

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Магнитогорский государственный технический  
университет им. Г.И. Носова»

На правах рукописи



**Тулупов Платон Гарриевич**

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

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Научный руководитель:  
кандидат технических наук, доцент  
Николаев Александр Аркадьевич

Магнитогорск

2021

<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	4
<b>Глава 1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ И ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ЭЛЕКТРОДОВ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ</b>	14
1.1. Требования к функционалу систем управления электрическим режимом, обеспечивающие возможность формирования оптимального электрического режима работы печи	15
1.2. Сравнительный анализ различных систем управления электрическим режимом дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь	18
1.3. Анализ структуры профиля плавки систем управления электрическим режимом ДСП и УКП	28
<b>ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1</b>	32
<b>Глава 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА НАПРЯЖЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ НА ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ ШАХТНОГО ТИПА ШП-125</b>	33
2.1. Краткая характеристика дуговой сталеплавильной печи шахтного типа ШП-125	33
2.2. Определение параметров электрического контура ШП-125	36
2.2.1. Определение параметров питающей сети и печного трансформатора	37
2.2.2. Определение параметров короткой сети и коэффициентов взаимной индуктивности	39
2.3. Построение математической модели электрического контура ШП-125	45
<b>ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2</b>	55
<b>Глава 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА НАПРЯЖЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ НА ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ ШАХТНОГО ТИПА ШП-125</b>	57
3.1. Основные аспекты применения анализа гармонического состава напряжения электрической дуги для решения задач диагностики стадии плавления шихты	57
3.2. Анализ гармонического состава токов и напряжений дуг в дуговой сталеплавильной печи с использованием математической модели	64

3.3. Анализ гармонического состава токов и напряжений дуг в дуговой сталеплавильной печи с использованием экспериментальных данных	71
<b>ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3</b>	79
<b>Глава 4. РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ ШП-125 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИИ О ГАРМОНИЧЕСКОМ СОСТАВЕ НАПРЯЖЕНИЙ ДУГ.</b>	81
4.1. Разработка универсальных алгоритмов обработки токовых сигналов для различных типов измерительных устройств	83
4.1.1. Трансформатор тока на первичной стороне ПТ при соединении обмоток по схеме $\Delta/\Delta-0$	85
4.1.2. Использование поясов Роговского на вторичной стороне печного трансформатора при соединении обмоток по схеме $\Delta/\Delta-0$ и $Y/\Delta-11$	85
4.1.3. Использование трансформаторов тока, встроенных в трёхфазную первичную обмотку печного трансформатора при группах соединения $\Delta/\Delta-0$ и $Y/\Delta-11$	86
4.1.4. Разработка функциональной схемы универсального алгоритма обработки сигналов с датчиков тока	90
4.2. Разработка методики определения граничных значений таблиц профиля плавки. Разработка алгоритма переключения $N_{TR}$ и $N_{PK}$ по высшим гармоникам напряжения электрической дуги	92
<b>ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4</b>	98
<b>Глава 5. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВ ВНЕДРЕНИЯ НА ИНЫХ УСТАНОВКАХ РАЗЛИЧНОЙ МОЩНОСТИ И КЛАССА</b>	100
5.1. Результаты внедрения новой системы управления на базе ШП-125	100
5.2. Расчёт экономического эффекта и рекомендации по внедрению на иных ДСП различной мощности и класса	102
<b>ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5</b>	103
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	105
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b>	108
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b>	119

## ВВЕДЕНИЕ

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

Одним из наиболее энергоёмких потребителей электрической энергии является дуговая сталеплавильная печь (ДСП). Современные ДСП характеризуются следующими основными технико-экономическими показателями: удельная мощность печного трансформатора в диапазоне 0,7 – 1 МВА/т, продолжительность плавки от выпуска до выпуска – около 40 минут, масса выплавляемой стали – от 100 до 250 т.

За последние десятилетия при освоении новых производственных мощностей, а также реконструкции старых сталеплавильных цехов, наметилась устойчивая тенденция внедрения ДСП в производство. Это связано с высокими технико-экономическими, экологическими и эксплуатационными показателями работы данных агрегатов.

Несмотря на очевидные преимущества, показатели энергопотребления ДСП остаются значительными и составляют весомую долю в себестоимости конечного продукта. Вследствие этого, особую актуальность приобретает задача снижения энергопотребления за счёт разработки алгоритмов энергоэффективного управления электрическим режимом печи.

Исследования в направлении снижения энергопотребления ДСП проводятся многими отечественными и зарубежными учёными. Среди зарубежных авторов следует выделить работы К. Крюгера [1], Б. Боумана [2] и С. Кёле [3,4], а среди отечественных – работы Ю.М. Миронова [5], А.Н. Макарова [6], А.А. Николаева и Г.П. Корнилова [7-16], Бикеева Р.А [18], С. М. Нехамина [19], А.Н. Шпигановича [20], И.А. Якимова [21], Серикова В.А. [22] и других. При этом фундаментальные основы данного направления исследований были заложены в работах А.Д. Свенчанского [23] и М.Я. Смелянского [24]. При этом вопрос раз-

вития исследований в области разработки алгоритмов энергоэффективного управления электрическим режимом работы печи заслуживает отдельного рассмотрения.

На отечественном и зарубежном рынке наиболее широко распространены системы управления электрическим режимом ДСП и УКП ARCOS (Primetals Technologies, ранее Siemens VAI, VAI Fuchs, Vantron, Германия) и HI-REG (Danieli, Италия). Также встречаются и менее распространённые системы, такие как E.M.P.E.R.E (Amec Spie, Франция), DECTEQ (Ferrottron, Германия) и DigitArc (AMI, Мексика). Кроме того, все большее распространение получают разработанные за последние несколько лет системы Simelt (Primetals Technologies, Германия) и Q-REG (Danieli, Италия). Также на ряде производств встречаются устаревшие системы управления, такие как A.R.C.E.L.E.C (Amec Spie, Франция).

Несмотря на расхождения в структуре и алгоритмах функционирования данных систем, все они обладают схожей структурой профиля плавки, в основе которой лежит параметр удельного расхода электроэнергии  $W_{уд}$  [кВт·ч/т]. Соответственно, переход с одной технологической стадии плавки на другую, определяемой сочетанием ступени печного трансформатора  $N_{TP}$ , реактора  $N_R$  и номера рабочей кривой  $N_{PK}$  на другое производится при достижении показателя  $W_{уд}$  определённых значений, определяемых усреднённо.

Основной недостаток данного подхода обусловлен тем, что величина  $W_{уд}$  не имеет прямой связи с технологическими процессами, протекающими внутри ванны печи. Вследствие этого, при использовании  $W_{уд}$  в основе профиля плавки переход с одной стадии на другую может производиться несвоевременно, что приводит к работе печи при электрическом режиме, не соответствующему текущей стадии плавления шихты.

Одним из ключевых шагов в решении данной проблемы стала разработка фирмой Siemens VAI усовершенствованной системы определения уровня вспененного шлака на поздних стадиях плавки Foaming Slag Manager (FSM). Основное назначение данной системы – построение виртуальной пространственной модели распределения вспененного шлака с использованием информации с виброакустических датчиков, установленных на кожухе печи, для управления про-

цессом инъекции угольной мелочи на стадии доводки металла. В данном случае электрический режим регулируется косвенно, поскольку экранирование дуг вспененным шлаком определяет стабильность их горения.

В дальнейшем идея использования виброакустических датчиков для управления электрическим режимом нашла отражение в различных исследованиях. Весомый вклад в данном направлении был обеспечен диссертационной работой Серикова В.А. [22]. В данной работе экспериментальным путём была установлена связь между интенсивностью сигналов, генерируемых виброакустическими датчиками, установленными на кожухе печи, и стадией плавления шихты. Следует отметить, что в данной работе предлагается применять сигнал с виброакустических датчиков для прямого управления электрическим режимом на всех стадиях плавления шихты, а не только на поздней стадии для решения задач регулирования уровня вспененного шлака.

Несмотря на то, что зависимость между сигналами с виброакустических датчиков и стадией плавления шихты была установлена экспериментально, данный способ управления электрическим режимом обладает существенным эксплуатационным недостатком. Ввиду того, что датчики устанавливаются непосредственно на кожухе печи, существует высокий риск их залива жидким металлом в процессе плавки, что приведёт к поломке и необходимости перехода на резервный профиль плавки с использованием  $W_{уд}$ . Поскольку стоимость виброакустического датчика высока, возникла потребность применения альтернативного критерия диагностики стадии плавки, доступного в системе по умолчанию и не требующего применения дополнительных технических средств.

В исследованиях, проводимых под руководством Николаева А.А., для решения задач диагностики стадии плавления шихты предлагается использовать анализ гармонического состава сигналов тока электрической дуги. Эксперименты, проведённые на электросталеплавильных агрегатах различной мощности и класса [25], доказали тесную связь между уровнем гармоник сигнала тока электрической дуги и технологической стадией плавления. Данный вывод имеет высокую практическую значимость, поскольку позволяет осуществлять переход с одного сочетания  $N_{TP}$ ,  $N_P$  и  $N_{PK}$  на другое своевременно и в соответствии с процессами, протекающими внутри ванны печи. Благодаря этому, достигается суще-

ственное повышение энергетической эффективности работы как печного агрегата, так и сталеплавильного комплекса в целом.

Закономерным этапом в развитии систем диагностики стадии плавления шихты является разработка системы, в основе которой лежит анализ гармонического состава напряжения электрической дуги. Уровень гармонического состава напряжения электрической дуги является эффективным показателем для решения задач диагностики стадии плавки, поскольку характер его изменения имеет наиболее тесную корреляцию с величиной тепловой постоянной времени дуги  $\theta_D$ , а также коэффициентом вентильного эффекта  $K_{ВЭ}$  при незначительной корреляции с колебаниями длины электрической дуги  $L_D$  и величиной коэффициента несимметрии  $K_{2f}$ .

Таким образом, разработка энергоэффективного алгоритма управления ДСП с системой диагностики стадии плавления шихты по высшим гармоникам напряжения электрической дуги является актуальной задачей с высоким потенциалом к внедрению на действующем производстве. Несмотря на это, в современной научно-технической литературе данный вопрос практически не освещается. Также отсутствуют упоминания об опыте практических исследований, проводимых в данном направлении.

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

**Целью диссертационной работы** является улучшение энергетических показателей ДСП за счёт разработки и применения системы управления электрическим режимом с автоматической адаптацией напряжения на вторичной стороне печного трансформатора и длин электрических дуг с использованием информации о гармоническом составе напряжения электрической дуги. При этом для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Анализ существующих систем управления электрическим режимом и перемещением электродов дуговых сталеплавильных печей, функционирующих на отечественных и зарубежных металлургических предприятиях.

2. Разработка математической модели электрического контура ДСП, обеспечивающей расчёт гармонического состава напряжений дуг на основе осциллограмм мгновенных значений токов дуг и фазных напряжений с учётом эффекта переноса мощности и взаимного влияния между фазами.

3. Теоретические и экспериментальные исследования гармонического состава напряжений электрической дуги на дуговой сталеплавильной печи шахтного типа ШП-125

4. Разработка усовершенствованной системы управления электрическим режимом ШП-125 с использованием информации о гармоническом составе напряжений дуг.

5. Оценка эффективности усовершенствованных алгоритмов в действующем производстве.

Решение поставленных задач выполняется на базе дуговой сталеплавильной печи шахтного типа ШП-125 («ЧерМК», г. Череповец). Содержание диссертационной работы соответствует решению поставленных задач и изложено следующим образом:

В первой главе подробно рассмотрена структура систем управления электрическим режимом ДСП, функционирующих на отечественных и зарубежных металлургических предприятиях. Сформулированы основные требования, предъявляемые к энергоэффективной системе управления электрическим режимом. Проведена проверка соответствия существующих систем управления электрическим режимом данным требованиям, которая в свою очередь позволила выявить основные преимущества и недостатки существующих систем. При этом особое внимание уделено недостаткам, связанным со структурой профиля плавки и алгоритмом перехода с одного сочетания  $N_{TP}$ ,  $N_P$  и  $N_{PK}$  на другое.

Во второй главе приведены характеристика дуговой сталеплавильной печи шахтного типа ШП-125 (ПАО «Северсталь», г. Череповец) как объекта исследования с кратким анализом основных конструктивных и технологических особенностей, а также расчёт параметров схемы замещения электрического контура. С использованием результатов расчёта, разработана математическая модель электрического режима ШП-125. Отличительной особенностью данной модели является учёт эффекта переноса мощности и взаимной индуктивности между фазами.

Адекватность разработанной модели подтверждается результатами статистического анализа и фактом соответствия результатов опытов двухфазных и трёхфазного КЗ, полученных экспериментально, результатам аналогичных опытов, выполненных на математической модели.

В третьей главе с использованием разработанной математической модели электрического контура ШП-125, а также модели для расчёта относительных действующих значений чётных и нечётных гармоник тока и напряжения дуги, было проведено теоретическое обоснование эффективности применения анализа уровня чётных и нечётных гармоник напряжения дуги для диагностики стадии плавки с целью энергоэффективного управления электрическим режимом. Доказано, что гармонический состав напряжения дуги более стабилен и в меньшей степени подвержен влиянию колебаний длин дуг и несимметричных режимов по сравнению с гармоническим составом тока дуги. Кроме того, обоснована эффективность применения анализа чётных гармоник на начальных стадиях плавки, а нечётных - на конечных стадиях. Закономерности, полученные в ходе теоретического обоснования, также были подтверждены экспериментально с применением специальной математической модели, позволяющей рассчитывать мгновенные значения напряжений дуг на основе экспериментальных сигналов мгновенных значений фазных напряжений и токов дуг.

В четвёртой главе проведён анализ фактических точек перехода с одного сочетания  $N_{TP}$  и  $N_{PK}$  на другое при работе алгоритма переключения, функционирующего на ШП-125. С учётом выявленных недостатков в работе существующего алгоритма, предложена новая методика определения стадии плавки с использованием информации о гармоническом составе напряжений дуг. В основе данной методики лежит анализ осциллограмм, полученных с использованием разработанной математической модели на основе экспериментальных данных. Описан усовершенствованный алгоритм перехода с одного сочетания  $N_{TP}$  и  $N_{PK}$  на другое с использованием информации о гармоническом составе напряжений дуг. На основе данного алгоритма предложена новая структура системы управления электрическим режимом, обладающая рядом преимуществ как по сравнению с системой, функционирующей на ШП-125, так и по сравнению с другими системами, представленными на рынке.

В пятой главе приведена оценка экономической эффективности внедрения разработанного алгоритма в действующее производство. По результатам оценки обоснована перспектива внедрения алгоритма на электросталеплавильных агрегатах, отличных по классу, мощности, а также способу загрузки шихты.

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

**Научная новизна.** В процессе решения поставленных задач получены следующие новые научные результаты:

1. Разработана математическая модель электрического контура ДСП, отличающаяся от известных возможностью расчёта мгновенных значений и гармонического состава напряжений дуг на основе осциллограмм мгновенных значений токов дуг и фазных напряжения с учетом эффекта переноса мощности и взаимного влияния между фазами.

2. Выполнено научное обоснование эффективности применения информации о гармоническом составе напряжений дуг для решения задач энергоэффективного управления ДСП в составе системы управления электрическим режимом. Результаты проведённого обоснования отличаются от известных тем, что получены новые закономерности, отражающие изменения гармонического состава напряжения дуг в зависимости от стадии плавки.

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

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

**Практическая ценность и реализация работы** заключается в том, что разработанная усовершенствованная система управления электрическим режи-

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

#### **Методика проведения исследований.**

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

#### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

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

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

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

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

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждаются правомерностью исходных положений и предположений, а также реальным экономическим эффектом, полученным от внедрения результатов диссертационного исследования в действующее производство на базе дуговой сталеплавильного типа ШП-125.

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

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

Магнитогорск, 2019), 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus) (г. Санкт –Петербург, 2020), 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (г. Челябинск, 2020), 2020 International Russian Automation Conference (RusAutРКon) (г. Сочи, 2020), 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon) (г. Магнитогорск, 2020), 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI) (г.Магнитогорск, 2020).

По содержанию диссертации опубликовано 12 научных трудов, в том числе 7 статей в изданиях, индексируемых Scopus, и 5 статей в изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ. Также по результатам исследований получено 3 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

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

## **Глава 1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ И ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ЭЛЕКТРОДОВ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ**

Система управления электрическим режимом является неотъемлемым элементом дуговых сталеплавильных печей (ДСП) и установок ковш-печь (УКП). В подавляющем большинстве случаев, данная система состоит из двух основных структурных компонентов: системы задания профиля плавки и системы управления положением электродов. С их помощью осуществляется изменение вторичного напряжения печного трансформатора и поддерживается длина электрической дуги, при которой достигается значение заданного электрического параметра ДСП (полного сопротивления, полной проводимости, тока или напряжения дуги), в зависимости от архитектуры, характерной для конкретного случая.

В системе задания профиля плавки устанавливаются оптимальные значения ступеней трансформатора и реактора (при наличии) для различных стадий плавки (и реализуется переход с одного электрического режима на другой по одному из выбранных электрических или технологических параметров, например, по абсолютному расходу электроэнергии). От правильности настройки параметров данных систем в сильной степени зависят технико-экономические показатели электросталеплавильных комплексов.

Несмотря на длительную историю применения ДСП и УКП в металлургической промышленности остается нерешенным ряд вопросов, связанных с обеспечением энергоэффективных и производительных режимов работы электротехнических комплексов с ДСП. Внедрение современных ДСП сверхвысокой мощности (150 – 300 МВА), применение ДСП с новыми технологиями ведения плавки (шахтные печи, печи с технологией непрерывной подачи лома в жидкую ванну (технология Consteel), также как и использование альтернативных источников энергии, вспененного шлака, жидкого чугуна и т.д., требует проведения дополнительных фундаментальных исследований в области разработки усовершенствованных систем автоматического управления электрическими режимами и перемещения электродов ДСП и УКП.

Задача оптимизации электрических режимов ДСП и УКП решается в несколько этапов – от настройки таблицы профиля плавки и задания значения критерия перехода с одной стадии на другую, до расчета таблицы уставок полных сопротивлений (полных проводимостей) и настройки параметров нелинейных регуляторов системы управления перемещением электродов. На каждом этапе важно использовать современные научно обоснованные методики выбора оптимальных параметров.

При этом решение данной задачи не представляется возможным без понимания структуры и основных принципов функционирования современных систем управления электрическим режимом ДСП. Кроме того, задача разработки новых, более совершенных алгоритмов управления требует проведения анализа недостатков существующих систем, а также формулировки принципиальных требований, предъявляемых к энергоэффективной системе управления. Остановимся на данном вопросе более подробно.

### **1.1. Требования к функционалу систем управления электрическим режимом, обеспечивающие возможность формирования оптимального электрического режима работы печи**

Исходя из анализа опыта эксплуатации ДСП (УКП) на различных металлургических предприятиях, а также исходя из требований, предъявляемых к архитектуре систем управления электрическим режимом для обеспечения возможности её оптимальной настройки, можно сформировать следующий перечень критериев, которые позволяют судить о преимуществах и недостатках той или иной системы управления:

1. Применение универсальных алгоритмов обработки измеряемых сигналов при использовании различных типов измерительных устройств (катушки Роговского на вторичной стороне печного трансформатора (ПТ), трансформаторы тока на первичной стороне ПТ). Данный критерий обусловлен большим удобством эксплуатации и настройки системы, в которой алгоритмы обработки сигналов унифицированы и не зависят от типа измерительного устройства.

2. Обеспечение полной линеаризации параметров электрического контура ДСП (УКП) и регулировочных характеристик гидроприводов перемещения электродов [26]. Очевидно, что характеристика электрического контура печи,

отражающая зависимость длины электрической дуги от того или иного параметра регулирования (импеданс фазы  $Z_{2\phi}$ , адмиттанс фазы  $Y_{2\phi}$ , сопротивление дуги  $R_d$  и т.д.) является нелинейной. Вследствие этого, настройка системы на технический оптимум во всём диапазоне рабочих длин дуг с использованием классического регулятора не представляется возможной. Аналогичная ситуация наблюдается и с гидравлическим контуром. Ввиду особенностей сервоклапана как исполнительного механизма системы гидравлического привода перемещения электродов, зависимость скорости перемещения электрода от сигнала задания на сервоклапан также является нелинейной и влечёт за собой ту же проблему, что и в случае с электрическим контуром. Для компенсации обозначенного негативного эффекта в некоторых системах управления прибегают к специальным линеаризующим блокам. При этом структура данных блоков зачастую не обеспечивает полную линеаризацию, что является существенным недостатком.

3. Применение адаптивного нелинейного регулятора с возможностью адаптации коэффициентов усиления П-регулятора при изменении стадий плавки в ДСП [27]. Данный критерий тесно связан с предыдущим. В силу того, что полная линеаризация электрического контура в большинстве современных систем управления не обеспечивается, зачастую для достижения относительной стабильности прибегают к ослаблению результирующего коэффициента усиления контура регулирования в зависимости от стадии плавки за счёт адаптивного регулятора.

4. Гибкое управление ограничением токов при работе ДСП (УКП) с использованием основных клапанов и клапанов быстрого подъема. Данный режим особенно необходим на начальной стадии плавления, когда имеют место постоянные обвалы шихты с закорачиванием дуг. В структуру системы вводится дополнительный контур, который отслеживает превышение током дуги заранее определённых допустимых значений с формированием сигнала задания на подъём электродов. В случае, если превышение продолжается длительный период времени, система открывает клапаны быстрого подъёма для обеспечения подъёма электродов с максимальной скоростью.

5. Коррекция уставок регулируемого электрического параметра в функции отклонения напряжения питающей сети, изменения гармонического состава токов. Уставка регулируемого параметра в системе подбирается таким образом, чтобы обеспечить поддержание требуемых мощности электрической дуги  $P_d$ , коэффициента износа футеровки (КИФ) и коэффициента интенсивности нагрева (КИН). При этом расчёт электрической характеристики, как правило, производится при идеализированных условиях, когда величина напряжения питающей сети равна номинальному значению, а величина тепловой постоянной времени электрической дуги  $\theta_d$  соответствует средней величине для отдельно взятой стадии плавки. На практике, напряжение питающей сети постоянно изменяется, а величина  $\theta_d$  не стабильна и не может быть измерена напрямую. Как следствие, возникает потребность в коррекции уставки параметра регулирования в зависимости от текущей величины напряжения питающей сети и гармонического состава токов.

6. Возможность задания индивидуальных несимметричных режимов горения дуг для различных ступеней печного трансформатора, реактора и номеров рабочих кривых. В печах с непрерывной подвалкой шихты конвейером, а также в печах шахтного типа, для предотвращения повышенного износа футеровки и перегрева водоохлаждаемой панели в «горячей» зоне печи необходимо формировать оптимальный несимметричный режим путём задания балансирующих коэффициентов. Отметим, для каждого сочетания ступени печного трансформатора, реактора и набора уставок оптимальное сочетание балансирующих коэффициентов является уникальным. Вследствие этого, обозначенная выше функция приобретает особую важность для системы управления электрическим режимом.

7. Автоматическая адаптация несимметричных режимов горения дуг к разным стадиям плавки в ДСП и изменяющимся условиям аргонной продувки и шлаковым режимам в УКП. Помимо сочетания ступени печного трансформатора, реактора и номера рабочей кривой, оптимальное сочетание балансирующих коэффициентов в ДСП и УКП также определяет текущая стадия плавки и шлаковый режим [28-29]. Так, при достаточном экранировании электрических дуг вспененным шлаком в ДСП, результирующая величина коэффициента из-

носа футеровки (КИФ) может быть увеличена за счёт подстройки балансирующих коэффициентов с целью сокращения времени работы под током и более быстрого завершения фазы активного расплавления. Для УКП в данном случае особую роль играет температура шлака, образующегося на поверхности расплава, а также текущий режим аргонной продувки. Это связано с тем, что при интенсивных режимах продувки на поверхности расплава образуется бурун, вследствие чего всплески жидкого металла закорачивают электроды в фазах, находящиеся в непосредственной близости от донной пробки. Важно отметить, что при одной и той же интенсивности продувки, но разной температуре шлака на поверхности, интенсивность всплесков может в значительной мере отличаться, предъявляя различные требования к формированию оптимального несимметричного режима [30].

8. Возможность диагностики стадий плавки в ДСП (оценка стабильности нагрева стали в УКП) и интеллектуальное управление процессом переключения ступеней РПН трансформатора, реактора и изменения рабочих кривых, реализованная на базе самого регулятора. Отметим, что для решения задачи формирования оптимального электрического режима необходимо достаточно точно судить о текущей стадии плавления шихты. Это становится возможным благодаря анализу гармонического состава сигналов тока (напряжения) электрических дуг [31-33]. Тем не менее, в подавляющем большинстве современных систем управления, как уже отмечалось ранее, определение стадии плавления шихты производится по величине удельного расхода электроэнергии  $W_{уд}$ , которая является косвенным показателем и не имеет прямой связи с реальными технологическими процессами, протекающими в ванне печи.

## **1.2. Сравнительный анализ различных систем управления электрическим режимом дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь**

Как говорилось ранее, на отечественном и зарубежном рынке наиболее широко распространены системы управления электрическим режимом ДСП и УКП ARCOS (Primetals Technologies, ранее Siemens VAI, VAI Fuchs, Vantron, Германия) и HI-REG (Danieli, Италия). Также встречаются и менее распространённые системы, такие как E.M.P.E.R.E (Amec Spie, Франция), DECTEQ (Ferrottron, Германия) и DigitArc (AMI, Мексика). Кроме того, все большее рас-

пространение получают разработанные за последние несколько лет системы Simelt (Primetals Technologies, Германия) и Q-REG (Danieli, Италия). Также на ряде производств встречаются устаревшие системы управления, такие как A.R.C.E.L.E.C (Amec Spie, Франция). Внешний вид основных шкафов с оборудованием упомянутых систем, а также отечественной системы управления САУЭР «РАДУГА НПА ПК», разработанной специалистами ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», и системы управления САУЭР «АСУ ЭРП», которая ввиду низкой серийности подробно рассматриваться не будет, представлен на рис.1.1.

Отметим, что для всех существующих систем управления ДСП и УКП характерна общая структура, которая является двухуровневой. На втором уровне в соответствии с профилем плавки формируется задание ступени печного трансформатора  $N_{ТР}$ , реактора  $N_{Р}$  (при наличии) и номера рабочей кривой  $N_{РК}$ . При этом, критерием перехода с одной стадии плавки на другую в подавляющем большинстве случаев является показатель удельного расхода электроэнергии  $W_{уд}$ . Сочетание  $N_{ТР}$  и  $N_{Р}$  определяет форму электрической характеристики, отражающей зависимость мощности электрической дуги  $P_{д}$  от длины дуги  $L_{д}$ , тем самым позволяя регулировать объём электрической энергии, вводимой в печь. В свою очередь, параметр  $N_{РК}$  отвечает за текущий набор уставок параметра регулирования в системе управления первого уровня, определяя рабочую точку на электрической характеристике  $P_{д}=f(L_{д})$  и обеспечивая её поддержание за счёт управления гидравлическим приводом перемещения электродов.

Системы управления электрическим режимом ARCOS является одной из наиболее распространённых систем управления электрическим режимом в России. В ней предусмотрена возможность регулирования по трём основным параметрам: напряжение электрической дуги  $U_{д}$ , сопротивление электрической дуги  $R_{д}$  и полный импеданс фазы  $Z_{2\phi}$ . При этом регулятор имеет нелинейную пропорционально-интегральную структуру с возможностью задания индивидуальных коэффициентов пропорциональной и интегральной частей для 6 зон ошибки регулирования.



Рисунок 1.1 - Внешний вид основных шкафов с оборудованием систем автоматического управления электрическими режимами и перемещением электродов ДСП и УКП зарубежного и отечественного производства

Наиболее существенным недостатком системы ARCOS является отсутствие разделения линеаризации электрического и гидравлического контуров, что является не удобным с практической точки зрения и усложняет процедуру настройки регулятора.

Система HIREG-Plus наряду с системой ARCOS также является одной из наиболее распространённых систем управления. В данной системе осуществляется косвенное регулирование адмитанса фазы  $Y_{2\phi}$  за счёт поддержания величины дифференциального показателя, определяемого на основании действующих значений сигналов тока дуги и фазного напряжения, на нулевом уровне. В системе HIREG-plus применяется классический дифференциальный регулятор. Все блоки, направленные на линеаризацию объекта управления, вынесены отдельно ( $K_a$ , блок нелинейного усиления, линеаризация сервоклапана). Тем не менее, форма линеаризующих кривых, формируемых данным блоком, заранее predeterminedена производителем и не может быть изменена пользователем. Ввиду того, что существующая форма линеаризующих кривых не обеспечивает полной линеаризации объекта управления, данный факт определяет один из наиболее значительных недостатков данной системы. Кроме того, в системе отсутствует возможность формирования индивидуальных несимметричных режимов горения дуг для различных рабочих кривых ввиду ограничений, накладываемых применением блока  $K_{ipn}$  в структуре контура регулирования. Функциональные схемы систем ARCOS и HIREG Plus представлены на рис.1.2.

Система управления Simelt появилась в одно время с системой ARCOS как независимая разработка компании Siemens. Её существенным преимуществом является наличие матрицы балансирующих коэффициентов, что позволяет формировать оптимальный электрический режим для всех ступеней печного трансформатора, реактора и номера рабочей кривой. Кроме того, в системе присутствует несколько нелинейных блоков (адаптивная П-часть, коэффициент скорости, полиномиальная функция), при правильном подборе функции которых появляется возможность достигнуть режимов регулирования, близких к оптимальным. Кроме того, в системе присутствует блок NEC-адаптации, который позволяет корректировать величину уставки параметра регулирования в зависимости от колебаний напряжения в питающей сети.

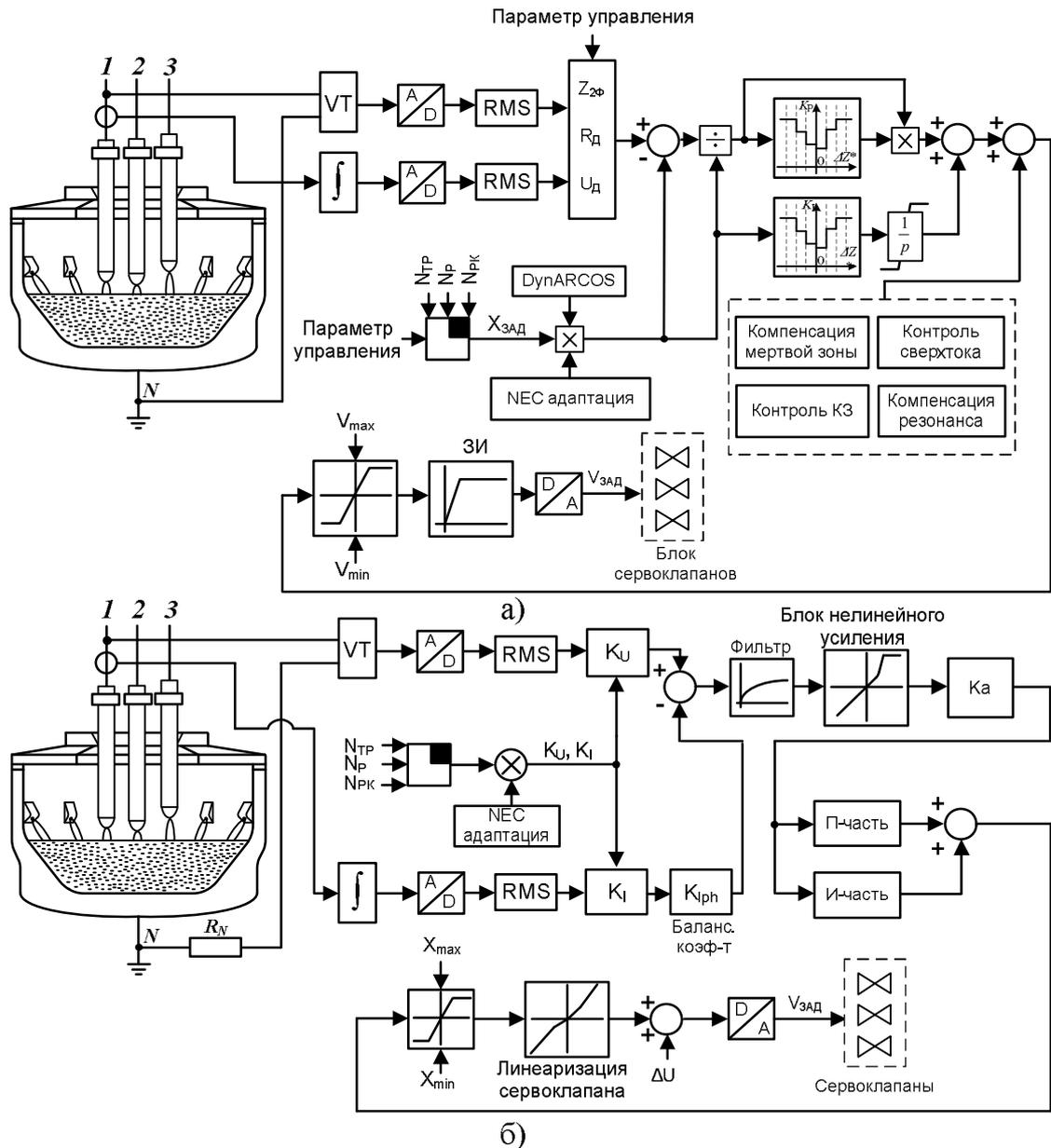


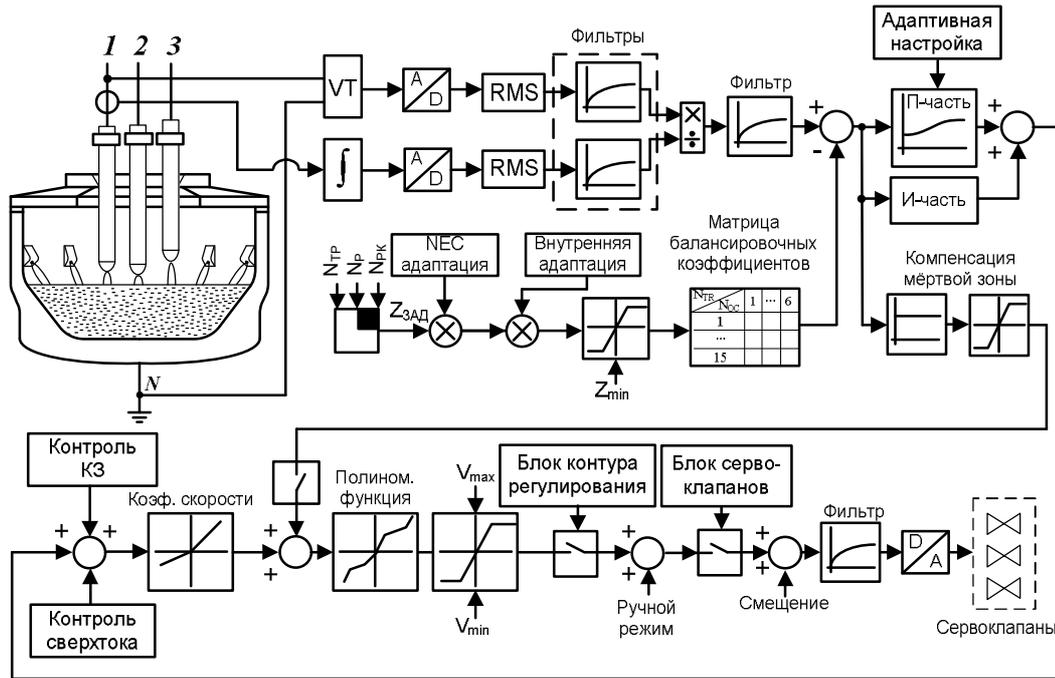
Рисунок 1.2 - Функциональные схемы систем управления электрическим режимом: а) ARCOS (Primetals Technologies, ранее Siemens VAI, VAI Fuchs, Vantron, Германия) б) HI-REG (Danieli, Италия)

Данная система является одной из наиболее гибких в настройке по сравнению с прочими, но при этом не лишена недостатков. Основным недостатком связан с тем, что в системе не выделены отдельные блоки, направленные на линеаризацию параметров электрического и гидравлического контура, что делает настройку недостаточно удобной. Кроме того, характер изменения нелинейной пропорциональной части в данной системе жестко привязан к одной форме в функции от времени и не может быть изменён под нужды потребителя. Отдельного упоминания также заслуживает система Melt

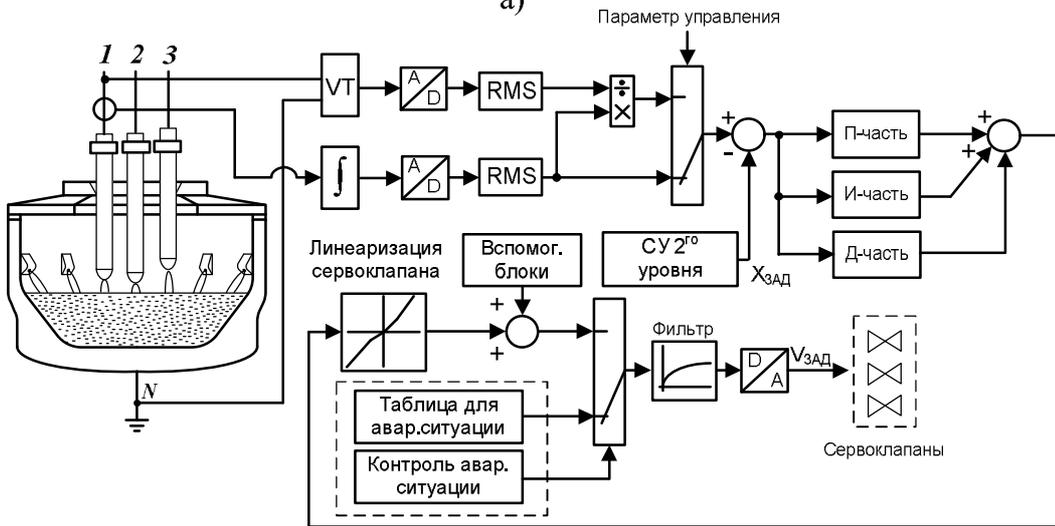
Expert, которая является симбиозом систем ARCOS и Simelt (основные блоки аналогичны ARCOS, аппаратная часть на базе PLC аналогична Simelt). Данная система обособленно рассматриваться не будет, но войдёт в итоговый сравнительный анализ.

Системы управления DECTEQ и E.M.P.E.R.E несут в себе характерные черты, свойственные как системе ARCOS, так и системе HIREG Plus с присущими им недостатками. Сходство с системой ARCOS заключается в возможности выбора различных параметров регулирования, а сходство с системой Hireg Plus – в вынесении в отдельные блоки линеаризующих характеристик. При этом в обеих системах применяется ПИД-регулятор, в котором, как правило, нет необходимости, поскольку на практике дифференциальная часть практически всегда выведена из состава контура регулирования. Тем не менее, важно отметить тот факт, что система E.M.P.E.R.E является единственной из представленных систем, в которой линеаризация электрического контура осуществляется с использованием характеристики, полученной на математической модели. Функциональные схемы систем управления Simelt, DECTEQ и E.M.P.E.R.E представлены на рис.1.3

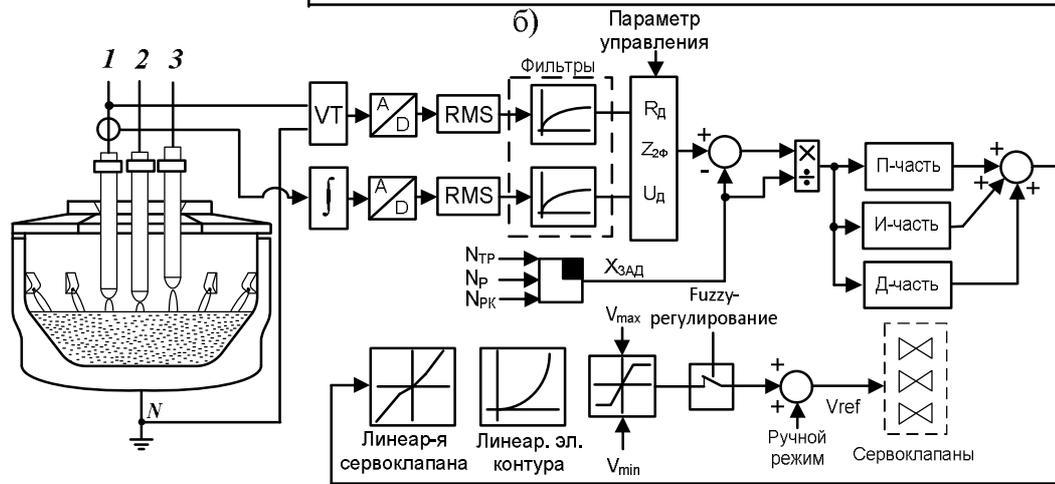
Система управления электрическим режимом Q-REG также является системой нового поколения наряду с Simelt. Основным преимуществом данной системы является разделение блоков линеаризации электрического (блок нелинейного усиления) и гидравлического контуров (линеаризация сервоклапана). Ввиду отсутствия чёткой привязки к зонам сигнала задания, блок линеаризации сервоклапана позволяет добиться полной линеаризации гидравлического контура. При этом форма характеристики блока нелинейного усиления определена однозначно, вследствие чего полная линеаризация электрического контура не представляется возможной. Кроме того, в данной системе отсутствует возможность определения уникального набора балансирующих коэффициентов для каждого сочетания ступени печного трансформатора, реактора и номера рабочей кривой. Следует отметить, что в системе Q-REG помимо регулирования полного адмитанса фазы  $Y_{2\Phi}$  имеется возможность осуществлять регулирование фазного напряжения  $U_{2\Phi}$  и тока электрической дуги  $I_d$ .



а)



б)



в)

Рисунок 1.3 - Функциональные схемы систем управления электрическим режимом: а) Simelt (Primetals Technologies, Германия); б) DECTEQ (Ferrotron, Германия); в) E.M.P.E.R.E (Amec Spie, Франция)

Опыт предыдущих исследований показывает, что прямое регулирования тока является неэффективным, поскольку изменения тока дуги в одной фазе приводит к мгновенному изменению тока в другой фазе, вследствие чего добиться стабильного регулирования при сохранении должного быстродействия практически невозможно.

На территории стран Северной и Южной Америки широкое распространение получила система управления Digit Arc. Данная система обладает недостатками, характерными как для системы Q-REG, так и для системы Simelt (отсутствие разделения при линеаризации электрического и гидравлического контуров, а также отсутствие возможности определения уникальных сочетаний балансирующих коэффициентов для различных стадий плавки). Также в ней отсутствует блок NEC-адаптации. Ключевой особенностью данной системы является применение системы подчинённого регулирования для всех возможных сочетаний параметров  $Z_{2\Phi}$ ,  $I_d$  и  $U_{2\Phi}$ . По аналогии с системой Q-REG, необходимость использования тока дуги  $I_d$  как во внешнем, так и внутреннем контуре регулирования также вызывает сомнения в силу причин, описанных выше. Тем не менее, данный вопрос в современной литературе подробно не освещался и является актуальной темой для будущих исследований.

В свою очередь, аналоговая система управления A.R.C.E.L.E.C в настоящее время является устаревшей. В ней отсутствует возможность применения поясов Роговского в качестве датчика тока, нет возможности формировать балансирующие коэффициенты не затрагивая профиль плавки, отсутствуют блоки NEC-адаптации, а также используется ПИД-регулятор, в чём нет необходимости, поскольку на практике дифференциальная часть не используется. При этом ограниченное число зон нелинейной пропорциональной части регулятора не позволяет достигнуть приемлемой линеаризации электрического и гидравлического контуров. Функциональные схемы систем управления Q-REG, Digit Arc и A.R.C.E.L.E.C. представлены на рис.1.4.

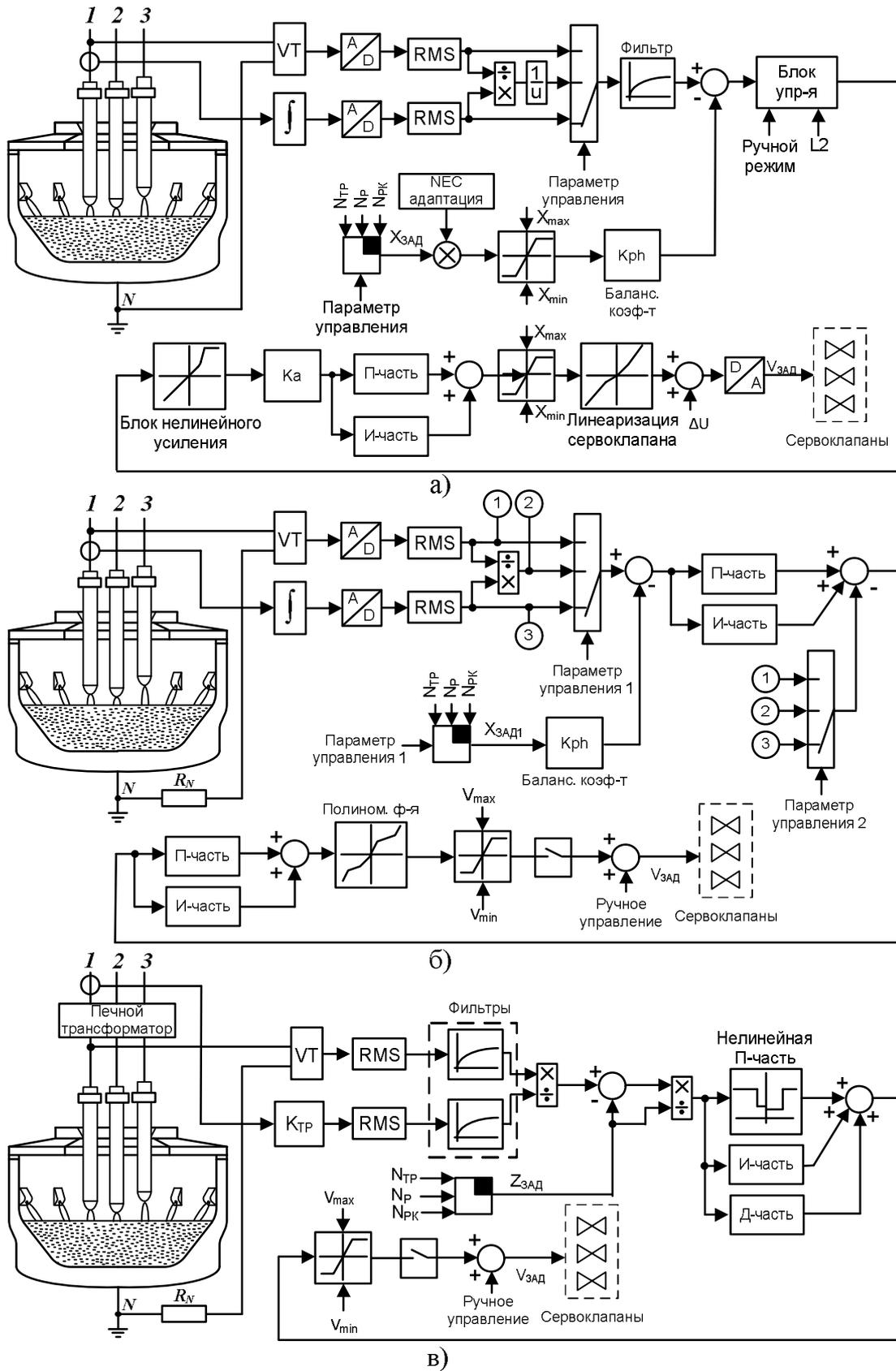


Рисунок 1.4 - Функциональные схемы систем управления электрическим режимом: а) Q-REG (Danieli, Италия); б) DigitArc (AMI, Мексика); в) A.R.C.E.L.E.C (Amec Spie, Франция).

С учётом вышеобозначенного, в таблице 1.1 сведена общая информация об основных преимуществах и недостатках наиболее распространённых систем управления электрическим режимом.

Таблица 1.1.

Сравнительный анализ различных систем управления электрическим режимом дуговых сталеплавильных печей

Основные параметры и характеристики САУЭР и ПЭ	Производитель / наименование САУЭР и ПЭ								
	Primetals Technologies			Danieli		Amec Spie		Ferrotron	AMI
	ARCOS	Simelt	Melt Expert	HI-REG	Q-REG	A.R.C.E.L.E.C	E.M.P.E.R.E	DECTEQ	DigitARC
1. Применение универсальных алгоритмов обработки измеряемых сигналов тока и напряжения при использовании различных типов измерительных устройств (катушки Роговского на вторичной стороне ПТ, трансформаторы тока на первичной стороне ПТ)	-	+	-	+	+	-	-	-	-
2. Обеспечение полной линеаризации параметров электрического контура ДСП (УКП) и регулировочных характеристик гидроприводов перемещения электродов	-	+/-	-	-	-	-	-	-	-
3. Применение адаптивного нелинейного регулятора с возможностью подстройки коэффициентов усиления ПИ-регулятора при изменении стадий плавок в ДСП и стабильности нагрева металла в УКП.	-	+	-	+/-	+/-	-	-	-	-
4. Гибкое управление ограничением токов при работе ДСП или УКП с использованием основных клапанов и клапанов быстрого подъема	+	+	+	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+
5. Коррекция уставок регулируемого параметра в функции отклонения напряжения питающей сети, изменения гармонического состава токов.	+	+	+	+	+	-	-	-	-
6. Возможность задания индивидуальных несимметричных режимов горения дуг для различных рабочих кривых	+	+	+	-	-	+	+	+	-

Основные параметры и характеристики САУЭР и ПЭ	Производитель / наименование САУЭР и ПЭ								
	Primetals Technologies			Danieli		Amec Spie		Ferrottron	AMI
	ARCOS	Simelt	Melt Expert	HI-REG	Q-REG	A.R.C.E.L.E.C	E.M.P.E.R.E	DECTEQ	DigitARC
7. Автоматическая адаптация несимметричных режимов горения дуг к разным стадиям плавки в ДСП и изменяющимся условиям аргонной продувки и шлаковым режимам в УСП	–	+/-	–	–	–	–	–	–	–
8. Возможность диагностики стадий плавки в ДСП (оценка стабильности нагрева стали в УСП) и интеллектуальное управление процессом переключения ступеней РПН трансформатора, реактора и изменения рабочих кривых, реализованная на базе самого регулятора	–	–	–	–	–	–	–	–	–

### 1.3. Анализ структуры профиля плавки систем управления электрическим режимом ДСП и УСП

В рамках данного исследования наиболее значимым является вывод о том, что возможность диагностики стадий плавки в ДСП (оценки стабильности нагрева стали в УСП) и интеллектуального управления процессом переключения ступеней РПН трансформатора, реактора и изменения рабочих кривых отсутствует во всех системах, представленных на рынке, что в значительной мере сказывается на показателях энергоэффективности. Отсутствие данной возможности обусловлено структурой профиля плавки, используемой в современных системах управления электрическим режимом. Вследствие этого, анализ структуры профиля плавки в данных системах является актуальной задачей, поскольку разработка новых алгоритмов управления требует глубокого понимания недостатков существующих систем.

При использовании системы ARCOS в контроллер АСУ ТП ДСП вводится информация о составе шихты, количестве чугуна и количестве подвалок. На основании этой информации оператор выбирает один из наиболее подходящих существующих профилей плавки. Профиль плавки представляет собой набор таблиц уставок для выбора ступени трансформатора, ступени реактора и рабочей кривой регулятора в зависимости от стадии плавки. Каждой завалке и подвалке соответствует своя таблица. Стадия плавки определяется диапазоном израсходованной электроэнергии на текущую завалку, а таблица – текущей завалкой или подвалкой. Расход электроэнергии вычисляется регулятором ARCOS NT и передается в контроллер АСУ ТП ДСП. Таким образом, в системе существует только косвенная обратная связь по расходу электроэнергии. Структура профиля плавки в системе ARCOS представлена таблицей 1.2.

Таблица 1.2.

Структура профиля плавки в системе управления ARCOS

шаг	Корзина 1				Корзина 2				Корзина 3			
	$W_{уд}$	$N_{ТР}$	$N_P$	$N_{PK}$	$W_{уд}$	$N_{ТР}$	$N_P$	$N_{PK}$	$W_{уд}$	$N_{ТР}$	$N_P$	$N_{PK}$
<b>1</b>	$W_{уд11}$	$N_{ТР11}$	$N_{P11}$	$N_{PK11}$	$W_{уд21}$	$N_{ТР21}$	$N_{P21}$	$N_{PK21}$	$W_{уд21}$	$N_{ТР21}$	$N_{P21}$	$N_{PK21}$
<b>2</b>	$W_{уд12}$	$N_{ТР12}$	$N_{P12}$	$N_{PK12}$	$W_{уд22}$	$N_{ТР22}$	$N_{P22}$	$N_{PK22}$	$W_{уд22}$	$N_{ТР22}$	$N_{P22}$	$N_{PK22}$
<b>3</b>	$W_{уд13}$	$N_{ТР13}$	$N_{P13}$	$N_{PK13}$	$W_{уд23}$	$N_{ТР23}$	$N_{P23}$	$N_{PK23}$	$W_{уд23}$	$N_{ТР23}$	$N_{P23}$	$N_{PK23}$
<b>4</b>	$W_{уд14}$	$N_{ТР14}$	$N_{P14}$	$N_{PK14}$	$W_{уд24}$	$N_{ТР24}$	$N_{P24}$	$N_{PK24}$	$W_{уд24}$	$N_{ТР24}$	$N_{P24}$	$N_{PK24}$
<b>5</b>	$W_{уд15}$	$N_{ТР15}$	$N_{P15}$	$N_{PK15}$	$W_{уд25}$	$N_{ТР25}$	$N_{P25}$	$N_{PK25}$	$W_{уд25}$	$N_{ТР25}$	$N_{P25}$	$N_{PK25}$
<b>6</b>	$W_{уд16}$	$N_{ТР16}$	$N_{P16}$	$N_{PK16}$	$W_{уд26}$	$N_{ТР26}$	$N_{P26}$	$N_{PK26}$	$W_{уд26}$	$N_{ТР26}$	$N_{P26}$	$N_{PK26}$

Профиль плавки в системе E.M.P.E.R.E. во многом схож с профилем плавки в системе ARCOS. Переключение ступеней печного трансформатора осуществляется при помощи обратной связи по расходу электроэнергии. В качестве отличительной особенности профиля плавки в данной системе можно выделить возможность более гибкой настройки технологического режима плавки на каждой ступени трансформатора с помощью следующих дополнительных опций: 1) параметр А: 1 – работа в диапазоне коротких дуг; 2 – работа в диапазоне средних дуг; 3 – работа в диапазоне длинных дуг; 0 – без ограниче-

ний; 2) параметр S: предельная скорость перемещения электрода; значение параметра варьируется от 1 до 5; 0 – без ограничений; 3) параметр P – активация интегральной части ПИ-регулятора; 0 – интегральная часть выведена из работы; 4) параметр T – активация режима контроля температуры водоохлаждаемых панелей (0/1); 5) параметр F – активация режима контроля уровня вспененного шлака (0/1). Структура профиля плавки в системе E.M.P.E.R.E представлена таблицей 1.3.

Таблица 1.3.

Структура профиля плавки в системе E.M.P.E.R.E

Шаг	W <sub>уд</sub>	N <sub>TP</sub>	N <sub>P</sub>	A	R	S	T	P	F
<b>Корзина 1</b>									
1.1	W <sub>уд11</sub>	N <sub>TP11</sub>	N <sub>P11</sub>	A <sub>11</sub>	R <sub>11</sub>	S <sub>11</sub>	T <sub>11</sub>	P <sub>11</sub>	F <sub>11</sub>
1.2	W <sub>уд12</sub>	N <sub>TP12</sub>	N <sub>P12</sub>	A <sub>12</sub>	R <sub>12</sub>	S <sub>12</sub>	T <sub>12</sub>	P <sub>12</sub>	F <sub>12</sub>
1.3	W <sub>уд13</sub>	N <sub>TP13</sub>	N <sub>P13</sub>	A <sub>13</sub>	R <sub>13</sub>	S <sub>13</sub>	T <sub>13</sub>	P <sub>13</sub>	F <sub>13</sub>
1.4	W <sub>уд14</sub>	N <sub>TP14</sub>	N <sub>P14</sub>	A <sub>14</sub>	R <sub>14</sub>	S <sub>14</sub>	T <sub>14</sub>	P <sub>14</sub>	F <sub>14</sub>
1.5	W <sub>уд15</sub>	N <sub>TP15</sub>	N <sub>P15</sub>	A <sub>15</sub>	R <sub>15</sub>	S <sub>15</sub>	T <sub>15</sub>	P <sub>15</sub>	F <sub>15</sub>
1.6	W <sub>уд16</sub>	N <sub>TP16</sub>	N <sub>P16</sub>	A <sub>16</sub>	R <sub>16</sub>	S <sub>16</sub>	T <sub>16</sub>	P <sub>16</sub>	F <sub>16</sub>
<b>Корзина 2</b>									
2.1	W <sub>уд21</sub>	N <sub>TP21</sub>	N <sub>P21</sub>	A <sub>21</sub>	R <sub>21</sub>	S <sub>21</sub>	T <sub>21</sub>	P <sub>21</sub>	F <sub>21</sub>
2.2	W <sub>уд22</sub>	N <sub>TP22</sub>	N <sub>P22</sub>	A <sub>22</sub>	R <sub>22</sub>	S <sub>22</sub>	T <sub>22</sub>	P <sub>22</sub>	F <sub>22</sub>
2.3	W <sub>уд23</sub>	N <sub>TP23</sub>	N <sub>P23</sub>	A <sub>23</sub>	R <sub>23</sub>	S <sub>23</sub>	T <sub>23</sub>	P <sub>23</sub>	F <sub>23</sub>
2.4	W <sub>уд24</sub>	N <sub>TP24</sub>	N <sub>P24</sub>	A <sub>24</sub>	R <sub>24</sub>	S <sub>24</sub>	T <sub>24</sub>	P <sub>24</sub>	F <sub>24</sub>
2.5	W <sub>уд25</sub>	N <sub>TP25</sub>	N <sub>P25</sub>	A <sub>25</sub>	R <sub>25</sub>	S <sub>25</sub>	T <sub>25</sub>	P <sub>25</sub>	F <sub>25</sub>
2.6	W <sub>уд26</sub>	N <sub>TP26</sub>	N <sub>P26</sub>	A <sub>26</sub>	R <sub>26</sub>	S <sub>26</sub>	T <sub>26</sub>	P <sub>26</sub>	F <sub>26</sub>
<b>Корзина 3</b>									
3.1	W <sub>уд31</sub>	N <sub>TP31</sub>	N <sub>P31</sub>	A <sub>31</sub>	R <sub>31</sub>	S <sub>31</sub>	T <sub>31</sub>	P <sub>31</sub>	F <sub>31</sub>
3.2	W <sub>уд32</sub>	N <sub>TP32</sub>	N <sub>P32</sub>	A <sub>32</sub>	R <sub>32</sub>	S <sub>32</sub>	T <sub>32</sub>	P <sub>32</sub>	F <sub>32</sub>
3.3	W <sub>уд33</sub>	N <sub>TP33</sub>	N <sub>P33</sub>	A <sub>33</sub>	R <sub>33</sub>	S <sub>33</sub>	T <sub>33</sub>	P <sub>33</sub>	F <sub>33</sub>
3.4	W <sub>уд34</sub>	N <sub>TP34</sub>	N <sub>P34</sub>	A <sub>34</sub>	R <sub>34</sub>	S <sub>34</sub>	T <sub>34</sub>	P <sub>34</sub>	F <sub>34</sub>
3.5	W <sub>уд35</sub>	N <sub>TP35</sub>	N <sub>P35</sub>	A <sub>35</sub>	R <sub>35</sub>	S <sub>35</sub>	T <sub>35</sub>	P <sub>35</sub>	F <sub>35</sub>
3.6	W <sub>уд36</sub>	N <sub>TP36</sub>	N <sub>P36</sub>	A <sub>36</sub>	R <sub>36</sub>	S <sub>36</sub>	T <sub>36</sub>	P <sub>36</sub>	F <sub>36</sub>

В системе HIREG plus от Danieli используется общий профиль плавки, определяющий как режимы работы системы управления перемещения электродов, так и режимы вспомогательных систем управления газокислородными RCB горелками, инжекторов углерода, продувки жидкой стали аргоном, управления газоочисткой, а также систем подачи вспомогательных материалов в расплав. В качестве критерия перехода с одной стадии плавки на другую так же как и в предыдущих случаях используется удельный расход электроэнергии  $W_{уд}$ . В том случае, когда в ДСП используется технология Consteel, предусматривающая непрерывную подачу шихтового материала в ванну печи, дополнительно может быть использован второй критерий – изменяющийся вес жидкой ванны  $G_{MET}$ , который увеличивается в процессе непрерывной подвалки лома. В остальном профиль плавки в системе HIREG Plus, как и профили других систем, упомянутых ранее, не имеют концептуальных отличий от профилей, используемых в системах AR-COS и E.M.P.E.R.E.

Таким образом, основной недостаток профилей плавки, работающих на обратной связи по  $W_{уд}$  заключается в том, что они основаны на количественной оценке завалок, а не на их качественной оценке. Увеличение количества профилей создает трудности для оператора, так как будет сложно объективно оценить состав шихты. По многим причинам состав шихты меняется от завалки к завалке, вследствие чего достоверно оценить стадию плавки основываясь лишь на данных о количестве лома и введенной энергии достаточно сложно. Так, для одинакового количества лома по достижении одного и того же граничного значения  $W_{уд}$  в случае для мелкого лома может идти стадия плавления, тогда как для крупного, содержащего большие куски либо пакеты – только стадия прожига колодцев.

Соответственно, как бы тщательно не был подобран профиль, есть вероятность задания неоптимальных электрических режимов, которые будут сопровождаться неэффективным использованием электроэнергии. В соответствии с этим актуальной задачей является разработка способов диагностики стадий плавки в ДСП, использующих альтернативные электрические и технологические параметры дуговой печи для распознавания условий горения дуг и состояния расплава. Перспективным вариантом является использование для этих целей информации о гармоническом составе напряжений дуг.

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

1. Выполнен анализ структуры современных систем управления электрическим режимом ДСП (УКП), таких как ARCOS, Simelt (Primetals Technologies, ранее Siemens VAI, VAI Fuchs, Vantron, Германия), HI-REG (Danieli, Италия), E.M.P.E.R.E (Amec Spie, Франция), DECTEQ (Ferrotron, Германия), DigitArc (AMI, Мексика), Melt Expert (Primetals Technologies, Германия), Q-REG (Danieli, Италия) и A.R.C.E.L.E.C (Amec Spie, Франция). Анализ показал, что все системы управления имеют свои сильные и слабые стороны, но при этом для всех обозначенных систем характерен недостаток, связанный с отсутствием возможности диагностики стадий плавки в ДСП (оценки стабильности нагрева стали в УКП) и интеллектуального управления процессом переключения  $N_{TR}$ ,  $N_P$  и  $N_{PK}$  в соответствии с критерием, позволяющим судить о реальных технологических процессах, протекающих в ванне печи.

2. Причина данного недостатка кроется в структуре профилей плавки современных систем управления, где переход с одной стадии плавки на другую жестко привязан к определённым граничным значениям  $W_{уд}$ . Данные граничные значения определяются исходя из количественной оценки завалки и не учитывают их качественный состав. Так, профиль плавки, составленный для завалки из крупного лома, может оказаться неприменим для завалки из мелкого лома. Кроме того, важную роль играет распределение шихты в ванне печи при завалке, которое уникально в каждом отдельно взятом случае. В совокупности с тем фактом, что величина  $W_{уд}$  не имеет прямой физической связи со стадией плавления шихты, переключение сочетаний  $N_{TR}$ ,  $N_P$  и  $N_{PK}$  в существующих системах управления может производиться несвоевременно, что приводит к неоптимальному режиму работы установки.

3. Факт наличия данного недостатка в существующих системах управления электрическим режимом обуславливает актуальность разработки систем диагностики стадии плавления шихты, в основе которых лежит применение альтернативного критерия, напрямую связанного с реальными физическими процессами, протекающими в ванне печи. В качестве такого критерия может выступать гармонический состав сигнала напряжения электрической дуги.

## **Глава 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТУРА ШП-125. ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ РАЗРАБОТАННОЙ МОДЕЛИ**

Одним из закономерных этапов в процессе разработки усовершенствованных алгоритмов и системы автоматического управления электрическим режимом ДСП с использованием информации о высших гармониках напряжений дуг является обоснование эффективности применения предлагаемого подхода. Для этой цели, необходимо: 1. Выполнить краткий обзор ШП-125 как объекта исследования с целью определения его основных технических характеристик; 2. Определить основные параметры электрического контура ШП-125, а также разработать его математическую модель; 3. Разработать математическую модель, позволяющую восстанавливать мгновенное значение сигнала напряжения электрической дуги; 4. На базе разработанных моделей выполнить теоретическое и экспериментальное обоснование эффективности применения анализа гармонического состава напряжения дуги для решения задач диагностики стадии плавления шихты с учётом результатов ранее проведённых исследований в аналогичной области для гармонического состава тока дуги. Таким образом, каждой из поставленных локальных задач будет посвящён отдельный подраздел в данной главе.

### **2.1. Краткая характеристика дуговой сталеплавильной печи шахтного типа ШП-125**

Дуговая сталеплавильная печь шахтного типа ШП-125 в настоящее время функционирует на базе Череповецкого металлургического комбината (ПАО «Северсталь», г. Череповец). Общий вид агрегата представлен на рис.2.1. Скрап загружается в печь порционно через шахту с помощью завалочной корзины. Завалочные корзины транспортируются на скраповозах с участка шихты напрямую на участок выплавки. Загрузочный кран снимает корзину со скраповоза и транспортирует её к ШП для завалки или подавки. При этом общий вес шихты варьируется в диапазоне от 135 до 150 т. При шихтовке первой плавки (печь без «болота») масса шихтового материала лежит в диапазоне от 145 до 150 т.

Завалка (подвалка) шихты осуществляется через шахту, в которой в качестве конструктивного элемента предусмотрены специальные удерживающие водоохлаждаемые пальцы, что позволяет осуществлять предварительный нагрев лома отводимыми газами высокой температуры, активно образующихся в процессе расплавления основной массы металлошихты, находящихся в подине, а также за счёт работы стеновых горелок. Впоследствии, отводимые газы также проходят через камеру дожигания, в которой происходит процесс преобразования угарного газа CO в углекислый CO<sub>2</sub>. Благодаря этому достигается существенная экономия электрической энергии, затрачиваемой непосредственно на расплавление. В рамках данной работы важно отметить, что для ШП-125 характерны следующие основные стадии протекания плавки: зажигание дуг, проплавление колодцев, начальная, основная и конечная стадия расплавления завалки и подвалки, а также стадия доводки жидкого металла до температуры выпуска. Для наглядности, общий вид и основные конструктивные особенности дуговой сталеплавильной печи шахтного типа представлены на рис.2.1 и рис.2.2 соответственно. Упрощённая схема электроснабжения объекта приведена в приложении 1.



Рисунок 2.1 - Общий вид дуговой сталеплавильной печи шахтного типа ШП-125

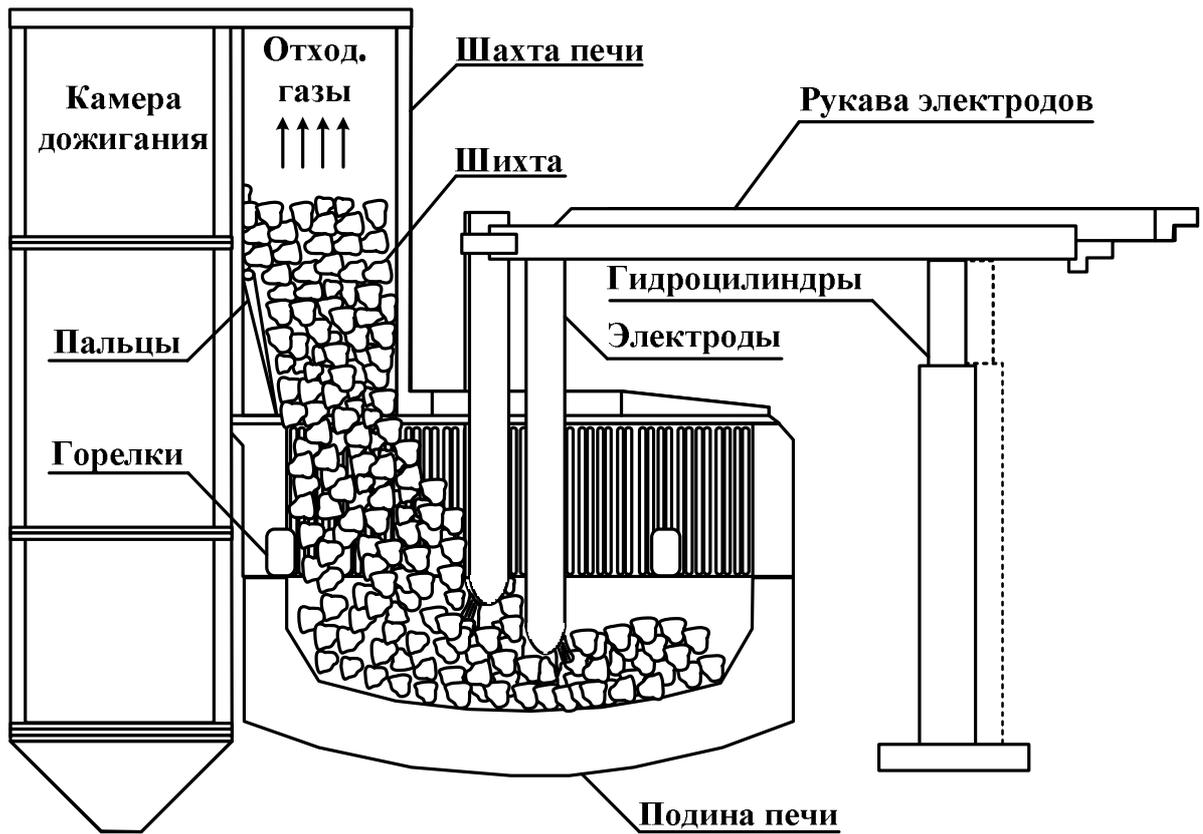


Рисунок 2.2 - Конструкция дуговой сталеплавильной печи шахтного типа

На момент проведения исследований, на базе ШП-125 функционировал печной трансформатор мощностью 85 МВА с 15 ступенями устройства регулирования под нагрузкой (РПН), при этом в процессе эксплуатации печи использовались ступени с 6 по 10. Также отметим, что в составе электрического оборудования ШП-125 отсутствует реактор. Таким образом, основные технические характеристики ПТ ШП-125 сведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1.

Основные технические характеристики ПТ 85 МВА ШП-125

Ступень РПН тр-ра	Полная мощность тр-ра $S$ , МВА	Линейное напряжение на первичной обмотке $U_{1л}$ , кВ	Линейное напряжение на вторичной обмотке $U_{2л}$ , кВ	Напря-жение КЗ $U_{кз}\%$	Кэф. трансформации $K_T$	Номинальный линейный ток на первичной стороне $I_1$ , А	Номинальный линейный ток на первичной стороне $I_2$ , А	Потери КЗ $dP_{кз}$ , кВт
1	67,24	35,0	0,670	22,99	52,24	1109	57938,83	533,43
2	69,35	35,0	0,691	22,15	50,65	1144	57938,83	557,45
3	71,55	35,0	0,713	21,27	49,09	1180	57938,83	575,94
4	73,86	35,0	0,736	20,36	47,55	1218	57938,83	588,92

Ступень РПН тр-ра	Полная мощность тр-ра S, МВА	Линейное напря- жение на первич- ной обмотке $U_{1л}$ , кВ	Линейное напря- жение на вторич- ной обмотке $U_{2л}$ , кВ	Напря-жение КЗ $U_{кз}^{\%}$	Коеф. трансфор- мации $K_T$	Номинальный ли- нейный ток на первичной сторо- не $I_1$ , А	Номинальный ли- нейный ток на первичной сторо- не $I_2$ , А	Потери КЗ $dP_{кз}$ , кВт
5	76,37	35,0	0,761	19,40	45,99	1260	57938,83	596,38
6	79,08	35,0	0,788	18,42	44,42	1305	57938,83	598,32
7	81,89	35,0	0,816	17,39	42,89	1351	57938,83	594,74
8	85,00	35,0	0,847	16,33	41,32	1402	57938,83	585,65
9	85,00	35,0	0,880	15,23	39,77	1402,0	55766,84	571,03
10	85,00	35,0	0,916	14,09	38,21	1402,0	53575,80	550,89
11	85,00	35,0	0,955	12,92	36,65	1402,0	51386,48	525,23
12	85,00	35,0	0,997	11,71	35,11	1402,0	49223,15	494,06
13	85,00	35,0	1,043	10,47	33,56	1402,0	47051,16	457,36
14	85,00	35,0	1,094	9,18	31,99	1402,0	44858,38	415,15
15	85,00	35,0	1,150	7,87	30,43	1402,0	42674,27	367,42

## 2.2. Определение параметров электрического контура ШП-125

Электрический контур ШП-125 может быть представлен схемой замещения, представленной на рис.2.3 [36]. При этом в составе данной схемы приняты следующие обозначения:  $R'_{s1}$ ,  $R'_{s2}$ ,  $R'_{s3}$  – приведённая величина активного сопротивления питающей сети 35 кВ,  $L'_{s1}$ ,  $L'_{s2}$ ,  $L'_{s3}$  – приведённая величина индуктивности питающей сети 35 кВ,  $R'_{TP1}$ ,  $R'_{TP2}$ ,  $R'_{TP3}$  – приведённая величина активного сопротивления обмотки печного трансформатора,  $L'_{TP1}$ ,  $L'_{TP2}$ ,  $L'_{TP3}$  – приведённая величина индуктивности обмотки печного трансформатора,  $R_{KC1}$ ,  $R_{KC2}$ ,  $R_{KC3}$  – активное сопротивление участка короткой сети,  $L_{KC1}$ ,  $L_{KC2}$ ,  $L_{KC3}$  – индуктивное сопротивление участка короткой сети,  $g_{д1}(t)$ ,  $g_{д2}(t)$ ,  $g_{д3}(t)$  – мгновенная проводимость электрической дуги,  $u_{12S}(t)$ ,  $u_{23S}(t)$ ,  $u_{12T}(t)$  – мгновенное линейное напряжение питающей сети,  $u_{12T}(t)$ ,  $u_{23T}(t)$ ,  $u_{12T}(t)$  – мгновенное линейное напряжение, подводимое к печному трансформатору,  $u_{2\_12}(t)$ ,  $u_{23\_13}(t)$ ,  $u_{12T}(t)$  – мгновенное линейное напряжение, подводимое к участку короткой сети,  $\Delta U_{M21}(t)$ ,  $\Delta U_{M31}(t)$ ,  $\Delta U_{M12}(t)$ ,  $\Delta U_{M32}(t)$ ,  $\Delta U_{M13}(t)$ ,  $\Delta U_{M23}(t)$  – мгновенные падения фазных на-

пряжений, обусловленные влиянием взаимной индуктивности между фазами,  $i_{Д1}(t)$ ,  $i_{Д2}(t)$ ,  $i_{Д3}(t)$  – мгновенные значения токов дуг.

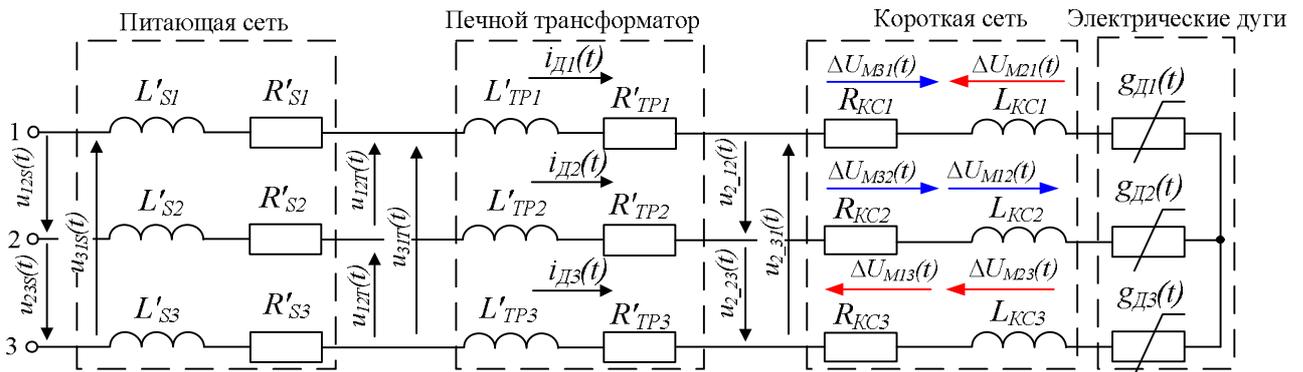


Рисунок 2.3 - Схема замещения электрического контура ШП-125

Для разработки математической модели электрического контура ШП-125 необходимо выполнить расчёт параметров схемы замещения электрического контура. Данный расчёт проводится в несколько этапов, описание которых приведено далее.

### 2.2.1. Определение параметров питающей сети и печного трансформатора

Приведённое значение индуктивности питающей сети рассчитывается в соответствии со следующими формулами:

$$X_S = \frac{U_{ЛНОМ}}{\sqrt{3}I_{КЗ.СР}}, \quad (2.1)$$

$$I_{КЗ.СР} = \frac{I_{КЗ.МАХ} + I_{КЗ.МИН}}{2}, \quad (2.2)$$

$$X'_S = \frac{X_S}{K_{TP}^2}, \quad (2.3)$$

$$L'_S = \frac{X'_S}{2\pi f}, \quad (2.4)$$

где  $U_{ЛНОМ}$  – номинальное значение линейного напряжения на текущей ступени ПТ,  $I_{КЗ.МАХ}$ ,  $I_{КЗ.МИН}$  – максимальный и минимальный токи КЗ соответственно,  $X'_S$  – индуктивное сопротивление питающей сети,  $K_{TP}$  – коэффициент трансформации ПТ,  $f$  – частота питающей сети.

Активное сопротивление питающей сети определяется на основе расчёта параметра  $X_S$  в соответствии со следующим выражением:

$$R'_s = 0,1X'_s. \quad (2.5)$$

Расчёт индуктивностей фаз печного трансформатора  $L'_{TP.1}$ ,  $L'_{TP.2}$ ,  $L'_{S3}$  производится следующим образом:

$$X_{TP} = \frac{U_{K\%} \cdot U_{ЛНОМ}^2 \cdot 10}{S_{НОМ}}, \quad (2.6)$$

$$X'_{TP} = \frac{X_{TP}}{K_{TP}^2}, \quad (2.7)$$

$$L'_{TP} = \frac{X'_{TP}}{2\pi f}, \quad (2.8)$$

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.  $f$  – частота питающей сети,  $K_{TP}$  - коэффициент трансформации.

Активное сопротивление обмоток печного трансформатора  $R'_{TP}$  определяется в соответствии со следующими выражениями:

$$R_{TP} = \frac{\Delta P_{K3} \cdot U_{ЛНОМ}^2 \cdot 1000}{S_{НОМ}^2}, \quad (2.9)$$

$$R'_{TP} = \frac{R_{TP}}{K_{TP}^2}, \quad (2.10)$$

где  $\Delta P_{K3}$  [кВт] – величина потерь активной мощности в меди трансформатора в режиме КЗ.

С учётом параметров питающего трансформатора, а также параметров ПТ ШП-125 85 МВА, приведённых в разделе 2.1, были рассчитаны и сведены в таблице 2.2 параметры схемы замещения электрического контура в части печного трансформатора и питающей сети для ступеней, используемых в процессе плавки (с 6 по 10). Отметим, что параметры схемы замещения питающей сети и печного трансформатора могут быть определены исходя из паспортных данных оборудования. Тем не менее, для определения параметров короткой сети требуется несколько иной подход, который будет рассмотрен в следующем подразделе.

Основные параметры схемы замещения электрического контура ШП-125 в части печного трансформатора и питающей сети

N <sub>ТР</sub>	Параметры печного трансформатора				Параметры питающей сети	
	R' <sub>ТР</sub> , мОм	Z' <sub>ТР</sub> , мОм	X' <sub>ТР</sub> , мОм	L' <sub>ТР</sub> , мГн	R' <sub>с</sub> , мОм	L' <sub>с</sub> , мГн
6	0,0594	1,4464	1,4451	4,600·10 <sup>-3</sup>	0,0685	2,181·10 <sup>-3</sup>
7	0,0591	1,4140	1,4128	4,383·10 <sup>-3</sup>	0,0735	2,339·10 <sup>-3</sup>
8	0,0582	1,3783	1,3770	4,412·10 <sup>-3</sup>	0,0792	2,520·10 <sup>-3</sup>
9	0,0612	1,3875	1,3862	4,423·10 <sup>-3</sup>	0,0854	2,720·10 <sup>-3</sup>
10	0,0640	1,3909	1,3894	4,209·10 <sup>-3</sup>	0,0926	2,947·10 <sup>-3</sup>

### 2.2.2. Определение параметров короткой сети и коэффициентов взаимной индуктивности

В подавляющем большинстве исследований принимается в качестве допущения факт отсутствия взаимной индуктивности между фазами печи. С учётом этого, расчёт параметров короткой сети производится по следующим формулам:

$$Z_{KC\_i} = \frac{U_{2\Phi\_i}}{I_{Д\_i}}, \quad (2.11)$$

$$R_{KC\_i} = \frac{P_{2\_i}}{I_{Д\_i}^2}, \quad (2.12)$$

$$X_{KC\_i} = \sqrt{Z_{KC\_i}^2 - R_{KC\_i}^2}, \quad (2.13)$$

Где  $i=\{1,2,3\}$  – номер фазы,  $U_{2\Phi\_i}$  – фазное напряжение на вторичной стороне печного трансформатора,  $I_{Д\_i}$  – ток электрической дуги,  $P_{2\_i}$  – активная мощность на вторичной стороне печного трансформатора,  $Z_{KC\_i}$  – полное сопротивление участка короткой сети,  $R_{KC\_i}$  – активное сопротивление участка короткой сети,  $X_{KC\_i}$  – реактивное сопротивление участка короткой сети.

Тем не менее, применение данного способа даёт значительную погрешность. Это связано с высоким влиянием явления переноса мощности между фа-

зами, а также смещением нейтральной точки на векторной диаграмме. Поскольку одной из задач данного диссертационного исследования является разработка математической модели, позволяющей рассчитывать величину мгновенного значения напряжения электрической дуги, требуется прибегнуть к иной методике расчёта параметров короткой сети, учитывающей влияние взаимной индуктивности.

Наиболее предпочтительной является методика расчёта на основании результатов экспериментов двухфазного и трёхфазного короткого замыкания с сопутствующим контролем положения консолей при контакте электродов с расплавом [37-38].

В соответствии с данной методикой, расчёт параметров короткой сети производится с использованием следующего набора формул:

$$Z_{2\_12} = \frac{S_{2\_1} + S_{2\_2}}{0,25(I_{2\_1} + I_{2\_2})^2} = \frac{U_{2\phi\_1} \cdot I_{2\_1} + U_{2\phi\_2} \cdot I_{2\_2}}{0,25(I_{2\_1} + I_{2\_2})^2}, \quad (2.14)$$

$$Z_{2\_23} = \frac{S_{2\_2} + S_{2\_3}}{0,25(I_{2\_2} + I_{2\_3})^2} = \frac{U_{2\phi\_2} \cdot I_{2\_2} + U_{2\phi\_3} \cdot I_{2\_3}}{0,25(I_{2\_2} + I_{2\_3})^2}, \quad (2.15)$$

$$Z_{2\_13} = \frac{S_{2\_1} + S_{2\_3}}{0,25(I_{2\_1} + I_{2\_3})^2} = \frac{U_{2\phi\_1} \cdot I_{2\_1} + U_{2\phi\_3} \cdot I_{2\_3}}{0,25(I_{2\_1} + I_{2\_3})^2}, \quad (2.16)$$

где  $Z_{2\_12}$ ,  $Z_{2\_23}$ ,  $Z_{2\_31}$  – полные сопротивления замкнутого контура в каждом из трёх режимов двухфазного КЗ соответственно;  $S_{2\_1}, S_{2\_2}, S_{2\_3}$  – полные фазные мощности на вторичной стороне печного трансформатора в фазах «1», «2» и «3» соответственно;  $S_{2\_1}, S_{2\_2}, S_{2\_3}$  – полные фазные мощности на вторичной стороне печного трансформатора в фазах «1», «2» и «3» соответственно;  $U_{2\phi_1}, U_{2\phi_2}, U_{2\phi_3}$  – фазные напряжения на вторичной стороне печного трансформатора в фазах «1», «2» и «3» соответственно;  $I_{2\_1}, I_{2\_2}, I_{2\_3}$  – значения токов, полученных с помощью датчиков Роговского, установленных на каждой из трёх фаз.

$$R_{2\_12} = \frac{P_{2\_1} + P_{2\_2}}{0,25 \cdot (I_{2\_1} + I_{2\_2})^2}, \quad (2.17)$$

$$R_{2\_23} = \frac{P_{2\_2} + P_{2\_3}}{0,25 \cdot (I_{2\_2} + I_{2\_3})^2}, \quad (2.18)$$

$$R_{2\_13} = \frac{P_{2\_1} + P_{2\_3}}{0,25 \cdot (I_{2\_1} + I_{2\_3})^2}, \quad (2.19)$$

где  $R_{2\_12}$ ,  $R_{2\_23}$ ,  $R_{2\_13}$  - активные сопротивления замкнутого контура в каждом из трёх режимов двухфазного КЗ соответственно;  $P_{2\_1}$ ,  $P_{2\_2}$ ,  $P_{2\_3}$  - фазные активные мощности на вторичной стороне печного трансформатора в фазах «1», «2» и «3» соответственно.

$$Z_{2\_1} = \frac{Z_{2\_12} + Z_{2\_31} - Z_{2\_23}}{2}, \quad (2.20)$$

$$Z_{2\_2} = \frac{Z_{2\_12} + Z_{2\_23} - Z_{2\_31}}{2}, \quad (2.21)$$

$$Z_{2\_3} = \frac{Z_{2\_23} + Z_{2\_31} - Z_{2\_12}}{2}, \quad (2.22)$$

$$R_{2\_1} = \frac{R_{2\_12} + R_{2\_31} - R_{2\_23}}{2}, \quad (2.23)$$

$$R_{2\_2} = \frac{R_{2\_12} + R_{2\_23} - R_{2\_31}}{2}, \quad (2.24)$$

$$R_{2\_3} = \frac{R_{2\_23} + R_{2\_31} - R_{2\_12}}{2}, \quad (2.25)$$

$$X_{2\_1} = \sqrt{Z_{2\_1}^2 - R_{2\_1}^2}, \quad (2.26)$$

$$X_{2\_2} = \sqrt{Z_{2\_2}^2 - R_{2\_2}^2}, \quad (2.27)$$

$$X_{2\_3} = \sqrt{Z_{2\_3}^2 - R_{2\_3}^2}, \quad (2.28)$$

где  $Z_{2\_1}$ ,  $Z_{2\_2}$ ,  $Z_{2\_3}$  - полное сопротивление участков короткой сети фаз «1», «2» и «3» соответственно;  $R_{2\_1}$ ,  $R_{2\_2}$ ,  $R_{2\_3}$  - активное сопротивление участков короткой сети фаз «1», «2» и «3» соответственно;  $X_{2\_1}$ ,  $X_{2\_2}$ ,  $X_{2\_3}$  - реактивное сопротивление участков короткой сети фаз «1», «2» и «3» соответственно.

Ранее упомянутая схема корректного взаимного расположения хомутов электрододержателей и рукавов приведена на рис.2.4. Соответствующая схема эксперимента при использовании описанной методики приведена на рис.2.5.



Рисунок 2.4 - Корректное взаимное расположение хомутов (а) и рукавов электродов (б) при проведении опытов КЗ

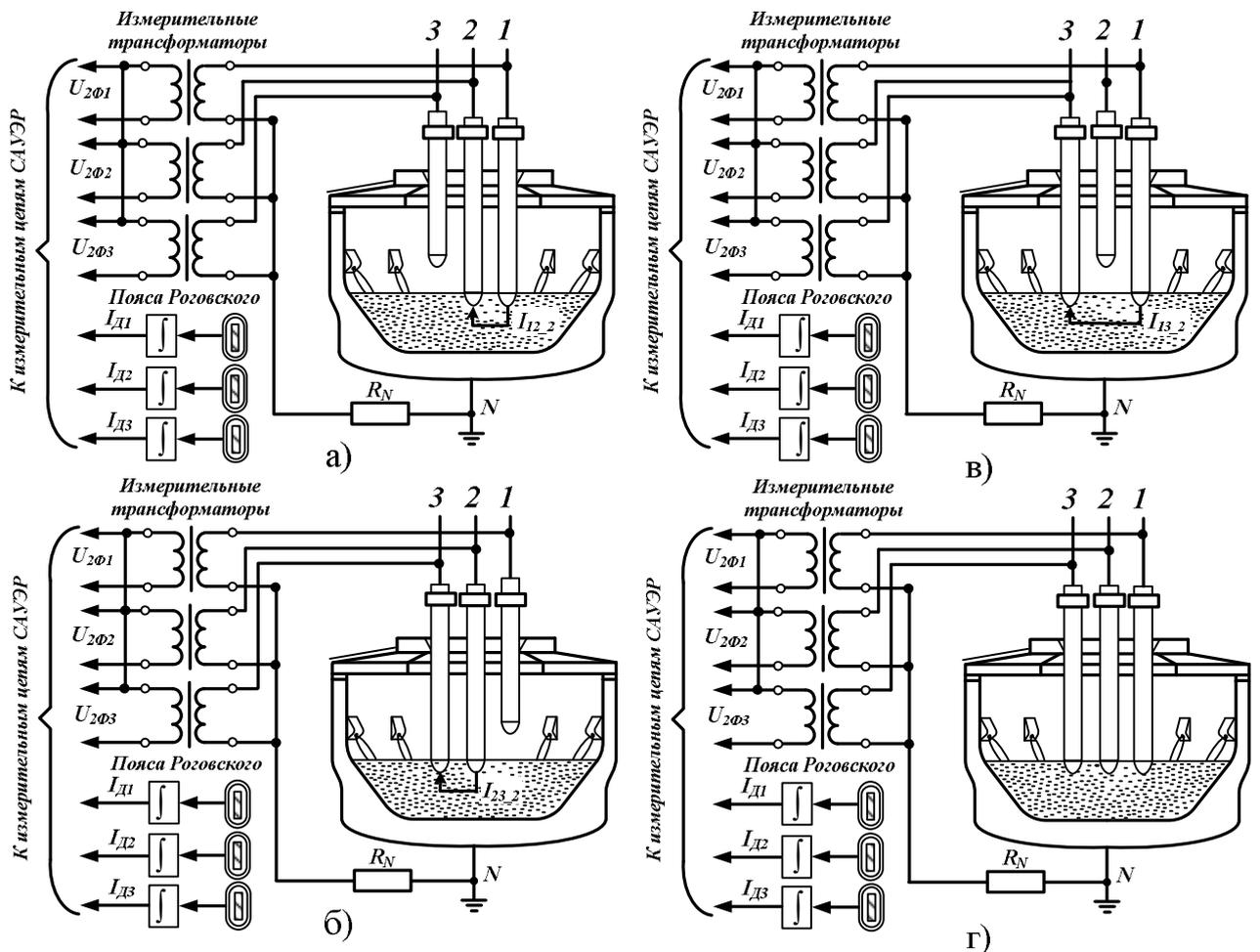


Рисунок 2.5 - Схема проведения экспериментов двухфазных (а-в) и трёхфазного (г) короткого замыкания с полным погружением электродов в расплав и сопутствующим контролем взаимного расположения хомутов и рукавов электродов

В свою очередь, определение величины коэффициентов взаимной индуктивности производится исходя из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} R_{ПЕР.1} = \omega [M_{12} \frac{I_2}{I_1} \cos(\alpha_{12} - \frac{\pi}{2}) - M_{13} \frac{I_3}{I_1} \cos(\alpha_{13} - \frac{\pi}{2})] \\ X_{ПЕР.1} = -\omega [M_{12} \frac{I_2}{I_1} \sin(\alpha_{12} - \frac{\pi}{2}) - M_{13} \frac{I_3}{I_1} \sin(\alpha_{13} - \frac{\pi}{2})] \end{cases}, \quad (2.29)$$

где  $R_{ПЕР.}$  - активное сопротивление переноса,  $X_{ПЕР.}$  - индуктивное сопротивление переноса,  $\omega$  - частота питающей сети;  $I_1, I_2, I_3$  - действующие значения тока электрической дуги в каждой из трёх фаз;  $M_{12}, M_{13}$  - взаимные индуктивности между фазами «1» и «2», «1» и «3», соответственно;  $\alpha_{12}, \alpha_{13}$  - углы между векторами токов в фазах «1» и «2», «1» и «3», соответственно.

В случае двухфазного КЗ между фазами «1» и «2» (рис.2.5.а) действующие значения токов дуг  $I_1$  и  $I_2$  равны между собой, а угол между векторами токов составляет  $180^\circ$ . С учётом того, что  $I_3=0$ , система (2.29) трансформируется в следующий вид:

$$\begin{cases} R_{ПЕР.1} = 0 \\ X_{ПЕР.1} = \omega M_{12} \end{cases}, \quad (2.30)$$

В случае КЗ между фазами «2» и «3» (рис.2.5.б), «1» и «3» (рис.2.5.в) результирующее выражение будет аналогично выражению (2.30).

Для определения параметров короткой сети и взаимных индуктивностей, на базе ШП-125 был реализован эксперимент, схема которого представлена на рис.2.5. Результатом эксперимента являются осциллограммы, полученные с помощью регистратора электрических сигналов РЭС-3, приведённые на рис.2.6.

На основе данных осциллограмм были получены численные результаты экспериментов, а также выполнен промежуточный расчёт по ранее описанным формулам. Итоговый расчёт параметров короткой сети показал, что  $R_{КС1}=0,382$  мОм,  $R_{КС2}=0,313$  мОм,  $R_{КС3}=0,378$  мОм,  $X_{КС1}=2,881$  мОм,  $X_{КС2}=2,704$  мОм,  $X_{КС3}=2,757$  мОм. В соответствии с формулой (2.30), также были определены реактивные сопротивления взаимной индуктивности между фазами:  $X_{M12}=0,445$  мОм,  $X_{M23}=0,4275$  мОм,  $X_{M13}=0,0625$  мОм.

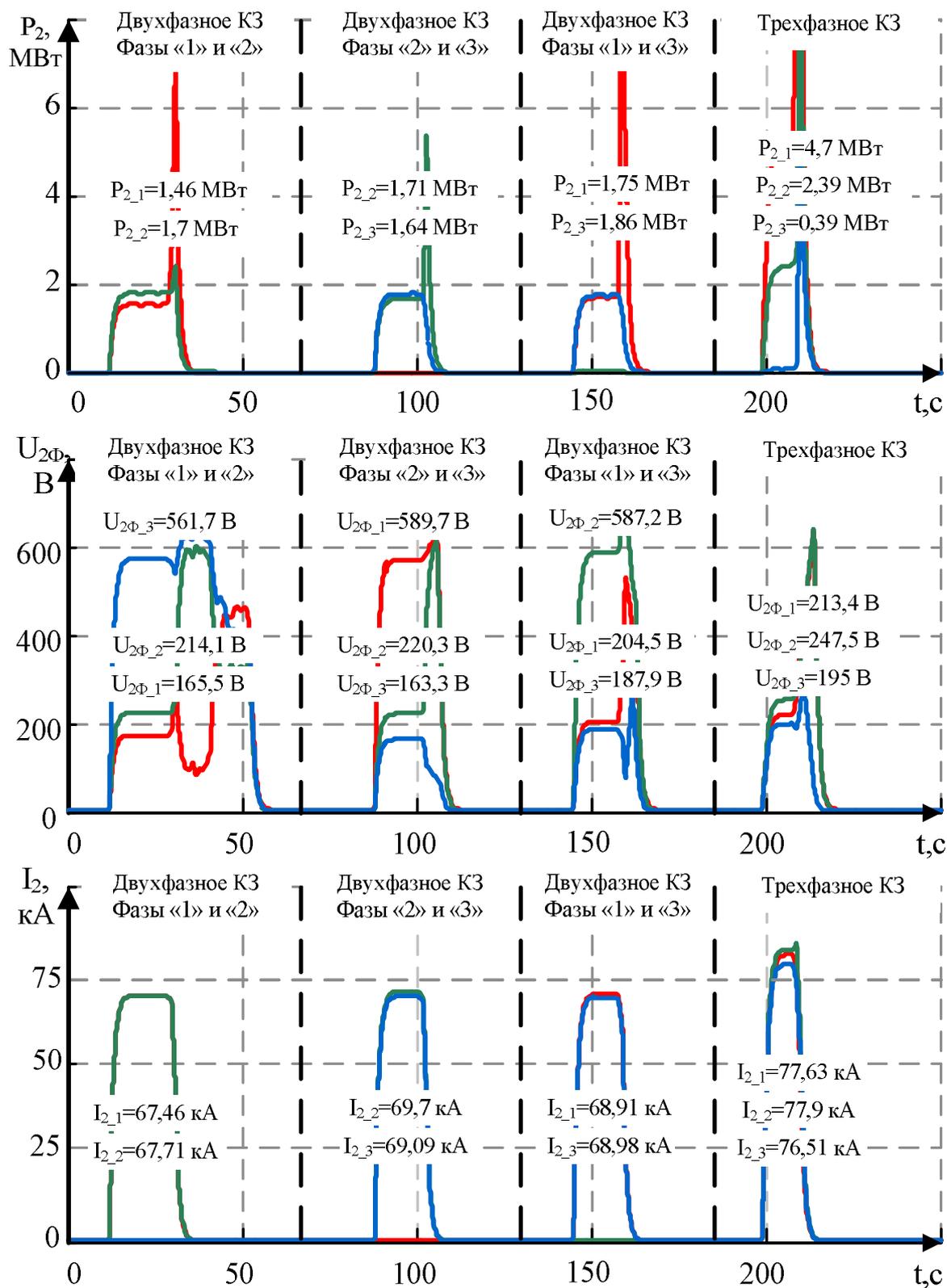


Рисунок 2.6 - Осциллограммы сигналов в фазах «1», «2», «3» при эксперименте по определению электрических параметров короткой сети и взаимных индуктивностей ШП-125: а) фазных активных мощностей на вторичной стороне ПТ  $P_2$ ; б) фазных напряжений на вторичной стороне ПТ  $U_{2\phi}$ ; в) сигналов токов на вторичной стороне ПТ  $I_2$ , полученных с помощью датчиков Роговского

Для наглядности, результаты промежуточных расчётов, полученные в ходе определения параметров короткой сети и реактивных сопротивлений взаимной индуктивности сведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2.

Результаты экспериментов двухфазных и трёхфазного КЗ ШП-125

Параметр	Двухфазное КЗ (фазы «1» и «2»)			Двухфазное КЗ (фазы «2» и «3»)			Двухфазное КЗ (фазы «1» и «3»)			Трёхфазное КЗ		
	«1»	«2»	«3»	«1»	«2»	«3»	«1»	«2»	«3»	«1»	«2»	«3»
$U_{2\Phi}$ [В]	165,5	214,1	561,7	589,7	220,3	163,3	204,5	587,2	187,9	213,4	247,5	195
$I_2$ [кА]	67,46	67,61	0,06	0,34	69,7	69,09	68,91	0,00	68,98	77,63	77,9	76,51
$S_2$ [МВА]	11,17	14,48	0,04	0,2	15,36	11,28	14,09	0,00	12,86	16,57	19,28	14,92
$P_2$ [МВт]	1,46	1,7	-0,03	0,17	1,71	1,64	1,75	0,00	1,86	4,7	2,39	0,39
$Z_2$ [МОм]	2,453	3,167	-	-	3,161	2,364	2,968	-	2,724	2,749	3,177	2,549
$X_{2\_23}$ [МОм]	2,43	3,14	-	-	3,14	2,34	2,94	-	2,70	2,64	3,15	2,55
$R_{2\_23}$ [МОм]	0,32	0,37	-	-	0,35	0,34	0,37	-	0,39	0,78	0,39	0,07

### 2.3. Построение математической модели электрического контура ШП-125

Для построения математической модели [39-44] электрического контура ШП-125, на основании первого и второго законов Кирхгофа для схемы замещения, представленной на рис.2.3, запишем следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} u'_{125}(t) = -i_{D1}(t)(R'_{S1} + R'_{TP1} + R_{KC1}) - \frac{di_{D1}(t)}{dt}(L'_{S1} + L'_{TP1} + L_{KC1}) + \Delta U_{M21} - \Delta U_{M31} + \\ + i_{D2}(t)(R'_{S2} + R'_{TP2} + R_{KC2}) + \frac{di_{D2}(t)}{dt}(L'_{S2} + L'_{TP2} + L_{KC2}) + \Delta U_{M32}(t) + \Delta U_{M12}(t) - u_{D1}(t) + u_{D2}(t) \\ u'_{235} = -i_{D2}(t)(R'_{S2} + R'_{TP2} + R_{KC2}) - \frac{di_{D2}(t)}{dt}(L'_{S2} + L'_{TP2} + L_{KC2}) - \Delta U_{M32}(t) - \Delta U_{M12}(t) \\ + i_{D3}(t)(R'_{S3} + R'_{TP3} + R_{KC3}) + \frac{di_{D3}(t)}{dt}(L'_{S3} + L'_{TP3} + L_{KC3}) - \Delta U_{M13}(t) - \Delta U_{M23}(t) - U_{D2}(t) + U_{D3}(t) \\ i_{D2}(t) = -i_{D1}(t) - i_{D3}(t) \end{array} \right. , \quad (2.31)$$

Здесь мгновенные падения фазных напряжений, обусловленные влиянием взаимной индуктивности между фазами, определяются по следующим формулам:

$$\Delta U_{M12}(t) = M_{12} \frac{di_{D1}(t)}{dt}, \quad (2.32)$$

$$\Delta U_{M21}(t) = M_{12} \frac{di_{D2}(t)}{dt}, \quad (2.33)$$

$$\Delta U_{M23}(t) = M_{23} \frac{di_{D2}(t)}{dt}, \quad (2.34)$$

$$\Delta U_{M32}(t) = M_{23} \frac{di_{D3}(t)}{dt}, \quad (2.35)$$

$$\Delta U_{M13}(t) = M_{13} \frac{di_{D1}(t)}{dt}, \quad (2.36)$$

$$\Delta U_{M31}(t) = M_{13} \frac{di_{D3}(t)}{dt}. \quad (2.37)$$

Электрическая дуга в математическом выражении может быть представлена дифференциальным уравнением мгновенной проводимости (уравнением Касси) [45]:

$$\Theta_D(t) \frac{dg_D(t)}{dt} = \left( \frac{u_D^2(t)}{E_D^2(t)} - 1 \right) g_D(t) dt, \quad (2.38)$$

где  $g_D(t)$  – мгновенное значение проводимости электрической дуги,  $\Theta_D$  – тепловая постоянная времени электрической дуги,  $E_D(t)$  – противо-ЭДС электрической дуги.

Противо-ЭДС электрической дуги, в свою очередь, определяется по следующей формуле:

$$E_D = \begin{cases} K_{BЭ}(\alpha + \beta L_D), i_D(t) > 0 \\ \alpha + \beta L_D, i_D(t) < 0 \end{cases}, \quad (2.39)$$

где  $\alpha$  – падение напряжения в приэлектродных областях,  $\beta$  – градиент напряжения дугового столба,  $L_D$  – длина электрической дуги,  $K_{BЭ}$  – коэффициент вентильного эффекта.

Параметр  $K_{BЭ}$ , определяет отношение величины противо-ЭДС дуги в момент прохождения положительной полуволны мгновенного значения тока дуги к величине противо-ЭДС дуги в момент прохождения отрицательной полуволны:

$$K_{BЭ} = \frac{E_{D+}}{E_{D-}} = \frac{I_{mD+}}{I_{mD-}}, \quad (2.40)$$

где  $E_{D+}$ ,  $E_{D-}$  – противо-ЭДС дуги в период прохождения положительной и отрицательной полуволны тока дуги соответственно,  $I_{mD+}$ ,  $I_{mD-}$  – амплитуда положи-

тельной и отрицательной полуволны сигнала мгновенного значения тока дуги соответственно.

Таким образом, система уравнений, описывающая полную математическую модель электрического контура ШП-125, на основе которой построена структурная схема на рис.2.7, имеет следующую форму:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 u_{Д1}(t) = -u'_{12S}(t) - i_{Д1}(t)(R'_{S1} + R'_{TP1} + R_{KC1}) - \frac{di_{Д1}(t)}{dt}(L'_{S1} + L'_{TP1} + L_{KC1}) + \Delta U_{M21} - \Delta U_{M31} + \\
 + i_{Д2}(t)(R'_{S2} + R'_{TP2} + R_{KC2}) + \frac{di_{Д2}(t)}{dt}(L'_{S2} + L'_{TP2} + L_{KC2}) + \Delta U_{M32}(t) + \Delta U_{M12}(t) + u_{Д2}(t) \\
 u_{Д3}(t) = u'_{23S} + i_{Д2}(t)(R'_{S2} + R'_{TP2} + R_{KC2}) + \frac{di_{Д2}(t)}{dt}(L'_{S2} + L'_{TP2} + L_{KC2}) + \Delta U_{M32}(t) + \Delta U_{M12}(t) \\
 - i_{Д3}(t)(R'_{S3} + R'_{TP3} + R_{KC3}) - \frac{di_{Д3}(t)}{dt}(L'_{S3} + L'_{TP3} + L_{KC3}) + \Delta U_{M13}(t) + \Delta U_{M23}(t) + u_{Д2}(t) \\
 \Delta U_{M12}(t) = M_{12} \frac{di_{Д1}(t)}{dt} \\
 \Delta U_{M21}(t) = M_{12} \frac{di_{Д2}(t)}{dt} \\
 \Delta U_{M23}(t) = M_{23} \frac{di_{Д2}(t)}{dt} \\
 \Delta U_{M13}(t) = M_{13} \frac{di_{Д1}(t)}{dt} \\
 \Delta U_{M31}(t) = M_{13} \frac{di_{Д3}(t)}{dt} \\
 \Theta_{Д1}(t) \frac{dg_{Д1}(t)}{dt} = \left( \frac{u_{Д1}^2(t)}{E_{Д1}^2(t)} - 1 \right) g_{Д1}(t) dt \\
 \Theta_{Д2}(t) \frac{dg_{Д2}(t)}{dt} = \left( \frac{u_{Д2}^2(t)}{E_{Д2}^2(t)} - 1 \right) g_{Д2}(t) dt \\
 \Theta_{Д2}(t) \frac{dg_{Д2}(t)}{dt} = \left( \frac{u_{Д2}^2(t)}{E_{Д2}^2(t)} - 1 \right) g_{Д2}(t) dt \\
 E_{Д1} = \begin{cases} K_{BЭ1}(\alpha + \beta L_{Д1}), i_{Д1}(t) > 0 \\ \alpha + \beta L_{Д1}, i_{Д1}(t) < 0 \end{cases} \\
 E_{Д2} = \begin{cases} K_{BЭ2}(\alpha + \beta L_{Д2}), i_{Д2}(t) > 0 \\ \alpha + \beta L_{Д2}, i_{Д2}(t) < 0 \end{cases} \\
 E_{Д3} = \begin{cases} K_{BЭ3}(\alpha + \beta L_{Д3}), i_{Д3}(t) > 0 \\ \alpha + \beta L_{Д3}, i_{Д3}(t) < 0 \end{cases}
 \end{array} \right. \quad (2.41)$$

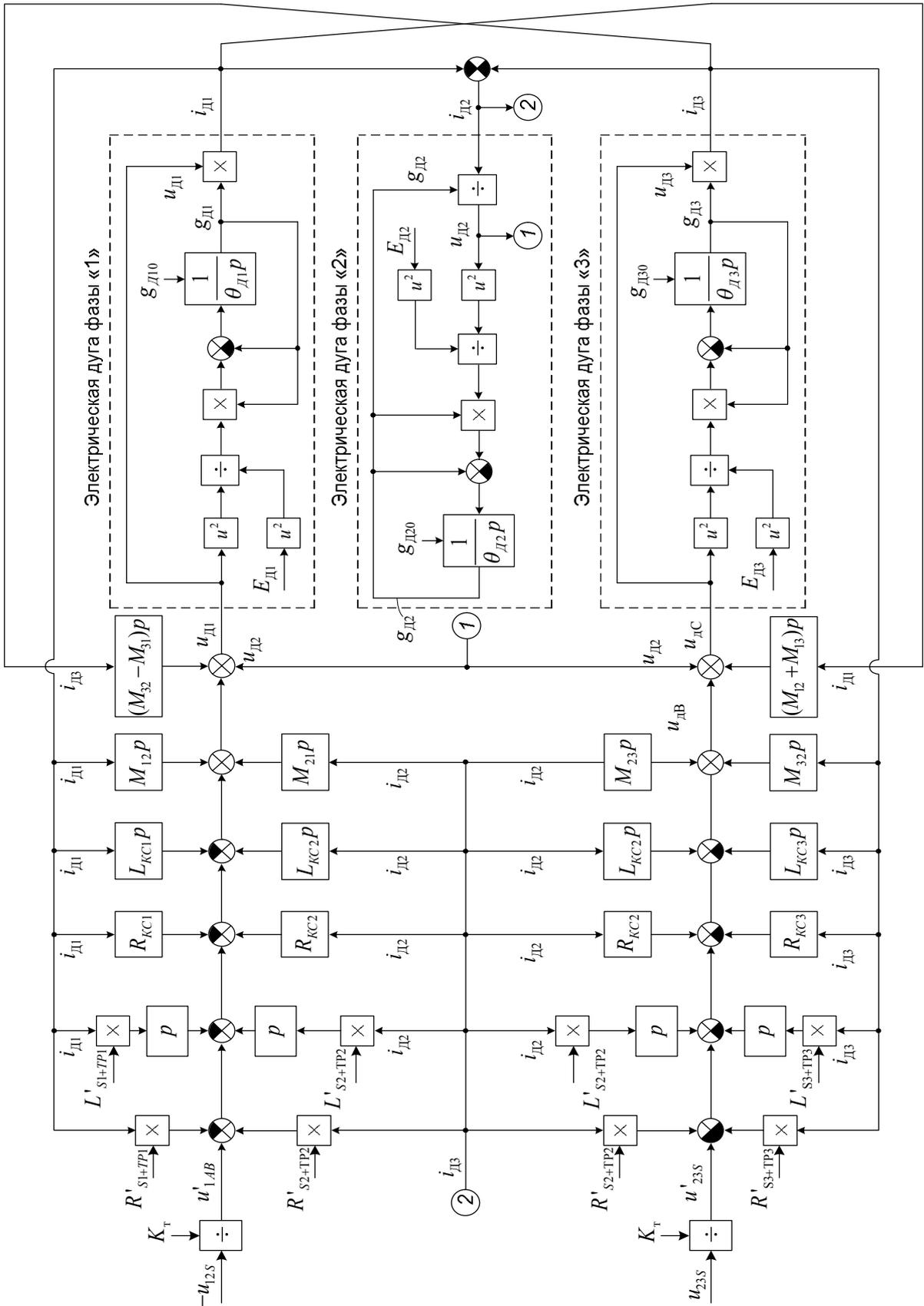


Рисунок 2.7 - Структурная схема математической модели электрического контура ШП-125

Для оценки адекватности математической модели, повторим с её использованием эксперименты двухфазных и трёхфазных КЗ. Результаты моделирования сведены в таблице 2.3 по аналогии с таблицей 2.2. Сравнительный анализ двух таблиц показал, что численные результаты экспериментов по двухфазным и трёхфазному КЗ на разработанной модели соответствует результатам, полученным на действующем технологическом оборудовании, что позволяет судить о её адекватности и применимости для решения дальнейших задач.

Таблица 2.3.

Результаты экспериментов двухфазных и трёхфазного КЗ ШП-125, полученные с использованием математической модели

Параметр	Двухфазное КЗ (фазы «1» и «2»)			Двухфазное КЗ (фазы «2» и «3»)			Двухфазное КЗ (фазы «1» и «3»)			Трёхфазное КЗ		
	«1»	«2»	«3»	«1»	«2»	«3»	«1»	«2»	«3»	«1»	«2»	«3»
$U_{2\Phi}$ [В]	165,1	211,4	562,8	575,4	214	160,9	212,1	604,9	194,5	222,3	251,2	199,4
$I_2$ [кА]	66,53	66,53	0,00	0,00	67,72	67,72	71,1	0,00	71,1	78,54	79,25	79,12
$S_2$ [МВА]	10,99	14,07	0,00	0,00	14,49	10,9	15,08	0,00	13,83	17,46	19,91	15,78
$P_2$ [МВт]	1,989	1,73	0,00	0,00	1,79	2,033	2,3	0,00	2,263	5,5	2,52	0,79
$Z_2$ [мОм]	2,482	3,178	-	-	3,160	2,376	2,983	-	2,736	2,830	3,170	2,520
$X_{2\_23}$ [мОм]	2,44	3,15	-	-	3,14	2,33	2,95	-	2,70	2,69	3,14	2,52
$R_{2\_23}$ [мОм]	0,45	0,39	-	-	0,39	0,44	0,45	-	0,45	0,89	0,40	0,13

Отметим, что адекватность математической модели также подтверждается результатами статистической оценки. Так, для  $N_{TP}=9$  и  $N_{PK}=5$  и  $N_{TP}=8$  и  $N_{PK}=4$  с помощью математической модели электрического контура, а также упрощённой математической модели поддержания заданной уставки  $Z_{2\Phi}$  в соответствии действующему профилю плавки ШП-125, были получены характеристики зависимости суммарной активной мощности дуг от среднего значения тока дуги по трём фазам  $P_{д\sum}(I_{д.ср})$  с нанесением моделируемых рабочих точек, где в первом случае  $P_{д\sum}=51,85$  МВт и  $I_{д.ср}=53,4$  кА, а во втором случае  $P_{д\sum}=57,67$  МВт и  $I_{д.ср}=58,67$  кА.

Далее, на данные характеристики были наложены экспериментальные массивы рабочих точек с объёмом выборки  $n=400$  и  $n=750$ . Несмещённые оценки математического ожидания данных выборок по суммарной активной мощности дуг составили 51,41 МВт и 57,52 МВт, а по среднему току дуг 52,93 кА и 58,54 кА. В свою очередь, несмещённые оценки стандартного отклонения по суммарной активной мощности дуг составили 9,24 МВт и 2,45 МВт, а по среднему значению токов дуг 18,23 кА и 7,52 кА.

Адекватность разработанной математической модели может быть подтверждена истинностью гипотезы о том, что моделируемая рабочая точка попадает в доверительный интервал оценки математического ожидания экспериментального массива как по среднему значению токов дуг, так и по суммарной мощности дуг. Границы доверительного интервала могут быть определены в соответствии со следующими выражениями:

$$\bar{P}_{д.ср} - z_{\alpha} \frac{\sigma_P}{\sqrt{n}} < \mu_P < \bar{P}_{д.ср} + z_{\alpha} \frac{\sigma_P}{\sqrt{n}}, \quad (2.42)$$

$$\bar{I}_{д.ср} - z_{\alpha} \frac{\sigma_I}{\sqrt{n}} < \mu_I < \bar{I}_{д.ср} + z_{\alpha} \frac{\sigma_I}{\sqrt{n}}, \quad (2.43)$$

где  $\bar{P}_{д.ср}$ ,  $\bar{I}_{д.ср}$  - несмещённая оценка математического ожидания экспериментального массива по суммарной активной мощности и среднему току;  $Z_{\alpha}$  - критическое значение стандартного нормального распределения (для уровня значимости  $\alpha=0,05$  составляет 1,96);  $n$  - объём выборки;  $\mu_P$ ,  $\mu_I$  - математическое ожидание экспериментального массива по суммарной активной мощности и среднему току.

В результате, для  $N_{ТП}=9$  и  $N_{РК}=5$  получены следующие доверительные интервалы для экспериментального массива данных:

$$51,39 \text{ МВт} < \mu_P < 52,32 \text{ МВт}, \quad (2.44)$$

$$52,91 \text{ кА} < \mu_I < 53,25 \text{ кА}. \quad (2.45)$$

Для сочетания  $N_{ТП}=8$  и  $N_{РК}=4$ , в свою очередь, получены следующие доверительные интервалы:

$$57,52 \text{ МВт} < \mu_P < 57,69 \text{ МВт}, \quad (2.46)$$

$$52,53 \text{ кА} < \mu_I < 58,94 \text{ кА}. \quad (2.47)$$

Рассчитанные значения границ доверительных интервалов подтверждают гипотезу об адекватности разработанной математической модели электрического контура ШП-125, что наглядно продемонстрировано с помощью рис.2.8.

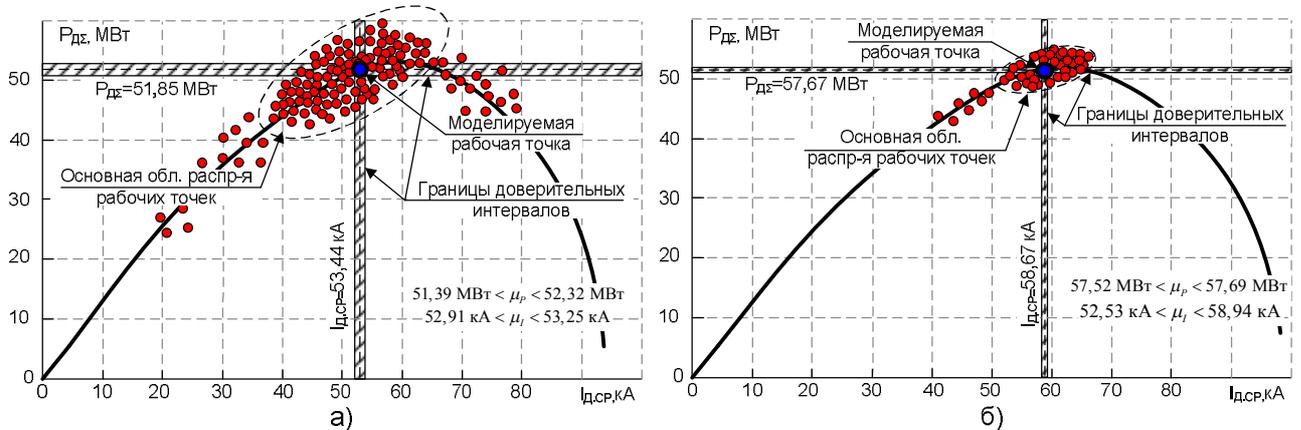


Рис.2.8. Характеристика  $P_{дз}(I_{дср})$  с рабочей точкой, полученная на математической модели, с нанесением фактической области распределения рабочих точек и доверительных интервалов для: а)  $N_{ТР}=9$  и  $N_{РК}=5$  на начальной стадии плавления шихты; б)  $N_{ТР}=8$  и  $N_{РК}=4$  на конечной стадии плавления шихты

Помимо оценки адекватности, особую важность представляет оценка влияния учёта взаимной индуктивности в математической модели на электрические характеристики. Рассмотрим случай, когда степень печного трансформатора  $N_{ТР}=7$ , а номер рабочей кривой  $N_{РК}=5$ . В соответствии с действующим на объекте профилем плавки системы управления электрическим режимом ARCOS (Primetals Technologies), данному сочетанию соответствует набор уставок сопротивления электрической дуги  $R_{д1.зАд}=6,35$  мОм,  $R_{д2.зАд}=6,25$  мОм,  $R_{д3.зАд}=6,5$  мОм.

Для данных значений уставок был проведён расчёт электрических характеристик печи  $P_{д}=f(I_{д})$ ,  $КИФ=f(I_{д})$  и  $КИН=f(I_{д})$  на математической модели как с учётом, так и без учёта взаимной индуктивности, с последующим нанесением рабочей точки (рис.2.9).

Активная мощность электрической дуги  $P_{д}$  определяется по формуле:

$$P_{д} = P_2 - \Delta P, \quad (2.48)$$

где  $P_2$  – активная мощность на вторичной стороне печного трансформатора,  $\Delta P$  – потери активной мощности на участке короткой сети.

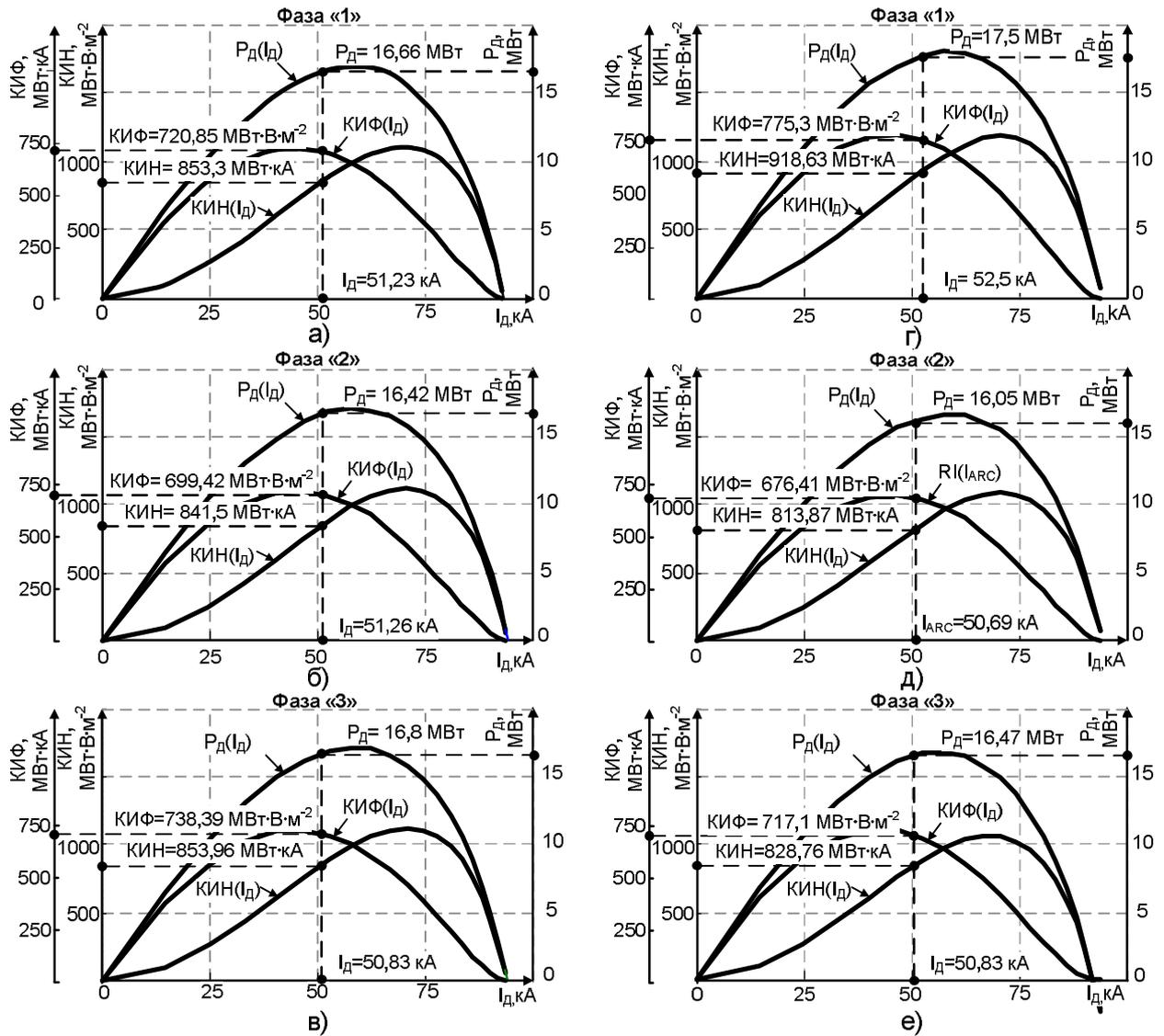


Рисунок 2.9 - электрические характеристики печи в фазах «1», «2» и «3» соответственно с нанесением рабочей точки: а,б,в – без учёта влияния взаимной индуктивности; г,д,е – с учётом влияния взаимной индуктивности

Параметры  $P_2$  и  $\Delta P$  определяются в соответствии со следующими выражениями:

$$P_2 = \frac{1}{T} \int_0^T U_{2\phi}(t) I_d(t) dt, \quad (2.49)$$

$$\Delta P = I_d^2 \cdot R_{КС}, \quad (2.50)$$

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 износа футеровки КИФ определяется в соответствии со следующим выражением:

$$КИФ = \frac{P_D U_D}{a^2} = \frac{P_D^2}{a^2 I_D}, \quad (2.51)$$

где  $a$  - расстояние между осью столба дуги и ближайшей точкой футеровки или водоохлаждаемой панели.

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

$$КИН = P_D I_D, \quad (2.52)$$

С целью проведения сравнительного анализа характеристик на рис.2.9, величины  $P_D$ ,  $КИФ$  и  $КИН$ , определяющие рабочую точку для набора уставок  $R_{Д1}=6,35$  мОм,  $R_{Д2}=6,25$  мОм,  $R_{Д3}=6,5$  мОм для случаев, когда взаимная индуктивность учитывается и не учитывается в математической модели, были сведены в таблице 2.4.

Анализ абсолютных значений параметров в таблице 2.4 показал, что суммарные значения  $P_{Д\Sigma}$ ,  $КИФ_\Sigma$  и  $КИН_\Sigma$  остаются практически неизменными вне зависимости от того, учитывается ли при моделировании влияние взаимной индуктивности. При этом значительному изменению подвергается соотношение параметров в трёх фазах. Для проведения оценки, введём следующие показатели:

$$\Delta I_{Дj} = I_{Дj} - \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 I_{Ди} \quad (2.53)$$

$$\delta I_{Дj} = \frac{I_{Дj}}{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 I_{Ди}}, \quad (2.54)$$

$$\Delta P_{Дj} = P_{Дj} - \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 P_{Ди} \quad (2.55)$$

$$\delta P_{Дj} = \frac{P_{Дj}}{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 P_{Ди}}, \quad (2.54)$$

$$\Delta KИФ_j = KИФ_j - \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 KИФ_i, \quad (2.56)$$

$$\delta KИФ_j = \frac{KИФ_j}{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 KИФ_i}, \quad (2.57)$$

$$\delta KИИ_j = \frac{KИИ_j}{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 KИИ_i}, \quad (2.58)$$

$$\Delta KИИ_j = KИИ_j - \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 KИИ_i, \quad (2.59)$$

Результаты расчётов в соответствии с данными формулами также сведены в таблице 2.4.

Как уже отмечалось ранее, с целью снижения тепловой нагрузки на водоохлаждаемые панели в холодной зоне печи, в контур регулирования часто вводится специальный балансировочный коэффициент. Обычно величина балансировочного коэффициента для каждой фазы лежит в диапазоне от 0.95 до 1.05. Результаты расчёта, приведённые в таблице 2.4, показывают, что взаимная индуктивность оказывает значительное влияние на балансировку фаз. Вследствие этого, электрическая характеристика, построенная с использованием математической модели без учёта влияния взаимной индуктивности, может оказаться не адекватной, что в свою очередь осложнит проведение мероприятий по повышению энергоэффективности ДСП.

Таблица 2.4.

Сравнительный анализ основных технологических параметров для двух вариантов математической модели (с учётом и без учёта влияния взаимной индуктивности)

Параметр	Без учёта влияния взаимной индуктивности			С учётом влияния взаимной индуктивности		
	«1»	«2»	«3»	«1»	«2»	«3»
$I_d, \text{кА}$	51,22	51,26	50,83	52,50	50,69	50,32
$P_d, \text{МВт}$	16,66	16,42	16,8	17,50	16,05	16,47

Продолжение таблицы 2.4.

Параметр	Без учёта влияния взаимной индуктивности			С учётом влияния взаимной индуктивности		
	«1»	«2»	«3»	«1»	«2»	«3»
КИФ, МВт·В·м <sup>-2</sup>	720,85	699,42	738,39	775,30	676,41	717,10
КИН, МВт·кА	853,53	841,50	853,96	918,63	813,87	828,76
I <sub>д,ср</sub> , кА	51,10			51,17		
P <sub>дс</sub> , МВт	49,88			50,02		
КИФ <sub>Σ</sub> , МВт·В·м <sup>-2</sup>	2158,66			2168,81		
КИН <sub>Σ</sub> , МВт·кА	2548,99			2561,26		
ΔI <sub>д</sub> , кА	0,12	0,16	-0,27	1,40	-0,41	-0,78
δI <sub>д</sub> , о.е.	1,0023	1,0031	0,9947	1,0273	0,9919	0,9847
ΔP <sub>д</sub> , МВт	0,03	-0,21	0,17	0,87	-0,58	-0,16
δP <sub>д</sub> , о.е.	1,002	0,9876	1,0104	1,0525	0,9653	0,9906
ΔКИФ, МВт·В·м <sup>-2</sup>	1,30	-20,13	18,84	55,75	-43,14	-2,45
δКИФ, о.е.	1,0018	0,9720	1,0262	1,0775	0,9400	0,9966
Δ КИН, МВт·кА	3,87	-8,16	4,30	68,97	-35,79	-20,90
δКИН, о.е.	1,0046	0,9904	1,0051	1,0812	0,9579	0,9754

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Выполнен анализ основных конструктивных особенностей дуговой сталеплавильной печи шахтного типа ШП-125 (ПАО «Северсталь», ЧерМК) с номинальной мощностью печного трансформатора 85 МВА. Рассмотрены основные технологические аспекты выплавки, характерные для печей данного класса, которые необходимо учитывать при проведении дальнейших исследований. Кратко рассмотрена схема электроснабжения ШП-125 как технологического объекта в общецеховой сети предприятия.

2. Определены основные параметры схемы замещения электрического контура ШП-125. При этом для определения параметров короткой сети и коэффициентов взаимной индуктивности применена методика расчёта, в основе которой лежат результаты экспериментов по двухфазным и трёхфазному КЗ, полученные с использованием регистратора электрических сигналов РЭС-3. Отметим, что в процессе измерений осуществлялся контроль взаимного расположения рукавов электродов для получения максимально достоверных результатов расчёта исключая влияние положения консолей в пространстве.

3. Разработана усовершенствованная математическая модель электрического контура ШП-125, учитывающая взаимную индуктивность между фазами печи и эффект переноса мощности. В основу математической модели легли результаты расчётов параметров схемы замещения. Адекватность разработанной математической модели подтверждается соответствием результатов эксперимента по двухфазным и трёхфазному КЗ на математической модели результатам эксперимента, проведённым на действующем технологическом оборудовании с использованием сигналов РЭС-3. Кроме того, адекватность модели подтверждается фактом соответствия результатов опытов двухфазных и трёхфазного КЗ, полученных экспериментально, результатам аналогичных опытов, выполненных на математической модели.

4. Проведена оценка влияния учёта взаимной индуктивности в математической модели на электрические и технологические характеристики. Выявлено, что отсутствие учёта взаимной индуктивности между фазами в составе математической модели искажает результаты моделирования рабочей точки, а также результаты расчёта величин основных электрических и технологических параметров, что влияет на адекватность и возможность применения данной модели как инструмента для решения задач энергоэффективного управления электрическими режимами ДСП.

### Глава 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА НАПРЯЖЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ НА ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ ШАХТНОГО ТИПА ШП-125

#### 3.1. Основные аспекты применения анализа гармонического состава напряжения электрической дуги для решения задач диагностики стадии плавления шихты

Как уже отмечалось в главе 1, в подавляющем большинстве современных систем управления электрическим режимом ДСП определение стадии плавления шихты производится по величине удельного расхода электроэнергии  $W_{уд}$ , которая является косвенным показателем. Вследствие этого, возникла потребность в использовании альтернативного параметра, имеющего прямую связь с реальными технологическими процессами, протекающими внутри ванны печи. Так, в работе [46] было предложено в качестве критерия для диагностики стадии плавления шихты использовать суммарный коэффициент гармонических составляющих тока дуги  $K_I$ . В основе идеи применения данного критерия лежат физические свойства электрической дуги, речь о которых пойдёт далее.

Тепловая постоянная времени электрической дуги  $\Theta_D$  и коэффициент вентильного эффекта  $K_{ВЭ}$  в составе дифференциального уравнения мгновенной проводимости дуги (уравнения Касси) и уравнения против-ЭДС дуги, приведённых в предыдущем разделе данной главы, являются параметрами, наиболее тесно связанными со стадией плавки. Величина  $\Theta_D$  по мере расплавления твердой шихты и образования жидкой фазы, экранированной вспененным шлаком, постепенно изменяется в диапазоне от 250 мкс до 3500 мкс. Параметр  $K_{ВЭ}$  по мере проплавления изменяется в диапазоне от 1,35 до 1. Наглядно продемонстрировать влияние вентильного эффекта позволяет серия высокоскоростных фотографий электрической дуги, приведённая в работе [1]. По данным снимкам видно, что в случае, когда анодом является концевой участок электрода, а катодом – шихта, дуга горит стабильнее, чем в случае, когда анод – шихта, а катод – концевой участок электрода. При этом

по мере проплавления шихты и образования жидкой фазы влияние данного эффекта будет сокращаться вплоть до полного исчезновения.

Таким образом, идея применения коэффициента несинусоидальности кривой тока дуги  $K_I$  для решения задачи диагностики стадии плавления шихты основана на том, что по мере увеличения величины  $\Theta_D$  и уменьшения  $K_{BЭ}$  доля высших гармоник в составе тока электрической дуги снижается, что продемонстрировано с помощью рис.3.1.

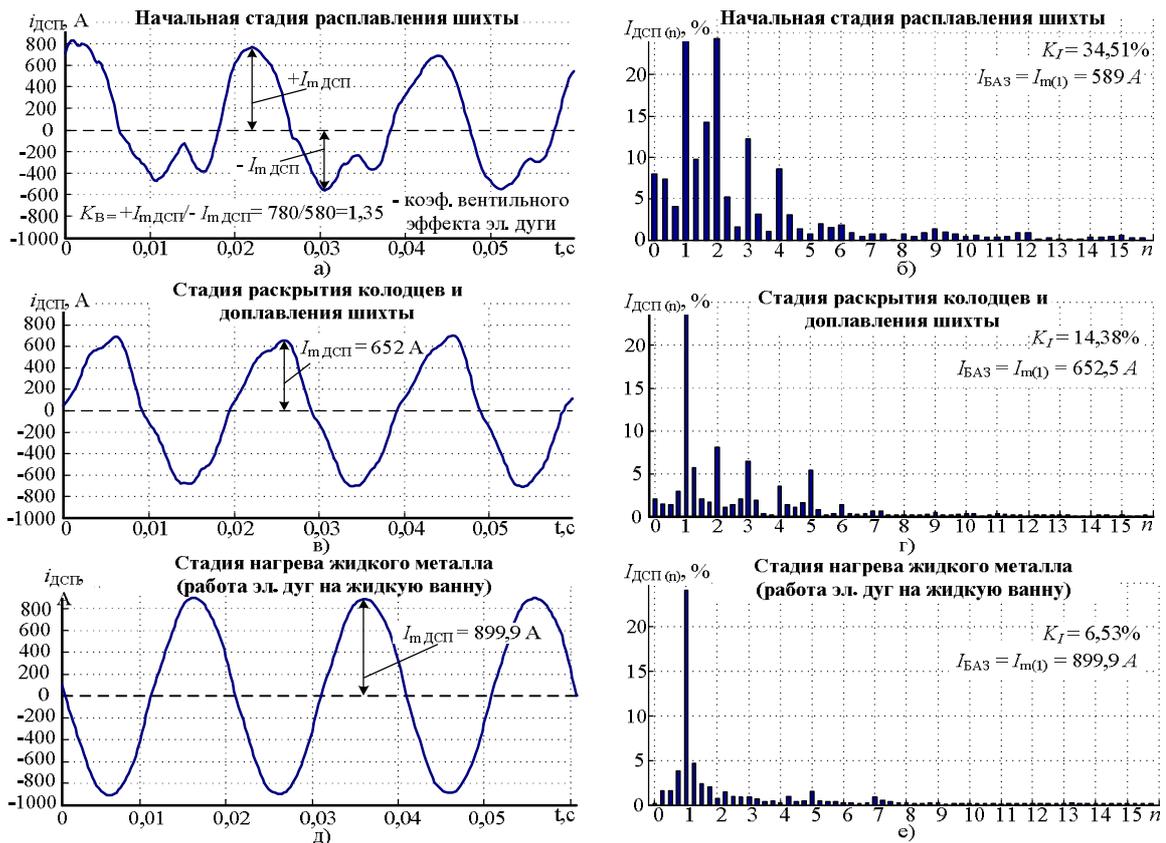


Рисунок 3.1 - Влияние стадии плавления шихты на уровень высших гармоник в составе сигнала тока электрической дуги

Данная идея получила своё развитие в исследовании [25], где был проведён подробный анализ гармонического состава сигнала тока электрической дуги на печных агрегатах различного класса и мощности. В результате данного исследования было предложено использовать для решения задач диагностики стадии плавки отдельный анализ по относительным действующим значениям чётных  $I'_{Д.ВГ.ЧЁТ.Σ}$  и нечётных  $I'_{Д.ВГ.НЕЧЁТ.Σ}$  гармоник. Экспериментальные исследования показали, что скорость ослабления чётных гармоник в начале приблизительно в четыре раза выше, чем нечётных. Вследствие этого,

использование чётных гармоник предпочтительнее использовать для диагностики стадии в начале плавки, а нечётных гармоник – в конце (рис.3.2).

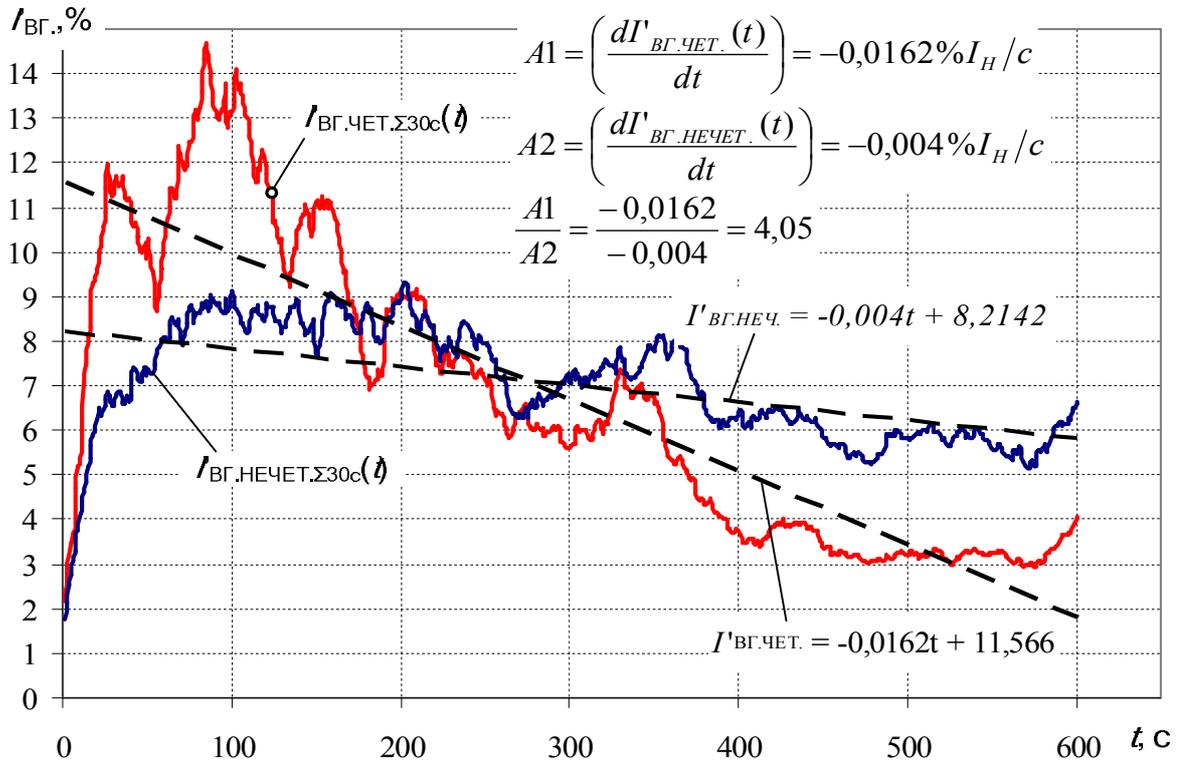


Рисунок 3.2 - Сравнительный анализ скоростей изменения относительных действующих значений токов четных и нечетных гармоник шахтной печи на начальной стадии расплавления шихты (первые 10 минут работы под током)

Отметим, что принцип отдельного анализа чётных и нечётных гармоник лёг в основу разработанной системы диагностики стадии плавления шихты [47] с использованием информации о гармоническом составе сигнала тока электрической дуги, функциональная схема которой представлена на рис.3.3.

На рисунке 3.3 принято следующее обозначение блоков: 1 – блок управления первого уровня; 2 – блок расчёта параметра регулирования; 3 – датчик фазного напряжения; 4 – датчик тока электрической дуги; 5 – блок расчёта удельного расхода электроэнергии; 6 – блок управления второго уровня; 7 – блок матрицы уставок параметров регулирования; 8 – блок вычисления; 9 – блок усреднения; 10 – блок выбора режима; 11 – электрод; 12 – электрододержатель; 13 – гидроцилиндр; 14 – ванна печи; 15 – сервоклапан; 16 – устройство РПН реактора; 17 – устройство РПН трансформатора; 18 – реактор; 19 – трансформатор).

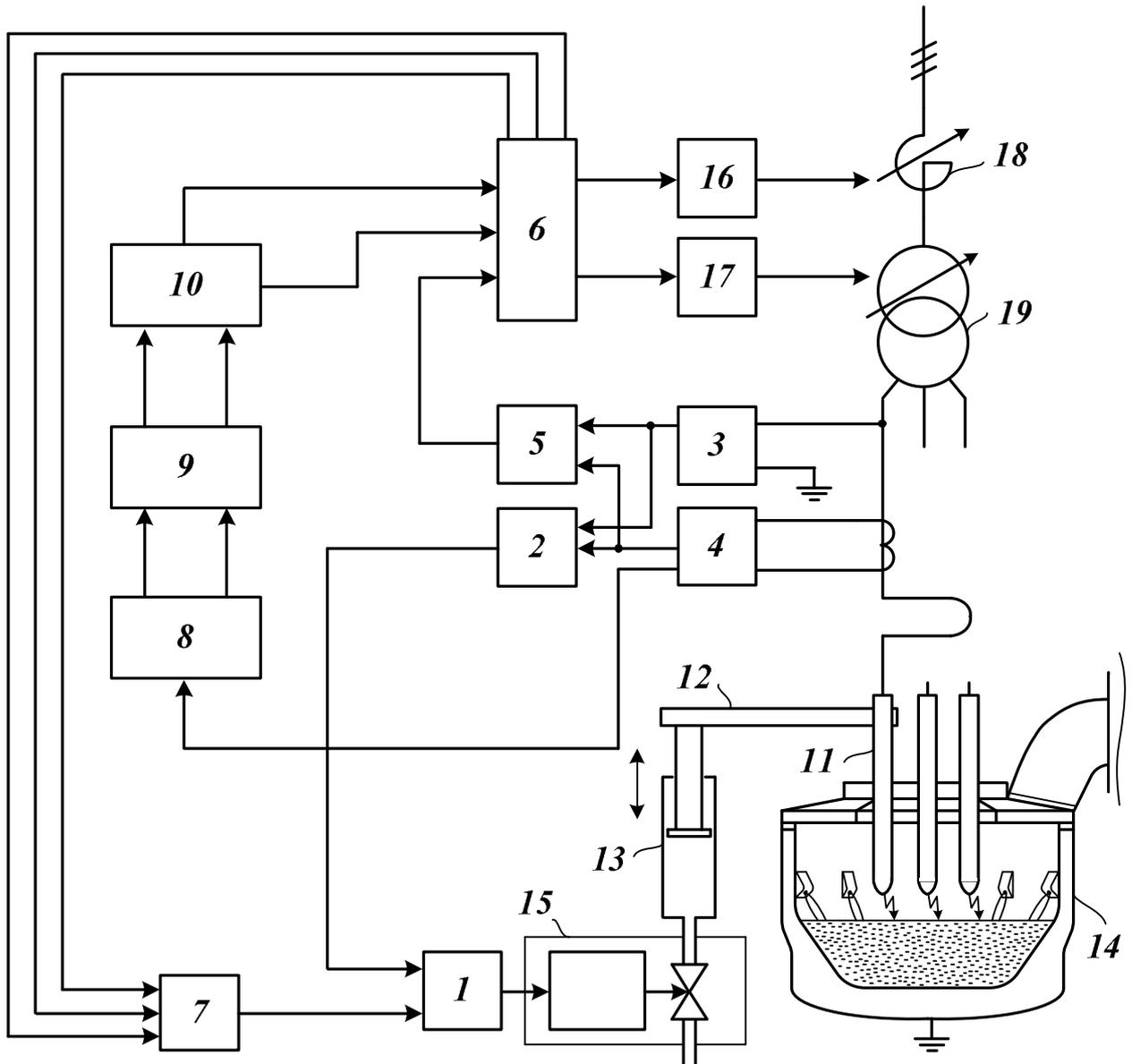


Рисунок 3.3 -Функциональная схема запатентованной системы управления электрическим режимом ДСП с системой диагностики стадии плавки с помощью информации о гармоническом составе сигнала тока электрической дуги

Данная система работает следующим образом. Предварительно в блок 6 закладывают информацию о профиле плавки, т.е. переключении ступеней печного трансформатора, реактора и рабочей кривой на определенных стадиях плавки в зависимости от величины параметра регулирования (управления). В данном случае, структура профиля плавки состоит из двух профилей №1 и №2, структура которых продемонстрирована с помощью таблиц 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1.

Таблица профиля плавки №1 (чётные гармоники, начальная стадия плавки)

№ шага	Значение $I_{ВГ.ЧЁТ.СР}$	$N_{ТР}$	$N_P$	$N_{PK}$
1	$I_{ВГ.ЧЁТ.ГР1}$	$N_{ТР1}$	$N_{P1}$	$N_{PK1}$
2	$I_{ВГ.ЧЁТ.ГР2}$	$N_{ТР2}$	$N_{P2}$	$N_{PK2}$
3	$I_{ВГ.ЧЁТ.ГР3}$	$N_{ТР3}$	$N_{P3}$	$N_{PK3}$
...	...	...	...	...
n	$I_{ВГ.ЧЁТ.ГРn}$	$N_{ТРn}$	$N_{Pn}$	$N_{PKn}$

Таблица 3.2.

Таблица профиля плавки №2 (нечётные гармоники, поздняя стадия плавки)

№ шага	Значение $I_{ВГ.НЕЧЁТ.СР}$	$N_{ТР}$	$N_P$	$N_{PK}$
1	$I_{ВГ.НЕЧЁТ.ГР1}$	$N_{ТР1}$	$N_{P1}$	$N_{PK1}$
2	$I_{ВГ.НЕЧЁТ.ГР2}$	$N_{ТР2}$	$N_{P2}$	$N_{PK2}$
3	$I_{ВГ.НЕЧЁТ.ГР3}$	$N_{ТР3}$	$N_{P3}$	$N_{PK3}$
...	...	...	...	...
n	$I_{ВГ.НЕЧЁТ.ГРn}$	$N_{ТРn}$	$N_{Pn}$	$N_{PKn}$

Затем с помощью датчиков 3 и 4 производят измерение мгновенных значений фазного напряжения и тока электрической дуги. Полученные значения в виде сигналов одновременно поступают на блок расчёта удельного расхода электроэнергии 5 и блок расчёта параметра регулирования 2.

Далее рассчитанный в блоке 2 сигнал фактического значения параметра регулирования  $X_{ФАКТ}$  поступает на вход блока управления первого уровня 1.

Одновременно с этим, сигнал мгновенного значения тока электрической дуги с блока 4 поступает на вход блока вычисления 8, в котором производится расчёт относительных действующих значений суммарных токов чётных и нечётных гармоник электрической дуги в соответствии с формулами:

$$I'_{\text{ВГ.ЧЕТ.}\Sigma} = \frac{\sqrt{I_{\text{Д}(0)}^2 + I_{\text{Д}(2)}^2 + I_{\text{Д}(4)}^2 + I_{\text{Д}(6)}^2 + I_{\text{Д}(8)}^2 + I_{\text{Д}(10)}^2}}{I_{\text{Н}}} \cdot 100\% , \quad (3.1)$$

где  $I_{\text{Д}(2)}, I_{\text{Д}(4)}, I_{\text{Д}(6)}, I_{\text{Д}(8)}, I_{\text{Д}(10)}$  – действующие значения 2,4,6,8,10 гармоник ДСП соответственно;  $I_{\text{Н}}$  – номинальный ток печного трансформатора ДСП.

$$I'_{\text{ВГ.НЕЧЕТ.}\Sigma} = \frac{\sqrt{I_{\text{Д}(3)}^2 + I_{\text{Д}(5)}^2 + I_{\text{Д}(7)}^2 + I_{\text{Д}(9)}^2}}{I_{\text{Н}}} \cdot 100\% , \quad (3.2)$$

где  $I_{\text{Д}(3)}, I_{\text{Д}(5)}, I_{\text{Д}(7)}, I_{\text{Д}(9)}$  – действующие значения 3,5,7,9 гармоник ДСП соответственно.

Результирующие сигналы на выходе блока вычисления относительных действующих значений суммарных токов чётных и нечётных гармоник тока дуги 8 усредняются методом скользящего среднего с варьируемой постоянной времени в блоке усреднения 9 в соответствии с формулой:

$$I'_{\text{ВГ.ЧЕТ.СР}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I'_{\text{ВГ.ЧЕТ.}\Sigma i} , \quad (3.3)$$

$$I'_{\text{ВГ.НЕЧЕТ.СР}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I'_{\text{ВГ.НЕЧЕТ.}\Sigma i} , \quad (3.4)$$

где  $n$  – общий объём выборки,  $I'_{\text{ВГ.ЧЕТ.}\Sigma i}, I'_{\text{ВГ.НЕЧЕТ.}\Sigma i}$  – значение  $i$ -го элемента массива выборки относительного действующего значения суммарного тока чётных и нечётных гармоник.

Далее, данные сигналы поступают на вход блока выбора режима 10, в котором производится анализ сигнала  $I'_{\text{ВГ.ЧЕТ.СР}}$ . В случае, если данный сигнал не изменяется более чем на 10% относительно среднего значения в течение одной минуты, на вход блока управления второго уровня 6 поступает сигнал выбора таблицы профиля плавки №2, соответствующей стадии доводки металла, а также сигнал  $I'_{\text{ВГ.НЕЧЕТ.СР}}$ . В противном случае, в блоке выбора режима 10 формируется сигнал выбора таблицы профиля плавки №1, соответствующей основной стадии расплавления шихты, а также сигнал  $I'_{\text{ВГ.ЧЕТ.СР}}$ .

В основе функционирования блока 5 положена формула расчёта удельного расхода электроэнергии:

$$W_{\text{уд}} = \frac{W_{\Sigma}}{G} , \quad (3.5)$$

где  $W_{\Sigma}$  - величина суммарного расхода электроэнергии, кВтч;  $G$  – масса шихты в тоннах. Несмотря на то, что сигнал удельного расхода электроэнергии  $W_{уд}$  поступает на вход блока 6, он предназначен исключительно для оценки энергетических показателей установки, и не участвует в процессе управления.

На выходе блока 6, в соответствии с заранее заложенным в него профилем плавки, представленным таблицами 2.2 и 2.3, формируются сигналы задания ступени трансформатора  $N_{ТР}$ , ступени реактора  $N_P$  и номера рабочей кривой  $N_{РК}$ . Сигналы задания  $N_{ТР}$ , и  $N_P$  поступают на исполнительные механизмы РПН 16 и 17, тем самым реализуя регулирование мощности путём переключения ступеней. Кроме того, сигналы  $N_{ТР}$ , и  $N_P$ , и  $N_{РК}$  поступают на вход блока матрицы уставок параметра регулирования 7, на выходе которого определяется величина уставки  $X_{Зад}$  и подается на блок управления первого уровня 1.

Блок управления первого уровня 1 является стандартным блоком и включает в себя нелинейный пропорционально-интегральный регулятор, блок вычитания, блок ограничения, задатчик интенсивности, блок переключения на ручное управление, дополнительные блоки устранения режимов технологических коротких замыканий, компенсации мёртвой зоны сервоклапана и резонансных явлений, приводящих к колебаниям концевой участка электрода и нестабильным режимам горения дуги.

Блок управления первого уровня 1 определяет ошибку регулирования  $\Delta X$ , как разницу между сигналом  $X_{Зад}$ , который формируется на выходе блока матрицы уставок 7 и сигналом  $X_{ФАКТ}$ , поступающего с блока расчета параметра регулирования 2. На выходе блока 1 формируется сигнал задания на сервоклапан 15, который обеспечивает регулирование расхода рабочей жидкости, поступающей в поршневую полость гидроцилиндра в зависимости от величины сигнала управления, вследствие чего при подъёме электрода 11 производится нагнетание рабочей жидкости в поршневую полость гидроцилиндра 13, а при опускании электрода 11 – вытеснение рабочей жидкости из поршневой полости гидроцилиндра под действием веса самого электрода, а также электрододержателя 12. Таким образом, величина ошибки регулирова-

ния  $\Delta X$  поддерживается на нулевом уровне, обеспечивая тем самым соблюдение технологического режима плавки.

Несмотря на высокую эффективность работы системы, представленной на рис.3.3, в ряде случаев её эксплуатация осложняется тем, что уровень гармоник тока дуги сильно зависит не только от постоянной времени дуги и удельного расхода электроэнергии, но и в значительной мере от возмущающих воздействий по длине электрической дуги и несимметричных режимов. Вследствие этого, на начальных стадиях плавления шихты возникают сильные всплески сигнала  $I'_{ВГ.ЧЕТ.СР}$ , которые требуют применения фильтра скользящей средней с большой постоянной времени, вследствие чего теряется информация о непродолжительных промежуточных стадиях.

Для решения данной проблемы, предлагается разработать систему управления электрическим режимом ДСП, в основе которой будет лежать анализ чётных и нечётных гармоник напряжения электрической дуги, что является одной из целей данного диссертационного исследования. При этом важнейшим этапом разработки данной системы является обоснование эффективности предлагаемого подхода, которое будет производиться в два этапа.

На первом этапе будет проведён сравнительный анализ влияния тепловой постоянной времени дуги, вентильного эффекта, несимметричных режимов и возмущающих воздействий по длине электрической дуги на уровень чётных и нечётных гармоник токов и напряжений дуг с использованием математической модели, разработанной в предыдущих разделах. На втором этапе будет произведён расчёт мгновенного значения напряжения электрической дуги на основе реальных экспериментальных данных с целью дальнейшего сравнения статистических характеристик сигналов чётных и нечётных гармоник токов и напряжений дуг, полученных на действующем технологическом оборудовании.

### **3.2. Анализ гармонического состава токов и напряжений дуг в дуговой сталеплавильной печи с использованием математической модели**

Для проведения анализа характера изменения чётных и нечётных гармоник тока и напряжения дуги была использована математическая модель электрического контура ДСП, представленная на рис. 2.7, реализованная в программной среде Matlab Simulink. В качестве рабочей ступени печного

трансформатора выбрана  $N_{TP}=8$ . Параметры схемы замещения соответствуют рассчитанным ранее.

Для расчёта сигналов относительного действующего значения чётных и нечётных гармоник токов и напряжений дуг использована вспомогательная математическая модель, также реализованная в среде Matlab Simulink, функциональная схема которой представлена на рис.3.4. В качестве входных параметров для данной модели используются сигналы мгновенных значений токов  $i_{д1}(t)$ ,  $i_{д2}(t)$ ,  $i_{д3}(t)$  и напряжений дуг  $u_{д1}(t)$ ,  $u_{д2}(t)$ ,  $u_{д3}(t)$ , формируемых в математической модели электрического контура.

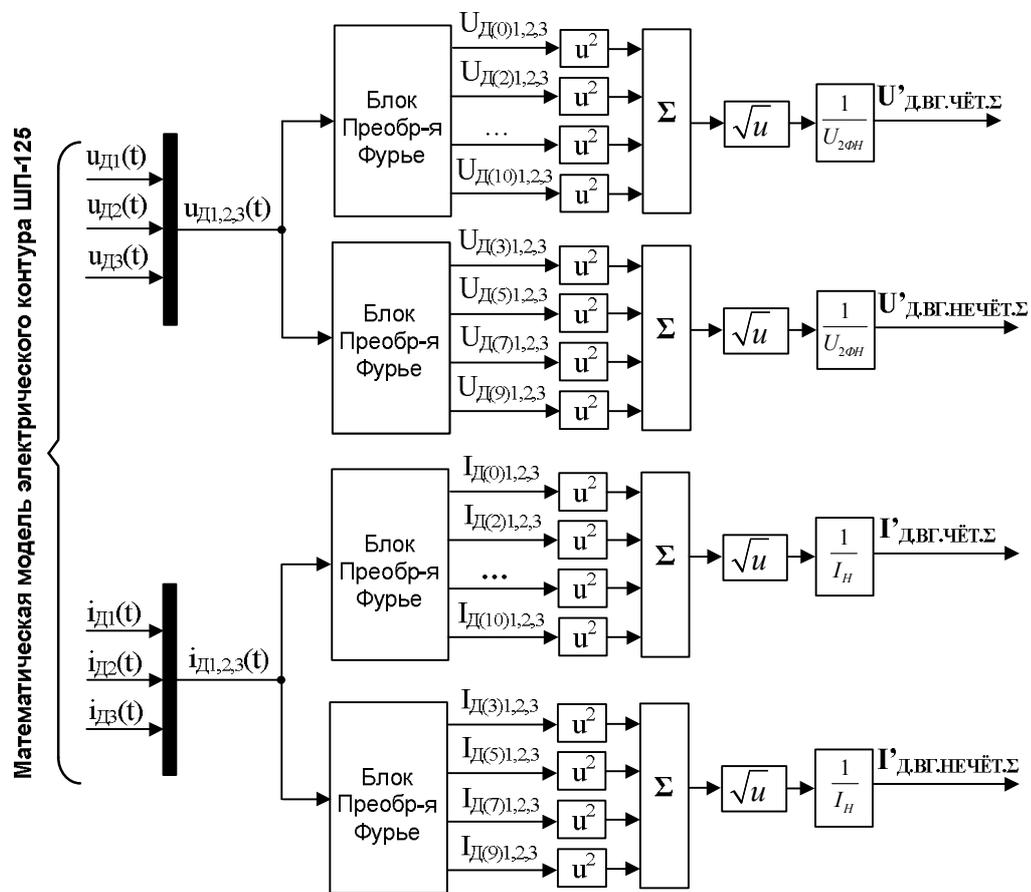


Рисунок 3.4 - Функциональная схема математической модели для расчёта относительных действующих значений чётных и нечётных гармоник токов и напряжений дуг

В основу данной функциональной схемы заложены следующие расчётные формулы относительного действующего значения суммарных чётных и нечётных гармоник тока дуги, представленные ранее, а также относительного действующего значения суммарных чётных и нечётных гармоник напряжения дуги, рассчитываемые аналогичным образом:

$$U'_{д.вг.чѐт} = \frac{\sqrt{U_{д(0)}^2 + U_{д(2)}^2 + U_{д(4)}^2 + U_{д(6)}^2 + U_{д(8)}^2 + U_{д(10)}^2}}{U_{2ФН}} \cdot 100\%, \quad (3.6)$$

$$U'_{д.вг.нечѐт} = \frac{\sqrt{U_{д(3)}^2 + U_{д(5)}^2 + U_{д(7)}^2 + U_{д(9)}^2}}{U_{2ФН}} \cdot 100\%, \quad (3.7)$$

где  $U_{д(0)}$ ,  $U_{д(2)}$ ,  $U_{д(4)}$ ,  $U_{д(6)}$ ,  $U_{д(8)}$ ,  $U_{д(10)}$  - действующие значения 0,2,4,6,8 и 10 гармоник напряжения электрической дуги соответственно,  $U_{д(3)}$ ,  $U_{д(5)}$ ,  $U_{д(7)}$ ,  $U_{д(9)}$  - действующие значения 3,5,7 и 9 гармоник напряжения электрической дуги соответственно,  $U_{2Н}$  – номинальное фазное напряжение печного трансформатора на текущей ступени РПН;

С использованием математической модели электрического контура, разработанной ранее, а также математической модели, приведённой на рис.3.4, было выполнено исследование влияния тепловой постоянной времени дуги, вентильного эффекта, а также несимметричных режимов на чётные и нечётные гармоники токов и напряжений дуг. При проведении исследований получены следующие осциллограммы:

1) средние по трём фазам значения величин  $I'_{д.вг.чѐт}$ ,  $I'_{д.вг.нечѐт}$ ,  $U'_{д.вг.чѐт}$ ,  $U'_{д.вг.нечѐт}$  при ступенчатом изменении величины  $\Theta_{д}$  от 500 мкс до 3500 мкс с шагом 500 мкс, постоянной величине  $K_{ВЭ}=1,2$  и одинаковой длине электрической дуги в трёх фазах равной 400 мм;

2) средние по трём фазам значения величин  $I'_{д.вг.чѐт}$ ,  $I'_{д.вг.нечѐт}$ ,  $U'_{д.вг.чѐт}$ ,  $U'_{д.вг.нечѐт}$  при ступенчатом изменении величины  $K_{ВЭ}$  от 1,2 до 1,00 с шагом 0,05, постоянной величине  $\Theta_{д} = 500$  мкс и одинаковой длине электрической дуги в трёх фазах равной 400 мм;

3) значения  $I'_{д.вг.чѐт}$ ,  $I'_{д.вг.нечѐт}$ ,  $U'_{д.вг.чѐт}$ ,  $U'_{д.вг.нечѐт}$  для каждой из трёх фаз в отдельности при ступенчатом изменении величины длины электрической дуги в фазе «3» от 200 мм до 700 мм при постоянной длине дуги в фазах «1» и «2» равной 100 мм.

Отметим, что для достижения в процессе моделирования режимов работы, максимально приближенным к реальным, была использована система формирования случайных возмущений по длине электрической дуги. Функциональная схема данной системы приведена на рис.3.5.

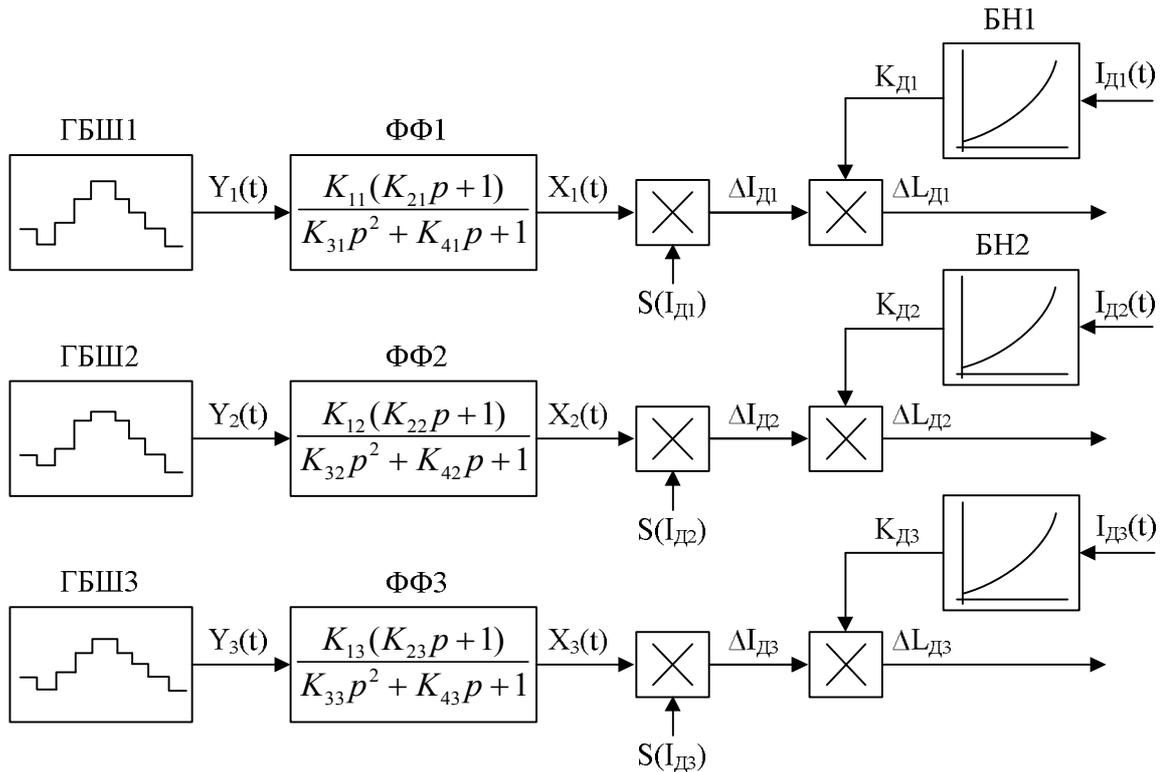


Рисунок 3.5 - Функциональная схема блока формирования случайных возмущений электрических дуг

В данной схеме сигналы, получаемые с формирующих фильтров ФФ1-3  $X_1(t)$ ,  $X_2(t)$ ,  $X_3(t)$  поступают на блоки умножения, где умножаются на значения стандартных отклонений токов дуг  $S(I_{д1})$ ,  $S(I_{д2})$ ,  $S(I_{д3})$ . Сигналы на выходе  $\Delta I_{д1}$ ,  $\Delta I_{д2}$ ,  $\Delta I_{д3}$  соответствуют случайной составляющей колебаний токов дуг. Для полной реализации случайных возмущений необходимо получить сигналы изменений длин дуг  $\Delta L_{д1}$ ,  $\Delta L_{д2}$ ,  $\Delta L_{д3}$ . Для этого на математической модели рассчитывается характеристика  $K_{д}=f(I_{д})$  путём дифференцирования зависимости  $L_{д}=f(I_{д})$ . В данном случае  $K_{д}$  – коэффициент пропорциональности между возмущающим воздействием по длине дуги  $\Delta L_{д}$  и возмущающим воздействием по току дуги  $\Delta I_{д}$  при заданном  $I_{д}$ .

Ввиду того, что физическая природа возмущающих воздействий по длине электрической дуги схожа для всех печей в пределах одного класса, при моделировании используем параметризацию блока формирования возмущающих воздействий, применённую в исследовании [48]. Осциллограммы, полученные в результате моделирования, представлены на рис.3.6-3.9.

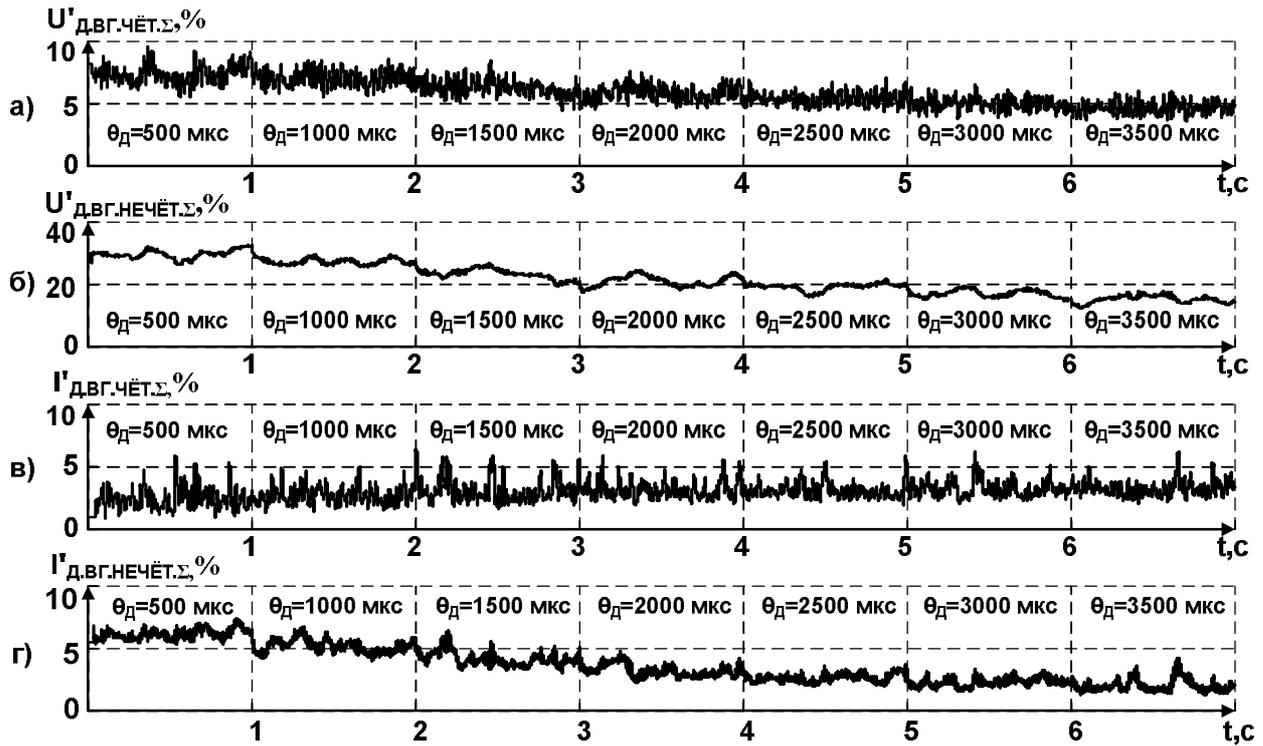


Рисунок 3.6 - Осциллограммы средних по 3 фазам относительных действующих значений суммарных чётных и нечётных гармоник: а, б) напряжения дуги; в, г) тока дуги при ступенчатом изменении величины  $\theta_d$  в симметричном режиме

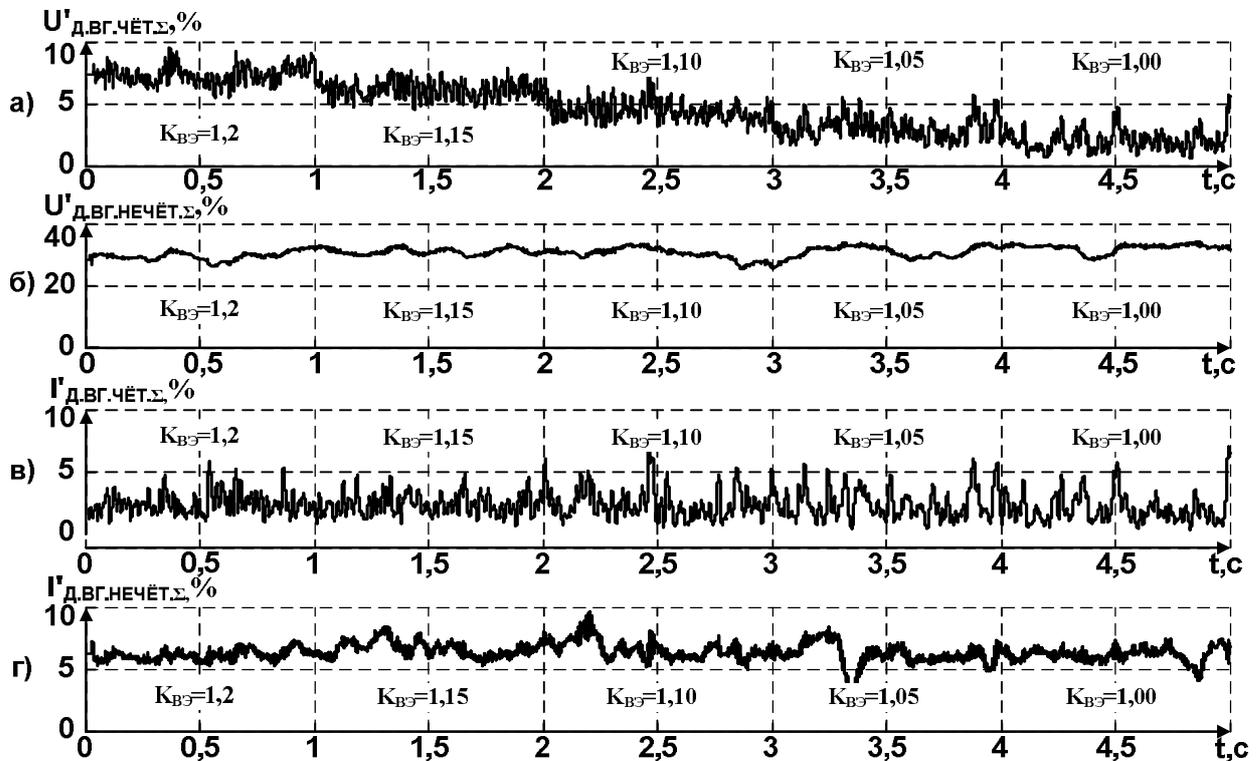


Рисунок 3.7 - Осциллограммы средних по 3 фазам относительных действующих значений суммарных чётных и нечётных гармоник: а, б) напряжения дуги; в, г) тока дуги при ступенчатом изменении величины  $K_{BЭ}$  в симметричном режиме

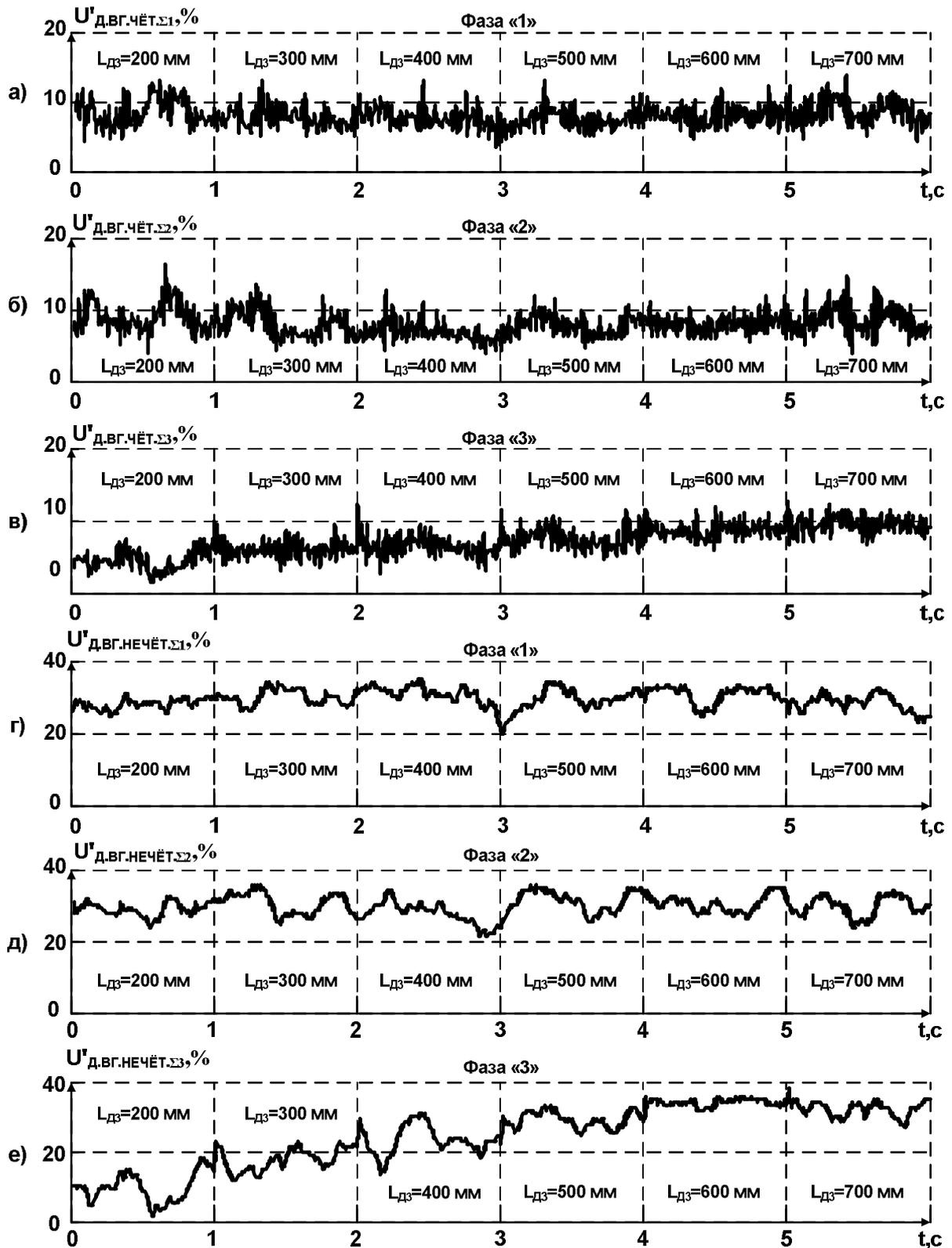


Рисунок 3.8 - Осциллограммы относительных действующих значений суммарных чѐтных и нечѐтных гармоник напряжения дуги по каждой из 3 фаз для: а, б, в) чѐтных гармоник; г, д, е) нечѐтных гармоник при ступенчатом изменении величины длины электрической дуги в фазе «3»

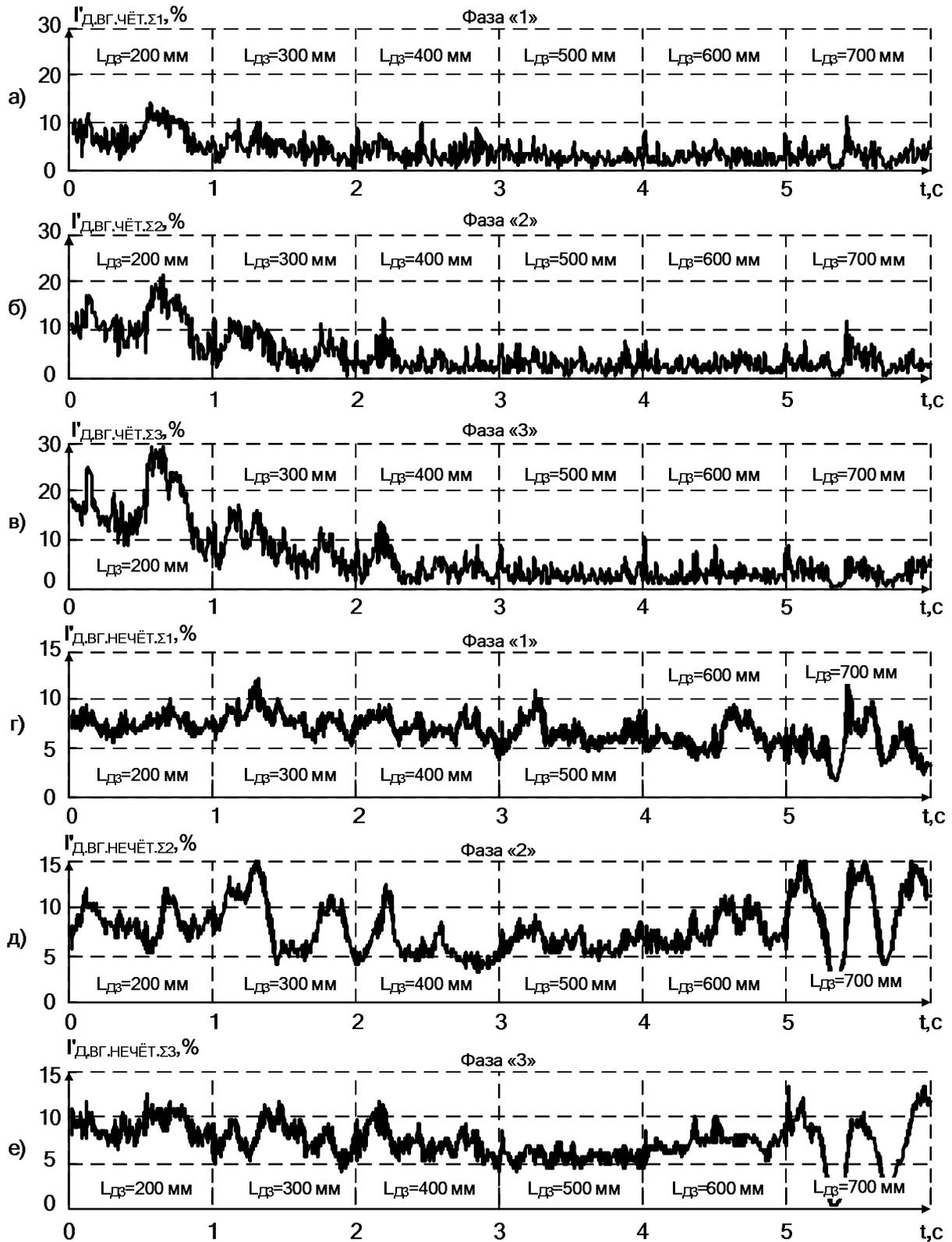


Рисунок 3.9 - Осциллограммы относительных действующих значений суммарных чётных и нечётных гармоник тока дуги по каждой из 3 фаз для: а, б, в) чётных гармоник; г, д, е) нечётных гармоник при ступенчатом изменении величины длины электрической дуги в фазе «3»

Анализ осциллограмм позволил получить теоретическое подтверждение для следующих выводов:

1. В симметричном режиме, когда длины дуг одинаковы, наибольшему влиянию изменению величины  $\Theta_D$  подвержены нечётные гармоники, а влиянию изменения  $K_{BЭ}$ , в свою очередь, чётные гармоники. При этом в обоих случаях сигналы относительного действующего значения суммарных чётных и нечётных гармоник более стабильны для напряжения электрической дуги, вследствие чего при использовании в системе управления нуждаются в меньшей величине постоянной времени сглаживающего фильтра;

2. Несимметричные режимы работы оказывают сильное влияние на чётные и нечётные гармоники тока электрической дуги, в то время как гармоники напряжения дуги данному влиянию подвержены в значительно меньшей мере, что осложняет применение анализа гармонического состава токов дуг для решения задач диагностики стадии плавления шихты на начальных стадиях ввиду необходимости применения сглаживающих фильтров с большой постоянной времени, что приведёт к потерям информации о непродолжительных стадиях.

### **3.3. Анализ гармонического состава токов и напряжений дуг в дуговой сталеплавильной печи с использованием экспериментальных данных**

Несмотря на высокую адекватность разработанной математической модели, утверждения, сделанные в предыдущем разделе, необходимо подтвердить экспериментально. Для решения данной задачи, с помощью многоканального регистратора электрических сигналов РЭСЗ были получены сигналы мгновенного значения тока дуги  $i_D(t)$  и фазного напряжения  $U_{2\phi}(t)$  на вторичной стороне печного трансформатора для трёх фаз ШП-125 в рамках отдельно взятой плавки. Общий вид площадки для проведения эксперимента представлен на рис.3.10.

Основная проблема, возникающая на практике при анализе сигнала мгновенного значения напряжения электрической дуги заключается в том, что данный параметр проблематично измерить напрямую. Поэтому возникает необходимость прибегать к косвенным расчётам. Отметим, что все необходимые параметры для выполнения косвенного расчёта были получены при определении параметров схемы замещения электрического контура.



Рисунок 3.10 - Экспериментальная площадка для получения осциллограмм мгновенных значений тока электрической дуги и фазного напряжения ШП-125

Таким образом, расчёт мгновенных значений напряжения электрической дуги осуществляется в соответствии со следующими выражениями:

$$\begin{cases} u_{д1}(t) = u_{2\phi1}(t) - i_{д1}(t)R_{КC1} - L_{КC1} \frac{di_{д1}(t)}{dt} + M_{21} \frac{di_{д2}(t)}{dt} - M_{31} \frac{di_{д3}(t)}{dt} \\ u_{д2}(t) = u_{2\phi2}(t) - i_{д2}(t)R_{КC2} - L_{КC2} \frac{di_{д2}(t)}{dt} - M_{12} \frac{di_{д1}(t)}{dt} - M_{32} \frac{di_{д3}(t)}{dt}, \quad (3.8) \\ u_{д3}(t) = u_{2\phi3}(t) - i_{д3}(t)R_{КC3} - L_{КC3} \frac{di_{д3}(t)}{dt} + M_{13} \frac{di_{д1}(t)}{dt} + M_{23} \frac{di_{д2}(t)}{dt} \end{cases}$$

Для проведения анализа гармонического состава экспериментальных сигналов мгновенного значения тока и напряжения электрической дуги была использована функциональная схема, приведённая на рис.3.4. Отметим, что для расчёта сигнала мгновенного значения напряжения электрической дуги, поступающего на вход данной схемы, в среде Matlab Simulink был разработан допол-

нительный модуль расчёта, основанный на системе уравнений 3.8, функциональная схема которого приведена на рис.3.11 [49-50].

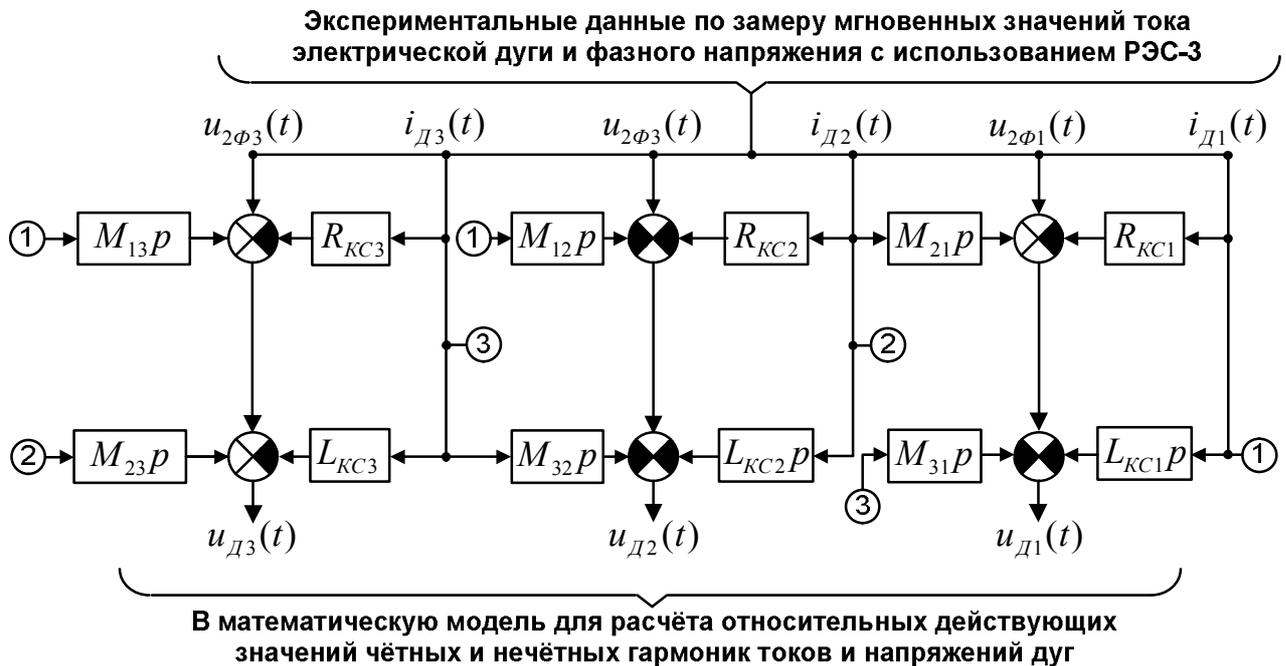


Рисунок 3.11 -Функциональная схема модуля расчёта мгновенных значений напряжения электрической дуги на основе сигналов мгновенных значений токов электрической дуги и фазных напряжений, полученных экспериментально

Поскольку особый интерес в данном случае представляет начальная стадия плавления шихты, для которой характерны частые обрывы электрической дуги ввиду сильных возмущающих воздействий и нестабильного режима горения дуг, а также сильная несимметрия токов для анализа использованы осциллограммы действующего значения тока электрической дуги, фазного напряжения и напряжения дуги для каждой из трёх фаз, соответствующие первым 12 минутам с начала плавления шихты (рис.3.12).

Результатом совместной работы математических моделей, представленных на рис.3.4 и 3.11, являются осциллограммы относительных действующих значений суммарных чётных и нечётных гармоник тока и напряжения электрической дуги. Анализ данных осциллограмм показал, что характер изменения гармонического состава тока и напряжения дуги имеет общий тренд, что обусловлено общей физической природой, порождающей гармонические искажения сигналов. Для того, чтобы подтвердить экспериментально большую устойчивость сигнала относительных действующих значений суммарных чётных и нечётных гармоник напряжения электрической дуги к возмущающим воздейст-

виям и несимметричным режимам, был проведён статистический анализ полученных сигналов.

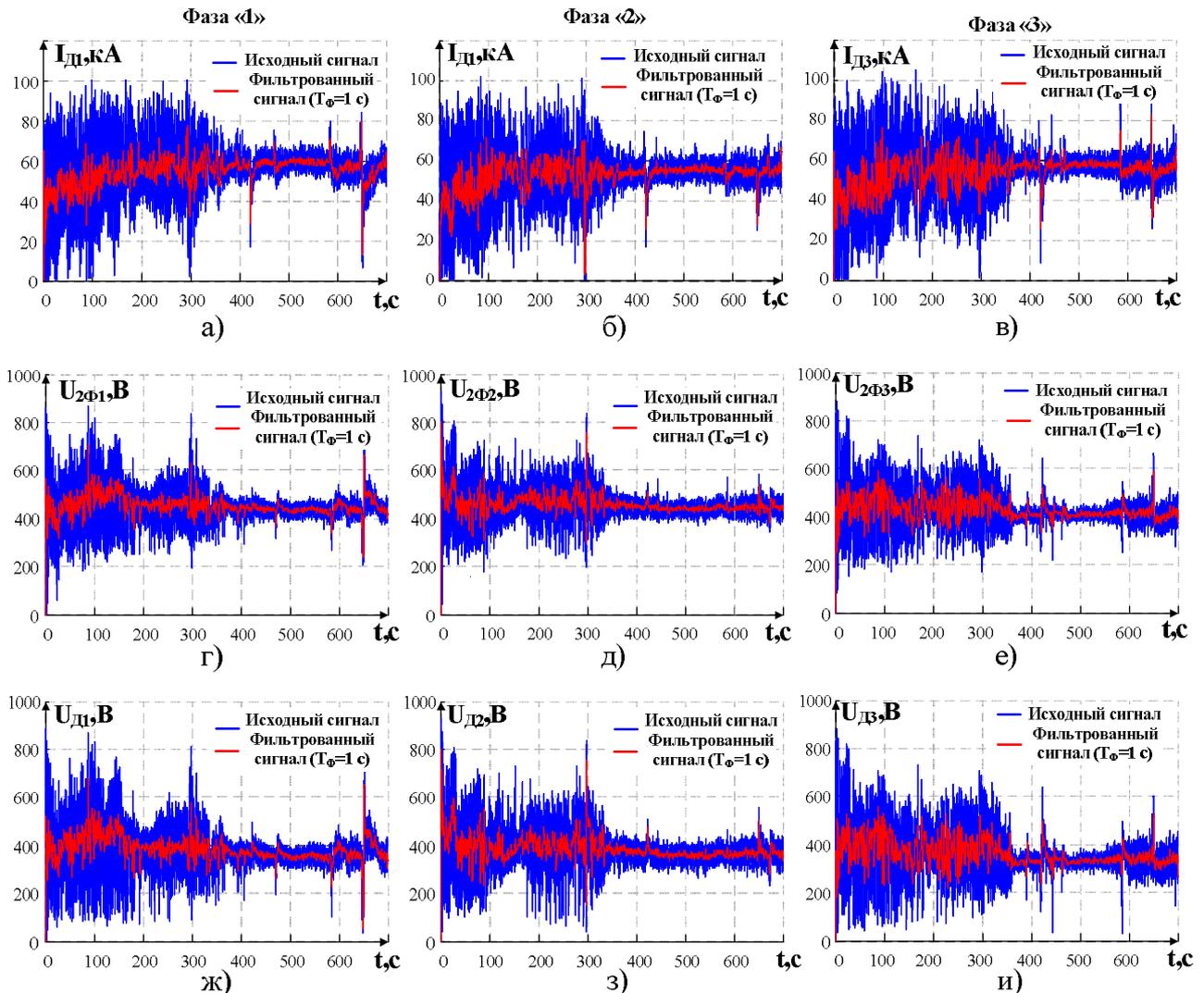


Рисунок 3.12 - графики действующих значений сигналов на протяжении первых 12 минут плавки: а,б,в – тока электрической дуги  $i_d$  в фазах «1», «2» и «3»; г,д,е – фазного напряжения в фазах «1», «2» и «3»; ж,з,и - напряжения в фазах «1», «2» и «3» для исходной частоты дискретизации 2 кГц и после применения фильтра скользящей средней с  $T_{\Phi}=1$  с

При проведении статистического анализа, исследуемый интервал в границах полученных осциллограмм (рис.3.13-3.15) был условно разделён на два временных промежутка: от 0 до 350 с, для которого характерны наиболее сильные колебания относительных действующих значений гармоник тока и напряжения дуги, обусловленные активным расплавлением шихты, и от 350 до 700 с, что соответствует более стабильному режиму горению дуг и значительно меньшим колебаниям гармонического состава [51].

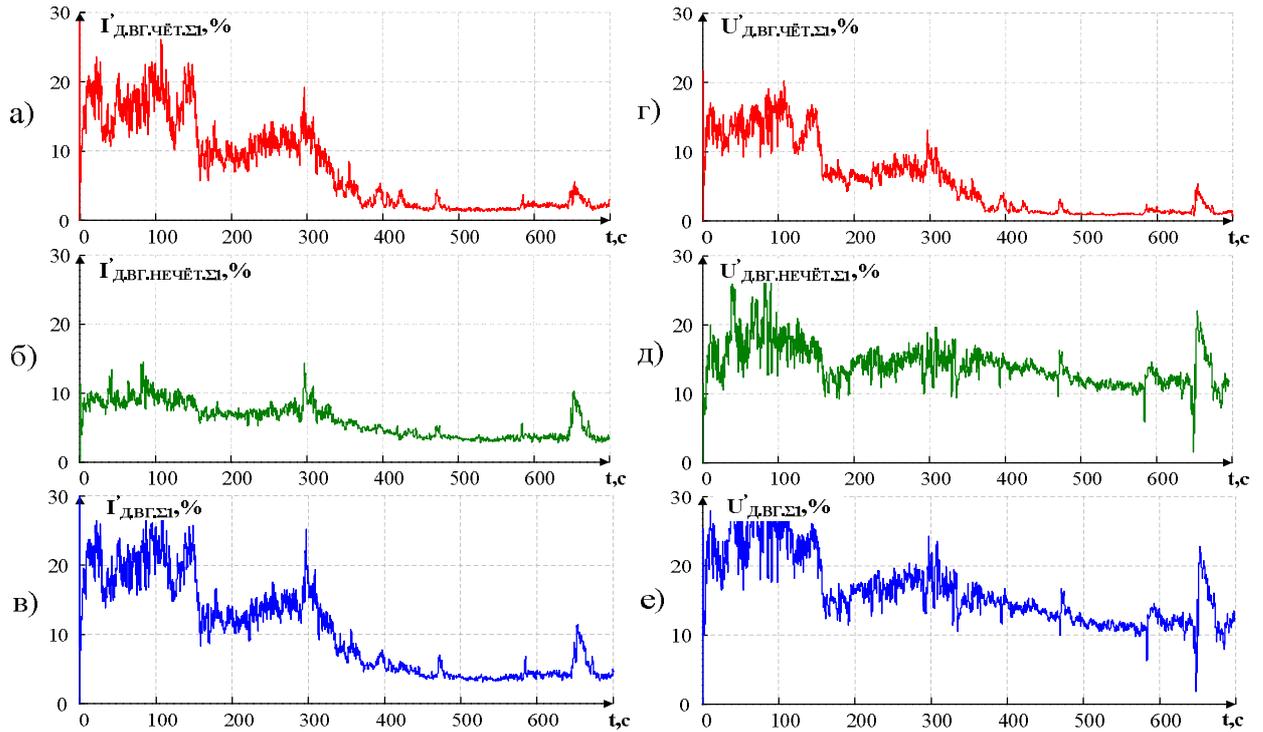


Рисунок 3.13 - Графики относительных действующих значений чётных, нечётных и суммарных гармоник (фильтр скользящей средней,  $T_{\Phi} = 1\text{c}$ ): а,б,в – тока электрической дуги; г,д,е – напряжения электрической дуги в фазе «1»

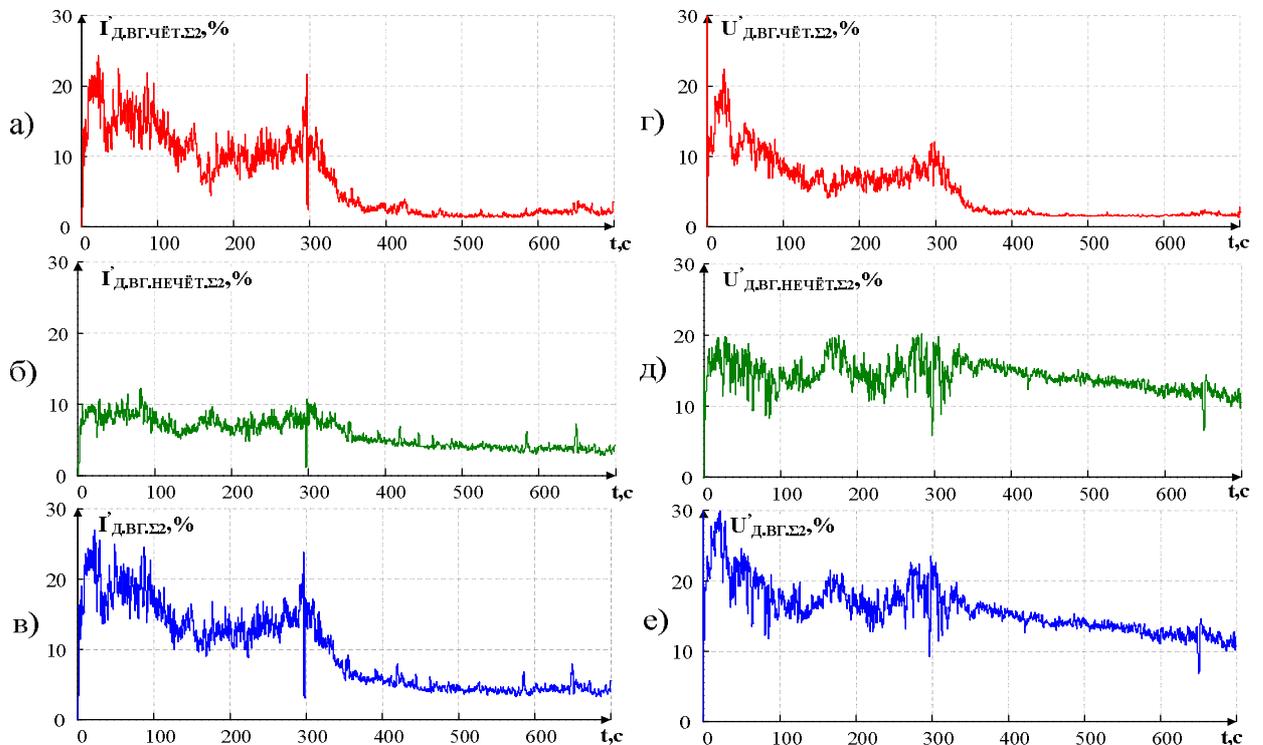


Рисунок 3.14 - Графики относительных действующих значений чётных, нечётных и суммарных гармоник (фильтр скользящей средней,  $T_{\Phi} = 1\text{c}$ ): а,б,в – тока электрической дуги; г,д,е – напряжения электрической дуги в фазе «2»

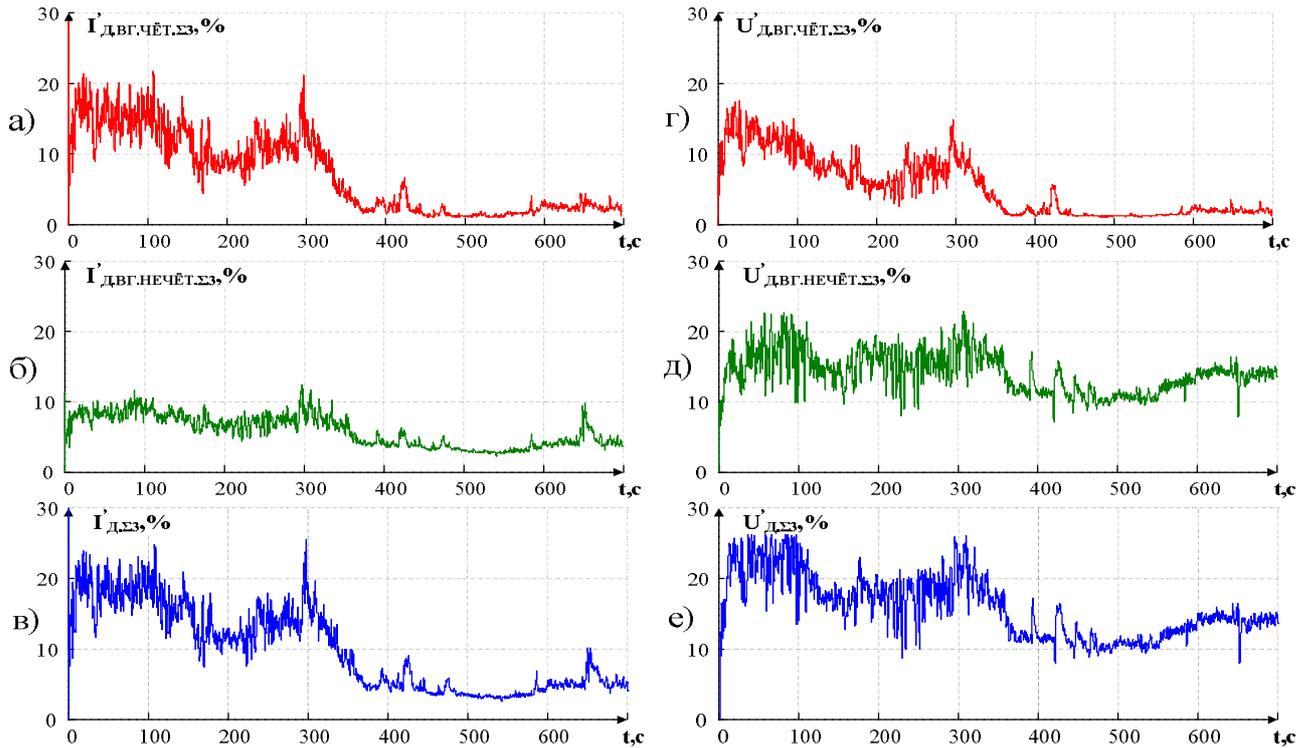


Рисунок 3.15 - Графики относительных действующих значений чётных, нечётных и суммарных гармоник (фильтр скользящей средней,  $T_{\Phi} = 1\text{с}$ ): а,б,в – тока электрической дуги; г,д,е – напряжения электрической дуги в фазе «3»

Для обоих временных промежутков применялись следующие статистические критерии оценивания:

1. Математическое ожидание для дискретного сигнала:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad (3.9)$$

где  $n$  – объём выборки дискретного сигнала,  $X_i$  –  $i$ -й элемент выборки.

2. Стандартное отклонение для дискретного сигнала:

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}}{n}, \quad (3.10)$$

3. Коэффициент вариации

$$K_B = \frac{\sigma}{\bar{X}}, \quad (3.11)$$

4. Средний коэффициент вариации по трём фазам:

$$K_{B,CP} = \frac{K_{B1} + K_{B2} + K_{B3}}{3}, \quad (3.12)$$

Где  $K_{B1}$  – коэффициент вариации сигнала в фазе «1»,  $K_{B2}$  – коэффициент вариации сигнала в фазе «2»,  $K_{B3}$  – коэффициент вариации сигнала в фазе «3».

5. Относительная разность среднего по фазам коэффициента вариации для сигнала тока и напряжения дуги:

$$\delta K_{B,CP} = \frac{K_{B,CP,ИД} - K_{B,CP,УД}}{K_{B,CP,ИД}}, \quad (3.13)$$

Где  $K_{B,CP,ИД}$  – средний коэффициент вариации по трём фазам для тока дуги,  $K_{B,CP,УД}$  – средний коэффициент вариации по трём фазам для напряжения дуги дуги.

Статистический анализ, результат которого сведён в таблице 3.3, показал, что сигналы относительного действующего значения чётных, нечётных и суммарных гармоник напряжения дуги [52-58] более стабильны и в меньшей мере подвержены влиянию возмущающих воздействий по сравнению с аналогичными сигналами для напряжения дуги при общности тренда. Данный вывод позволяет сделать оценка относительной разности среднего по фазам коэффициента вариации сигнала тока и напряжения дуги.

Отдельно следует отметить тот факт, что согласно экспериментальным данным коэффициент вариации сигналов относительного действующего значения суммарных, чётных и нечётных гармоник напряжения дуги не зависит в значительной мере от коэффициента вариации сигнала действующего значения напряжения электрической дуги. Так, несмотря на то, что на втором временном интервале величина  $\delta V_{CP} < 0$  для действующих значений, для относительного действующего значения чётных, нечётных и суммарных гармоник величина  $\delta V_{CP}$  остаётся положительной.

Тем не менее, несмотря на преимущества, которые предоставляет анализ гармонического состава сигнала напряжения дуги для диагностики стадии плавки, расчёт мгновенных значений сигналов напряжений дуг является ресурсоёмким. Соответственно, наиболее целесообразно применять анализ гармонического состава напряжения электрической дуги для печей с высокой амплитудой возмущающих воздействий. К таким печам относятся шахтные дуговые сталеплавильные печи и печи с классическим способом завалки шихты через отводимый свод.

Статистический анализ гармонического состава сигналов тока и напряжения  
электрической дуги

Сигнал	Математическое ожидание $\bar{X}$			Стандартное отклонение $\sigma$			Коэффициент вариации $K_V$			$K_{V,CP}$	$\delta K_{V,CP}$
	«1»	«2»	«3»	«1»	«2»	«3»	«1»	«2»	«3»		
<b>t=0...350 с</b>											
Действующие значения:											
Тока дуги $I_D$	52,60 кА	50,51 кА	51,46 кА	13,4 кА	14,31 кА	14,34 кА	0,25	0,28	0,28	0,27	10 %
Напряжения дуги $U_D$	405,05 В	405,82 В	385,65 В	95,78 В	94,88 В	101,67 В	0,24	0,23	0,26	0,243	
Относительное действующее значение суммарных чётных гармоник:											
Тока дуги $I_D$	12,88 %	11,58 %	11,86 %	8,8 %	7,96 %	8,06 %	0,68	0,69	0,67	0,68	16,18 %
Напряжения дуги $U_D$	9,8 %	8,19 %	8,77 %	5,7 %	4,78 %	4,89 %	0,58	0,58	0,55	0,57	
Относительное действующее значение суммарных нечётных гармоник:											
Тока дуги $I_D$	7,93 %	7,47 %	7,63 %	3,21 %	2,92 %	2,92 %	0,4	0,39	0,38	0,39	15,38 %
Напряжения дуги $U_D$	15,48 %	14,93 %	15,68 %	5,49 %	4,35 %	4,96 %	0,35	0,36	0,31	0,33	
Относительное действующее значение суммарных гармоник:											
Тока дуги $I_D$	15,99 %	14,61 %	14,93 %	8,39 %	7,51 %	7,59 %	0,52	0,51	0,51	0,513	57,12 %
Напряжения дуги $U_D$	19,64 %	18,18 %	19,14 %	4,66 %	3,64 %	4,09 %	0,24	0,2	0,21	0,22	
<b>t=350...700 с</b>											
Действующие значения:											
Тока дуги $I_D$	56,91 кА	54,09 кА	56,25 кА	6,17 кА	4,65 кА	5,34 кА	0,1	0,086	0,095	0,094	-12,8 %
Напряжения дуги $U_D$	365,91 В	367,31 В	338,06 В	46,76 В	28,56 В	36,75 В	0,13	0,078	0,11	0,106	
Относительное действующее значение суммарных чётных гармоник:											
Тока дуги $I_D$	2,23 %	1,98 %	2,083 %	1,73 %	1,31 %	1,67 %	0,76	0,66	0,8	0,74	17,57 %
Напряжения дуги $U_D$	1,97 %	2,083 %	1,48 %	1,18 %	0,603 %	1,011 %	0,6	0,57	0,68	0,61	
Относительное действующее значение суммарных нечётных гармоник:											
Тока дуги $I_D$	3,91 %	4,09 %	3,92 %	1,33 %	0,99 %	1,29 %	0,34	0,24	0,33	0,303	42,57 %
Напряжения дуги $U_D$	12,66 %	13,34 %	12,2 %	2,57 %	1,84 %	2,2 %	0,203	0,14	0,18	0,174	
Относительное действующее значение суммарных гармоник:											
Тока дуги $I_D$	4,69 %	4,7 %	4,6 %	1,88 %	1,29 %	1,81 %	0,401	0,275	0,39	0,36	52,78 %
Напряжения дуги $U_D$	12,84 %	13,47 %	12,39 %	2,65 %	1,84 %	2,25 %	0,2	0,14	0,18	0,17	

### ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. Использование информации о гармоническом составе токов и напряжений дуг является перспективным направлением в развитии усовершенствованных систем управления электрическим режимом ДСП с интеллектуальной системой диагностики технологических стадий плавки. В ходе исследований с использованием математической модели теоретически обоснована тесная связь между уровнем нечётных гармоник тока и напряжения дуги и тепловой постоянной времени, а также связь между уровнем чётных гармоник и величиной коэффициента вентильного эффекта. Показано, что величина вентильного эффекта изменяется от максимального к минимальному значению по мере полного расплавления твёрдой шихты, а величина тепловой времени достигает максимальной величины при экранировании дуг вспененным шлаком, что характерно для стадии доводки. Таким образом, было сделано теоретическое обоснование для полученных ранее экспериментальных зависимостей изменения гармонического состава напряжений дуг от стадий плавки. В частности, подтверждено, что скорость изменения чётных гармоник токов и напряжений дуг в начале плавки значительно выше, чем скорость изменения нечётных гармоник.

2. Результаты математического моделирования подтвердили эффективность подхода построения системы диагностики стадии плавления шихты, в соответствии с которым анализ чётных гармоник используется в начале плавки, а нечётных гармоник – в конце. Кроме того, для гармоник напряжений электрических дуг доказана меньшая зависимость изменения уровней гармоник при колебаниях длин электрических дуг и их несимметрии, чем у гармоник тока дуг, что является важным преимуществом.

3. Теоретические результаты, полученные с использованием математической модели, подтверждены аналитически с использованием экспериментальных данных. Для этой цели была разработана специальная математическая модель, которая позволяет производить расчёт мгновенного значения напряжения электрической дуги на основании экспериментальных сигналов тока и фазного напряжения, измеренных на действующем технологическом оборудовании с использованием РЭС-3.

4. Информация о гармоническом составе тока электрической дуги, так как и гармоническом составе напряжения дуги, может быть использована при разработке системы диагностики стадии плавления металлошихты. При этом анализ гармонического состава тока предпочтительнее использовать на сталеплавильных агрегатах, где используется режим горения дуг, близкий к симметричному, а также агрегатов с низкой интенсивностью возмущающих воздействий (например, печи с технологией непрерывной подвалки шихты конвейером, установки ковш-печь). Анализ гармонического состава напряжения дуги больше подходит для установок с сильными возмущающими воздействиями а также значительным влиянием несимметричных режимов (шахтные печи, печи с классической завалкой через отводимый свод). В иных случаях, эффективность использования гармоник токов и напряжений дуг одинакова.

## Глава 4. РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ ШП-125 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИИ О ГАРМОНИЧЕСКОМ СОСТАВЕ НАПРЯЖЕНИЙ ДУГ.

Опираясь на результаты, полученные в главе 2, разработана функциональная схема системы управления электрическим режимом ШП-125 с использованием информации о гармоническом составе напряжений дуг (рис.4.1). Входными сигналами, необходимыми для функционирования данной системы, являются сигналы, полученные с датчиков тока и фазных напряжений непосредственно на ШП. Далее, данные сигналы поступают на блок преобразования сигналов, в котором с учётом группы соединения обмоток ПТ и типа датчиков тока рассчитываются величины мгновенного значения тока электрической дуги  $i_{д1}(t), i_{д2}(t), i_{д3}(t)$  и фазного напряжения  $u_{2\phi1}(t), u_{2\phi2}(t), u_{2\phi3}(t)$ . Далее данные сигналы поступают на вход блока расчёта напряжения электрической дуги, разработанного в предыдущей главе. Рассчитанный сигнал мгновенных значений напряжений электрических дуг  $u_{д1}(t), u_{д2}(t), u_{д3}(t)$  поступает на вход блоков преобразования Фурье, где впоследствии выполняется расчёт относительных действующих значений суммарных чётных и нечётных гармоник напряжений электрических дуг  $U'_{д.ВГ.ЧЁТ}, U'_{д.ВГ.НЕЧЁТ}$ . На основании последних с использованием специализированного алгоритма и таблиц профилей плавки на базе программируемого логического контроллера (ПЛК) определяется текущее задание на  $N_{ТР}$  и  $N_{РК}$ , определяющее в совокупности с системой управления 1 уровня действующий электрический режим. Отметим, что помимо профиля плавки, в основе которого лежит анализ гармонического состава напряжений дуг, также предусмотрен классический профиль плавки с  $W_{уд}$ , выполненный по аналогии с существующими системами, рассмотренными в главе 1, для проведения сравнения между старой и новой системой.

Для обеспечения функционирования данной системы на практике, необходимо решить следующие задачи: 1. Разработка структуры блока преобразования сигнала для обеспечения возможности интеграции системы с наиболее распространёнными схемами измерения тока дуги; 2. Определение граничных значений таблиц профиля плавки, а также разработка алгоритма перехода с одной технологической стадии плавления на другую.

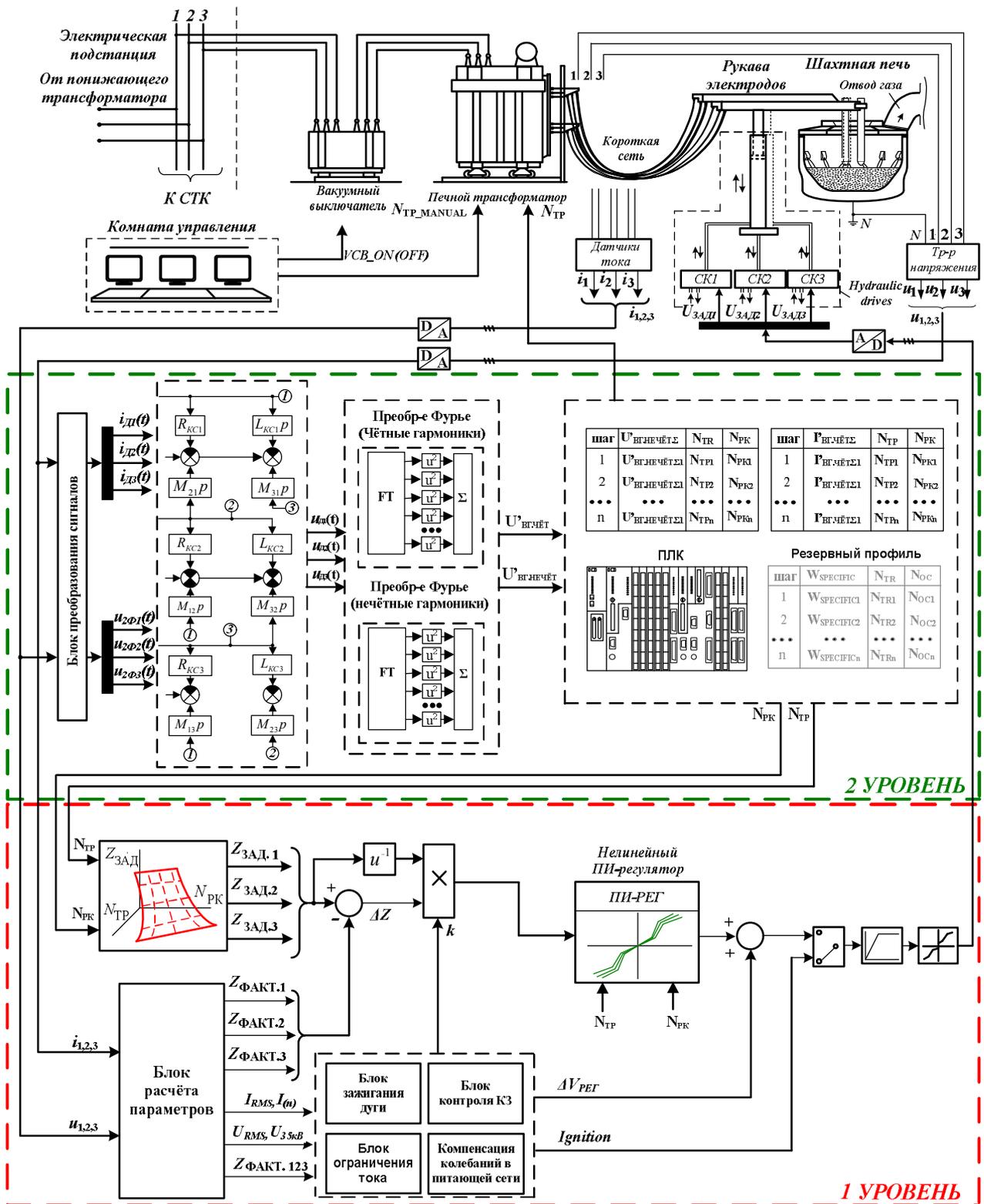


Рисунок 4.1 - Функциональная схема системы управления электрическим режимом ШП-125 с использованием информации о гармоническом составе сигнала напряжения электрической дуги

#### 4.1. Разработка универсальных алгоритмов обработки токовых сигналов для различных типов измерительных устройств

Опыт эксплуатации систем управления электрическим режимом ДСП и УКП различного класса и мощности показывает, что на практике, как правило, используются три основные конфигурации системы измерения токов электрических дуг, предусматривающие использование: 1) измерительных трансформаторов, включенных на первичной стороне ПТ для измерения линейных токов; 2) поясов Роговского на вторичной стороне ПТ; 3) трансформаторов тока, включенных непосредственно трёхфазную первичную обмотку ПТ. Также могут применяться комбинации из двух различных конфигураций. При этом используются следующие группы соединения обмоток ПТ:  $Y/\Delta-11$  и  $\Delta/\Delta-0$ . Для наглядности, все возможные варианты сочетания соединения обмоток и конфигураций систем измерения токов дуг приведены на рис.4.2. Более подробные схемы, в свою очередь, приведены на рис. 4.3.

Отметим, что использование сигналов с системы измерения токов дуг напрямую без дополнительной обработки не во всех обозначенных случаях представляется возможным. Для наглядности, особенности каждого случая приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1.

Особенности использования различных устройств измерения величины тока дуги в составе системы управления электрическим режимом ДСП (УКП)

Конфигурация измерительной системы токов	Соединение $\Delta/\Delta-0$	Соединение $Y/\Delta-0$
Трансформаторы тока, установленные на первичной стороне ПТ	Требуется приведение к току вторичной стороны через КТ для текущей ступени ПТ	Требуется расчёт величины тока на вторичной стороне ПТ по специальному алгоритму
Трансформаторы тока, включенные в обмотку на первичной стороне ПТ	Требуется расчёт величины тока на вторичной стороне ПТ по специальному алгоритму	Требуется расчёт величины тока на вторичной стороне ПТ по специальному алгоритму
Пояса Роговского, установленные на вторичной стороне ПТ	Требуется интегрирование сигнала для восстановления реальных осциллограмм токов дуг	Требуется интегрирование сигнала для восстановления реальных осциллограмм токов дуг

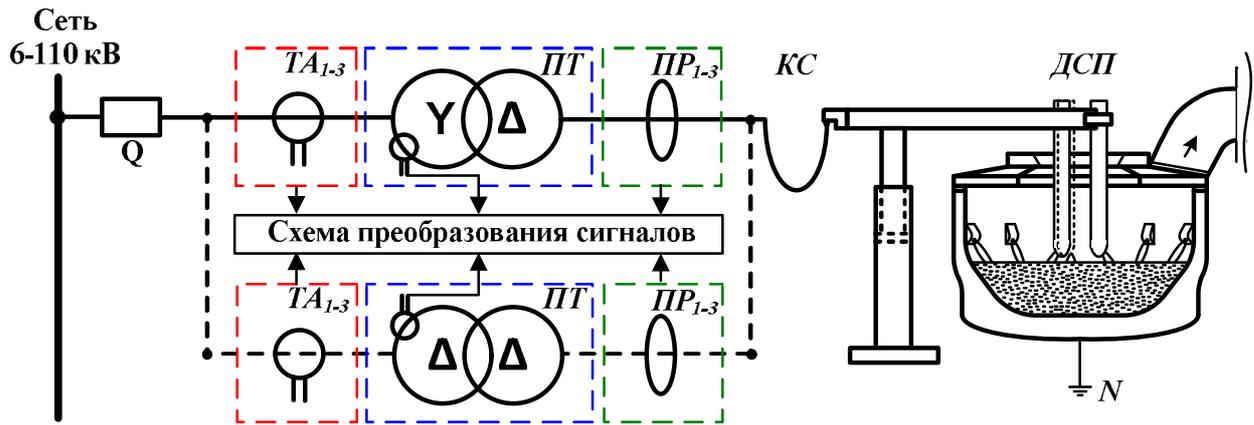


Рисунок 4.2 - Возможные типы систем измерения токов электрических дуг и соединения обмоток печного трансформатора ( $TA_{1-3}$  - измерительные трансформаторы тока в фазах «1», «2» и «3»; ПТ – печной трансформатор со встроенными в обмотку трансформаторами тока;  $ПР_{1-3}$  - пояса Роговского в фазах «1», «2» и «3»; КС – короткая сеть, Q – оперативный вакуумный выключатель)

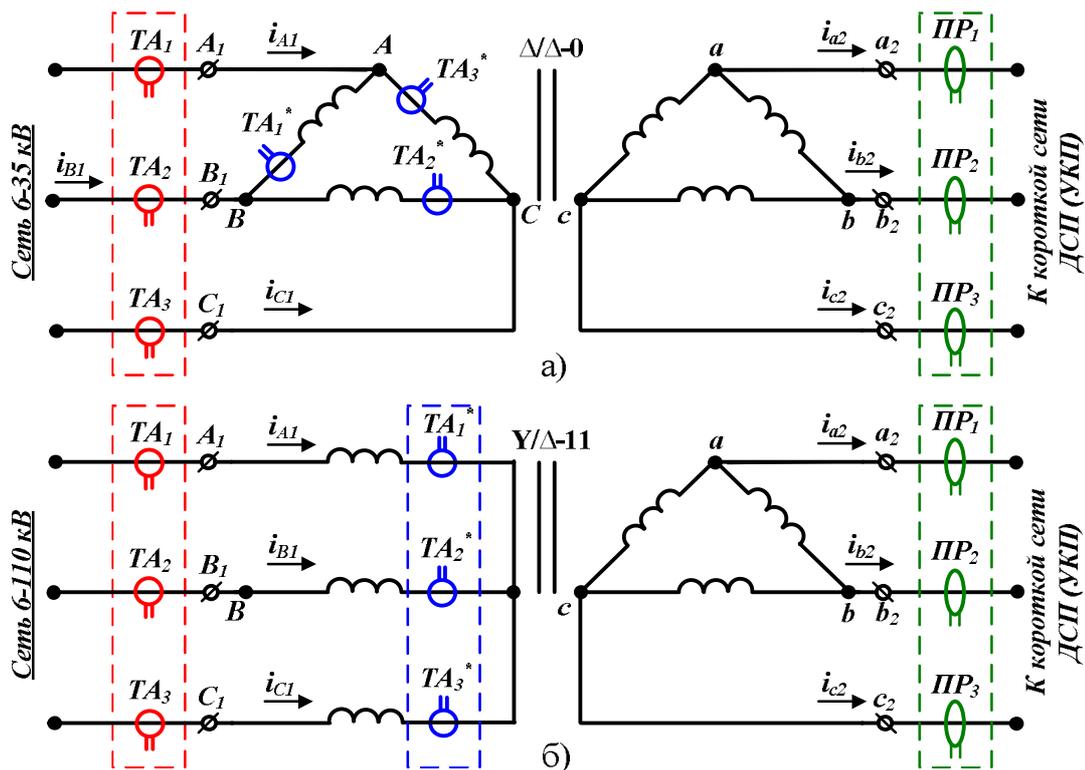


Рисунок 4.3 - Варианты включения устройств измерения тока дуги в схему электрического контура ДСП при соединении обмоток печного трансформатора по схеме: а)  $\Delta/\Delta-0$ ; б)  $Y/\Delta-11$  ( $i_{A1}$ ,  $i_{B1}$ ,  $i_{C1}$  – токи на первичной стороне печного трансформатора;  $i_{a2}$ ,  $i_{b2}$ ,  $i_{c2}$  – токи на вторичной стороне печного трансформатора;  $TA_1$ ,  $TA_2$ ,  $TA_3$  – внешние измерительные трансформаторы тока на первичной стороне ПТ;  $TA_1^*$ ,  $TA_2^*$ ,  $TA_3^*$  – встроенные в ПТ измерительные трансформаторы тока)

#### 4.1.1. Трансформатор тока на первичной стороне ПТ при соединении обмоток по схеме $\Delta/\Delta-0$

Данный случай является наиболее простым, поскольку приведение величины тока на вторичную сторону ПТ производится в соответствии с формулой:

$$i_D(t) = i_{TA}(t) \cdot K_{TA} \cdot K_T, \quad (4.1)$$

где  $i_{TA}(t)$  – мгновенное значение тока в измерительной обмотке трансформатора тока;  $K_{TA}$  – коэффициент трансформации измерительного устройства;

В большинстве случаев преобразование в соответствии с формулой (3.1) может быть реализовано с использованием инструментальной базы, доступной в большинстве современных систем управления электрическим режимом. Тем не менее, в устаревших системах иногда отсутствует возможность учёта изменения величины  $K_T$  в зависимости от ступени печного трансформатора  $N_{ТР}$ . Вследствие этого, на аппаратном уровне приходится прибегать к использованию дополнительных трансформаторов тока, коэффициент трансформации которых изменяется при переключении РПН печного трансформатора, благодаря чему достигается неизменная величина коэффициента трансформации  $K_{TA1} \cdot K_{TA2} \cdot K_T = const$ .

#### 4.1.2. Использование поясов Роговского на вторичной стороне печного трансформатора при соединении обмоток по схеме $\Delta/\Delta-0$ и $Y/\Delta-11$

При использовании поясов Роговского, выходной сигнал с катушки  $U_{IP}$  пропорционален производной тока  $i_D$ . По этой причине в системе измерения тока используются интегрирующие цепи, восстанавливающие осциллограмму тока за счёт операции интегрирования:

$$u_{IP}(t) = L_{IP} \frac{di_D(t)}{dt}, \quad (4.2)$$

$$i_D(t) = K_{IP} \cdot \int u_{IP}(t), \quad (4.3)$$

где  $K_{ПР}$  – величина коэффициента пропорциональности пояса Роговского, равная индуктивности катушки  $L_{ПР}$ ;  $u_{ПР}(t)$  – напряжение на выходе пояса Роговского.

Как правило, в современных системах управления электрическим режимом предусмотрено наличие аппаратных цепей интегрирования для восстановления реальной осциллограммы тока дуги. При этом выходной сигнал цепей интегрирования нормируется до значения 20-40 мА или 1-5 А в зависимости от параметров входных датчиков тока, используемых в СУ ДСП (УКП). В этом случае в выражениях (3.2;3.3) учитываются дополнительные коэффициенты трансформации интегрирующих цепей  $K_{ИЦ}$ .

#### **4.1.3. Использование трансформаторов тока, встроенных в трёхфазную первичную обмотку печного трансформатора при группах соединения $\Delta/\Delta-0$ и $Y/\Delta-11$**

Необходимо отметить, что при подключении обмоток по схеме  $Y/\Delta-11$  сигналы с трансформаторов тока, встроенных в обмотку, и внешних трансформаторов тока, установленных перед трансформатором, по очевидным причинам дают эквивалентные результаты. Вследствие этого, дальнейшее рассмотрение для соединения  $Y/\Delta-11$  будет проведено только для встроенных трансформаторов тока.

Также отметим, что данный вариант является наиболее сложным в применении вследствие того, что характер изменения тока в измерительных обмотках трансформаторов при их соединении в схему «полная звезда» не совпадает с характером изменения тока на вторичной стороне ПТ из-за неодинакового соединения обмоток ПТ. Для исследования взаимосвязи между токами на первичной и вторичной сторонах ПТ была разработана вспомогательная математическая модель электрического контура ДСП с применением библиотеки SimPowerSystems, функциональная схема которой представлена на рис.4.4. Параметры модели были приняты исходя из расчёта, выполненного в главе 2, для  $N_{ТР}=8$ . При этом для оптимизации быстродействия модели, электрическая дуга была представлена по методу С.И. Тельного [59].

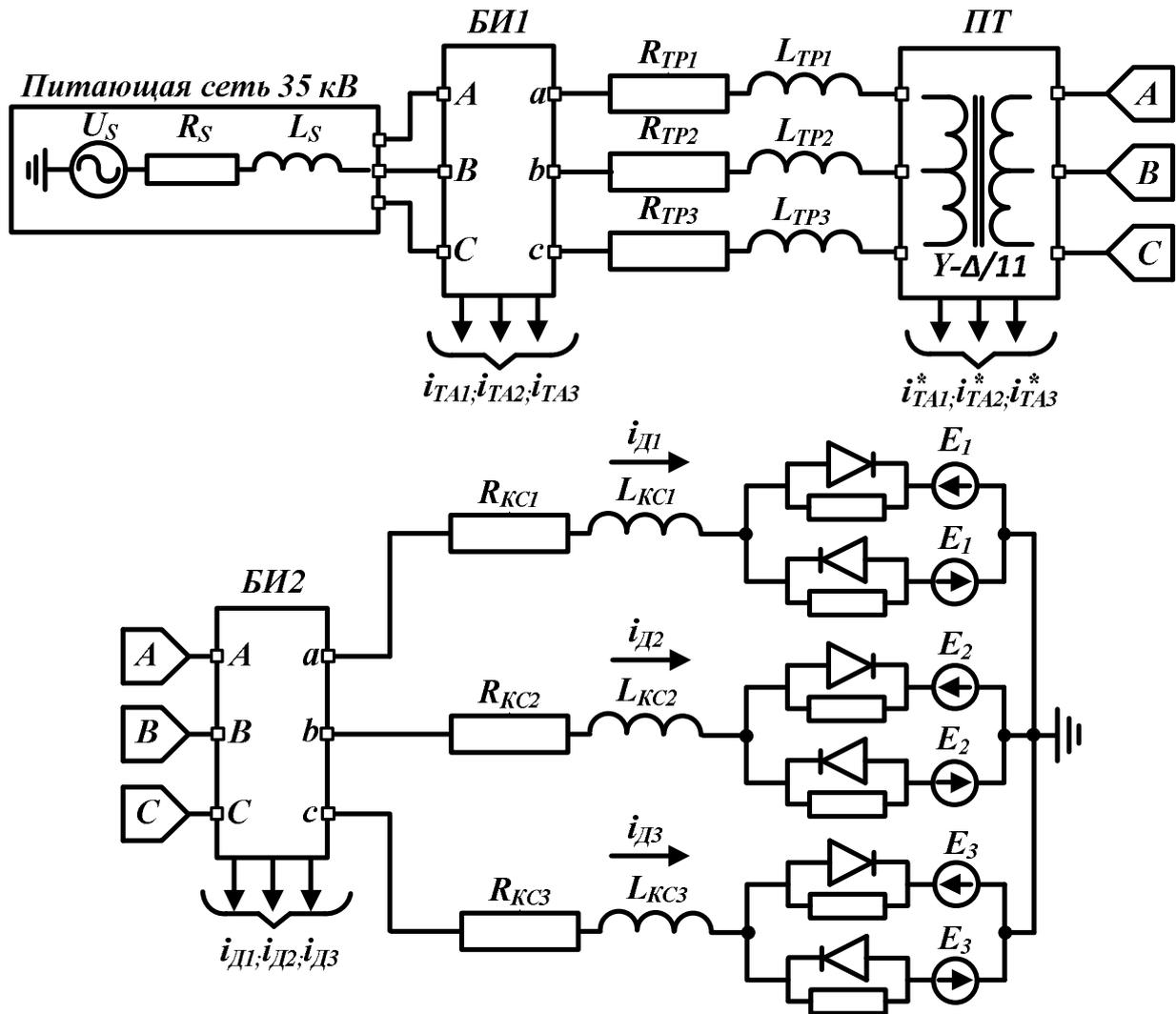


Рисунок 4.4 - Функциональная схема математической модели электрического контура ДСП с различными вариантами измерения сигнала тока дуги (БИ1 – блок измерения №1, моделирует внешние трансформаторы тока на первичной стороне; БИ2 – блок измерения №2 для определения фактического значения тока дуги;  $E_1, E_2, E_3$  – противо-ЭДС электрической дуги)

Изначально, рассмотрим осциллограммы (рис.4.5), полученные с помощью математической модели при различных режимах работы печи (симметричный режим, однофазный обрыв дуги, однофазное КЗ дуги) для случая соединения обмоток ПТ по схеме  $Y/\Delta-11$  (рис. 4.5.а-г). На рис. 4.5.а и 4.5.б показаны сигналы  $i_{TA}$  и  $i_{TA}^*$ , соответствующие сигналам с внешних и встроенных в обмотку ПТ трансформаторов тока. Как уже отмечалось ранее, для случая  $Y/\Delta-11$  полученные сигналы идентичны. Отметим, что здесь и далее для удобства анализа принимается в качестве допущения, что коэффициент трансформации всех измерительных устройств равен 1.

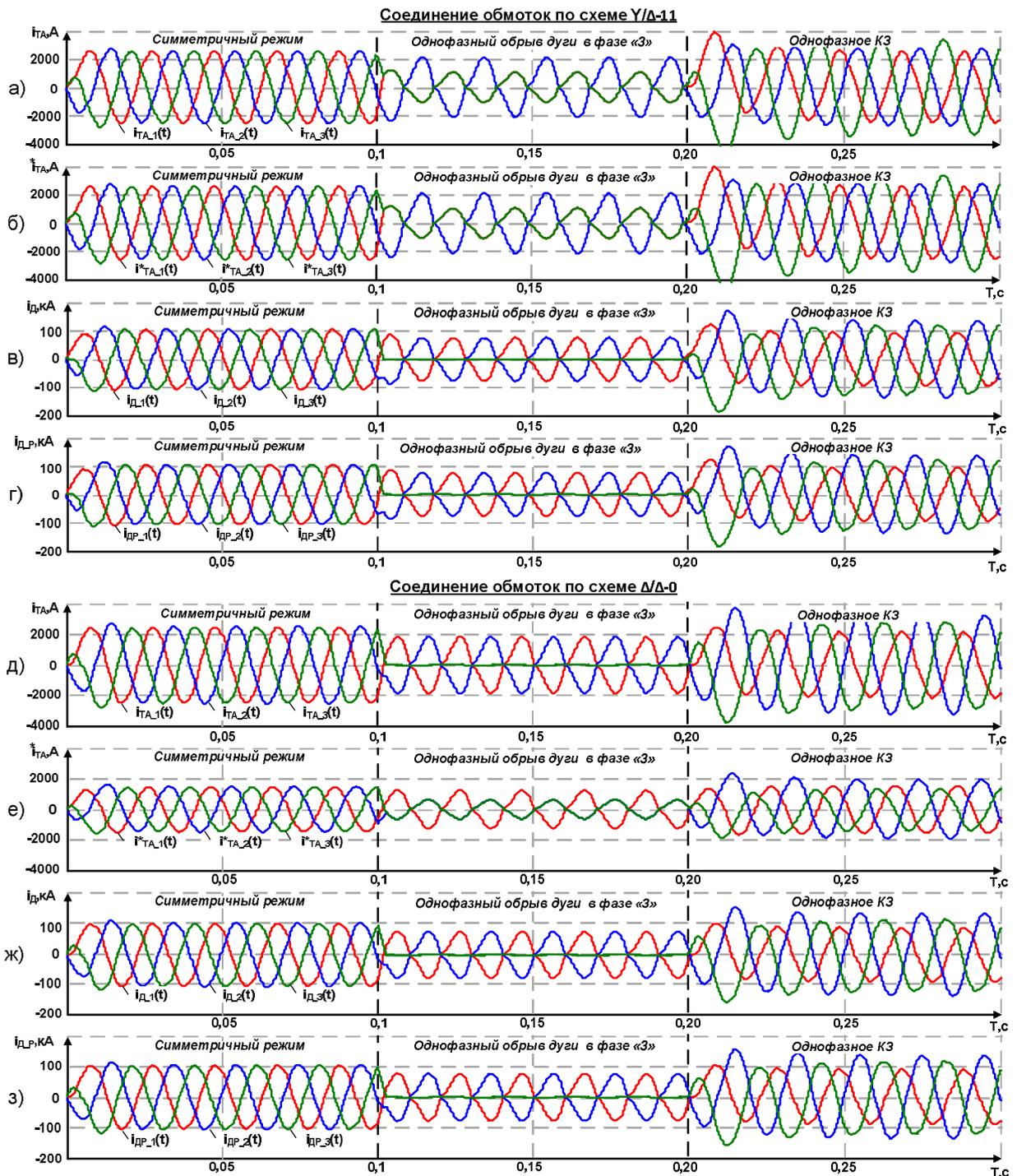


Рисунок 4.5 - Осциллограммы, демонстрирующие особенности применения встроенных в обмотку трансформаторов тока при различных способах соединения обмотки ПТ (а, д – осциллограммы сигналов с внешних трансформаторов тока; б, е – осциллограммы сигналов с внутренних трансформаторов тока, в, ж – осциллограммы фактического значения тока дуги; г, з – осциллограммы восстановленного значения тока дуги)

На рис. 4.5.в приведены осциллограммы фактических значений токов электрических дуг  $i_{д}$ . Очевидно, что сигналы  $i_{TA1,2,3}$  и  $i_{TA1,2,3}^*$  являются идентичными по форме и амплитуде только в симметричном режиме. В режиме однофазного обрыва и однофазного КЗ имеет место значительное расхождение как по амплитуде, так и по фазе сигнала. Для того, чтобы получить корректные осциллограммы токов дуг  $i_{д\_P}$  на основании сигналов  $i_{TA1,2,3}$  и  $i_{TA1,2,3}^*$ , необходимо использовать следующее преобразование:

$$\begin{cases} i_{д1\_P} = K_T (i_{TA\_1}^* - i_{TA\_2}^*) \\ i_{д2\_P} = K_T (i_{TA\_2}^* - i_{TA\_3}^*), \\ i_{д3\_P} = K_T (i_{TA\_3}^* - i_{TA\_1}^*) \end{cases} \quad (4.4)$$

где  $i_{д1\_P}$ ,  $i_{д2\_P}$ ,  $i_{д3\_P}$  – расчётные значения сигнала тока электрической дуги;  $i_{TA\_1}^*$ ,  $i_{TA\_2}^*$ ,  $i_{TA\_3}^*$  – сигналы с трансформаторов тока на первичной стороне ПТ.

Выражения (4.4) получены на основании векторных диаграмм, представленных на рис.4.6, показывающих взаимосвязь токов на первичной и вторичной стороне ПТ. Корректность преобразования (4.4) также подтверждается результатом моделирования, поскольку расчётный сигнал тока дуги  $I_{д\_P}$  (рис.4.5.г) идентичен фактическому (рис.4.5.в).

Случай для осциллограмм при схеме соединения обмоток  $\Delta/\Delta-0$  (рис.4.5.д-з) в целом аналогичен. Основное отличие заключается в том, что сигналы с внешних и встроенных в обмотку ПТ трансформаторов тока не идентичны (рис.4.5.д и 4.5.е). Здесь очевидно, что сигнал с внешних трансформаторов тока пропорционален фактическому значению тока дуги, и может быть рассчитан с использованием параметра  $K_T$ , о чём говорилось ранее. При этом для сигналов с встроенных в обмотку трансформаторов тока, согласно векторной диаграмме на рис.4.6, также необходимо прибегнуть преобразованию:

$$\begin{cases} i_{д1\_P} = \sqrt{3} K_T (i_{TA\_1}^* - i_{TA\_3}^*) \\ i_{д2\_P} = \sqrt{3} K_T (i_{TA\_2}^* - i_{TA\_1}^*) \\ i_{д3\_P} = \sqrt{3} K_T (i_{TA\_3}^* - i_{TA\_2}^*) \end{cases} \quad (4.5)$$

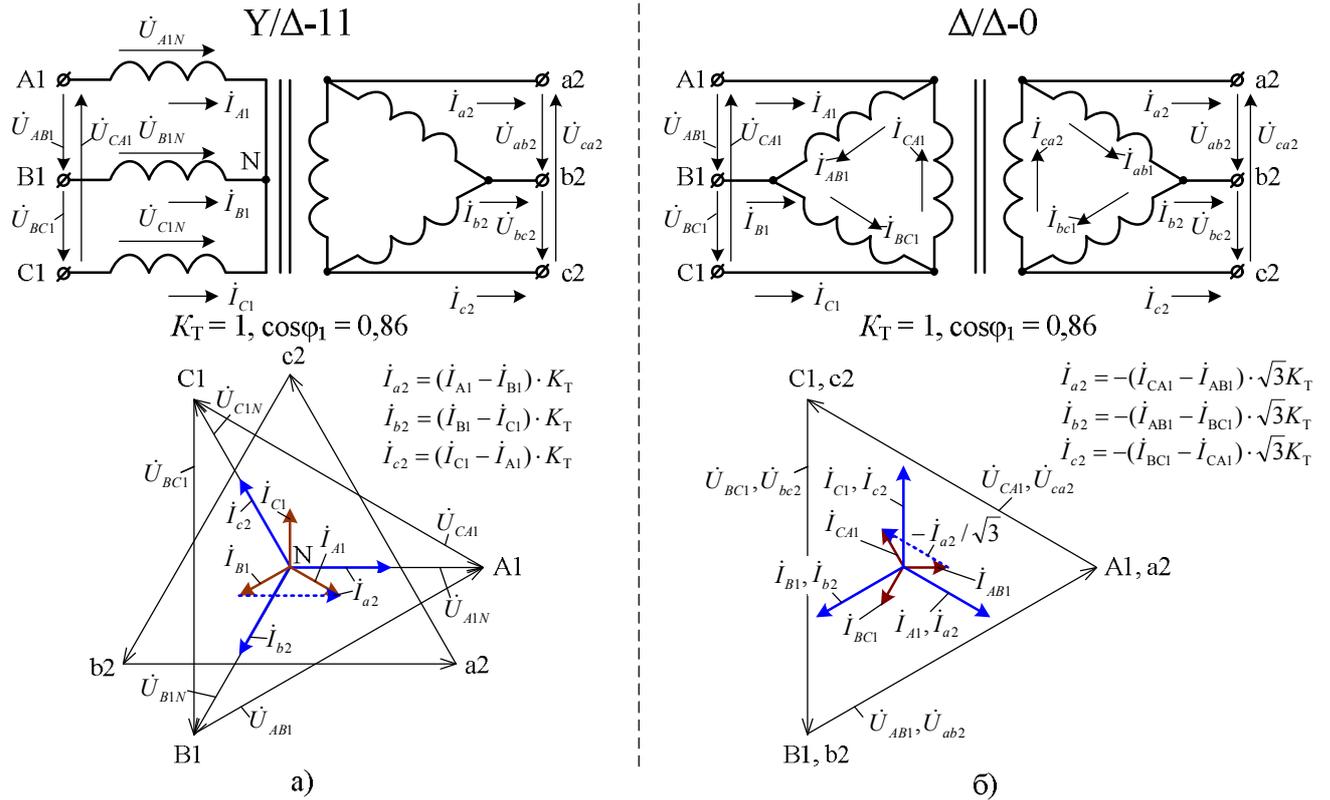


Рисунок 4.6 - Векторные диаграммы, показывающие взаимосвязь токов на первичной и вторичной сторонах печного трансформатора при различных группах соединения обмоток (а – группа соединения Y/Δ-11; б – группа соединения Δ/Δ-0)

#### 4.1.4. Разработка функциональной схемы универсального алгоритма обработки сигналов с датчиков тока

Универсальный алгоритм обработки токовых сигналов, реализуемый на базе контроллера системы автоматического управления электрическими режимами ДСП (УКП), должен обеспечивать простую интеграцию существующих систем [60] измерения токов на базе ТТ или поясов Роговского со встроенными датчиками тока системы управления, обеспечивающими нормирование и гальваническую изоляцию сигналов.

В случаях, когда в составе электрооборудования ДСП (УКП) применяются встроенные или внешние трансформаторы тока, устанавливаемые на первичной стороне ПТ, использование данного алгоритма позволяет исключить применение дополнительных аппаратных устройств для формирования сигналов обратных связей по току с постоянным коэффициентом трансформации, например, дополнительных трансформаторов тока с изменяемым коэффициентом трансформации с функцией синхронизации с РПН ПТ. Вследствие этого,

предлагается на практике использовать алгоритм, функциональная схема которого представлена на рис.4.7.

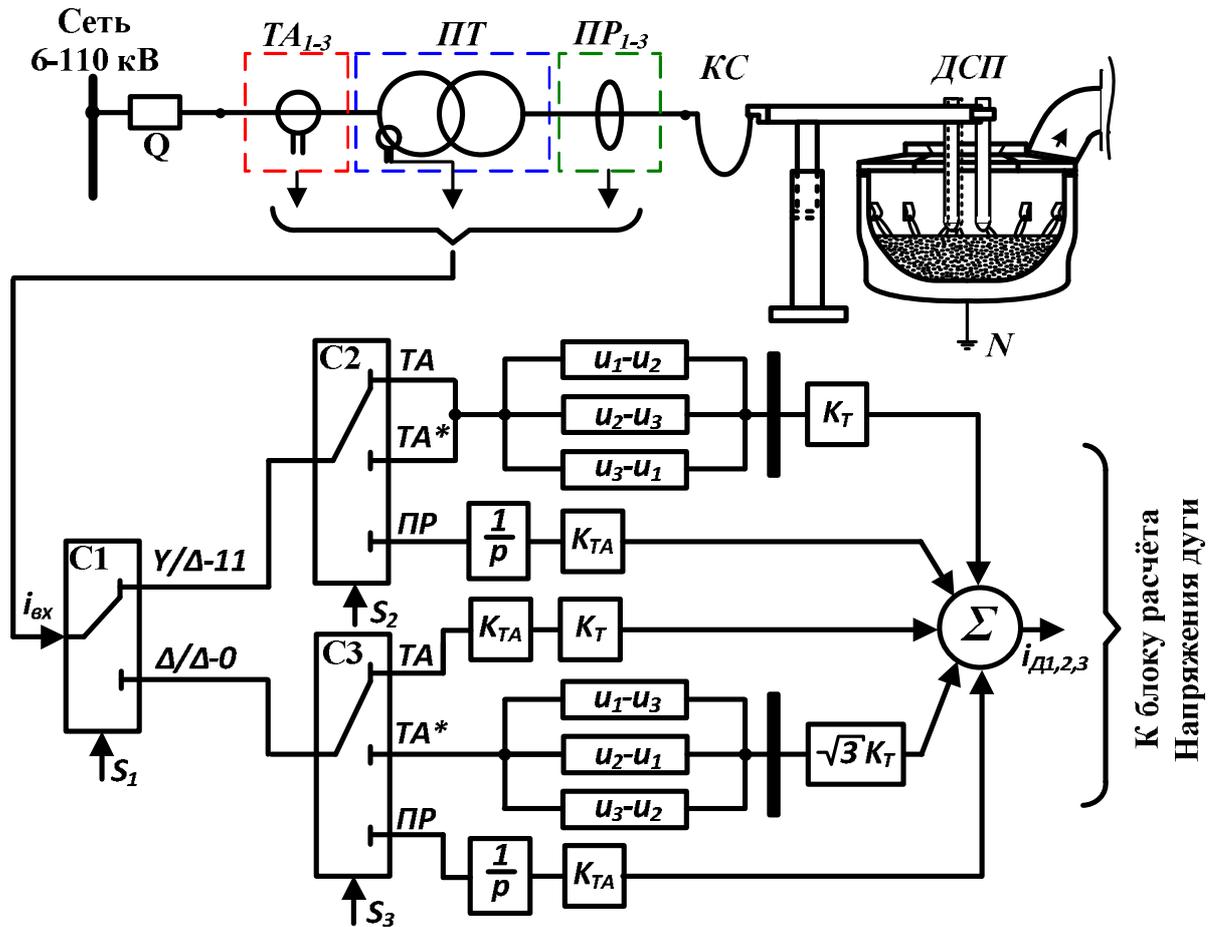


Рисунок 4.7 - Функциональная схема универсального алгоритма обработки сигналов для различных способов измерения тока дуги ( $C_1, C_2, C_3$  – селекторы №1,2,3;  $S_1, S_2, S_3$  – сигналы управления селекторами №1,2,3 соответственно)

Данный алгоритм функционирует следующим образом. Изначально на вход селектора  $C_1$  подаётся сигнал  $i_{вх}$  с системы измерения тока ДСП (УКП). В зависимости от величины сигнала управления  $S_1$ , данный сигнал поступает либо на вход селектора  $C_2$  (случай соединения обмоток ПТ по схеме  $Y/\Delta-11$ ), либо на вход селектора  $C_3$  (случай соединения обмоток ПТ по схеме  $\Delta/\Delta-0$ ). Величины управляющих сигналов  $S_2$  и  $S_3$  определяют, какое устройство измерения тока дуги используется на данный момент. После прохождения через селекторы, входной сигнал подвергается преобразованиям, которые были подробно описаны ранее. Конечным результатом работы алгоритма является восстановленное значение сигнала тока электрической дуги на вторичной стороне ПТ, которое поступает непосредственно в систему управле-

ния электрическим режимом для дальнейшего расчёта действующего значения тока дуги  $I_{RMS}$ , полного импеданса фазы  $Z_{2\phi}$  или полного адмитанса фазы  $Y_{2\phi}$ , активной, реактивной и полной мощности на вторичной стороне ПТ  $P_2$ ,  $Q_2$ ,  $S_2$  соответственно.

#### **4.2. Разработка методики определения граничных значений таблиц профиля плавки. Разработка алгоритма переключения $N_{ТР}$ и $N_{РК}$ по высшим гармоникам напряжения электрической дуги**

Для разработки методики определения граничных значений таблиц профиля плавки необходимо проанализировать изменение сигналов  $U'_{д.вг.чѐт}$ ,  $U'_{д.вг.нечѐт}$  для характерной плавки. В рамках данной плавки, существующая система управления осуществляет переключение ступеней печного трансформатора и рабочей кривой в соответствии со следующим алгоритмом:

**-Точка 0.** Начало плавки, работа на пониженной ступени  $N_{ТР}=7$ ,  $N_{РК}=5$ .

**-Точка 1.** Переход на повышенную ступень  $N_{ТР}=9$ ,  $N_{РК}=5$  по критерию достижения величины удельного расхода электроэнергии  $W_{уд1}$ .

**-Точка 2.** Переход на режим с пониженным излучением электрической дуги в фазе «2» при  $N_{ТР}=9$ ,  $N_{РК}=3$  по критерию достижения величины удельного расхода электроэнергии  $W_{уд2}$ .

**-Точка 3.** Возврат на сочетание  $N_{ТР}=9$ ,  $N_{РК}=5$  по критерию достижения величины удельного расхода электроэнергии  $W_{уд3}$ .

**-Точка 4.** Выполнена подвалка. Переход на пониженную ступень  $N_{ТР}=7$ ,  $N_{РК}=5$ .

**-Точка 5.** После подвалки достигнуто граничное значение по удельному расходу электроэнергии  $W_{уд4}$ . Переход сочетание  $N_{ТР}=9$ ,  $N_{РК}=5$ .

**- Точка 6.** Конечная стадия. Переход на сочетание  $N_{ТР}=8$ ,  $N_{РК}=4$  по критерию достижения величины удельного расхода электроэнергии  $W_{уд5}$ .

Основные данные по точкам перехода в существующей системе управления электрическим режимом сведены в таблице 4.2. В основу функционирования существующего алгоритма заложен профиль плавки, представленный в таблице 4.3.

Таблица 4.2.

Точки перехода с одного сочетания  $N_{ТР}$  и  $N_{РК}$  на другое при использовании существующей системы управления

№	$N_{ТР}$	$N_{РК}$	t,с	$U'_{Д.ВГ.ЧЕТ}$	$U'_{Д.ВГ.НЕЧЕТ}$	Критерий
<b>Плавка ШП-125 (40 т. чугуна, скрап без стружки)</b>						
0	7	5	0	-	-	Начало плавки
1	9	5	91	10,55	16,33	$W_{уд1}$
2	9	3	432	3,25	17,44	$W_{уд2}$
3	9	5	610	1,13	11,00	$W_{уд3}$
4	7	5	926	-	-	Подвалка
5	9	5	1009	4,25	12,29	$W_{уд4}$
6	8	4	1324	1,01	6,87	$W_{уд5}$

Таблица 4.3.

Профиль плавки в существующей системе управления электрическим режимом, используемой на ШП-125

№ программы	$N_{ТР}$	$N_{РК}$	$Z_{23АД.1}$ [МОм]	$Z_{23АД.2}$ [МОм]	$Z_{23АД.3}$ [МОм]
1	7	5	6,35	6,25	6,50
2	9	5	6,05	6,00	6,15
3	9	3	6,10	5,90	6,00
4	8	4	6,20	6,00	6,10
5	9	5	6,30	6,10	6,20
6	-	-	-	-	-
7	8	1	6,05	5,85	5,9
8	8	2	6,20	5,90	6,10
9	8	3	6,20	6,00	6,10

Анализ алгоритмов работы существующей системы управления позволил выявить следующие недостатки в существующей системе управления электрическим режимом [61-67]:

1. На начальной стадии плавления шихты переход с сочетания  $N_{TP}=7$ ,  $N_{PK}=5$  на сочетание  $N_{TP}=9$ ,  $N_{PK}=5$  по критерию  $W_{уд}$  может быть произведён несвоевременно ввиду того, что распределение лома уникально для каждой отдельно взятой плавки. Граничное значение  $W_{уд}$  в данном случае является эмпирическим параметром, который на практике подбирается итерационным методом. Анализ большой выборки плавков показал, что необходимость перехода на сочетание  $N_{TP}=9$ ,  $N_{PK}=3$  с пониженным излучением дуги в фазе «2» для компенсации излишней тепловой энергии, поглощённой водоохлаждаемыми панелями, возникает вследствие несвоевременного перехода на повышенную ступень  $N_{TP}=9$ ,  $N_{PK}=3$ . В новой системе необходимость понижения излучения в фазе «2» отсутствует ввиду того, что переходы с одного сочетания  $N_{TP}$  и  $N_{PK}$  производятся своевременно. Поэтому в новой настройке уставки для данного сочетания могут быть заменены альтернативными с учётом критерия выбора оптимального несимметричного режима [68].

2. Ход плавки после завершения проплавления колодцев может быть различен. В ряде случаев раскрытие колодцев проходит относительно стабильно при малой амплитуде возмущающих воздействий, вызванных обвалами шихты. В ряде случаев, в том числе для плавки на рис.3.8, раскрытие колодцев проходит со значительными возмущающими воздействиями. Об этом свидетельствует резкий рост относительного действующего значения суммарных чётных гармоник тока и напряжения дуги приблизительно на 150 секунде. Применение  $W_{уд}$  не позволяют отследить начало данного процесса, вследствие чего возникает вероятность того, что плавка будет протекать на повышенной ступени при значительных возмущениях.

3. После закрытия пальцев, плавка протекает при постоянном сочетании  $N_{TP}=9$ ,  $N_{PK}=4$ . Анализ относительного действующего значения суммарных нечётных гармоник тока и напряжения дуги позволяет судить о том, что условия в процессе плавки менялись вследствие изменения режима продувки жидкой ванны. При этом адаптации электрического режима к изменению

условий не происходит, так как удельный расход электроэнергии в данном случае не является показательным параметром.

Для устранения вышеприведённых недостатков, предлагается использовать следующий алгоритм управления, в основе которого лежит анализ значительной выборки плавков:

1. Начало плавки, работа на пониженной ступени  $N_{ТР}=7$ ,  $N_{РК}=5$ . На протяжении 1 минуты система выведена из работы для компенсации постоянных времени фильтров скользящих средних.

2. Включение работы системы. Управление по относительному действующему значению суммарных чётных гармоник напряжения дуги. Критерий перехода на промежуточную ступень  $N_{ТР}=8$ ,  $N_{РК}=5$ : величина  $U'_{ВГ.ЧЁТ}$  достигла граничного значения в 7,5% и не выходит за его пределы на протяжении 30 секунд.

3. Проверка возможности перехода на повышенную ступень  $N_{ТР}=9$ ,  $N_{РК}=5$ . Если после перехода на  $N_{ТР}=8$ ,  $N_{РК}=5$  величина  $U'_{ВГ.ЧЁТ}$  не превышает граничного значения в 7,5% на протяжении 1 минуты, система переходит на сочетание  $N_{ТР}=9$ ,  $N_{РК}=5$ . В противном случае система остаётся на сочетании  $N_{ТР}=8$ ,  $N_{РК}=5$ , пока величина  $U'_{ВГ.ЧЁТ}$  вновь не опустится до уровня в 10% и не будет превышать его на протяжении 30 секунд, что будет являться критерием перехода на сочетание  $N_{ТР}=9$ ,  $N_{РК}=5$ .

4. По факту достижения величины  $U'_{ВГ.ЧЁТ}$  граничного значения в 1,5%, осуществляется переход на сочетание  $N_{ТР}=9$ ,  $N_{РК}=3$ . На последующие всплески система не реагирует до момента подвалки.

5. После подвалки производится переход на пониженную ступень  $N_{ТР}=7$ ,  $N_{РК}=5$ . На протяжении 30 секунд система выведена из работы для компенсации постоянных времени фильтров скользящих средних.

6. По мере достижения граничного значения величины  $U'_{ВГ.ЧЁТ}$  граничного значения в 1,5%, система возвращается на повышенную ступень  $N_{ТР}=9$ ,  $N_{РК}=5$  и продолжает работать вплоть до закрытия пальцев.

7. После закрытия пальцев, система переходит на управление по относительному действующему значению суммарных нечётных гармоник напряжения дуги. При этом вводится следующий критерий управления, где соче-

тание  $N_{TP}=8$ ,  $N_{PK}=1$  характерно для режима с длинными дугами, сочетание  $N_{TP}=8$ ,  $N_{PK}=2$  – средними дугами, и сочетание  $N_{TP}=8$ ,  $N_{PK}=3$  – для режима с короткими дугами:

$$[N_{TP}; N_{PK}] = \begin{cases} [8;1], & \text{если } U'_{ВГ.НЕЧЕТ} < 7,5\% \\ [8;2], & \text{если } 7,5\% \leq U'_{ВГ.НЕЧЕТ} \leq 10\% \\ [8;3], & \text{если } U'_{ВГ.НЕЧЕТ} > 10\% \end{cases} \quad (4.6)$$

Блок-схема работы вышеописанного алгоритма представлена на рис.4.9 [69-71]. Точки переключения, соответствующие работе данного алгоритма (см. рис.4.8), по аналогии с таблицей 4.2 сведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3.

Точки перехода с одного сочетания  $N_{TP}$  и  $N_{PK}$  на другое при использовании новой системы управления

№	$N_{TP}$	$N_{PK}$	t,с	$U'_{Д.ВГ.ЧЕТ}$	$U'_{Д.ВГ.НЕЧЕТ}$	Критерий
<b>Плавка ШП-125 (40 т. чугуна, скрап без стружки)</b>						
1	7	5	0	-	-	Начальные значения
2	8	5	134	5,04	13,87	Чётные гармоники
3	9	5	394	5,08	16,91	Чётные гармоники
4	9	3	463	1,5	15,9	Чётные гармоники
5	7	5	926	-	-	Подвалка
6	9	3	1032	1,5	12,73	Чётные гармоники
7	8	2	1391	1,38	9,82	Нечётные гармоники
8	8	3	1523	1,89	10	Нечётные гармоники
9	8	2	1687	1,7	10	Нечётные гармоники
10	8	1	1798	1,43	7,5	Нечётные гармоники
11	8	2	1994	1.41	7.5	Нечётные гармоники

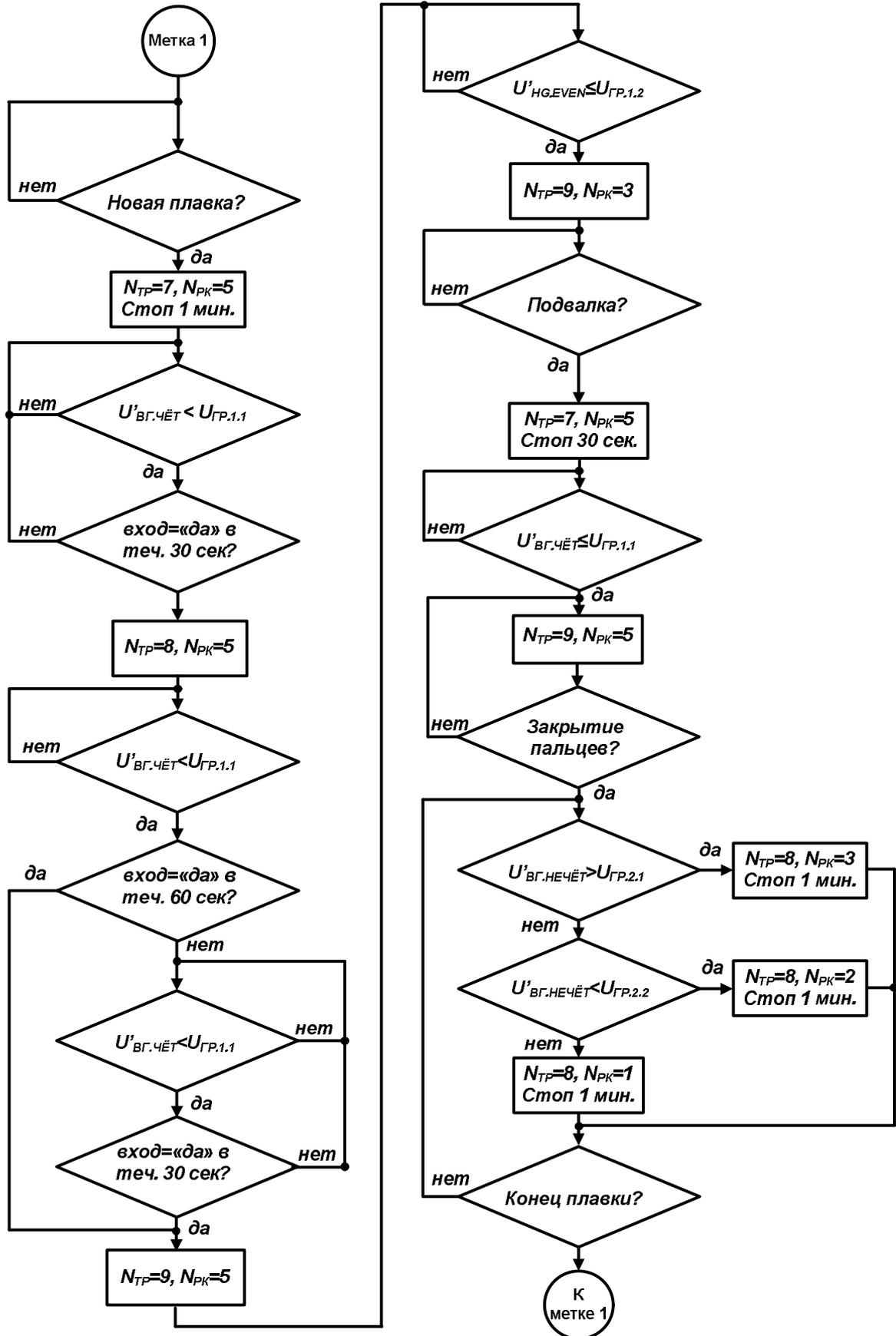


Рисунок 4.9 - Блок-схема алгоритма функционирования новой системы управления электрическим режимом ШП с применением анализа гармонического состава напряжения дуги

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. При эксплуатации дуговых сталеплавильных печей используются три основные конфигурации систем измерения токов дуг, а именно: 1) системы на базе внешних трансформаторов тока на первичной стороне печного трансформатора; 2) системы на базе измерительных трансформаторов тока, встроенных в печной трансформатор; 3) системы на базе поясов Роговского, установленных на вторичной стороне печного трансформатора. Применение той или иной конфигурации при различных группах соединения обмоток печного трансформатора ( $\Delta/\Delta-0$  или  $Y/\Delta-11$ ) влечёт за собой необходимость выполнения определённых предварительных преобразований для получения корректных сигналов мгновенных значений токов дуг. Для решения выше обозначенной проблемы, разработан универсальный алгоритм обработки сигналов для различных способов измерения тока дуги. Данный алгоритм обеспечивает возможность функционирования системы управления при различных конфигурациях системы измерения токов дуг, а также при различных группах соединения обмоток печного трансформатора ( $\Delta/\Delta-0$  и  $Y/\Delta-11$ ). Благодаря применению разработанного алгоритма, все преобразования сигналов выполняются на программном уровне, без использования дополнительных аппаратных устройств в составе систем измерения тока.

2. Разработан алгоритм переключения ступеней печного трансформатора и номера рабочей кривой, в основе которого лежит анализ гармонического состава сигналов напряжений электрических дуг. На базе результатов анализа большой выборки плавок определены граничные значения в 7,5% и 1,5% для управления по чётным гармоникам напряжения электрической дуги на начальной стадии плавления шихты. Аналогичные значения в 10% и 7,5% определены для регулирования по нечётным гармоникам напряжений дуг на конечной стадии плавления. Основным критерием при определении граничных значений по чётным гармоникам стал выход сигнала тока электрической дуги на участок со средней амплитудой колебаний (для диагностики завершения промежуточной стадии активного проплавления шихты) и на участок с минимальной амплитудой колебаний (для диагностики момента полного перехода к жидкой фазе). Для нечётных гармоник граничные значения определялись в соответствии с

режимами продувки кислородом (минимальный, средний и максимальный расход). Данный алгоритм позволяет осуществлять переключения сочетаний  $N_{TR}$  и  $N_{PK}$  в соответствии с реальными технологическими процессами, протекающими в ванне печи, тем самым предотвращая несвоевременные переключения. В рамках разработанного алгоритма предусмотрен дополнительный механизм, направленный на предотвращение несвоевременного перехода на повышенную ступень печного трансформатора на начальной стадии плавления шихты. Работа на повышенной ступени до окончания стадии активного расплавления впоследствии приводит к необходимости перехода на режим с пониженным излучением электрической дуги в фазе «2», который направлен на компенсацию излишней тепловой энергии, поглощённой водоохлаждаемыми панелями. Обосновано, что на конечной стадии плавления применение постоянного сочетания  $N_{TR}$  и  $N_{PK}$  не является оптимальным вследствие меняющихся условий плавки, обусловленных интенсивностью продувки расплава кислородом. Предложен альтернативный способ управления электрическим режимом на поздней стадии плавления шихты, в основе которого лежит анализ текущего значения относительного действующего значения суммарных нечётных гармоник напряжений электрических дуг с переключением между режимами с короткими, средними и длинными дугами.

3. Разработана функциональная схема системы управления электрическим режимом шахтной печи с использованием информации о гармоническом составе напряжений электрических дуг. Данная функциональная схема включает в себя следующие структурные компоненты: блок преобразования сигналов с датчиков тока электрической дуги, блок расчёта напряжения электрической дуги на основе мгновенных значений токов электрических дуг и фазных напряжений, блок ПЛК, в который заложены алгоритм перехода с одного этапа профиля плавки на другой, а также граничные значения по чётным и нечётным гармоникам напряжения электрической дуги.

## Глава 5. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВ ВНЕДРЕНИЯ НА ИНЫХ УСТАНОВКАХ РАЗЛИЧНОЙ МОЩНОСТИ И КЛАССА

### 5.1. Результаты внедрения новой системы управления на базе ШП-125

Разработанная в предыдущих разделах усовершенствованная система управления электрическим режимом ШП-125 с системой диагностики стадии плавления шихты по высшим гармоникам напряжений электрических дуг была внедрена в действующее производство. В качестве примера, на рис.5.1 приведены осциллограммы, полученные в результате работы данной системы для характерной плавки, с нанесением исходных и новых точек переключения сочетаний  $N_{ТР}$  и  $N_{РК}$ . За период испытаний, проводимых с 26.01.2020 г. по 03.05.2020 г. был достигнут технический эффект по снижению удельного расхода электроэнергии на 1,75%, что подтверждается актом внедрения в приложении 2. Достижение технического эффекта обеспечивают следующие преимущества разработанной системы управления электрическим режимом:

1. Обеспечено своевременное переключение между сочетаниями ступени печного  $N_{ТР}$  и  $N_{РК}$  в соответствии с реальными технологическими процессами, протекающими внутри ванны печи.
2. Предусмотрен алгоритм предотвращения несвоевременного перехода на повышенную ступень печного трансформатора на начальной стадии плавления шихты, вследствие которого происходит избыточное поглощение тепловой энергии водоохлаждаемыми панелями.
3. Обеспечена адаптация электрического режима к интенсивности продувки расплава кислородом.

С учётом подтверждённой величины технического эффекта по снижению удельного расхода электроэнергии, может быть рассчитан годовой экономический эффект от внедрения усовершенствованной системы управления электрическим режимом. В основу расчёта ложатся номинальные экономические показатели для работы ШП-125, представленные в таблице 5.1. В качестве базового периода принят период работы печи с 25.01.2019 г. по 25.01.2020 г. В качестве расчётного периода принят период работы печи в течение одного года после внедрения новой системы (с 26.01.2020 г. по 26.01.2021 г.)

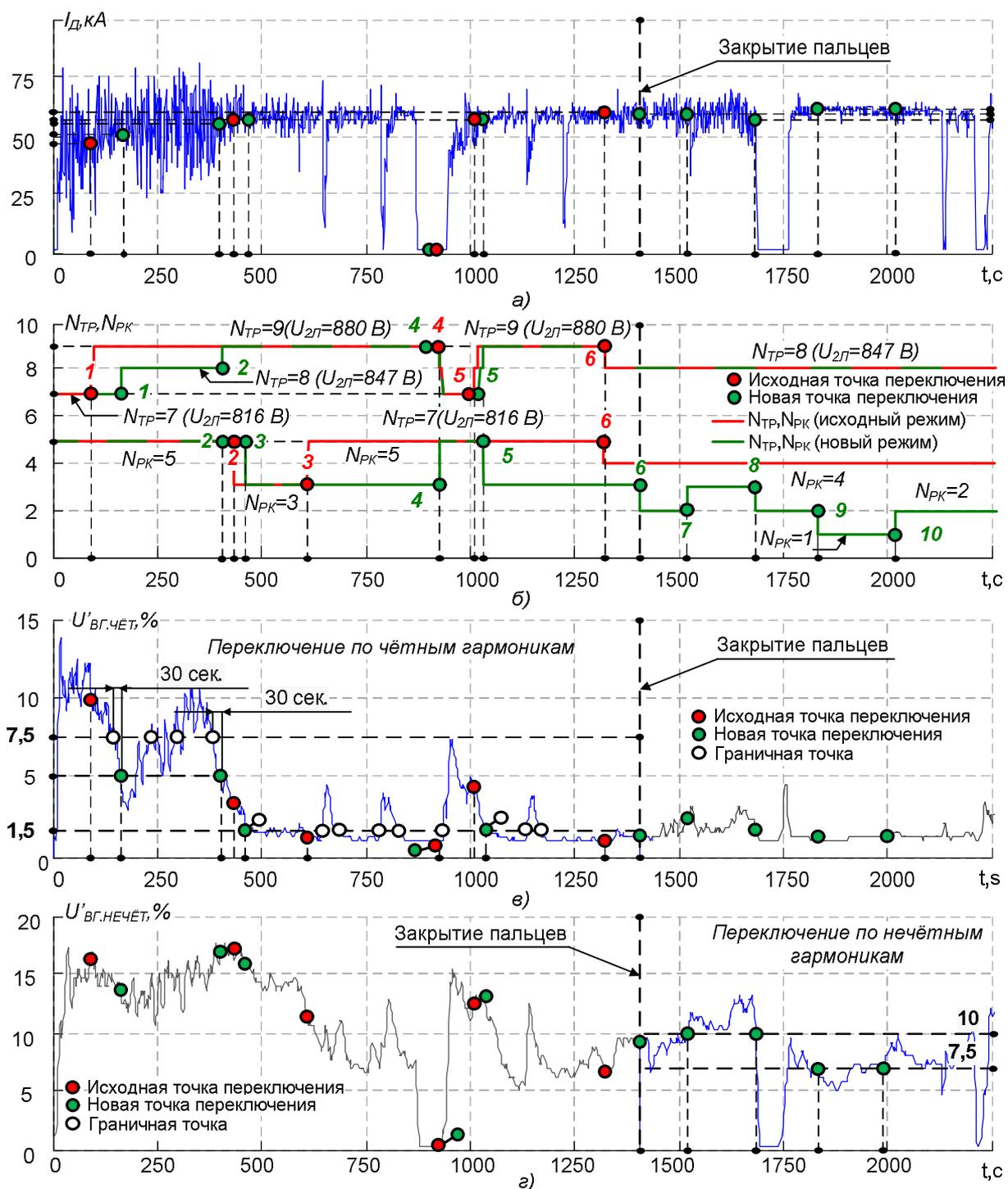


Рисунок 5.1- Осциллограммы сигналов: а) среднего значения сигнала тока электрической дуги  $I_d$ ; б) переключения ступени печного трансформатора  $N_{TR}$  и номера рабочей кривой  $N_{PK}$  для существующей и новой системы; в) относительного действующего значения суммарных чѐтных гармоник напряжения дуги  $U'_{вг.чѐт}$ , г) относительного действующего значения суммарных нечѐтных гармоник напряжения дуги,  $U'_{вг.нечѐт}$

## 5.2. Расчёт экономического эффекта и рекомендации по внедрению на иных ДСП различной мощности и класса

С учётом данных, представленных в таблице 5.1, дополнительная прибыль от снижения удельного расхода электроэнергии за счёт внедрения усовершенствованной системы управления электрическим режимом с системой диагностики стадии плавления шихты по высшим гармоникам напряжений электрических дуг может быть рассчитана по следующей формуле:

$$\Delta\Pi = O_p(UД_Б - UД_Р) \cdot Ц_p = 988000 \cdot (274,8 - 269,99) \cdot 3,52 = 16\,728\,025,60 \text{ руб.} \quad (5.2)$$

где  $O_p$  – годовой объём производства жидкой стали,  $UД_Б$  – средний удельный расход электроэнергии в базовом периоде при использовании исходной системы управления электрическим режимом,  $UД_Р$  – средний удельный расход электроэнергии в расчётном периоде при использовании новой системы управления электрическим режимом,  $Ц_p$  – стоимость электроэнергии в расчётном периоде

Таблица 5.1.

Номинальные экономические показатели работы ШП-125

Наименование показателя	Ед.изм.	Обозн	Значение показателя за период	
			Базовый	Расчётный
1.Годовой объём производства жидкой стали ШП-125	т	$O_p$	-	988 000,00
2.Средний удельный расход электроэнергии при использовании исходной системы управления электрическим режимом ШП-125	кВтч/т	$UД_Б$	274,8	-
3.Средний удельных расход электроэнергии при использовании новой системы управления электрическим режимом	кВтч/т	$UД_Р$	-	269,99
4. Стоимость электроэнергии в расчётный период	Руб/ кВтч	$Ц_p$	-	3,52

Отметим, что разработанная система управления электрическим режимом ШП-125 является универсальной и может быть использована на иных ДСП различных по классу, мощности и способу завалки шихты (непрерывная подача шихты конвейером с использованием технологии Consteel, классическая завалка через отводимый свод) [72]. Универсальность данной системы обусловлена тем, что взаимосвязь между стадией плавления шихты и гармоническим составом напряжения дуги обусловлена физическими свойствами дугового разряда в составе, процесс горения которого схож для всех печных агрегатов. Кроме того, структура новой системы, а также разработанные программные алгоритмы [37,74-79] обеспечивают возможность интеграции на базе ПЛК с существующей системы управления электрическим режимом любого типа [80], а также с любым из наиболее распространённых методов измерения токовых сигналов.

Важно отметить, что параметризация системы для печных агрегатов разного вида будет различной. Во-первых, при внедрении системы на новой установке необходимо обеспечить корректную параметризацию блока расчёта напряжения электрической дуги с учётом фактических значений параметров схемы замещения. Во-вторых, будут иметься определённые отличия в структуре профиля плавки и алгоритме переключения сочетаний  $N_{TP}$  и  $N_{PK}$ . Так, для печей с технологией непрерывной подвалке шихты конвейером после холодного старта может быть нецелесообразным использование чётных гармоник, поскольку электрическая дуга всегда горит на жидкую ванну. В печах с классическим способом завалки малой мощности может потребоваться увеличить число промежуточных граничных значений относительного действующего значения чётных и нечётных гармоник ввиду высокой интенсивности возмущающих воздействий. Тем не менее, функциональная схема системы во всех случаях остаётся неизменной.

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

1. Усовершенствованная система управления электрическим режимом ШП-125 с системой диагностики стадии плавления шихты по высшим гармоникам напряжения электрической дуги была внедрена на действующем производстве. За период проведения контрольных испытаний был подтверждён

технический эффект по снижению удельного расхода электроэнергии на 1,75 %. Расчётная величина дополнительной прибыли от внедрённых мероприятий составит 16 728 025,60 руб.

2. Разработанная система управления электрическим режимом является универсальной и может применяться на печах различного класса и мощности. При этом для каждого отдельно взятого агрегата необходимо производить параметризацию блока расчёта напряжений электрических дуг с учётом фактических параметров электрического контура, которые, в свою очередь, могут быть определены в соответствии с методикой, разработанной в данном исследовании. Кроме того, существует необходимость адаптации профиля плавки к особенностям той или иной печной установки, а также применяемой технологии выплавки стали.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Наиболее распространённые системы управления электрическим режимом ДСП, представленные в настоящее время на рынке, обладают своими преимуществами и недостатками. При этом более современные системы характеризуются более сложной структурой и учитывают большее количество факторов, определяющих качество управления печным агрегатом. Тем не менее, по результатам сравнительного анализа было установлено, что для всех рассмотренных систем вне зависимости от продолжительности существования характерен недостаток, связанный с отсутствием возможности диагностики стадий плавки в ДСП и интеллектуального управления процессом переключения  $N_{TP}$ ,  $N_P$  и  $N_{PK}$  в соответствии с критерием, позволяющим судить о реальных технологических процессах, протекающих в ванне печи.

2. В современной литературе присутствует значительное количество исследований, направленных на решение задачи диагностики стадии плавления шихты с целью адекватной адаптации электрического режима. Одним из таких способов является диагностика стадии плавки на основе сигнала от виброакселерометра, установленного на кожухе печи. Данный способ является эффективным, но при этом имеются определённые издержки, связанные с необходимостью эксплуатации вибрационных датчиков в агрессивных условиях электросталеплавильного цеха, что влечёт за собой снижение надёжности подобного технического решения. В качестве отдельного направления исследований в данной области можно выделить решение задач диагностики стадии плавки по высшим гармоникам токов электрических дуг. В основе данного способа лежит физическая зависимость между гармоническим составом тока дуги и условиями горения дугового разряда. Так, доля чётных гармоник постепенно сокращается по мере снижения влияния вентильного эффекта, которое достигает максимума при горении дуг на твёрдую шихту и минимума при горении дуг на жидкую ванну, что делает данный параметр пригодным для решения задач диагностики стадии плавления на начальных этапах. В свою очередь, доля нечётных гармоник сокращается по мере увеличения величины тепловой постоянной времени дуги и степени экранирования дуг вспененным шлаком, что в наибольшей мере подходит для решения задач диагностики на стадии доводки. Тем не менее, гармони-

ческий состав тока дуги в значительной мере подвержен влиянию несимметричных режимов и возмущающих воздействий по длине электрической дуги. Вследствие этого, в ряде случаев может потребоваться применение фильтров скользящей средней с большой постоянной времени фильтрации, что приведёт к неизбежным потерям информации о непродолжительных стадиях.

3. В рамках данной работы предложено использовать для решения задач диагностики стадии плавления шихты анализ относительных действующих значений чётных и нечётных гармоник напряжений электрических дуг. Обоснование эффективности данного подхода было проведено в несколько этапов. Во-первых, была разработана усовершенствованная математическая модель электрического контура печи, учитывающая влияние взаимной индуктивности между фазами. Расчёт параметров модели проводился по специальной методике, в соответствии с которой выполнен расчёт параметров короткой сети на основе результатов опытов двухфазных и трёхфазного коротких замыканий с полным погружением электродов в расплав и сопутствующим контролем взаимного расположения консолей. Во-вторых, на математической модели был проведён сравнительный анализ, в ходе которого был подтверждён факт меньшей зависимости изменения уровней гармоник при колебаниях длин электрических дуг и их несимметрии, чем у гармоник тока дуг, что является основополагающим преимуществом. В-третьих, была разработана специальная математическая модель, которая позволяет рассчитать мгновенного значения напряжения электрической дуги на основе сигналов фазного напряжения и тока дуги, которые были получены на действующем технологическом оборудовании ШП-125 в ходе экспериментальных исследований с использованием регистратора электрических сигналов РЭС-3. Данная математическая модель позволила обеспечить экспериментальное подтверждение факта меньшего влияния несимметричных режимов и колебаний длин дуг на гармонический состав напряжения дуги по сравнению с гармоническим составом тока дуги.

4. С учётом доказанной эффективности предлагаемого подхода, была разработана усовершенствованная система управления электрическим режимом ШП-125 с системой диагностики стадии плавления шихты по высшим гармоникам напряжения электрической дуги. Основными структурными компонентами

данной системы являются блок преобразования сигналов, который позволяет интегрировать систему с наиболее распространёнными схемами измерения тока дуги, блок расчёта мгновенного значения напряжения дуги, блок преобразования Фурье и непосредственного расчёта относительных действующих значений чётных и нечётных гармоник напряжения электрической дуги, а также профиль плавки с предустановленным алгоритмом перехода с одного технологического этапа на другой. В рамках разработанного алгоритма предусмотрен дополнительный механизм, направленный на предотвращение несвоевременного перехода на повышенную ступень печного трансформатора на начальной стадии плавления шихты, в случае которого исходная система была вынуждена формировать электрический режим с пониженным излучением дуг для компенсации перегрева водоохлаждаемых панелей. Кроме того, данный алгоритм предусматривает адаптацию электрического режима работы печи к интенсивности продувки кислородом, что не учитывалось при использовании исходной системы. На базе результатов анализа большой выборки плавок для профиля плавки определены граничные значения в 7,5% и 1,5% для управления по чётным гармоникам напряжения электрической дуги на начальной стадии плавления шихты и значения в 10% и 7,5% для регулирования по нечётным гармоникам напряжений дуг на конечной стадии плавления.

5. Разработанная система внедрена на действующем производстве. За период проведения тестовых испытаний было получено подтверждение технического эффекта, выраженного в снижении удельного расхода электроэнергии на 1,75 %. При этом расчётная величина дополнительной прибыли по результатам внедрения составила 16 728 025,60 руб. С учётом универсальности применяемых подходов, разработанная система может быть рекомендована к внедрению на электросталеплавильных агрегатах различного класса и мощности. Наибольшую эффективность данная система покажет на агрегатах, для которых характерны сильные несимметричные режимы и высокая интенсивность возмущающих воздействий (печи с классическим способом завалки через отводимый свод, шахтные печи).

**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 // Электротехнология, 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 // Электротехнология, 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. Использование статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи для обеспечения устойчивости электроэнергетической системы и повышения надежности внутризаводского 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. 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. Повышение эффективности работы сверхмощной дуговой сталеплавильной печи / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин, и др. // Известия вузов. Электромеханика, 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 // Электрометаллургия, 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. Изво 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. 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.
20. Шпиганович, А.Н. Особенности систем электроснабжения сталеплавильных и ферросплавных производств / А.Н. Шпиганович, К.Д. Захаров // Липецк: ЛГТУ. – 2004. - 213 с
21. Якимов, И.А. Обоснование тиристорного регулирования напряжения трансформатора дуговой сталеплавильной печи / Электротехнические системы и комплексы, № 2 (35) . – 2017. – с. 41-48.
22. Сериков, В.А акустические и вибрационные характеристики сверхмощных дуговых сталеплавильных электропечей: дисс. канд. техн. наук/ Сериков Виктор Андреевич – Новосибирск. – 2016. – 147 с.
23. 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.

24. Влияние дуговых электропечей на системы электроснабжения / Ю.Л. Рыжнев, Р.В. Минеев, А.П. Михеев [и др.] // М.: Энергия. – 1975. –184 с.
25. Экспериментальное исследование гармонического состава токов дуг для дуговых сталеплавильных печей различной мощности / А.А. Николаев, Ж.Ж. Руссо, В. Сцымански, П.Г. Тулупов// Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2016. – №3. – С. 106-120.
26. Nikolaev, A.A. experimental study of control characteristics of electrodes hydraulic drives of electric arc furnaces and ladle furnaces / A.A. Nikolaev, M.V. Bulanov, A.S. Denisevich // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) . – pp.1-6. – 2020.
27. Пат. 176886 Российская Федерация, МПК Н 05 В 7/148 (2006.01). Устройство регулирования импеданса электродуговой печи / А.А. Николаев, П.Г. Тулупов, Е.В. Повелица; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» . – №2017132819; заявл. 20.09.2017; опубл. 01.02.2018, Бюл. №4.
28. Jansen, T. Advanced Foaming Slag Control / Jansen T., Krüger K., Schliephake H. et al. // 10th European Electric Steelmaking Conference, Graz. – 25-28 Sep., 2012. – pp.385-390
29. Регулирование мощности в электродуговой печи с использованием акустической системы распознавания вспененного шлака / Т. Янсен, К. Крюгер, Х. Шлипхакке [и др.] // Чёрные металлы. – №2.2011. – С. 20-25.
30. Nikolaev, A.A. Method of setting optimum asymmetric mode of operation of electric arc furnace / Nikolaev A.A., Tulupov P.G. // 2016 11th France-Japan & 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS) / 17th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM) . – pp.033-037. – 2016.
31. Harmonic Analysis of the Industrial Power System with an AC Electric Arc Furnace / G.W. Chang, Y.J. Liu, H.M. Huang, S.Y. Chu // Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting. 2016. Montreal. Canada. IEEE. – pp. 1-4. – DOI: 10.1109/PES.2006. 1709471.

32. Ye, Xiao-Mei The Harmonic Detection based on Wavelet Transform and FFT for Electric Arc Furnaces / Ye Xiao-Mei, Liu Xiao-He// Proceedings of International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition. Baoding. China. IEEE. – 2009. – pp. 408-412. – DOI: 10.1109/ICWAPR. 2009.5207486.
33. Simulation Research of Harmonics in Electric System of Arc Furnace / Yongning Wang, Heming Li, Boqiang Xu, Liling Sun // Proceedings of Power System Technology International Conference. IEEE. – 2004. – Vol.1. – pp. 902-906. –DOI: 10.1109/ICPST.2004.1460122.
34. 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.
35. Nikolaev, A.A. The Comparative Analysis of Electrode Control Systems of Electric Arc Furnaces and Ladle Furnaces / АА. Nikolaev, P.G. Tulupov., G.V. Astashova// Proceedings of the 2nd International Conference on Industrial Engineering, Application and Manufacturing ICIEAM-2016. – Chelyabinsk, Russia. – 19-20 May 2016. – pp. 1-7.
36. Игнатов, И.И. Расчет электрических параметров и режимов дуговых сталеплавильных печей/ Игнатов И.И., Хаинсон А.В. // Электричество. – № 8. – 1983. – С. 62-65.
37. 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.
38. 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.
39. Boulet, B. Modeling and control of an electric arc furnace / B. Boulet, G. Lalli, and M. Ajerschv // presented at the American Control Conference, Denver, CO, USA. – Jun. 4-6. – 2000.
40. Wang, Yan Modeling of electrode system for three-phase electric arc furnace / Wang Yan, Mao Zhi-zhong, Tian Hui-xin, Li Yan, Yuan Ping // J.Cent. South Univ. Technol. – 2010. –pp. 560-565. – DOI:10.1007/s11771-010-0523-3
41. Nikolaev, A.A. Development and Research of Improved Control Algorithms for Electric Modes of a Shaft-type Electric Arc Furnace / Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Lozhkin I.A. // Proceedings of the 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI 2020). – Magnitogorsk, Russia. – 25-26 Sep. 2020, pp.1-6. – doi: 10.1109/PEAMI49900.2020.9234324
42. Особенности моделирования дуговой сталеплавильной печи как электротехнического комплекса / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин, [и др.] // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2013. – №1. – С.76–82.
43. Игнатов, И.И. Математическое моделирование электрических режимов дуговых сталеплавильных печей / Игнатов И.И., Хаинсон А.В.// Электричество. №8. – 1985. – С. 69-72.
44. Матросов, А.П. Компьютерное моделирование процессов в электрических цепях дуговых печей/ А.П.Матросов, Ю.М. Миронов // Электromеталлургия. – №6. – 2006. С. 27-32.
45. 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.
46. Корнилов, Г.П. Исследование гармонического состава тока дуговых сталеплавильных печей различной мощности / Корнилов Г.П., Николаев А.А., Ануфриев А.В. [и др.] // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2013. –Т. 2. № 71. – С. 62-64.

47. Пат. 176106 Российская Федерация, МПК Н 05 В 7/148. Система управления электрическим режимом дуговой сталеплавильной печи / А.А. Николаев, П.Г. Тулупов, А.В. Ануфриев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» . – №2017120504; заявл. 13.06.2017; опубл. 09.01.2018, Бюл. №1.
48. 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.
49. 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.
50. 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.
51. Николаев, А.А. Экспериментальные исследования гармонического состава токов и напряжений дуг мощной дуговой сталеплавильной печи шахтного типа/ Николаев А.А., Тулупов П.Г., Омельченко Е.Я.// Электротехнические системы и комплексы. 2018. №4 (41). С.63-72
52. Nikolaev, A. A. Assessing the feasibility of electrical mode control of ultra-high power arc steelmaking furnace based on data about harmonic composition of arc currents and voltages. / A. A. Nikolaev, P. G. Tulupov, A. V Anufriev // Research and Education in Mechatronics (REM). 16th International Conference. – 2015. – pp. 301-308.
53. Nikolaev, A. A. Heating stage diagnostics of the electric arc furnace based on the data about harmonic composition of the arc voltage/ A. A. Nikolaev, P. G. Tulupov,

- L.I. Antropova // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. – ElConRus 2018. – 2018. – pp. 742-747.
54. Nikolaev, A.A. Melting stage diagnostic in different types of electric arc furnaces based on the analysis of the harmonic composition of the electric arc current / A.A. Nikolaev, P.G. Tulupov, O.V. Tulupova // 8th International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization, ICMSAO 2019. – 2019. – pp.1-6
55. Nikolaev, A. A. Analysis of the electric arc voltage harmonic composition with experimental data about mutual inductances of high-current system of arc furnace / A.A. Nikolaev, P.G. Tulupov, L.I. Antropova // Proceedings 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI) . – 2019. – pp. 24-29.
56. Nikolaev, A.A. Improved Electrical Mode Control Method for Ladle Furnace Using Data on Harmonic Composition of Arc Current /A.A. Nikolaev, P.G. Tulupov // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) . – 2019. – pp. 1-6.
57. Nikolaev, A.A. Mutual influence of the melting stage and electric arc current harmonic composition in different types of electric arc furnaces / A.A. Nikolaev, P.G. Tulupov, O.V. Tulupova, O.V. Leshner // International Journal of Computing and Digital Systems. – 2020. – В. 9. № 1. – pp. 1-11.
58. Nikolaev, A.A. Analysis of the Electric Arc Voltage Harmonic Composition with Experimental Data About Mutual Inductances of High-Current System of Arc Furnace /A.A. Nikolaev, P.G. Tulupov, L.I. Antropova // 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI) . – 2019, pp. 24-29. – doi: 10.1109/PEAMI.2019.8915415.
59. Тельный, С.И. К теории трехфазной дуговой печи с непроводящей подиной // Электричество. – 1954. – №12. – С. 38 – 42.
60. 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 In-

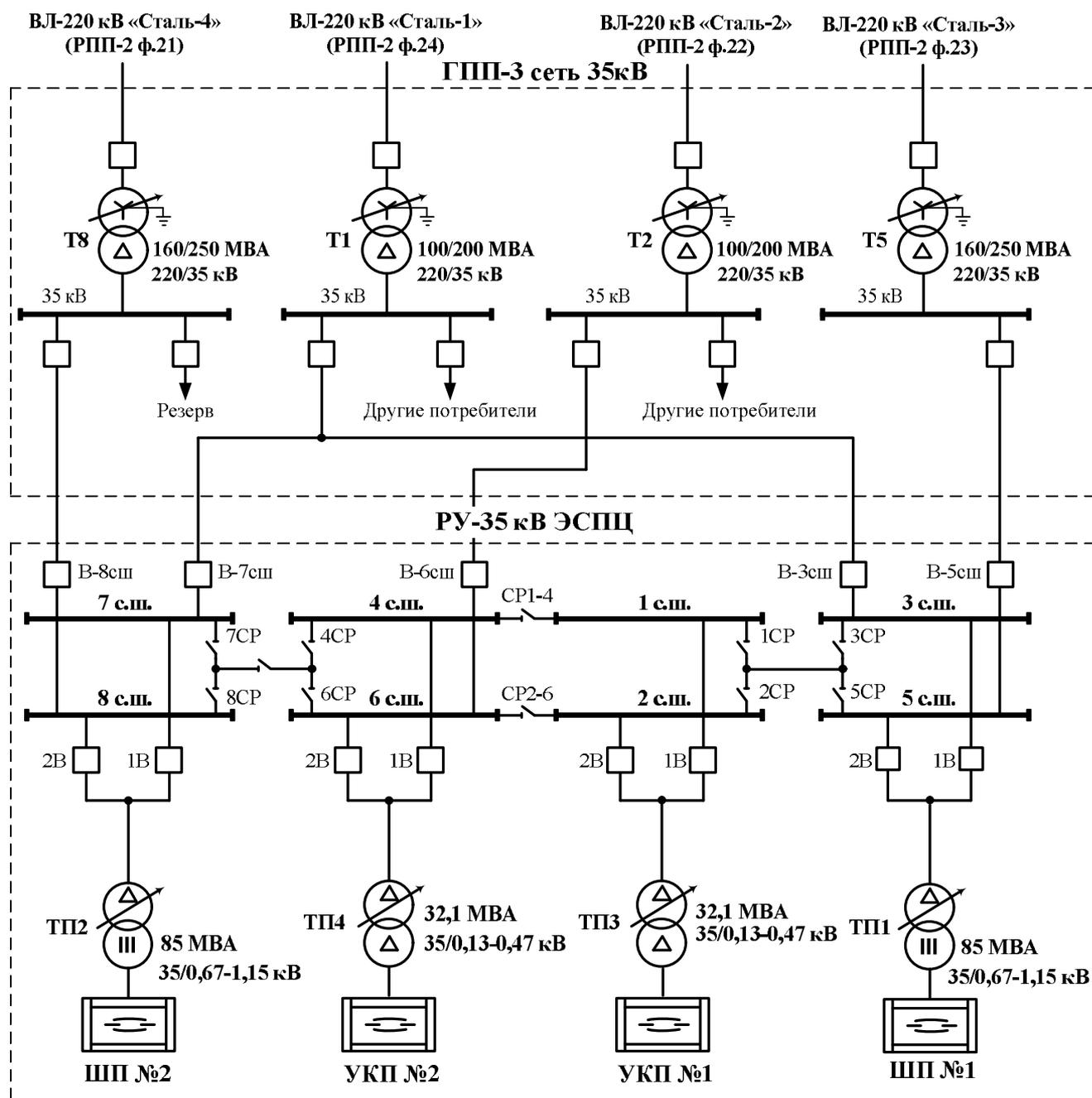
- ternational Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon) . – 2020. – pp. 464-468
61. Николаев, А.А. Повышение эффективности работы дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь за счет применения усовершенствованных алгоритмов управления электрическими режимами: Монография / А.А. Николаев. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск гос. техн. университета им. Г.И. Носова, 2015. – 161 с.
62. Способы управления электрическим режимом электродуговых печей / Ю.П. Журавлев, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин [и др.] // Известия вузов. Электромеханика. - 2006. - №4. – С. 76-80.
63. Салтыков, В.М. Электромагнитная совместимость и энергосберегающие режимы электротехнического комплекса «система электроснабжения – дуговая сталеплавильная печь» / дис. д-ра техн. наук: 05.09.03. – Тольятти, 2003. – 400 с.
64. Салтыков, В.М. Влияние характеристик дуговых сталеплавильных печей на качество напряжения в системах электроснабжения / В.М. Салтыков, О.А. Салтыков, А.В. Салтыков // М.: Энергоатомиздат, 2006. – с. 245.
65. Автоматическое управление электрическим режимом дуговой сталеплавильной печи по критерию постоянства активной мощности / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, И.М. Ячиков [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2017. – Т. 17., №4. – С. 122–133.
66. 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.
67. Лозинский, О.Ю. Система оптимального управления электрическим режимом дуговой печи, питаемой через электрический реактор / О.Ю. Лозинский, Я.С. Паранчук // Электрометаллургия. – 2007. - №8. – С. 23–31.
68. 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 Eu-

- rope-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS) /17th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM) . – 2016. – pp. 033-037
69. Nikolaev, A.A. Method of Switching Point Determination for Control System of Electric Arc Furnace Based on Data about Harmonics of Arc Currents and Voltages / A.A. Nikolaev, P.G. Tulupov, E.B. Agapitov // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM. – 2020, pp. 1-5
70. 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.
71. 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.
72. Nikolaev, A. A. Experimental Studies of Operating Modes of Electric Arc Furnaces of Various Capacity and Class at the Existing Metallurgical Plants / A. A. Nikolaev, P. G. Tulupov // 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon) . – 2020. – pp. 926-930
73. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016612798 Математическая модель электрического контура электродуговой сталеплавильной печи/ А.А. Николаев, П.Г. Тулупов; № 2016610031; заявл. 11.01.2016; опубл. 10.03.2016. – 8,48 Кб
74. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020661845 Программа для анализа графиков электрических нагрузок электродуговых печей на основании экспериментальных данных / А.А. Николаев, П.Г. Тулупов, М.В. Буланов, К.А. Шахбиева; № 2020660870; заявл. 23.09.2020; опубл. 01.10.2020. – 48 Кб
75. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020661559 Комплексная математическая модель электрического контура дуговой сталеплавильной печи и системой автоматического регулирования им-

- педанса для исследования электрических и рабочих характеристик / А.А. Николаев, П.Г. Тулупов, А.С. Денисевич, Лаптова В.А // № 2020660785; заявл. 23.09.2020; опубл. 25.09.2020. – 73 Кб.
76. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019612008 Программа анализа гармонического состава напряжений и токов дуг электродуговой печи / А.А. Николаев, П.Г. Тулупов // № 2019610868; опубл. 07.02.2019. – 1113 Кб.
77. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020661816 Программа для исследования динамических режимов систем автоматического управления гидроприводами перемещения электродов электродуговых печей / А.А. Николаев, П.Г. Тулупов, М.В. Буланов, И.А. Ложкин; № 020660836; заявл. 24.09.2020; опубл. 01.10.2020. – 66 Кб.
78. 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.
79. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017611841 Математическая модель электротехнического комплекса «дуговая сталеплавильная печь - статический тиристорный компенсатор» / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, А.В. Анохин, П.Г. Тулупов; № 2016664106; заявл. 20.12.2016; опубл. 09.07.2017. – 2,76 Мб.
80. Анализ различных вариантов построения систем автоматического управления перемещением электродов дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, П.Г. Тулупов, Е.В. Повелица // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. № 2 (50). С. 90-100.

**ПРИЛОЖЕНИЯ**

## Приложение 1.



УТВЕРЖДАЮ  
 Директор по техническому  
 развитию и качеству

П.А. Мишнев  
 8 февраля 2021 г.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательской опытно-конструкторской работы  
 «Разработка новых электрических и других режимов шахтных печей №№1,2 ЭС СП в целях экономии графитированных электродов для двух вариантов питания 35 кВ в условиях пониженного напряжения и для двух систем (рабочей и резервной) автоматического управления перемещением электродов» (договор №625НС/9000086306 от 06.12.2018 г., доп. соглашения №№1-3 от 15.05.2019 г. и 11.03.2020

Работа проводится в рамках раздела VI «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика, пункта 4 «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии», подпункта 8 «Разработка систем рационального использования энергоресурсов и комплексного использования вторичных энергоресурсов» «Перечня научных исследований и опытно-конструкторских разработок, расходы налогоплательщика на которые в соответствии с п. 7 ст. 262 ч.2 НК РФ включаются в состав прочих расходов в размере фактических затрат с коэффициентом 1,5», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.12.2008 №988 (в редакции Постановления Правительства РФ от 6 февраля 2012 г. №96)

#### Краткое описание выполненной работы

Разработаны и внедрены усовершенствованные электрические режимы ШП2 ЭС СП и УПК2, включающие в себя измененные параметры систем автоматического управления перемещением электродов ArCOS NT, АСУ ЭРП (ШП2 ЭС СП), Simelt (УПК2 КС СП), а также новые алгоритмы автоматического переключения рабочих кривых и ступеней РПН печного трансформатора, функционирующие на основании анализа гармонического состава токов и напряжений электрических дуг.

Новые настройки систем управления ArCOS NT (ШП2 ЭС СП) и Simelt (УПК2 КС СП), выполненные по авторским методикам исполнителей НИОКР (Николаев А.А., Тулупов П.Г.), включают в себе измененные таблицы уставок импедансов (активных сопротивлений дуг) для вторичных электрических контуров ШП2 ЭС СП и УПК2 КС СП, измененные коэффициенты нелинейных ПИ-регуляторов и импеданса, а также новые параметры вспомогательных блоков. Для ШП2 ЭС СП был введен в работу режим регулирования импеданса на основных стадиях расплавления металлошихты с оптимальными уставками, обеспечивающими исключение неконтролируемого роста тока на переходных участках между стадией расплавления металлошихты и стадией работы дуг на жидкую ванну из-за изменения гармонического состава токов и напряжений дуг. Для ШП2 ЭС СП дополнительно были изменены настройки системы управления АСУ ЭРП, обеспечивающие устойчивую работу резервного регулятора без сильного ухудшения временных и энергетических показателей работы ШП2 ЭС СП. В случае с УПК2 КС СП 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 агрегата.

Скорректированный алгоритм автоматического переключения рабочих кривых на стадии доводки жидкой стали для ШП2 ЭС СП выполняет динамическую адаптацию длин дуг в зависимости от шлакового режима и режимов кислородной продувки. За счет использования оптимальных логических условий переключения рабочих кривых, а также граничных значений коэффициента шлака, были созданы условия для уменьшения средних значений токов дуг на стадии доводки без существенного снижения скорости нагрева жидкой стали, что совместно с введенным режимом регулирования импеданса для основных стадий расплавления металлошихты обеспечивает снижение удельного расхода электродов.

Новый алгоритм автоматического изменения рабочих кривых и ступеней РПН печного трансформатора УПК2 КС СП, построенный на основании анализа коэффициента шлака с использованием информации о гармоническом составе токов дуг, совместно с скорректированными настройками системы управления Simelt обеспечивает коррекцию электрических режимов агрегата в зависимости от текущего шлакового режима и режима аргоновой продувки. Благодаря динамической адаптации длин электрических дуг в процессе обработки жидкой стали достигается сохранение максимального теплового КПД дуг и оптимальной скорости нагрева стали при минимизации действующих значений токов дуг, благодаря чему достигается снижение удельного расхода электродов.

#### **Технический эффект от внедрения результатов НИОКР**

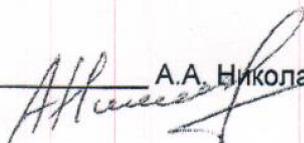
По результатам гарантийных испытаний, проводившихся для ШП2 ЭС СП в период с 26.01.2020 г. по 03.05.2020 г., для УПК2 КС СП – с 25.01.2020 г. по 07.05.2021 г., был достигнут основной технический эффект по снижению удельного расхода электродов при расчете на жидкую сталь на **2,56%** (ШП2 ЭС СП) и **3,82%** (УПК2 КС СП), а также дополнительный технический эффект по снижению удельного расхода электроэнергии на **1,75%** (ШП2 ЭС СП) и **0,97%** (УПК2 КС СП), при сопоставлении с утвержденными предгарантийными периодами с 21.10.2019 г. по 20.01.2020 г. (ШП2 ЭС СП) и с 07.09.2019 г. по 15.12.2019 г. (УПК2 КС СП). Оценка технического эффекта выполнялась с использованием разработанной методики, учитывающей влияние разных технологических условий в гарантийном и предгарантийном периодах. Прямая оценка для сравниваемых периодов, показала уменьшение удельного расхода электродов при расчете на годную/жидкую сталь на 1,40 / 0,91% (ШП2 ЭС СП) и 9,26/10,06% (УПК2 КС СП).

**Даты фактического внедрения результатов НИОКР:** ШП2 ЭС СП – 04.05.2020 г.; УПК2 КС СП – 08.05.2020 г.

**Срок полезного использования:** 5 лет.

Научный руководитель НИОКР:

Заведующий кафедрой автоматизированного электропривода и мехатроники  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,  
канд. техн. наук, доцент

  
А.А. Николаев

Согласовано  
Начальник ЦТР МП

  
А.В. Краснов