

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 3 (2024)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и информационных
систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/MEBG1583>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Омарова А. Р.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

МРНТИ 44.29.04

<https://doi.org/10.48081/YGJV2427>***В. И. Фандюшин¹, Н. Н. Пудич², Ю. В. Улихина³**^{1,2,3} Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар*e-mail: fan.vladimir@mail.ru¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2130-6119>²ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6897-9235>³ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0255-4436>

АДАПТИВНЫЙ РЕГУЛЯТОР МОЩНОСТИ ДЛЯ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

В данной статье представлена структурная схема адаптивного регулятора мощности дуговых сталеплавильных печей. Широкие исследования эксплуатации таких печей показали, что существует много факторов, приводящих к повышенной дисперсии колебаний тока дуги, а это в свою очередь вызывает неравномерность выделения мощности и снижает технико-экономические показатели печи. Поэтому является актуальной задача адаптации системы автоматического регулирования мощности дуговых сталеплавильных печей к изменяющимся характеристикам возмущающих воздействий по ходу плавки.

От повышенной дисперсии колебаний тока дуги можно избавиться путём адаптации параметров регулятора мощности к определённому типу возмущений, появляющихся в металлургические периоды плавки. В другие периоды плавки, например, в режиме расплавления твёрдой шихты такая адаптация невозможна и даже вредна. Снизить колебания токов дуг можно путём изменения инерционности цепи управления в зависимости от номера ступени переключателя ступеней напряжения печного трансформатора. Инерционность цепи управления предложено регулировать вводом в цепь апериодического звена первого порядка.

В статье описана разработка адаптивного контура регулирования положения электрода, даны рекомендации по используемым электронным компонентам и представлены возможности дальнейшей модернизации системы управления.

Ключевые слова: дуговые сталеплавильные печи, регулятор мощности, апериодическое звено, периоды плавки, адаптация.

Введение

Известно, что на ток электрической дуги в электропечи влияют различные случайные факторы: колебания ионизации в дуговом разряде в моменты плавления и испарения шихты, изменения химического состава шихты, перемещения дуги от действия электромагнитных сил, механические вибрации электродов, изменения амплитуды питающего напряжения сети и др. Эти возмущения наблюдаются во всех фазах и характерны для любого периода работы печи, они вызывают колебания токов дуг, которые, как по своей природе, так и по основным параметрам (амплитуда, частота и форма волны) также являются случайными.

Необходимость учёта большого числа случайных факторов обуславливает использование основных положений теории вероятностей, что позволяет свести описание многочисленных эмпирических данных к небольшому числу характеристик и достаточно чётко предсказать поведение дуговой электропечи, как объекта со случайной природой колебаний электрической нагрузки. Такие колебания существуют во всех режимах работы печи. Но если в период расплавления шихты колебания максимальны и требуют немедленной отработки системой автоматического регулирования (САР), то в металлургические периоды плавки, когда сформирована ванна жидкого металла, такие колебания малы и в меньшей степени влияют на технико-экономические показатели работы дуговых сталеплавильных печей (ДСП). Тем не менее, эти колебания отрицательно влияют на двигатель электропривода электрода и приводят к увеличению расхода электроэнергии на плавку. От таких колебаний можно избавиться посредством модернизации САР мощностью ДСП с адаптацией к кратковременным возмущениям, появляющимся в металлургические периоды плавки.

Материалы и методы

Обширные исследования вероятностных характеристик электрических параметров позволили определить степень нестабильности электрических режимов электропечей в зависимости от дисперсии колебаний тока дуги. При этом отмечают три рода колебаний [1]:

частые колебания длительностью в несколько миллисекунд, вызванные изменением ионизации дугового промежутка, величиной до 50% от номинального тока;

изменения тока с частотой от долей герц до 8 герц, достигающие значений 25 % в обе стороны от номинального тока, эти изменения тока вызываются внешними и внутренними механическими и электромагнитными усилиями, действующими на подвижную часть системы, несущей электроды и на сами дуги;

возмущения тока, вызываемые перемещениями шихты и ограничиваемые лишь сопротивлением токоподвода, эти колебания имеют место в период расплавления шихты.

Достаточно точно описать такие колебания можно лишь в результате проведения довольно трудоёмких замеров и расчётов с применением специального счётного прибора, подсчитывающего возмущения тока определённой амплитуды и продолжительности. Такие замеры показали, что по мере увеличения продолжительности возмущений их число закономерно убывает [2]. Эти возмущения вызывают колебания тока дуги, что отрицательно сказывается на технико-экономических показателях ДСП: коэффициенте полезного действия (КПД) и коэффициенте мощности. Поэтому одним из направлений увеличения КПД дуговой сталеплавильной печи является снижение дисперсии тока дуги, приводящее к снижению удельного расхода электроэнергии.

Можно применять простые устройства, корректирующие уставку регулятора, но если САР ДСП не обеспечивает малых значений разброса тока, то экономически целесообразнее разработать регулятор мощности ДСП с увеличенной помехоустойчивостью, чтобы не отрабатывать ложные сигналы. Такая задача является технически сложной для периода расплавления, когда регулятор постоянно находится в переходном режиме и относительное среднеквадратическое отклонение тока достигает 65 % [3].

В периоды рафинирования и окисления эта величина значительно меньше – 15 – 20 %, т.е. режим работы гораздо спокойнее.

Согласно технологических требований, зону нечувствительности регулятора необходимо изменять в течении плавки от 6 – 7 % в период расплава шихты и до 2 – 3 % в металлургические периоды плавки [4]. Повышенная зона нечувствительности в периоды расплавления необходима для дополнительного повышения устойчивости и основное требование к регулятору – это быстродействие. В металлургические периоды плавки от регулятора требуется высокая чувствительность и точность регулирования, поэтому зону нечувствительности необходимо уменьшать, но в этом случае регулятор оказывается чувствителен к малым и кратковременным возмущениям с частотой от долей герц до единиц герц. Такие возмущения регулятор не должен обрабатывать, а должен только поддерживать заданное среднее значение тока. Однако, даже при работе на низшей ступени напряжения печного трансформатора при полностью сформированной ванне жидкого металла было отмечено, что двигатель перемещения электрода в среднем за 1 секунду успевает изменить направление вращения [5]. А это приводит к увеличению дисперсии колебаний тока дуги, что вызывает неравномерность выделения мощности и снижает технико-экономические показатели печи.

Результаты и обсуждение

Вышеизложенное позволяет сделать вывод о том, что возмущающие воздействия по ходу плавки значительно и закономерно изменяются и из-за таких изменений параметров объекта принципы управления без адаптации становятся недостаточными, а контуры систем управления с неизменной настройкой – малопригодными. Поэтому возникает необходимость решить задачу адаптации САР ДСП к изменяющимся характеристикам возмущающих воздействий по ходу плавки. Была поставлена задача сделать привод нечувствительным к малым и кратковременным возмущениям в металлургические периоды плавки. Это можно осуществить простым и надёжным средством: ввести аperiodическое звено в пропорциональный канал регулирования контура положения электрода и изменять параметры этого звена в зависимости от периода работы печи. Аperiodическое звено представляет собой известную схему фильтра низких частот на конденсаторах [6].

Электро-механический регулятор мощности ДСП поддерживает дифференциальный принцип регулирования, что обеспечивается двумя каналами управления: пропорциональным и релейным [7]. Релейный канал служит для мгновенной отработки максимальных возмущений и коротких замыканий, поэтому аperiodическое звено в этот канал вводить нельзя, так как замедлится отработка больших возмущений и коротких замыканий. А в канале пропорционального управления аperiodическое звено не мешает отработке значительных возмущений, так как этот канал работает в спокойные металлургические периоды плавки. На рисунке 1 показана структурная схема регулятора мощности с разработанным адаптивным контуром регулирования положения электрода.

Изменение инерционности цепи управления осуществляется в зависимости от номера ступени переключателя ступеней напряжения (ПСН) печного трансформатора.

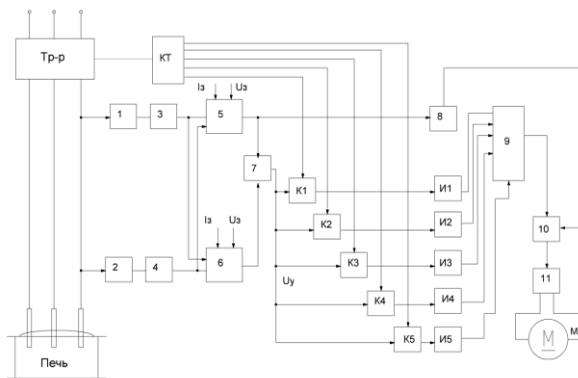


Рисунок 1 – Структурная схема адаптивного регулятора мощности ДСП

Регулятор содержит датчик тока 1 и датчик напряжения 2, подключённые к согласующим элементам 3 и 4. На выходе сумматора 5 формируется сигнал задания на подъём электрода, а на выходе сумматора 6 формируется сигнал задания на спуск электрода. Эти два сигнала сравниваются в блоке сравнения 7 и на его выходе появляется напряжение управления U_y . Далее с помощью коммутаторов К1 – К5 сигнал управления поступает на соответствующие инерционные элементы ИЭ1 – ИЭ5, с выхода которых через сумматор 9 поступает на усилитель-сумматор 10. С выхода усилителя-сумматора сигнал поступает на тиристорный

преобразователь 11, который управляет двигателем перемещения электрода М. Управление коммутаторами К1 – К5 осуществляется с помощью КТ – коммутатора ступеней напряжения печного трансформатора.

Инерционные элементы и фильтр могут быть выполнены по любой схеме, но желательно на операционных усилителя типа 140УД8А или аналогичных с полевыми транзисторами на входе [8]. Такие операционные усилители имеют повышенное входное сопротивление, поэтому конденсаторы фильтра могут иметь не большую ёмкость, так как расчёты показывают, что для нужной величины постоянной времени фильтра пришлось бы использовать ёмкость в сотни микрофард [9]. Коммутаторы можно изготовить на герконовых реле или оптронах, а пороговые элементы могут быть собраны по схеме компаратора с регулируемым уровнем напряжения сравнения [10].

Выводы

Главная цель, описанной здесь модернизации регулятора мощности, заключается в снижении дисперсии колебаний тока дуги. Этот эффект объясняется тем, что отработка регулятором мощности малых и кратковременных возмущений замедляется на столько, что ненужные перемещения электродов практически устраняются. А это приводит к увеличению коэффициента полезного действия и коэффициента мощности электропечной установки.

Достоинством данной схемы является простота реализации контура адаптации на действующей САР ДСП и возможность дальнейшей модернизации схемы. Например, перед коммутаторами можно поставить пороговые элементы и фильтр с большой величиной постоянной времени, чтобы исключить ложные переключения коммутаторов из-за непостоянства напряжения дуги, которое возможно даже на одной ступени напряжения печного трансформатора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Рябов, А. В.** Современные способы выплавки стали в ДСП [Текст]. – М. : Теплотехник, 2007. – 192 с.

2 **Панова, О. С.** Разработка и совершенствование способов компенсации реактивной мощности дуговых сталеплавильных печей [Текст]. – М. : Академия, 2010. – 173 с.

3 **Алиферов, А. И., Бикеев, Р. А., Горева, Л. П.** Дуговые электропечи [Текст]. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 204 с.

4 **Протасов, А. В., Смирнов, Л. А., Сивак, Б. А.** Рафинирование стали в процессе разливки [Текст]. – М. : Инфра-Инженерия, 2023. – 328 с.

5 **Рубцов, В. П., Дмитриев, И. Ю., Минеев, А. Р.** Параметры дугового разряда и их влияние на эффективность работы ЭТУ // Электричество. – 2000. – №8. – С.40–41.

6 **Лаврентьев, Б. Ф.** Схемотехника электронных средств [Текст]. – М. : Академия, 2010. – 336 с.

7 **Ефанов, А. В., Ярош, В. А.** Теория автоматического управления: учебник для вузов [Текст]. – СПб. :Лань, 2024. – 160 с.

8 **Коммисаров, Ю. А., Гордеев, Л. С., Вент, Д. П., Бабокин, Г. И.** Основы электротехники, микроэлектроники и управления [Текст]. – М. : Химия, 2007. – 451 с.

9 **Хоровиц, П., Хилл, У.** Искусство схемотехники: В 3-х томах: Т. 3 [Текст]. – М. :Мир, 1993. – 367 с.

10 **Джонс, М. Х.** Электроника – практический курс [Текст]. – М. : Постмаркет, 1999. – 528 с.

REFERENCES

1 **Ryabov, A. V.** Sovremennyye sposoby vyplavki stali v DSP [Modern methods of steel smelting in chipboard] [Text]. – М.: Teplotekhnik, 2007. – 192 p.

2 **Panova, O. S.** Razrabotka i sovershenstvovaniye sposobov kompensatsii reaktivnoy moshchnosti dugovykh staleplavil'nykh pechey [Development and improvement of methods for compensating the reactive power of arc steel-smelting furnaces] [Text]. – М. : Academy, 2010. – 173 p.

3 **Aliferov, A. I., Bikeev, R. A., Goreva, L. P.** Dugovyue elektropечи [Electric arc furnaces] [Text]. Novosibirsk : NSTU Publishing House, 2018. – 204 p.

4 **Protasov, A. V., Smirnov, L. A., Sivak, B. A.** Rafinirovaniye stali v protsesse razlivki [Refining steel during the casting process] [Text]. – Moscow : Infra-Engineering, 2023. – 328 p.

5 **Rubtsov, V. P., Dmitriev, I. Yu., Mineev, A. R.** Parametry dugovogo razryada i ikh vliyaniye na effektivnost' raboty ETU [Parameters of the arc discharge and their influence on the efficiency of the ETD] // Electricity. – 2000. – No. 8. – P.40–41.

6 **Lavrentiev, B. F.** Skhemotekhnika elektronnykh sredstv [Circuitry of electronic devices] [Text]. – Moscow : Academy, 2010. – 336 p.

7 **Efanov, A. V., Yarosh, V. A.** Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: uchebnik dlya vuzov [Automatic control theory: a textbook for universities] [Text]. – St. Petersburg : Lan, 2024. – 160 p.

8 **Kommisarov, Yu. A., Gordeev, L. S., Vent, D. P., Babokin, G. I.** Osnovy elektrotekhniki, mikroelektroniki i upravleniya [Fundamentals of electrical engineering, microelectronics and control] [Text]. – Moscow: Chemistry, 2007. – 451 p.

9 **Horowitz, P., Hill, W.** Iskusstvo skhemotekhniki : V 3-kh tomakh : T. 3 [The art of circuit design: In 3 volumes : T. 3] [Text]. – Moscow : Mir, 1993. – 367 p.

10 **Jones, M. H.** Elektronika – prakticheskiy kurs [Electronics - a practical course] [Text]. – Moscow : Postmarket, 1999. – 528 p.

Поступило в редакцию 20.05.24

Поступило с исправлениями 20.05.24

Принято в печать 05.09.24

**В. И. Фандюшин¹, Н. Н. Пудич², Ю. В. Улихина³*

^{1,2,3}Торайғыров университет, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

20.05.24 ж. баспаға түсті.

20.05.24 ж. түзетулерімен түсті.

05.09.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

ДОҒАЛЫ БОЛАТ БЕРУ ПЕШТЕРІ ҮШІН АДАПТИВТІ ҚУАТТЫ БАСҚАРУ

Бұл мақалада доғалы болат балқыту пештері үшін бейімделгіш қуат реттегішінің құрылымдық схемасы берілген. Мұндай пештердің жұмысын ауқымды зерттеулер доға тогының тербелістерінің дисперсиясының жоғарылауына әкелетін көптеген факторлардың бар екенін көрсетті және бұл өз кезегінде қуаттың біркелкі емес босатылуын тудырады және пештің техникалық-экономикалық көрсеткіштерін төмендетеді. Сондықтан доғалы болат балқыту пештерінің қуатты автоматты басқару жүйесін балқыту процесі кезіндегі бұзылатын әсерлердің өзгеретін сипаттамаларына бейімдеу кезек күттірмейтін міндет болып табылады.

Доғалық ток тербелістерінің дисперсиясының жоғарылауын қуат реттегішінің параметрлерін балқытудың металлургиялық кезеңдерінде пайда болатын бұзылудың белгілі бір түріне бейімдеу арқылы жоюға болады. Балқытудың басқа кезеңдерінде, мысалы, қатты зарядты балқыту режимінде мұндай бейімделу мүмкін емес, тіпті зиянды. Пеш трансформаторының кернеу қадамдық ауыстырып-қосқышының саты нөміріне байланысты басқару тізбегінің инерциясын өзгерту арқылы доғалық токтардың ауытқуын азайтуға болады. Тізбекке бірінші ретті аперидоттық буынды енгізу арқылы басқару тізбегінің инерциясын реттеу ұсынылады.

Мақалада адаптивті электрод позициясын басқару циклінің дамуы сипатталған, пайдаланылатын электрондық компоненттер бойынша ұсыныстар берілген және басқару жүйесін одан әрі жаңғырту мүмкіндіктері ұсынылған.

Кілтті сөздер: доғалы болат балқыту пештері, қуат реттегіші, аперидоттық звено, балқыту кезеңдері, бейімделу.

*V. I. Fandyushin¹, N. N. Pudich², Yu. V. Ulikhina³

^{1,2,3}Toraigyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

Received 20.05.24

Received in revised form 20.05.24

Accepted for publication 05.09.24

ADAPTIVE POWER CONTROL FOR ARC STEEL MELTING FURNACES

This article presents a block diagram of an adaptive power regulator for arc steel-smelting furnaces. Extensive studies of the operation of such furnaces have shown that there are many factors leading to increased dispersion of arc current fluctuations, and this in turn causes uneven power release and reduces the technical and economic performance of the furnace. Therefore, the urgent task is to adapt the automatic power control system of arc steel-smelting furnaces to the changing characteristics of disturbing influences during the melting process.

Increased dispersion of arc current oscillations can be eliminated by adapting the parameters of the power regulator to a certain type of disturbance that appears during the metallurgical periods of smelting. During other periods of smelting, for example, in the mode of melting a solid charge, such adaptation is impossible and even harmful. It is possible to reduce fluctuations in arc currents by changing the inertia of the control circuit depending on the stage number of the voltage step switch of the furnace transformer. It is proposed to regulate the inertia of the control circuit by introducing a first-order aperiodic link into the circuit.

The article describes the development of an adaptive electrode position control loop, provides recommendations on the electronic components used, and presents possibilities for further modernization of the control system.

Keywords: arc steel-smelting furnaces, power regulator, aperiodic link, melting periods, adaptation.

Теруге 10.09.2024 ж. жіберілді. Басуға 30.09.2024 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

29.9 Мб RAM

Шартты баспа табағы 22,2. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректорлар: А. Р. Омарова, М. М. Нугманова

Тапсырыс №4277

Сдано в набор 10.09.2024 г. Подписано в печать 30.09.2024 г.

Электронное издание

29.9 Мб RAM

Усл. печ. л. 22,2. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректоры: А. Р. Омарова, М. М. Нугманова

Заказ № 4277

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайгыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайгыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

e-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz