

## Адаптивная система управления приводом перемещения электродов дуговой сталеплавильной печи

*Целью работы является повышение эффективности работы дуговых сталеплавильных печей (ДСП) путем разработки способа адаптации регуляторов перемещения электродов к внешним возмущениям. В результате моделирования разработанной системы управления ДСП дисперсии длин дуг сократились на 93-98 %, что позволило снизить продолжительность расплавления на 3,2 % и уменьшить потребление технологической энергии на 5,3 %. Данный способ управления может быть реализован на базе действующих микропроцессорных систем управления ДСП без дополнительных капитальных затрат. Ил. 5. Библиогр.: 6 назв.*

**Ключевые слова:** регулятор перемещения электрода, адаптивность, система управления

*The purpose of work is to increase the efficiency of electric arc furnace (EAF) by developing a way to adapt controls movement of the electrodes to external disturbances. As a result of modeling the system of the chipboard control dispersion of arc lengths decreased by 93-98%, thus reducing the duration of the melt by 3.2% and reduce the energy consumption of technology by 5.3%. This method may be implemented on the basis of the existing particleboard microprocessor control systems without additional capital expenditures.*

**Keywords:** electrode movement regulator, adaptability, management system

### Постановка задачи

Период плавления шихты является наиболее энергозатратным. Увеличение рабочих токов дуговых сталеплавильных печей переменного тока обусловило резкое усиление электродинамических усилий между проводниками вторичного токопровода. Проводники жестко связаны с электрододержателями, что заметно влияет на работу ДСП в целом. На этапе плавления шихты и в период расплавления колодцев становятся значимыми колебания механической системы под действием электродинамических сил и электрического режима в связи с изменением длины дуги, в частности, колебания гибких кабелей [1]. Экспериментально установлено, что при эксплуатационных коротких замыканиях (при падениях кусков шихты и т.п.) возникают электродинамические усилия между гибкими кабелями трёх фаз. После исчезновения эксплуатационных коротких замыканий гибкие кабели колеблются с частотами свободных затухающих колебаний [2]. При этом изменяются расстояния между фазами, что приводит к соответствующему изменению взаимных индуктивностей фаз. Поэтому в токах фаз возникают соответствующие модулированные затухающие колебания, которые нарушают нормальную работу регуляторов перемещения электродов дуговой сталеплавильной печи. Таким образом, электроды также начинают совершать продольные колебания [3]. Такие колебательные процессы в ДСП могут привести к вхождению системы в резонанс и возникновению незатухающих колебаний. Такие аварийные режимы могут длиться десятки минут, поскольку за одну плавку может происходить до 200 коротких замыканий. Электромеханические колебания гибких кабелей, а следовательно, и продольные колебания графитированных электродов, которые создаются за счёт обратных связей по току и напряжению регуляторов переме-

щения электродов, вызывают снижение усталостной прочности элементов системы, а также могут привести к недоиспользованию мощности печного трансформатора, отрицательному влиянию на питающую сеть, поломки электродов, преждевременному износу элементов конструкции, излишнему энергопотреблению, ухудшению стабильности горения электрических дуг.

Возникла необходимость углубленного исследования этого явления. Как уже было установлено, первопричиной возникновения колебаний в системе ДСП являются электродинамические усилия, вызванные эксплуатационными короткими замыканиями в фазах, которые исключить невозможно, их минимизация за счёт включения в цепь токопроводов реакторов снижает полезную мощность печи.

Установка распорок, клиц и плотных стяжек, фиксирующих гибкие кабели с целью механического предотвращения их колебаний, также не даст положительных результатов, поскольку при фиксации гибких токопроводов электродинамика возрастает и происходит стирание и повреждение самих гибких проводов вследствие тесного механического контакта с клицами. Поэтому основное внимание следует уделить тому, чтобы затухающие колебания не перешли в самовозбуждающиеся, а процесс затухания проходил интенсивнее.

Ряд исследователей предлагали использовать различные демпферы и устройства, поглощающие колебательную энергию системы [4]. Однако на промышленных ДСП эти устройства не были применены из-за малой эффективности. Стремление снизить опасные колебания путём увеличений жёсткости конструкций электрододержателей приводило на отечественных печах к увеличению материалоёмкости подвижных частей механических систем, но мало влияло на ин-

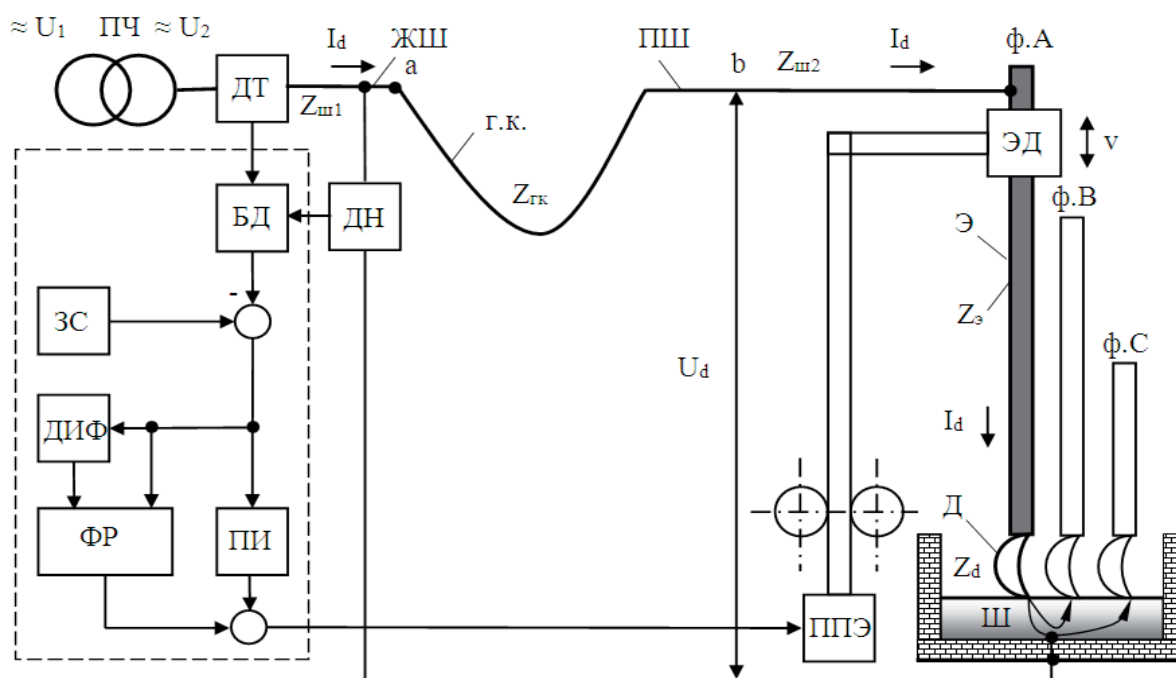


Рис. 1. Структурная схема адаптивной системы управления приводом перемещения электродов ДСП с импедансным регулятором для одной фазы: ПЧ – печной трансформатор; ЖШ – жесткая шина; г.к. – гибкий кабель; ПШ – подвижная шина; ЭД – электро-додержатель; Э – электрод; Д – дуга; Ш – шихта; БД – блок деления; ДТ – датчик тока дуги; ДН – датчик напряжения фазы; ПИ – ПИ-регулятор; ЗС – задатчик сопротивления; ППЭ – привод перемещения электродов; ф.А, ф.В, ф.С – фазы А, В, С

тенсивность электромеханических колебаний.

Исследования электродинамических явлений в ДСП проводились рядом авторов [5]. Была установлена физическая природа электродинамических взаимодействий силовых токопроводов ДСП, предложены математические модели, позволяющие раскрыть общие закономерности, отражающие зависимость параметров колебаний электрических режимов от соотношения электрических параметров печи и свойств механической системы ДСП, участвующей в процессе колебаний. Однако используемый в [5] математический аппарат ограничивал возможности моделей, а принятые допущения отдалили их от реального объекта.

В [2] предложена математическая модель электромеханической системы дуговой электропечи, основанная на новом уровне детализации ДСП как физического объекта. Разработаны основные концепции анализа ДСП как электромеханической системы с внутренними взаимосвязями; исследована причина возбуждения и развития колебаний в дуговой установке; исследовано влияние электромеханических колебаний кабельных гирлянд на электрические режимы печи. Однако работа была посвящена техническим требованиям к конструкциям печей, а не разработке или совершенствованию регулятора.

Существующие системы регулирования перемещения электродов ДСП не адаптивны к рассмотренным в предыдущих пунктах возмущениям, поскольку не гасят, а наоборот, усиливают и увеличивают продолжительность действия возмущающих воздействий, снижая, тем самым, производительность печи. Несмотря на то, что дуговые печи исследуются и совершенствуются уже много лет, в ходе литературно-

го обзора и исследования методов решения данной проблемы ранее, было выяснено, что до сих пор не был разработан способ адаптации регуляторов к возмущениям, связанным с колебаниями гибких кабелей ДСП, что говорит о том, что данная работа является актуальной.

#### Цели и задачи исследования

Таким образом, очевидна необходимость разработки адаптивной системы управления приводом перемещения электродов с целью повышения эффективности работы печи, то есть снижения энергопотребления за счет сокращения продолжительности расплавления металла, повышения стабильности плавки и надежности работы печи. Для осуществления поставленной цели была сформулирована задача: изменить структуру действующего регулятора перемещения электродов так, чтобы он приобрёл новое свойство – защиту электродов от продольных колебаний при действии электродинамических усилий между гибкими кабелями трёх фаз, но не изменил своего основного назначения – регулирования положения электродов в нормальных режимах в соответствии с заданием.

Проведенные в работах [1-3] исследования позволили раскрыть взаимосвязи в электромеханической системе между колебаниями гибких кабелей и изменением электрических параметров короткой сети и разработать средство адаптации регуляторов перемещения электродов к внешним электродинамическим возмущениям.

В качестве метода оптимизации электромеханической системы ДСП используется принцип минимизации дисперсии длин дуг с целью их стабилизации. Дисперсия длин дуг определяется по формуле

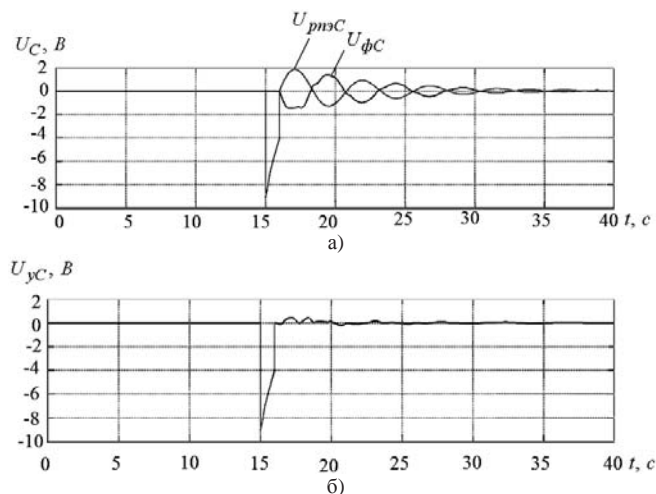


Рис. 2. Графики компенсации возмущений в фазе С при к. з. в фазе С ДСП-50: а) графики сигналов с выходов регуляторов перемещения электродов  $U_{рпзс}$ , с выходов фаззи-регуляторов  $U_{фс}$ ; б) графики сигналов управления в адаптивной системе  $U_{yc}$

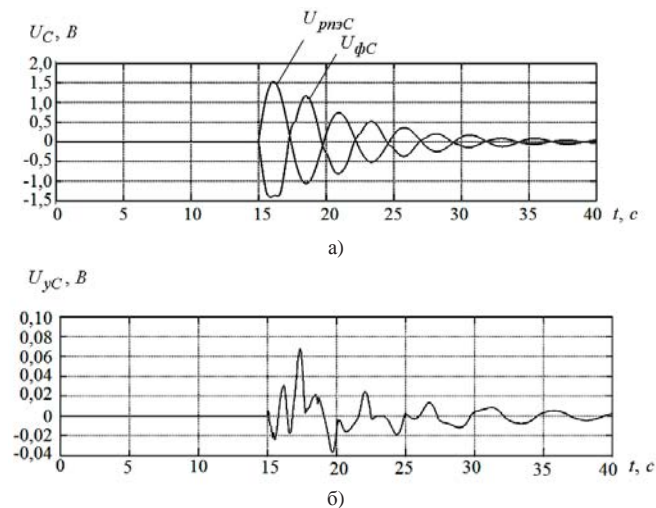


Рис. 3. Графики компенсации возмущений в фазе С при имитации колебания гибкого кабеля в фазе С ДСП-50: а) графики сигналов с выходов регуляторов перемещения электродов  $U_{рпзс}$ , с выходов фаззи-регуляторов  $U_{фс}$ ; б) графики сигналов управления в адаптивной системе  $U_{yc}$

$$\sigma_{\ell}^2 = m \left[ (\ell_{\partial} - m_{\ell})^2 \right], \quad (1)$$

где  $\ell_{\partial}$  – текущее расчетное значение длины дуги;  $m_{\ell}$  и  $\sigma_{\ell}^2$  – математическое ожидание и дисперсия длины дуги;  $\sigma_{\ell}$  – среднеквадратическое отклонение длины дуги.

Для разработки адаптивной системы управления приводом перемещения электродов был сформирован функционал, который учитывает изменения основного контролируемого параметра – дисперсии длин дуг, определяемых по формуле (1)

$$I = \int_0^T \sigma_{\ell}^2 dt \rightarrow \min. \quad (2)$$

Возмущения приводят к модуляции электрических параметров короткой сети, которые обрабатываются регуляторами перемещения электродов. Сигналы с выходов регуляторов отклоняются и передаются на привод перемещения электродов, поэтому длины дуг начинают изменяться с той же частотой, поскольку изменения длин дуг происходят при преобра-

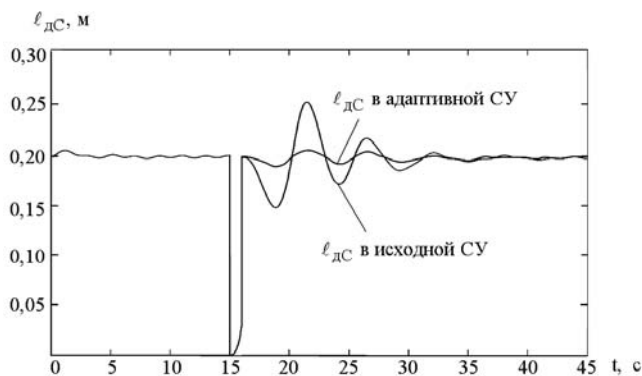


Рис. 4. Графики изменения длин дуг фазы С при коротком замыкании в фазе С в исходной и адаптивной системах управления

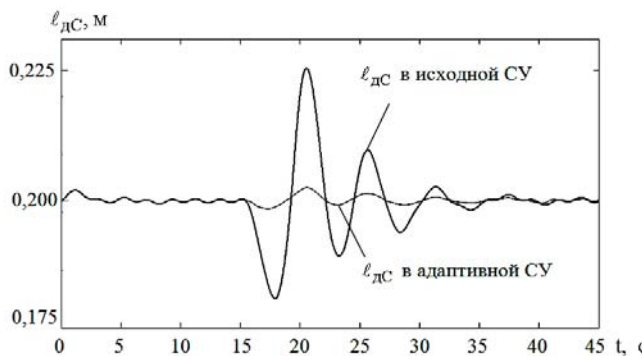


Рис. 5. Графики изменения длин дуг фазы С при имитации возмущения в фазе С в исходной и адаптивной системах управления

зовании сигналов управления с выходов регуляторов и сигналов рассогласования. Таким образом, оптимизация функционала по минимизации дисперсии длин дуг сводится к минимизации дисперсии сигнала рассогласования с выхода блока деления напряжения фазы на ток дуги (для импедансных регуляторов перемещения электродов).

Для исключения последствий исследуемых возмущающих воздействий предлагается использовать метод, основанный на применении нечеткого управления – использовании фаззи-контроллеров для каждой фазы с параллельной коррекцией управляющего сигнала [6].

В соответствии с разработанным функционалом (2) разработан способ управления приводом перемещения электродов ДСП (рис. 1) [6].

Способ реализуется следующим образом [6]. На рис. 1 показана силовая цепь фазы ф.А. Под действием вторичного напряжения  $U_2$  трансформатора ПЧ по жесткой шине ЖШ, гибкому кабелю г. к., подвижной шине ПШ, электрододержателю ЭД, электроду Э, дуге Д, шихте Ш к дугам электродов фаз ф.В и ф.С течет ток  $I_d$  дуги фазы ф.А. На первый вход блока БД определения полного сопротивления дуги поступает сигнал от цифрового датчика ДТ тока дуги, на второй вход блока БД поступает сигнал от цифрового датчика ДН напряжения дуги. В блоке БД выполняется операция определения полного сопротивления дуги. На суммирующем входе ПИ-регулятора сопротивление дуги, определенное в блоке БД, сравнивается с заданным по технологии задатчиком сопротивления



$Z_{d\text{зад}}$ . Сигнал рассогласования  $\pm\Delta Z_d$  ( $\pm\Delta Z_d = Z_d - Z_{d\text{зад}}$ ), пропорциональный длине дуги, воздействует на привод перемещения ППЭ так, чтобы электрод Э перемещался вертикально вверх или вниз. При  $Z_d > Z_{d\text{зад}}$  привод ППЭ перемещает электрод вниз, а при  $Z_d < Z_{d\text{зад}}$  – вверх. При выполнении условия  $\Delta Z_d = 0$ , что соответствует оптимальному горению дуги, перемещения электродов нет.

Параллельно ПИ-регулятору полного сопротивления дуги подключен фаззи-регулятор ФР, на вход которого подаются сигнал рассогласования  $\pm\Delta Z_d$  и через дифференциатор ДИФ производная этого сигнала. В итоге после суммирования сигналов с выхода имеющегося в системе ПИ-регулятора и фаззи-регулятора ФР возмущения в сигнале управления компенсируются и на привод перемещения электродов ошибка не подается, что приводит к стабилизации длин электрических дуг.

С помощью разработанной в [1, 3] модели в программной среде MatLab Simulink была произведена настройка фаззи-контроллера. Результаты моделирования разработанной адаптивной системы управления приводом перемещения электродов приведены на рис. 2-5.

Как видно на рис. 2-5, фаззи-регуляторы практически полностью устраняют последствия возмущающих воздействий как при имитации короткого замыкания в фазе, так и при имитации внешнего возмущения, и они больше не оказывают влияние на выходную контролируемую величину – длину дуги.

Таким образом, во время действия возмущающих воздействий при коротком замыкании дисперсия длин дуг уменьшилась на 93,6-95,7 %. А при имитации колебания гибкого кабеля – на 97-97,9 %.

Это способствует повышению эффективности работы печи, а именно более устойчивому стабильному горению дуги, что сокращает продолжительность расплавления металла на 3,2 %, снижает потребление технологической энергии на 5,3 %. Экономическая эффективность от реализации внедрения данной методики с реальной загрузкой оборудования составляет порядка 1,6 млн. грн.

### Выводы

Разработана методика оптимизации системы управления приводом перемещения электродов дуговой сталеплавильной печи по принципу минимизации дисперсий длин электрических дуг с целью их стабилизации.

Разработана адаптивная система управления приводом перемещения электродов дуговой сталеплавильной печи переменного тока, отличающаяся параллельной фаззи-коррекцией сигналов управления

приводом перемещения электродов дуговой сталеплавильной печи, позволяющая адаптировать регуляторы перемещения электродов ДСП к внешним электродинамическим возмущениям, снизить дисперсии длин дуг на 93-98 % при имитации внешних возмущений.

В результате реализации разработанного способа адаптации регуляторов перемещения электродов ДСП к внешним электродинамическим возмущениям обеспечивается повышение эффективности работы печи, а именно, более устойчивому стабильному горению дуги, что сокращает продолжительность расплавления металла на 3,2 %, снижает потребление технологической энергии на 5,3 %. Экономическая эффективность от реализации внедрения данной методики с реальной загрузкой оборудования составляет порядка 1,6 млн. грн.

### Библиографический список

1. Оценка электромеханических возмущений в силовых цепях дуговой сталеплавильной печи ДСП-12 при эксплуатационных коротких замыканиях / А.И. Панкратов, А.В. Афанасьева // Вестник Кременчугского ННТУ. Вып. 3, ч. 1. - Кременчуг, 2009. – С. 231-234.
2. Тесля Н.Б. Исследование электромеханических характеристик гибких токопроводов дуговых сталеплавильных печей и разработка технических требований к их конструкциям: Дис. ... канд. техн. наук: 05.09.10 / Новосибирский гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 1998. – 198 с.
3. Проблема вариации реактанса в силовых цепях дуговых сталеплавильных печей / А.И. Панкратов, А.В. Афанасьева // Международный научный журнал Acta Universitatis Pontica Euxinus. Специальный выпуск. Варна, Болгария, 2010. – Том I (Ч. 1). – С. 397-399.
4. Устройства и способы демпфирования электродинамических колебаний электродов СВМ ДСП / Сапко А.И., Коваль Н.В., Салмин В.В., Петров В.И. // Освоение новых высокоомощных электропечей. – М.: Металлургия, 1992. – С. 44-49.
5. K. Timm. Untersushung elektromeshanischer Schwingungen der Elektroden-Tragarm Szsteme von Lichtbogenöfen // VDI-Ber. – 1992. – № 957. – P. 59-76.
6. Позитивне рішення про видачу патенту на корисну модель по заявці № u201207394. Спосіб автоматичного управління приводами переміщення електродів n-фазних дугових сталеплавильних печей / А.І. Панкратов, А.В. Люта; заявник і патентовласник Донбаська держ. машинобуд. академія; заявл. 18.06.12.

Поступила 11.12.2012

