

# ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

## И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

### METALLURGICAL POWER ENGINEERING, ENERGY SAVING AND ELECTRICAL SYSTEMS

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.365.22

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-2-120-132



## РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ИНЖЕКТОРАМИ УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩЕГО МАТЕРИАЛА ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Николаев А.А., Тулупов П.Г., Рыжевол С.С., Ивекеев В.С.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Аннотация.** Постановка задачи (актуальность работы). В современной металлургии широкое распространение получили дуговые сталеплавильные печи. В связи с энергоёмкостью данных установок актуальной задачей является разработка усовершенствованных алгоритмов управления печными агрегатами, обеспечивающих снижение доли затрат на электроэнергию и расходные материалы в составе себестоимости конечного продукта. Одним из путей данной задачи является разработка усовершенствованной системы управления инжекторами углеродосодержащего материала, что является целью данной работы. **Используемые методы.** В процессе исследования выполнен анализ существующего алгоритма управления инжекторами углеродосодержащего материала на примере наиболее распространённой системы управления электрическим режимом ARCOS (Primetals Technologies, ранее Siemens VAI, VAI Fuchs, Vantron, Германия). Выявлены основные недостатки, связанные с применяемым параметром управления, а также общим подходом к определению степени экранирования дуг вспененным шлаком. С учётом опыта ранее проведённых исследований предложены технические решения, направленные на устранение выявленных недостатков. **Новизна.** Предложены новые подходы к управлению расходом углеродосодержащего материала, в основе которых лежит применение величины относительного действующего значения суммарных нечётных гармоник напряжений дуг в качестве параметра регулирования, а также учёт интенсивности действующего режима продувки расплава. **Результат.** Разработана новая система управления инжекторами углеродосодержащего материала дуговой сталеплавильной печи, обеспечивающая улучшенное шлакообразование и условия горения электрических дуг за счёт использования усовершенствованной формулы расчёта коэффициента шлака, а также вспомогательной системы автоматической адаптации длин дуг при недостаточном шлакообразовании. **Практическая значимость.** Применение новой системы управления инжекторами позволяет обеспечить оптимальную величину расхода углеродосодержащего материала в соответствии с интенсивностью продувки расплава, а также возможностью полного экранирования дуг вспененным шлаком в условиях заданной рабочей точки. В результате обеспечивается сокращение себестоимости конечного продукта за счёт увеличения теплового КПД дуг и сокращения расхода углеродосодержащего материала.

**Ключевые слова:** дуговая сталеплавильная печь, система управления электрическим режимом, углеродосодержащий материал, инжектор, тепловой КПД электрической дуги.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект №FZRU-2020-0011).

© Николаев А.А., Тулупов П.Г., Рыжевол С.С., Ивекеев В.С., 2022

#### Для цитирования

Разработка усовершенствованной системы автоматического управления инжекторами углеродосодержащего материала дуговой сталеплавильной печи / Николаев А.А., Тулупов П.Г., Рыжевол С.С., Ивекеев В.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №2. С. 120–132. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-120-132>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

## DEVELOPMENT OF AN IMPROVED AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR CARBON INJECTORS OF AN ELECTRIC ARC FURNACE

Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Ryzhevol S.S., Ivekeev V.S.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** At present, electric arc furnaces are widely used in modern metallurgy. Due to the energy intensity of these installations, a relevant task is to develop improved algorithms for controlling furnace units that reduce a share of costs for electricity and consumables in the cost of the final product.

One of the ways for completing this task is to develop an improved control system for carbon injectors, which is the objective of this research. **Methods Applied.** In the study, the existing control algorithm for carbon injectors was analyzed using the example of the most common electric mode control system, ARCOS (Primetals Technologies, formerly Siemens VAI, VAI Fuchs, Vantron, Germany). The main disadvantages associated with the applied control parameter, as well as a general approach to determining the degree of arc shielding by foamed slag, are revealed. Taking into account the experience of previous studies, the authors proposed the technical solutions to eliminate the identified disadvantages. **Originality.** The paper describes new approaches to controlling the carbon material consumption, which are based on the use of the relative effective value of the total odd harmonics of arc voltages as a control parameter, as well as taking into account the rate of the current schedule of argon blowing.

**Result.** A new control system for carbon injectors of the electric arc furnace has been developed to provide improved slag formation and the conditions for arcing by using an improved formula for calculating the slag coefficient, as well as an auxiliary system for automatic adaptation of arc lengths in case of insufficient slag formation.

**Practical Relevance.** The use of a new injector control system makes it possible to ensure the optimal flow rate of carbon material in accordance with the melt blowing rate, as well as the possibility of complete shielding of the arcs with foamed slag at a given operating point. As a result, the cost of the final product is reduced by increasing the thermal efficiency of the arcs and decreasing the consumption of the carbon material.

**Keywords:** electric arc furnace, electric mode control system, carbon material, injector, electric arc thermal efficiency.

*The research has been funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FZRU-2020-0011).*

### For citation

Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Ryzhevol S.S., Ivekeev V.S. Development of an Improved Automated Control System for Carbon Injectors of an Electric Arc Furnace. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 2, pp. 120–132. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-120-132>

### Введение

Современная металлургия является одной из наиболее приоритетных отраслей современной экономики. По последним данным доля металлургического производства в валовой добавленной стоимости (ВДС) РФ составила около 2,4%, в промышленном производстве – порядка 17,8%, а в экспорте – 13,5%. При этом предприятия металлургии используют около 20% от общего объема электроэнергии, производимой генерирующими компаниями с собственными электростанциями. Одним из наиболее энергоёмких потребителей электрической энергии на металлургических предприятиях являются дуговые сталеплавильные печи (ДСП). Современные ДСП ха-

рактеризуются следующими основными технико-экономическими показателями: удельная мощность печного трансформатора в диапазоне 0,7–1 МВА/т, продолжительность плавки от выпуска до выпуска около 40 мин, масса выплавляемой стали от 100 до 250 т. За последние десятилетия при освоении новых производственных мощностей, а также реконструкции старых сталеплавильных цехов наметилась устойчивая тенденция внедрения ДСП в производство. Это связано с высокими технико-экономическими, экологическими и эксплуатационными показателями работы данных агрегатов.

Несмотря на очевидные преимущества, показатели энергопотребления ДСП остаются

значительными и составляют весомую долю в себестоимости конечного продукта. Вследствие этого особую актуальность приобретает задача снижения потребления электрической энергии в процессе выплавки жидкой стали. Одним из путей решения данной задачи является обеспечение максимального теплового КПД электрических дуг путём их экранирования вспененным шлаком. Для этого на конечной стадии плавки через специальные инжекторы в ванну плавки осуществляется подача углеродсодержащего материала (УСМ). При этом управление расходом УСМ осуществляется специальная вспомогательная система в составе системы управления электрическим режимом, поставляемой в комплекте с основным технологическим оборудованием.

Отметим, что практически во всех современных системах подход к управлению инжекторами на протяжении последних десятков лет остаётся неизменным. Опыт эксплуатации показывает, что штатные решения не всегда являются эффективными и не обеспечивают полного экранирования дуг вспененным шлаком на поздних стадиях плавки, а также в ряде случаев приводят к существенно завышенному расходу УСМ. Таким образом, основной целью данной работы является анализ недостатков существующего подхода к управлению инжекторами на примере системы ARCOS (Primetals Technologies, ранее Siemens VAI, VAI Fuchs, Vantron, Германия), а также разработка новой, более эффективной системы управления инжекторами, в которой выявленные недостатки будут компенсированы.

#### Краткий обзор современных подходов к диагностике уровня вспененного шлака в ДСП. Анализ недостатков системы управления инжекторами УСМ на примере системы ARCOS

Очевидно, что для управления режимом работы инжектора УСМ необходимо обладать актуальной информацией об уровне вспененного шлака в ванне печи (рис. 1). Для решения данной задачи в промышленности существует несколько подходов. Первый подход подразумевает установку на кожухе печи виброметров, сигнал с которых в дальнейшем с помощью специальных алгоритмов преобразуется в сигнал задания на расход УСМ. В осно-

ве данного принципа лежит различие среды прохождения звуковых волн при горении открытых дуг и среды, формируемой при наведении вспененного шлака. Первой практической реализацией подобного подхода с возможностью построения пространственной модели распределения вспененного шлака в ванне печи стал модуль FSM (Foaming Slag Manager), разработанный фирмой Siemens VAI (Германия) и получивший своё дальнейшее развитие в системе Melt Expert (Primetals Technologies, Великобритания).

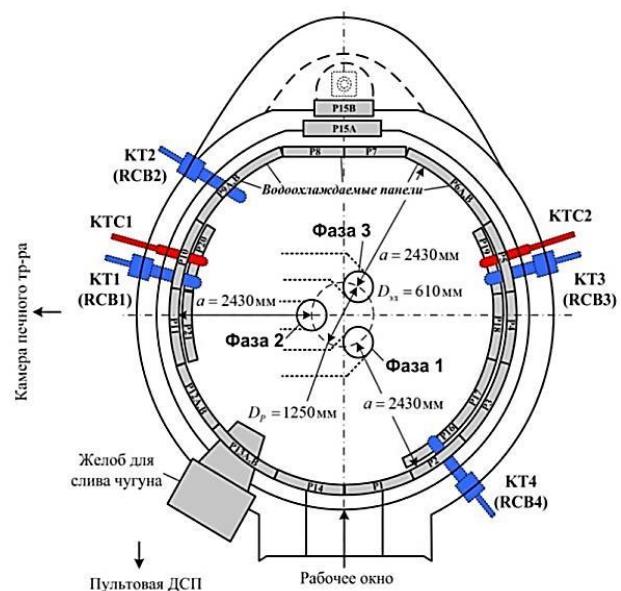


Рис. 1. Типовой чертёж ДСП-120 (95 МВА) с указанием расположения электродов фаз 1-3, комбинированных фурм-горелок (КТ, RCB), инжекторов углерода (КТС) и водоохлаждаемых панелей (P1-P21)

Fig. 1. Typical drawing of EAF-120 (95 MVA), representing the electrodes in phases 1-3, refining combined burners (KT, RCB), carbon injectors (KTC) and water-cooled panels (P1-P21)

Для наглядности функциональная схема модуля FSM приведена на рис. 2. Отметим, что данному направлению посвящено определённое количество отечественных и зарубежных исследований, в качестве примера которых можно привести работы [1, 2]. Несмотря на эффективность, применение метода виброметрии не получило широкого распространения на действующем производстве. Это связано с тем, что эксплуатация виброметров в агрессивных условиях электросталеплавильных цехов часто приводит их к выходу из строя.

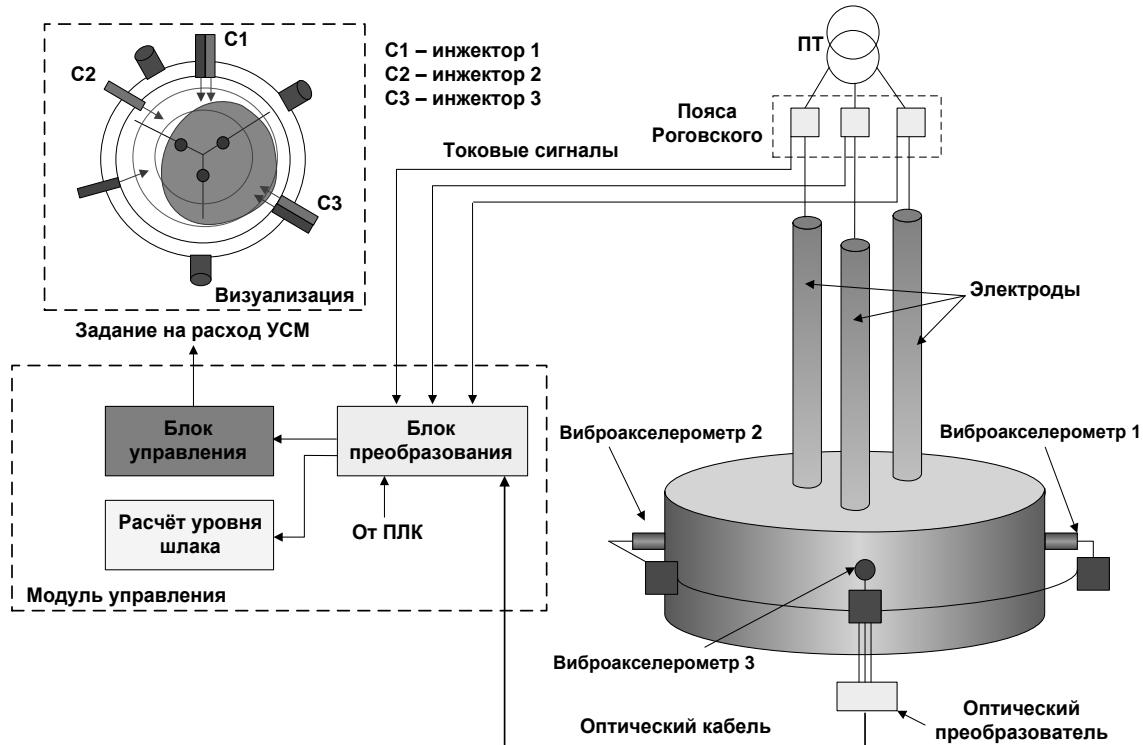


Рис. 2. Функциональная схема модуля диагностики уровня вспененного шлака FSM (Foaming Slag Manager), разработанного фирмой Siemens VAI (Германия)

Fig. 2. Functional diagram for foaming slag diagnostic block FSM (Foaming Slag Manager) designed by Siemens VAI (Germany)

В связи с этим в подавляющем большинстве современных систем управления электрическим режимом [3] применяется второй подход, в соответствии с которым управление режимом работы инжектора осуществляется на основании величины коэффициента шлака, который определяется по формуле

$$K_{\text{ШЛАК}} = \frac{A}{K_I}, \quad (1)$$

где  $K_I$  – суммарный коэффициент гармонических составляющих тока (в зарубежной терминологии – Total Harmonic Distortion или  $THD_I$ );  $A$  – масштабный коэффициент.

В свою очередь, величина суммарного коэффициента гармонических составляющих тока определяется в соответствии со следующим выражением:

$$K_I = \frac{\sqrt{I^2 - I_{(1)}^2 - I_{(0)}^2}}{I_{(1)}} \cdot 100\% = \frac{I_{\text{ВГ}}}{I_{(1)}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $I$  – действующее (среднеквадратическое) значение тока;  $I_{(1)}$  – действующее значение тока 1-й гармоники;  $I_{(0)}$  – постоянная составляющая тока;  $I_{\text{ВГ}}$  – действующее значение высших гармоник.

В основе управления инжектором по величине  $K_{\text{ШЛАК}}$  лежит принцип, суть которого заключается в том, что по мере увеличения тепловой постоянной времени дуги  $\Theta_d$  и наведения вспененного шлака доля высших гармоник в составе сигнала тока электрической дуги существенно сокращается. Аналогичный эффект используется в системах диагностики стадии плавления шихты по высшим гармоникам токов и напряжений дуг, что подробно описано в работе [4] и наглядно продемонстрировано с помощью **рис. 3**.

Отметим, что тепловая постоянная времени электрической дуги является переменной в составе дифференциального уравнения мгновенной проводимости электрической дуги (уравнение Касси) [5], которое выражается следующей формулой:

$$\Theta_d(t) \frac{dg_d(t)}{dt} = \left( \frac{u_d^2(t)}{E_d^2(t)} - 1 \right) g_d(t) dt, \quad (3)$$

где  $g_d(t)$  – мгновенное значение проводимости электрической дуги;  $\Theta_d$  – тепловая постоянная времени электрической дуги;  $E_d(t)$  – противоЭДС электрической дуги.

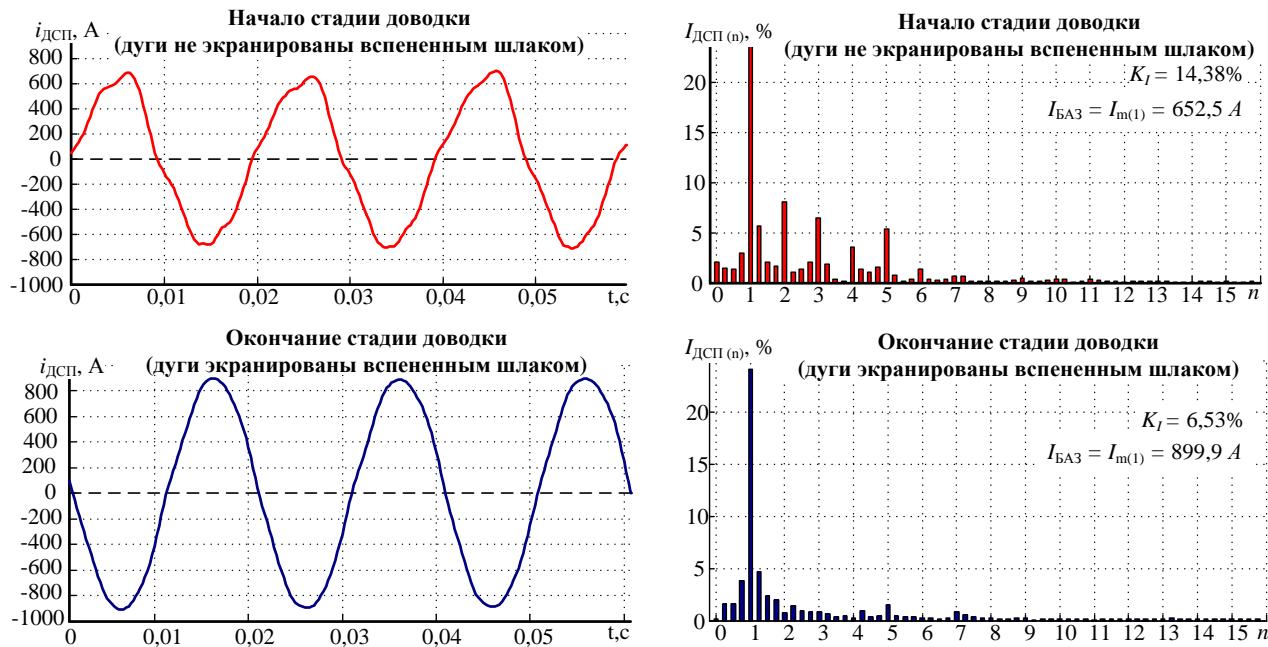


Рис. 3. Влияние стадии плавления шихты на уровень высших гармоник в составе сигнала тока электрической дуги  
Fig. 3. Correlation between the level of electric arc current higher harmonics and the charge melting stage

Как упоминалось ранее, подход к управлению инжекторами с использованием величины  $K_{\text{ШЛАК}}$  для подавляющего большинства современных систем управления электрическим режимом является типовым и не менялся за последние десятилетия. Рассмотрим структуру блока управления расходом УСМ в составе системы управления электрическим режимом ARCOS, получившей наиболее широкое распространение на отечественном и зарубежном рынке (рис. 4).

Приведём краткое описание работы данного блока. Изначально в системе производится расчёт коэффициента шлака  $K_{\text{ШЛАК}}$  в соответствии с формулой (2). Далее на вход нечёткого регулятора поступает два сигнала в режиме реального времени: непосредственно  $K_{\text{ШЛАК}}$  и первая производная от  $K_{\text{ШЛАК}}$ . Нечёткий регулятор содержит в себе три основные предустановленные характеристики. Первая характеристика устанавливает формальные границы для 5-ти уровней образования вспененного шлака, которые в системе ARCOS имеют названия «no slag» (шлак отсутствует), «poor slag» (слабое образование вспененного шлака), «medium slag» (среднее образование вспененного шлака), «good slag» («хорошее образование вспененного шлака»), «excellent slag» («наилучшее образование вспененного шлака»). Вторая характеристика определяет гра-

ницы для 3-х уровней, характеризующих динамику шлакообразования: «slag growing» (уровень вспененного шлака растёт), «slag shrinking» (уровень вспененного шлака сокращается), «slag steady» (уровень вспененного шлака стабилен). Третья характеристика формирует уставку сигнала задания на открытие (закрытие) инжектора для 5-ти основных режимов работы: «no injection» (инжектор выведен из работы), «low injection» («низкая интенсивность работы инжектора»), «medium injection» («средняя интенсивность работы инжектора»), «high injection» («высокая интенсивность работы инжектора»), «max injection» («максимальная интенсивность работы инжектора»).

Работа регулятора осуществляется по набору заранее предустановленных правил, которые сведены в табл. 1. Например, если система наблюдает отсутствие вспененного шлака, а также отсутствие динамики его увеличения, инжектор переводится в режим максимально интенсивной работы. В ином случае, если уровень вспененного шлака максимальен и продолжает нарастать, система выводит инжектор из работы и прекращает подачу УСМ в ванну печи. Для наглядности на рис. 5 представлены основные характеристики нечёткого регулятора, полученные на действующем производственном объекте.

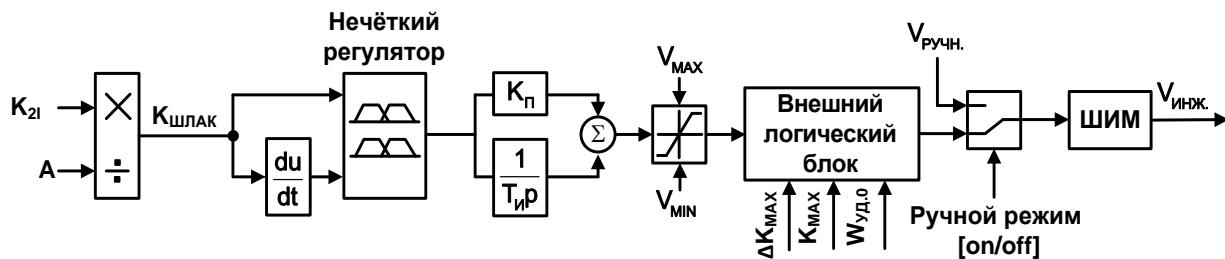


Рис. 4. Структура блока управления инжектором УСМ в системе управления электрическим режимом ARCOS (Primetals Technologies, ранее Siemens VAI, VAI Fuchs, Vantron, Германия)

Fig. 4. The structure of the carbon-injection control block in electric mode control system ARCOS (Primetals Technologies, former Siemens VAI, VAI Fuchs, Vantron, Germany)

Таблица 1. Набор правил для работы нечёткого регулятора в блоке управления инжектором УСМ в системе ARCOS  
Table 1. The rules of the fuzzy regulator in the carbon injection control block for ARCOS control system

№ п/п	Уровень шлака	Темп нарастания уровня вспененного шлака	Режим работы инжектора
1	Excellent slag (наилучшее образование вспененного шлака)	Slag growing (уровень вспененного шлака растёт)	No injection (инжектор выведен из работы)
2	Excellent slag (наилучшее образование вспененного шлака)	Slag steady (уровень вспененного шлака стабилен)	No injection (инжектор выведен из работы)
3	Excellent slag (наилучшее образование вспененного шлака)	Slag shrinking (уровень вспененного шлака сокращается)	Low injection (низкая интенсивность работы инжектора)
4	Good slag (хорошее образование вспененного шлака)	Slag growing (уровень вспененного шлака растёт)	No injection (инжектор выведен из работы)
5	Good slag (хорошее образование вспененного шлака)	Slag steady (уровень вспененного шлака стабилен)	Low injection (низкая интенсивность работы инжектора)
6	Good slag (среднее образование вспененного шлака)	Slag shrinking (уровень вспененного шлака сокращается)	Medium injection (средняя интенсивность работы инжектора)
7	Medium slag (среднее образование вспененного шлака)	Slag growing (уровень вспененного шлака растёт)	Low injection (низкая интенсивность работы инжектора)
8	Medium slag (среднее образование вспененного шлака)	Slag steady (уровень вспененного шлака стабилен)	Medium injection (средняя интенсивность работы инжектора)
9	Medium slag (среднее образование вспененного шлака)	Slag shrinking (уровень вспененного шлака сокращается)	High injection (высокая интенсивность работы инжектора)
10	Poor slag (слабое образование вспененного шлака)	Slag growing (уровень вспененного шлака растёт)	Medium injection (средняя интенсивность работы инжектора)
11	Poor slag (слабое образование вспененного шлака)	Slag steady (уровень вспененного шлака стабилен)	Max injection (максимальная интенсивность работы инжектора)
12	Poor slag (слабое образование вспененного шлака)	Slag shrinking (уровень вспененного шлака сокращается)	High injection (высокая интенсивность работы инжектора)
13	No slag (шлак отсутствует)	Slag growing (уровень вспененного шлака растёт)	High injection (высокая интенсивность работы инжектора)
14	No slag (шлак отсутствует)	Slag steady (уровень вспененного шлака стабилен)	Max injection (максимальная интенсивность работы инжектора)
15	No slag (шлак отсутствует)	Slag shrinking (уровень вспененного шлака сокращается)	Max injection (максимальная интенсивность работы инжектора)

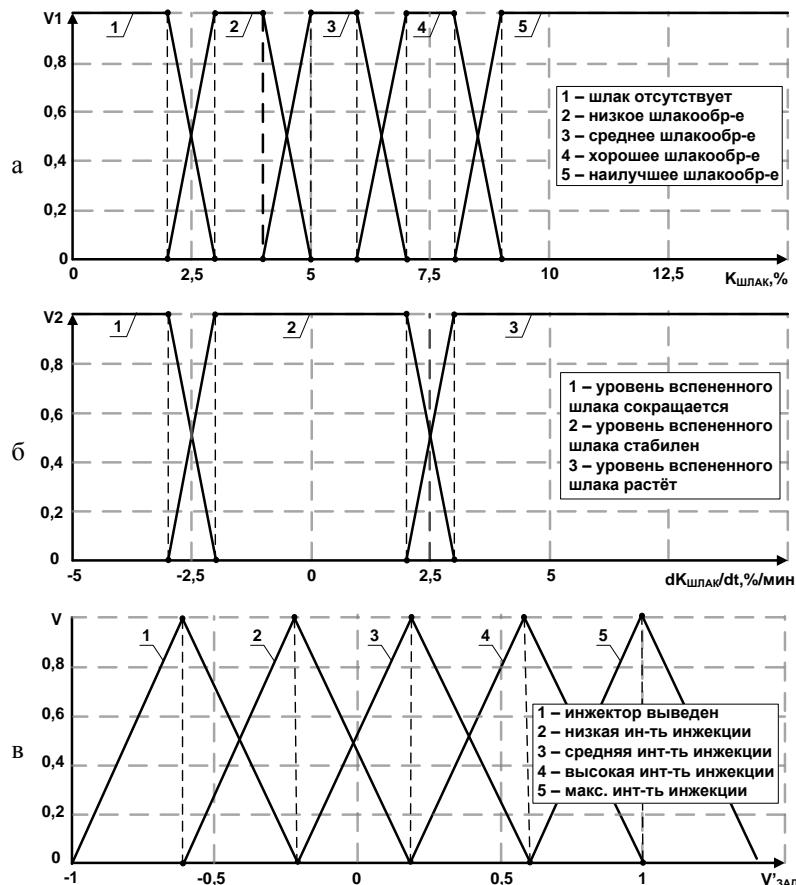


Рис. 5. Характеристики нечёткого регулятора в блоке управления инжекторами системы ARCOS, отвечающие за:  
а – оценку уровня вспененного шлака; б – оценку динамики изменения уровня вспененного шлака;

в – формирование сигнала задания на открытие инжектора  
Fig. 5. Characteristics of the fuzzy regulator for the carbon injection control block in ARCOS, responsible for:  
a is estimation of the foaming slag level; b is estimation of trends in foaming slag; c is control of an injector opening process

На выходе нечёткого регулятора в данном случае формируется сигнал задания на открытие инжектора, находящийся в диапазоне от -1 до 1,5. При этом величина «-1» соответствует максимально быстрому закрытию инжектора и сокращению подачи УСМ, а величина «1,5», наоборот, максимально быстро открытию инжектора и увеличению подачи УСМ. Выходной сигнал с нечёткого регулятора поступает на традиционный ПИ-регулятор, в котором реализуется приведение сигнала задания из безразмерных единиц в процents. Далее сигнал задания на открытие (закрытие) инжектора проходит через стандартный блок ограничения в диапазоне от  $V_{\min}$  до  $V_{\max}$ , внешний логический блок, который выводит регулятор из работы при превышении максимальной величины  $K_{шлак}$  или скорости его нарастания, а также отслеживает момент начала работы блока управления в целом по достижении заданной величины удельного расхода электроэнергии  $W_{уд}$ . В итоге результирующий

выходной сигнал поступает на блок ШИМ, в котором формируется непосредственное воздействие на механизм открытия (закрытия) инжектора. Отметим, что в системе также предусмотрена возможность ручного управления инжектором, что может быть полезно при возникновении непредвиденных ситуаций.

#### Анализ недостатков существующих технических решений. Разработка усовершенствованной структуры блока управления инжектором

Структура блока управления инжекторами УСМ в системе ARCOS имеет ряд недостатков, которые были выявлены в процессе эксплуатации на различных металлургических предприятиях России и зарубежных стран. Во-первых, показатель  $K_I$  [6–9], на основе которого выполняется расчёт  $K_{шлак}$ , обладает сильной зависимостью от несимметричных режимов горения дуг, а также возмущающих воздействий по

длине электрической дуги [10–12]. Вследствие этого возникает необходимость применять входные фильтры сигнала с большими постоянными временем (до 15–20 с), что приводит к высокой инерционности системы, неоптимальным шлаковым режимам и перерасходу УСМ. Кроме того, в структуре блока не учитывается режим аргонной продувки (при наличии), который оказывает существенное влияние на гармонический состав тока дуги. По этой причине одно и то же значение  $K_{\text{ШЛАК}}$  может быть показателем оптимального шлакового режима при низкой интенсивности продувки расплава, но недостаточной при продувке высокой интенсивности. Помимо вышеперечисленного, существующая система также не учитывает ситуацию, при которой из-за использования УСМ низкого качества не удастся достичь оптимального шлакового режима и инжекторы будут работать при существенной величине расхода вхолостую, а также возможной ситуации поломки одного из инжекторов УСМ, в результате которого возникает несимметричное закрытие дуг вспененным шлаком.

Для компенсации обозначенных недостатков предлагается использовать усовершенствованную систему управления УСМ, которая имеет ряд отличий от существующей. Так, в новой системе вместо коэффициента шлака  $K_{\text{ШЛАК}}$ , который рассчитывается на основе  $K_{2i}$ , используется параметр  $K_{\text{ШЛАКУ}}$ , рассчитываемый на основании величины относительного действующего значения нечётных гармоник напряжения электрической дуги в соответствии со следующей формулой:

$$U'_{\text{д.вг.нечёт}\Sigma} = \frac{\sqrt{U_{\text{д(3)}}^2 + U_{\text{д(5)}}^2 + U_{\text{д(7)}}^2 + U_{\text{д(9)}}^2}}{U_{2\text{ФН}}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

$$K_{\text{ШЛАКУ}} = \frac{U'_{\text{д.вг.нечёт}\Sigma}}{A} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где  $U_{\text{д(3)}}, U_{\text{д(5)}}, U_{\text{д(7)}}, U_{\text{д(9)}}$  – действующие значения 3, 5, 7 и 9-й гармоник напряжения электрической дуги соответственно;  $U_{2\text{Н}}$  – номинальное фазное напряжение печного трансформатора на текущей ступени РПН.

Отметим, что для расчёта  $U'_{\text{вг.нечёт}\Sigma}$  необходимо выполнить косвенный расчёт мгновенного значения напряжения электрической дуги в каждой фазе, который осуществляется на основании прямых измерений токов дуг и фазных напряжений в соответствии со следующей формулой:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{\text{д1}}(t) = u_{2\Phi 1}(t) - i_{\text{д1}}(t)R_{\text{KC1}} - L_{\text{KC1}} \frac{di_{\text{д1}}(t)}{dt} \pm \\ \pm M_{21} \frac{di_{\text{д2}}(t)}{dt} \pm M_{31} \frac{di_{\text{д3}}(t)}{dt}; \\ u_{\text{д2}}(t) = u_{2\Phi 2}(t) - i_{\text{д2}}(t)R_{\text{KC2}} - L_{\text{KC2}} \frac{di_{\text{д2}}(t)}{dt} \pm \\ \pm M_{12} \frac{di_{\text{д1}}(t)}{dt} \pm M_{32} \frac{di_{\text{д3}}(t)}{dt}; \\ u_{\text{д3}}(t) = u_{2\Phi 3}(t) - i_{\text{д3}}(t)R_{\text{KC3}} - L_{\text{KC3}} \frac{di_{\text{д3}}(t)}{dt} \pm \\ \pm M_{13} \frac{di_{\text{д1}}(t)}{dt} \pm M_{23} \frac{di_{\text{д2}}(t)}{dt}, \end{array} \right. \quad (6)$$

где  $R_{\text{KC1}}, R_{\text{KC2}}, R_{\text{KC3}}$  – активное сопротивление участка короткой сети,  $L_{\text{KC1}}, L_{\text{KC2}}, L_{\text{KC3}}$  – индуктивное сопротивление участка короткой сети;  $u_{\text{д1}}(t), u_{\text{д2}}(t), u_{\text{д3}}(t)$  – мгновенное значение напряжения дуги;  $u_{2\Phi 1}(t), u_{2\Phi 2}(t), u_{2\Phi 3}(t)$  – мгновенное значение фазного напряжения на вторичной стороне ПТ;  $i_{\text{д1}}(t), i_{\text{д2}}(t), i_{\text{д3}}(t)$  – мгновенные значения токов дуг;  $M_{12}, M_{21}, M_{23}, M_{32}, M_{13}, M_{31}$  – коэффициенты взаимной индуктивности между фазами печи (знаки при составляющих с данными коэффициентами в системе уравнений определяются индивидуально для каждого объекта в зависимости от ориентации консолей в пространстве).

Выбор  $U'_{\text{вг.нечёт}\Sigma}$  в качестве параметра управления обусловлен результатами исследования [13], в котором доказано, что данный показатель имеет прямую связь с величиной тепловой постоянной времени дуги  $\theta_{\text{д}}$ , а также в наименьшей мере подвержен влиянию несимметричных режимов и возмущающих воздействий по длине электрической дуги. Благодаря этому отпадает необходимость в применении входных фильтров с большими постоянными времени, что решает проблему инерционности исходной системы.

Помимо нового параметра управления, в системе предусмотрены два дополнительных усовершенствования: 1) использована более сложная структура нечёткого регулятора, в которой предопределён индивидуальный набор характеристик, аналогичных **рис. 5**, для различных режимов продувки расплава аргоном. Необходимость этого связана с тем, что при более интенсивной продувке значение  $K_{\text{ШЛАКУ}}$ , свидетельствующее о достижении оптимального шлакового режима, будет несколько завышено по сравнению с тем же значением при низкой интенсивности продувки. Несмотря на то, что показатель  $K_{\text{ШЛАКУ}}$  является стабильным и не подвер-

жен сильному влиянию возмущений, вызванных продувкой, данная опция может быть полезна для печей малой и средней мощности; 2) предусмотрен дополнительный блок, который отслеживает продолжительную работу инжекторов без существенного изменения шлакового режима. При возникновении такой ситуации система управления адаптирует электрический режим путём перехода на более короткую длину электрической дуги, формируемой переходом на новую рабочую кривую  $N_{PK}$ , что позволит увеличить тепловой КПД дуг. При этом набор правил, инициирующих переход на более короткую дугу, может определяться индивидуально для каждого отдельно взятого объекта.

С учётом вышеперечисленного функциональная схема усовершенствованного блока управления УСМ приведена на **рис. 6**. Возможная структура алгоритма управления рабочей кривой  $N_{PK}$  приведена на **рис. 7**, на котором следующие обозначения:  $W_{ABC}$  – абсолютное значение потребленной электроэнергии [ $\text{kВт}\cdot\text{ч}$ ];  $W_{ГР}$  – граничные значения абсолютного расхода электроэнергии, используемые для перехода к точкам алгоритма [ $\text{kВт}\cdot\text{ч}$ ];  $W_{РАСЧ}$  – расчетное значение ожидаемого расхода электроэнергии для закрытия пальцев;  $VT_{ПАН}$  – рассчитанные скорости изменения температуры водоохлаждаемых панелей [ $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ ];  $VT_{ЗАД}$  – граничные значения скоростей изменения температуры водоохлаждаемых панелей

[ $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ ];  $K_{ВСПЕН}$  – коэффициент вспенивания шлака, рассчитываемый на основании информации о высших гармониках токов дуг;  $K_{ВСПЕН.ГР}$  – граничные значения коэффициентов вспенивания шлака, используемые для изменения длины электрической дуги на стадии доводки металла.

В данном случае при выборе значения  $N_{PK}$ , помимо стандартных условий по абсолютному расходу электроэнергии, используют также другие технологические параметры, такие как температура водоохлаждаемых панелей, а также коэффициент вспенивания шлака, рассчитанный по сигналу  $U'_{ВГ.НЕЧЕТ.Σ}$ . Набор сочетаний ступеней печного трансформатора и номеров рабочих кривых для различных режимов данного алгоритма приведён в **табл. 2**. При этом режимы 6, 7 и 8 соответствуют режимам с разными длинами дуг для поздней стадии плавки.

Таким образом, применение усовершенствованного блока позволит обеспечить более рациональный расход УСМ, сформировать электрический режим с максимальным тепловым КПД электрических дуг в соответствии с текущим распределением вспененного шлака в ванне печи, а также адаптировать работу инжектора к различным режимам продувки расплава. При этом особую актуальность для дальнейших исследований приобретает задача установки взаимосвязи между  $K_{ШЛАКУ}$ , уровнем вспененного шлака и режимом продувки расплава.

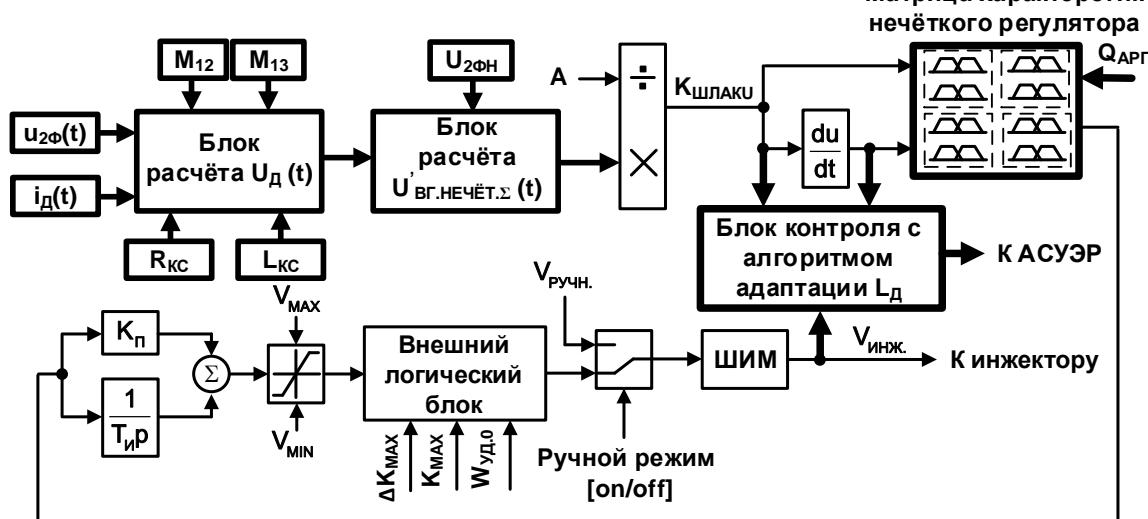


Рис. 6. Структура усовершенствованного блока управления инжектором УСМ (дополнительные блоки усовершенствованной системы управления инжектором УСМ выделены жирными линиями)

Fig. 6. The structure of the modified carbon-injection control block (additional blocks of the improved carbon-injection control system are highlighted in bold)

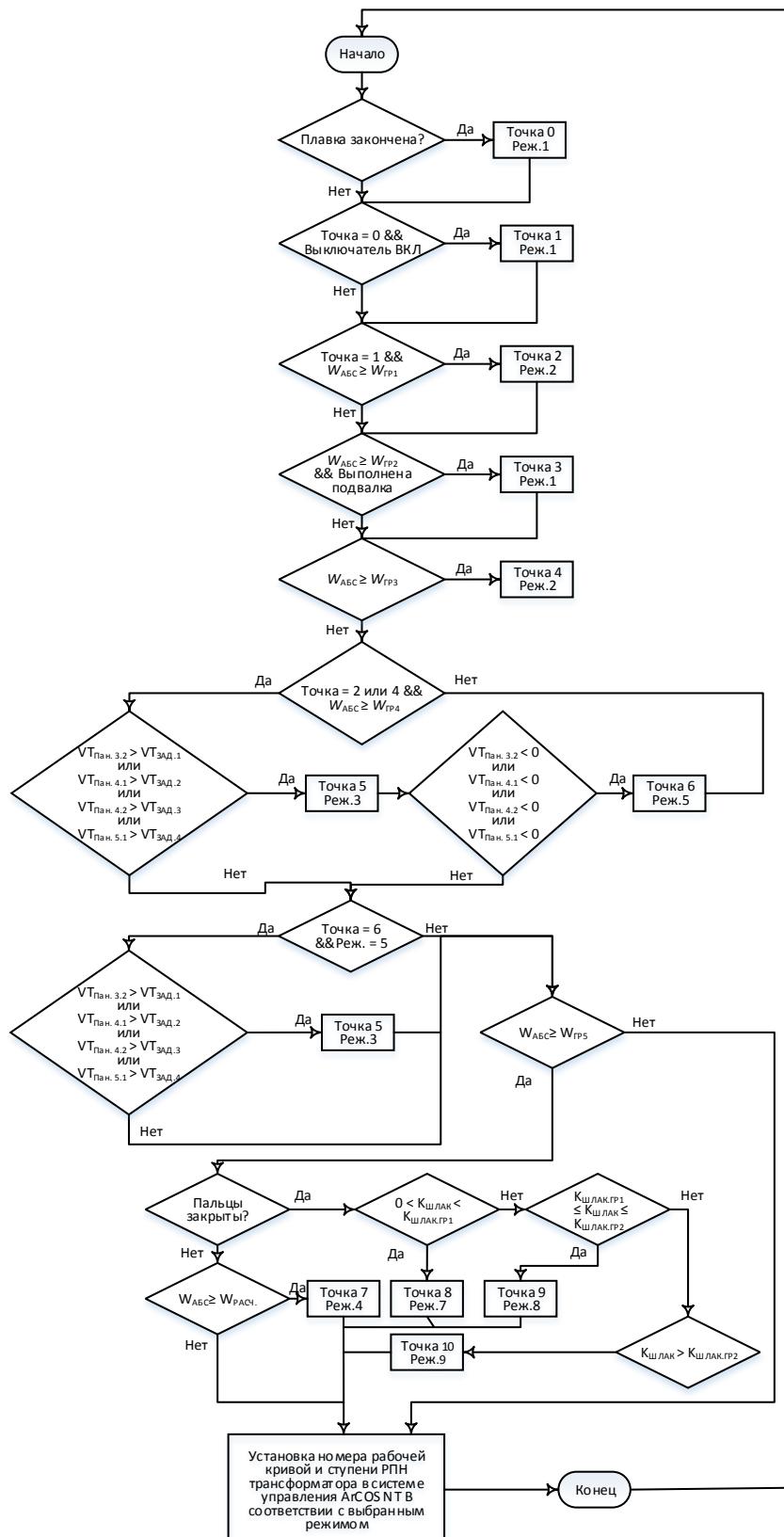


Таблица 2. Набор сочетаний ступеней печного трансформатора и номеров рабочих кривых для различных режимов алгоритма автоматической адаптации длины дуги к шлаковому режиму

Table 2. The values of furnace transformer taps and operating curve numbers for the modified adaptation algorithm of electric arc length to a slag level

Номер режима	Номер ступени печного трансформатора $N_{TP}$	Номер рабочей кривой $N_{PK}$
1	7	5
2	9	5
3	9	3
4	8	4
5	9	5
6	8	3
7	8	2
8	8	1

### Заключение

1. В настоящее время существует два основных подхода к управлению инжекторами УСМ в ДСП. Первый подход основан на анализе сигналов с виброакселерометров, установленных на кожухе печи. Несмотря на эффективность, данный подход не получил широкого распространения на практике ввиду того, что эксплуатация вибрационных датчиков в агрессивных условиях электросталеплавильных цехов часто приводит к их поломке. Второй подход основан на анализе гармонического состава тока электрической дуги. В его основе лежит явление сокращения доли высших гармонических составляющих в составе сигнала тока дуги по мере экранирования электрических дуг вспененным шлаком. Тем не менее данный подход, а также его реализация в современных системах управления электрическим режимом имеет ряд недостатков. На примере блока управления инжекторами в системе ARCOS (Primetals Technologies, ранее Siemens VAI, VAI Fuchs, Vantron, Германия) было выявлено, что работа блока была слишком инерционной ввиду необходимости применения фильтров с большими постоянными временем. Данная необходимость вызвана тем, что параметр управления  $K_{шлак}$ , рассчитываемый на основе суммарного коэффициента гармонических составляющих  $K_I$ , сильно подвержен влиянию несимметричных режимов и колебаний длины дуг. Помимо этого, к недостаткам существую-

щего технического решения можно отнести отсутствие учёта режима продувки, а также отсутствия блока контроля продолжительной работы инжекторов без существенного изменения уровня вспененного шлака.

2. В связи с этим в исследовании предложена структура нового блока управления инжектором УСМ, отличающаяся тем, что в качестве параметра управления в ней используется более стабильный показатель  $K_{шлак}$ , который рассчитывается на основе относительного действующего значения нечетных гармоник напряжения дуги. Помимо этого, в новой структуре предусмотрен дополнительный блок контроля, который в случае низкого качества УСМ и недостаточного образования вспененного шлака адаптирует электрический режим путём сокращения длины электрической дуги. Кроме того, в блоке предусмотрена возможность адаптации характеристик нечёткого регулятора к режимам аргонной продувки. Применение результатов данного исследования на действующем производстве позволит обеспечить сокращение расхода УСМ, а также увеличение среднего значения теплового КПД электрических дуг на протяжении плавки. В дополнение к вышеперечисленному сформирована база для проведения дальнейших исследований, направленных на установку взаимосвязи между уровнем  $K_{шлак}$ , уровнем вспененного шлака и интенсивностью продувки для адекватной настройки регулятора в составе блока управления инжектором УСМ.

### Список литературы

1. Advanced Foaming Slag Control / Jansen T., Krüger K., Schliephake H. et al. // 10th European Electric Steelmaking Conference, Graz. 25–28 Sep., 2012, pp. 385–390.
2. Сериков В.А. Акустические и вибрационные характеристики сверхмощных дуговых сталеплавильных электропечей: дис. ... канд. техн. наук / Сериков Виктор Андреевич. Новосибирск, 2016. 147 с.
3. Николаев А.А., Тулупов П.Г., Ивекеев В.С. Сравнительный анализ современных систем управления электрическим режимом дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2020. Т. 20, №3. С. 52–64. DOI: 10.14529/power200306.
4. Николаев А.А., Тулупов П.Г., Омельченко Е.Я. Экспериментальные исследования гармонического состава токов и напряжений дуг мощной дуговой сталеплавильной печи шахтного типа // Электротехнические системы и комплексы. 2018. №4 (41). С. 63–72.

5. Cassie A.M. Nouvelle théorie des arcs de rupture et rigidité du circuit (New theory of breaker arcs and circuit rigidity) // CIGRE Report. No. 102. 1939.
6. Krüger K. Modellbildung und Regelung der elektrischen Energieumsetzung von Lichtbogenöfen (Modeling and control of the electrical energy conversion in arc furnaces) / Dr.-Ing. Dissertation, Fachbereich Maschinenbau, Universität der Bundeswehr Hamburg, Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 6, Nr. 382. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998.
7. Bowman B., Krüger K. Arc Furnace Physics // Verlag Stahleisen GmbH. Düsseldorf, 2009.
8. Harmonic Analysis of the Industrial Power System with an AC Electric Arc Furnace / G.W. Chang, Y.J. Liu, H.M. Huang, S.Y. Chu // Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting. 2016. Montreal. Canada. IEEE, pp. 1–4. DOI: 10.1109/PES.2006.1709471.
9. Ye Xiao-Mei. The Harmonic Detection based on Wavelet Transform and FFT for Electric Arc Furnaces / Ye Xiao-Mei, Liu Xiao-He // Proceedings of International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition. Baoding. China. IEEE. 2009, pp. 408–412. DOI: 10.1109/ICWAPR.2009.5207486.
10. Simulation Research of Harmonics in Electric System of Arc Furnace / Yongning Wang, Heming Li, Boqiang Xu, Liling Sun // Proceedings of Power System Technology International Conference. IEEE. 2004. Vol.1. Pp. 902–906. DOI: 10.1109/ICPST.2004.1460122.
11. Анализ гармонического состава токов и напряжений дуг в дуговой сталеплавильной печи с использованием математической модели / А.А. Николаев, П.Г. Тулупов, А.С. Денисевич, С.С. Рыжевол // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2021. Т. 21, №2. С. 72–84.
12. Электрические промышленные печи: дуговые печи и установки специального нагрева: учебник для вузов / А.Д. Свенчанский, И.Т. Жердев, А.М. Кручинин [и др.]; под общ. ред. А.Д. Свенчанского. М.: Энергоиздат, 1981. 296 с.
13. Макаров А.Н. Законы теплообмена электрической дуги и факела в металлургических печах и энергетических установках. Тверь: Изд-во Тверск. гос. техн. ун-та, 2012. 164 с.
14. Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika [Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering], 2020, vol. 20, no. 3, pp. 52–64. (In Russ.) DOI: 10.14529/power200306
15. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Omelchenko E.Ya. Experimental analysis of the electric arc current and electric arc voltage harmonic composition of the high power shaft electric arc furnace. *Elektrotehnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 4(41), pp. 63–72. (In Russ.) [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-63-72](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-63-72)
16. Cassie A.M. Nouvelle théorie des arcs de rupture et rigidité du circuit (New theory of breaker arcs and circuit rigidity). CIGRE Report. No. 102, 1939.
17. Krüger K. Modellbildung und Regelung der elektrischen Energieumsetzung von Lichtbogenöfen (Modeling and control of the electrical energy conversion in arc furnaces). Dr.-Ing. Dissertation, Fachbereich Maschinenbau, Universität der Bundeswehr Hamburg, Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 6, Nr. 382. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998.
18. Bowman B., Krüger K. Arc Furnace Physics. Verlag Stahleisen GmbH. Düsseldorf, 2009.
19. Chang G.W., Liu Y.J., Huang H.M., Chu S.Y. Harmonic analysis of the industrial power system with an AC electric arc furnace. Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting. 2016. Montreal. Canada. IEEE, pp. 1–4. DOI: 10.1109/PES.2006.1709471.
20. Ye Xiao-Mei, Liu Xiao-He. The harmonic detection based on wavelet transform and FFT for electric arc furnaces. Proceedings of International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition. Baoding. China. IEEE, 2009, pp. 408–412. DOI: 10.1109/ICWAPR.2009.5207486.
21. Yongning Wang, Heming Li, Boqiang Xu, Liling Sun. Simulation research of harmonics in electric system of arc furnace. Proceedings of Power System Technology International Conference. IEEE. 2004, vol. 1, pp. 902–906. DOI: 10.1109/ICPST.2004.1460122.
22. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Denisevich A.S., Ryzhevolev S.S. Mathematical model for the harmonic analysis of electric arc currents and voltages in an electric arc furnace. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering], 2021, vol. 21, no. 2, pp. 72–84. (in Russ.) DOI: 10.14529/power210208
23. Svenchansky A.D., Zherdev I.T., Kruchinin A.M. et al. *Elektricheskie promyshlennye pechi: Dugovye pechi i ustanovki spetsialnogo nagreva: Uchebnik dlya vuzov* [Electric industrial furnaces: Arc furnaces and special heating installations: A textbook for universities]. Moscow: Energoizdat, 1981, 296 p. (In Russ.)
24. Makarov A.N. *Zakony teploobmena elektricheskoy dugi i fakela v metallurgicheskikh pechakh i energeticheskikh ustanovkakh* [The laws of heat transfer between an electric arc and a torch in metallurgical furnaces and power plants]. Tver: Publishing House of Tver State Technical University, 2012, 164 p. (In Russ.)

### References

1. Jansen T., Krüger K., Schliephake H. et al. Advanced foaming slag control. 10th European Electric Steelmaking Conference, Graz. 25–28 Sep., 2012, pp. 385–390.
2. Serikov V.A. *Akusticheskie i vibratsionnye kharakteristiki sverkhmoshchnykh dugovykh staleplavilnykh elektropechey: diss. kand. tekhn. nauk* [Acoustic and vibrational characteristics of high power electric arc furnaces. PhD thesis]. Novosibirsk, 2016. 147 p.
3. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Ivezkeev V.S. The comparative analysis of modern electric mode control systems in electric arc and ladle furnaces. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering], 2020, vol. 20, no. 3, pp. 52–64. (In Russ.) DOI: 10.14529/power200306
4. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Omelchenko E.Ya. Experimental analysis of the electric arc current and electric arc voltage harmonic composition of the high power shaft electric arc furnace. *Elektrotehnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 4(41), pp. 63–72. (In Russ.) [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-63-72](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-63-72)
5. Cassie A.M. Nouvelle théorie des arcs de rupture et rigidité du circuit (New theory of breaker arcs and circuit rigidity). CIGRE Report. No. 102, 1939.
6. Krüger K. Modellbildung und Regelung der elektrischen Energieumsetzung von Lichtbogenöfen (Modeling and control of the electrical energy conversion in arc furnaces). Dr.-Ing. Dissertation, Fachbereich Maschinenbau, Universität der Bundeswehr Hamburg, Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 6, Nr. 382. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998.
7. Bowman B., Krüger K. Arc Furnace Physics. Verlag Stahleisen GmbH. Düsseldorf, 2009.
8. Chang G.W., Liu Y.J., Huang H.M., Chu S.Y. Harmonic analysis of the industrial power system with an AC electric arc furnace. Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting. 2016. Montreal. Canada. IEEE, pp. 1–4. DOI: 10.1109/PES.2006.1709471.
9. Ye Xiao-Mei, Liu Xiao-He. The harmonic detection based on wavelet transform and FFT for electric arc furnaces. Proceedings of International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition. Baoding. China. IEEE, 2009, pp. 408–412. DOI: 10.1109/ICWAPR.2009.5207486.
10. Yongning Wang, Heming Li, Boqiang Xu, Liling Sun. Simulation research of harmonics in electric system of arc furnace. Proceedings of Power System Technology International Conference. IEEE. 2004, vol. 1, pp. 902–906. DOI: 10.1109/ICPST.2004.1460122.
11. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Denisevich A.S., Ryzhevolev S.S. Mathematical model for the harmonic analysis of electric arc currents and voltages in an electric arc furnace. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering], 2021, vol. 21, no. 2, pp. 72–84. (in Russ.) DOI: 10.14529/power210208
12. Svenchansky A.D., Zherdev I.T., Kruchinin A.M. et al. *Elektricheskie promyshlennye pechi: Dugovye pechi i ustanovki spetsialnogo nagreva: Uchebnik dlya vuzov* [Electric industrial furnaces: Arc furnaces and special heating installations: A textbook for universities]. Moscow: Energoizdat, 1981, 296 p. (In Russ.)
13. Makarov A.N. *Zakony teploobmena elektricheskoy dugi i fakela v metallurgicheskikh pechakh i energeticheskikh ustanovkakh* [The laws of heat transfer between an electric arc and a torch in metallurgical furnaces and power plants]. Tver: Publishing House of Tver State Technical University, 2012, 164 p. (In Russ.)

Поступила 15.03.2022; принята к публикации 05.04.2022; опубликована 28.06.2022  
Submitted 15/03/2022; revised 05/04/2022; published 28/06/2022

**Николаев Александр Аркадьевич** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой АЭПиМ, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: aa.nikolaev@magtu.ru. ORCID 0000-0001-5014-4852

**Тулупов Платон Гарриевич** – младший научный сотрудник кафедры АЭПиМ, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: tulupov.pg@mail.ru. ORCID 0000-0002-3058-2406

**Рыжевол Сергей Сергеевич** – аспирант кафедры АЭПиМ, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: snaffls18@gmail.com. ORCID 0000-0001-8525-279X

**Ивекеев Владимир Сергеевич** – младший научный сотрудник кафедры АЭПиМ, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: vivekeev@yandex.ru. ORCID 0000-0002-0730-8257

**Alexander A. Nikolaev** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Head of the Automated Electric Drives and Mechatronics Department,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: aa.nikolaev@magtu.ru. ORCID 0000-0001-5014-4852

**Platon G. Tulupov** – junior researcher of the Automated Electric Drives and Mechatronics Department,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: tulupov.pg@mail.ru. ORCID 0000-0002-3058-2406

**Sergey S. Ryzhevov** – postgraduate student of the Automated Electric Drives and Mechatronics Department,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: snaffls18@gmail.com. ORCID 0000-0001-8525-279X

**Vladimir S. Ivekeev** – junior researcher of the Automated Electric Drives and Mechatronics Department,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: vivekeev@yandex.ru. ORCID 0000-0002-0730-8257