

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН  
НАВОЙСКИЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ  
НАВОЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи  
УДК 66.012-52.678

РУЗИЕВ ТОЛМАСЖОН ДИЛМУРОДОВИЧ

СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ  
ПЕЧЕЙ ДСП -6 ЛИТЕЙНОГО КОМПЛЕКСА ПО НМЗ

Специальность: 5А521802 – «Автоматизация технологических  
процессов и производств»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание академической степени магистра

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор М.Б. Базаров

Навоий 2013

# ОГЛАВЛЕНИЕ

## ВВЕДЕНИЕ

### ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИИ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

- 1.1. Краткое описание технологии сталеплавильного производства перспективы развития
- 1.2. Особенности управления режимами электродуговых печей переменного тока
- 1.3. Системы автоматизации и управления сталеплавильными печами
- 1.4. Постановка цели и задачи исследования

### ГЛАВА 2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

- 2.1. Характеристика производственных процессов как объектов автоматизации
  - 2.2. Составления структурной и функциональной схемы ДСП
  - 2.3. Критерии оптимизации управления энергетическим режимом электродуговых печей
  - 2.4. Расчет электрических характеристик печи
  - 2.5. Электрические характеристики печи
- Выводы по главе

### ГЛАВА 3. СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ ДСП

- 3.1. Математическая модель системы управления энергетическим режимом ДСП
  - 3.2. Особенности синтеза стабилизирующих систем управления электрическим режимом электродуговой печи \
  - 3.3. Система поискового автоматического управления энергетическим режимом ДСП
- Выводы по главе

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## **АННОТАЦИЯ**

**магистерской диссертации Рузиева Толмаса Дилмуродовича по теме:  
«Система регулирования режимов работ сталеплавильных печей ДСП-6  
литейного комплекса ПО НМЗ» выполненной по специальности 5А311001  
-«Автоматизация технологических процессов и производств»**

Диссертационная работа посвящена вопросам создания поисковой экстремальной автоматической системы управления режимом энергопотребления электродуговыми печами переменного тока в условиях нестационарности характеристик объекта управления. В качестве цели оптимального управления принимается достижение максимальной экономии электроэнергии и производительности ДСП.

В работе: исследованы зависимости энергетических и экономических итоговых показателей эффективности электросталеплавильного процесса от параметров подводимой к ДСП электрической энергии; научно обоснован перспективности использования системы автоматического управления энергетическим режимом ДСП переменного тока, с целью повысить эффективность ее энергопотребления; разработано математическое и алгоритмическое обеспечение системы управления энергетическим режимом электродуговой печи переменного тока; разработана программная реализация функционирования системы автоматического управления энергетическим режимом электродуговых печей, работающей в поисковом режиме, численное моделирование ее работы.

Научная новизна: на основе исследования корреляционной связи между случайными функциями времени входа и выхода унимодальной статической характеристики объекта управления (током и мощностью дуги) разработана система управления энергетическим режимом электродуговой печи, с целью повысить эффективность ее энергопотребления; структура системы управления энергетическим режимом дуговой печи переменного тока, реализующей управление энергетическим режимом электродуговой печи; математическое и алгоритмическое описание системы управления энергетическим режимом электродуговой печи переменного тока, реализующей управление энергетическим режимом электродуговой печи; программная реализация алгоритма метода автоматической оптимизации управления энергетическим режимом электродуговой печи.

Практическая ценность работы. Создана система автоматического управления энергетическим режимом электродуговой печи, реализующей рациональное (близкое к оптимальному) управление с целью повышения часовой производительности, что позволит сократить время плавки, путем ускорения процесса расплавления шихтовых материалов, сократить расход электроэнергии путем сокращения времени плавки.

## SUMMARY

**Ruziyev Tolmas Dilmurodovich's master thesis on a subject: "System of regulation of modes of operation of steel-smelting DSP-6 furnaces of the PO NMZ foundry complex" executed in the specialty 5A311001 - "Automation of technological processes and productions"**

Dissertation work is devoted to questions of creation of a search extreme automatic control system by a mode of power consumption by arc furnaces of alternating current in the conditions of not stationarity of characteristics of object of management. As the purpose of optimum control achievement of the maximum economy of the electric power and productivity of a particleboard is accepted.

In work: dependences of power and economic totals of efficiency of electrosteel-smelting process on parameters of electric energy brought to a particleboard are investigated; it is scientifically proved prospects of use of system of automatic control by the particleboard power mode of alternating current, with the purpose to increase efficiency of its power consumption; mathematical and algorithmic providing a control system with a power mode of the arc furnace of alternating current is developed; program realization of functioning of system of automatic control by a power mode of the arc furnaces, working in a search mode, numerical modeling of its work is developed.

Scientific novelty: on the basis of research of correlation communication between casual functions of time of an entrance and an exit unimodal static характеристики object of management (current and arch capacity) it is developed система managements of a power mode of the arc furnace, with the purpose to increase efficiency of its energopotrebkleniye; structure of a control system of a power mode of the arc furnace of the alternating current realizing management of a power mode of the arc furnace; mathematical and algorithmic description of a control system of an energetichesky mode of the arc furnace of alternating current, realizuyushchy management of a power mode of the arc furnace; program realization of algorithm метода automatic optimization of management by a power mode of the arc furnace.

Practical value of work. The system automatic an upravleniya is created by a power mode of the arc furnace realizing ratsionalny (near optimal) management for the purpose of increase of hour productivity that will allow to reduce melting time, by acceleration of process of fusion of shikhtovy materials, to reduce an electric power expense by reduction of time of melting.

## **ВВЕДЕНИЕ**

**Актуальность работы.** В настоящее время сверхмощные электродуговые сталеплавильные печи (ДСП), как агрегаты для производства стали, получают большое распространение, как в нашей Республике, так и в мире. К преимуществам электродугового способа получения стали можно отнести высокую производительность агрегатов, способность использовать в качестве исходного сырья как традиционные полуфабрикаты (металлический лом, жидкий чугун), так и металлизированные окатыши. На сегодняшний день электродуговые печи считаются самыми распространенными и экологически чистыми агрегатами для выплавки стали.

Основным источником тепловой энергии в дуговой сталеплавильной печи является электрический разряд—электрическая дуга. В столбе дуги выделяется большая мощность и вопросы рационального использования этой мощности для нагрева и плавления материалов, загруженных в печь, представляют большую сложность.

Сложности решения этой труднореализуемой, но необходимой в ситуации быстро развивающейся тенденции повышения стоимости энергоресурсов задачи объясняются тем, что трехфазная электродуговая печь является асимметричной нагрузкой, имеет нелинейные характеристики дуги и большие колебания реактивного сопротивления, обусловленные спецификой процесса. Даже если печь сконструирована симметрично, реактивное сопротивление будет существенно меняться в течение плавки, вызывая неконтролируемый дрейф статических рабочих характеристик.

Таким образом, эффективное управление электродуговым агрегатом переменного тока в процессе плавки исходного металлургического сырья является довольно сложной научно-технической задачей, и остается одной из актуальных.

**Цель диссертационной работы** заключается в научном обосновании использования эффективного поискового метода экстремального управления и реализации на его основе системы автоматического управления режимами

ДСП, обеспечивающей снижение энергозатрат и увеличение производительности агрегата путем сокращения времени процесса расплавления.

В соответствии с поставленной целью в диссертации решаются следующие основные задачи:

- исследование зависимости энергетических и экономических итоговых показателей эффективности электросталеплавильного процесса от параметров подводимой к ДСП электрической энергии;
- научное обоснование перспективности использования системы автоматического управления энергетическим режимом ДСП переменного тока, с целью повысить эффективность ее энергопотребления;
- разработка математического и алгоритмического обеспечения системы управления энергетическим режимом электродуговой печи переменного тока;
- разработка программной реализации функционирования системы автоматического управления энергетическим режимом электродуговых печей, работающей в поисковом режиме, численное моделирование ее работы.

**Объектом исследований** являлись промышленные электродуговые сталеплавильные печи переменного тока.

**Методы исследований.** Методы системного анализа, математического моделирования и оптимального управления.

**Гипотеза исследования.** Повышение качество процесса повышения часовой производительности, что позволит сократить время плавки, путем ускорения процесса расплавления шихтовых материалов, сократить расход электроэнергии путем сокращения времени плавки .

**Научная новизна:**

- на основе исследования корреляционной связи между случайными функциями времени входа и выхода унимодальной статической

характеристики объекта управления (током и мощностью дуги) разработана система управления энергетическим режимом электродуговой печи, с целью повысить эффективность ее энергопотребления;

- структура системы управления энергетическим режимом дуговой печи переменного тока, реализующей управление энергетическим режимом электродуговой печи;
- математическое и алгоритмическое описание системы управления энергетическим режимом электродуговой печи переменного тока, реализующей управление энергетическим режимом электродуговой печи
- программная реализация алгоритма метода автоматической оптимизации управления энергетическим режимом электродуговой печи.

**Практическая ценность.** Создана система автоматического управления энергетическим режимом электродуговой печи, реализующей рациональное (близкое к оптимальному) управление с целью повышения часовой производительности, что позволит сократить время плавки, путем ускорения процесса расплавления шихтовых материалов, сократить расход электроэнергии путем сокращения времени плавки.

**На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:**

- обоснование целесообразности реализации рационального эффективного режима энергопотребления электродуговой печи по критерию максимальной производительности;
- разработка системы поисковой экстремальной оптимизации управления энергетическим режимом электродуговой печи на основе исследования корреляционной связи между случайными функциями времени входа и выхода унимодальной статической характеристики объекта управления (током и мощностью дуги);
- структурное и алгоритмическое решения для построения системы автоматического управления энергетическим режимом ДСП с использованием поискового и экстремального управления.

**Обоснованность научных положений,** рекомендаций и выводов, изложенных в работе, определяется корректным использованием современных математических методов, согласованным сравнительным анализом аналитических зависимостей.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на: конференциях одаренных студентов и магистрантов НГГИ (Навои, 2012-2013 гг.); республиканских и международных конференциях проведенных в г. Навои(2012-2013 гг.)

**Опубликованность результатов.** По результатам выполненных исследований опубликованы 3 научные работы.

**Объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, 3 глав основного текста, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем 93 страниц, 21 рисунка.

Пользуясь случаем автор выражает глубокую благодарность доктору технических наук, профессору, М.Б. Базарову за научное руководство и методическую помощь при подготовке диссертации.

# ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИИ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

## 1.1. Краткое описание технологии сталеплавильного производства перспективы развития

Дуговые сталеплавильные печи, применяемые в промышленных установках с конца XIX века, в настоящее время получили широкое распространение во многих областях промышленности. Большая скорость нагрева является дополнительным преимуществом по сравнению с нагревом в печах сопротивления.

Основное назначение дуговой сталеплавильной печи (ДСП) прямого действия—выплавка стали из металлического лома (скарпа). Такой процесс весьма энергоемок; на 1 т выплавленной стали в зависимости от емкости печи и характера процесса расходуется от 500 до 1000 кВт·ч электроэнергии, поэтому при прочих равных условиях процесс дешевле проводить в мартеновской печи, где топливо сжигается непосредственно. В связи с этим лишь сравнительно небольшую часть всей получаемой из скрапа стали выплавляют в электрических печах. В них осуществляют лишь те процессы, которые трудно проводить в мартеновской печи или конверторе. В первую очередь—это получение высоколегированных сортов стали, требующих тщательного очищения металла от вредных примесей (особенно серы) и неметаллических включений, и обезгаживания его. Для таких сортов стали стоимость передела гораздо меньше стоимости легирующих и самой стали и решающими факторами становятся качество металла и степень угара ценных добавок. Существенные преимущества (большие маневренность и скорость плавки, снижение капитальных затрат) имеет дуговая печь как агрегат для получения стального литья.

Следует отметить, что по мере удешевления электроэнергии, а также благодаря увеличению емкости дуговых агрегатов, вследствие чего

уменьшается расход электроэнергии и материалов на выплавку 1 т стали, разница в стоимости передела металла в дуговой и мартеновской печах снижается. В последние годы в мощных дуговых печах выплавляют не только высоколегированные стали. В этом случае в пользу дуговых печей говорят их большая приспособленность к характеру скрапа и легкость плавки в них крупного скрапа.

Современные электродуговые сталеплавильные печи (ДСП) характеризуются следующими особенностями:

- 1) большой емкостью [1];
- 2) применением высокой удельной мощности печных трансформаторов (до 800-1000 кВт/т) [1, 2];
- 3) использованием альтернативных источников тепловой энергии (от сжигания природного газа и энергии, от экзотермических реакций окисления элементов [C], [Mn], [Si], жидкого чугуна) [1-3];
- 4) симметрированием коротких сетей [1];
- 5) применением водоохлаждающих конструкций рабочего пространства печи (свода и панелей) [1, 4];
- 6) вынесением ряда рафинировочных операций в установки и агрегаты внепечной обработки стали, с целью использования ДСП как высокоэффективного плавильного агрегата [1, 2].

Основной целью технологического процесса электродуговой плавки является получение определенного количества стали заданного состава при требуемой температуре, при максимальной производительности и наиболее эффективном использовании подводимой в печь энергии.

Электрическая энергия преобразуется в столбе дуги в тепловую, которая, в основном, в виде излучения поглощается шихтовыми материалами и металлическим ломом загруженным в печь. В качестве дополнительного источника энергии могут применяться газо-кислородные горелки, конструктивно скомбинированные с кислородными продувочными фурмами [1, 3].

В газовом разряде (в столбе дуги) в небольших объемах сосредотачиваются

большие мощности и достигаются большие температуры. Для снижения интенсивности разогрева огнеупорной футеровки, водоохлаждаемых панелей и свода печи за счет экранирования электрических дуг используются пенистые шлаки [5].

В последнее время намечается тенденция использования ДСП в качестве агрегата для эффективного расплавления шихтовых материалов. Процессы рафинирования и доводки стали переводятся частично или полностью в другие технологические установки внепечной обработки стали [1].

В этом случае наиболее значимыми периодами работы агрегата являются энергетические стадии, в которых основное внимание уделяется режиму расплавления шихтовых материалов и затрачивается до 80% потребляемой электрической энергии.

В современных дуговых сталеплавильных печах процесс производства стали представляет собой периодический процесс, включающий следующие периоды:

- 1) загрузка шихты;
- 2) расплавление шихты;
- 3) окислительный период;
- 4) восстановительный период (если не используются в технологическом процессе агрегаты внепечной обработки стали);
- 5) выпуск стали.

Период расплавления, самый энергоемкий период работы печи, составляет обычно больше половины продолжительности всей плавки. Период расплавления по ограничениям энергопотребления можно разделить на несколько стадий.

- 1) *Заглубление электродов* в шихту. Этот период длится недолго, и дуга сравнительно быстро экранируется шихтой. В эту стадию работают на коротких дугах и пониженных ступенях напряжения.
- 2) *Проплавление колодцев*, во время которой электроды движутся вниз, проплавляя колодцы в шихте. Прекращение движения электродов вниз говорит об окончании этой стадии, когда электрод доходит до ванны

жидкого металла на дне печи, оставшейся от предыдущей плавки массой. В эту стадию не работают на больших токах, из-за опасности проплавления слишком узких колодцев и поломки электрода.

3) Стадия *закрытых дуг*, когда дуги горят между электродом Р1 жидким металлом, футеровка печи экранирована от излучения дуг шихтой. В эту стадию начинается подъем электродов в соответствии с подъемом уровня жидкого металла в печи, и используется максимально возможная электрическая мощность подводимой электроэнергии.

4) Стадия *открытых дуг*, когда происходит окончательное расплавление шихтовых материалов, но дуга уже не экранируется шихтой. В эту стадию работают на коротких дугах, таким образом, чтобы дуга горела в слое пенистого шлака.

Для защиты футеровки и охлаждающих панелей печи от перегрева на стадиях открытых дуг, а также во время продувки ванны кислородом, наводится вспененный шлак, и дуги горят в слое шлака [5].

Для ускорения расплавления шихты и нагрева металла до температуры выпуска, а также для экономии электроэнергии могут применяться газовые горелки. На электропечах электросталеплавильного цеха (ЭСПЦ) ОАО «ММК» до 20% тепловой энергии за плавку поступает в печь при использовании 6 комбинированных газокислородных горелок в режиме сжигания природного газа, каждая мощностью 3,5 МВт.

В промышленных электродуговых печах переменного тока используется трехфазная система питания без нулевого провода. Дуги горят между тремя электродами и нулевой точкой, которой является расплавляемый материал.

Источником тепла в ДСП является электрическая дуга, возникающая между электродами и жидким металлом или шихтой при приложении к электродам электрического тока необходимой силы. Дуга представляет собой поток электронов, ионизированных газов и паров металла и шлака. Дуговые печи работают на переменном токе.

Таким образом, оптимальные режимы с точки зрения интенсификации

процесса выплавки стали, а также энерго и ресурсосбережения доступны на современных печах, оборудованных мощными трансформаторами и реакторами с повышенными вторичными напряжениями и возможностью изменения (увеличения) реактивного сопротивления печи, а также оборудованных специальными инжекционными устройствами для наведения пенистого шлака [17-9].

Характеристика взаимосвязи полезной мощности и силы тока имеет четко выраженный максимум, что позволяет доступными аппаратными и программными средствами решать проблемы оптимального управления электрическими и электродными режимами в условиях максимального приближения к симметрии нагрузки фаз [10].

Дальнейший процесс развития электросталеплавления движется в направлении таких технологий, как Consteel и инновационная технология Faststeel [2, 6]. Технология Consteel обеспечивает непрерывную загрузку в печь лома и первородной шихты (чугун, продукты прямого восстановления железа). Подача материалов в печь осуществляется непрерывно в течение всего цикла плавки, при этом дуги горят всегда на жидкую ванну, так как металл в ванне находится в жидком состоянии и расплавление скрапа происходит при его погружении и растворении в металле, что повышает стабильность электрического режима печи.

Технология Faststeel представляет собой комбинацию процессов Fastmelt и Consteel. Процесс Fastmelt — это процесс прямого восстановления железа во вращающейся печи объединенный с процессом получения чугуна из металлизированного сырья (совместная разработка компаний Kobe Steel/Midrex и Techint). В технологической схеме процесса Faststeel задействуется установка Consteel и установка Fastmelt (одна вращающаяся печь для прямого восстановления железа и одна электропечь для плавки чугуна из металлизированного сырья). [2]

Применение данных технологий позволяет перейти от технологической схемы «доменная печь — конвертер» к схеме «лом/первородная шихта —

электродуговая печь». При этом достигается общее снижение объема вредных выбросов от передела (за счет остановки аглопроизводств и доменных печей), более полное использование железосодержащих материалов, снижение затрат на сырье, сокращение потребления электроэнергии и сокращение продолжительности технологического цикла от сырья до стали [2, 11].

## **1.2. Особенности управления энергетическим режимом электродуговых печей переменного тока**

Плавка характеризуется тремя режимами: электрическим, тепловым и технологическим.

*Электрический режим* – это изменение подводимой к печи электрической мощности во времени.

*Тепловой режим* – изменение и управление температурными параметрами футеровки, металла и шлака по ходу плавки.

*Технологический режим* – целенаправленное изменение химического состава металла, выполнение технологических операций по ходу плавки: скачивание шлака, ввод сыпучих добавок и так далее.

Электрическая дуга в электродуговых печах переменного тока является основным источником тепловой энергии, а следовательно, контур управления электрическим режимом печи является основным в структуре системы управления электродуговой печи.

В качестве управляющих воздействий при регулировании электрического режима электродуговой печи применяются:

1. переключение ступеней напряжения печного трансформатора;
2. перемещение электродов, при выбранной ступени напряжения.

При *переключении ступеней трансформатора* изменяется напряжение питания электродов. Данное воздействие приводит к скачкообразным изменениям подводимого напряжения к электродам, что приводит к изменению длины дуги при одной и той же мощности.

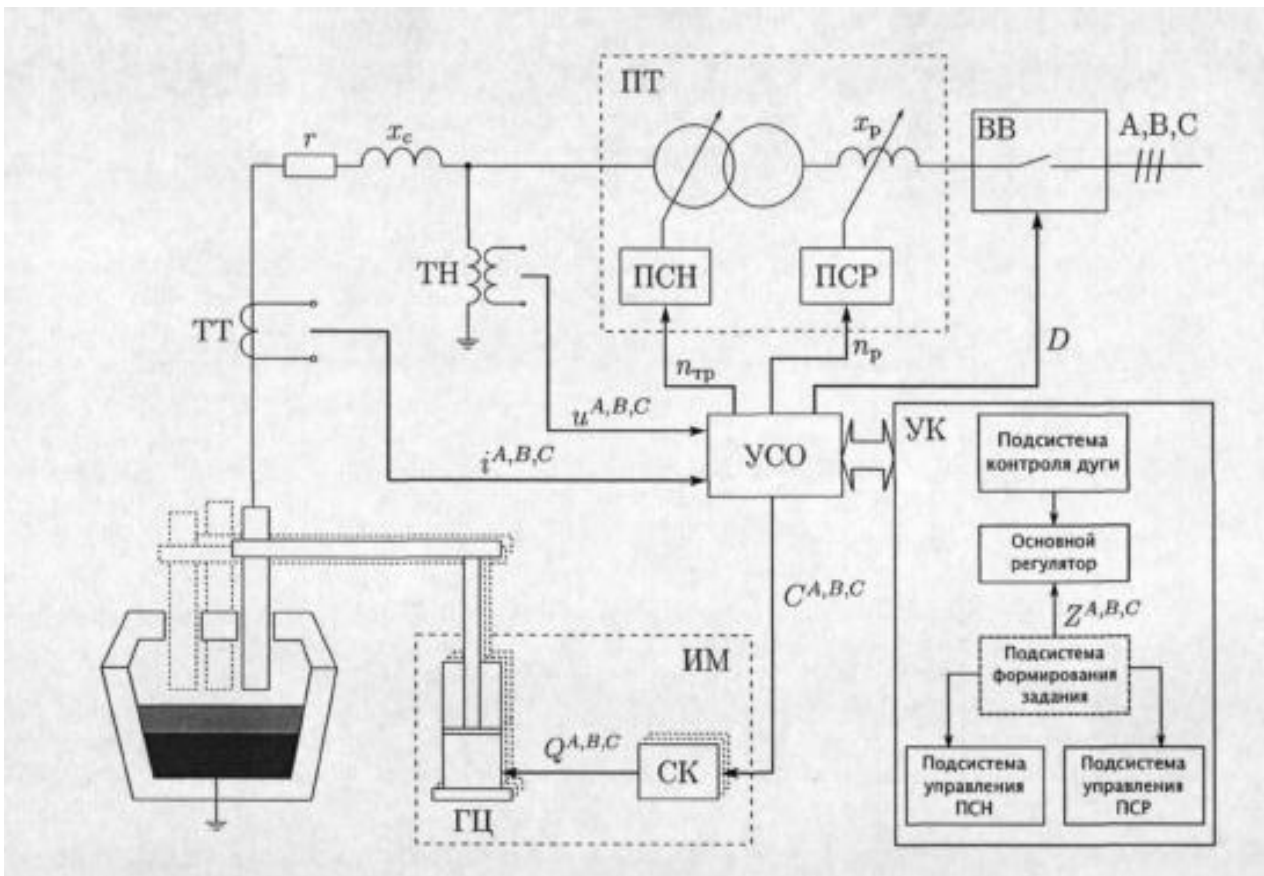
При *перемещении электродов* изменяется длина дуги, что приводит к

изменению падения напряжения на дуге, и таким образом изменяется ток в фазах печи. Для перемещения электродов применяют электромеханические или гидравлические исполнительные механизмы.

Дополнительным управляющим воздействием, которое широко применяется на современных сверхмощных печах можно считать *переключение ступеней реактора* — дополнительной индуктивности в подводящих цепях печи. Конструктивно, реактор обычно входит в состав печного трансформатора (в третичной обмотке). С помощью переключения ступеней реактора можно изменять внешнюю характеристику трансформатора. Данное воздействие влияет на коэффициент мощности ( $\cos\phi$ ) при текущем токе фазы, уменьшение  $\cos\phi$  приводит к более стабильному режиму горения дуги. Чтобы скомпенсировать полученную таким образом дополнительную реактивную мощность на высокой стороне устанавливают системы компенсации реактивной мощности (СКРМ).

На рисунке 1.1 изображена типовая функциональная схема (составлена на основе предложенной в [12]) системы автоматического управления электрическим режимом печи.

На рисунке 1.1 представлена схема управления одной фазой печи. Управление двумя другими фазами происходит аналогично. Печной трансформатор (ПТ) позволяет ступенчато изменять величину напряжения питания электродов и конструктивно содержит в себе реактор, а также переключатель ступеней напряжения (ПСН) и переключатель ступеней реактора (ПСР) для изменения сопротивления реактора  $x_p$ . Вакуумный выключатель (ВВ) позволяет отключать печь от сети, в том числе и при возникновении аварийных ситуаций. Сигналы мгновенных значений по фазам напряжения  $u^{A,B,C}$  и тока  $i^{A,B,C}$  измерительных преобразователей: ТТ—измерительный трансформатор тока и ТН—измерительный трансформатор напряжения—поступают в устройство связи с объектом (УСО).



**Рис. 1.1. Функциональная схема контура управления энергетическим режимом ДСП**

Устройство управления — контроллер (УК) осуществляет формирование управляющих сигналов:  $n_{тр}$  — сигнал переключения ступени напряжения,  $n_p$  — сигнал переключения ступени реактора;  $D$  — сигнал включения/выключения вакуумного выключателя,  $C^{A,B,C}$  — сигналы на сервоклапаны (СК) гидравлических устройств перемещения электродов (ИМ).  $Q^{A,B,C}$  — расходы жидкости поступающей в гидроцилиндры (ГЦ) ИМ фаз A, B, C, пропорциональные скорости перемещения электродов.  $r$  и  $x_c$  — параметры короткой сети, соответственно активное и реактивное сопротивление.

Реализация системы управления осуществляется, в основном с использованием программируемых контроллеров (ПЛК) или промышленных компьютеров (ПК). Структура организации АСУТП может предполагать уровневое разделение задач, решаемых при осуществлении управления электродуговой печью. Управление перемещением электродов (по заданию) и переключением ступеней реактора и трансформатора осуществляется на первом

уровне, в соответствии с заданием, формируемым на втором уровне АСУТП. Задание, в основном, формируется в соответствии с программой плавки (программное управление).

На рисунке 1.1 также представлена традиционная схема взаимодействия основных подсистем управления электрическим режимом электродуговой печи переменного тока.

*Подсистема управления ПСР и подсистема управления ПСН* осуществляют управление исполнительными механизмами соответственно ПСР и ПСН. В соответствии с текущей ступенью реактора и ступенью напряжения трансформатора, а так же с учетом текущей стадии плавки (стадийное программное управление) в *подсистеме формирования задания* вырабатывается задание  $Z^{A,B,C}$  *основному регулятору*, который, в свою очередь осуществляет управление положением электродов, стабилизируя управляемый параметр (ток, импеданс фазы, напряжение дуги и т.д.). *Подсистема контроля дуги* обеспечивает отработку обрывов дуг, технологических коротких замыканий, на высокой скорости исполнительного механизма.

В данной диссертационной работе предлагается осуществлять выбор оптимального режима (по мощности) сверхмощной ДСП с помощью коррекции задания основному регулятору положения электродов, а также подход к реализации подсистемы формирования задания (выделена пунктиром), с целью обеспечения наиболее выгодного (энергетически) текущего режима работы электродуговой печи. Управление переключением ступеней напряжения трансформатора и реактора в рамках данной работы не рассматривается.

Согласно [13], действующее напряжение на дуге может быть выражено с помощью уравнения (1.1), при больших токах:

$$U_D = \alpha + \beta l_D, \quad (1.1)$$

где  $\alpha$  — сумма анодного и катодного падений напряжения,  $\beta$  — градиент потенциала в столбе дуги, В/мм — является функцией состава атмосферы, в которой горит дуга, ее температуры и давления,  $l_D$  — длина межэлектродного промежутка, мм.

Значения коэффициента  $\alpha$  для дуговых печей может составлять 9 — 30 В (для электродов уголь - сталь 22 В; уголь - основной шлак 9 В; уголь -кислый шлак 30 В). Коэффициент  $\beta$  может колебаться еще в большей степени по ходу плавки, в период расплавления при интенсивном отводе тепла от дуги 10 - 12 В/мм; в период окисления 3,5 - 4,0 В/мм, в период рафинирования 1,0 -1,2 В/мм [13].

Коэффициент передачи электрической дуги по напряжению равен  $\beta$ . Таким образом электрическая дуга является сложным нестационарным объектом управления, параметры которого могут значительным образом изменяться по ходу плавки.

Чтобы определить зависимость тока фазы от длины дуги, рассмотрим упрощенную схему замещения одной фазы печи (рисунок 1.2).

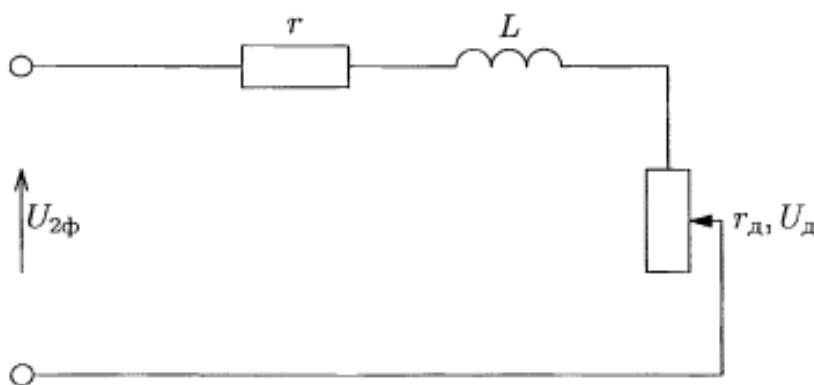


Рис. 1.2. Упрощенная схема замещения одной фазы ДСП

Если принять, что токи и напряжения в цепи имеют синусоидальный характер, то можно построить векторную диаграмму (рисунок 1.3)

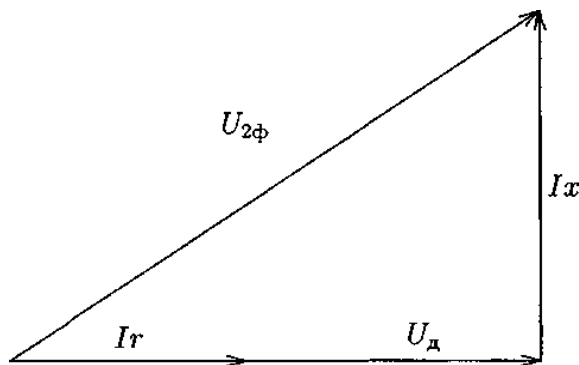


Рис. 1.3. Векторная диаграмма напряжений схемы замещения одной фазы ДСП

В соответствии с диаграммой на рис. 1.3 можно записать уравнение (1.2):

$$U_{2\phi}^2 = (Ix)^2 + (Ir + U_d)^2, \quad (1.2)$$

где  $U_{2\phi}^2$  — напряжение питания фазы (фазное напряжение вторичной стороны трансформатора),  $B; I$  — ток фазы,  $A; x$  — эквивалентное индуктивное сопротивление фазы, Ом;  $r$  — эквивалентное активное сопротивление фазы, Ом;  $U_d$  — падение напряжения на дуге.

Далее с учетом формул (1.1) и (1.2) взаимосвязь между длиной дуги и током может быть выражена как (1.3) [1].

$$l_d = \frac{1}{\beta} (\sqrt{U_{2\phi}^2 - (Ix)^2} - Ir - \beta), \quad (1.3)$$

Взаимосвязь между током и длиной дуги при напряжении питания фазы  $U_{2\phi}$  имеет нелинейный характер. На рисунке 1.4 изображены зависимости тока дуги от ее длины, рассчитанные по уравнению (1.3) при  $x = 6,24$  мОм (с учетом сопротивления реактора),  $r = 0,5$  мОм,  $\alpha = 12$  В,  $\beta = 3$  В/мм, для различных напряжений  $U_{2\pi}$

Таким образом, по каналу тока объект является нестационарным и нелинейным.

Более существенным недостатком данного способа управления можно считать большую сложность автономного управления фазами печи, ввиду особенностей распределения токов в трехфазных цепях без нулевого провода, когда изменение тока в одной фазе немедленно сказывается на токах в двух других фазах.

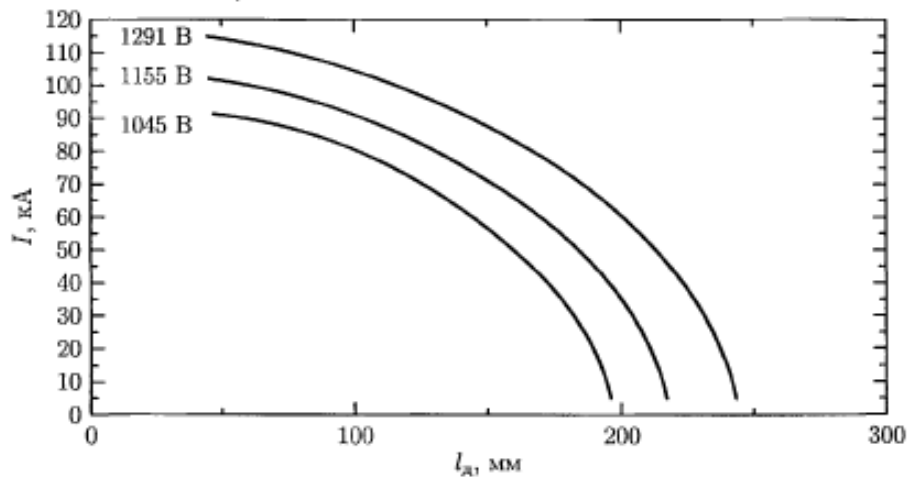
Наиболее часто используется в регуляторах электрического режима ДСП управление по *импедансу* или *полному сопротивлению* фазы печи

$$z = \frac{U_{2\phi}}{I}, \quad (1.4)$$

где  $z$  — модуль полного сопротивления фазы печи;  $U_{2\phi}$  — напряжение фазы печи;  $I$  — ток в фазе печи.

Иногда используют *дифференциальный параметр*, представляющий собой разность между током и напряжением (1.5) [1].

$$A = \alpha I - bU_{2\phi}, \quad (1.5)$$



**Рис. 1.4. Зависимость между током и длиной дуги одной фазы ДСП при различных фазных напряжениях**

Существуют несколько типов регуляторов мощности ДСП, которые различаются по используемым в них параметрам регулирования. В качестве параметра регулирования контура управления электрическим режимом дуговой сталеплавильной печи могут использоваться [1]:

2. значение силы тока в фазе печи;
3. импеданс фазы (полное сопротивление);
4. напряжение дуги;
5. сопротивление дуги;
6. соотношение активной и реактивной мощности.

Каждый из этих параметров в той или иной степени характеризует текущий электрический режим, и использование для управления того или иного параметра имеет как преимущества так и недостатки.

В качестве косвенных параметров, недоступных прямому инструментальному контролю, могут применяться *напряжение на дуге* и *сопротивление дуги*, которые могут быть рассчитаны согласно (1.6) и (1.7).

$$U_d = \frac{P_d}{I} = \frac{P - I^2 r}{I}, \quad (1.6)$$

где  $U_d$  — напряжение на дуге;  $P_d$  — активная мощность дуги;  $I$  — фазный ток;

$P$  — активная мощность фазы печи;  $r$  — активное сопротивление короткой сети.

$$r_d = \frac{P_d}{I}, \quad (1.7)$$

где  $r_d$  — сопротивление дуги.

Согласно (1.1) напряжение на дуге зависит только от длины дуги, следовательно, используя этот параметр, возможно полностью автономное управление тремя фазами печи [1]. Однако, для вычисления этого параметра приходится использовать упрощенные зависимости (1.6) (полагая, что токи и напряжения в цепи синусоидальны), а также необходимо точно знать сопротивление короткой сети  $r$ , которое может изменяться по ходу плавки. В работе [14] предлагается способ измерения напряжения дуги.

### **1.3. Системы автоматизации и управления сталеплавильными печами и оптимизации работы ДСП**

#### **1.3.1. Система управления электродами ArCOS NT**

На агрегатах ковш-печь и дуговых сталеплавильных печах в цехах ОАО «ММК» используется система ArCOS NT разработки компании Vatron совместно с компанией VAI FUCHS.

Система ArCOS обеспечивает устойчивую стабилизацию и программное управление электродами в процессе электродуговой плавки. При надлежащем соблюдении технологии, практически не требуется вмешательства операторов в процесс работы системы регулирования ArCOS. В блоке регулирования применяется ПИ-закон регулирования, с изменяемыми коэффициентами (в зависимости от текущего рассогласования).

С аппаратной точки зрения регулятор ArCOS NT представляет собой промышленный компьютер, оснащенный устройством связи с объектом. Входные сигналы нормируются и поступают на вход устройства DAP4000, представляющего собой интеллектуальную PCI-плату, имеющую микропроцессор. Обязательными информационными каналами, с точки зрения

работоспособности системы регулирования, являются сигналы вторичных токов и напряжений. Процессор устройства DAP4000 в реальном времени ведет обработку поступающих на вход сигналов. Вычисляются:

- эффективные (действующие) значения токов и напряжений по фазам;
- гармонический состав сигналов тока (алгоритм быстрого преобразования Фурье);
- активная мощность;

Управляющая часть системы ArCOS реализована в виде программного обеспечения выполняющего следующие основные функции управления плавкой:

- зажигание дуг, отработка коротких замыканий;
- регулирование (стабилизация) основных электрических параметров;
- расчет и архивирование основных показателей плавки.

Логика зажигания дуг реализована с использованием описанного выше дифференциального параметра (1.5). Управление электрическим режимом производится с использованием одного из трех (на каждой стадии плавки в соответствии с профилем) параметров:

- 1) *импеданс фазы (полное сопротивление) (1.4);*
- 2) *напряжение дуги (1-6);*
- 3) *сопротивление дуги (1.7).*

Устанавливаемые регулятору задаваемые значения этих параметров хранятся в виде таблиц, где каждой паре ступени трансформатора и реактора ставятся в соответствие несколько задаваемых значений, в зависимости от используемой рабочей кривой, графически это можно представить как семейство поверхностей, где каждая поверхность представляет собой значения заданий регулятору электродов для текущих ступеней реактора и трансформатора в единицах либо импеданса, либо сопротивления дуги, либо напряжения дуги (в зависимости от номера кривой).

Управление плавкой в системе осуществляется в соответствии с заранее заданными программами плавки (профилями), представленными в виде таблиц

переключения реактора, напряжения трансформатора и выбора используемой рабочей кривой в зависимости от текущей стадии процесса. Для реализации такого программного управления необходима идентификация текущей стадии процесса. В системе ArCOS текущая стадия процесса определяется по величине текущей энергии активной мощности, потребленной печью с начала плавки [15].

ArCOS NT выступая в роли подчиненного регулятора, предоставляет информацию вышестоящей системе на второй уровень АСУТП о величине текущей затраченной электроэнергии. В ArCOS NT от вышестоящей системы, в соответствии с выбранным профилем передаются команды:

- 1) *номер ступени трансформатора;*
- 2) *номер ступени реактора;*
- 3) *номер рабочей кривой (поверхности).*

В соответствии с этими командами система ArCOS NT производит выборку текущих задаваемых значений и осуществляет управление плавкой. В системе также предусмотрен механизм коррекции рабочей точки с учетом изменения питающего напряжения на первичной стороне печного трансформатора. В данном случае осуществляется так называемое управление по возмущению, для коррекции значений уставок регуляторам перемещения электродов.

Таким образом, нужно отметить, что система ArCOS NT функционирует в жестком программном режиме плавки, учесть особенности процессов можно только на этапе настройки таблиц задаваемых значений параметров регулирования и составлении программ плавки (эмпирическими методами). То есть, система требует точной настройки на конкретный агрегат и под конкретные технологические процессы, не учитывая нестационарности характеристик объекта в процессе плавки (параметрические возмущения).

### **1.3.2. Система регулирования электродов HiReg+**

Базовая система регулирования электродов HiReg+ компании Danielli работает как регулятор, минимизирующий дифференциальный параметр, как в уравнении (1.5), и является составной частью комплекса управления и

оптимизации процессом выплавки стали в электродуговой печи. Согласно [16] алгоритм управления электродами функционирует, минимизируя ошибку управления(1.8).

$$K_i I - K_u U = Error, \quad (1.8)$$

где  $I$  — ток;  $U$  — напряжение;  $K_i$ — коэффициент, зависящий от положения переключателя входных обмоток трансформатора;  $K_u$ —коэффициент, зависящий от выбранного момента работы;  $Error$ —погрешность регулирования, которую необходимо минимизировать.

В регуляторе реализовано динамическое изменение коэффициентов регулятора. С целью улучшения рабочих характеристик базового регулятора (пропорционально-интегрирующего) предлагается система с нечеткой логикой, которая позволяет определить правила, отражающие физические процессы, и осуществлять нелинейное регулирование процесса [16]. Исходный алгоритм управления модифицируется, согласно (1.9):

$$K_c I - K_u K_c U = Error, \quad (1.9)$$

где  $K_c$  — параметр, связанный с состоянием дуги, которое определяется путем анализа гармоник.

По состоянию дуги определяют, на какой стадии находится процесс в текущий момент времени. На завершающих стадиях важно, чтобы дуга была закрыта шлаком. Это обеспечивает высокую эффективность теплопередачи и предотвращает чрезмерный перегрев футеровки. Используются два способа управления [16]:

- подстройка напряжения дуги (ее длины) к текущим условиям вспенивания шлака, с помощью выбора соответствующего тока электрода или напряжения на вторичной обмотке трансформатора, либо комбинацией обоих методов;
- управление вспениванием шлака (регулированием расхода вдувания углеродосодержащих материалов), с целью обеспечения закрытия дуги при текущем электрическом режиме.

Система решает не только основную задачу управления электродами, но и

задачу управления вспениванием шлака, в совокупности с основной задачей. Рабочая точка (токовая уставка) в таком режиме может динамически изменяться по ходу плавки, однако в любой момент времени может быть восстановлено «безопасное» управление согласно статической модели [16].

Нужно отметить, что данная система является полностью интегрированной в систему управления электродуговой печью, обеспечивающей управление процессом выплавки стали, с учетом его моделей в форме статического и динамического материального и энергетического балансов [16].

Однако, для точного сведения материального и энергетического балансов, необходим постоянный и точный химический анализ, а также постоянный контроль тепловых показателей. Данное требование приводит к существенному удорожанию системы управления. С учетом того, что окончательная доводка продукта производится в агрегатах внепечной обработки стали, такое усложнение системы управления может оказаться экономически нецелесообразным.

### **1.3.3. Система «Нева-ДСП»**

Компанией НПФ «Энергосоюз» предлагается система оптимизации энергопотребления «Нева-ДСП», предназначенная для: снижения потребления электроэнергии, повышения коэффициента мощности, повышения производительности, снижения расхода электродов.

Входными сигналами являются:

- мгновенные фазные напряжения на первичной и вторичной сторонах печного трансформатора;
- мгновенные фазные токи на первичной и вторичной сторонах печного трансформатора;
- управляющие сигналы устройствами перемещения электродов;
- положение переключателя ступеней напряжения печного трансформатора и реактора.

С использованием входной информации система рассчитывает:

- действующие (эффективные) значения напряжений и токов на первичной и

вторичной сторонах печного трансформатора;

- показатели, характеризующие уровни несинусоидальности, несимметрии и колебательности токов и напряжений;
- активные и реактивные мощности на первичной и вторичной сторонах печного трансформатора, активные потери в печном контуре;
- коэффициенты, характеризующие мощность излучения дуг и уровень вспененного шлака.

Система осуществляет расчет и отображение реальных рабочих характеристик печи: зависимостей активной и реактивной мощности от тока  $P(I)$  и  $Q(I)$  и т. п., в текущий момент времени, зависящих от положения переключателя реактора, напряжения печного трансформатора, уровня напряжения питающей сети, степени несинусоидальности токов и т. д. На графиках отображается положение текущей рабочей точки и рекомендуемая оптимальная точка. Система дает рекомендации оператору по изменению текущих режимов работы печи для получения оптимальных режимов работы агрегата [17].

Недостатком системы является экспериментально-статистический в основе подход к определению рабочих характеристик печи, который по сути сводится к получению статических моделей процесса.

#### **1.3.4. Система управления электродуговыми печами**

##### **Intelligent Arc Furnace**

Разработанная фирмой «Neural Application Corporation» система IAF реализуется на основе искусственной нейронной сети (ИНС). Нейросеть реализует модель работы ДСП, которая предсказывает возможную ситуацию на печи за 0,1 с до реального события. Это позволяет вводить соответствующую коррекцию с предварением. Другая ИНС первоначально обучается управлению этой моделью, чтобы соответствовать традиционному контроллеру, затем производится дополнительная оптимизация, для улучшения функционирования регулятора [1].

Система позволяет компенсировать отклонения управления от

оптимального, с учетом изменений состава шихты, отклонений питающего напряжения, изменения длины электродов, изменения импеданса подводящей сети.

### **1.3.5. Система оптимизации управления электродуговыми печами SIMELT NEC**

Компания Siemens предлагает систему оптимизации управления энергетическим режимом электродуговой печи SIMELT NEC. В качестве системы регулирования электродов может выступать практически любая существующая система. SIMELT NEC реализуется в виде надстройки, как главный контур управления, осуществляющий коррекцию или передачу уставок системам регулирования электродов.

Работа системы основана на использовании гибридной модели, которая является комбинацией математической модели электрического контура печи и искусственной нейронной сети (ИНС). Результатом работы является уставка, которая для данных условий протекания процесса будет настолько отвечать максимуму активной мощности, насколько это возможно. Система позволяет компенсировать недостатки несимметричной работы печи, обеспечивая более равномерное распределение мощностей по фазам. В случае перегрева водо- j охлаждаемых панелей напротив одной из дуг, система обеспечивает автоматическое перераспределение мощностей дуг, не изменяя суммарной мощности вводимой в печь, одновременно поддерживая ее максимальное значение на максимально возможном уровне для данной ступени напряжения печного трансформатора, с учетом эксплуатационных ограничений [18, 19].

Достоинством нейросетевых моделей является возможность накопления ими знаний, посредством адаптации. В настоящее время хорошо развита теория алгоритмов обучения нейронных структур. Однако, накопленные сетью знания остаются распределенными между всеми нейронами сети, ввиду самого принципа построения нейронных сетей, как параллельного вычислителя, что существенно снижает их полезность при анализе закономерностей приводящих к полученному результату.

#### **1.4. Постановка цели и задачи исследование**

В результате краткого обзора особенностей процесса управления, установлено, что на современных печах в связи с совершенствованием технологий появляется возможность управления ведением плавки в режимах интенсификации производства при одновременном снижении энергозатрат. Для интенсификации процесса требуется определение и поддержание рациональных режимов энергопотребления доставляющих оптимумы текущим технологическим показателям, что является важной и актуальной задачей при управлении такими агрегатами. Для выбора приоритетного критерия оптимизации процесса управления электрическим режимом ДСП, необходим анализ рабочих электрических и технологическо-экономических характеристик процесса плавки и влияние электрического режима плавки на итоговые показатели плавки.

Особенностью большинства существующих систем является использование ими при управлении в том или ином виде статических моделей процесса (детерминированных, эмпирических или статистических), которые не могут учитывать в должной мере нестационарность процесса. Большинство систем управления ведения плавки работают в программном режиме. Однако, для эффективного управления в динамично изменяющихся условиях работы печи с влиянием стохастических и труднопрогнозируемых возмущений требуется разработать поисковую систему для управления режимом энергопотребления ДСП.

Для оценки эффективности работы разработанной системы автоматического управления энергетическим режимом, необходимо выполнить математическое моделирование управляемого процесса и работы разрабатываемой системы управления.

## ГЛАВА 2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

## ГЛАВА 3. СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ ДСП

### Выводы по главе

1) Управление электрическим режимом электродуговой печи предлагается организовать каскадным регулированием, с помощью двух подсистем управления: подчиненного стабилизирующего и командного оптимизирующего, для сохранения устойчивости управления, ввиду особенностей трехфазных цепей без нулевого провода.

2) Оптимизирующее управление для ускорения поиска экстремума также реализуется двухонтурным регулированием: модулем быстрого поиска (по выполнению условия  $P_d \approx Q$ ) и модулем экстремального регулирования, переключение между двумя регуляторами производится по условиям достижения границ функционирования того или иного регулятора.

3) Предлагаемый модуль экстремального регулирования в отличие от существующих систем экстремального регулирования для оценки градиента целевой функции не использует принудительных возмущений, для поиска экстремума используются только оценка корреляционной связи между случайными значениями входного и выходного сигнала объекта, так как их функции во времени являются случайными.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель работы, заявленная, как научное обоснование использования эффективного метода управления и реализации на его основе системы автоматического управления энергетическим режимом электродуговых печей переменного тока, обеспечивающей снижение энергозатрат и увеличение производительности агрегата путем сокращения времени процесса расплавления, достигнута

1) В динамично изменяющихся условиях работы металлургической печи с учетом стохастических и труднопрогнозируемых возмущений, выдвинута и обоснована идея применения поисковой экстремальной системы для автоматического управления энергетическим режимом ДСП.

2) Режимы энергопотребления электродуговых сталеплавильных печей переменного тока могут изменяться в широких пределах. В качестве приоритетного критерия, характеризующего эффективность работы ДСП, принято поддержание максимально возможной текущей производительности  $g(I)$ , что обеспечивается путем определения и поддержания максимально возможной мощности, выделяемой в дуге  $P_d$ .

3) Возможность использования поисковой системы экстремального регулирования для определения оптимального энергетического режима обосновывается экстремальным характером зависимости оптимизируемого параметра  $P_d$  от текущего рабочего тока  $I$ , а также выявлением наличия неконтролируемого непрогнозируемого дрейфа статической характеристики объекта, обусловленного нестационарностью металлургического процесса.

4) Поисковое управление предлагается реализовать с помощью каскадного управления подчиненной системой стабилизирующего регулирования для обеспечения стабильного и симметричного режима работы в процессе поиска. Предлагается структура организации системы управления электрическим режимом электродуговой печи, совместно с системой автоматического поискового экстремального управления энергетическим

режимом ДСП на основе выявленной корреляционной связи между входным сигналом тока и выходным сигналом мощности дуги. Для быстрого выхода в окрестность экстремума дополнительно предлагается использовать особенность электрического режима в районе оптимума  $P_d(I) \approx Q(I)$ .

5) Численное моделирование показало, что предлагаемая система автоматического управления осуществляет устойчивый поисковый режим работы и обеспечивает более точное определение и поддержание максимального значения мощности дуг (суммарная мощность дуг на 3,7% выше), чем в традиционных системах управления электрическим режимом ДСП. Показано, что система эффективно обеспечивает поиск рационального электрического режима ДСП при наличии возмущений в виде скачкообразных и плавных смещений статической характеристики.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лапшин, И. В. Автоматизация технологических процессов дуговой сталеплавильной печи / И. В. Лапшин. — М.: МИСиС, 2002. — С. 157.
2. Рябов, А. В. Современные способы выплавки стали в дуговых печах: Учебное пособие / А. В. Рябов, И. В. Чуманов, М. В. Шишимиров. — М.: Теплотехник, 2007. - С. 192.
3. Лапшин, И. В. Применение кислорода для высокоэффективного электросталеплавильного производства / И. В. Лапшин // Новости черной металлургии за рубежом. — 2001. — 4. — С. 35-38.
4. Управление режимом плавки в дуговой электропечи переменного тока с целью защиты холодильников стен печи / М. Кнооп, Р. Лихтербек, З. Келе, Ю. Зинг // Черные металлы. — 1997. — 7. — С. 8-13.
5. Роль вспенивания шлака в оптимизации тепловой работы ДСП переменного тока / П. Поррагин, Д. Онеги, А. Гроссо, Ф. Миани // Сталь. — 2005.-4.- С. 84-86.
6. Энерготехнологические особенности процесса электроплавки стали PI инновационный характер его развития / В. Д. Смоляренко, А. Г. Девицкий, А. Н. Попов, М. А. Бесчанова // Электromеталлургия.— 2003.— № 12. — С. 12-19.
7. Дуговые печи нового поколения: ЭДП серии ULTIMATE фирмы «ФАИ Фукс» / Ф. Вагнер, Ф. Мюллер, П. Пудель, В. Д. Смоляренко // Сталь. — 2005.— №6.- С. 77-79.
8. Смоляренко, В. Д. Современное состояние и перспективы развития электродуговых печей для выплавки стали / В. Д. Смоляренко, С. Г. Овчинников, Б. П. Черняховский // Сталь. — 2005. — № 2. — С. 47-51.
9. Нархольц, Т. Электродуговая печь серии ULTIMATE — сталеплавильный агрегат нового поколения / Т. Нархольц, Б. Виллемин // Электromеталлургия. — 2005. — № 4. — С. 8-12.
10. Воробьев, В. П. Автоматизация дуговых электропечей / В. П. Воробьев, А. В. Сивцов, С. Г. Возжеников // Черные металлы. — 1999. — № 5.-С. 12-14.

11. Аргента, П. Выплавка электростали с непрерывной загрузкой горячей шихты / П. Аргента, М. Бианчи Ферри // *Электromеталлургия*.— 2003.-5.-С. 27-34.
12. Глишков, Г. М. Контроль и автоматизация метал лургических процессов / Г. М. Глишков, А. И. Косырев, Е. К. Шевцов. — М.: Metallургия, 1989. — С. 352.
13. Электрические промышленные печи. Дуговые печи и установки специального нагрева / Под ред. А. Д. Свенчанский. — М.: Энергоиздат, 1981.— С. 296.
14. Андрианова, А. Я. О свойствах электрических цепей с дугами и вопросы управления ДСП / А. Я. Андрианова, В. М. Эдемский // *Электromеталлургия*. — 2002. — № 10. — С. 29-32.
15. ОАО «ММК». - Технологическая инструкция ТИ-101-СТ ЭСПЦ-64-2006, 2006.
16. Рушило, Э. Электродуговая печь с ситемой динамического автоматического регулирования фирмы DANIELI / Э. Рушило, К. Бергман, С. Олунд // *Сталь*. — 2005. - № 10. — С. 42-48.
17. Кучумов, Л. А. Система «Нева ДСП». Рекламный проспект / Л. А. Кучумов. — 2006.
18. Повышение эффективности управления дуговой печью переменного тока // А О «Черметинформация». Новости черной металлургии за рубежом. - 2002. - № 2. - С. 47-48.
19. Рис, М. Оптимизация управления электродуговых печей с использованием нейронных сетей / М. Рис, Р. Сессельман // *Труды 3-го конгресса сталеплавильщиков*.— М.:, 1995.— С. 153-162.
20. Андриянова, А. Я. Некоторые вопросы использования интеллектуного управления в дуговых сталеплавильных печах / А. Я. Андриянова, Я. С. Паранчук, А. О. Лозинский // *Электromеталлургия*. — 2004. — № 3. - С. 30-37.
21. Ефроймович, Ю. Е. Оптимальные электрические режимы дуговых стале-

- плавильных печей. / Ю. Е. Ефроймович.— М.: Metallurgizdat, 1956.— С. 98.
22. Марков, Н. А. Электрические цепи и режимы дуговых электропечных установок / Н. А. Марков. — М.: Энергия, 1975.— С. 204.
23. Минеев, А. Р. Энергосберегающая статистическая и динамическая оптимизация параметров и структур компьютеризированных электроприводов (на примере электрических печей) / А. Р. Минеев // Электротехника. — 1998. -10. - С. 15-22.
24. Лозинский, О. Ю. Система оптимального управления электрическим режимом дуговой печи, питаемой через регулируемый реактор / О. Ю. Лозинский, Я. С. Паранчук // Электрометаллургия. — 2007. — №8. — С. 23-31.
25. Лозинский, О. Ю. Устройство для регулирования электрического режима дуговой многофазной электропечи. Патент RU 2238616.
26. Миронов, Ю. М. Об оптимизации электрических режимов и параметров дуговых сталеплавильных печей / Ю. М. Миронов // Электрометаллургия. — 2001. - 9. — С. 25-32.
27. Казаков, О. А. О вольт-амперной характеристике дугового разряда переменного тока / О. А. Казаков // Электричество. — 1995.—№ 8.—С. 49-56.
28. Леушин А.И. Дуга горения/А.И.Леушин.—М.:Металлургия, 1973.— С.239.
29. Игнатов, И. И. Расчет электрических параметров и режимов дуговых сталеплавильных печей/И. И. Игнатов, А. В. Хаинсон // Электричество. - 1983. — 8. - С. 62-65.
30. Ридингер, Д. Измерение мощности на первичных и вторичных сторонах трехфазных дуговых печей / Д. Ридингер, М. Бок//Черные металлы. — 2002.- 8.-С. 17-21.
31. Калиткин, Н. Н. Численные методы/ Н. Н. Калиткин.— М.: Наука, 1978.- С. 512.
32. Игнатов, И. И. Математическое моделирование электрических режимов дуговых сталеплавильных печей/ И.И.Игнатов, А.В. Хаинсон// Электричество.

— 1985. — 8. — С. 69-72.

33. Математическая модель электрического контура дуговой сталеплавильной печи / В. С. Галактионов, В. Л. Рабинович, Р. В. Минеев и др. // Электричество. — 1975. — 11. — С. 76-78.

34. Миронов, Ю. М. Закономерности электрических режимов дуговых сталеплавильных электропечей / Ю. М. Миронов // Электричество.—2006.-6. — С. 56-62.

35. Корнилов, Г. П. Математическая модель дуговой сталеплавильная печь — статический компенсатор реактивной мощности (часть 1) / Г. П. Корнилов, А. А. Николаев, Т. Р. Храмшин // Создание и внедрение корпоративных информационных систем (КИС) на промышленных предприятиях Российской Федерации. Сборник трудов международной научно-технической конференции. / Под ред. Д. Х. Девятова. — Магнитогорск, 2007. — С. 278-286.

36. Выбор параметра для оптимизации электрического режима дуговых печей переменного тока / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, М. В. Усачев, Е. Н. Ишметьев//Математика. Приложение математики в экономических, технических и педагогических исследованиях: Сб. науч. тр. Вып. 4.— Магнитогорск: МГТУ, 2006.— С. 188-191.

37. Оптимизация управления энергетическим режимом доводки стали в агрегате печь-ковш с целью минимизации себестоимости процесса / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, С. В. Булычева и др. // Приложение математики в экономических исследованиях: Сб. науч. тр. Вып. 1.— Магнитогорск: МГТУ, 2007.-С. 3-12.

38. Оптимизация управления температурным и энергетическим режимами в технологические периоды электродуговой плавки / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, М. В. Усачев и др. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова.—2007. - № 4.

39. Ахметов, У. Б. Особенности материального и теплового балансов ДСП-180 ОАО ММК / У. Б. Ахметов, А. В. Малофеев, А. В. Пантелеев // Теория и технология металлургического производства: Межрегиональный сб. науч.

- трудов. Вып. 7. — Магнитогорск: МГТУ, 2007. — С. 84-89.
40. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. — М.: Высшее образование, 2008. — С. 479.
41. Аншин, В. Ш. Трансформаторы для промышленных электропечей / В. Ш. Аншин, А. Г. Крайз, В. Г. Мейксон; Под ред. А. Г. Крайза. — М.: Энергоиздат, 1982. — С. 296.
42. Баранчук, Е. И. Взаимосвязанные и многоконтурные регулируемые системы / Е. И. Баранчук. — Ленингр. «Энергия», 1968.— С. 268.
43. Салихов, З. Г. Терминология основных понятий автоматики / З. Г. Салихов. — М.: Издательство «Учеба», 2003.— С. 126.
44. Александров, А. Г. Оптимальные и адаптивные системы / А. Г. Александров.— М.: Высш. шк., 1989.— С. 263.
45. Самонастраивающиеся системы: Справочник / Под ред. П. И. Чинаева. — Киев, 1959.-С. 528.
46. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-и тт.; 2-е изд. Т. 5: Методы современной теории автоматического управления / Под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова.— М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006.— С. 784.
47. Казакевич, В. В. Системы автоматической оптимизации / В. В. Казакевич, А. Б. Родов. — М.: Энергия, 1977.— С. 288.
48. Автоматизация и оптимизация управления технологическими процессами внепечной доводки стали / Е. Н. Ишметьев, С. М. Андреев, Б. Н. Парсункин и др. - Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. — С. 311.
49. Оптимизация электрического режима дуговых сталеплавильных печей в литейном производстве / С. М. Андреев, У. Б. Ахметов, Б. Н. Парсункин, М. В. Усачев // Металлургия машиностроения. — 2005. — № 5. — С. 2-5.
50. Парсункин Б.П., Расчеты систем автоматической оптимизации управления технологическими процессами в металлургии / Б. Н. Парсункин, М. В. Бушманова, С. М. Андреев.— Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 2003. - С. 267.

51. Аггуиг, К. В. Real-Time Optimization by Extremum-Seeking Control / К. В. Ariyur, М. Kristic. — New Jersey: Wiley-Interscience Publication, 2003. - P. 230.
52. Парсункин, Б. П. Оптимизация управления технологическими процессами в металлургии / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, У. Б. Ахметов.— Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. — С. 198.
53. Gurvich, L. Fuzzy logic base extremum seeking control system / L. Gurvich // Electrical and Electronics Engineers in Israel. — 2004. — 9. — Pp. 18-21.
54. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Под ред. Н. Д. Егупова.— М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001.— С. 744.
55. Деменков Н. П., Нечеткое управление в технических системах / Н. П. Деменков.— М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005.— С. 200.
56. Оптимизация электрического режима дуговых сталеплавильных печей переменного тока / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, У. Б. Ахметов, М. В. Усачев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. — 2006. — 7.— С. 26-30.
57. Оптимизация энергетического режима работы электродуговой печи / Е. Н. Ишметьев, С. М. Андреев, Б. Н. Парсункин и др. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. — 2007. — 5.
58. Статистическое исследование и моделирование экономических и технологических процессов металлургического производства / Б. Н. Парсункин, М. В. Бушманова, С. М. Андреев и др. — Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. - С. 316.
59. Салихов, З. Г. Об одном методе повышения эффективности расчета динамических характеристик объектов управления / З. Г. Салихов, Л. А. Рутковский, Д. Н. Столбовский // Автоматика и Телемеханика.— 2004.— № П.-С. 76-80.
60. Бендат, Д. Прикладной анализ случайных данных / Д. Бендат, А. Пирсол. — М.: «Мир», 1989.— С. 540.
61. Ким, Д. П. Теория автоматического управления. Т.2: Многомерные,

нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. / Д. П. Ким.— М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.—С. 464.

62. Салихов, З. Г. Системы оптимального управления сложными технологическими объектами / З. Г. Салихов, Г. Г. Арунц, Л. А. Рутковский.— М.: Теплоэнергетик, 2004.— С. 495.

63. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-и тт.; 2-е изд. Т. 2: Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления / Под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. — М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006.— С. 640.

64. Динамическая оптимизация электрического режима электродуговых печей и реализация экспериментальной установки для ее моделирования / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, Е. Н. Ишметьев и др. // Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сб. науч. тр. Вып. 14.— Магнитогорск: МГТУ, 2007.— С. 210-215.

65. OPC Data Access Custom Interface Specification. — Electronically published. — 2002.

66. Казаринов, Л. С. Автоматизированные информационно-управляющие системы: уч. пособие / Л. С. Казаринов, Д. А. Шнайдер, Т. А. Барбасова. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. — С. 296.

67. Влияние системы управления электрическим режимом на электропотребление ДСП-180 ОАО «ММК» /Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин, А. Н. Шеметов //Международная конференция «Электроэнергетика и автоматика в металлургии и машиностроении» 22-24 октября 2008 года, г. Магнитогорск. — 2008. — С. 236-242.