N_{ТР} = 23$	0,25

5.3. Результаты экспериментальных исследований и анализ эффективности работы алгоритмов управления электрическими режимами УКП в реальных производственных условиях

После задания оптимальных электрических режимов УКП с учетом расположения оборудования аргонной продувки и реализации 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, целесообразно провести экспериментальные исследования работы и оценить эффективность принятых мер по энергоэффективному управлению электрическими режимами УКП.

Для анализа полученного технического эффекта сравнивались два периода работы агрегатов: 1) базовый – до внедрения усовершенствованных электрических режимов и алгоритмов автоматического переключения рабочих кривых $N_{РК}$ и ступеней напряжения печного трансформатора $N_{ТР}$; 2) гарантийный – период экспериментальных исследований после внедрения усовершенствованных электрических режимов и алгоритмов автоматического переключения $N_{РК}$ и $N_{ТР}$. С целью набора необходимой статистической информации для последующей оценки технического эффекта длительность экспериментальных исследований составила 3 месяца как для базового (предгарантийного) периода, так и для периода гарантийных испытаний.

На рис. 5.23 и 5.24 приведены осциллограммы фактической работы усовершенствованных алгоритмов автоматического переключения рабочих кривых и ступеней напряжения печного трансформатора. Представленные осциллограммы наглядно демонстрируют принцип работы алгоритма, а именно уменьшение длин дуг при снижении $K_{ШЛАК}$. В случае с УКП №1 180т. ПАО «ММК», если поддержание приемлемого $K_{ШЛАК}$ на самых коротких дугах не обеспечивается, тогда выполняется автоматическое понижение рабочей ступени печного трансформатора. Напротив, при большом значении $K_{ШЛАК}$ и работе на максимально длинных дугах формируется сигнал на увеличение ступени трансформатора с целью повышения мощностей дуг и коэффициента интенсивности нагрева $K_{ИН}$.

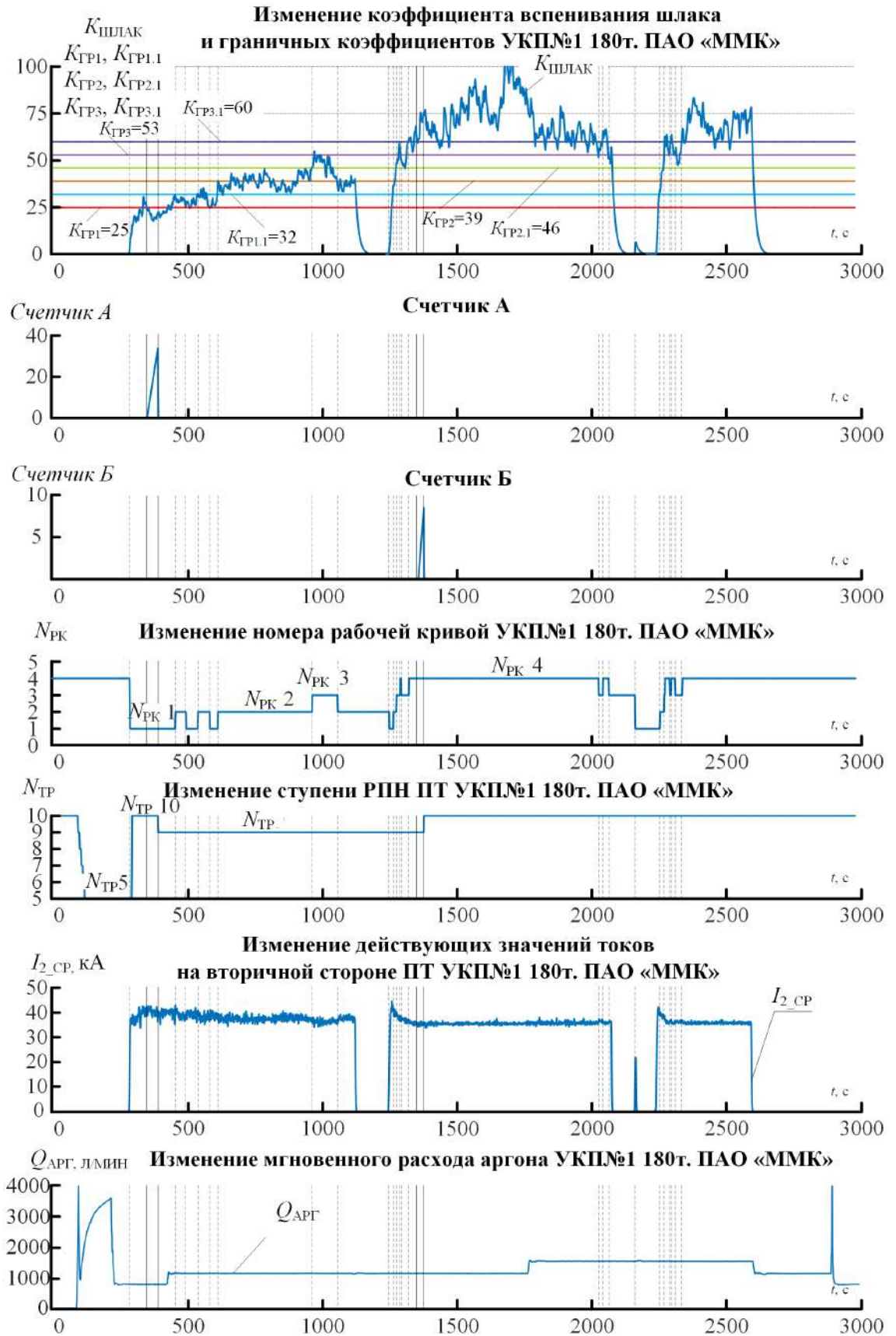


Рис. 5.23 - Работа алгоритма автоматического переключения рабочих кривых
в зависимости от уровня коэффициента шлака $K_{\text{ШЛАК}}$
УКПН №1 180т. ПАО «ММК»

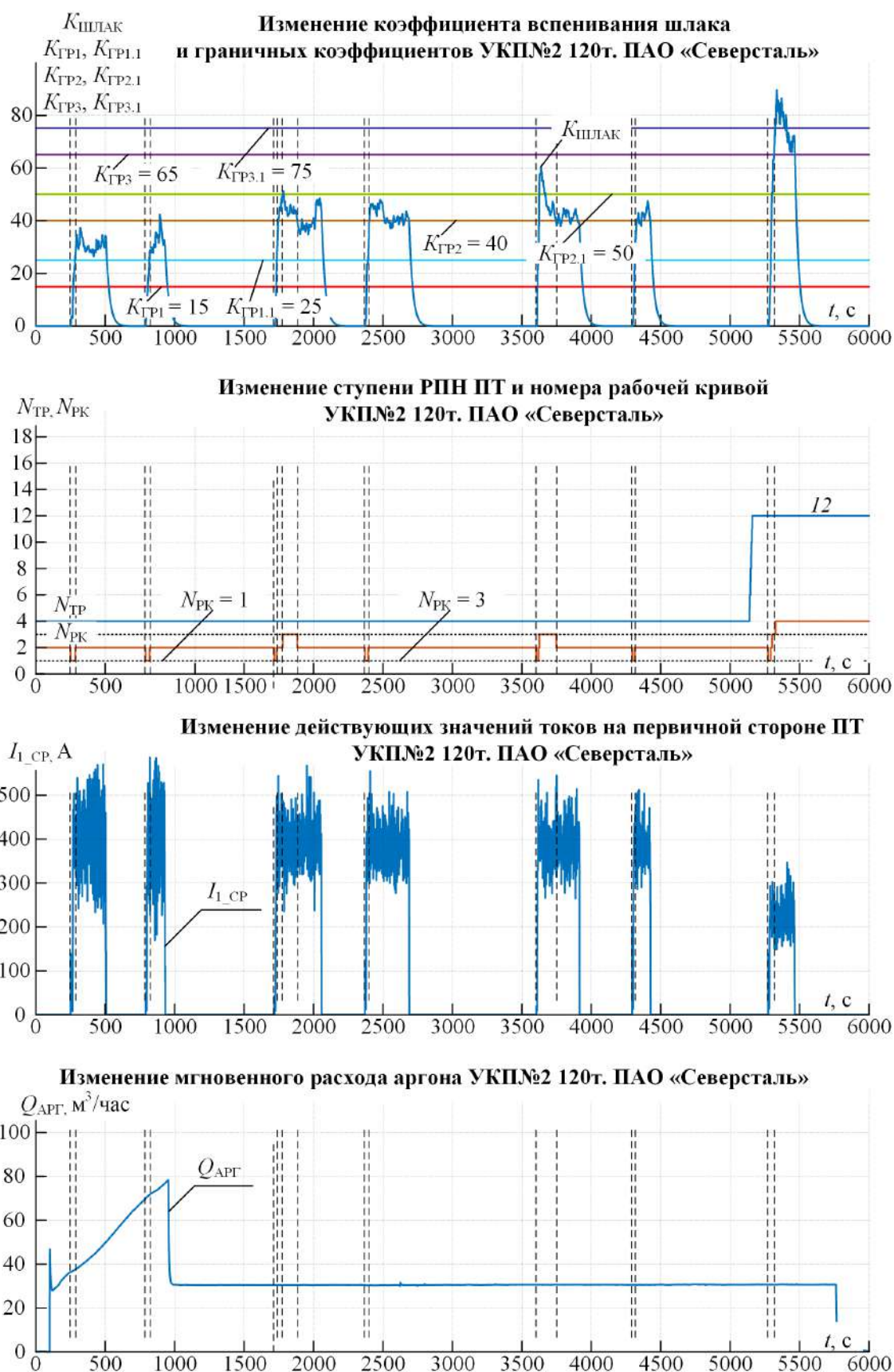


Рис. 5.24 – Работа алгоритма автоматического переключения рабочих кривых
в зависимости от уровня коэффициента шлака $K_{\text{ШЛАК}}$
УКПН№2 120т. ПАО «Северсталь»

Поскольку алгоритм, реализованный на УКП№1 180т. ПАО «ММК», осуществляет переключения ступеней напряжения печного трансформатора, то целесообразно проанализировать его влияние на ресурс переключающего устройства РПН. На основании архивных трендов IBA PDA было подсчитано количество переключений ступеней РПН печного трансформатора, инициированных отдельно по счетчикам А и Б, а также выполненных сталеваром вручную. Стоит отметить, что при выходе за пределы указанного в настройках алгоритма рабочего диапазона ступени напряжения печного трансформатора, алгоритм автоматического управления электрическими режимами осуществляет управление только длиной электрической дуги посредством переключения рабочих кривых N_{PK} . Поэтому при операциях, когда необходимо использовать пониженную ступень напряжения печного трансформатора, таких как: разжижение шлака, проплавления колодцев в начале плавки, а также усреднительной продувки, сталевар вручную выполняет переключение РПН печного трансформатора. Таким образом, при включенном автоматическом управлении длиной электрической дуги и уровнем вторичного напряжения все равно присутствует необходимость ручного переключения ступеней напряжения печного трансформатора. Анализ количества переключений ступеней напряжения печного трансформатора показал, 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 электрическими режимами УКП приходится 10,36% всех переключений устройства РПН печного трансформатора. Примечательно, что среди всех агрегатов, на которых был реализован подобный алгоритм, УКП№1 180т. ПАО «ММК» имеет самую большую долю переключений ступеней напряжения, инициированных алгоритмом.

Кроме того был проведен сравнительный анализ работы исследуемых У КП по времени работы на различных N_{PK} и N_{TP} , периода экспериментальных исследований и базового периода, до внедрения усовершенствованных электрических режимов и алгоритма автоматического управления электрическими режимами. Данный анализ представлен в таблице 5.7. Из представленных в таблице данных видно, что У КП №1 180т. ПАО «ММК» до внедрения алгоритма 88,73% времени работал на одной ступени напряжения печного трансформатора $N_{TP} = 10$ при этом, как правило, использовалась одна рабочая кривая $N_{PK} = 2$. Также в базовом периоде 84,07% времени агрегат проработал на производительной ступени напряжения печного трансформатора $N_{TP}=10$ и $N_{PK}=2$. Второе по времени использования сочетание $N_{TP}=5$, $N_{PK}=2$, составляющее 5,03% времени, применяется для операций разжижения шлака и усреднительной продувки. В период экспериментальных исследований наиболее часто используемой ступенью напряжения печного трансформатора является также $N_{TP} = 10$ с долей от общего времени работы агрегата за данный период равный 57,71%, а доля работы агрегата на сочетании $N_{TP}=10$ и $N_{PK}=2$ составила 23,27% времени работы агрегата. По данным, представленным в таблице 5.7, после внедрения алгоритма автоматического управления электрическими режимами с динамической адаптацией длин электрических дуг и вторичного напряжения печного трансформатора с использованием информации о гармоническом составе токов дуг явно прослеживается работа агрегата во всем диапазоне заданных N_{PK} и N_{TP} , что свидетельствует о корректной работе алгоритма и, соответственно, об адаптации электрического режима агрегата к текущему шлаковому режиму и режиму продувки.

Таблица 5.6 – Анализ количества переключений ступеней РПН печного трансформатора за один месяц с функционирующим алгоритмом автоматического переключения N_{PK} и N_{TP} на У КП №1 180т. ПАО «ММК»

	Переключений по счетчику А	Переключений по счетчику В	Переключений вручную	Всего
Количество переключений	310	200	4415	4925
Доля переключений, %	6,29	4,06	89,64	

Таблица 5.7 – Анализ времени работы различных $N_{ТР}$ и $N_{РК}$ УКП№1 180т. ПАО «ММК»

Доля работы на различных $N_{РК}$ и $N_{ТР}$ до внедрения алгоритма								
$N_{ТР}$	Доля работы $N_{ТР}$, %	Доля времени работы $N_{РК}$ для каждой ступени РПН ПТ, %						Доля работы на различных сочетаниях $N_{ТР}/N_{РК}$, %
		1	2	3	4	5	6	
5	5,52	3,56	91,08	5,37	-	-	-	10/2 – 84,07
6	0,79	2,52	91,24	6,24	-	-	-	5/2 – 5,03
7	1,25	3,89	88,41	7,70	-	-	-	10/1 – 2,43
8	1,98	1,31	94,83	3,86	-	-	-	8/2 – 1,87
9	1,72	2,06	88,59	9,35	-	-	-	9/2 – 1,53
10	88,73	2,74	94,75	2,51	-	-	-	7/2 – 1,11
								6/2 – 0,72
Доля работы на различных $N_{РК}$ и $N_{ТР}$ с функционирующим алгоритмом								
$N_{ТР}$	Доля работы $N_{ТР}$, %	Доля времени работы $N_{РК}$ для каждой ступени РПН ПТ, %						Доля работы на различных сочетаниях $N_{ТР}/N_{РК}$, %
		1	2	3	4	5	6	
5	4,56	85,73	9,51	0,91	2,82	0,01	1,01	10/2 – 23,27
6	0,55	76,37	16,83	1,80	4,58	0,07	0,36	10/3 – 13,66
7	1,27	78,69	15,47	2,63	2,87	0,03	0,31	10/4 – 11,98
8	17,77	36,89	41,43	14,58	5,41	0,45	1,25	9/2 – 8,66
9	18,15	23,11	47,72	19,88	7,42	1,34	0,53	8/2 – 7,36
10	57,71	12,68	40,32	23,67	20,77	2,15	0,41	10/1 – 7,32
								8/1 – 6,55
								9/1 – 4,19
								5/1 – 3,91
								9/3 – 3,61
								8/3 – 2,59

Поскольку все разработанных меры направлены на повышение энергоэффективности УКП, то целесообразной является также оценка достигнутого технического эффекта в виде снижения удельного расхода электроэнергии $W_{уд}$.

Прямой сравнительный анализ $W_{уд}$ УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» показал, что при использовании усовершенствованных электрических режимов, а

также усовершенствованных автоматизированных алгоритмов переключения рабочих кривых удельный расход электроэнергии $W_{уд}$ снизился на 0,29%.

Прямой сравнительный анализ $W_{уд}$ агрегатов ПАО «ММК» без учета влияния основных технологических факторов показал, что при использовании усовершенствованных электрических режимов, а также усовершенствованных автоматизированных алгоритмов переключения рабочих кривых $W_{уд}$ снизился на 2,12%. Стоит отметить, что прямой сравнительный анализ для агрегатов ПАО «ММК» проводился без поагрегатного разделения, согласно цеховому стандарту. Также следует отметить, что для прямого анализа использовались данные по расходу электроэнергии, полученные с приборов учета электроэнергии, установленных на подстанции.

Важно сказать, что прямой сравнительный анализ не учитывает разные условия работы агрегатов в анализируемых периодах. В частности, в период экспериментальных исследований работы алгоритмов автоматического управления электрическими режимами по отношению к базовому периоду уменьшилось общее время обработки металла t_{OBR} на 15,6%, уменьшилось время работы под током $t_{РТ}$ на 1,34%, суммарный расход аргона $Q_{АРГ}$ уменьшился на 18,84%, величина нагрева металла уменьшилась на 5,94%, расход извести уменьшился на 19,63%, также значительно уменьшилось количество вдуваемых УСМ на 65,5%.

В условиях влияния большого количества факторов на удельный расход электроэнергии для повышения точности оценки технического эффекта необходимо применение регрессионных моделей изменения удельного расхода электроэнергии $W_{уд}$ [105-106]. Регрессионная модель представляет собой уравнение, связывающее удельный расход электроэнергии $W_{уд}$ с основными факторами, которые оказывают наибольшее влияние на параметр $W_{уд}$. Данные факторы выявляются с помощью построения корреляционной таблицы для больших массивов плавок (несколько сотен или тысяч) для двух анализируемых периодов, базового и гарантийного, с примерно одинаковым месячным объемом

обработанной стали. Корреляционная таблица показывает статистическую взаимосвязь между анализируемым параметром $W_{уд}$ и всеми доступными параметрами из паспортов плавов (время работы под током, время цикла обработки, расход аргона за плавку, начальная, конечная температуры и средняя величина нагрева за плавку, вес отдельных легирующих и шлакообразующих материалов, отдаваемых в ковш в процессе обработки жидкой стали и т.д.). Те факторы, которые имеют высокий коэффициент корреляции с $W_{уд}$, отбираются для подстановки в уравнение регрессии.

Перед выполнением корреляционного и регрессионного анализа осуществляется подготовка статистических выборок параметров для исследуемых У КП. Статистические выборки параметров исследуемых У КП были получены на основании обработанных паспортов плавов за периоды предгарантийных и гарантийных испытаний. Статистические выборки параметров представляют собой электронные таблицы, где для каждой строки с соответствующим номером плавки приведены значения энергетических, временных и технологических показателей работы агрегатов, таких как: время цикла обработки стали, время работы под током, начальная и конечная температуры металла, абсолютная величина нагрева металла, суммарный расход аргона при продувке металла, признаки плавов с повторными обработками на У КП, обработками на У В С и др. параметры.

После первичной подготовки выборок осуществлялись проверка массива данных и отсев плавов по следующим условиям: 1) тестовые «нулевые» плавки; 2) плавки с ошибочными данными по электроэнергии (отрицательные значения), некорректными значениями начальной и конечной температуры жидкого металла (отрицательные значения температуры, значения температуры, отличающиеся на несколько сот градусов от предполагаемого фактического значения), некорректными значениями времени работы под током и общего времени обработки металла (отрицательные значения $t_{РТ}$ и $t_{ОБР}$, ошибочные значения $t_{РТ} > t_{ОБР}$).

В результате отсева плавов с некорректными данными для УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» были получены две статистические выборки, состоящие из 927 и 885 плавов. Для УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» объемы выборок составили 4649 и 3601 плавов.

Для указанных массивов данных были получены корреляционные таблицы для двух анализируемых периодов (предгарантийного – базового и гарантийного с примерно одинаковым месячным объемом обработанной стали).

На основании выполненного корреляционного анализа были отобраны факторы для регрессионной модели удельного расхода электроэнергии $W_{уд}$. Для правильного регрессионного анализа уравнение регрессии в рамках одного УКП должно иметь одинаковый вид для каждого из двух анализируемых периодов (предгарантийного и гарантийного).

Для УКП№1 180т. ПАО «ММК» было получено следующее уравнение регрессии, содержащее 12 факторов:

$$\begin{aligned} W_{уд} = & a \cdot t_{ОБР.} + b \cdot t_{АРГОН} + c \cdot t_{РТ} + d \cdot Q_{АРГ} + e \cdot T_{МЕТ.НАЧ.} + \\ & + f \cdot T_{МЕТ} + g \cdot G_{АВ87ГР} + h \cdot G_{СМН18} + i \cdot G_{УСМ} + j \cdot G_{ФМН78А} + \\ & + k \cdot G_{ФС65} + l \cdot G_{ИЗВЕСТЬ} + m \end{aligned} \quad (5.2)$$

где $t_{ОБР.}$ – время обработки [мин.]; $t_{АРГОН}$ – длительность продувки; $\Delta T_{МЕТ}$ – величина нагрева стали [°C], $t_{РТ}$ – время работы под током [мин.]; $Q_{АРГ}$ – суммарный расход аргона [м³]; $T_{МЕТ.НАЧ.}$ – начальная температура стали [°C]; $G_{АВ87ГР}$ – общий вес АВ87ГР [кг]; $G_{СМН18}$ – общий вес СМН18 [кг]; $G_{УСМ}$ – общий вес УСМ [кг]; $G_{ФМН78А}$ – общий вес ФМН78А [кг]; $G_{ФС65}$ – общий вес ФС65 [кг]; $G_{ИЗВЕСТЬ}$ – общий вес извести [кг]; $a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m$ – коэффициенты при факторах уравнения регрессии; n – свободный член уравнения регрессии.

Для УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» было получено следующее уравнение регрессии, содержащее 8 факторов:

$$\begin{aligned} W_{уд} = & a \cdot t_{ОБР.} + b \cdot t_{РТ} + c \cdot G_{МЕТ} + d \cdot T_{МЕТ.НАЧ.} + e \cdot T_{МЕТ} + \\ & + f \cdot Q_{АРГ} + g \cdot t_{ВЫД.СК.МЕТ.} + h \cdot N_{ТР.ЭКВ.} + n \end{aligned} \quad (5.3)$$

где $G_{\text{пл.}}$ – вес плавки на У КП [т.]; $t_{\text{выд.}}$ – выдержка металла в стальковше перед плавкой [мин.]; $N_{\text{перелив}}$ – доля переливных плавов [о.е.]; $N_{\text{увс}}$ – доля плавов с обработкой на установке вакуумирования стали перед У КП [о.е.]; $N_{\text{аф}}$ – доля плавов с использованием аварийной фурмы [о.е.]; $N_{\text{тр.экв.}}$ – эквивалентная ступень напряжения печного трансформатора; $N_{\text{п.обр.}}$ – доля плавов с повторной обработкой на У КП [о.е.]; $t_{\text{мет.ск.}}$ – время нахождения металла в стальковше [мин.].

Для каждой пары регрессионных моделей, соответствующих предгарантийному и гарантийному периодам, определялись коэффициенты при факторах регрессии с использованием метода наименьших квадратов. Значения коэффициентов регрессии для уравнений У КП №1 180т. ПАО «ММК», описываемых выражением 5.2, приведены в таблице 5.8. Значения коэффициентов регрессии для уравнений У КП №2 120т. ПАО «Северсталь», описываемых выражением 5.3, приведены в таблице 5.9.

Для каждой пары регрессионных моделей, соответствующей предгарантийному и гарантийному периодам, определялись коэффициенты при факторах регрессии с использованием метода наименьших квадратов. Значения коэффициентов регрессии для уравнений также приведены в таблицах 5.8 и 5.9. Для всех исследуемых агрегатов значения коэффициентов детерминации R^2 , характеризующих точность регрессионных моделей, находились в диапазоне $R^2 = 0,908 - 0,960$, что является доказательством адекватности моделей и подтверждением возможности их применения для анализа изменения $W_{\text{уд}}$ в условиях влияния большого количества факторов.

На следующем этапе с использованием полученных уравнений регрессии для двух анализируемых периодов (предгарантийного и гарантийного) осуществлялось приведение технологических факторов, влияющих на $W_{\text{уд}}$, к одинаковым условиям. Механизм учета влияния неодинаковых технологических факторов на $W_{\text{уд}}$ заключается в следующем: для двух анализируемых периодов (гарантийного и предгарантийного) определены средние значения факторов, которые

используются в уравнениях регрессии и оказывают значимое влияние на $W_{уд}$. Далее для каждого исследуемого агрегата был проведен анализ, в каком из периодов сочетания факторов способствовали достижению технического эффекта по экономии электроэнергии, а в каком, наоборот, ухудшали эффект. Для правильной оценки эффективности электрических режимов осуществляется приведение условий более легкого гарантийного периода к более тяжелому предгарантийному за счет подстановки в уравнения регрессии средних значений факторов более тяжелого периода. Благодаря этому учитывается неодинаковое влияние всех основных факторов в уравнении регрессии, в том числе обусловленных обработкой разного сортамента. После подстановки в уравнение регрессии для гарантийного периода с уже определенными коэффициентами a , b , c , d , e и т.д. рассчитывается уточненное значение $W_{уд2.ср}$ для гарантийного периода и сравнивается со значением $W_{уд1.ср}$ для предгарантийного. Далее определяется уточненный эффект $\delta W_{уд}$ с учетом приведения факторов к одинаковым технологическим условиям:

$$\delta W_{уд} = \frac{W_{уд2.ср} - W_{уд1.ср}}{W_{уд1.ср}} \cdot 100\%, \quad (5.4)$$

где $W_{уд1.ср}$ и $W_{уд2.ср}$ – средние значения удельного расхода электроэнергии за периоды предгарантийных и гарантийных испытаний, вычисленные на основании регрессионных моделей.

Результаты уточненного регрессионного анализа расхода электроэнергии также показали наличие технического эффекта по уменьшению $W_{уд}$ на 2,46% для УКП№1 180т. ПАО «ММК» и на 2,2% для УКП№2 120т. ПАО «Северсталь».

С учетом вышеизложенного можно сделать заключение о наличии положительных технических эффектов от коррекции электрических режимов и алгоритмов автоматического переключения рабочих кривых исследуемых УКП.

Таблица 5.8 - Анализ изменения удельного расхода электроэнергии УКПН_{№1} 180т. ПАО «ММК» с использованием полученных уравнений регрессии

Анализируемый период	Коэф. уравнения регрессии	Коэф. детерминации R^2	Ср. удельный расход ЭЭ по уравнению регрессии $W_{уд.ср}$, кВт·ч/т	Относительное изменение $\delta W_{уд.ср}$, %
1.Предгарантийный период УКПН _{№1} 180т. ПАО «ММК»	$a=0,001976; b=-0,022628;$ $c=2,432048; d=0,004112;$ $e=-0,022192; f=-0,020412;$ $g=0,000392; h=0,000225;$ $i=-0,000367; j=0,000192;$ $k=-0,001357; l=0,001555;$ $m=-0,000304; n=34,167691$	0,960	72,69	
2. Гарантийный период УКПН _{№1} 180т. ПАО «ММК»	$a=0,009138; b=0,060336;$ $c=2,121633; d=0,00811;$ $e=0,062543; f=0,110219;$ $g=-0,001745; h=0,001351;$ $i=-0,000178; j=-0,000707;$ $k=-0,00132; l=-0,001204;$ $m=-0,000507; n=-100,148585$	0,949	70,90	-2,46

Таблица 5.9 - Анализ изменения удельного расхода электроэнергии УКПН_{№2} 120т. ПАО «Северсталь» с использованием полученных уравнений регрессии

Анализируемый период	Коэф. уравнения регрессии	Коэф. детерминации R^2	Ср. удельный расход ЭЭ по уравнению регрессии $W_{уд.ср}$, кВт·ч/т	Относительное изменение $\delta W_{уд.ср}$, %
1.Предгарантийный период УКПН _{№2} 120т. ПАО «Северсталь»	$a = 0,022977; b = 1,614704;$ $c = -0,269488; d = 0,025170;$ $e = 0,082005; f = -0,009783;$ $g = 0,000497; h = -1,204484;$ $n = 7,766345$	0,911	40,11	—
2. Гарантийный период УКПН _{№2} 120т. ПАО «Северсталь»	$a = 0,004339; b = 1,662181;$ $c = -0,263959; d = 0,016080;$ $e = 0,057738; f = -0,033795;$ $g = 0,003581; h = -1,235336;$ $n = 19,496835$	0,908	39,24	-2,2

5.4. Выводы по главе 5

1. Выполнены реализация, внедрение и апробация усовершенствованных несимметричных электрических режимов и алгоритмов автоматического переключения рабочих кривых $N_{РК}$ и ступеней напряжения печного трансформатора $N_{ТР}$ на исследуемых У КП. Реализация осуществилась с учетом индивидуальных особенностей агрегатов и включала как корректировку параметров существующих систем управления, так и реализацию алгоритмов на базе головных ПЛК для динамической адаптации к толщине шлака и режимам продувки аргоном, а также установку дополнительного оборудования (анализаторов мощности) для получения информации о гармоническом составе токов.

2. Выполнена настройка несимметричных электрических режимов и алгоритмов автоматического переключения $N_{РК}$ и $N_{ТР}$. Окончательная настройка несимметричных электрических режимов и алгоритмов автоматического переключения $N_{РК}$ и $N_{ТР}$ осуществлялась в реальных производственных условиях на протяжении двух недель после внедрения и первичной наладки, выполненной в рамках проведения тестовых плавов.

3. Были проведены экспериментальные исследования заданных несимметричных электрических режимов и алгоритмов автоматического переключения $N_{РК}$ и $N_{ТР}$ в рамках трехмесячных гарантийных испытаний. В этот период реализованные усовершенствованные несимметричные электрические режимы и алгоритмы автоматического $N_{РК}$ и $N_{ТР}$ проходили апробацию в реальных промышленных условиях. На основании полученных данных проведен анализ влияния работы алгоритмов на ресурс переключающего устройства печного трансформатора (РПН) и эффективности переключений, осуществляемых алгоритмом. Анализ показал, что на долю алгоритма автоматического управления электрическими режимами У КП приходится не более 10,36% всех переключений устройства РПН печного трансформатора. Также на основании проведенных экспериментальных исследований можно сделать заключение о коррект-

ной работе алгоритма и, соответственно, об адаптации электрического режима агрегата к текущему шлаковому режиму и режиму продувки. Также, в течении этого периода набиралась необходимая статистическая информация для последующей оценки достигнутого технического эффекта.

4. Выполнен анализ технического эффекта с использованием прямого сопоставления удельного расхода электроэнергии $W_{уд}$ в базовом и гарантийном периодах, а также с применением специализированной методики, учитывающей влияние технологических факторов на $W_{уд}$. Сравнение удельных расходов электроэнергии, рассчитанных по уравнениям регрессии для предгарантийного и гарантийного периодов, доказывает наличие статистически значимого уменьшения удельного расхода электроэнергии при внедрении разработанных решений. По результатам анализа, в результате внедрения усовершенствованных электрических режимов и алгоритмов автоматического переключения рабочих кривых $N_{РК}$ и $N_{ТР}$, был достигнут положительный технический эффект в виде снижения удельного расхода электроэнергии. Регрессионный анализ показал снижение на 2,46% для УКП№1 180т ПАО «ММК» и на 2,2% для УКП№2 120т ПАО «Северсталь», что подтверждает эффективность разработанных подходов.

5. Разработанные электрические режимы и алгоритмы автоматического управления электрическими режимами УКП с динамической адаптацией длин электрических дуг и вторичного напряжения печного трансформатора были успешно приняты в промышленную эксплуатацию, что подтверждается актами внедрения. Это свидетельствует о практической применимости и доказанной эффективности предложенных решений в реальных производственных условиях, способствующих повышению энергоэффективности электросталеплавильных комплексов с УКП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведены экспериментальные исследования электрических режимов У КП, функционирующих на отечественных предприятиях черной металлургии. Выполнен сбор данных о электрооборудовании, системах электроснабжения и управления, а также технологических режимах. Важной технологической особенностью У КП является необходимость перемешивания жидкой стали в стальковшах 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 РПН печного трансформатора $N_{\text{ТР}}$ и рабочих кривых $N_{\text{РК}}$, 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 и ступеней РПН печного трансформатора, используя суммарный коэффициент гармонических составляющих тока K_I (THD_I) в качестве критерия для изменения электрического режима.

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

4. Разработана методика задания оптимальных электрических режимов У КП с учетом расположения оборудования аргонной продувки, обеспечивающая нахождение наилучших значений уставок импедансов вторичного электри-

ческого контура, задающих наилучшую несимметрию длин дуг в фазах, расположенных в непосредственной близости к зеркалам жидкого металла на поверхности ванны в стальковше.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krüger K. Modellbildung und Regelung der elektrischen Energieumsetzung von Lichtbogenöfen (Modeling and control of the electrical energy conversion in arc furnaces) / Dr.-Ing. Dissertation, Fachbereich Maschinenbau, Universität der Bundeswehr Hamburg, Fortschritt-Berichte VDI. – Reihe 6, Nr. 382. – VDI-Verlag, Düsseldorf. – 1998.
2. Bowman B. Arc Furnace Physics /B. Bowman, K. Krüger // Verlag Stahleisen GmbH. – Düsseldorf. –2009.
3. Köhle S. Ersatzschaltbilder und Modelle für die elektrischen Größen von Drehstrom-Lichtbogenöfen (Equivalent circuit diagrams and models for the electrical parameters of AC arc furnaces) / Habilitationsschrift, Fachbereich Elektrotechnik, Bergische Universität – Gesamthochschule Wuppertal, Verlag Stahleisen. – Düsseldorf. –1990.
4. Köhle S. D Lichtbogenreaktanzen von Drehstrom-Lichtbogenöfen (Arc reactances of AC arc furnace) // Elektrowärme International 51, B4. –1993. – pp. 175-185.
5. Миронов Ю.М. Электрическая дуга в электротехнологических установках: Монография / Ю.М. Миронов. – Чебоксары: изд. Чуваш. Ун-та, 2013. – 290 с.
6. Макаров А.Н. Законы теплообмена электрической дуги и факела в металлургических печах и энергетических установках / А.Н. Макаров. – Тверь: изд. Тверск. госуд. техн. ун-та, 2012. – 164 с.
7. Николаев А.А. Повышение эффективности работы статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи: дис. канд. техн. Наук. Магнитогорский государственный технический университет, Магнитогорск, 2009.
8. Перспективы и средства повышения эффективности дуговых сталеплавильных печей за счет силового электрооборудования / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин, И.А. Якимов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Энергетика. – 2009. – Вып. 11. – №15(148). – С. 32-38.

9. Николаев А.А. Способы повышения эффективности дуговых сталеплавильных печей за счет силового электрооборудования / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, И.А. Якимов, Т.Р. Храмшин, Т.Ю. Вахитов // Труды X конгресса сталеплавильщиков, г. Магнитогорск, 13-17 октября 2008 г. – М.: Изд. дом. МИСиС, 2009. – С.274–279.

10. Николаев А.А. Исследования режимов работы дуговых сталеплавильных печей в комплексе со статическими тиристорными компенсаторами реактивной мощности. Часть 1. / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, И.А. Якимов // Электromеталлургия, 2014. – №5. – С.15-22.

11. Корнилов Г.П. Анализ и оптимизация электрических режимов сверхмощных дуговых сталеплавильных печей / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин, Т.Ю. Вахитов // Электromеталлургия, 2013. – №7. – С. 2- 10.

12. Патент на полезную модель № 98314, МПК Н 05 В 7/148. Устройство управления электрическим режимом дуговой печи / А.А. Николаев, В.М. Салтыков, Ю.П. Журавлев [и др.]; заявитель и патентообладатель Магнитогорский гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова. – БИМП. 2010. №28.

13. Николаев А.А. Использование статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи для обеспечения устойчивости электроэнергетической системы и повышения надежности внутривозводского электроснабжения / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, В.С. Ивекеев и др. // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал, 2014. – № 1. – С. 59-69. – URL: <http://www.indust-engineering.ru/issues/2014/2014-1-8.pdf> (дата обращения 27.04.2014).

14. Корнилов Г.П. Анализ системы управления дуговой сталеплавильной печи с целью повышения ее эффективности / Г.П. Корнилов, И.А. Якимов, А.А. Николаев, А.В. Ануфриев // Электротехнические системы и комплексы, 2012. – № 20. – С. 309–315.

15. Корнилов Г.П. Повышение эффективности работы сверхмощной дуговой сталеплавильной печи / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин, и др. // Известия вузов. Электromеханика, 2009. – №1. – С. 55–59.

16. Николаев А.А. Исследования режимов работы дуговых сталеплавильных печей в комплексе со статическими тиристорными компенсаторами реактивной мощности. Часть 2. / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, И.А. Якимов // Электromеталлургия, 2014. – №6. – С.9-13.

17. Корнилов Г.П. Проблемы энергосбережения металлургического предприятия / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, И.А. Якимов и др. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Вып. 3: в 5 ч. – Тула. Из-во ТулГУ. – 2010. - Ч.4. –С. 45 – 52.

18. Бикеев Р.А. Динамические режимы в электромеханических системах дуговых сталеплавильных печей и их воздействие на вводимую активную мощность: дис. канд. техн. наук. – Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск. – 2004.

19. Шпиганович А.Н. Особенности систем электроснабжения сталеплавильных и ферросплавных производств / А.Н. Шпиганович, К.Д. Захаров // Липецк: ЛГТУ. – 2004. - 213 с

20. Нехамин С.М. Создание и внедрение энергоэффективных дуговых и шлаковых электропечных комплексов с использованием постоянного тока и тока пониженной частоты: дис. докт. техн. наук. – Московский энергетический институт, Москва. – 2015.

21. Якимов И.А. Обоснование тиристорного регулирования напряжения трансформатора дуговой сталеплавильной печи / Электротехнические системы и комплексы, № 2 (35) . – 2017. – с. 41-48.

22. Николаев А. А. Особенности моделирования гидропривода сверхмощной электродуговой сталеплавильной печи ДСП-180 / А. А. Николаев, П. Г. Тулупов // Инновации в науке. – 2013. – № 27. – С. 53-61. – EDN RNGORH.

23. Николаев А. А. Применение математической модели дуговой печи для анализа мгновенных значений напряжения дуги при наличии реальных сигналов тока дуги и фазного напряжения / А. А. Николаев, П. Г. Тулупов // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2016. – Т. 4, № 2. – С. 2-9. – EDN XHUVFX.

24. 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. – DOI 10.14529/power200306. – EDN MCYYCN.

25. Кудрин В.А. Проблемы современного электросталеплавильного производства в России / В. А. Кудрин, М. В. Шишимиров, О. М. Сосонкин, В. А. Шишимиров // Технология металлов. – 2011. – № 3. – С. 2-7. – EDN NTDINX.

26. Кудрин В.А. О повышении эффективности производства стали в ДСП / В. А. Кудрин, В. А. Шишимиров, О. М. Сосонкин, М. В. Шишимиров // Электromеталлургия. – 2010. – № 10. – С. 24-29. – EDN MWHYAT.

27. Рубцов В. П. Исследование устойчивости зажигания и горения дуги в электропечах постоянного тока / В. П. Рубцов // Электричество. – 2010. – № 3. – С. 40-46. – EDN KZDWTF.

28. Сериков В.А. Акустические и вибрационные характеристики сверхмощных дуговых сталеплавильных электропечей: дисс. канд. техн. наук/ Сериков Виктор Андреевич – Новосибирск. – 2016. – 147 с.

29. Кучумов Л. А. Методика расчета и анализа электрических характеристик нелинейных, несимметричных и резкопеременных нагрузок дуговых сталеплавильных печей / Л. А. Кучумов, А. А. Кузнецов, Д. А. Беляев // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2007. – № 2(50). – С. 218-224. – EDN JUBXMX.

30. Свенчанский А.Д. Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева: Учебник для вузов / А.Д. Свенчанский, И.Т. Жердев, А.М. Кручинин [и др.] // под общ. ред. А.Д. Свенчанского. – М.: Энергоиздат, 1981. – 296 с.

31. Рыжнев Ю.Л. Влияние дуговых электропечей на системы электроснабжения / Ю.Л. Рыжнев, Р.В. Минеев, А.П. Михеев [и др.] // М.: Энергия. – 1975. –184 с.

32. Тулуевский Ю. Н. Повышение производительности и энергетической эффективности дуговых сталеплавильных печей с шахтным подогревом металлолома / Ю. Н. Тулуевский, И. Ю. Зинуров // *Электromеталлургия*. – 2014. – № 3. – С. 5-11. – EDN RWZJKB.

33. Зинуров И. Ю. Этапы развития конструкции дуговых сталеплавильных печей / И. Ю. Зинуров, Ю. А. Гудим // *Электromеталлургия*. – 2006. – № 10. – С. 9-16. – EDN KTWGEN.

34. Минеев Р. В. Динамическое симметрирование режимов работы дуговых электропечей / Р. В. Минеев, А. И. Коробов, А. Р. Минеев // *Электromеталлургия*. – 2011. – № 6. – С. 34-38. – EDN NUVAYL.

35. Гудим Ю.А. Рациональные способы интенсификации плавки в современных дуговых сталеплавильных печах / Ю. А. Гудим, И. Ю. Зинуров, А. Д. Киселев, А. М. Шумаков // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия*. – 2008. – № 9(109). – С. 10-13. – EDN IUJOKX.

36. Жохов Б.Д. Компенсация реактивной мощности в сетях с электродуговыми печами // *Промышленная энергетика*. №11. 1994. С.39-45.

37. Карташёв И.И. Статические компенсаторы реактивной мощности в электрических системах: Пер. тематического сб. рабочей группы Исследовательского Комитета №38 СИГРЭ / Под ред. Карташёва И.И. // М.: Энергоатомиздат. 1990. 174 с.

38. Николаев А.А. Сравнительный анализ современных систем управления электрическим режимом дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь / Николаев А.А, Тулупов П.Г., Ивекеев В.С. // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. – 2020. Т. 20. №3. С. 52-64. – doi: 10.14529/power200306.

39. Тулупов П.Г. Улучшение энергетических показателей электродуговой печи за счет системы управления с анализом гармоник напряжений дуг: дис. канд. техн. Наук. Магнитогорский государственный технический университет, Магнитогорск, 2021.

40. Николаев А.А. Методика сравнительной оценки эффективности работы систем управления положением электродов агрегата ковш-печь / Николаев А.А. // Материалы XVI Международной конференции «Современные проблемы электрометаллургии стали». Челябинск, Издательский центр ЮУрГУ. – 2015. – Ч.1. С.161-170.

41. Николаев А.А. Методика сравнительной оценки эффективности работы систем управления положением электродов агрегата печь-ковш / Николаев А.А. // Современные проблемы электрометаллургии стали. Материалы XVI Международной конференции: в 2-х частях. – 2015. – С. 161-170.

42. 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. Тулупов, А.С. Денисевич [и др.]; №2020660637; заявл. 18.09.2020; опубли. 24.09.2020. Бюл.№10. – 22000 кб.

43. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021666379 Российская Федерация. Программа для обработки сигналов напряжений и токов дуговой сталеплавильной печи при различной конфигурации измерительных устройств : № 2021665364 : заявл. 06.10.2021 : опубли. 13.10.2021 / А. А. Николаев, П. Г. Тулупов, А. С. Денисевич [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – EDN EIFQNU.

44. 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. – doi: 10.18503/1995-2732-2020-18-3-58-68.

45. Николаев, А.А. Разработка математической модели электрического контура дуговой сталеплавильной печи для расчёта мгновенных значений напряжения электрических дуг на основании реальных экспериментальных данных / А.А. Николаев, П.Г. Тулупов //Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2019. – Т. 10.№ 1. – С. 104-109.

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

47. Nikolaev, A. A. Method of setting optimum asymmetric mode of operation of electric arc furnace / A. A. Nikolaev, P. G. Tulupov //2016 11th France-Japan & 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS) /17th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM) . – 2016. – pp. 033-037

48. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021666556 Российская Федерация. Программа для управления электрическим режимом электродуговой печи с использованием информации о гармоническом составе токов дуг : № 2021665415 : заявл. 06.10.2021 : опубл. 15.10.2021 / А. А. Николаев, П. Г. Тулупов, М. В. Буланов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – EDN SQMPYZ.

49. Повышение эффективности систем управления электрическими режимами электродуговых печей за счет применения адаптивного регулятора импеданса / А. А. Николаев, П. Г. Тулупов, О. С. Малахов, С. С. Рыжевол // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2021. – Т. 21, № 4. – С. 82-93. – DOI 10.14529/power210410. – EDN JWLCOR.

50. Разработка методики оптимизации электрических режимов дуговых сталеплавильных печей шахтного типа на примере ШП-125 чермк ПАО "Северсталь" / А. А. Николаев, П. Г. Тулупов, С. С. Рыжевол, В. А. Ефремов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : Тезисы 80-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 18–22 апреля 2022 года. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2022. – С. 263. – EDN IAZFZA.

51. Николаев, А.А. Повышение эффективности электродуговых печей за счет усовершенствованных алгоритмов управления электрическими режимами / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, П.Г. Тулупов, Г.В. Никифоров // Черные металлы. – 2020. – № 12 (1068) . – С. 10-16.

52. Николаев, А.А. Усовершенствованный способ управления электрическим режимом установки ковш-печь с использованием информации о гармониках токов дуг / А.А. Николаев, С.И. Лукьянов, П.Г. Тулупов // Сталь. – 2019. – № 4. – С. 16-21.

53. Повышение эффективности работы установок ковш-печь ПАО "ММК" за счет применения систем управления электрическими режимами с анализом высших гармоник токов дуг / П. Г. Тулупов, С. С. Рыжевол, В. А. Ефремов [и др.] // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : Тезисы 80-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 18–22 апреля 2022 года. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2022. – С. 262. – EDN TITMQD.

54. Разработка усовершенствованных алгоритмов управления электрическими режимами установок ковш-печь ЭСПЦ и ККЦ ПАО "ММК" / А. А. Николаев, П. Г. Тулупов, С. С. Рыжевол [и др.] // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : Тезисы докладов 81-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 17–21 апреля 2023 года. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2023. – С. 296. – EDN YPENJM.

55. 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. – DOI 10.14529/power210208. – EDN TZOWQC.

56. Игнатов И.И. Расчет электрических параметров и режимов дуговых сталеплавильных печей/ Игнатов И.И., Хаинсон А.В. // Электричество. – № 8. – 1983. – С. 62-65.
57. Тельный С.И. К теории трехфазной дуговой печи с непроводящей подиной // Электричество. – 1954. №12. – С. 38-42.
58. Игнатов И.И. Хаинсон А.В. Математическое моделирование электрических режимов дуговых сталеплавильных печей // Электричество. № 8. – 1985. – С. 69-72.
59. Казаков О.А. О вольт-амперной характеристике дугового разряда переменного тока // Электричество. № 8. – 1995. – С. 49-56.
60. Корнилов Г.П. Способы моделирования электрического контура дуговой сталеплавильной печи / Корнилов Г.П., Храмшин Т.Р., Николаев А.А. // Энергетика и энергоэффективные технологии: Сб. докл. по итогам научно-технической конференции, посвященной 50-летию ЛГТУ – Липецк: ГОУ ВПО ЛГТУ, 2006. – С. 34 – 41.
61. Bowman B. Computer modeling of arc furnace electrical operation // Metallurgia International 1, 1988, No. 4. pp. 286-291.
62. Celada J. Power Input to the Electric Arc Furnace // Transaction of the Iron and Steel Society 13, 1992, pp. 17-24.
63. Николаев А.А. Моделирование электротехнических комплексов промышленных предприятий: Учебное пособие (гриф УМО) / Николаев А.А., Корнилов Г.П., Николаев А.А., Храмшин Т.Р. // Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 239 с.
64. Cassie A.M. Nouvelle théorie des arcs de rupture et rigidité du circuit (New theory of breaker arcs and circuit rigidity). CIGRE Report No. 102, 1939.
65. Миронов Ю.М. Закономерности электрических режимов дуговых сталеплавильных печей // Электричество. № 6. 2006. С. 56 – 62.
66. Рудцов В.П. Параметры дугового разряда и их влияние на эффективность работы электротехнологических установок / Рудцов В.П., Дмитриев И.Ю., Минеев А.Р. // Электричество. № 8. 2000. С. 40-45.

67. Nikolaev A.A. Electrical Optimization of Superpowerful Arc Furnaces / Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Anufriev A.V., Pekhterev S.V., Povelitsa E.V. // *Steel in Translation*, 2014, Vol.44, No. 4, pp. 289-297.

68. Корнилов Г.П. Особенности моделирования дуговой сталеплавильной печи как электротехнического комплекса / Корнилов Г.П., Николаев А.А., Храмшин Т.Р., Вахитов Т.Ю. Якимов И.А. // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2013. – №1. – С.76–82.

69. Николаев А.А. Математическое моделирование в электроэнергетических системах / Николаев А.А., Абдулвелеев И.Р., Анохин В.В. // *Электронное издание – Магнитогорск, 2017. (Переиздание)*

70. Николаев А.А. Математическая модель электрического контура электродуговой сталеплавильной печи / Николаев А.А., Тулупов П.Г. // *Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2016612798, 10.03.2016. Заявка № 2016610031 от 11.01.2016.*

71. Миронов, Ю. М. Энерготехнологические соотношения в дуговых сталеплавильных печах / Ю. М. Миронов // *Электрометаллургия*. – 2021. – № 4. – С. 2-10. – DOI 10.31044/1684-5781-2021-0-4-2-10. – EDN QONPWZ.

72. Миронов, Ю. М. Закономерности изменения параметров электрического режима во времени плавки в дуговых сталеплавильных печах / Ю. М. Миронов // *Электрометаллургия*. – 2021. – № 8. – С. 11-18. – DOI 10.31044/1684-5781-2021-0-8-11-18. – EDN NGDQMY.

73. Николаев А.А. Исследование гидропривода перемещения электродов сверхмощной дуговой сталеплавильной печи ДСП-250 ЗАО «ММК Metalurji» г. Искендерун, Турция / Николаев А.А., Тулупов П.Г. // *Энергетические и электротехнические системы: Междунар. сб. науч. тр. Вып. 1. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. С. 84-95.*

74. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016612797 Математическая модель системы управления положением электродов дуговой сталеплавильной печи / А.А. Николаев, П.Г. Тулупов, Е.В. Повелица, А.В. Ануфриев; № 2016610030; заявл.11.01.2016; опубл. 20.04.2016. – 89 Кб.

75. Nikolaev, A. A. Mathematical model of electrode positioning hydraulic drive of electric arc steel-making furnace taking into account stochastic disturbances of arcs/ A. A. Nikolaev, P. G. Tulupov, D. A. Savinov // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) . – pp. 1-6. – 2017.

76. Повышение эффективности систем управления электрическими режимами электродуговых печей за счет применения адаптивного регулятора импеданса / А. А. Николаев, П. Г. Тулупов, О. С. Малахов, С. С. Рыжевол // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2021. – Т. 21, № 4. – С. 82-93. – DOI 10.14529/power210410. – EDN JWLCOR.

77. Nikolaev, A. A. Optimal Adjustment Methodology for the Electric Mode Control System Non-Linear Regulator of Electric Arc Furnace / A. A. Nikolaev, P. G. Tulupov, S. S. Ryzhevol // Proceedings - 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2022, Sochi, 16–20 мая 2022 года. – Sochi, 2022. – P. 712-716. – DOI 10.1109/ICIEAM54945.2022.9787224. – EDN MFITNG.

78. Разработка методики оптимальной настройки нелинейного регулятора импеданса дуговой сталеплавильной печи / А. А. Николаев, П. Г. Тулупов, В. С. Ивекеев, С. С. Рыжевол // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2023. – Т. 23, № 3. – С. 51-61. – DOI 10.14529/power230305. – EDN RQJRXZ.

79. Диагностика стадии плавления шихты по высшим гармоникам токов и напряжений дуг для дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь различного класса / А. А. Николаев, Г. П. Корнилов, П. Г. Тулупов, С. С. Рыжевол // Черные металлы. – 2022. – № 7. – С. 71-78. – DOI 10.17580/chm.2022.07.12. – EDN KLV TJN.

80. Разработка алгоритма энергоэффективного управления дуговой сталеплавильной печи с использованием цифрового двойника / А. А. Николаев, Р. Р. Дема, П. Г. Тулупов, С. С. Рыжевол // Черные металлы. – 2023. – № 8. – С. 4-12. – DOI 10.17580/chm.2023.08.01. – EDN RMNHHH.

81. Разработка усовершенствованных алгоритмов управления электрическими режимами гибкими модульными ДСП на примере АО "Уральская сталь" и ЧерМК ПАО "Северсталь" / А. А. Николаев, П. Г. Тулупов, С. С. Рыжевол [и др.] // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : Тезисы докладов 81-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 17–21 апреля 2023 года. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2023. – С. 289. – EDN SMPQFU.

82. Разработка алгоритма энергоэффективного управления дуговой сталеплавильной печи с использованием цифрового двойника / А. А. Николаев, Р. Р. Дема, П. Г. Тулупов, С. С. Рыжевол // Черные металлы. – 2023. – № 8. – С. 4-12. – DOI 10.17580/chm.2023.08.01. – EDN RMNHHH.

83. Макаров, А.Н. Анализ энергетических характеристик высокоомощных дуговых сталеплавильных печей / А.Н. Макаров, Р.А. Макаров, В.В. Воропаев // Электричество. – 2014. – № 5. – С. 34-36.

84. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024686869 Российская Федерация. Программа для сравнительного анализа показателей работы электродуговых печей при использовании различных электрических режимов: № 2024686485: заявл. 08.11.2024: опубл. 13.11.2024 / А. А. Николаев, П. Г. Тулупов, Р. Р. Дема [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – EDN AWUJNU.

85. Миронов, Ю. М. Особенности дуговых сталеплавильных печей как приемников электрической энергии / Ю. М. Миронов // Электromеталлургия. – 2020. – № 9. – С. 2-8. – DOI 10.31044/1684-5781-2020-0-9-2-8. – EDN TSGMAF.

86. H. Pfeifer Thermodynamic analysis of EAF electrical energy demand / H. Pfeifer M. Kirschen // Proc. 7th European electric steelmaking conference. – 2002. – Т. 26. – С. 1.

87. H.Pfeifer Thermodynamic analysis of electrical energy demand / Pfeifer H., Kirschen M., Simoes, J.-P. // Proc. 8th European Electric Steelmaking Conference. - London, 2005. - С. 211-232

88. Rahman. Fundamental Investigation of Slag/Carbon Interactions in Electric Arc Furnaces Steelmaking Process: PhD thesis University of New South Wales, Faculty of Science School of Materials Science and Engineering. – New South Wales, 2010.

89. Институт стали Steel Institute VDeH // [Материалы научных семинаров]. URL: <https://vdeh.de/en/steel-academy/seminars/>

90. 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.

91. Улучшение энергетических показателей работы установок ковш-печь за счет использования оптимальных несимметричных режимов горения дуг / А. А. Николаев, П. Г. Тулупов, С. С. Рыжевол [и др.] // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : Тезисы докладов 82-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 22–26 апреля 2024 года. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2024. – С. 24. – EDN POTLNT.

92. 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; опубл. 17.10.2022. 135 кб

93. Разработка усовершенствованной системы автоматического управления инжекторами углеродосодержащего материала дуговой сталеплавильной печи / А. А. Николаев, П. Г. Тулупов, С. С. Рыжевол, В. С. Ивекеев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2022. – Т. 20, № 2. – С. 120-132. – DOI 10.18503/1995-2732-2022-20-2-120-132. – EDN VBDCYY.

94. Development of an Automatic Control Algorithm for the Combined RCB-Burners and Carbon Material Injectors of the Flexible Modular Furnace / A. A. Nikolaev, P. G. Tulupov, S. S. Ryzhevol, S. A. Linkov // International Russian Automation Conference : Proceedings 2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, 04–10 сентября 2022 года. – Danvers, MA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022. – P. 644-648. – DOI 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896242. – EDN QDCQTR.

95. 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.

96. 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

97. 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.

98. 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; опубл. 15.11.2023. 207 кб

99. 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.

100. 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.

101. 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; опубл. 25.11.2024. 139 кб

102. 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; опубл. 15.11.2023. 2,17 мб

103. 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.

104. 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

105. Николаев, А.А. Методика оценки изменения удельного расхода электроэнергии и электродов при коррекции электрических режимов дуговых сталеплавильных печей / А.А. Николаев, В. С. Ивекеев, П. Г. Тулупов, М. В. Буланов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2022. – Т. 22, № 2. – С. 45-55

106. Nikolaev, A.A. Improved Methodology for Estimating Specific Energy Consumption in Electric Arc Furnaces when Changing Electrical Modes / A.A. Nikolaev, V.A. Efremov, P.G. Tulupov // Proceedings of the 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2021). – Sochi, Russia. – 17-21 May 2021, pp. 1-6

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица П.1.1 - Значения электрических и технологических параметров УКПН№1 180т. ПАО «ММК» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 5$, $N_{\text{РК}} = 1$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.З.АД}}$, мОм	4,40	4,50	4,00	4,30	-	4,36	4,17	4,36	4,30	-
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	35,61	35,79	37,36	36,25	-	36,68	36,37	35,62	36,22	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,86	0,87	0,90	0,88	-	0,89	0,88	0,86	0,88	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	103,4	106,6	94,0	101,3	-	104,9	95,0	104,1	101,3	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	73,39	76,60	64,04	71,34	-	74,90	64,98	74,13	71,34	-
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	3,68	3,82	3,51	3,67	11,01	3,85	3,45	3,71	3,67	11,01
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	295,1	296,6	309,5	300,4	-	303,9	301,3	295,1	300,1	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	4,31	4,44	4,24	4,33	13,00	4,52	4,10	4,37	4,33	12,99
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	4,36	4,50	4,53	4,46	13,39	4,62	4,54	4,23	4,46	13,38
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	6,13	6,32	6,21	6,22	18,66	6,46	6,12	6,08	6,22	18,66
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\phi_1$	0,70	0,70	0,68	0,70	-	0,70	0,67	0,72	0,70	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	380,7	406,7	330,4	372,6	1117,8	403,7	328,0	386,2	372,6	1117,9
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	131,1	136,6	131,2	133,0	398,9	141,1	125,6	132,1	133,0	398,9

Таблица П.1.2 - Значения электрических и технологических параметров УКПН№1 180т. ПАО «ММК» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 5$, $N_{\text{РК}} = 2$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.З.АД}}$, мОм	4,50	4,60	4,10	4,40	-	4,34	4,21	4,34	4,30	-
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	34,96	35,11	36,63	35,57	-	36,66	36,21	35,79	36,22	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,85	0,85	0,89	0,86	-	0,89	0,88	0,87	0,88	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	105,4	108,4	96,3	103,4	-	104,0	96,3	103,8	101,4	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	75,39	78,44	66,30	73,37	-	73,98	66,33	73,76	71,36	-
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	3,68	3,81	3,53	3,67	11,02	3,81	3,49	3,71	3,67	11,01
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	289,7	290,9	303,5	294,7	-	303,8	300,0	296,5	300,1	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	4,29	4,41	4,23	4,31	12,93	4,48	4,13	4,38	4,33	12,99
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	4,23	4,36	4,39	4,33	12,98	4,61	4,51	4,26	4,46	13,38
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	6,03	6,20	6,09	6,11	18,32	6,43	6,12	6,11	6,22	18,65
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\phi_1$	0,71	0,71	0,69	0,71	-	0,70	0,68	0,72	0,70	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	388,3	412,8	339,7	380,3	1140,8	396,3	336,0	385,3	372,5	1117,6
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	128,8	133,7	129,2	130,6	391,7	139,7	126,3	132,9	133,0	398,9

Таблица П.1.3 - Значения электрических и технологических параметров УКП№1 180т. ПАО «ММК» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 5$, $N_{\text{РК}} = 3$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	4,60	4,70	4,20	4,50	-	4,42	4,36	4,42	4,40	-
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	34,34	34,45	35,92	34,90	-	35,94	35,38	35,28	35,53	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,83	0,83	0,87	0,85	-	0,87	0,86	0,85	0,86	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	107,3	110,2	98,4	105,3	-	105,1	99,8	105,3	103,4	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	77,28	80,18	68,44	75,30	-	75,08	69,80	75,31	73,40	-
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	3,68	3,80	3,54	3,67	11,02	3,78	3,53	3,72	3,67	11,02
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	284,5	285,4	297,6	289,2	-	297,7	293,1	292,3	294,4	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	4,27	4,38	4,21	4,28	12,85	4,42	4,14	4,36	4,31	12,93
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	4,11	4,23	4,25	4,20	12,59	4,45	4,35	4,16	4,32	12,97
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	5,93	6,08	5,98	6,00	17,99	6,27	6,01	6,03	6,10	18,31
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\phi_1$	0,72	0,72	0,70	0,71	-	0,70	0,69	0,72	0,71	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт/В	395,2	418,2	348,1	387,1	1161,4	396,8	352,4	391,2	380,1	1140,4
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт/кА	126,5	130,8	127,0	128,1	384,2	135,7	124,9	131,1	130,6	391,7

Таблица П.1.4 - Значения электрических и технологических параметров УКП№1 180т. ПАО «ММК» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 5$, $N_{\text{РК}} = 4$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	-	-	-	-	-	4,40	4,40	4,40	4,40	-
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	-	-	-	-	-	35,92	35,22	35,45	35,53	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	-	-	-	-	-	0,87	0,85	0,86	0,86	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	-	-	-	-	-	104,2	101,1	104,9	103,4	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	-	-	-	-	-	74,18	71,11	74,93	73,40	-
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	-	-	-	-	-	3,74	3,56	3,72	3,67	11,02
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	-	-	-	-	-	297,6	291,8	293,7	294,4	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	-	-	-	-	-	4,39	4,17	4,37	4,31	12,93
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	-	-	-	-	-	4,44	4,33	4,20	4,32	12,96
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	-	-	-	-	-	6,24	6,01	6,06	6,10	18,31
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\phi_1$	-	-	-	-	-	0,70	0,69	0,72	0,71	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт/В	-	-	-	-	-	389,9	360,1	390,3	380,1	1140,2
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт/кА	-	-	-	-	-	134,4	125,4	131,8	130,6	391,7

Таблица П.1.5 - Значения электрических и технологических параметров УКПН№1 180т. ПАО «ММК» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 5$, $N_{\text{РК}} = 5$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{фЗЛД}}$, МОм	-	-	-	-	-	4,27	4,36	4,27	4,30	-
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	-	-	-	-	-	36,61	35,66	36,38	36,22	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	-	-	-	-	-	0,89	0,86	0,88	0,88	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	-	-	-	-	-	100,8	100,9	102,4	101,4	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	-	-	-	-	-	70,77	70,95	72,41	71,38	-
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	-	-	-	-	-	3,69	3,60	3,73	3,67	11,02
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	-	-	-	-	-	303,3	295,5	301,5	300,1	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	-	-	-	-	-	4,36	4,22	4,42	4,33	12,99
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	-	-	-	-	-	4,57	4,42	4,38	4,46	13,38
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	-	-	-	-	-	6,31	6,12	6,22	6,22	18,65
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi_1$	-	-	-	-	-	0,69	0,69	0,71	0,70	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	-	-	-	-	-	371,8	363,4	381,6	372,3	1116,8
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	-	-	-	-	-	135,1	128,4	135,6	133,0	399,0

Таблица П.1.6 - Значения электрических и технологических параметров УКПН№1 180т. ПАО «ММК» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 5$, $N_{\text{РК}} = 6$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{фЗЛД}}$, МОм	-	-	-	-	-	4,24	4,43	4,24	4,30	-
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	-	-	-	-	-	36,60	35,44	36,64	36,23	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	-	-	-	-	-	0,89	0,86	0,89	0,88	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	-	-	-	-	-	99,4	102,9	101,8	101,4	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	-	-	-	-	-	69,42	72,86	71,81	71,36	-
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	-	-	-	-	-	3,64	3,65	3,73	3,67	11,01
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	-	-	-	-	-	303,2	293,6	303,6	300,2	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	-	-	-	-	-	4,31	4,26	4,43	4,33	12,99
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	-	-	-	-	-	4,56	4,39	4,44	4,46	13,38
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	-	-	-	-	-	6,27	6,11	6,27	6,22	18,65
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi_1$	-	-	-	-	-	0,69	0,70	0,71	0,70	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	-	-	-	-	-	361,7	375,0	379,8	372,2	1116,5
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	-	-	-	-	-	133,1	129,2	136,7	133,0	399,0

Таблица П.1.7 - Значения электрических и технологических параметров УКП№1 180т. ПАО «ММК» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 8$, $N_{\text{РК}} = 1$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	5,20	5,30	4,80	5,10	-	5,02	4,80	5,02	4,95	-
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	35,99	35,96	37,40	36,45	-	37,74	37,60	36,81	37,38	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,87	0,87	0,91	0,88	-	0,91	0,91	0,89	0,91	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	135,8	138,2	126,8	133,6	-	135,1	124,6	133,7	131,1	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	105,76	108,25	96,85	103,62	-	105,06	94,61	103,67	101,11	-
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	4,89	4,97	4,74	4,87	14,60	5,10	4,68	4,92	4,90	14,70
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	345,5	345,2	359,1	349,9	-	362,3	360,9	353,3	358,9	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	5,53	5,60	5,47	5,53	16,60	5,80	5,37	5,62	5,60	16,80
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	4,63	4,73	4,73	4,69	14,08	5,04	4,99	4,65	4,89	14,68
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	7,21	7,33	7,23	7,26	21,77	7,69	7,33	7,30	7,44	22,31
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi_1$	0,77	0,76	0,76	0,76	-	0,76	0,73	0,77	0,75	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	663,3	687,3	601,8	650,8	1952,5	688,5	583,8	657,7	643,3	1930,0
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	175,9	178,8	177,5	177,4	532,1	192,4	176,1	181,1	183,2	549,6

Таблица П.1.8 - Значения электрических и технологических параметров УКП№1 180т. ПАО «ММК» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 8$, $N_{\text{РК}} = 2$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	5,30	5,40	4,90	5,20	-	5,15	5,00	5,15	5,10	-
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	35,40	35,36	36,76	35,84	-	36,76	36,48	36,03	36,43	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,86	0,86	0,89	0,87	-	0,89	0,88	0,87	0,88	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	137,3	139,7	128,6	135,2	-	136,5	128,7	135,6	133,6	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	107,30	109,67	98,57	105,18	-	106,52	98,68	105,64	103,62	-
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	4,86	4,94	4,73	4,84	14,53	5,02	4,69	4,89	4,87	14,60
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	339,9	339,4	352,9	344,1	-	352,9	350,2	345,9	349,7	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	5,48	5,55	5,43	5,49	16,46	5,69	5,34	5,56	5,53	16,59
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	4,50	4,60	4,60	4,57	13,71	4,82	4,76	4,50	4,69	14,08
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	7,10	7,20	7,12	7,14	21,42	7,46	7,15	7,15	7,25	21,76
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi_1$	0,77	0,77	0,76	0,77	-	0,76	0,75	0,78	0,76	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	667,4	689,8	607,7	655,0	1964,9	685,1	604,1	663,0	650,7	1952,2
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	172,1	174,6	173,7	173,5	520,4	184,5	171,3	176,1	177,3	531,9

Таблица П.1.9 - Значения электрических и технологических параметров УКП№1 180т. ПАО «ММК» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 8$, $N_{\text{РК}} = 3$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	5,40	5,50	5,00	5,30	-	5,23	5,15	5,23	5,20	-
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	34,83	34,77	36,13	35,25	-	36,14	35,72	35,58	35,81	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,84	0,84	0,88	0,85	-	0,88	0,87	0,86	0,87	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	138,8	141,0	130,2	136,7	-	137,1	131,7	136,7	135,2	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	108,77	111,04	100,22	106,68	-	107,11	101,73	106,73	105,19	-
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	4,83	4,90	4,71	4,81	14,44	4,95	4,71	4,87	4,84	14,53
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	334,4	333,8	346,9	338,4	-	346,9	342,9	341,6	343,8	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	5,44	5,49	5,38	5,44	16,31	5,60	5,33	5,52	5,48	16,45
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	4,39	4,48	4,48	4,45	13,34	4,68	4,61	4,41	4,57	13,70
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	6,99	7,09	7,00	7,03	21,08	7,30	7,04	7,07	7,14	21,41
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi_1$	0,78	0,78	0,77	0,77	-	0,77	0,76	0,78	0,77	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	670,8	691,7	612,8	658,4	1975,3	679,3	619,8	665,3	654,8	1964,4
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	168,4	170,6	170,0	169,7	509,0	179,0	168,1	173,1	173,4	520,2

Таблица П.1.10 - Значения электрических и технологических параметров УКП№1 180т. ПАО «ММК» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 8$, $N_{\text{РК}} = 4$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	-	-	-	-	-	5,30	5,30	5,30	5,30	-
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	-	-	-	-	-	35,54	34,98	35,15	35,22	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	-	-	-	-	-	0,86	0,85	0,85	0,85	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	-	-	-	-	-	137,6	134,7	137,8	136,7	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	-	-	-	-	-	107,65	104,66	107,75	106,69	-
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	-	-	-	-	-	4,89	4,71	4,84	4,81	14,44
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	-	-	-	-	-	341,1	335,8	337,4	338,1	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	-	-	-	-	-	5,52	5,30	5,48	5,44	16,31
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	-	-	-	-	-	4,55	4,46	4,33	4,44	13,33
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	-	-	-	-	-	7,15	6,93	6,98	7,02	21,06
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi_1$	-	-	-	-	-	0,77	0,77	0,79	0,77	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	-	-	-	-	-	673,3	634,3	667,0	658,2	1974,5
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	-	-	-	-	-	173,8	164,7	170,2	169,6	508,8

Таблица П.1.11 - Значения электрических и технологических параметров УКП№1 180т. ПАО «ММК» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 8$, $N_{\text{РК}} = 5$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	-	-	-	-	-	5,06	5,18	5,06	5,10	-
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	-	-	-	-	-	36,77	35,92	36,58	36,43	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	-	-	-	-	-	0,89	0,87	0,89	0,88	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	-	-	-	-	-	133,2	133,5	134,2	133,6	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	-	-	-	-	-	103,15	103,55	104,18	103,63	-
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	-	-	-	-	-	4,90	4,80	4,91	4,87	14,60
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	-	-	-	-	-	353,0	344,8	351,2	349,7	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	-	-	-	-	-	5,57	5,42	5,60	5,53	16,59
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	-	-	-	-	-	4,79	4,67	4,61	4,69	14,07
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	-	-	-	-	-	7,34	7,16	7,26	7,25	21,76
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi_1$	-	-	-	-	-	0,76	0,76	0,77	0,76	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	-	-	-	-	-	652,0	640,6	658,7	650,4	1951,3
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	-	-	-	-	-	180,1	172,3	179,6	177,3	531,9

Таблица П.1.12 - Значения электрических и технологических параметров УКП№1 180т. ПАО «ММК» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 8$, $N_{\text{РК}} = 6$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	-	-	-	-	-	4,88	5,10	4,88	4,95	-
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	-	-	-	-	-	37,75	36,61	37,79	37,39	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	-	-	-	-	-	0,91	0,89	0,92	0,91	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	-	-	-	-	-	129,2	133,0	131,1	131,1	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	-	-	-	-	-	99,19	103,05	101,15	101,13	-
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	-	-	-	-	-	4,88	4,87	4,96	4,90	14,70
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	-	-	-	-	-	362,4	351,4	362,8	358,9	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	-	-	-	-	-	5,58	5,52	5,70	5,60	16,80
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	-	-	-	-	-	4,99	4,82	4,86	4,89	14,67
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	-	-	-	-	-	7,49	7,33	7,49	7,44	22,31
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi_1$	-	-	-	-	-	0,75	0,75	0,76	0,75	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	-	-	-	-	-	630,1	648,0	650,0	642,7	1928,2
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	-	-	-	-	-	184,1	178,3	187,3	183,3	549,8

Таблица П.1.13 - Значения электрических и технологических параметров УКП№1 180т. ПАО «ММК» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 9$, $N_{\text{РК}} = 1$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	5,40	5,50	5,00	5,30	-	5,08	4,85	5,08	5,00	-
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	36,36	36,30	37,72	36,80	-	39,06	38,92	38,10	38,69	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,88	0,88	0,91	0,89	-	0,95	0,94	0,92	0,94	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	144,9	147,2	135,9	142,7	-	141,9	131,1	140,4	137,8	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	114,87	117,22	105,95	112,68	-	111,88	101,05	110,41	107,78	-
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	5,27	5,34	5,13	5,25	15,74	5,54	5,10	5,35	5,33	15,99
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	363,6	363,0	377,2	368,0	-	390,6	389,2	381,0	386,9	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	5,92	5,98	5,86	5,92	17,77	6,30	5,84	6,10	6,08	18,23
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	4,75	4,84	4,84	4,81	14,43	5,37	5,32	4,96	5,22	15,65
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	7,59	7,70	7,61	7,63	22,89	8,28	7,90	7,86	8,01	24,04
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi_1$	0,78	0,78	0,77	0,78	-	0,76	0,74	0,78	0,76	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	763,2	786,7	697,2	749,0	2247,1	786,3	668,5	751,2	735,3	2206,0
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	191,6	194,0	193,5	193,0	579,0	216,5	198,5	203,8	206,3	618,8

Таблица П.1.14 - Значения электрических и технологических параметров УКП№1 180т. ПАО «ММК» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 9$, $N_{\text{РК}} = 2$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	5,50	5,60	5,10	5,40	-	5,25	5,10	5,25	5,20	-
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	35,79	35,71	37,09	36,19	-	37,72	37,46	36,99	37,39	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,87	0,86	0,90	0,88	-	0,91	0,91	0,90	0,91	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	146,3	148,6	137,6	144,2	-	144,1	136,1	143,2	141,1	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	116,34	118,57	107,58	114,16	-	114,14	106,07	113,17	111,12	-
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	5,24	5,30	5,10	5,21	15,64	5,44	5,10	5,30	5,28	15,83
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	357,9	357,1	370,9	361,9	-	377,2	374,6	369,9	373,9	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	5,87	5,92	5,81	5,87	17,61	6,14	5,78	6,00	5,97	17,92
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	4,63	4,72	4,71	4,69	14,06	5,07	5,01	4,73	4,94	14,81
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	7,48	7,57	7,49	7,51	22,53	7,96	7,65	7,65	7,75	23,26
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi_1$	0,79	0,78	0,78	0,78	-	0,77	0,76	0,79	0,77	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	766,3	788,1	702,1	752,2	2256,5	783,7	693,5	758,2	745,1	2235,3
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	187,4	189,4	189,3	188,7	566,1	205,1	190,9	195,9	197,3	591,9

Таблица П.1.15 - Значения электрических и технологических параметров УКП№1 180т. ПАО «ММК» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 9$, $N_{\text{РК}} = 3$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	5,60	5,70	5,20	5,50	-	5,43	5,35	5,43	5,40	-
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	35,22	35,13	36,48	35,61	-	36,48	36,08	35,94	36,17	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,85	0,85	0,88	0,86	-	0,88	0,87	0,87	0,88	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	147,7	149,9	139,1	145,6	-	146,1	140,7	145,7	144,2	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	117,74	119,86	109,14	115,58	-	116,15	110,70	115,65	114,17	-
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	5,20	5,27	5,08	5,18	15,54	5,33	5,08	5,23	5,21	15,64
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	352,2	351,3	364,8	356,1	-	364,8	360,8	359,4	361,7	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	5,82	5,86	5,76	5,82	17,45	5,99	5,71	5,90	5,87	17,60
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	4,51	4,59	4,59	4,57	13,70	4,80	4,73	4,53	4,68	14,05
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	7,36	7,45	7,37	7,39	22,18	7,67	7,41	7,44	7,51	22,52
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi_1$	0,79	0,79	0,78	0,79	-	0,78	0,77	0,79	0,78	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	768,8	789,0	706,2	754,7	2264,1	779,1	714,3	762,5	752,0	2255,9
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	183,3	185,0	185,2	184,5	553,4	194,5	183,2	188,1	188,6	565,8

Таблица П.1.16 - Значения электрических и технологических параметров УКП№1 180т. ПАО «ММК» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 9$, $N_{\text{РК}} = 4$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	-	-	-	-	-	5,50	5,50	5,50	5,50	-
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	-	-	-	-	-	35,89	35,35	35,51	35,59	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	-	-	-	-	-	0,87	0,86	0,86	0,86	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	-	-	-	-	-	146,6	143,6	146,6	145,6	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	-	-	-	-	-	116,59	113,58	116,59	115,59	-
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	-	-	-	-	-	5,26	5,08	5,21	5,18	15,54
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	-	-	-	-	-	358,9	353,5	355,1	355,9	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	-	-	-	-	-	5,90	5,68	5,86	5,81	17,44
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	-	-	-	-	-	4,66	4,58	4,44	4,56	13,69
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	-	-	-	-	-	7,52	7,30	7,35	7,39	22,17
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi_1$	-	-	-	-	-	0,78	0,78	0,80	0,79	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	-	-	-	-	-	771,3	728,8	763,1	754,4	2263,2
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	-	-	-	-	-	188,9	179,4	184,9	184,4	553,2

Таблица П.1.17 - Значения электрических и технологических параметров УКП№1 180т. ПАО «ММК» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 9$, $N_{\text{РК}} = 5$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	-	-	-	-	-	5,16	5,28	5,16	5,20	-
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	-	-	-	-	-	37,74	36,87	37,55	37,39	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	-	-	-	-	-	0,91	0,89	0,91	0,91	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	-	-	-	-	-	140,7	141,1	141,7	141,1	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	-	-	-	-	-	110,66	111,09	111,65	111,14	-
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	-	-	-	-	-	5,31	5,20	5,32	5,28	15,83
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	-	-	-	-	-	377,4	368,7	375,5	373,9	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	-	-	-	-	-	6,01	5,86	6,05	5,98	17,93
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	-	-	-	-	-	5,04	4,91	4,86	4,94	14,81
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	-	-	-	-	-	7,85	7,65	7,76	7,75	23,25
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi_1$	-	-	-	-	-	0,77	0,77	0,78	0,77	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	-	-	-	-	-	746,8	734,0	753,4	744,8	2234,3
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	-	-	-	-	-	200,4	191,8	199,7	197,3	592,0

Таблица П.1.18 - Значения электрических и технологических параметров УКП№1 180т. ПАО «ММК» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 9$, $N_{\text{РК}} = 6$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	-	-	-	-	-	4,93	5,15	4,93	5,00	-
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	-	-	-	-	-	39,08	37,89	39,12	38,70	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	-	-	-	-	-	0,95	0,92	0,95	0,94	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	-	-	-	-	-	135,8	139,8	137,8	137,8	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	-	-	-	-	-	105,81	109,81	107,78	107,80	-
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	-	-	-	-	-	5,31	5,30	5,39	5,33	15,99
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	-	-	-	-	-	390,8	378,9	391,2	387,0	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	-	-	-	-	-	6,06	5,99	6,18	6,08	18,24
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	-	-	-	-	-	5,32	5,15	5,18	5,22	15,65
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	-	-	-	-	-	8,06	7,90	8,07	8,01	24,03
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi_1$	-	-	-	-	-	0,75	0,76	0,77	0,76	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	-	-	-	-	-	720,7	740,7	742,6	734,7	2204,0
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	-	-	-	-	-	207,4	200,8	210,8	206,3	619,0

Таблица П.1.19 - Значения электрических и технологических параметров УКП№1 180т. ПАО «ММК» для сочетания $N_{TP} = 10$, $N_{PK} = 1$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2ф.ЗД}$, мОм	5,60	5,70	5,20	5,50	-	5,28	5,04	5,28	5,20	-
2. Действующее значения тока электрической дуги I_d , кА	36,72	36,62	38,02	37,12	-	39,32	39,22	38,39	38,98	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,93	0,93	0,96	0,94	-	0,99	0,99	0,97	0,98	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, U_d , В	154,0	156,2	145,0	151,7	-	151,3	140,3	149,7	147,1	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) l_d , мм	123,99	126,20	115,03	121,74	-	121,28	110,29	119,67	117,08	-
6. Активная мощность электрической дуги P_d , МВт	5,65	5,72	5,51	5,63	16,89	5,95	5,50	5,75	5,73	17,20
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	382,9	381,9	396,5	387,1	-	410,0	409,0	400,4	406,5	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	6,33	6,38	6,27	6,32	18,97	6,72	6,25	6,51	6,50	19,49
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	4,89	4,98	4,97	4,95	14,84	5,50	5,46	5,09	5,35	16,05
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	7,99	8,09	8,00	8,03	24,08	8,68	8,30	8,27	8,42	25,25
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\phi_1$	0,79	0,79	0,78	0,79	-	0,77	0,75	0,79	0,77	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг K_{II} , МВт·В	870,7	893,5	799,7	854,6	2563,9	899,8	771,9	860,0	843,9	2531,7
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{IИH}$, МВт·кА	207,6	209,5	209,7	208,9	626,7	233,8	215,8	220,6	223,4	670,2

Таблица П.1.20 - Значения электрических и технологических параметров УКП№1 180т. ПАО «ММК» для сочетания $N_{TP} = 10$, $N_{PK} = 2$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2ф.ЗД}$, мОм	5,70	5,80	5,30	5,60	-	5,45	5,29	5,45	5,40	-
2. Действующее значения тока электрической дуги I_d , кА	36,15	36,04	37,40	36,53	-	38,01	37,78	37,30	37,70	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,91	0,91	0,95	0,92	-	0,96	0,95	0,94	0,95	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, U_d , В	155,4	157,5	146,6	153,2	-	153,4	145,2	152,3	150,3	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) l_d , мм	125,39	127,50	116,59	123,16	-	123,35	115,16	122,26	120,26	-
6. Активная мощность электрической дуги P_d , МВт	5,62	5,68	5,48	5,59	16,78	5,83	5,48	5,68	5,66	16,99
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	377,0	375,8	390,1	381,0	-	396,4	394,0	389,0	393,2	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	6,27	6,31	6,21	6,26	18,79	6,55	6,18	6,41	6,38	19,14
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	4,77	4,85	4,85	4,82	14,46	5,20	5,15	4,87	5,07	15,22
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	7,88	7,96	7,88	7,90	23,71	8,37	8,04	8,04	8,15	24,45
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\phi_1$	0,80	0,79	0,79	0,79	-	0,78	0,77	0,80	0,78	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг K_{II} , МВт·В	872,8	894,0	803,7	856,8	2570,5	894,0	796,1	864,8	851,6	2554,9
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{IИH}$, МВт·кА	203,0	204,6	205,1	204,2	612,7	221,6	207,2	211,9	213,6	640,7

Таблица П.1.21 - Значения электрических и технологических параметров УКП№1 180т. ПАО «ММК» для сочетания $N_{TP} = 10$, $N_{PK} = 3$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2ф.ЗД}$, мОм	5,80	5,90	5,40	5,70	-	5,63	5,54	5,63	5,60	-
2. Действующее значения тока электрической дуги I_d , кА	35,60	35,48	36,80	35,96	-	36,80	36,43	36,28	36,51	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,90	0,90	0,93	0,91	-	0,93	0,92	0,92	0,92	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, U_d , В	156,7	158,7	148,1	154,5	-	155,2	149,7	154,6	153,2	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) l_d , мм	126,73	128,74	118,08	124,52	-	125,20	119,68	124,60	123,16	-
6. Активная мощность электрической дуги P_d , МВт	5,58	5,63	5,45	5,55	16,66	5,71	5,45	5,61	5,59	16,77
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	371,2	370,0	383,8	375,0	-	383,8	379,9	378,4	380,7	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	6,21	6,25	6,16	6,20	18,61	6,39	6,10	6,29	6,26	18,78
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	4,65	4,73	4,72	4,70	14,11	4,93	4,86	4,66	4,82	14,45
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	7,76	7,84	7,76	7,79	23,36	8,07	7,80	7,83	7,90	23,70
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\phi_1$	0,80	0,80	0,79	0,80	-	0,79	0,78	0,80	0,79	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг K_{II} , МВт·В	874,4	894,0	807,1	858,5	2575,4	886,5	816,2	867,2	856,6	2569,8
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{IИH}$, МВт·кА	198,6	199,8	200,6	199,7	599,0	210,2	198,7	203,5	204,1	612,4

Таблица П.1.22 - Значения электрических и технологических параметров УКП№1 180т. ПАО «ММК» для сочетания $N_{TP} = 10$, $N_{PK} = 4$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2ф.ЗД}$, мОм	-	-	-	-	-	5,70	5,70	5,70	5,70	-
2. Действующее значения тока электрической дуги I_d , кА	-	-	-	-	-	36,23	35,71	35,87	35,93	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	-	-	-	-	-	0,92	0,90	0,91	0,91	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, U_d , В	-	-	-	-	-	155,6	152,5	155,5	154,5	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) l_d , мм	-	-	-	-	-	125,56	122,54	125,46	124,52	-
6. Активная мощность электрической дуги P_d , МВт	-	-	-	-	-	5,64	5,45	5,58	5,55	16,66
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	-	-	-	-	-	377,9	372,4	374,0	374,8	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	-	-	-	-	-	6,29	6,07	6,25	6,20	18,61
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	-	-	-	-	-	4,80	4,72	4,58	4,70	14,10
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	-	-	-	-	-	7,91	7,69	7,74	7,78	23,35
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\phi_1$	-	-	-	-	-	0,80	0,79	0,81	0,80	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг K_{II} , МВт·В	-	-	-	-	-	876,9	830,8	866,8	858,1	2574,4
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{IИH}$, МВт·кА	-	-	-	-	-	204,2	194,5	200,0	199,6	598,7

Таблица П.1.23 - Значения электрических и технологических параметров УКП№1 180т. ПАО «ММК» для сочетания $N_{TP} = 10$, $N_{PK} = 5$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2ф.ЗД}$, мОм	-	-	-	-	-	5,36	5,48	5,36	5,40	-
2. Действующее значения тока электрической дуги I_d , кА	-	-	-	-	-	38,05	37,19	37,86	37,70	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	-	-	-	-	-	0,96	0,94	0,96	0,95	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, U_d , В	-	-	-	-	-	149,8	150,3	150,7	150,3	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) l_d , мм	-	-	-	-	-	119,81	120,31	120,69	120,27	-
6. Активная мощность электрической дуги P_d , МВт	-	-	-	-	-	5,70	5,59	5,71	5,67	17,00
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	-	-	-	-	-	396,8	387,9	394,8	393,2	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	-	-	-	-	-	6,42	6,27	6,45	6,38	19,14
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	-	-	-	-	-	5,17	5,05	4,99	5,07	15,21
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	-	-	-	-	-	8,25	8,05	8,16	8,15	24,45
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\phi_1$	-	-	-	-	-	0,78	0,78	0,79	0,78	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг K_{II} , МВт·В	-	-	-	-	-	853,9	840,2	859,7	851,3	2553,8
13. Коэффициент интенсивности нагрева K_{IH} , МВт·кА	-	-	-	-	-	216,9	207,9	216,0	213,6	640,8

Таблица П.1.24 - Значения электрических и технологических параметров УКП№1 180т. ПАО «ММК» для сочетания $N_{TP} = 10$, $N_{PK} = 6$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2ф.ЗД}$, мОм	-	-	-	-	-	5,12	5,36	5,12	5,20	-
2. Действующее значения тока электрической дуги I_d , кА	-	-	-	-	-	39,36	38,18	39,40	38,98	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	-	-	-	-	-	0,99	0,96	1,00	0,99	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, U_d , В	-	-	-	-	-	145,1	149,2	146,9	147,1	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) l_d , мм	-	-	-	-	-	115,09	119,24	116,95	117,09	-
6. Активная мощность электрической дуги P_d , МВт	-	-	-	-	-	5,71	5,70	5,79	5,73	17,20
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	-	-	-	-	-	410,5	398,2	410,8	406,5	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	-	-	-	-	-	6,48	6,41	6,60	6,50	19,49
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	-	-	-	-	-	5,45	5,28	5,31	5,35	16,04
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	-	-	-	-	-	8,47	8,30	8,47	8,42	25,25
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\phi_1$	-	-	-	-	-	0,77	0,77	0,78	0,77	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг K_{II} , МВт·В	-	-	-	-	-	828,6	850,3	850,7	843,2	2529,6
13. Коэффициент интенсивности нагрева K_{IH} , МВт·кА	-	-	-	-	-	224,8	217,5	228,1	223,5	670,4

Таблица П.1.25 - Значения электрических и технологических параметров УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 3$, $N_{\text{РК}} = 1$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	6,85	6,60	6,75	6,73	0,00	6,20	6,20	7,39	6,60	-
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	30,00	32,05	32,10	31,38	0,00	31,13	33,91	31,08	32,04	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,87	0,93	0,93	0,91	0,00	0,90	0,98	0,90	0,93	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	166,7	162,5	178,2	169,2	0,0	153,7	156,9	192,6	167,7	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	136,74	132,47	148,25	139,15	0,00	123,65	126,93	162,59	137,72	-
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	5,00	5,21	5,72	5,31	15,93	4,78	5,32	5,99	5,36	16,09
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	335,2	358,1	358,6	350,6	0,0	347,8	378,8	347,2	357,9	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	5,43	5,74	6,31	5,83	17,48	5,25	5,92	6,53	5,90	17,70
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	3,61	4,39	3,75	3,92	11,75	3,68	4,84	3,65	4,05	12,16
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	6,52	7,23	7,34	7,03	21,08	6,40	7,64	7,48	7,18	21,53
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi_1$	0,83	0,79	0,86	0,83	0,00	0,82	0,77	0,87	0,82	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	834,1	846,0	1019,8	900,0	2699,9	734,9	835,1	1152,8	907,6	2722,8
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	150,1	166,9	183,6	166,9	500,6	148,9	180,4	186,0	171,8	515,4

Таблица П.1.26 - Значения электрических и технологических параметров УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 3$, $N_{\text{РК}} = 2$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	7,05	6,75	6,95	6,92	0,00	6,60	6,60	7,21	6,80	-
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	29,28	31,35	31,32	30,65	0,00	30,18	32,22	30,94	31,11	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,85	0,91	0,91	0,89	0,00	0,87	0,93	0,89	0,90	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	168,7	163,9	180,2	170,9	0,0	160,7	163,0	186,1	169,9	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	138,74	133,88	150,18	140,93	0,00	130,68	132,98	156,12	139,93	-
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	4,94	5,14	5,64	5,24	15,72	4,85	5,25	5,76	5,29	15,86
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	327,1	350,3	349,9	342,4	0,0	337,2	359,9	345,6	347,6	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	5,35	5,65	6,20	5,73	17,20	5,28	5,79	6,30	5,79	17,37
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	3,47	4,23	3,61	3,77	11,32	3,57	4,45	3,58	3,87	11,60
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	6,38	7,06	7,18	6,87	20,61	6,38	7,30	7,25	6,97	20,92
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi_1$	0,84	0,80	0,86	0,83	0,00	0,83	0,79	0,87	0,83	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	833,6	842,1	1016,6	897,4	2692,3	779,1	855,8	1071,7	902,2	2706,7
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	144,6	161,1	176,7	160,8	482,4	146,3	169,2	178,1	164,6	493,7

Таблица П.1.27 - Значения электрических и технологических параметров УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 3$, $N_{\text{РК}} = 3$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	7,15	6,95	7,05	7,05	0,00	6,88	6,88	7,30	7,02	-
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	28,93	30,68	30,78	30,13	0,00	29,35	31,09	30,31	30,25	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,84	0,89	0,89	0,87	0,00	0,85	0,90	0,88	0,87	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	169,6	166,8	180,2	172,2	0,0	164,5	166,5	185,0	172,0	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	139,60	136,80	150,20	142,20	0,00	134,46	136,48	155,04	141,99	-
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	4,91	5,12	5,55	5,19	15,57	4,83	5,18	5,61	5,20	15,61
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	323,1	342,8	343,9	336,6	0,0	327,9	347,3	338,6	337,9	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	5,30	5,61	6,08	5,67	17,00	5,24	5,68	6,13	5,68	17,04
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	3,41	4,09	3,51	3,67	11,02	3,44	4,20	3,45	3,70	11,09
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	6,31	6,94	7,03	6,76	20,27	6,27	7,06	7,03	6,79	20,36
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi_1$	0,84	0,81	0,87	0,84	0,00	0,84	0,80	0,87	0,84	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	832,0	853,7	999,5	895,1	2685,3	793,8	861,7	1037,7	897,7	2693,1
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	141,9	157,0	170,7	156,6	469,7	141,7	160,9	169,9	157,5	472,5

Таблица П.1.28 - Значения электрических и технологических параметров УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 3$, $N_{\text{РК}} = 4$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	7,25	7,05	7,15	7,15	0,00	7,28	7,28	7,28	7,28	-
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	28,58	30,30	30,39	29,76	0,00	28,38	29,66	29,80	29,28	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,83	0,88	0,88	0,86	0,00	0,82	0,86	0,86	0,85	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	170,5	167,9	180,9	173,1	0,0	170,1	171,3	181,3	174,3	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	140,50	137,85	150,93	143,09	0,00	140,12	141,33	151,34	144,27	-
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	4,87	5,09	5,50	5,15	15,46	4,83	5,08	5,40	5,10	15,31
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	319,3	338,5	339,5	332,4	0,0	317,0	331,3	332,9	327,1	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	5,26	5,56	6,02	5,62	16,85	5,21	5,54	5,91	5,55	16,66
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	3,35	4,01	3,44	3,60	10,80	3,31	3,89	3,33	3,51	10,53
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	6,24	6,86	6,94	6,68	20,03	6,17	6,77	6,78	6,57	19,72
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi_1$	0,84	0,81	0,87	0,84	0,00	0,84	0,82	0,87	0,84	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	830,9	853,6	994,7	893,1	2679,2	821,2	870,5	980,0	890,6	2671,7
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	139,3	154,1	167,1	153,5	460,4	137,0	150,7	161,0	149,6	448,7

Таблица П.1.29 - Значения электрических и технологических параметров УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 3$, $N_{\text{РК}} = 5$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	7,35	7,15	7,25	7,25	0,00	6,82	7,10	6,69	6,87	-
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	28,25	29,92	30,00	29,39	0,00	30,15	30,73	31,62	30,83	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,82	0,86	0,87	0,85	0,00	0,87	0,89	0,91	0,89	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	171,4	168,9	181,6	174,0	0,0	166,3	171,8	173,8	170,6	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	141,38	138,87	151,63	143,96	0,00	136,27	141,82	143,77	140,62	-
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	4,84	5,05	5,45	5,11	15,34	5,01	5,28	5,49	5,26	15,79
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	315,6	334,2	335,2	328,3	0,0	336,8	343,4	353,2	344,5	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	5,22	5,52	5,96	5,57	16,70	5,45	5,77	6,06	5,76	17,28
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	3,29	3,93	3,38	3,53	10,60	3,66	4,14	3,62	3,81	11,42
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	6,17	6,77	6,85	6,60	19,79	6,56	7,10	7,06	6,91	20,72
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\phi_1$	0,85	0,81	0,87	0,84	0,00	0,83	0,81	0,86	0,83	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	829,7	853,1	989,8	890,9	2672,6	833,5	907,4	954,7	898,5	2695,5
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	136,8	151,1	163,5	150,5	451,4	151,1	162,3	173,7	162,4	487,1

Таблица П.1.30 - Значения электрических и технологических параметров УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 3$, $N_{\text{РК}} = 6$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	7,45	7,25	7,35	7,35	0,00	6,45	6,97	6,06	6,49	-
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	27,92	29,55	29,63	29,03	0,00	31,99	31,64	33,68	32,44	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,81	0,85	0,86	0,84	0,00	0,92	0,91	0,97	0,94	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	172,2	169,9	182,3	174,8	0,0	163,8	172,7	163,7	166,8	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	142,23	139,85	152,32	144,80	0,00	133,85	142,68	133,73	136,75	-
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	4,81	5,02	5,40	5,08	15,23	5,24	5,46	5,51	5,41	16,22
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	311,9	330,1	331,0	324,3	0,0	357,4	353,5	376,3	362,4	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	5,18	5,47	5,90	5,52	16,55	5,73	5,98	6,16	5,96	17,87
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	3,23	3,85	3,31	3,47	10,40	4,06	4,36	3,95	4,12	12,37
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	6,11	6,69	6,77	6,52	19,56	7,02	7,40	7,32	7,25	21,74
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\phi_1$	0,85	0,82	0,87	0,85	0,00	0,82	0,81	0,84	0,82	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	828,2	852,4	984,8	888,5	2665,4	858,8	943,5	902,9	901,8	2705,3
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	134,3	148,3	160,0	147,5	442,6	167,7	172,9	185,8	175,4	526,3

Таблица П.1.31 - Значения электрических и технологических параметров УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 4$, $N_{\text{РК}} = 1$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	6,70	6,45	6,60	6,58	-	6,06	6,06	7,23	6,45	0,00
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	29,48	31,53	31,59	30,87	-	30,56	33,36	30,59	31,50	0,00
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,85	0,91	0,91	0,89	-	0,88	0,96	0,88	0,91	0,00
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	159,3	154,8	170,7	161,6	-	146,4	149,4	184,7	160,2	0,0
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	129,29	124,82	140,69	131,60	-	116,39	119,43	154,67	130,16	0,00
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	4,70	4,88	5,39	4,99	14,97	4,47	4,99	5,65	5,04	15,11
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	318,3	340,5	341,2	333,4	-	330,1	360,3	330,4	340,2	0,0
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	5,11	5,40	5,96	5,49	16,47	4,92	5,56	6,18	5,56	16,67
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	3,49	4,26	3,64	3,80	11,40	3,56	4,70	3,54	3,93	11,79
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	6,19	6,88	6,99	6,68	20,05	6,07	7,28	7,12	6,83	20,48
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi_1$	0,83	0,79	0,85	0,82	-	0,81	0,76	0,87	0,81	0,00
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	747,9	755,8	920,4	808,0	2424,1	654,9	744,9	1043,1	814,3	2443,0
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	138,4	153,9	170,4	154,2	462,7	136,7	166,3	172,8	158,6	475,8

Таблица П.1.32 - Значения электрических и технологических параметров УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 4$, $N_{\text{РК}} = 2$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	6,90	6,60	6,80	6,77	-	6,45	6,45	7,05	6,65	0,00
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	28,75	30,83	30,81	30,13	-	29,66	31,71	30,46	30,61	0,00
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,83	0,89	0,89	0,87	-	0,86	0,92	0,88	0,88	0,00
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	161,3	156,3	172,7	163,4	-	153,3	155,4	178,4	162,4	0,0
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	131,32	126,29	142,65	133,42	-	123,31	125,39	148,37	132,36	0,00
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	4,64	4,82	5,32	4,93	14,78	4,55	4,93	5,43	4,97	14,91
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	310,6	333,0	332,8	325,5	-	320,3	342,5	329,0	330,6	0,0
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	5,03	5,31	5,86	5,40	16,21	4,97	5,45	5,96	5,46	16,38
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	3,36	4,10	3,51	3,66	10,97	3,46	4,32	3,47	3,75	11,25
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	6,05	6,71	6,83	6,53	19,60	6,05	6,96	6,90	6,64	19,91
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi_1$	0,83	0,79	0,86	0,83	-	0,82	0,78	0,86	0,82	0,00
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	748,3	753,2	918,5	806,7	2420,0	697,0	765,7	969,0	810,6	2431,7
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	133,4	148,6	163,9	148,6	445,9	134,8	156,2	165,5	152,2	456,5

Таблица П.1.33 - Значения электрических и технологических параметров УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 4$, $N_{\text{РК}} = 3$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	6,95	6,75	6,85	6,85	-	6,74	6,74	7,16	6,88	0,00
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	28,58	30,36	30,48	29,81	-	28,79	30,54	29,76	29,70	0,00
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,83	0,88	0,88	0,86	-	0,83	0,88	0,86	0,86	0,00
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	161,7	158,7	172,3	164,3	-	157,2	159,0	177,6	164,6	0,0
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	131,74	128,69	142,32	134,25	-	127,20	129,04	147,56	134,60	0,00
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	4,62	4,82	5,25	4,90	14,69	4,53	4,86	5,28	4,89	14,67
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	308,7	327,9	329,2	321,9	-	310,9	329,8	321,4	320,7	0,0
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	5,01	5,30	5,78	5,36	16,09	4,92	5,34	5,79	5,35	16,05
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	3,33	4,01	3,44	3,59	10,78	3,32	4,06	3,34	3,57	10,72
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	6,02	6,64	6,73	6,46	19,39	5,94	6,71	6,68	6,44	19,33
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi_1$	0,83	0,80	0,86	0,83	-	0,83	0,80	0,87	0,83	0,00
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	747,7	764,6	905,0	805,8	2417,4	711,4	772,4	938,3	807,4	2422,1
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	132,1	146,3	160,1	146,2	438,5	130,3	148,3	157,3	145,3	435,9

Таблица П.1.34 - Значения электрических и технологических параметров УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 4$, $N_{\text{РК}} = 4$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	7,05	6,85	6,95	6,95	-	7,08	7,08	7,08	7,08	0,00
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	28,24	29,97	30,08	29,43	-	28,03	29,33	29,48	28,95	0,00
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,82	0,87	0,87	0,85	-	0,81	0,85	0,85	0,84	0,00
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	162,7	159,8	173,1	165,2	-	162,3	163,3	173,5	166,4	0,0
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	132,68	129,79	143,08	135,18	-	132,35	133,33	143,52	136,40	0,00
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	4,59	4,79	5,21	4,86	14,59	4,55	4,79	5,12	4,82	14,46
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	305,0	323,7	324,9	317,8	-	302,8	316,7	318,4	312,6	0,0
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	4,97	5,26	5,72	5,32	15,95	4,93	5,24	5,61	5,26	15,77
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	3,27	3,93	3,37	3,52	10,57	3,23	3,80	3,26	3,43	10,29
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	5,95	6,56	6,64	6,38	19,15	5,89	6,47	6,49	6,28	18,85
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi_1$	0,84	0,80	0,86	0,83	-	0,84	0,81	0,86	0,84	0,00
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	747,3	765,2	901,0	804,5	2413,5	738,8	782,3	887,6	802,9	2408,8
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	129,7	143,5	156,6	143,3	429,8	127,6	140,5	150,8	139,6	418,8

Таблица П.1.35 - Значения электрических и технологических параметров УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 4$, $N_{\text{РК}} = 5$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	7,15	6,95	7,05	7,05	-	6,68	6,95	6,55	6,73	0,00
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	27,90	29,59	29,69	29,06	-	29,60	30,20	31,07	30,29	0,00
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,81	0,86	0,86	0,84	-	0,86	0,87	0,90	0,88	0,00
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	163,6	160,8	173,8	166,1	-	159,0	164,1	166,4	163,2	0,0
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	133,59	130,84	143,81	136,08	-	129,00	134,11	136,40	133,17	0,00
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	4,56	4,76	5,16	4,83	14,48	4,71	4,96	5,17	4,94	14,83
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	301,3	319,6	320,7	313,9	-	319,7	326,2	335,6	327,1	0,0
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	4,94	5,21	5,66	5,27	15,81	5,12	5,43	5,72	5,43	16,28
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	3,21	3,85	3,31	3,45	10,36	3,54	4,01	3,51	3,68	11,05
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	5,89	6,48	6,56	6,31	18,92	6,23	6,75	6,71	6,56	19,69
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi_1$	0,84	0,80	0,86	0,84	-	0,82	0,80	0,85	0,83	0,00
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	746,6	765,5	896,9	803,0	2409,0	748,2	813,4	860,3	807,3	2422,0
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	127,3	140,8	153,2	140,5	421,4	139,3	149,7	160,7	149,9	449,6

Таблица П.1.36 - Значения электрических и технологических параметров УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 4$, $N_{\text{РК}} = 6$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	7,25	7,05	7,15	7,15	-	6,34	6,85	5,96	6,38	0,00
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	27,57	29,22	29,31	28,70	-	31,30	30,97	32,96	31,74	0,00
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,80	0,84	0,85	0,83	-	0,90	0,90	0,95	0,92	0,00
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	164,5	161,9	174,5	166,9	-	156,8	165,1	156,8	159,6	0,0
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	134,46	131,87	144,52	136,95	-	126,77	135,14	126,84	129,58	0,00
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	4,53	4,73	5,12	4,79	14,38	4,91	5,12	5,17	5,06	15,19
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	297,8	315,5	316,6	310,0	-	338,0	334,5	356,0	342,8	0,0
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	4,90	5,17	5,60	5,23	15,68	5,38	5,61	5,79	5,59	16,78
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	3,15	3,77	3,24	3,39	10,16	3,90	4,19	3,81	3,97	11,91
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	5,82	6,40	6,47	6,23	18,70	6,64	7,01	6,93	6,86	20,58
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi_1$	0,84	0,81	0,87	0,84	-	0,81	0,80	0,84	0,82	0,00
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	745,7	765,5	892,7	801,3	2403,9	769,2	844,7	810,8	808,2	2424,7
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	125,0	138,2	149,9	137,7	413,1	153,6	158,4	170,4	160,8	482,4

Таблица П.1.37 - Значения электрических и технологических параметров УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 5$, $N_{\text{РК}} = 1$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	6,55	6,30	6,45	6,43	0,00	5,93	5,93	7,06	6,31	-
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	28,94	31,00	31,08	30,34	0,00	29,96	32,76	30,09	30,94	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,84	0,90	0,90	0,88	0,00	0,87	0,95	0,87	0,89	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	151,9	147,3	163,2	154,1	0,0	139,4	142,2	176,6	152,7	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	121,93	117,26	133,21	124,13	0,00	109,44	112,18	146,59	122,74	-
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	4,40	4,57	5,07	4,68	14,03	4,18	4,66	5,31	4,72	14,15
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	301,8	323,3	324,1	316,4	0,0	312,5	341,7	313,8	322,7	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	4,80	5,07	5,62	5,16	15,49	4,61	5,22	5,83	5,22	15,66
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	3,37	4,13	3,53	3,68	11,03	3,43	4,54	3,43	3,80	11,40
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	5,87	6,53	6,64	6,35	19,04	5,74	6,92	6,76	6,48	19,43
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi_1$	0,82	0,78	0,85	0,81	0,00	0,80	0,75	0,86	0,81	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	668,0	672,3	827,8	722,7	2168,1	582,5	662,3	938,5	727,8	2183,3
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	127,2	141,5	157,6	142,1	426,4	125,2	152,6	159,9	145,9	437,7

Таблица П.1.38 - Значения электрических и технологических параметров УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 5$, $N_{\text{РК}} = 2$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	6,65	6,45	6,55	6,55	0,00	6,31	6,31	6,89	6,50	-
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	28,58	30,44	30,58	29,87	0,00	29,10	31,15	29,95	30,07	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,83	0,88	0,88	0,86	0,00	0,84	0,90	0,87	0,87	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	152,9	149,5	163,7	155,4	0,0	146,2	148,0	170,6	154,9	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	122,95	119,45	133,69	125,36	0,00	116,19	118,02	140,61	124,94	-
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	4,37	4,55	5,01	4,64	13,93	4,25	4,61	5,11	4,66	13,97
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	298,0	317,4	318,9	311,5	0,0	303,4	324,9	312,3	313,5	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	4,76	5,03	5,54	5,11	15,34	4,66	5,12	5,62	5,13	15,40
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	3,31	4,01	3,44	3,59	10,76	3,34	4,18	3,36	3,63	10,88
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	5,80	6,43	6,52	6,25	18,75	5,73	6,61	6,55	6,30	18,89
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi_1$	0,82	0,78	0,85	0,82	0,00	0,81	0,77	0,86	0,82	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	668,6	679,9	819,3	722,6	2167,8	621,8	682,5	871,8	725,4	2176,2
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	124,9	138,5	153,1	138,8	416,5	123,8	143,6	153,0	140,1	420,4

Таблица П.1.39 - Значения электрических и технологических параметров УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 5$, $N_{\text{РК}} = 3$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	6,75	6,55	6,65	6,65	0,00	6,58	6,58	6,98	6,71	-
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	28,23	30,03	30,16	29,47	0,00	28,31	30,06	29,33	29,23	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,82	0,87	0,87	0,85	0,00	0,82	0,87	0,85	0,84	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	153,9	150,6	164,5	156,4	0,0	149,9	151,5	169,7	157,0	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	123,95	120,63	134,50	126,36	0,00	119,90	121,50	139,72	127,04	-
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	4,35	4,52	4,96	4,61	13,83	4,24	4,55	4,98	4,59	13,78
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	294,4	313,2	314,6	307,4	0,0	295,2	313,5	305,9	304,9	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	4,73	4,99	5,48	5,07	15,20	4,63	5,03	5,47	5,04	15,12
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	3,25	3,92	3,37	3,51	10,53	3,21	3,94	3,24	3,47	10,40
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	5,73	6,35	6,43	6,17	18,52	5,63	6,39	6,36	6,13	18,38
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi_1$	0,82	0,79	0,85	0,82	0,00	0,82	0,79	0,86	0,82	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	669,0	681,5	816,3	722,2	2166,7	636,2	689,9	844,9	723,7	2171,0
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	122,6	135,9	149,7	136,1	408,2	120,1	136,9	146,0	134,4	403,1

Таблица П.1.40 - Значения электрических и технологических параметров УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 5$, $N_{\text{РК}} = 4$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	6,85	6,65	6,75	6,75	0,00	6,88	6,88	6,88	6,88	-
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	27,88	29,64	29,76	29,09	0,00	27,68	28,99	29,15	28,61	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,81	0,86	0,86	0,84	0,00	0,80	0,84	0,84	0,83	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	154,9	151,8	165,3	157,3	0,0	154,6	155,4	165,7	158,6	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	124,92	121,77	135,29	127,33	0,00	124,63	125,38	135,75	128,59	-
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	4,32	4,50	4,92	4,58	13,74	4,28	4,50	4,83	4,54	13,62
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	290,7	309,1	310,4	303,4	0,0	288,6	302,3	304,0	298,3	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	4,69	4,96	5,42	5,02	15,07	4,65	4,94	5,32	4,97	14,91
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	3,18	3,84	3,30	3,44	10,32	3,14	3,71	3,19	3,35	10,04
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	5,67	6,27	6,35	6,09	18,28	5,61	6,18	6,20	6,00	17,99
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi_1$	0,83	0,79	0,85	0,82	0,00	0,83	0,80	0,86	0,83	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	669,1	682,7	813,0	721,6	2164,8	661,8	699,9	800,9	720,9	2162,6
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	120,4	133,3	146,4	133,4	400,1	118,4	130,6	140,9	130,0	389,9

Таблица П.1.41 - Значения электрических и технологических параметров УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 5$, $N_{\text{РК}} = 5$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	6,95	6,75	6,85	6,85	0,00	6,51	6,77	6,38	6,55	-
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	27,54	29,25	29,37	28,72	0,00	29,15	29,78	30,64	29,86	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,80	0,85	0,85	0,83	0,00	0,84	0,86	0,89	0,86	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	155,9	152,9	166,0	158,3	0,0	151,5	156,2	158,8	155,5	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	125,86	122,87	136,05	128,26	0,00	121,50	126,18	128,84	125,51	-
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	4,29	4,47	4,88	4,55	13,64	4,42	4,65	4,87	4,64	13,93
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	287,2	305,1	306,3	299,5	0,0	304,0	310,5	319,6	311,3	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	4,66	4,92	5,37	4,98	14,94	4,82	5,11	5,40	5,11	15,34
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	3,12	3,76	3,23	3,37	10,11	3,43	3,90	3,41	3,58	10,74
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	5,61	6,19	6,26	6,02	18,06	5,92	6,43	6,39	6,25	18,74
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi_1$	0,83	0,79	0,86	0,83	0,00	0,81	0,80	0,85	0,82	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	669,0	683,6	809,7	720,8	2162,3	669,0	726,3	773,1	722,8	2168,4
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	118,2	130,8	143,2	130,7	392,2	128,7	138,5	149,1	138,8	416,3

Таблица П.1.42 - Значения электрических и технологических параметров УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» для сочетания $N_{\text{ТР}} = 5$, $N_{\text{РК}} = 6$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\text{ф.ЗЛД}}$, мОм	7,05	6,85	6,95	6,95	0,00	6,20	6,70	5,82	6,24	-
2. Действующее значения тока электрической дуги $I_{\text{д}}$, кА	27,21	28,88	28,98	28,36	0,00	30,74	30,42	32,39	31,19	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,79	0,83	0,84	0,82	0,00	0,89	0,88	0,94	0,90	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, $U_{\text{д}}$, В	156,8	153,9	166,8	159,2	0,0	149,5	157,4	149,5	152,1	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) $l_{\text{д}}$, мм	126,76	123,94	136,78	129,16	0,00	119,52	127,40	119,52	122,15	-
6. Активная мощность электрической дуги $P_{\text{д}}$, МВт	4,27	4,44	4,83	4,51	13,54	4,60	4,79	4,84	4,74	14,23
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	283,8	301,1	302,3	295,7	0,0	320,6	317,3	337,8	325,2	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	4,62	4,88	5,31	4,94	14,81	5,05	5,27	5,44	5,25	15,76
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	3,06	3,68	3,16	3,30	9,90	3,77	4,05	3,69	3,84	11,51
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	5,54	6,11	6,18	5,95	17,84	6,30	6,65	6,57	6,51	19,53
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\varphi_1$	0,83	0,80	0,86	0,83	0,00	0,80	0,79	0,83	0,81	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг $K_{\text{И}}$, МВт·В	668,7	684,2	806,2	719,7	2159,2	687,2	753,8	724,2	721,7	2165,1
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{\text{ИИ}}$, МВт·кА	116,1	128,3	140,1	128,2	384,5	141,3	145,7	156,9	148,0	443,9

Таблица П.1.43 - Значения электрических и технологических параметров УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» для сочетания $N_{TP} = 12$, $N_{PK} = 1$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2ф.ЗД}$, мОм	5,70	5,50	5,60	5,60	-	5,16	5,16	6,15	5,49	-
2. Действующее значения тока электрической дуги I_d , кА	24,15	25,97	26,18	25,43	-	24,82	27,53	25,38	25,91	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,70	0,75	0,76	0,74	-	0,72	0,80	0,73	0,75	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, U_d , В	105,4	100,9	115,0	107,1	-	95,3	96,2	125,7	105,8	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) l_d , мм	75,37	70,91	84,97	77,08	-	65,30	66,24	95,74	75,76	-
6. Активная мощность электрической дуги P_d , МВт	2,54	2,62	3,01	2,73	8,18	2,37	2,65	3,19	2,74	8,21
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	189,0	203,3	205,0	199,1	-	194,3	215,5	198,7	202,8	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	2,83	2,98	3,41	3,07	9,21	2,66	3,05	3,56	3,09	9,28
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	2,33	2,88	2,48	2,56	7,69	2,35	3,19	2,40	2,65	7,94
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	3,66	4,14	4,21	4,01	12,02	3,55	4,42	4,30	4,09	12,26
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\phi_1$	0,77	0,72	0,81	0,77	-	0,75	0,69	0,83	0,76	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг K_{II} , МВт·В	268,1	264,5	346,0	292,9	878,6	225,4	255,0	401,3	293,9	881,7
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{IИH}$, МВт·кА	61,4	68,1	78,8	69,4	208,3	58,7	72,9	81,0	70,9	212,6

Таблица П.1.44 - Значения электрических и технологических параметров УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» для сочетания $N_{TP} = 12$, $N_{PK} = 2$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2ф.ЗД}$, мОм	5,80	5,60	5,70	5,70	-	5,50	5,50	6,01	5,67	-
2. Действующее значения тока электрической дуги I_d , кА	23,82	25,59	25,78	25,06	-	24,18	26,15	25,21	25,18	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,69	0,74	0,75	0,72	-	0,70	0,76	0,73	0,73	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, U_d , В	106,4	102,2	115,8	108,2	-	101,0	101,4	121,3	107,9	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) l_d , мм	76,44	72,21	85,84	78,17	-	71,00	71,41	91,27	77,89	-
6. Активная мощность электрической дуги P_d , МВт	2,54	2,62	2,99	2,71	8,14	2,44	2,65	3,06	2,72	8,15
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	186,4	200,3	201,8	196,2	-	189,3	204,7	197,3	197,1	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	2,81	2,96	3,37	3,05	9,14	2,73	3,01	3,42	3,05	9,16
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	2,28	2,81	2,42	2,50	7,51	2,29	2,93	2,35	2,52	7,57
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	3,62	4,08	4,15	3,95	11,85	3,56	4,20	4,15	3,97	11,92
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\phi_1$	0,78	0,73	0,81	0,77	-	0,77	0,72	0,82	0,77	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг K_{II} , МВт·В	269,8	267,3	346,0	294,4	883,1	246,6	268,9	370,7	295,4	886,3
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{IИH}$, МВт·кА	60,4	66,9	77,0	68,1	204,3	59,0	69,3	77,1	68,5	205,5

Таблица П.1.45 - Значения электрических и технологических параметров УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» для сочетания $N_{TP} = 12$, $N_{PK} = 3$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2ф.ЗД}$, мОм	5,90	5,70	5,80	5,80	-	5,76	5,76	6,12	5,88	-
2. Действующее значения тока электрической дуги I_d , кА	23,50	25,21	25,39	24,70	-	23,49	25,16	24,60	24,42	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,68	0,73	0,73	0,71	-	0,68	0,73	0,71	0,71	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, U_d , В	107,5	103,5	116,7	109,2	-	104,4	104,8	121,0	110,1	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) l_d , мм	77,47	73,46	86,68	79,21	-	74,40	74,77	91,04	80,07	-
6. Активная мощность электрической дуги P_d , МВт	2,53	2,61	2,96	2,70	8,10	2,45	2,64	2,98	2,69	8,07
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	183,9	197,3	198,8	193,4	-	183,9	197,0	192,5	191,2	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	2,79	2,94	3,33	3,02	9,07	2,72	2,97	3,33	3,01	9,02
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	2,23	2,74	2,36	2,45	7,34	2,20	2,75	2,25	2,40	7,20
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	3,57	4,02	4,09	3,89	11,68	3,50	4,05	4,02	3,85	11,56
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\phi_1$	0,78	0,73	0,82	0,78	-	0,78	0,73	0,83	0,78	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг K_{II} , МВт·В	271,4	269,9	345,7	295,7	887,0	256,1	276,2	360,4	297,5	892,6
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{IИH}$, МВт·кА	59,3	65,8	75,2	66,8	200,3	57,6	66,3	73,2	65,7	197,2

Таблица П.1.46 - Значения электрических и технологических параметров УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» для сочетания $N_{TP} = 12$, $N_{PK} = 4$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2ф.ЗД}$, мОм	6,00	5,80	5,90	5,90	-	6,00	6,00	6,00	6,00	-
2. Действующее значения тока электрической дуги I_d , кА	23,18	24,84	25,02	24,35	-	23,11	24,35	24,54	24,00	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,67	0,72	0,72	0,70	-	0,67	0,70	0,71	0,69	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, U_d , В	108,5	104,7	117,5	110,2	-	108,1	107,8	117,8	111,2	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) l_d , мм	78,46	74,66	87,49	80,21	-	78,12	77,81	87,77	81,23	-
6. Активная мощность электрической дуги P_d , МВт	2,51	2,60	2,94	2,68	8,05	2,50	2,63	2,89	2,67	8,01
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	181,5	194,5	195,8	190,6	-	180,9	190,7	192,1	187,9	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	2,78	2,93	3,30	3,00	9,00	2,76	2,94	3,24	2,98	8,93
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	2,18	2,68	2,30	2,39	7,17	2,17	2,60	2,23	2,33	7,00
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	3,53	3,97	4,03	3,84	11,52	3,51	3,92	3,93	3,79	11,36
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\phi_1$	0,79	0,74	0,82	0,78	-	0,79	0,75	0,82	0,79	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг K_{II} , МВт·В	272,7	272,1	345,4	296,7	890,2	270,1	283,1	340,4	297,9	893,6
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{IИH}$, МВт·кА	58,3	64,6	73,5	65,5	196,4	57,7	63,9	70,9	64,2	192,6

Таблица П.1.47 - Значения электрических и технологических параметров УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» для сочетания $N_{TP} = 12$, $N_{PK} = 5$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2ф.ЗД}$, мОм	6,10	5,90	6,00	6,00	-	5,66	5,89	5,55	5,70	-
2. Действующее значения тока электрической дуги I_d , кА	22,88	24,49	24,65	24,01	-	24,37	25,03	25,78	25,06	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,66	0,71	0,71	0,69	-	0,70	0,72	0,75	0,72	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, U_d , В	109,4	105,8	118,3	111,2	-	105,1	107,8	111,9	108,3	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) l_d , мм	79,42	75,81	88,28	81,17	-	75,15	77,85	81,88	78,29	-
6. Активная мощность электрической дуги P_d , МВт	2,50	2,59	2,92	2,67	8,01	2,56	2,70	2,88	2,72	8,15
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	179,1	191,7	193,0	187,9	-	190,8	196,0	201,8	196,2	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	2,76	2,91	3,27	2,98	8,93	2,85	3,03	3,27	3,05	9,15
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	2,14	2,61	2,25	2,33	7,00	2,38	2,73	2,40	2,50	7,51
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	3,49	3,91	3,97	3,79	11,37	3,71	4,08	4,05	3,95	11,84
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\phi_1$	0,79	0,74	0,82	0,79	-	0,77	0,74	0,81	0,77	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг K_{II} , МВт·В	273,9	274,2	344,9	297,6	892,9	269,5	291,2	322,6	294,4	883,3
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{IИH}$, МВт·кА	57,3	63,5	71,9	64,2	192,6	62,5	67,6	74,3	68,1	204,4

Таблица П.1.48 - Значения электрических и технологических параметров УКП№2 120т. ПАО «Северсталь» для сочетания $N_{TP} = 12$, $N_{PK} = 6$ при использовании исходных и новых параметров системы управления ArCOS Light NT

Наименование параметра	Значения при исходных параметрах ArCOS Light NT					Значения при новых параметрах ArCOS Light NT				
	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение	Номер фазы			Сред. значение	Сум. значение
	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3			Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3		
1. Заданное значение импеданса вторичного электрического контура $Z_{2ф.ЗД}$, мОм	6,20	6,00	6,10	6,10	-	5,42	5,85	5,09	5,45	-
2. Действующее значения тока электрической дуги I_d , кА	22,58	24,14	24,30	23,67	-	25,58	25,44	27,05	26,02	-
3. Коэффициент загрузки ПТ по току, о.е.	0,65	0,70	0,70	0,68	-	0,74	0,74	0,78	0,75	-
4. Действующее значение напряжения электрической дуги, U_d , В	110,3	106,9	119,0	112,1	-	103,6	108,5	104,5	105,5	-
5. Длина электрической дуги (при градиенте напряжения $\beta = 1$ В/мм и падении напряжения в области «катод-анод» $\alpha = 30$ В) l_d , мм	80,34	76,92	89,03	82,10	-	73,55	78,54	74,55	75,55	-
6. Активная мощность электрической дуги P_d , МВт	2,49	2,58	2,89	2,65	7,96	2,65	2,76	2,83	2,75	8,24
7. Действующее значение тока на первичной стороне печного трансформатора I_1 , А	176,8	189,0	190,2	185,3	-	200,2	199,2	211,7	203,7	-
8. Активная мощность на первичной стороне печного трансформатора P_1 , МВт	2,74	2,89	3,23	2,95	8,86	2,97	3,10	3,25	3,11	9,32
9. Реактивная мощность на первичной стороне печного трансформатора Q_1 , МВАр	2,09	2,55	2,20	2,28	6,85	2,60	2,82	2,57	2,66	7,98
10. Полная мощность на первичной стороне печного трансформатора S_1 , МВА	3,45	3,86	3,91	3,74	11,21	3,94	4,19	4,14	4,09	12,27
11. Коэффициент мощности на первичной стороне печного трансформатора $\cos\phi_1$	0,79	0,75	0,83	0,79	-	0,75	0,74	0,78	0,76	-
12. Коэффициент теплового излучения электрических дуг K_{II} , МВт·В	274,9	276,0	344,2	298,4	895,1	274,3	299,8	295,7	289,9	869,7
13. Коэффициент интенсивности нагрева $K_{IИH}$, МВт·кА	56,3	62,3	70,3	62,9	188,8	67,7	70,3	76,5	71,5	214,5

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ММК СМК НТЦ (45)-9-2

УТВЕРЖДАЮ

И. о. главного специалиста
группы по развитию НТЦ ПАО

Мычак М.Н.

(подпись, дата)

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

**Результатов научно-исследовательской и опытно-конструкторской
работы по договору № 247879 от 21 июля 2021 г.
с ООО «Рнд МГТУ»**

**по теме: «Разработка и внедрение усовершенствованных
электрических режимов АПК-1,2,3 ЭСПЦ ПАО «ММК» с целью снижения
удельного расхода электроэнергии и экономии графитированных
электродов»**

Краткое описание выполненной работы

В ходе работы выполнены следующие мероприятия:

1. Выполнено изучение существующего электрического и технологического оборудования в составе АПК-1,2,3, структуры АСУ ТП агрегатов и параметров САУЭР и ПЭ ArcOS NT Light и РАДУГА НПА ПК.
2. Проведен анализ существующих электрических и технологических режимов работы агрегатов.
3. Выполнены опыты по определению параметров электрических контуров АПК-1,2,3 (опыты двухфазных и трехфазного коротких замыканий).
4. Проведены экспериментальные исследования регулировочных характеристик гидроприводов перемещения электродов.
5. Выполнены исследования поведения поверхности жидкого металла и шлака при различных режимах аргонной продувки.
6. Проведена запись мгновенных значений напряжений и токов АПК-1,2,3 с целью анализа электрических режимов и дальнейшего исследования гармонического состава токов при донной продувке.
7. Выполнено экспериментальное определение скоростей нагрева металла на каждом из агрегатов при использовании существующих электрических режимов и основных рабочих ступеней РПН печных трансформаторов.
8. Разработаны алгоритмы автоматического переключения рабочих кривых и ступеней РПН печных трансформаторов для реализации эффективного управления электрическими режимами АПК-1,2,3, направленного на достижение технических эффектов по снижению удельного расхода электроэнергии и графитированных электродов.
9. Разработана рекомендация по изменению параметров существующих регуляторов ArcOS NT Light и РАДУГА НПА ПК (коррекция таблиц уставок импедансов, коэффициентов нелинейных регуляторов, других параметров

вспомогательных блоков систем управления) с целью достижения оптимальных несимметричных режимов горения дуг для каждой из позиций агрегатов, а также оптимальных динамических режимов работы гидроприводов перемещения электродов, направленных на достижение технических эффектов по экономии электроэнергии и графитированных электродов.

10. Выполнена коррекция параметров систем автоматического управления электрическими режимами и перемещением электродов ArCOS NT Light и РАДУГА НПК ПК в соответствии с разработанными рекомендациями. Реализованы алгоритмы автоматического переключения рабочих кривых и ступеней РПН печных трансформаторов на базе головных ПЛК в структуре систем АСУ ТП исследуемых агрегатов. Проведены тестовые плавки с целью наладки и предварительной оценки эффективности разработанных мероприятий.

11. Разработаны условия проведения гарантийных испытаний усовершенствованных электрических режимов АПК-1,2,3 в течении 1-2 месяцев. Разработана методика оценки изменения удельного расхода электроэнергии и графитированных электродов с учетом влияния технологических факторов.

12. Проведены гарантийные испытания усовершенствованных электрических режимов АПК-1,2,3 в течении 2 месяцев.

13. Выполнена оценка технического и экономического эффекта от использования результатов НИОКР на основании разработанной методики. Оформлен акт внедрения результатов НИОКР на действующем производстве.

Полученный результат

В результате проведенных работ:

1. Разработаны и внедрены усовершенствованные электрические режимы АПК-1,2,3, а также новые алгоритмы автоматического переключения рабочих кривых и ступеней РПН печного трансформатора, функционирующие на основании анализа гармонического состава токов дуг. Новые настройки систем управления ArCOS NT Light и РАДУГА НПА ПК включают в себе измененные таблицы уставок импедансов для вторичных электрических контуров, а также новые параметры вспомогательных блоков. Изменения таблиц уставок импедансов были направлены на создание оптимальных несимметричных режимов горения дуг с учетом расположения зеркала на поверхности жидкой ванны и режимов аргонной продувки для каждой позиции агрегатов. Новые алгоритмы автоматического изменения рабочих кривых и ступеней РПН печного трансформатора АПК1,2,3, построенные на основании анализа коэффициента шлака с использованием информации о гармоническом составе токов дуг, совместно с скорректированными настройками систем управления ArCOS NT Light и РАДУГА НПА ПК обеспечивают коррекцию электрических режимов агрегата в зависимости от текущего шлакового режима и режима аргонной продувки. Благодаря динамической адаптации длин электрических дуг в процессе обработки жидкой стали достигается сохранение максимального теплового КПД дуг и оптимальной скорости нагрева стали, благодаря чему достигается снижение удельного расхода электроэнергии и электродов.

2. Прямой анализ изменения удельного расхода электроэнергии и графитированных электродов $УРЭ$ и $W_{уд}$ агрегатов АПК-1,2,3 за базовый период

(с 01.01.2022 г. по 30.06.2022 г.) и период гарантийных испытаний (с 01.04.2023 г. по 31.05.2023 г.) без учета влияния основных технологических факторов показал уменьшение УРЭ на 18,34% (изменение с 0,09102 кг/т до 0,07432 кг/т) и уменьшение $W_{уд}$ на 2,62% (изменение с 0,3516 кВт·ч/т до 0,3424 кВт·ч/т).

3. Уточненный анализ изменения удельного расхода электроэнергии с использованием специализированной методики с использованием регрессионных моделей электропотребления АПК-1,2,3, учитывающих влияние технологических факторов на $W_{уд}$, показал наличие технического эффекта по уменьшению $W_{уд}$: для АПК-1 – на 2,29% для АПК-2 – на 2,20%; для АПК-3 – на 2,46%.

Выявление по результатам НИОКР источника, который может причинить вред здоровью или травмы (не выявлено / выявлено с указанием источника)

Не выявлено

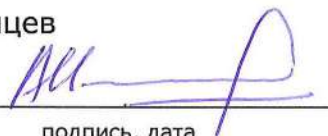
Способность к правовой охране полученного результата

Отсутствует

Дата фактического внедрения: 1 апреля 2023 г.

Срок полезного использования: 36 месяцев

Научный руководитель
ООО «РнД МГТУ»


подпись, дата

Николаев А.А.

Руководитель отдела исполнения
ООО «РнД МГТУ»


подпись, дата
На основании доверенности №27 от 27.07.2023

Попов Л.С.