

На правах рукописи

Усачев Максим Валерьевич

**Система автоматического управления  
энергетическим режимом электродуговых  
печей переменного тока**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и  
производствами (в металлургии)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2009

Работа выполнена на кафедре *Компьютерные информационные и управляющие системы автоматики Государственного технологического университета — «Московский институт стали и сплавов».*

Научный руководитель: *"Заслуженный деятель науки России",  
"Заслуженный изобретатель РСФСР",  
доктор технических наук, профессор,  
Салихов Зуфар Гарифуллович*

Консультант по  
электродуговым печам: *кандидат технических наук,  
Ишметьев Евгений Николаевич*

Официальные оппоненты: *доктор технических наук, профессор,  
Еременко Юрий Иванович*  
  
*кандидат технических наук, профессор,  
Лапшин Игорь Васильевич*

Ведущая организация: *ОАО «Черметавтоматика»*

Защита состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2009 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д212.132.07 при Государственном технологическом университете - «Московский институт стали и сплавов», по адресу: 119049, г. Москва, Крымский вал, д.3, ком. К325

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного технологического университета - «Московский институт стали и сплавов».

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2009 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
*кандидат технических наук, профессор*

*Калашников Е. А.*

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** В настоящее время сверхмощные электродуговые сталеплавильные печи (ДСП), как агрегаты для производства стали, получают большое распространение, как в России, 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. В России наибольшее распространение получают электродуговые печи переменного тока, которые обладают рядом эксплуатационных преимуществ перед дуговыми печами постоянного тока.

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, нерешенной до настоящего времени в полном объеме, и остается одной из актуальных.

В данной работе исследуются вопросы 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.

**Цель диссертационной работы** заключается в научном обосновании использования эффективного поискового метода экстремального управления и реализации на его основе системы автоматического управления энергетическим режимом электродуговых печей переменного тока, обеспечивающей снижение энергозатрат и увеличение производительности агрегата путем со-

кращения времени процесса расплавления.

Вопросы, решаемые в работе:

- исследование зависимости энергетических и экономических итоговых показателей эффективности электросталеплавильного процесса от параметров подводимой к ДСП электрической энергии;
- научное обоснование перспективности использования поисковой экстремальной системы автоматического управления энергетическим режимом ДСП переменного тока, с целью повысить эффективность ее энергопотребления;
- разработка математического и алгоритмического обеспечения поисковой экстремальной 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;
- разработка физической модели процесса плавления в ДСП переменного тока и исследование процессов плавки на физической модели с использованием поисковой экстремальной системы управления энергетическим режимом печи, при существенном дрейфе рабочих ее характеристик.

#### **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 поискового экстремального управления энергетическим режимом электродуговой печи, с целью повысить эффективность ее энергопотребления;
- структура системы управления энергетическим режимом дуговой печи переменного тока, реализующей поисковое экстремальное управление энергетическим режимом электродуговой печи;
- математическое и алгоритмическое описание системы управления энергетическим режимом электродуговой печи переменного тока, реализующей поисковое экстремальное управление энергетическим режимом электродуговой печи

- программная реализация алгоритма поискового экстремального метода автоматической оптимизации управления энергетическим режимом электродуговой печи;
- созданная физическая модель ДСП для исследования разрабатываемого программного обеспечения реализующего функции 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;
- результаты математического и реального физического моделирования в лабораторных и промышленных условиях работы системы автоматического поискового экстремального управления энергетическим режимом электродуговой печи, подтверждающие эффективность предлагаемого метода.

**Внедрение результатов.** Проведено испытание разработанной системы автоматического управления энергетическим режимом электродуговой печи переменного тока в лабораторных и промышленных условиях Электростале-плавильного цеха ОАО «Златоустовский металлургический завод» (акт от 1 февраля 2009 г.).

По данным испытаний получены оценки сокращения времени плавки на 10% и сокращения расхода электроэнергии на 7,5% в сутки.

Использование результатов работы в учебном процессе при подготовке специалистов в ВУЗе по автоматизации сложных металлургических процессов.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались:

- на всероссийской научно-технической конференции «Создание и внедрение корпоративных информационных систем (КИС) на промышленных предприятиях Российской Федерации» (г. Магнитогорск, 2005);
- на 64-ой, 65-ой и 66-ой научно-технических конференциях по итогам научно-исследовательских работ (г. Магнитогорск, МГТУ, 2006, 2007, 2008 гг.);
- на Всероссийской молодежной научной конференции «Мавлютовские чтения», посвященной 75-летию УГАТУ (г. Уфа, 2007 г.);
- на VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современные информационные технологии в науке, образовании и практике» (г. Оренбург, 2007 г.);
- на IV Международной научно-практической конференции «Печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии и машиностроении» (г. Москва, 2008 г.)

**Публикации.** Положения работы изложены в 11 основных печатных работах, две из которых опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов исследований.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Содержит 131 страницу основного текста, проиллюстрированного 50 рисунками, 7 таблицами.

## Содержание работы

**Во Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована необходимость проведения научных исследований, для обоснования практической значимости построения адаптивной системы управления ДСП переменного тока, представлены выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** сделан обзор современных способов управления электродуговой плавкой, рассмотрены особенности электродуговой печи переменного тока как объекта управления.

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

В результате обзора состояния техники конструирования и проектирования дуговых печей можно сделать вывод: оптимальные режимы с точки зрения интенсификации процесса выплавки стали и 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, причем работа в номинальном режиме трансформатора не обеспечивает экстремумов показателей эффективности плавки.

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

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

- 1) переключение ступеней реактора;
- 2) переключение ступеней напряжения печного трансформатора;
- 3) перемещение электродов, при выбранной ступени напряжения.

В результате обзора принципов построения современных систем управления электрическим режимом электродуговых печей переменного тока, была разработана функциональная схема системы автоматического управления электрическим режимом электродуговой печи (рис 1).

На рисунке 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 фазных напряжений  $u^{A,B,C}$  и токов  $i^{A,B,C}$  с измерительных преобразователей: ТТ — измерительный трансформатор тока и ТН — измерительный трансформатор напряжения — поступают

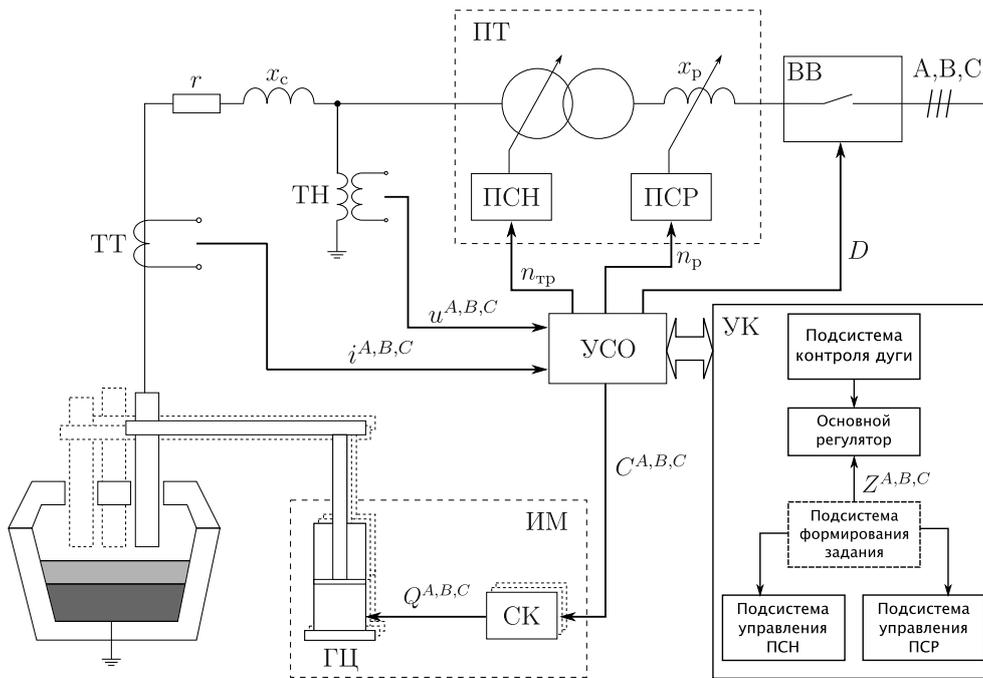


Рис. 1. Функциональная схема контура управления электрическим режимом ДСП

в устройство связи с объектом (УСО). 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,  $C^{A,B,C}$  — управляющие сигналы на сервоклапаны (СК) гидравлических устройств перемещения электродов (ИМ).  $Q^{A,B,C}$  — расходы жидкости поступающей в гидроцилиндры (ГЦ) ИМ фаз А, В, С, пропорциональные скорости перемещения электродов.  $r$  и  $x_c$  — параметры короткой сети, соответственно активное и реактивное сопротивление.

На рисунке 1 также представлена традиционная схема взаимодействия основных подсистем управления электрическим режимом электродуговой печи переменного тока блока УК.

Анализ существующих систем управления показал, что особенностью большинства из них 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, в динамично изменяющихся условиях работы печи с влиянием стохастических и труднопрогнозируемых возмущений наиболее целесообразно применять адаптивные поисковые системы для управления и оптимизации режима энергопотребления ДСП.

В данной диссертационной работе предлагается осуществлять выбор оптимального режима (по мощности) сверхмощной ДСП с помощью коррекции

уставки основному регулятору положения электродов, а также подход к реализации подсистемы формирования задания (на рис. 1 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.

**Во второй главе** проведен анализ зависимостей электрических характеристик электродуговой печи от текущего электрического режима, и был выбран приоритетный показатель эффективности текущего использования электрической энергии, для осуществления управления энергетическим режимом электродуговой печи.

Как отмечается в литературных источниках, оптимизация электрического режима в ДСП, реализуемая путем идентификации состояния процесса плавки и поддержания оптимального режима для каждого состояния, позволяет увеличить производительность на 7–10% и снизить расход электроэнергии и огнеупоров на 5–7%.

Электрический режим однозначно определяется текущими значениями тока дуги и напряжения питания печи. Определяют следующие рабочие характеристики печи:

- зависимости активной мощности и реактивной мощности печи от тока;
- зависимость активной мощности, выделенной в дугах, от тока;
- зависимость текущего удельного расхода электроэнергии от тока;
- зависимость текущей производительности печи от тока;

В процессе работы данные величины могут изменяться в широких пределах. Количество электроэнергии, затраченное на плавку зависит от соотношения электрических и тепловых потерь, от полезной мощности, усваиваемой печью. Результирующие производственно-экономические показатели (производительность, продолжительность периода расплавления, удельное количество затраченной электроэнергии) зависят от рационального использования подводимой к электродуговой печи электрической мощности. На рисунке 2 представлены зависимости текущей часовой производительности печи от тока дуг  $g(I)$ , удельного расхода электроэнергии  $\omega_{уд}(I)$  и мощности дуг  $P_d(I)$  от рабочего тока печи (расчитаны для ДСП-180 с учетом использования альтернативных источников энергии — природного газа, кислорода и энергии жидкого чугуна).

Из рисунка 2 видно, что значение тока, при котором достигается максимум производительности печи, совпадает со значением тока, при котором в дугах выделяется максимальная мощность.

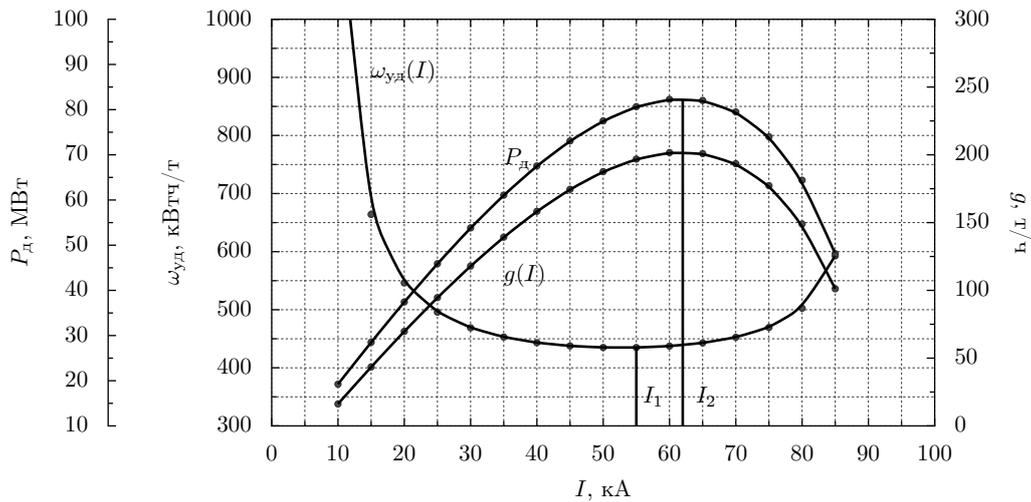


Рис. 2. Зависимости текущей часовой производительности печи  $g(I)$ , удельного расхода электроэнергии  $\omega_{уд}(I)$  и мощности дуг  $P_d(I)$  от рабочего тока печи

На рисунке 3 представлены экспериментальные данные за два месяца работы ЭСПЦ ОАО «ММК» в виде зависимости удельного расхода электроэнергии от суточной производительности агрегата.

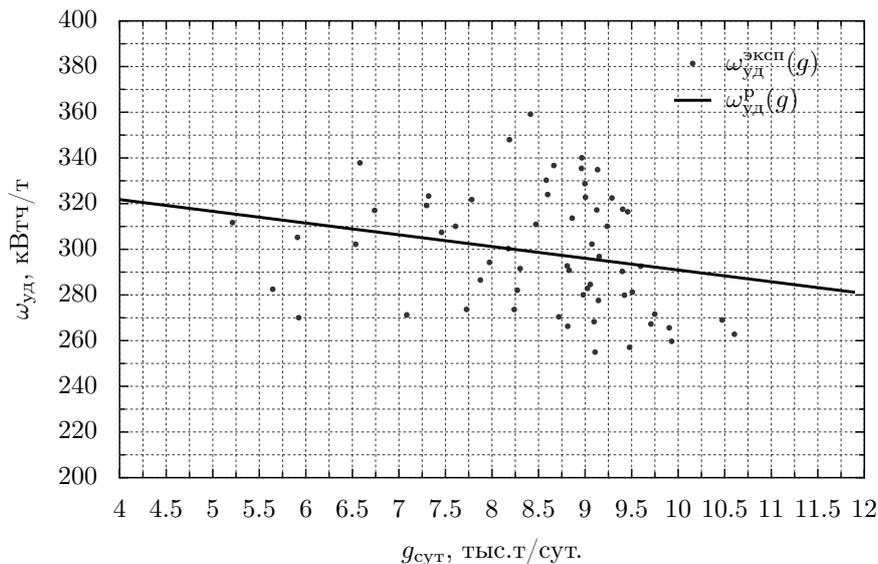


Рис. 3. Зависимость удельного расхода электроэнергии от суточной производительности цеха:  $\omega_{уд}^{эксп}(g)$  — экспериментальные данные,  $\omega_{уд}^p(g)$  — линия регрессии

Анализ представленного на рисунке 3 графика, позволяет сделать вывод, что с увеличением производительности работы печи, удельный расход электроэнергии имеет тенденцию к снижению. Таким образом снижается себестоимость единицы продукции. Суточную производительность печи можно повысить, уменьшив время простоев агрегатов или сократив время плавки, с помощью повышения текущей производительности  $g(I)$ , которая напрямую

зависит от текущей мощности  $P_d(I)$ , выделяемой в дугах, и имеет явно выраженный экстремальный характер.

Условием для достижения максимальной текущей производительности агрегата  $g_{max}$  является наличие такого текущего электрического режима, при котором достигается максимальная мощность  $P_{dmax}$ , выделяемая в дугах печи. В качестве критерия эффективности использования электрической энергии в данной работе предлагается отыскание такого значения рабочего тока  $I_{опт}$ , что:

$$\begin{aligned} P_d(I_{опт}) &= \max(P_d(I)); \\ I &\leq I_{ном}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $I_{ном}$  — номинальное значение тока вторичной обмотки трансформатора. В случае, если значение тока печи, обеспечивающего максимум мощности выделяемой в дугах  $I_{max} > I_{ном}$ , тогда  $I_{опт} = I_{ном}$ . Однако, на практике обычно допускается 20%-ое превышение номинального тока.

На рисунке 4 представлены зависимости активной мощности, мощности дуг и реактивной мощности печи от тока.

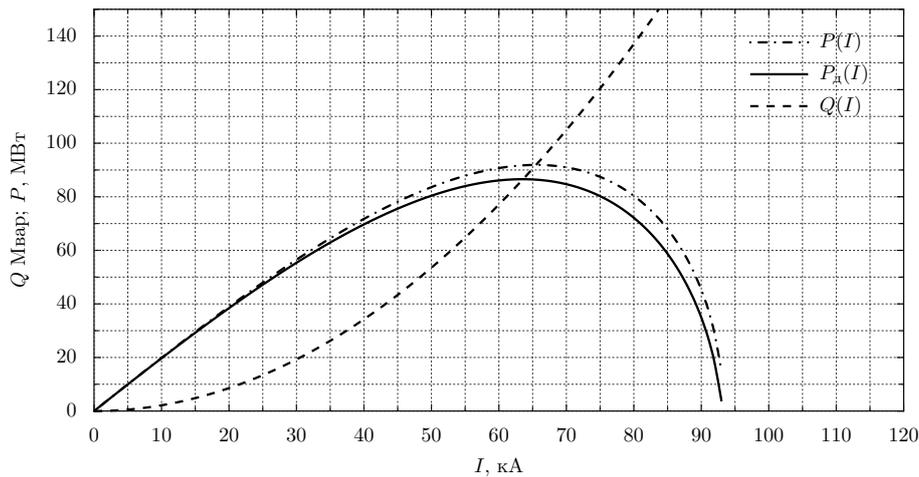


Рис. 4. Графики зависимости активной мощности  $P(I)$ , мощности дуг  $P_d(I)$  и реактивной мощности печи  $Q(I)$  от тока

В режиме максимума мощности дуги выполняется условие  $Q(I) \approx P_d(I)$ . Данное условие используется при организации поисковой системы автоматической оптимизации.

На рисунке 5 представлены статические характеристики оптимизируемого параметра, полученные с помощью программной модели электродуговой печи при различных значениях постоянной времени дуги  $\theta$  (в разные периоды плавки).

Из графиков на рисунке 5 следует, что существует нестационарность характеристик дуги, которая вызывает неконтролируемый дрейф статических характеристик процесса. При наличии дрейфа статических характеристик

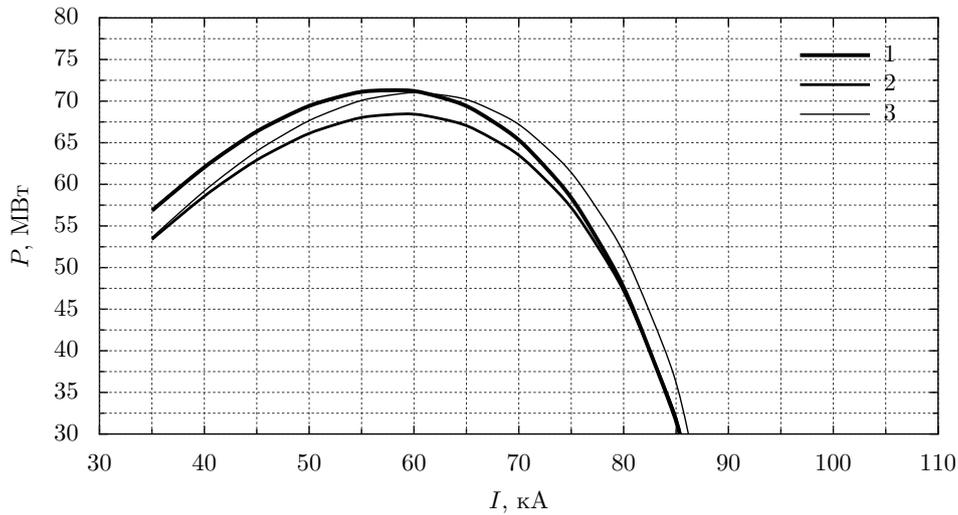


Рис. 5. Графики зависимости активной мощности дуг  $P_d(I)$  при различных значениях  $\theta$ : 1 —  $\theta = 5000$  мкс; 2 —  $\theta = 300$  мкс; 3 —  $\theta = 100$  мкс

объекта в работе предлагается использовать поисковую экстремальную систему автоматического управления, определяющую в процессе функционирования значение  $I_{\text{опт}}$  для достижения максимального значения текущей мощности дуг  $P_d$  (с учетом ограничений по току), в соответствии с (1).

**В третьей главе** разрабатывается математическое и алгоритмическое описание системы управления энергетическим режимом электродуговой печи.

Задача поиска эффективного режима энергопотребления ДСП решается с помощью совместной работы двух подсистем: подчиненной системы стабилизирующего управления положением электродов и командной поисковой системы оптимизации для коррекции текущего режима (рисунок 6). Все сиг-

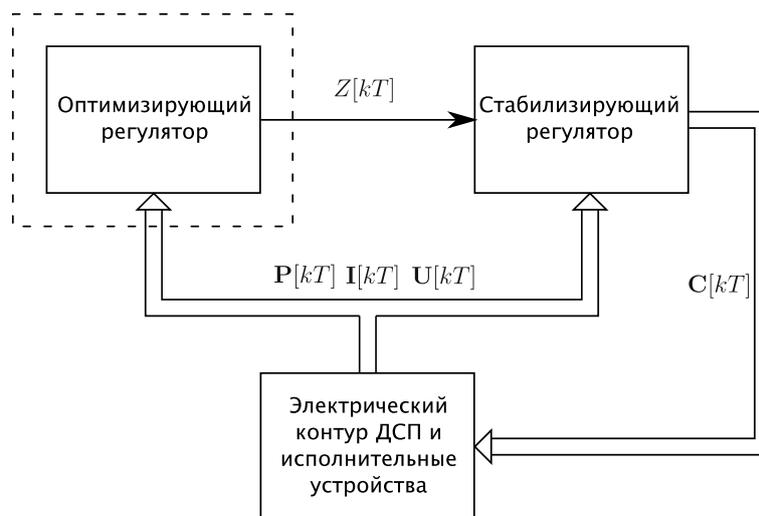


Рис. 6. Схема взаимодействия регуляторов предлагаемой системы автоматического управления

налы далее будут представлены в функции дискретного времени  $kT$ . Объект управления — электрический контур печи и исполнительные устройства перемещения электродов. Стабилизирующий регулятор реализует алгоритмы зажигания дуг и может использовать различные законы формирования вектора управляющих воздействий  $\mathbf{C}[kT] = [C^A, C^B, C^C]^T$  на механизмы перемещения электродов с целью минимизировать рассогласование между заданием  $Z[kT]$  и регулируемым параметром. Входными сигналами СР являются векторы текущих значений токов в фазах  $\mathbf{I}[kT] = [I^A, I^B, I^C]^T$ , фазных напряжений  $\mathbf{U}[kT] = [U^A, U^B, U^C]^T$  и активной мощности  $\mathbf{P}[kT] = [P^A, P^B, P^C]^T$  по фазам.

Входными сигналами для поисковой системы управления (оптимизирующий регулятор) являются векторы текущих значений токов в фазах  $\mathbf{I}[kT]$ , фазных напряжений  $\mathbf{U}[kT]$  и активной мощности  $\mathbf{P}[kT]$  по фазам. Выходным сигналом является сигнал задания (уставки)  $Z[kT]$ , передаваемый в подчиненный стабилизирующий регулятор на каждой итерации работы поисковой системы управления. Так как целью управления является поддержание максимально возможной мощности, выделяемой в дугах, текущее значение  $P_d[kT]$  определяется расчетно на каждой итерации в соответствии с выражением  $P_d(I) = P(I) - 3I^2r$ . Физически сигнал  $Z[kT]$  представляет собой величину уставки стабилизирующему регулятору в единицах стабилизируемого параметра.

Использование каскадного управления необходимо для обеспечения устойчивости работы системы автоматического управления. Если производить поисковое управление для достижения максимума целевой функции непосредственно управляя исполнительными механизмами, можно вывести систему в неустойчивый режим работы из-за наличия значительного взаимовлияния токов в трехфазной цепи без нулевого провода. Поэтому поисковая система управления работает в качестве командной системы для стабилизирующего регулятора. В качестве подчиненного стабилизирующего контура для существующих печей можно использовать существующие промышленные системы управления электрическим режимом.

В основе предлагаемой системы поисковой автоматической оптимизации лежит функциональная схема, представленная на рисунке 7.

Система поискового автоматического управления состоит из двух подсистем: экстремальный регулятор (ЭР) и быстрый поисковый регулятор (БПР). В каждый момент времени в работе находится только один из них, в зависимости от положения ключа К. Переключение К производится по сигналу  $\sigma$  от устройства управления переключением (УП).

БПР обеспечивает быстрый вывод объекта в «окрестность» максимальной мощности дуги. В основе принципа работы этой подсистемы лежит условие максимума мощности дуги, полученное в главе 2:  $Q(I) \approx P_d(I)$ .

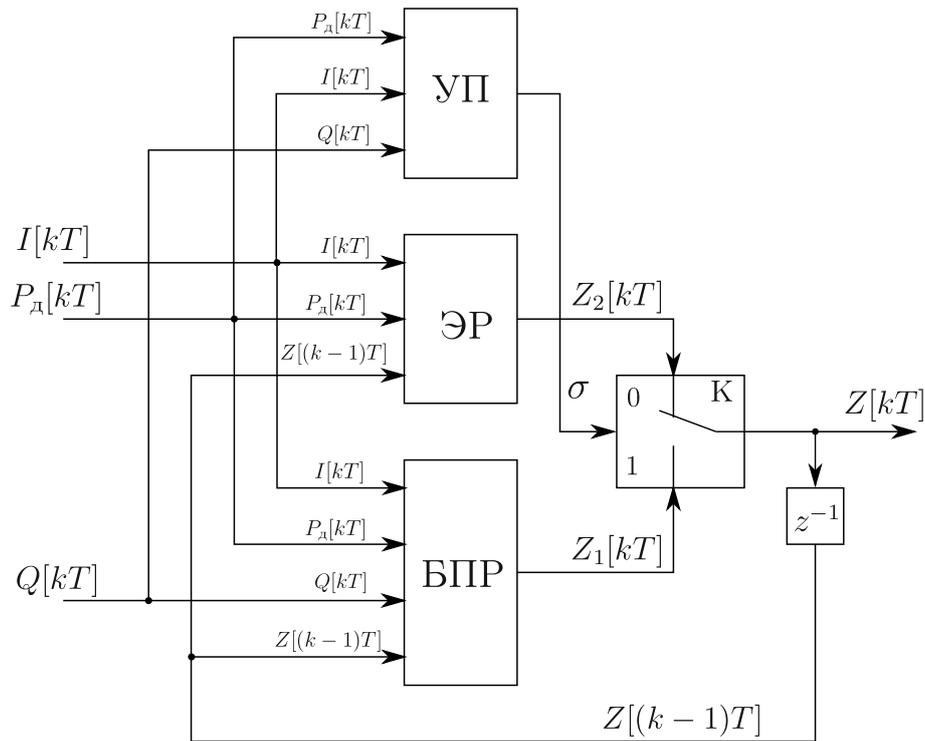


Рис. 7. Функциональная схема блока поисковой автоматической оптимизации

С учетом ограничений на минимальное  $Z_{min}$  и максимальное  $Z_{max}$  значение задания (в единицах управляемого параметра, например напряжения дуги), на рисунке 8 представлена функциональная схема работы блока БПР на каждой итерации работы системы управления.

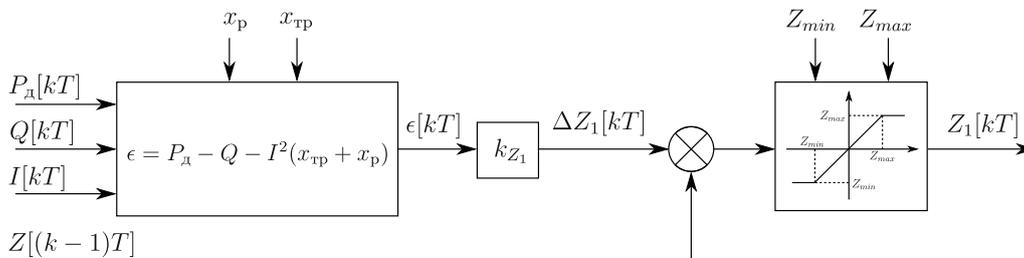


Рис. 8. Функциональная схема блока БПР

Однако, индуктивные сопротивления  $x_{тp}$  и  $x_p$  могут изменяться в процессе плавки, например, в связи с изменением гармонического состава токов в фазах печи. Поэтому данный алгоритм не может обеспечить точное определение экстремума, когда имеет место нестационарность характеристик объекта. Для коррекции неточности определения экстремума модулем БПР, используется модуль экстремального регулирования (ЭР), в котором реализуется полностью поисковый режим работы, точность работы которого не зависит от точности определения параметров объекта.

Электродуговой процесс, можно считать случайным (стохастическим) про-

цессом, так как в системе присутствуют случайные возмущения, в виде флуктуаций длины дуги. При наличии высокочастотных флуктуаций тока, а также практически отсутствием запаздывания между изменениями тока и мощности дуги отсутствует необходимость введения принудительного возмущения (в отличие от традиционных систем с принудительной модуляцией), что позволит повысить качество поискового процесса, то есть позволит избежать принудительного колебательного режима работы и уменьшить амплитуду входного и выходного параметров. С помощью физического моделирования были получены значения оценок коэффициентов корреляции  $r$  между случайными значениями мощности дуги  $P_d$  и тока дуги  $I$ , за период времени длиной  $\Delta\tau=1$  с, в различных режимах работы печи, то есть при различных рабочих токах (средних значениях, рассчитанных за тот же промежуток времени  $\Delta\tau$ ). График зависимости оценки коэффициента корреляции  $r$  от рабочего тока печи представлен на рисунке 9. Для наглядности на рисунке также представлена статическая характеристика процесса  $P_d(I)$ .

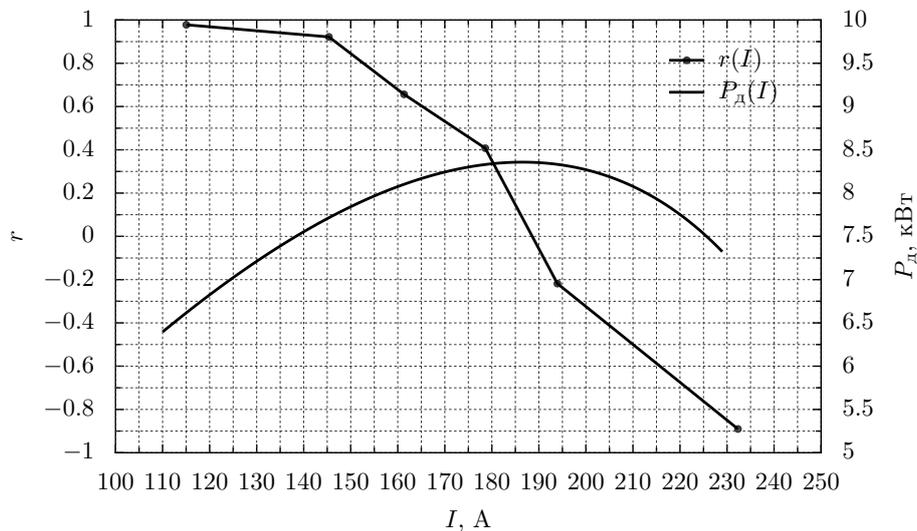


Рис. 9. Зависимость оценки коэффициента корреляции  $r$  между случайными величинами тока и мощности дуги от текущего среднего рабочего тока печи и статическая характеристика процесса  $P_d(I)$

Из графика следует, что между значениями случайных функций тока и мощности дуги в каждый момент времени существует возрастающая зависимость при работе на восходящей ветви статической характеристики и убывающая зависимость при работе на нисходящей ветви статической характеристики.

Алгоритм функционирования блока ЭР представлен на рисунке 10 в виде функциональной схемы.

На схеме 10  $n$  — количество точек, используемых для расчета статистических оценок.  $i$ -ые элементы векторов  $\mathbf{c}$  и  $\mathbf{p}$  хранят  $i$ -ые значения тока дуги и

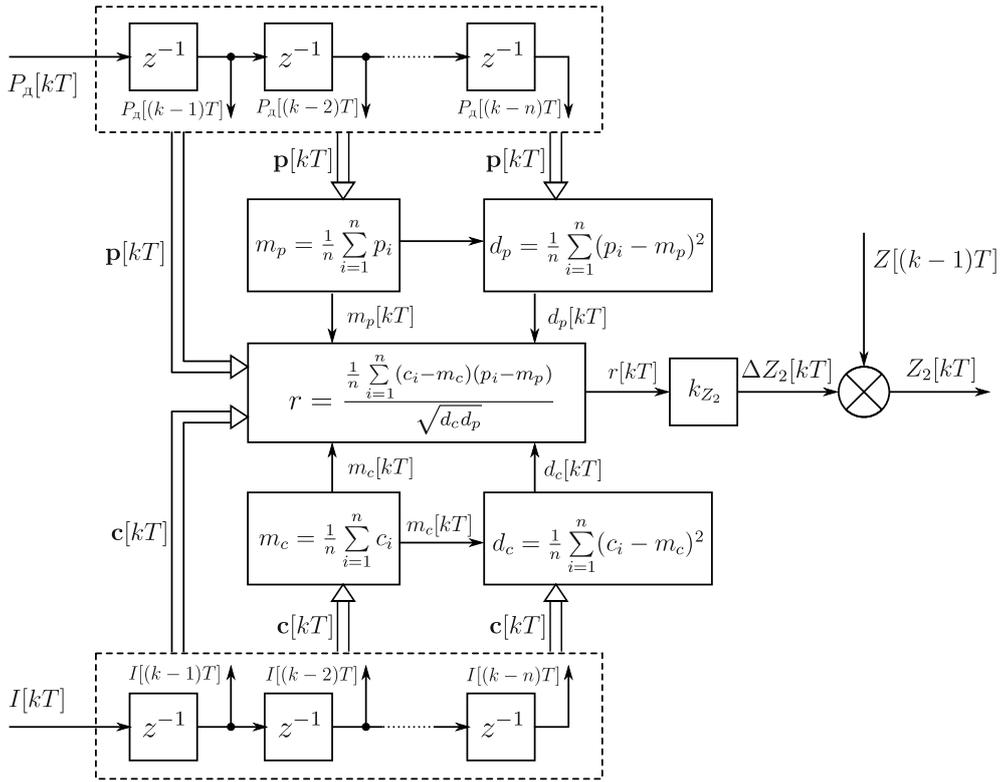


Рис. 10. Функциональная схема блока ЭР

мощности дуг соответственно за рассматриваемый промежуток времени  $\Delta\tau$ , где  $i = 1, 2, \dots, n$ .  $m_c$  и  $m_p$  — средние значения соответственно тока дуги и мощности дуг за рассматриваемый промежуток времени  $\Delta\tau$ .  $d_c$  и  $d_p$  — оценки дисперсий тока дуги и мощности дуг за рассматриваемый промежуток времени  $\Delta\tau$ .  $r$  — оценка коэффициента взаимной корреляции между током дуги и мощностью дуг.

С помощью блоков единичных задержек, на каждой итерации работы контроллера происходит запоминание  $n$  предыдущих значений тока  $I$  и мощности дуги  $P_d$ , при накоплении  $n$  точек (за время  $\Delta\tau = nT$ , где  $T$  — период цикла опроса датчиков) производится вычисление текущей коррекции величины уставки  $\Delta Z_2[kT]$  и, с учетом значения уставки на предыдущем цикле  $Z[(k-1)T]$ , формируется уставка  $Z_2[kT]$  на текущий цикл работы.

УП обеспечивает переключение между двумя регуляторами подсистемы поискового автоматического управления. Основная задача, выполняемая этим блоком — определять границы функционирования каждого модуля. В случае большого отклонения от экстремума действует блок БПР с допустимой неточностью определения экстремума, далее в работу включается корректирующий блок ЭР.

УП функционирует в соответствии с выражениями (2):

$$\begin{aligned} \epsilon(t) &= P_d(t) - Q'(t) - I(t)^2(x_{\text{тр}} + x_p); \\ \sigma &= \begin{cases} 1 & , \text{ если } |\epsilon| > H_1 \\ 0 & , \text{ если } |\epsilon| < H_2 \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

где  $H_1$  — граница функционирования системы ЭР, выход за которую переводит ключ в состояние «1», включая тем самым в работу блок БПР,  $H_2$  — зона, при попадании в которую ключ переводится в положение «0», происходит отключение блока БПР и включение в работу блока ЭР.

Целесообразно принять  $H_1 > H_2$ , тогда при первоначальном включении системы при работе модуля БПР будет обеспечено ближайшее к оптимуму положение объекта, что может увеличить скорость поиска экстремума оптимизируемого параметра.

**В четвертой главе** приводится описание созданной опытной физической модели процесса электродуговой плавки, используемой при проведении испытаний предлагаемой системы автоматического управления электрическим режимом электродуговой печи.

В главе представлены также результаты программного моделирования функционирования предлагаемой системы автоматического управления и ее практической реализации виде управляющего программного комплекса. Численное программное моделирование работы предлагаемой системы производилось для 21 ступени напряжения трансформатора и 4 ступени реактора. На рисунке 11 изображен процесс работы предлагаемой системы оптимизации во времени.

На рисунке 11 представлены графики изменения текущих значений мощности дуг  $P_d(t)$ , среднего тока  $I(t)$  по фазам, средних импедансов фаз  $z_{2\phi}(t)$ , изменение задания  $Z(t)$  стабилизирующему контуру, а также значение коэффициента корреляции  $r(t)$  между током и мощностью. Стабилизирующий контур работает по импедансу, поэтому задание выражается в единицах импеданса. На графиках также отмечено оптимальное значения мощности дуг  $P_{dmax}$  для данного сочетания ступени реактора и ступени напряжения трансформатора. Весь процесс поиска разделен на три временных интервала: 1 — оптимальное управление не производится, 2 — работа блока БПР, 3 — работа блока ЭР.

Численное моделирование и сравнение режимов энергопотребления печи ДСП-180 показало, что предлагаемая система осуществляет устойчивый поисковый режим работы и обеспечивает более точное определение и поддержание максимального значения мощности дуг (суммарная мощность дуг на 3,7% выше), чем используемая в настоящее время стабилизирующая система управления электрическим режимом ДСП ArCOS NT.

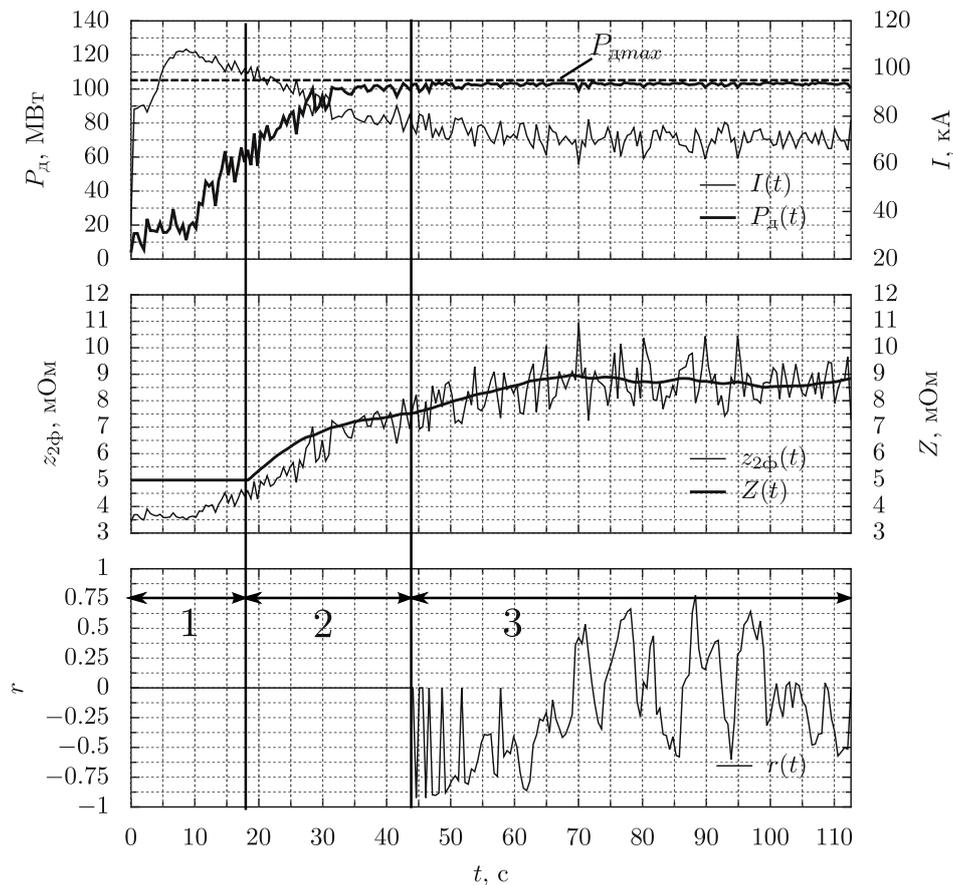


Рис. 11. Численное моделирование процесса работы системы автоматического управления электрическим режимом электродуговой печи (процесс поиска во времени)

Результаты физического моделирования поискового режима работы системы управления энергетическим режимом лабораторной электродуговой печи представлены на рисунке 12.

Для оценки эффективности поискового режима работы системы, было проведено ее сравнение с системой экстремального регулирования, использующей шаговый принцип поиска, работающей в тех же условиях. Потери на поиск при работе предлагаемой системы составляют 2,7% от максимального значения, что на 30% меньше, чем у шаговой системы экстремального регулирования.

На рисунке 13 представлено изображение процесса работы печи в фазовых координатах (« $I-P_d$ ») в поисковом режиме работы системы управления.

От начала плавления (от режима короткого замыкания, когда загорается дуга) и до окончания процесса (когда происходит гашение дуг) происходит постоянный поиск экстремума статической характеристики в условиях ее дрейфа. На рисунке видно, что система обеспечивает определение и поддержание такого режима энергопотребления, в котором в дуге выделяется максимальная мощность.

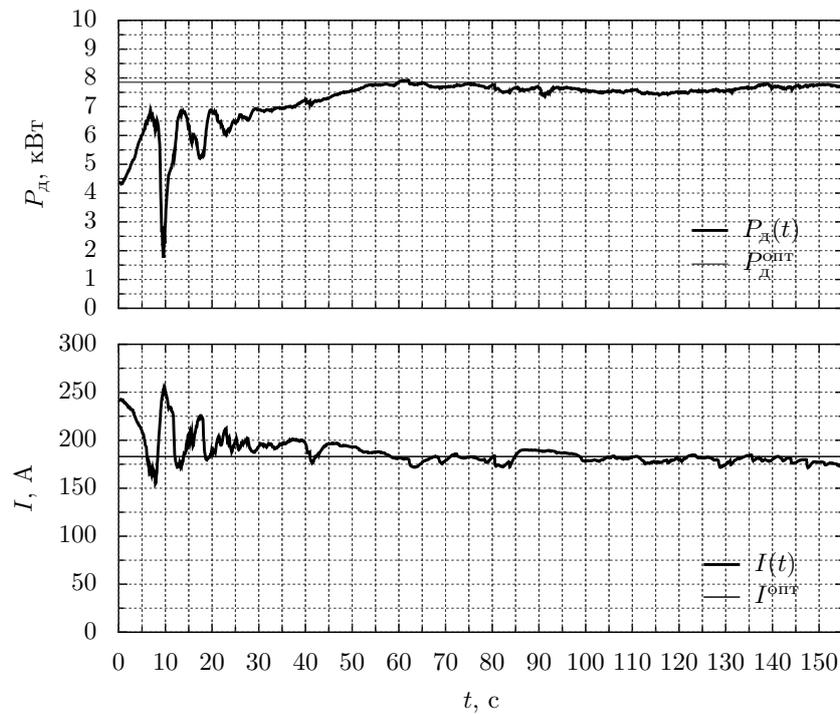


Рис. 12. Процесс работы системы автоматического поискового управления электрическим режимом лабораторной электродуговой печи

Для оценки эффективности работы предлагаемой системы автоматического управления энергетическим режимом ДСП были проведены лабораторные испытания, в которых оценивались такие показатели плавки как время расплавления  $t_p$ , количество затраченной электроэнергии на расплавление  $w_p$ , средняя мощность дуги за плавку  $P_{дср}$ , средний ток за плавку  $I_{ср}$ . Система работала в двух режимах: в первом случае имитировался стабилизирующий режим работы традиционных систем автоматического управления электрическим режимом ДСП, во втором — система работала в поисковом режиме, определяя экстремум текущей зависимости мощности дуги от тока.

В результате применения поискового режима работы, обеспечивающего определение максимального значения мощности дуги, в процессе лабораторных испытаний количество энергии, требуемое для расплавления чугуна массой  $m_{ш}=0,4$  кг уменьшилось на 10,5% по сравнению с плавкой в стабилизирующем режиме. Также на 10,7% сократилось время плавки. Средняя мощность дуги за плавку увеличилась на 4%.

В результате испытаний разработанной системы автоматического управления энергетическим режимом электродуговой печи переменного тока в промышленных условиях электросталеплавильного цеха ОАО «Златоустовский металлургический завод» были получены оценки сокращения времени плавки на 10% и сокращения расхода электроэнергии на 7,5% в сутки.

**В Заключение** отмечено, что цель работы, заявленная, как научное

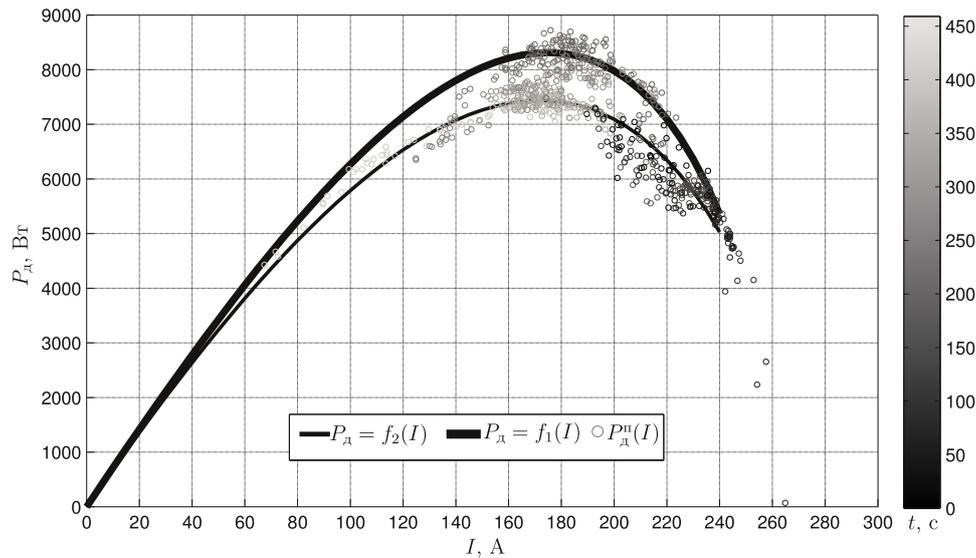


Рис. 13. Процесс плавки в поисковом режиме:  $P_d = f_1(I)$  — статическая характеристика в начале плавки,  $P_d = f_2(I)$  — статическая характеристика в конце плавки,  $P_d^n(I)$  — процесс плавки

обоснование использования эффективного поискового метода экстремального 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. Основные выводы:

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 системы экстремального регулирования для поиска 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.
6. В результате лабораторного моделирования показано, что предлагаемая система обладает более высокими показателями качества поиска, чем шаговая система экстремального регулирования, функционирующая в тех же условиях. Потери на поиск у предлагаемой системы на 30% меньше, чем у шаговой системы, потери на «рысканье» на 53% меньше чем у шаговой системы экстремального регулирования.
7. В результате лабораторного исследования процессов расплавления с использованием поискового режима работы достигнуто сокращение времени плавки и количества затраченной электроэнергии на 10% по сравнению с ведением плавки в стабилизирующем режиме работы системы управления.
8. В результате испытаний разработанной системы автоматического управления энергетическим режимом электродуговой печи переменного тока в промышленных условиях электросталеплавильного цеха ОАО «Златоустовский металлургический завод» были получены оценки сокращения времени плавки на 10% и сокращения расхода электроэнергии на 7,5% в сутки.

## Список публикаций

1. *Усачев, М. В.* Оптимизация энергетического режима работы электродуговой печи / Е. Н. Ишметьев, С. М. Андреев, Б. Н. Парсункин, З. Г. Салихов, М. В. Усачев, М. Ю. Рябчиков // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. — 2007. — 5. С. 23–27.
2. *Усачев, М. В.* 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.
3. *Усачев, М. В.* 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.
4. *Усачев, М. В.* Рациональный электрический режим выплавки стали в дуговых печах / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, У. Б. Ахметов, М. В. Усачев // Электротехнические комплексы и системы: Межвузовский сб. науч. тр. Вып. 11. — Магнитогорск: МГТУ. — 2005. — С. 117–123.
5. *Усачев, М. В.* Помехозащищенный алгоритм динамической оптимизации управления электрическим режимом при выплавке стали в мощных дуговых печах / Парсункин Б. Н., Андреев С. М., Усачев М. В., Ахметов У. Б. // Сборник трудов всероссийской научно-технической конференции Создание и внедрение корпоративных информационных систем на промышленных предприятиях Российской Федерации. Выпуск 1. — Магнитогорск — 2005. — С. 126–131.
6. *Усачев, М. В.* 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.
7. *Усачев, М. В.* Программное обеспечение системы оптимизации управления энергетическим режимом электродуговых установок / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, М. В. Усачев, А. К. Наливкин // Материалы 65-й научно-технической конференции — Магнитогорск: МГТУ. — 2007. — С. 63–66.

8. *Усачев, М. В.* Оптимизация управления энергетическим режимом доводки стали в агрегате печь-ковш с целью минимизации себестоимости процесса / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, С. В. Булычева, М. В. Усачев, Е. С. Михальченко. // Приложение математики в экономических исследованиях: Сб. науч. тр. Вып. 1. — Магнитогорск: МГТУ. — 2007. С. 3–12.
9. *Усачев, М. В.* Динамическая оптимизация электрического режима электродуговых печей и реализация экспериментальной установки для ее моделирования / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, Е. Н. Ишметьев, М. В. Усачев, А. К. Наливкин // Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сб. науч. тр. Вып. 14. — Магнитогорск: МГТУ. — 2007. С. 210–215.
10. *Усачев, М. В.* Система автоматической оптимизации управления энергетическим режимом при доводке стали в агрегате печь-ковш / Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, Е. Н. Ишметьев, М. В. Усачев, А. К. Наливкин, Е. В. Шаваев // Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сб. науч. тр. Вып. 14. — Магнитогорск: МГТУ. — 2007. С. 220–228.
11. *Усачев, М. В.* Оптимизация управления энергетическим режимом сверхмощных ДСП / З. Г. Салихов, Е. Н. Ишметьев, М. В. Усачев, Б. Н. Парсункин, С. М. Андреев, А. К. Наливкин // Печные агрегаты и энерго-сберегающие технологии в металлургии и машиностроении: материалы IV международной научно-практической конференции. — Москва: ГТУ «МИСиС». — 2008. — С. 309–316.