

РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ УСТАНОВОК КОВШ-ПЕЧЬ С АНАЛИЗОМ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ТОКОВ ДУГ

А.А. Николаев, aa.nikolaev@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5014-4852>

В.С. Ивекеев, vivekeev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0730-8257>

П.Г. Тулупов, tulupov.pg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3058-2406>

С.С. Рыжевол, snaffs18@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8525-279X>

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

Аннотация. Целью данного исследования является разработка усовершенствованных алгоритмов управления электрическими режимами установок ковш-печь, предусматривающих автоматическую адаптацию длин электрических дуг к различным условиям аргоновой продувки и разной толщине шлака. Рассмотрены вопросы оптимизации несимметричных режимов горения дуг, обеспечивающих максимальное снижение излучений и повышение теплового КПД в фазах, расположенных рядом с зеркалом жидкого металла при донной продувке и работе аварийной фурмы. Приведены результаты экспериментальных исследований поведения поверхности жидкого металла и шлака при различных режимах аргоновой продувки, а также различной толщине шлакового слоя. На основе результатов экспериментов предложены новые алгоритмы управления электрическим режимом установки ковш-печь. Данные алгоритмы позволяют производить динамическую адаптацию длин электрических дуг к изменяющимся режимам аргоновой продувки, а также шлаковым режимам с использованием информации о гармоническом составе токов дуг. За счёт этого обеспечиваются необходимые условия для улучшения энергетических, временных и технологических показателей установок ковш – печь, поскольку от корректной адаптации электрического режима к изменяющимся условиям плавки напрямую зависит величина теплового КПД электрических дуг, а также КПД технологической установки в целом.

Ключевые слова: установка ковш-печь, система управления электрическими режимами, гармоники тока электрической дуги, коэффициент шлака, аргоновая продувка

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

Для цитирования: Разработка усовершенствованных алгоритмов управления электрическими режимами установок ковш-печь с анализом гармонического состава токов дуг / А.А. Николаев, В.С. Ивекеев, П.Г. Тулупов, С.С. Рыжевол // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2022. Т. 22, № 3. С. 62–75. DOI: 10.14529/power220307

Original article
DOI: 10.14529/power220307

DESIGN OF IMPROVED CONTROL ALGORITHMS FOR LADLE FURNACES WITH ANALYSIS OF ELECTRIC ARC CURRENT HARMONIC COMPOSITION

A.A. Nikolaev, aa.nikolaev@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5014-4852>

V.S. Ivekeev, vivekeev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0730-8257>

P.G. Tulupov, tulupov.pg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3058-2406>

S.S. Ryzhevov, snaffs18@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8525-279X>

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The aim of this research is the design of improved control algorithms for ladle furnaces, considering arc length adaptation to different argon blow conditions and slag layer depth. The paper considers the issues of optimizing asymmetric arc burning regimes, which ensure the maximum reduction in radiation and an increase in thermal efficiency in phases located near the liquid metal mirror during bottom blowing and emergency lance operation. The experimental results of liquid bath surface behavior in dependence from blowing intensity and slag layer depth are presented. On the basis of experimental results, new algorithms of electric modes control in ladle furnaces are proposed. These algorithms allow dynamic adaptation of electric arc lengths to different argon blowing modes and slag layer depth to be provided. Applying of this algorithm allows the requisite conditions for improving of different quality indicators in

ladle furnace to be ensured, since the correct adaptation of electric mode to varying conditions of melting has a direct connection with thermal efficiency of electric arcs and efficiency of equipment in general.

Keywords: ladle furnace, electric modes control system, electric arc current harmonic composition, slag coefficient, argon blowing

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the government order (project No. FZRU-2020-0011) of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation: Nikolaev A.A., Ivekeev V.S., Tulupov P.G., Ryzhev S.S. Design of improved control algorithms for ladle furnaces with analysis of electric arc current harmonic composition. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2022;22(3):62–75. (In Russ.) DOI: 10.14529/power220307

Введение

Важную роль в современной металлургической промышленности занимает производство жидкой стали в дуговых сталеплавильных печах (ДСП). На сегодняшний день из всего годового объема выпускаемой продукции, полученной на отечественных предприятиях, порядка 30 % производится в электросталеплавильных цехах. Неотъемлемым звеном в технологической цепочке производства электростали является установка ковш-печь (УКП). Основной функцией данного агрегата является доведение жидкого полупродукта до необходимого химического состава в соответствии с заданной маркой стали. Стоит отметить, что данные агрегаты являются весьма энергоемкими и влекут за собой значительные эксплуатационные затраты. Так, например, мощности печных трансформаторов современных УКП превышают значения 50 МВА [1, 2]. Исходя из этого все большую актуальность приобретают вопросы, направленные на оптимизацию электрических режимов электросталеплавильных агрегатов с целью улучшения их временных, энергетических и технологических показателей работы [3–6]. При этом, как показывает анализ отечественной и зарубежной литературы, малоизученным является вопрос разработки и внедрения алгоритмов и систем управления электрическими режимами УКП с автоматической адаптацией к изменяющимся условиям аргонной продувки и шлаковым режимам.

Современные электросталеплавильные агрегаты в большинстве случаев оснащены собственными системами управления электрическими режимами, установленными заводами-изготовителями (регуляторы Melt Expert, ArCOS, Simelt, Q-REG, HI-REG, Ferrotron – DECTEQ и др.). Функциональные возможности вышеперечисленных систем управления для УКП являются ограниченными. В большинстве систем управления заданные параметры регулирования (полное сопротивление фазы $Z_{2\Phi}$, активное сопротивление дуг R_d или полные проводимости фаз $Y_{2\Phi}$) рассчитываются заранее для различных сочетаний ступеней РПН печного трансформатора (N_{TP}) и рабочих кривых (N_{PK}), определяющих длину электрической дуги, а выбор необходимых ступеней трансформатора осуществляется вручную технологическим персоналом. Таким образом, можно сделать вывод

о том, что в современных системах управления электрическими режимами УКП отсутствует автоматическая адаптация электрических режимов к изменяющимся режимам аргонной продувки, а также шлаковым режимам, от которых зависит степень экранирования электрических дуг и их тепловой КПД [7, 8].

Таким образом, целью данного исследования является разработка интеллектуальных систем автоматического управления электрическими режимами УКП с функцией динамической адаптации длин электрических дуг и ступеней РПН печного трансформатора к текущему шлаковому режиму и режиму аргонной продувки с учетом расположения возмущений (зеркал металла) на поверхности жидкой ванны относительно электродов фаз УКП, создаваемых работой продувочных блоков в днище стальной ванны или аварийной фурмы. В качестве критерия, по которому предлагается реализация динамической коррекции электрических режимов УКП, может выступать гармонический состав токов дуг, определяемый суммарным коэффициентом гармонических составляющих тока K_I (в зарубежной терминологии – параметр Total Harmonic Distortion или THD_I).

Результаты экспериментальных исследований поведения поверхности жидкого металла и шлака при различных режимах аргонной продувки с учетом измененного расположения продувочного блока

Технически операция аргонной продувки выполняется с помощью специальных продувочных блоков, установленных в большинстве случаев в днище стальной ванны. Режим донной продувки выставляется вручную сталеваром с визуальной оценкой степени перемешивания металла через рабочее окно. В данном случае расход аргона и его давление используются как основные задающие параметры. При продувке аргоном на поверхности жидкой ванны с внешним слоем шлака образуется зеркало металла. Размеры зеркала зависят от расхода аргона, состояния и положения донных пробок, толщины шлакового слоя, температуры расплава и шлака. Вследствие интенсивной аргонной продувки зеркало металла создает возмущения, оказывающие негативное влияние на режимы горения электрических дуг фаз УКП, расположен-

ных наиболее близко к зоне продувки. Рассмотрим данный процесс на примере установок ковш-печь для обработки стальной с металлом 125 т, с мощностью печного трансформатора 25 МВА, функционирующих на одном из металлургических предприятий (рис. 1, 2). Схемы расположения продувочных блоков в днищах стальной показаны на рис. 2. В обоих случаях фазы 1 и 2 подвержены наиболее сильному влиянию зеркала металла.

Достижение максимального эффекта по повышению стойкости футеровки стальной требует проведения дополнительных работ по коррекции электрических режимов УКП 1, 2 и алгоритмов автоматического переключения рабочих кривых из-за изменения влияния зеркала жидкого металла на режимы горения электрических дуг.

На представленных УКП были проведены экспериментальные исследования поведения поверхности жидкого металла и шлака при различных режимах аргонной продувки и выполнены исследования геометрии зеркала жидкого металла при работе аварийной фурмы. Исследования проводились с использованием видеофиксации. Были проведены четыре серии экспериментов. Первая серия – для пониженной температуры расплава $T = 1568\text{ }^{\circ}\text{C}$ и толщины шлака $h_{\text{ш}} = 150\text{ мм}$, вторая – для повышенной температуры $T = 1602\text{ }^{\circ}\text{C}$ и толщины шлака $h_{\text{ш}} = 150\text{ мм}$. Первая и вторая серии экспериментов проводились при донной продувке аргоном, третья и четвертая серии экспериментов проводились при аргонной продувке через аварийную фурму. Третья серия экспериментов проводилась для пониженной температуры $T = 1552\text{ }^{\circ}\text{C}$ и толщины шлака $h_{\text{ш}} = 120\text{ мм}$, четвертая – для повышенной температуры $T = 1610\text{ }^{\circ}\text{C}$ и толщины шлака $h_{\text{ш}} = 120\text{ мм}$. Это позволило оценить влияние степени разжижения шлака на геометрические параметры зеркала, а также на образование волн и брызг.

В качестве примера рассмотрим более подробно первую серию экспериментов для УКП 1 при

различных режимах аргонной продувки. На рис. 3 четко прослеживается процесс образования зеркала, увеличение его диаметра, а также появление волн и брызг, закорачивающих в начале фазу «1», а затем фазы «1» и «2». Граничное значение давления $P_{\text{АРГ}}$, при котором негативное воздействие на фазы становится максимально возможным, составляет 8 атм. Посредством компьютерного анализа набора фотокадров с использованием основных оптических характеристик видеоаппаратуры (угол и высота расположения камеры, значение оптического зума и т. д.) были восстановлены геометрические параметры зеркала жидкого металла. Анализ показал, что диаметр зеркала при интенсивной продувке достигает значения $D_3 = 1005\text{ мм}$. Критическое значение $D_{3,\text{КРИТ}}$ составляет 577 мм, что приводит к наиболее нестабильным режимам нагрева со значительными колебаниями токов и мощностей дуг и сопровождается снижением КПД электрических дуг, что сказывается на эффективности нагрева жидкой ванны. Результаты анализа геометрических параметров зеркала сведены в таблицу. По полученным данным построена зависимость $D_3 = f(P_{\text{АРГ}})$ (рис. 4), для которой получено уравнение регрессии. Порядок и вид уравнения выбирались, исходя из максимального значения коэффициента достоверности аппроксимации R^2 . Приемлемая точность математической модели диаметра зеркала достигалась при $R^2 > 0,95$.

Следует отметить, что при работе аварийной фурмы увеличение зеркала металла происходит быстрее. При давлении аргона, равном 4 атм, происходит резкое увеличение диаметра жидкого металла на поверхности шлакового слоя до значения 985 мм. Максимальный диаметр зеркала при интенсивной продувке достигает значения $D_3 = 1577\text{ мм}$.

При наиболее интенсивных режимах продувки волны и брызги жидкого металла могут приводить к периодическим изменениям длины дуги в определенной фазе, а в некоторых случаях приводить к эксплуатационным коротким замыканиям,



a)



b)

Рис. 1. Общий вид УКП 1 (a) и УКП 2 (b)
Fig. 1. General view of UKP 1 (a) and UKP 2 (b)

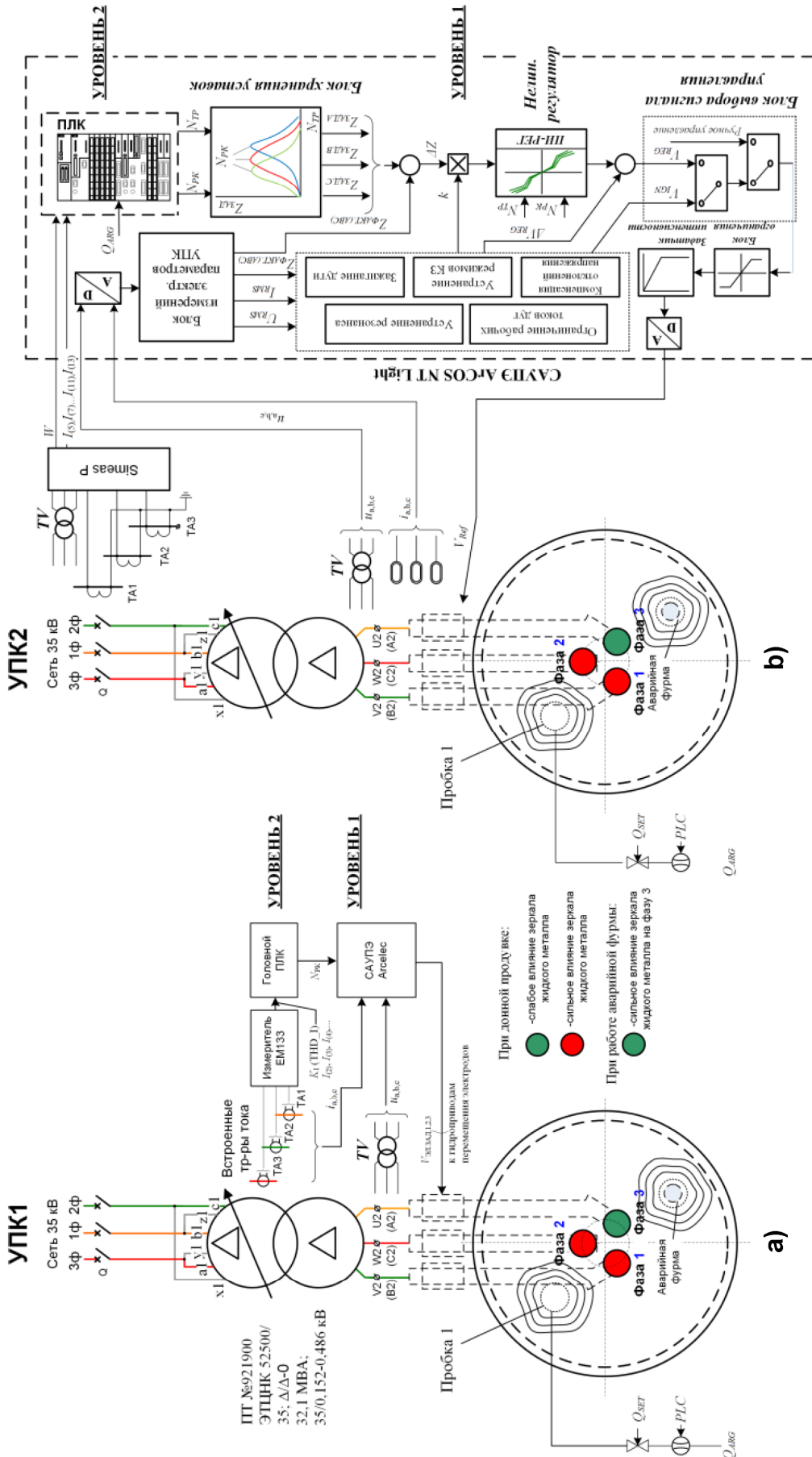


Рис. 2. Расположение продувочного блока в днище стальковша и функциональные схемы систем автоматического управления электрическими режимами УКП 1, 2
Fig. 2. The location of the purge unit in the bottom of the stalkovsky and the functional diagrams of the automatic control systems of the electrical modes UKP 1, 2

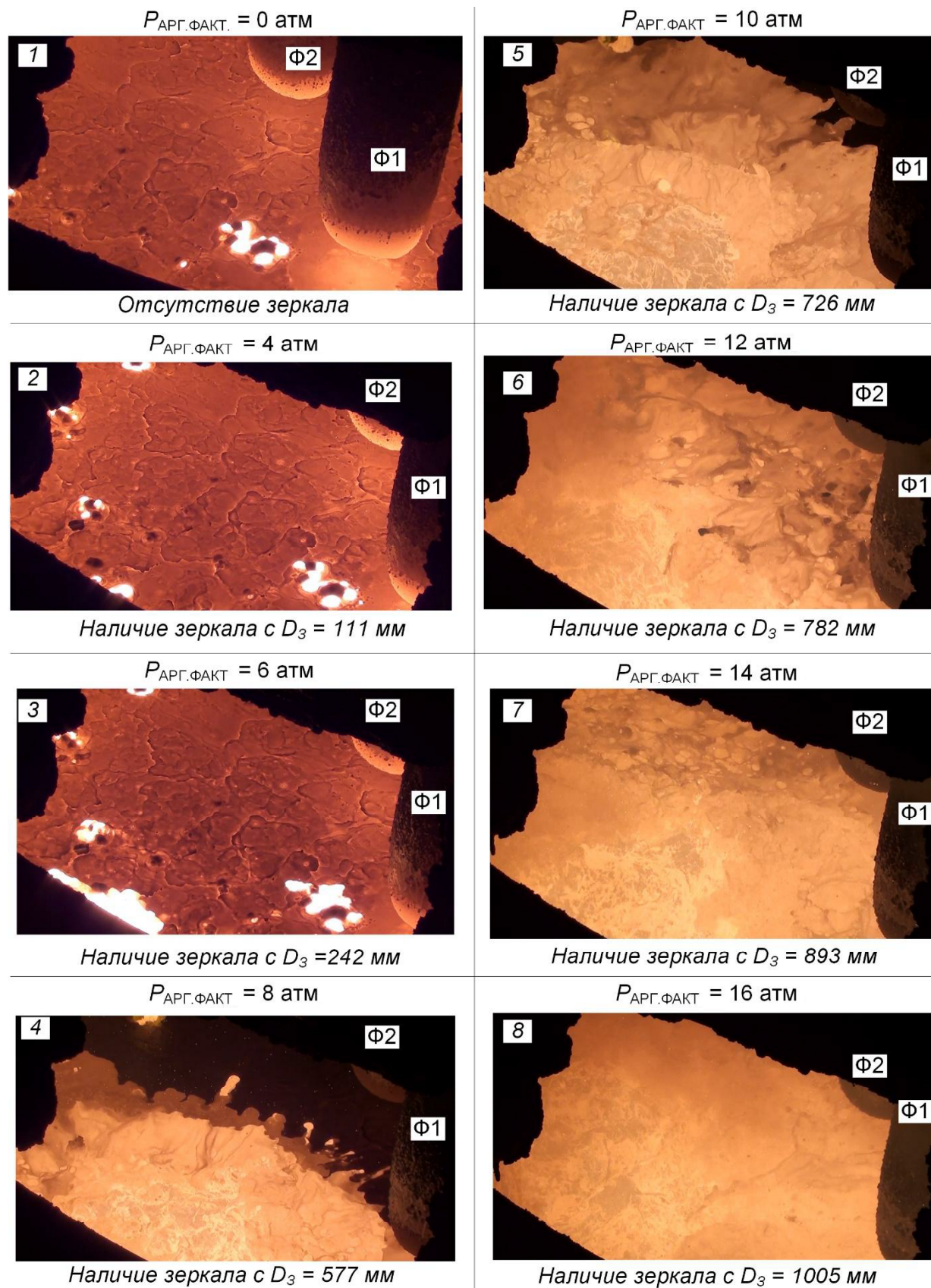


Рис. 3. Исследование зеркала жидкого металла на УКП 1 ЭС при различных режимах аргонной продувки (донная продувка) (температура перед проведением эксперимента $T = 1568 \text{ }^\circ\text{C}$; толщина шлака $h_{\text{ш}} = 150 \text{ мм}$)
Fig. 3. Investigation of the liquid metal mirror on the UCP 1 ES under various modes of argon purging (bottom purging) (temperature before the experiment $T = 1568 \text{ }^\circ\text{C}$; slag thickness $h_{\text{ш}} = 150 \text{ мм}$)

Результаты измерений геометрических параметров зеркала жидкого металла для УКП 1 при различных режимах аргонной продувки (серия измерений № 1, соответствующая донной продувке при $T = 1568 \text{ }^\circ\text{C}$)

Results of measurements of geometrical parameters of liquid metal mirror for UCP 1 under various argon purge modes (measurement series No. 1 corresponding to bottom purge at $T = 1568 \text{ }^\circ\text{C}$)

Номер опыта	Давление аргона $P_{\text{АРГ.ФАКТ}}$, атм	Диаметр зеркала жидкого металла D_3 , мм	Наличие волн жидкого металла, периодически закорачивающих фазу 1	Наличие волн жидкого металла, периодически закорачивающих фазу 2
1	0	0	–	–
2	4	111	–	–
3	6	242	–	–
4	8	577	+	+
5	10	726	+	+
6	12	782	+	+
7	14	893	+	+
8	16	1005	+	+

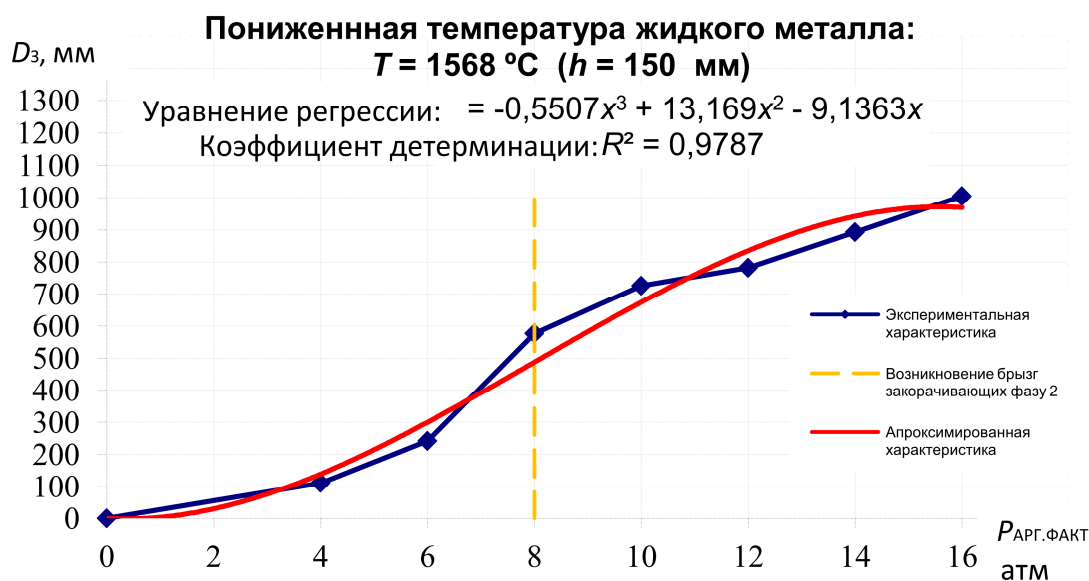


Рис. 4. Экспериментальная зависимость диаметра зеркала жидкого металла на УКП 1 при донной продувке аргоном и температуре металла $T = 1568 \text{ }^\circ\text{C}$
Fig. 4. Experimental dependence of the diameter of the liquid metal mirror on UCP 1 at bottom argon purge and metal temperature $T = 1568 \text{ }^\circ\text{C}$

что в свою очередь приводит к сильным колебаниям мощности электрической дуги. Кроме того, при интенсивной продувке вследствие влияния зеркала металла снижается КПД дуг в фазах, находящиеся в непосредственной близости к продувочным блокам.

Осциллограммы колебаний мгновенных значений токов на первичной стороне печного трансформатора при высокой интенсивности продувки УКП приведены на рис. 5. Очевидно, что подобное явление оказывает сильное негативное влияние на результирующие энергетические показатели эффективности эксплуатации печного комплекса.

Необходимо отметить, что результаты научных исследований, проведенные на различных электросталеплавильных комплексах [9, 10], выявили закономерности изменения гармоник тока в течение всего цикла плавки. В частности, было доказано, что режимы горения электрических дуг на жидкую ванну наилучшим образом описываются

изменением эквивалентного действующего значения четных гармонических составляющих либо суммарным коэффициентом гармонических составляющих тока K_I (в зарубежной терминологии – Total Harmonic Distortion или THD):

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

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 тока.

Для того чтобы определить величину коэффициента шлама $K_{\text{ШЛАК}}$, можно применить обратную величину коэффициента гармонических составляющих тока K_I с учетом масштабного коэффициента a :

$$K_{\text{ШЛАК}} = \frac{a}{K_I}. \quad (2)$$

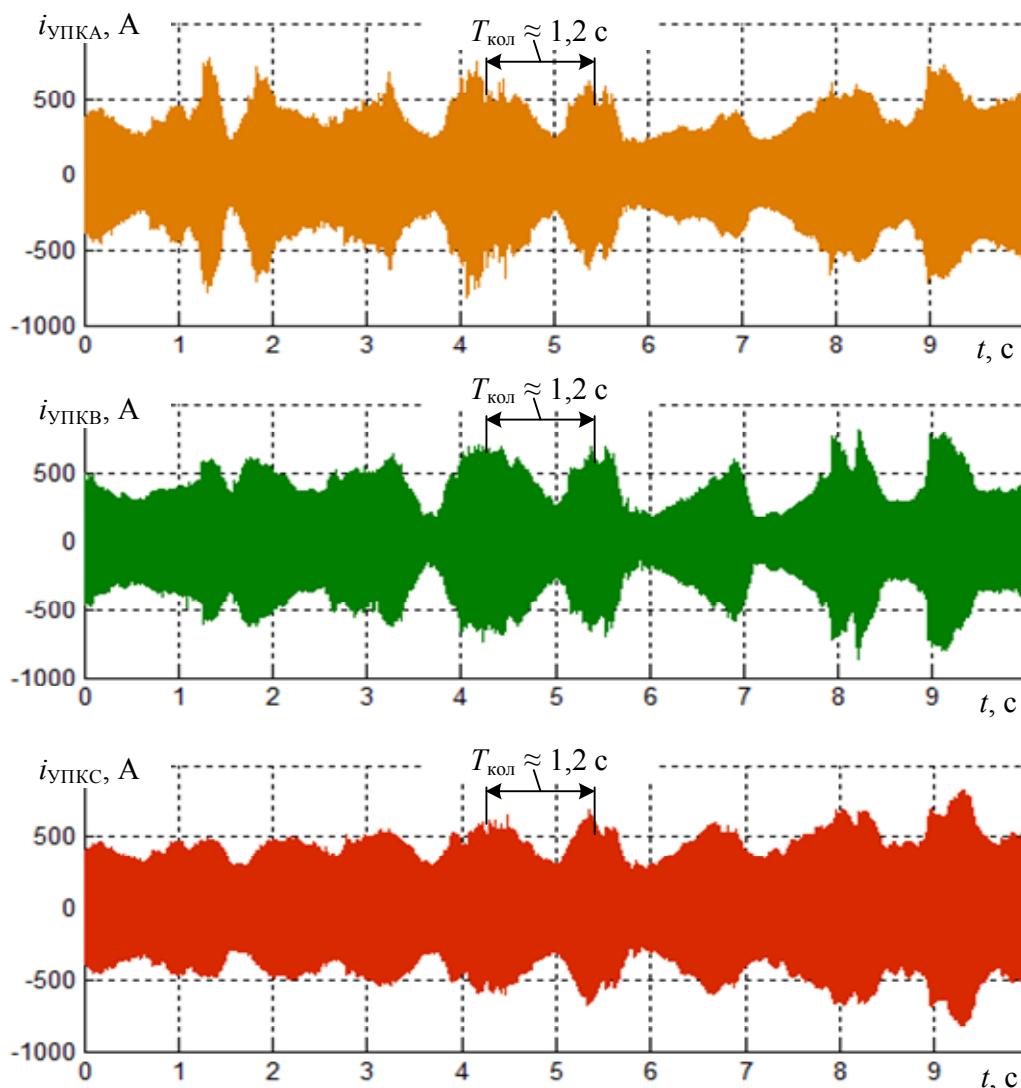


Рис. 5. Изменение мгновенных значений токов на первичной стороне печного трансформатора УКП при интенсивной продувке аргоном с $P_{\text{АРГ}} > 12$ атм
Fig. 5. Change in the instantaneous values of currents on the primary side of the furnace transformer of the UCP, with intensive argon purge with $P_{\text{АРГ}} > 12$ atm

В свою очередь коэффициент a может быть определен как произведение числа 100 на минимальное значение $K_{I \min}$, зафиксированное за цикл плавки при существующей электрической дуге ($I_{\text{д}} > 0$), следует отметить, что на практике значения $K_{I \min} = 2,0-2,5$ %:

$$a = 100 \cdot K_{I \min}. \quad (3)$$

При корректном расчете параметра a максимальное значение $K_{\text{ШЛАК}}$, равное 100 единицам, будет соответствовать наиболее стабильному режиму горения электрической дуги с максимальным тепловым КПД.

Использование параметра $K_{\text{ШЛАК}}$ в алгоритмах автоматического переключения рабочих кривых и ступеней РПН печных трансформаторов позволяет адаптировать электрические режимы УКП с учетом переменной толщины шлака, режимов аргоновой продувки, операций подачи материалов в ковш при нагреве и т. д. Данный факт лег в основу

нового алгоритма управления электрическим режимом УКП.

Разработка усовершенствованных алгоритмов автоматического переключения рабочих кривых, обеспечивающих автоматическую адаптацию электрических режимов УКП 1,2 в зависимости от режима аргоновой продувки и шлакового режима

Как уже было сказано ранее, для минимизации влияния зеркала металла на режимы горения электрических дуг необходимо произвести разработку усовершенствованных алгоритмов автоматического переключения рабочих кривых, обеспечивающих автоматическую адаптацию электрических режимов УКП 1,2 в зависимости от режима аргоновой продувки и шлакового режима. Блок-схема усовершенствованного алгоритма управления показана на рис. 6. Для работы данного алгоритма

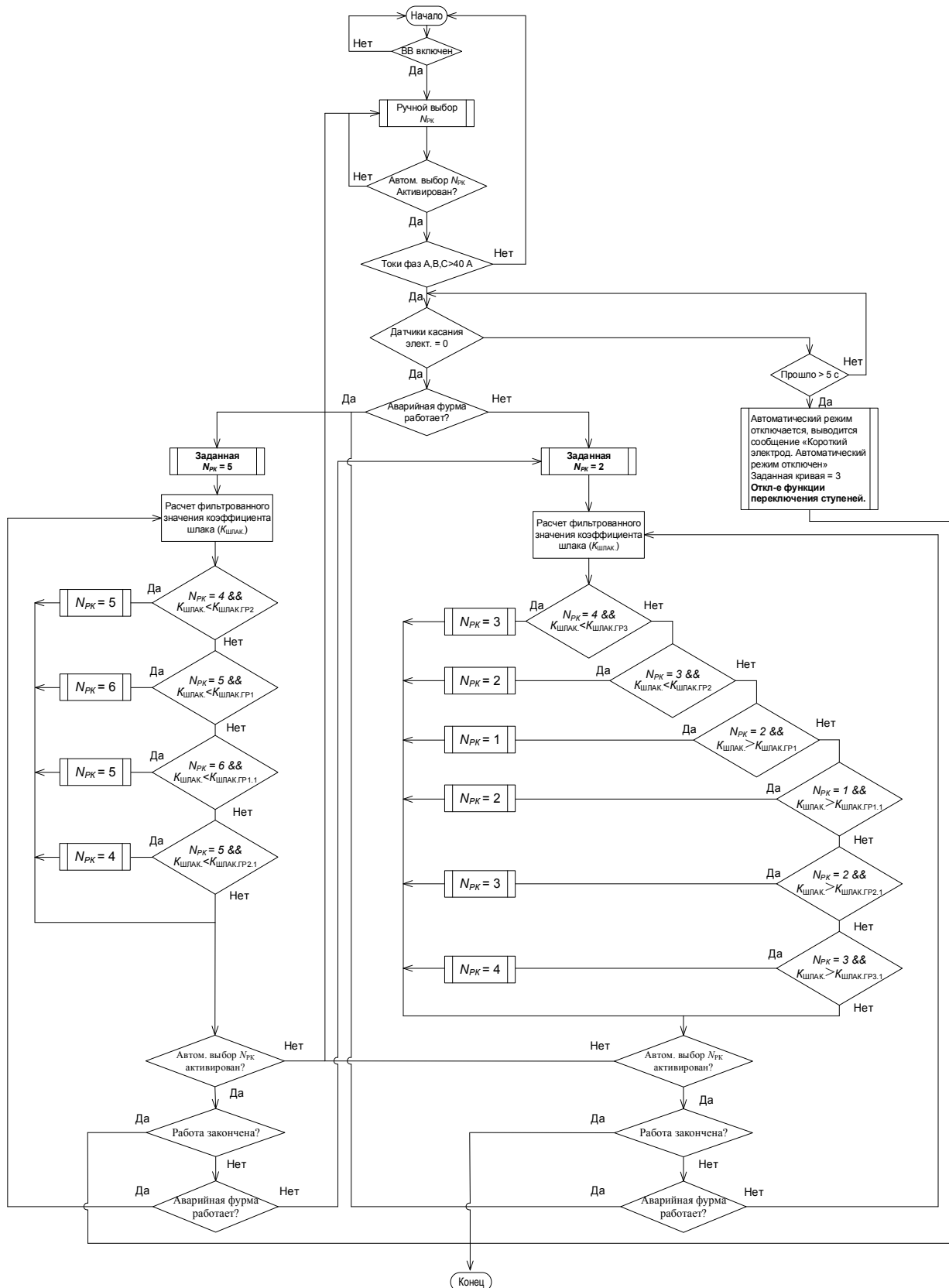


Рис. 6. Блок-схема разработанного алгоритма автоматического переключения рабочих кривых в системе управления ArcOS NT Light УКП в функции текущего коэффициента шлака
Fig. 6. Block diagram of the algorithm developed for automatic switching of working curves in the ArcOS NT Light control system of the UCP as a function of the current slag coefficient

определены граничные значения коэффициентов шлака $K_{\text{ШЛАК}}$ и также предложена формула расчета коэффициента шлака с использованием информации о гармоническом составе токов на первичной стороне печного трансформатора:

$$K_{\text{ШЛАК}1,\Phi_i} = K_{\text{ШЛАК}1,\Phi_{i-1}} + \left(K_{\text{ШЛАК}1,i} - K_{\text{ШЛАК}1,\Phi_{i-1}} \right) \cdot \frac{T_{\text{ЦИКЛ}}}{T_{\Phi}}, \quad (4)$$

где $K_{\text{ШЛАК}}$ – мгновенное (нефильтрованное) значение коэффициента шлака; $K_{\text{ШЛАК}\Phi}$ – фильтрованное значение $K_{\text{ШЛАК}}$; T_{Φ} – постоянная времени фильтра; $T_{\text{ЦИКЛ}}$ – фиксированное время опроса контроллера (0,1 с).

Для настройки разработанных алгоритмов управления с помощью специализированного меню на визуализации сталевара задаются следующие параметры: 1) граничные коэффициенты $K_{\text{ГР}1}$, $K_{\text{ГР}1,1}$, $K_{\text{ГР}2}$, $K_{\text{ГР}2,1}$, $K_{\text{ГР}3}$, $K_{\text{ГР}3,1}$, при которых происходит переключение $N_{\text{РК}}$; 2) весовые коэффициенты $K_{\text{В}(\text{i})}$, учитывающие влияние изменения вторичного напряжения ПТ при переключении ступеней РПН на уровни высших гармоник тока; 3) постоянная времени фильтра T_{Φ} , для получения фильтрованного значения $K_{\text{ШЛАК}}$, используемого в алгоритме автоматического переключения рабочих кривых; 4) минимальное значение тока для исключения работы алгоритма в режиме работы печного трансформатора на холостом ходу (в данном случае 40А). Далее активируется основная часть алгоритма по определению номеров рабочих кривых $N_{\text{РК}}$ в зависимости от текущего уровня коэффициента шлака $K_{\text{ШЛАК}}$ в зависимости от того, действует ли в данный момент донная продувка или аварийная фурма. Более наглядно данный процесс показан на рис. 7. На представленных графиках в целях упрощения смоделировано поведение фильтрованного значения $K_{\text{ШЛАК}}$ с возрастающим и спадающим участками.

Для режима донной продувки при достижении граничных коэффициентов шлака $K_{\text{ГР}1,1}$, $K_{\text{ГР}2,1}$, $K_{\text{ГР}3,1}$ осуществляется увеличение номера рабочей кривой с $N_{\text{РК}} = 1$ до $N_{\text{РК}} = 4$ с увеличением длины электрической дуги и изменением степени несимметрии горения дуг. Для повышения устойчивости работы алгоритма и исключения автоколебаний при переключении $N_{\text{РК}}$ в алгоритм введены дублирующие значения граничных коэффициентов, работающие на понижение номера рабочей кривой, – это $K_{\text{ГР}1}$, $K_{\text{ГР}2}$, $K_{\text{ГР}3}$. Для режима работы аварийной фурмы использованы только две пары граничных значений коэффициента шлака на повышение рабочей кривой ($K_{\text{ГР}1,1}$, $K_{\text{ГР}2,1}$, $K_{\text{ГР}1}$, $K_{\text{ГР}2}$) и, соответственно, три значения рабочих кривых с $N_{\text{РК}} = 4$ до $N_{\text{РК}} = 6$ с различной несимметрией горения дуг. Во втором случае увеличение номера рабочей кривой соответствует уменьшению длины электрической дуги и увеличению несимметрии длин электрических дуг с учетом расположения возмущения

на поверхности жидкого металла, создаваемого работой аварийной фурмы [11, 12].

Для обеспечения оптимальных значений тепловых КПД электрических дуг при изменении режима аргоновой продувки и толщины шлака для указанных выше рабочих кривых $N_{\text{РК}}$ введены различные балансовые коэффициенты $K_{\text{БАЛ}1,2,3}$ к уставкам импеданса $Z_{2\Phi 1,2,3}$ вторичного электрического контура У КП. На основании проведенных ранее экспериментальных исследований, описанных в [11, 13], было показано, что для обеспечения стабильного горения дуг [14, 15] и сохранения теплового КПД при увеличении диаметра зеркала металла длины дуг, определенные заданием импеданса вторичного электрического контура $Z_{2\Phi \text{ЗД}}$, в ближайших к зеркалу металла фазах должны быть уменьшены, а в фазе, которая находится на удалении от источника возмущений, – увеличены. Исходя из этого для режима коротких дуг ($N_{\text{РК}} = 1$) использованы максимально несимметричные длины дуг с $K_{\text{БАЛ}1} = 0,95$; $K_{\text{БАЛ}2} = 0,95$; $K_{\text{БАЛ}3} = 1,1$. Для $N_{\text{РК}} = 2$ использованы $K_{\text{БАЛ}1} = 0,96$; $K_{\text{БАЛ}2} = 0,96$; $K_{\text{БАЛ}3} = 1,08$. Для $N_{\text{РК}} = 3$ использованы $K_{\text{БАЛ}1} = 0,975$; $K_{\text{БАЛ}2} = 0,975$; $K_{\text{БАЛ}3} = 1,05$. Для спокойного режима продувки и нормальной толщины шлака, при которых $K_{\text{ШЛАК}}$ имеет максимальное значение, используется $N_{\text{РК}} = 4$ с $K_{\text{БАЛ}1,2,3} = 1$. При использовании аварийной фурмы укорачивается длина дуги в фазе 3, ближайшей к зеркалу металла. При этом балансовые коэффициенты для режима горения коротких дуг $N_{\text{РК}} = 6$ равны: $K_{\text{БАЛ}1} = 1,025$, $K_{\text{БАЛ}2} = 1,025$, $K_{\text{БАЛ}3} = 0,95$. Для режима горения средних дуг $N_{\text{РК}} = 5$ равны: $K_{\text{БАЛ}1} = 1$, $K_{\text{БАЛ}2} = 1,03$, $K_{\text{БАЛ}3} = 0,97$. В режиме горения длинных дуг и продувке через аварийную фурму $N_{\text{РК}} = 4$ $K_{\text{БАЛ}1,2,3} = 1$, аналогично режиму донной продувки.

Необходимо отметить, что перед настройкой алгоритмов управления отдельно для каждой У КП были проведены дополнительные экспериментальные исследования по определению предварительных весовых коэффициентов $K_{\text{ВЕС}}$, используемых в формулах для расчета коэффициентов шлака. При настройке алгоритмов предварительные значения коэффициентов корректировались для достижения оптимального переключения $N_{\text{РК}}$.

В формуле расчета текущего значения коэффициента шлака, используемого для сравнения с граничными значениями для режима донной продувки, $K_{\text{ШЛАК}1,2}$ находится как среднее арифметическое значение коэффициентов шлака фаз 1 и 2 (2 и 1 по первичной стороне ПТ), при этом для режима работы аварийной фурмы рассчитывается значение $K_{\text{ШЛАК}2,3}$ как среднее арифметическое значение коэффициентов шлака фаз 1 и 3 (2 и 3 по первичной стороне ПТ).

На рис. 8 приведены графики, иллюстрирующие фактическую работу усовершенствованных алгоритмов автоматического переключения рабочих кривых.

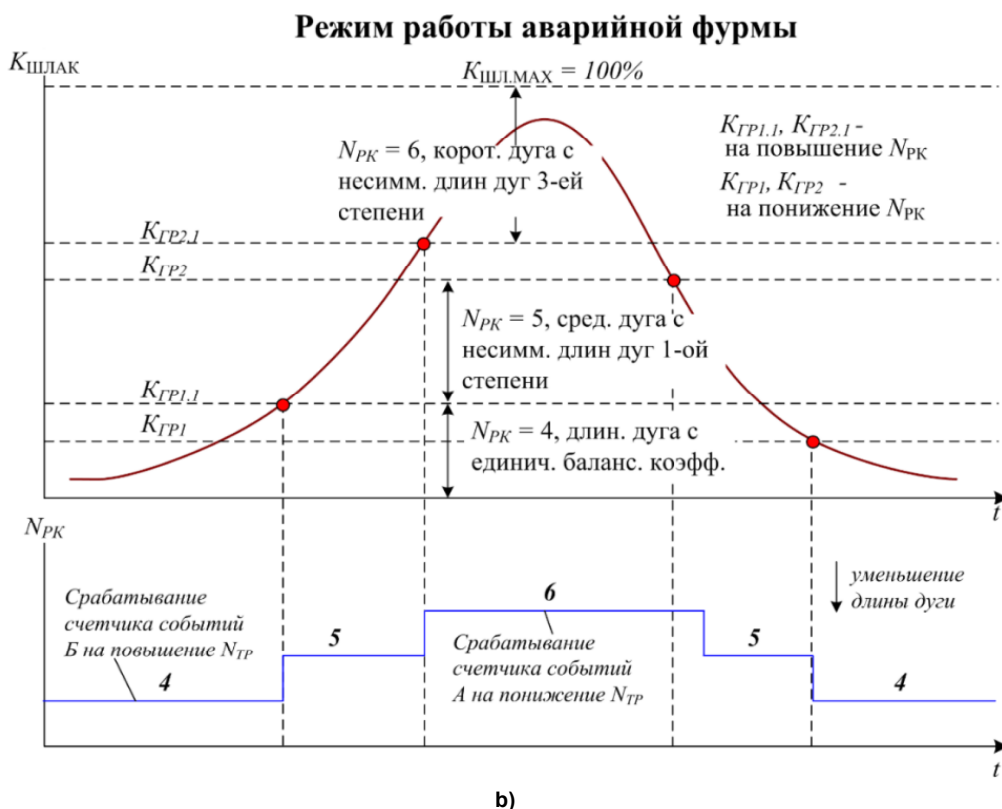
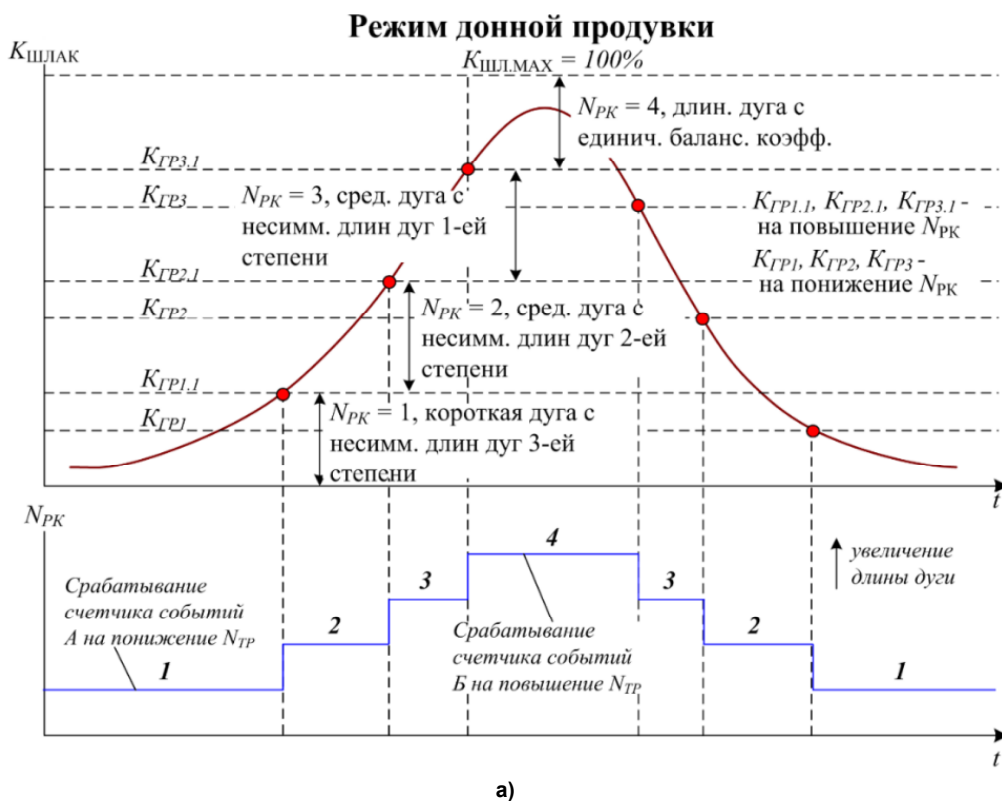


Рис. 7. Пояснение работы алгоритма автоматического переключения рабочих кривых в зависимости от уровня коэффициента шлака $K_{\text{шлак}}$: а – для режима донной продувки; б – для режима работы аварийной фурмы

Fig. 7. Explanation of the algorithm for automatic switching of working curves depending on the level of the slag coefficient $K_{\text{шлак}}$: а – for the bottom purge mode; б – for the emergency tuyere operation mode

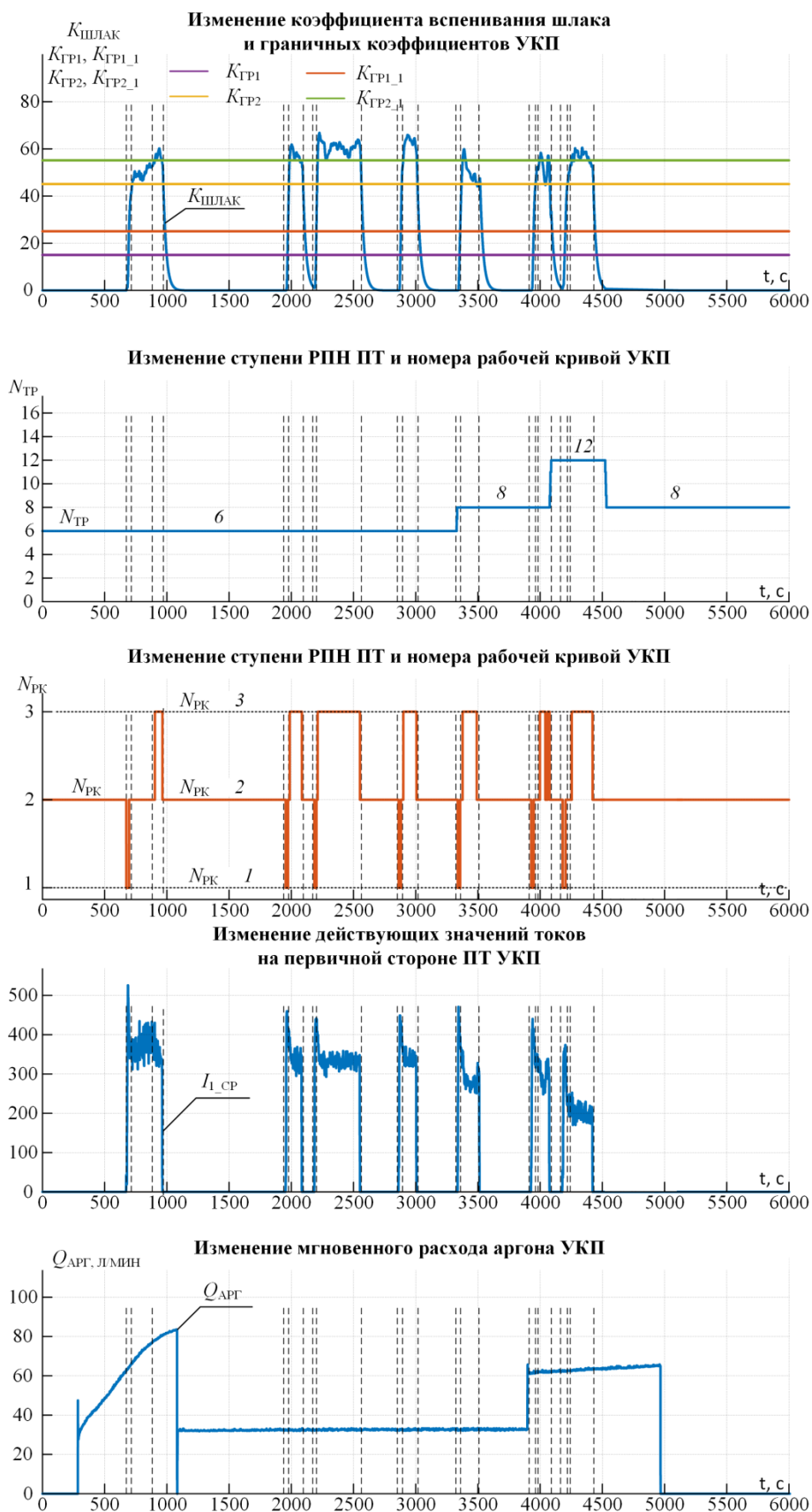


Рис. 8. Работа алгоритма автоматического переключения рабочих кривых NPK в зависимости от уровня коэффициента шлака $K_{\text{шлак}}$ в исследуемом УКП
Fig. 8. Operation of the algorithm for automatic switching of the working curves NPK of the fuel pump depending on the level of the slag coefficient $K_{\text{шлак}}$ in the investigated UCP

Результат оценки показал наличие технического эффекта в снижении расхода электродов – в среднем на 4 %, снижении удельного расхода электрической энергии – в среднем на 3 %, в повышении стойкости футеровки шлакового пояса стальной ванны – на 4,5 %, с 67 до 70 плавов за кампанию.

Заключение

Как показывает практика, режим аргонной продувки стали в установках ковш-печь оказывает существенное влияние на режимы горения электрических дуг. Установлено, что дуги в фазах У КП, расположенных рядом с возмущениями, образованными работой продувочного блока и аварийной фурмы, имеют худший тепловой КПД, по сравнению с фазой, находящейся на удалении. На сегодняшний день управление электрическими режимами на данных агрегатах происходит в ручном режиме, в связи с чем снижается эффективность управления электрическими режимами.

Проведены экспериментальные исследования поведения поверхности жидкого металла и шлака в У КП при различных режимах аргонной продувки с помощью продувочных блоков в днище стальной ванны, а также при использовании аварийной фурмы. На основании полученных данных

были сделаны выводы о влиянии расположения возмущений на поверхности жидкого металла (зеркал металла) на стабильность горения электрических дуг в фазах 1–3, а также были определены граничные значения мгновенного расхода аргона, при которых происходят качественные изменения влияния возмущений на поверхности ванны.

Разработаны алгоритмы автоматического переключения рабочих кривых и ступеней РПН печных трансформаторов У КП, обеспечивающие изменение электрического режима по коэффициенту шлака $K_{\text{ШЛАК}}$ в автоматическом режиме. Основным принципом управления, положенным в основу алгоритма автоматического управления, является уменьшение номера рабочей кривой при снижении значения $K_{\text{ШЛАК}}$. Также алгоритм предусматривает изменение несимметрии горения дуг при работе аварийной фурмы за счет привязки к данному режиму отдельных рабочих кривых.

В ходе оценки технического эффекта показано, что применение усовершенствованного алгоритма на действующей установке позволило снизить расход электродов в среднем на 4 %, удельный расход электрической энергии – в среднем на 3 %, а стойкость футеровки шлакового пояса стальной ванны увеличилась на 4,5 %, с 67 до 70 плавов.

Список литературы

1. Миронов Ю.М. Особенности дуговых сталеплавильных печей как приемников электрической энергии // *Электрометаллургия*. 2020. № 9. С. 2–8. DOI: 10.31044/1684-5781-2020-0-9-2-8
2. Энергосбережение в современной дуговой сталеплавильной печи дсп-120 / И.В. Глухов, Д.В. Мехряков, Г.В. Воронов и др. // *Сталь*. 2020. № 5. С. 21–23.
3. Повышение эффективности работы сверхмощной дуговой сталеплавильной печи / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин и др. // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2009. № 1. С. 55–59.
4. Корнилов Г.П., Николаев А.А., Якимов И.А. Перспективы и средства повышения эффективности дуговых сталеплавильных печей за счет силового электрооборудования // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2009. № 15 (148). С. 32–38.
5. Mees H., Hohl J., Krüger K. Dynamic Condition-Based Scrap Melt Control: Results of the Application at Thyssenkrupp Nirosta in Bochum // *10th European Electric Steelmaking Conference*. Graz, 25–28 Sep., 2012.
6. Способы управления электрическим режимом электродуговых печей / Ю.П. Журавлев, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин и др. // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2006. № 4. С. 76–80. DOI: 10.17213/0136-3360
7. Тулуевский Ю.Н., Зинуров И.Ю. Инновации для дуговых сталеплавильных печей: научные основы выбора: моногр. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. 347 с. (Современные электротехнологии: серия монографий. Т. 12).
8. Dorndorf M., Wichert W., Schubert M. Holistic Control of EAF's Energy and Material Flows // *3rd International Steel Conference on Developments in Metallurgical Process Technologies*. Düsseldorf, June 11–15, 2007. P. 513–520.
9. Экспериментальное исследование гармонического состава токов дуг для дуговых сталеплавильных печей различной мощности / А.А. Николаев, Ж.Ж. Руссо, В. Сдьмански, П.Г. Тулупов // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2016. № 3. С. 106–120. DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-3-106-120
10. Оптимизация электрических режимов сверхмощных дуговых сталеплавильных печей / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, А.В. Ануфриев и др. // *Сталь*. 2014. № 4. С. 37–47.
11. Nikolaev A.A., Tulupov P.G. Method of setting optimum asymmetric mode of operation of electric arc furnace // *Proceedings of the 2016 11th France-Japan and 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics*

MECHATRONICS-2016 / 17th International Conference on Research and Education in Mechatronics REM-2016. Compiègne, France. 15–17 June 2016. P. 33–37. DOI: 10.1109/mecatronics.2016.7547111

12. Миронов Ю.М. Закономерности электрических режимов дуговых сталеплавильных печей // Электричество. 2006. № 6. С. 56–62.

13. Пат. 176106 Российская Федерация, МПК H 05 B 7/148. Система управления электрическим режимом дуговой сталеплавильной печи / А.А. Николаев, П.Г. Тулупов, А.В. Ануфриев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»; № 2017120504; заявл. 13.06.2017; опубл. 09.01.2018, Бюл. № 1.

14. Bowman B., Krüger K. *Arc Furnace Physics* // Düsseldorf: Verlag Stahleisen GmbH, 2009.

15. 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.

References

1. Mironov Yu.M. Features of arc steel-making furnaces as receivers of electric power. *Electrometallurgy*. 2020;(9):2–8. (In Russ.) DOI: 10.31044/1684-5781-2020-0-9-2-8

2. Glukhov I.V., Mekhriakov D.V., Voronov G.V., Vdovin K.M., Rybak A.A., Taranov V.V. Power managing in the modern EAF DSP-120. *Steel in Translation*. 2020;(5):21–23.

3. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khramshin T.R. et al. Improving the efficiency of a heavy-duty arc steel-smelting furnace. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika = Russian electromechanics*. 2009;(1):55–59. (In Russ.)

4. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Yakimov I.A. Prospects and means of increasing the efficiency of arc steel-smelting furnaces at the expense of power electrical equipment. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2009;15(148):32–38. (In Russ.)

5. Mees H., Hohl J., Krüger K. Dynamic Condition-Based Scrap Melt Control: Results of the Application at Thyssenkrupp Nirosta in Bochum. In: *10th European Electric Steelmaking Conference*; 2012.

6. Zhuravlev Yu.P., Kornilov G.P., Khramshin T.R. et al. Ways to control the electric mode of electric arc furnaces. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika = Russian electromechanics*. 2006;(4):76–80. (In Russ.) DOI: 10.17213/0136-3360

7. Tuluevsky Yu.N., Zinurov I.Yu. *Innovatsii dlya dugovykh staleplavil'nykh pechey: nauchnye osnovy vybora: monografiya* [Innovations for electric arc furnaces: Scientific basis of choice: monograph]. *Sovremennye elektrotekhnologii: seriya monografy. T. 12* [Modern electrical technologies: a series of monographs. Vol. 12]; 2010. 347 p. (In Russ.)

8. Dorndorf M., Wichert W., Schubert M. Holistic Control of EAF's Energy and Material Flows. In: *3rd International Steel Conference on Developments in Metallurgical Process Technologies*; 2007. P. 513–520.

9. Nikolaev A.A., Rousseau J.-J., Szymanski V., Tulupov P.G. An experimental study of electric arc current harmonics in electric arc furnaces with different power characteristics. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2016;3(14):106–120. DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-3-106-120

10. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Anufriev A.V., Pekhterev S.V., Povelitsa E.V. Electrical optimization of superpowerful arc furnaces. *Steel in Translation*. 2014;44(4):289–297. DOI: 10.3103/S0967091214040135

11. Nikolaev A.A., Tulupov P.G. Method of setting optimum asymmetric mode of operation of electric arc furnace. In: *Proceedings of the 2016 11th France-Japan and 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics MECHATRONICS-2016 / 17th International Conference on Research and Education in Mechatronics REM-2016*; 2016. P. 33–37. DOI: 10.1109/mecatronics.2016.7547111

12. Mironov Yu.M. The laws of electric operating conditions of steel-smelting electric arc furnaces. *Elektrichestvo*. 2006;(6):56–62. (In Russ.)

13. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Anufriev A.V. *Sistema upravleniya elektricheskim rezhimom dugovoy staleplavil'noy pechi* [Control system for the electric regime of an arc steel-smelting furnace]. Patent RF 176106, IPC H 05 B 7/148, no. 2017120504; decl. 13.06.2017; publ. 09.01.2018, Bul. no. 1. (In Russ.)

14. Bowman B., Krüger K. *Arc Furnace Physics*. Düsseldorf: Verlag Stahleisen GmbH; 2009.

15. 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.

Информация об авторах

Николаев Александр Аркадьевич, канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; aa.nikolaev@mail.ru.

Ивекеев Владимир Сергеевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; vivekeev@yandex.ru.

Тулупов Платон Гарриевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; tulupov.pg@mail.ru.

Рыжевол Сергей Сергеевич, младший научный сотрудник кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; snaffls18@gmail.com.

Information about the authors

Alexander A. Nikolaev, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Head of the Department of Automated Electric Drive and Mechatronic, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; aa.nikolaev@mail.ru.

Vladimir S. Ivekeev, Cand. Sci. (Eng.), Senior Scientist of the Department of Automated Electric Drive and Mechatronic, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; vivekeev@yandex.ru.

Platon G. Tulupov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Scientist of the Department of Automated Electric Drive and Mechatronic, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; tulupov.pg@mail.ru.

Sergey S. Ryzhevol, Junior Scientist of the Department of Automated Electric Drive and Mechatronic, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; snaffls18@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 12.08.2022; одобрена после рецензирования 12.08.2022; принята к публикации 25.08.2022.

The article was submitted 12.08.2022; approved after reviewing 12.08.2022; accepted for publication 25.08.2022.