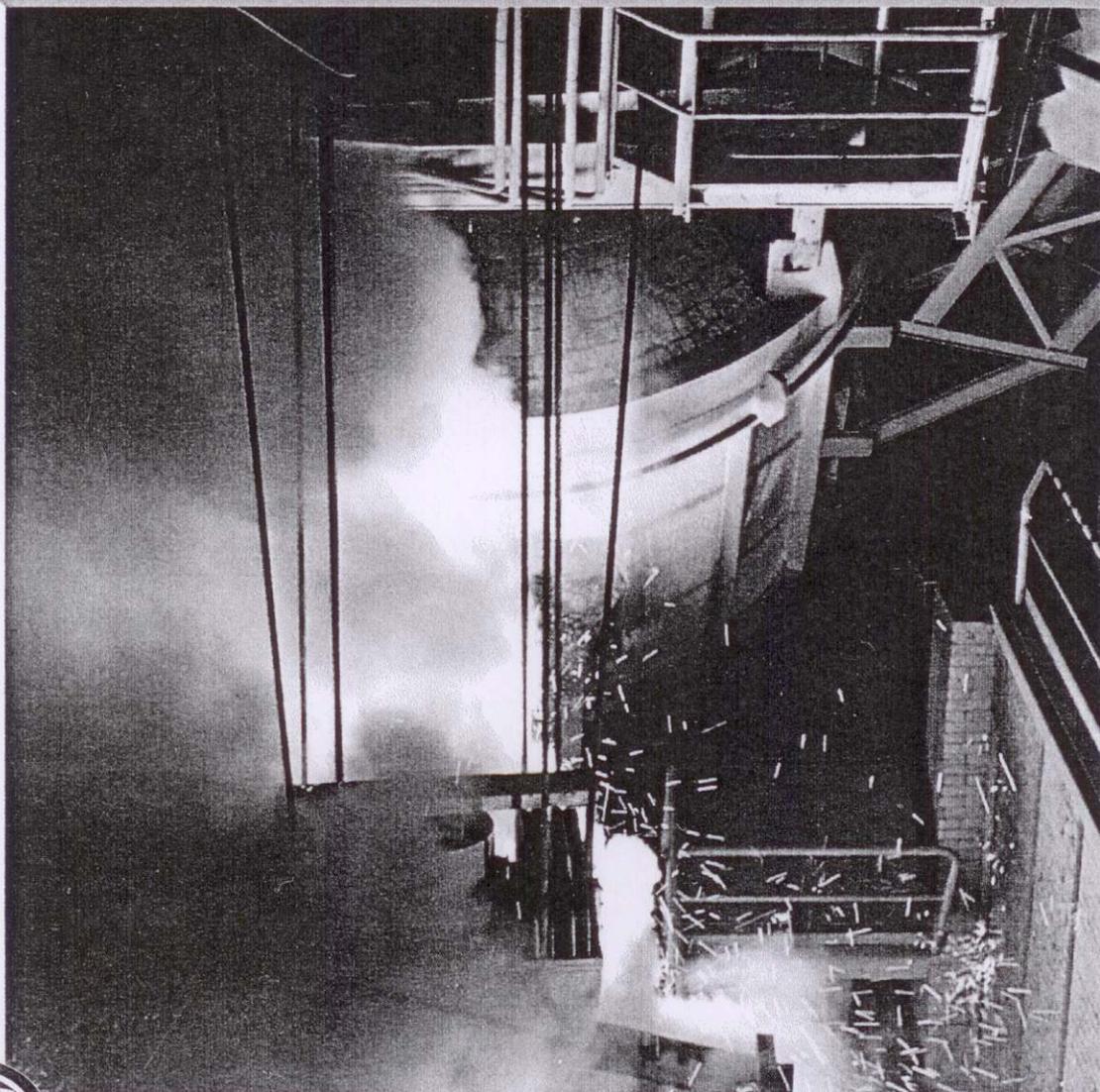


ЭлектроМеталлургия

Ежемесячный
научно-технический,
производственный
и учебно-методический
журнал

11 / 2010



ЭлектроМеталлургия

Ежемесячный научно-технический, производственный и учебно-методический журнал

Издается с мая 1998 г.

11/2010

Рекомендован ВАК для публикации результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора технических наук

Журнал переводит на английский язык и выпускает издательство «Pleiades Publishing Ltd.» в виде приложений к журналу «Russain Metallurgy (Metally)», распространение которого осуществляет издательство «Springer»

Автор (ы) статьи передает (ют) исключительное право издательству ООО «Наука и технологии» на ее публикацию в любой форме в данном журнале и его зарубежных аналогах. Гонорар выплачивается только за русскоязычное издание.

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Белитченко А.К., Воробьев Н.И., Гонтарук Е.И., Дейнеко А.Д., Дуб А.В., Карабасов Ю.С., Карноухов В.Н., Островский Я.И., Павлов В.В., Снитко Ю.П., Тимофеев В.Н., Угаров А.А., Усачев А.Б., Шаманов Г.А., Шахпазов Е.Х., Шевцов А.З.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор журнала д-р техн. наук **Уточкин Ю.И.**

Заместитель главного редактора д-р техн. наук Семин А.Е.

Члены редакционной коллегии

Бигеев В.А., Богданов С.В., Григорович К.В., Григорян В.А., Дуб В.С., Дурынин В.А., Егоров А.В., Жарницкий М.Д., Жучков В.И., Зинуров И.Ю., Ковалевский М.А., Кувалдин А.Б., Кудря А.В., Либерман А.Л., Лопухов Г.А., Макаров А.Н., Некрасов В.М., Парецкий В.М., Роцин В.Е., Смирнов Н.А. (отв. секретарь), Соيفер В.М., Чередниченко В.С., Шевелев Л.Н.

Зарубежные члены редколлегии

Гасик М.И. (Украина), Гелер К. (Германия), Добровски Л. (Чехия), Медовар Л.Б. (Украина), Островский О.И. (Австралия), Пройдак Ю.С. (Украина), Савицки А. (Польша), Смирнов А.Н. (Украина), Фу Дзе (Китай)

При использовании материалов журнала в любой форме ссылка на журнал обязательна.

За достоверность информации и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели.

Адрес редакции:

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон/факс: (499) 269-52-97

E-mail: sokol@nait.ru

http://www.nait.ru

© ООО «Наука и технологии», 2010

СОДЕРЖАНИЕ

Производство черных металлов

Гудим Ю.А., Зинуров И.Ю. Производство стали из твердой металлической шихты. Электрические или топливные плавильные агрегаты? 2

Исаев Г.А., Кудрин В.А., Савченко В.И., Куликов Г.Б. Опыт использования в литейных и сталеплавильных цехах новых композиционных материалов для легирования стали в ДСП 8

Спецэлектротехнологии

Медовар Л.Б., Стовпченко А.П., Саенко В.Я., Нощенко Г.В., Федоровский Б.Б., Петренко В.Л., Ланцман И.А., Журавель В.М. Концепция универсальной печи ЭШП для производства крупных слитков 12

Автоматизация и управление технологическими процессами

Педро А.А., Арлиевский М.П., Куртенков Р.В. Особенности существования электрохимических процессов в ванне рудно-термической печи 19

Рубцов В.П., Елизаров К.А. Совершенствование электрогидравлического регулятора мощности дуговой печи в литейном производстве 25

Фризен В.Э., Сарапулов Ф.Н. Управление электромагнитным перемешиванием путем фокусирования мощности в крупных индукционных тигельных печах 32

Качество металлопродукции

Чуманов И.В., Чуманов В.И., Матвеева М.А. Компьютеризация контроля качества металлопродукции. 36

Информационные материалы

Смирнов Н.А., Семин А.Е., Уточкин Ю.И. Производство ферросплавов в России 40

Рецензии на книги

Гасик М.И. Рецензия на книгу В.С. Чередниченко «Дистилляционные электропечи» 42

Памяти Феликса Иосифовича Шведа 46

Гасик М.И. Степан Иванович Тельный — к 120-летию со дня рождения 47

УДК 621.365.2

Совершенствование электрогидравлического регулятора мощности дуговой печи в литейном производстве

В.П. Рубцов, К.А. Елизаров

НИУ «Московский энергетический институт»

На основании разработанной по экспериментальным данным модели предложена структура адаптивного электрогидравлического регулятора мощности дуговой печи, показана целесообразность ввода в электрогидравлический привод перемещения электродов отрицательной обратной связи по скорости. Проведены модельные исследования работы предложенного регулятора мощности в различных режимах и даны рекомендации по выбору параметров при проектировании регуляторов мощности.

Ключевые слова: дуговая печь, регулятор мощности, система автоматизированного управления, электрогидравлический привод.

В настоящее время в литейном производстве все большее распространение получают дуговые печи, в которых расплавляют и доводят по химическому составу металл. Как известно, дуговые печи по роду используемого тока подразделяются на печи постоянного и переменного тока. В отличие от традиционных печей переменного тока, печи постоянного тока имеют ряд технологических преимуществ, однако требуют более сложной системы электроснабжения и управления [1, 2]. Привод перемещения электродов в печах обоих типов выполняется электромеханическим или гидравлическим. Гидравлический привод перемещения электродов в настоящее время находит все большее применение. Этому способствуют такие его преимущества, как компактность, наименьшее по сравнению с приводами других видов отношение массы к развиваемой мощности, способность длительно развивать

статические усилия, возможность регулирования скорости и защиты от перегрузок ограничением давления, плавность и бесшумность работы. Недостатки гидравлического привода — утечки рабочей жидкости через уплотнения и зазоры (особенно при высоких значениях давления); нагрев рабочей жидкости; необходимость обеспечения в процессе эксплуатации чистоты рабочей жидкости и защиты от проникновения в нее воздуха; пожароопасность (при применении горючей рабочей жидкости). Устраняют или значительно уменьшают влияние этих недостатков рациональным конструированием гидроузлов и гидравлических схем, что подтверждается зарубежными работами [3—5]. Применение гидравлического привода позволяет упростить кинематическую схему механизма перемещения электродов и значительно повысить быстродействие.

Несмотря на широкое использование в настоящее время гидравлических приводов перемещения электродов дуговых печей, разнообразие технологических режимов работы электропечей и применяемого электрооборудования не позволяет сформулировать единые подходы к проектированию систем управления на их основе. Отсутствие такой методики требует проведения длительных и затратных исследований при наладке и настройке систем управления. При синтезе и настройке регулятора мощности электропечей руководствуются, в основном, упрощенным представлением печи как объекта управления, что приводит к большим погрешностям при вы-

боре параметров оборудования и, соответственно, к удорожанию всего комплекса и снижению производительности дуговой печи. Точность и быстроедействие регулятора мощности дуговой печи определяют ее производительность и энергетическую эффективность.

Регуляторы мощности (или, иначе, регуляторы перемещения электродов) дуговой печи имеют относительно простую кинематику, однако отличаются нелинейностями и разноплановым характером связей, затрудняющих определение параметров регуляторов. В настоящее время они выполняются по функциональной схеме (рис. 1), отличающейся от традиционной [6]. Электрогидравлический регулятор перемещения электрода дуговой печи выполняется цифровым и содержит программируемый логический контроллер (ПЛК) 1, анализирующий входные сигналы, получаемые с блока измерения и нормализации 2, который собирает сигналы тока и напряжения с трансформатора тока ТА и трансформатора напряжения ТУ и приводит их к виду, пригодному для ввода в ПЛК. Кроме этого, ПЛК получает из систем более высокого уровня (например, системы управления плавильным участком) технологические параметры (например, химический состав металла после анализа), а так-

же задания и уставки регулятора. На основании полученной информации ПЛК формирует управляющие воздействия на пропорциональный распределитель 3. Современный пропорциональный гидрораспределитель выполняется со встроенной электроникой, позволяющей управлять им с помощью стандартизированных сигналов (например, 4–20 мА или ± 10 В). Пропорциональный гидрораспределитель регулирует расход рабочей жидкости, подготавливаемой насосно-аккумуляторной станцией (НАС), состоящей кроме собственно пропорционального распределителя еще и из бака 13 с установленной на нем аппаратурой фильтрации и охлаждения, насоса 12 с регулируемой подачей и гидроаккумулятора 11, в задачу которого входит сглаживание переходных процессов в гидросистеме. Рабочая жидкость перемещается по трубопроводу 4 с установленными в нем дросселирующими элементами к гидравлическому плунжеру 5.1, который под давлением рабочей жидкости перемещается и приводит в движение механически связанные с ним стойку 5.2 и электрододержатель 6. Между электродом 7 и ванной печи 9 поддерживается электрическая дуга 8. На стойке 5.2 расположен датчик перемещения электрода, отсчитывающий абсолютное значение перемещения электрода. Датчик давления 10, установленный на входе гидравлического плунжера 5, служит для защиты электрода от поломки при упоре в непроводящую шихту.

В отличие от действующих устаревших гидроприводов новые приводы используют более высокие давления в гидросистеме. Так, вместо используемого ранее давления до 6,3 МПа используется давление до 30 МПа. В них применяют вычислительные устройства и усовершенствованные гидрораспределители, а производительность насосных установок часто регулируется. Введенные усовершенствования привода оказывают существенное влияние на характеристики регулятора мощности. Обеспечить желаемые показатели регулирования можно только путем настройки регулятора на основе уточненной модели, учитывающей имеющиеся в приводе нелинейности и запаздывания.

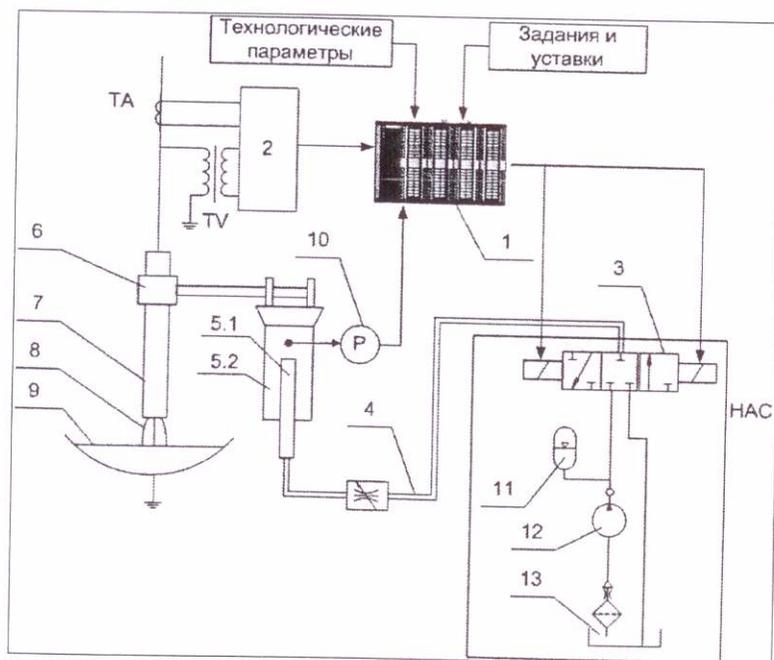


Рис. 1. Функциональная схема электрогидравлического регулятора мощности (обозначения в тексте)

Так как модель гидропривода является существенно нелинейной, а параметры элементов практически не поддаются вычислению, для определения параметров привода и получения уточненной модели использовали экспериментальный метод. Исследования проводились на печах постоянного тока ДПС-12 Саранского литейного завода ООО «ВКМ-Сталь» при участии ООО «НПФ КОМТЕРМ».

На первом этапе исследований динамических характеристик гидравлического оборудования были определены зависимости перемещения электрода от сигнала управления [7]. Выявлено, что общее время запаздывания при отработке задания на подъем электрода в дуговой печи постоянного тока составляет 100 мс при длительности нарастания фронта сигнала управления 1,2 мс. Установлено, что при отработке управляющего сигнала на подъем электрода давление на входе в гидравлический плунжер перемещения электрода запаздывает по отношению к управляющему сигналу в среднем на 20,3 мс и не зависит от величины управляющего сигнала. Это обусловлено замедлением прохождения гидравлической рабочей жидкости от насосно-аккумуляторной станции к исполнительному гидроцилиндру.

На втором этапе исследования динамических характеристик механической части регулятора мощности дуговой печи проводили путем регистрации переходных функций ускорения электрода $\frac{dv}{dt}(t)$ при подаче ступенчатого сигнала задания. С помощью интегрального акселерометра, расположенного непосредственно на электроде холодной печи, фиксировали ускорение электрода. Датчик, состоящий из акселерометра и фильтров низкой частоты, закрепляли на электроде [8]. Полученные значения ускорений, выдаваемые в виде аналогового сигнала напряжения, оцифровывались АЦП и записывались в память ЭВМ специальным программным обеспечением. Такое построение схемы позволило проводить измерение значений ускорений при движении электрода дуговой печи вверх и вниз, обеспечивая при этом ликвидацию собственных шумов акселерометра.

Полученные данные после обработки позволили определить динамические характеристики тракта, включающего в себя гидравлическое

оборудование, подвижную стойку, электрододержатель, электрод. На основе этих характеристик были найдены передаточные функции элементов привода.

Получена передаточная функция электрогидравлической части системы:

$$W(p) = 0,2 + \frac{185,564}{p^2 + 15,698p + 1719,774} \quad (1)$$

На основе передаточной функции (1) с добавлением нелинейностей и запаздываний в гидравлическом канале привода составлена структурная схема гидропривода, приведенная на рис. 2. Эта схема учитывает тракт прохождения электрических сигналов и рабочей жидкости в гидроприводе и определяет связь между сигналом управления в форме напряжения U_y , подаваемого на вход привода, и скоростью перемещения электрода v . Входной сигнал U_y выдается обычно ПЛК в аналоговой форме с некоторым фронтом сигнала (блок 1 на рис. 2) в квантованном виде (квантователь — блок 2). Далее сигнал с запаздыванием (блок 3) передается насосно-аккумуляторной станции (НАС), описываемой как звено с передаточной функцией $W(p)$, согласно уравнению (1) (блок 6), и нелинейным коэффициентом усиления, определенным экспериментально (блоки 4, 5). На выходе давление ограничивается рабочим давлением НАС (блок 7) и с запаздыванием (блок 8) поступает в гидравлический плунжер (геометрические размеры гидравлического плунжера определяются постоянной c_1 в блоке 9), развивающий усилие, определяемое давлением рабочей жидкости на плунжер. Далее усилие передается на подвиж-

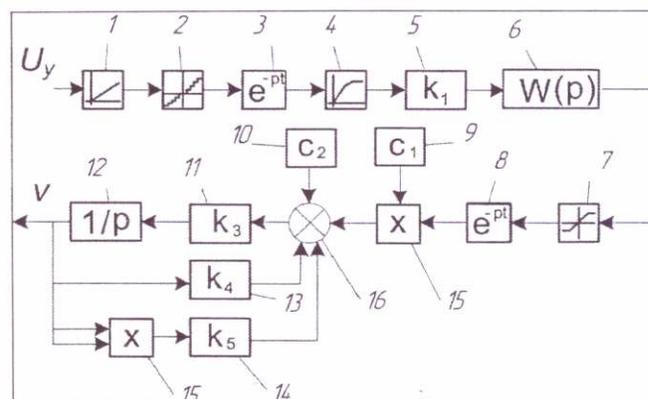


Рис. 2. Структурная схема уточненной модели гидравлического привода (обозначения в тексте)

ную часть, масса которой учитывается коэффициентом c_2 (блок 10). Сигнал, пропорциональный усилию, интегрируется (блок 12) для получения выходного сигнала по скорости v . Обратные связи учитывают вязкое (блок 14) и сухое трение (блок 13) в системе. Блок 15 представляет собой блок умножения, а блок 16 — сумматор.

Привод, используемый в электрогидравлических механизмах перемещения электродов дуговых печей, является разомкнутым по скорости, что обусловлено затруднениями выделения сигнала обратной связи, пропорционального линейной скорости перемещения электрода. Как показали исследования, отсутствие обратной связи по скорости в электрогидравлическом приводе ухудшает его быстродействие и точность регулирования. Для улучшения показателей предложено ввести в структуру привода отрицательную обратную связь по скорости и последовательную коррекцию на основе пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора (ПИД-регулятора). Эти приемы широко используют в электроприводе для улучшения показателей, в частности, для расширения диапазона регулирования, повышения быстродействия и точности, однако недостаточно широко применяют при разработке регуляторов мощности дуговых печей.

Система, замкнутая по скорости, оказалась критична к настройке регулятора. Настройка регулятора для каждого задания скорости позволяет получить близкие к желаемым переходные процессы, однако показатели качества регулирования значительно изменяются при изменении задания.

Дальнейшее исследование замкнутого по скорости электрогидравлического привода перемещения электродов показало, что выявленная при экспериментальных исследованиях привода нелинейность его коэффициента передачи $k_n(v)$ приводит к необходимости изменения параметров регулятора для получения желаемого характера переходных процессов при изменении задания скорости v_3 . Автоматическая подстройка параметров регулятора позволяет получить переходный процесс, близкий к требуемому, при изменении задания скорости в реализуемом диапазоне. Поэтому было предложено использовать адаптивную систему управления приводом.

Для определения зависимостей параметров настройки регулятора, обеспечивающих необходимый характер переходных процессов при изменении задания скорости, рассчитали переходные функции $v(t)$ для различных значений задания скорости v_3 . С использованием полученных зависимостей был разработан электрогидравлический привод перемещения электродов с адаптивным пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором и обратной связью по скорости, структурная схема которого показана на рис. 3. В его основу положена модель гидравлического привода рис. 2 (блок 3 на рис. 3). Введение адаптации позволяет получить переходный процесс, близкий к требуемому, расширить границы работы привода, улучшить его скоростные характеристики, а также обеспечить работу в области малых скоростей.

На основе полученных в ходе исследования динамических характеристик тракта, включающего гидроцилиндр перемещения электрода, подвижную стойку, электрододержатель, электрод, была определена передаточная функция звена, описывающая данный тракт,

$$W(p) = \frac{106,681}{p^2 + 5,274 \cdot p + 1066,806} \quad (2)$$

Установлено, что в пределах реализуемости вид передаточной функции инвариантен относительно скорости перемещения электрода и его можно считать неизменным. В процессе эксперимента была выявлена нелинейная зависимость коэффициента передачи привода от скорости.

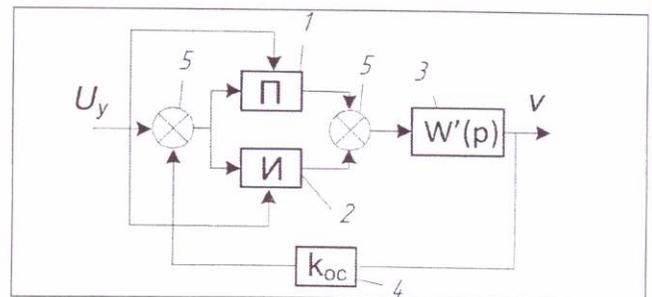


Рис. 3. Структурная схема адаптивного гидравлического привода:

1 — блок пропорциональной составляющей закона регулирования; 2 — блок интегральной составляющей закона регулирования; 3 — модель гидравлического привода; 4 — коэффициент обратной связи; 5 — сумматор

Модели гидравлической и механической частей положены в основу структурной схемы электрогидравлического регулятора мощности, реализация которой в пакете *Matlab Simulink* показана на рис. 4. Она отражает все основные особенности электрогидравлического регулятора мощности с учетом допущений, принятых при разработке моделей составляющих элементов. Обозначения на структурной схеме рис. 4 сохранены в транскрипции пакета прикладных программ *Matlab Simulink*.

Исследование данной системы регулирования мощности дуговой печи проводили в наиболее характерном режиме работы для дуговой печи — режиме отработки зажигания дуги. Этот режим является наиболее важным, так как в начале плавки при частых эксплуатационных коротких замыканиях именно скорость повторного зажигания дуги определяет производительность печи. Целью исследования являлось определение зоны нечувствительности, настройки регулятора и допустимой скорости перемещения электрода, при которой обеспечивается устойчивая работа. При этом при неизменных параметрах модели печи, полученной на основе приведенных экспериментов,

рассчитывали переходные функции тока дуги, напряжения на дуге, перемещения и скорости электрода, изменяли ширину зоны нечувствительности и параметры настройки регулятора. Важным показателем работы регулятора, влияющим на устойчивость зажигания дуги, является максимально допустимая скорость перемещения электрода, которую определяли в процессе исследования. Установлено, что проектная для печей ДПС-12 скорость перемещения электродов 10 м/мин является завышенной и не обеспечивающей устойчивой работы регулятора без возникновения автоколебаний, приводящих к периодическому разрыву дуги.

Обычно в промышленных регуляторах мощности дугowych печей максимальную скорость перемещения электрода ограничивают на уровне 2—4 м/мин [9—10].

Для определения допустимой скорости перемещения электрода в рассматриваемом регуляторе мощности на модели исследовали его работу в режиме зажигания дуги при изменении максимальной скорости перемещения электрода при ширине зоны нечувствительности 10%. Установлено, что система работает устойчиво при ограничении скорости перемещения электрода 1,5—2 м/мин

и использовании пропорционального регулятора с $k_p = 0,3$. Осциллограммы, полученные при таком режиме работы, представлены на рис. 5.

Необходимо отметить, что наблюдаемую в последнее время тенденцию к повышению скорости перемещения электродов нельзя считать определяющей в дугowych печах, работающих в литейном производстве, она может привести к излишним расходам на гидравлическое и электро-механическое оборудование печей. Для регулирования режима горения дуги достаточно сравнительно небольших скоростей перемещения электродов (до 2—3 м/мин), на более высоких скоростях трудно обеспечить необходи-

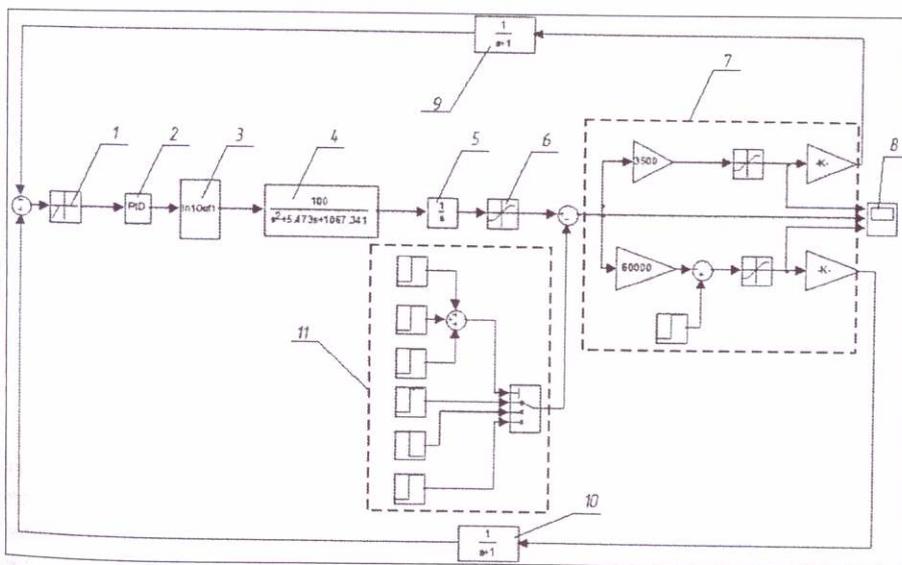


Рис. 4. Схема модели дуговой печи с электрогидравлическим регулятором мощности и механизмом перемещения электродов в пакете *MatLab Simulink*:

1 — зона нечувствительности; 2 — ПИД-регулятор; 3 — модель гидравлического привода; 4 — модель механизма перемещения электрода; 5 — интегрирующее звено; 6 — звено насыщения; 7 — модель дуги; 8 — осциллограф; 9 — фильтр в цепи обратной связи по напряжению; 10 — фильтр в цепи обратной связи по току; 11 — модель возмущающих воздействий

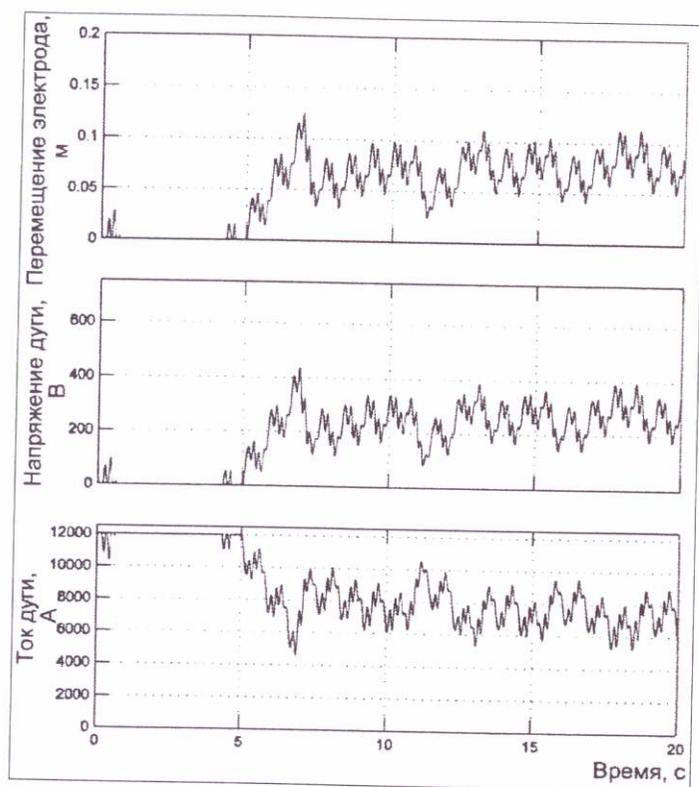


Рис. 5. Осциллограммы перемещения электрода, напряжения и тока дуги

мое качество регулирования. Высокие скорости перемещения электродов печи оправдываются на печах большой емкости (свыше 50 т), на которых скорости более 3 м/мин следует использовать лишь в режиме маршевой скорости для уменьшения технологических простоев, связанных с перемещением электродов (например, при подъеме электродов перед сливом металла или перед отворотом свода при подвалках). В остальных случаях, особенно на печах малой емкости (до 25–30 т), целесообразно проектировать механизмы перемещения электродов на скорости до 3–5 м/мин, что позволит значительно (на 150% и более) сократить капитальные расходы на сооружение печи. В таких печах максимальный ход электрода не превышает 2,5–3 м, и при максимальной скорости электрода 5 м/мин продолжительность поднятия электрода из нижнего положения не превысит 30 с.

Повысить эффективность регуляторов мощности можно, применив гидравлические схемы с байпасом, в которых пропорциональный распределитель выбирают на сравнительно небольшие расходы

рабочей жидкости, обеспечивающие скорости перемещения электрода до 3–5 м/мин, а маршевая скорость достигается подключением нерегулируемого гидрораспределителя, создающего дополнительный расход рабочей жидкости. Такая схема позволяет также экономить на капитальных затратах, так как рост стоимости пропорциональных распределителей с переходом с малых типоразмеров на большие весьма ощутим и составляет до 200%, между тем нерегулируемые распределители заметно дешевле пропорциональных.

Дуговая печь работает по различным режимам, в которых требования к регулятору мощности изменяются. Для лучшего удовлетворения этих требований целесообразно провести анализ влияния параметров регулятора на качество регулирования, одним из наиболее важных параметров является постоянная времени фильтра в каналах измерения тока и напряжения.

Исследования проводили на модели регулятора мощности (рис. 4) путем расчета переходных функций $U_n(t)$, $I_n(t)$ и $I_d(t)$ для режимов зажигания дуги после устранения короткого замыкания при постоянной времени фильтра от 0 до 10 с. С ростом постоянной времени наблюдается снижение амплитуды установившихся колебаний, увеличение запаздывания и величины перерегулирования в канале, зависимость времени регулирования имеет явно выраженный экстремум. Это позволяет сделать вывод о нецелесообразности увеличения постоянной времени фильтра (как отмечают некоторые исследователи) с целью снизить перерегулирование. Исследование показало, что существует близкое к оптимальному значение постоянной времени фильтра $T_{\phi} = 1$ с, при котором время регулирования и величина перерегулирования минимальны.

Работа дуговой печи сопровождается значительными колебаниями напряжения и силы тока, частота которых изменяется в широком диапазоне, охватывающем области средних и низких частот. Наличие фильтров низких частот в канале обратной связи по току и напряжению снижает амплитуду этих колебаний, но не устраняет их. Логично предположить, что при совпадении частоты пульсаций напряжения в канале обратной связи с частотой собственных колебаний систе-

мы могут возникнуть резонансные явления, нарушающие работу регулятора. Для определения возможности их возникновения исследовали работу системы при возмущениях в канале обратной связи по напряжению дуги U_d . Выбор изменения напряжения дуги в качестве возмущающего воздействия обусловлен тем, что колебания напряжения более значительны по сравнению с колебаниями тока, так как колебания тока фильтруются индуктивностью короткой сети печи. Частоту гармонических воздействий изменяли в диапазоне 0,1—5 Гц, амплитуду в диапазоне 0—0,25 от номинального напряжения. Указанные диапазоны изменения параметров гармонических возмущений были приняты на основании проведенных экспериментальных исследований и литературных данных для выявления возможной резонансной области вблизи частоты собственных колебаний системы регулирования, составляющей 1 Гц [5].

Установлено, что система имеет достаточное внутреннее демпфирование, исключающее возникновение резонансных явлений. Устойчивость системы в области резонанса предполагает ее устойчивость во всей области рассматриваемых частот.

Реализация системы, полученной авторами, включая структуры привода и алгоритмы, выполненная на печах постоянного и переменного тока, разработанных и внедренных ООО «НПФ КОМТЕРМ», показала, что предложенные решения обеспечивают нормальное функционирование системы в целом и повышение эффективности ее работы.

Заключение

На основании разработанной уточненной модели электрогидравлического привода предложена структура адаптивного электрогидравлического регулятора мощности, обеспечивающего инвариантность показателей качества переходных процессов при изменении скорости, и показана целесообразность ввода в электрогидравлический привод перемещения электродов отрицательной обратной связи по скорости.

Выявлено существенное влияние на устойчивость работы системы регулирования скорости

перемещения электрода, которая для печей емкостью до 25 т не должна превышать 1,5—2 м/мин.

Установлено оптимальное значение постоянной времени фильтров в канале обратной связи по току и напряжению, составляющее для рассматриваемых печей ~1 с и обеспечивающее минимальное значение амплитуды установившихся колебаний, величины запаздывания и времени регулирования.

Резонансные явления в системе регулирования при изменении круговой частоты в диапазоне 0,1—5 Гц отсутствуют. Система имеет достаточное внутреннее демпфирование, исключающее возникновение резонансных явлений.

Список литературы

1. Филиппов А.К., Крутянский М.М., Фарнасов Г.А. Использование электропечей постоянного тока в металлургии // Сталь. 2002. № 1. С. 33—41.
2. Нехамин С.М., Крутянский М.М., Стомахин А.Я., Тимошенко С.Н., Черняк А.И. Пути улучшения показателей выплавки стали в малотоннажных дуговых печах // Электрометаллургия. 2007. № 7. С. 2—13.
3. Meritt H.E. Hydraulic control systems. New York, London, Sydney: John Wiley & Sons Inc., 1991. 251 p.
4. Treppschuh Arne, Krüger Klaus, Kuehn Robert. A New Closed-Loop Control for DC-EAF // 3rd International Steel Conference on New Developments in Metallurgical Process Technologies. Düsseldorf. 13.06.07. P. 348—352.
5. Bowman Ben, Krüger Klaus. Arc furnace physics. Düsseldorf: Stahleisen Verlag, 2009. 248 p.
6. Минеев А.Р., Коробов А.И., Погребиский М.Я. Моделирование электротехнологических процессов и установок. М.: Компания Спутник+, 2004. 124 с.
7. Елизаров К.А. Экспериментальное определение структуры и параметров электрогидравлического привода перемещения электродов дуговой электропечи // Вестник МЭИ. 2010. № 1. С. 51—57.
8. Елизаров К.А. Экспериментальное исследование электрогидравлического механизма перемещения электродов дуговой сталеплавильной печи // Вестник МЭИ. 2009. № 3. С. 47—53.
9. Klaus Krüger. Anforderungen an eine moderne Elektrodenregelung für Drehstrom Lichtbogenöfen // Elektrowärme international. 2007. № 4. P. 245—248.
10. Treppschuh Arne, Krüger Klaus, Kühn Robert. Verbesserte Spannungsregelung für Gleichstrom-Elektrolichtbogenöfen // Stahl und Eisen. 2007. N 9. P. 51—57.