

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 + 621.3.011.72

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-186-196



ИССЛЕДОВАНИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ УСТАНОВКИ КОВШ-ПЕЧЬ

Николаев А.А., Тулупов П.Г., Рыжевол С.С., Буланов М.В.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Современная электрометаллургия представляет собой одну из наиболее перспективных отраслей отечественной металлургической промышленности. Благодаря высоким технико-экономическим показателям по сравнению с другими способами выплавки стали, все большее распространение получили электросталеплавильные комплексы на основе дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь. В настоящее время подавляющее большинство систем управления электрическим режимом установок ковш-печь не используют адаптацию электрических режимов работы к условиям продувки расплава инертным газом, а также шлаковым режимам, что приводит к их неоптимальной работе и повышению эксплуатационных издержек. В связи с этим особую актуальность приобретает разработка усовершенствованных алгоритмов автоматического управления электрическими режимами, в которых данный недостаток будет компенсирован. **Цель работы.** Разработка и оценка эффективности нового алгоритма управления электрическим режимом установок ковш-печь, в котором будет обеспечена адаптация электрического режима работы установки к постоянно меняющимся режимам продувки и шлаковым режимам с использованием информации о гармоническом составе токов электрических дуг. **Используемые методы.** Работа выполнена с использованием методов статистического и теоретического анализа, математического моделирования, а также экспериментальных исследований на действующем производственном объекте. **Новизна.** В усовершенствованной системе управления электрическим режимом установок ковш-печь используется анализ гармонического состава токов дуг для адаптации электрического режима к режимам продувки и шлаковому режиму. **Результат.** Разработан принципиально новый алгоритм управления электрическим режимом установок ковш-печь с адаптацией к технологическим условиям процесса плавки. **Практическая значимость.** Применение разработанного алгоритма позволяет уменьшить величину удельного расхода электроэнергии в процессе плавки, что, в свою очередь, обеспечит снижение себестоимости конечного продукта.

Ключевые слова: установка ковш-печь, электрическая дуга, система управления электрическим режимом, гармонический состав токов дуг, шлаковый режим, режим аргонной продувки

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZRU-2023-0008).

© Николаев А.А., Тулупов П.Г., Рыжевол С.С., Буланов М.В., 2025

Для цитирования

Исследование усовершенствованного алгоритма автоматического управления электрическими режимами установки ковш-печь / Николаев А.А., Тулупов П.Г., Рыжевол С.С., Буланов М.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 186-196. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-186-196>



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

STUDY OF AN IMPROVED ALGORITHM FOR AUTOMATIC CONTROL OF ELECTRICAL MODES OF A LADLE FURNACE UNIT

Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Ryzhevol S.S., Bulanov M.V.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Modern electrometallurgy is one of the most promising sectors of the domestic metallurgical industry. Due to their superior technical and economic performance compared to other steelmaking methods, electric steelmaking systems based on electric arc furnaces (EAF) and ladle furnaces (LF) are becoming increasingly widespread. Currently, the vast majority of LFU electrical control systems do not adapt their electrical operating modes to the conditions of inert gas purging into the melt or slag conditions, resulting in suboptimal operation and increased operating costs. Therefore, the development of improved algorithms for automatic electrical modes control that will compensate for this shortcoming is particularly relevant. **Objectives.** The research is aimed at developing and evaluating the effectiveness of the new algorithm for the LF electrical mode control, which will ensure adaptation of the electrical operating mode of the unit to constantly changing purging and slag modes using information on the harmonic composition of electric arc currents. **Methods Applied.** The work was performed using statistical and theoretical analysis, mathematical modeling, and experimental studies at an operating production facility. **Originality.** It lies in the fact that the improved control system for the electrical mode of the LF uses an analysis of the harmonic composition of arc currents to adapt the electrical mode to the purging and slag modes. **Result.** A fundamentally new algorithm for the LF electrical mode control with adaptation to the technological conditions of the melting process has been developed. **Practical Relevance.** The use of the developed algorithm allows for a reduction in the specific energy consumption during the melting process, which in turn will ensure a reduction in the cost of the final product.

Keywords: ladle furnace, electric arc, electric mode control system, harmonic composition of electric arc current, slag mode, argon purging mode

The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FZRU-2023-0008).

For citation

Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Ryzhevol S.S., Bulanov M.V. Study of an Improved Algorithm for Automatic Control of Electrical Modes of a Ladle Furnace Unit. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 186-196. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-186-196>

Введение

В настоящее время электрометаллургия представляет собой одну из наиболее перспективных отраслей отечественной металлургической промышленности. Благодаря высоким технико-экономическим показателям по сравнению с другими способами выплавки стали, все большее распространение получили электросталеплавильные комплексы на основе дуговых сталеплавильных печей (ДСП) и установок ковш-печь (УКП). В рамках данного технологического комплекса ДСП выполняет функцию основного агрегата для расплавления твердой металлошихты для получения жидкой стали, последующая доводка которой до требуемых параметров, в том числе окончательное раскисление, удаление серы, легирование и доведение до требуемой температуры, осуществляется в УКП.

Современные установки ковш-печь характеризуются следующими показателями: удельная мощность печного трансформатора находится в диапазоне 0,14–0,3 МВА/т, продолжительность цикла плавки состав-

ляет около 60 мин, а масса выплавляемой стали — от 100 до 250 т. Неотъемлемой частью технологии производства в УКП является перемешивание жидкой стали в ковшах инертным газом, обеспечивающее выравнивание температуры и достижение изотропности химического состава. Подача газа производится через продувочные блоки, расположенные в днище стальковша, или через аварийную фурму.

Особенностью технологического процесса выплавки стали в УКП является возникновение разрыва шлакового слоя при достижении определенной интенсивности продувки. На поверхности расплава в районе продувочного блока образуется так называемое зеркало жидкого металла, что приводит к оголению и, как следствие, к снижению теплового КПД электрических дуг, расположенных в непосредственной близости к продувочным блокам. Дальнейшее увеличение расхода аргона может вызвать образование сильных волн и всплесков на поверхности жидкого металла, что создаёт риск возникновения эксплуатационных коротких замыканий. Наглядно данное явление продемонстрировано с помощью **рис. 1**.

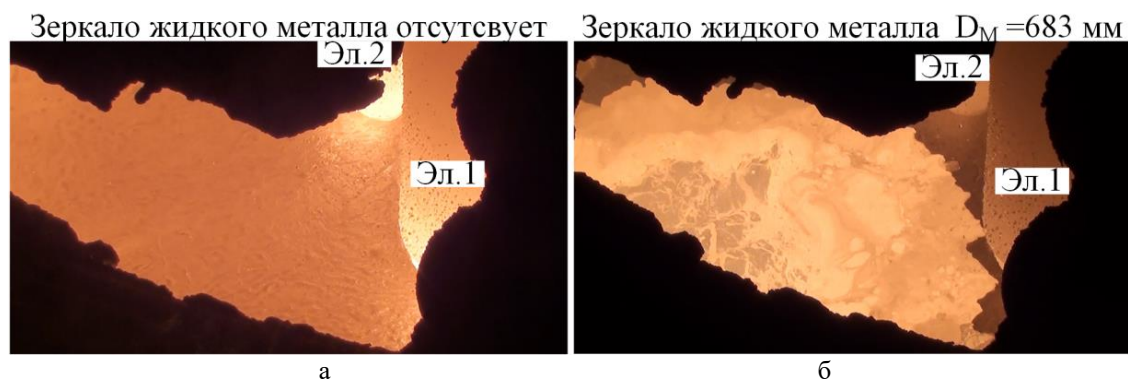


Рис. 1. Возмущения на поверхности жидкого металла, создаваемые работой продувочных блоков: Эл.1 и Эл.2 – графитированные электроды У КП

Fig.1. Disturbances on the surface of liquid metal caused by the work of purging blocks: el.1 and el.2 are LF graphite electrodes

Существующие системы управления У КП не учитывают условия аргонной продувки и шлаковый режим. Таким образом, целью данного исследования является разработка и исследование эффективности усовершенствованного алгоритма автоматического управления электрическими режимами У КП с динамической адаптацией длин электрических дуг и вторичного напряжения печного трансформатора к режимам аргонной продувки.

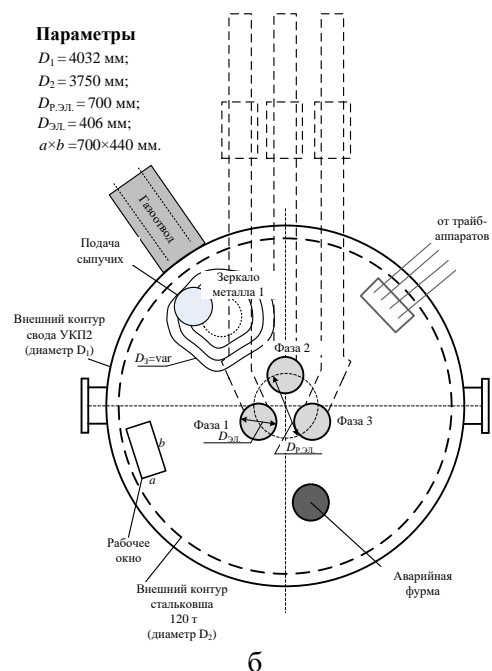
Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования в данной работе

выбрана У КП ёмкостью 120 т, функционирующая на одном из отечественных металлургических предприятий. На У КП используется печной трансформатор с номинальной мощностью $S_{ПТ.ном} = 25$ МВА и номинальным первичным напряжением $U_{1ном} = 35$ кВ. Применяемый трансформатор имеет 23 ступени вторичного напряжения. Диапазон изменения вторичного линейного напряжения составляет $U_{2ном} = 417-131$ В. Номинальный ток вторичной обмотки печного трансформатора одинаковый для всех ступеней напряжения $I_{2ном} = 34,6$ кА. Для наглядности общий вид установки и её геометрические параметры представлены на рис. 2.



а



б

Рис. 2. Общий вид исследуемой У КП (а) и основные геометрические параметры исследуемой У КП (б)

Fig. 2. General view of LF under study (a) and general geometrical parameters of LF under study (б)

Для реализации автоматической адаптации электрических режимов У КП к меняющимся условиям работы необходимо использование специализированного параметра, адекватно отражающего режимы горения электрических дуг. В рамках исследования [1] были представлены экспериментальные подтверждения взаимосвязи между шлаковыми режимами, параметрами аргоновой продувки, стабильностью горения дуг, их тепловым КПД и гармоническим составом токов. Таким образом, управление электрическими режимами может осуществляться с использованием информации о гармоническом составе токов дуг. Необходимо отметить, что данный подход используется зарубежными компаниями-производителями электросталеплавильных агрегатов и систем автоматического управления электрическими режимами, такими как Primetals Technologies (бывший Siemens VAI), Danieli и др. В частности, в системах управления ДСП на основании высших гармоник тока рассчитываются коэффициенты вспенивания шлака, служащие исходными параметрами для систем автоматического управления инжекторами углерода. Необходимо отметить, что коэффициент гармонических искажений также используется и на У КП в блоках динамической адаптации.

Поскольку разрабатываемые алгоритмы предназначены для динамической адаптации к режимам аргоновой продувки и шлаковым режимам, то для удобства управления, а также для наглядности и понимания процессов технологическим персоналом целесообразно ввести величину, отражающую фактическое состояние слоя шлака и зависящую от гармонического состава токов электрических дуг. В качестве такого критерия предлагается использовать коэффициент шлака $K_{\text{ШЛАК}}$, который является аналогом коэффициента вспенивания шлака [2-4], используемого в ДСП, для автоматического управления инжекторами углеродосодержащего материала (УСМ).

В системах управления У КП [5-7] коэффициент вспенивания шлака $K_{\text{ШЛАК}}$ может быть определен как обратная величина от K_1 с учетом масштабного коэффициента a . Для наглядного объяснения взаимосвязи $K_{\text{ШЛАК}} = f(K_1)$ на **рис. 3** приведена зависимость изменения коэффициента шлака от среднего по фазам коэффициента суммарных гармонических искажений токов дуг. Коэффициенты $K_{\text{ШЛАК}}$ и K_1 рассчитывались в системе автоматического управления электрическими режимами и перемещением электродов ArCOS. Как видно из **рис. 3**, $K_{\text{ШЛАК}}$ с достаточно высокой статистической точностью ($R^2 = 0,875$) описывается выражением

$$K_{\text{ШЛАК}} = \frac{a}{K_1}, \quad (1)$$

при этом коэффициент a может быть определен как произведение 100 на минимальное значение K_{Imin} ,

зафиксированное за цикл плавки при существующей электрической дуге ($I_{\text{д}} > 0$):

$$a = 100 \cdot K_{\text{Imin}}. \quad (2)$$

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.

Коэффициент гармонических искажений тока K_1 может быть рассчитан по следующей формуле:

$$K_1 = \frac{\sqrt{I^2 - I_{(1)}^2 - I_{(0)}^2}}{I_{(1)}} \cdot 100\% = \frac{I_{\text{ВГ}}}{I_{(1)}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

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.

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

Основным принципом управления, положенным в основу алгоритма автоматического управления электрическими режимами, является уменьшение длин дуг при снижении $K_{\text{ШЛАК}}$. В случае если поддержание приемлемого $K_{\text{ШЛАК}}$ на самых коротких дугах не обеспечивается, тогда выполняется автоматическое понижение рабочей ступени печного трансформатора. Напротив, при большом значении $K_{\text{ШЛАК}}$ при работе на максимально длинных дугах формируется сигнал на увеличение ступени трансформатора с целью повышения мощностей дуг и коэффициента интенсивности нагрева КИН [8-10].

На основе данного принципа был разработан усовершенствованный алгоритм управления электрическим режимом У КП. Работа алгоритма иллюстрируется графиками, представленными на **рис. 4**. В свою очередь, на **рис. 5** представлена блок-схема данного алгоритма. В целях упрощения на графиках смоделировано поведение фильтрованного значения $K_{\text{ШЛАК}}$ с возрастающим и спадающим участками. При достижении граничных коэффициентов шлака $K_{\text{ГР1.1}}$, $K_{\text{ГР2.1}}$ осуществляется увеличение длины электрической дуги и изменение степени несимметрии горения дуг с учетом расположения возмущения на поверхности жидкого металла. 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: $K_{\text{ГР1}}$, $K_{\text{ГР2}}$. Данное решение обеспечивает гистерезис управляющего воздействия и стабильную работу при значениях $K_{\text{ШЛАК}}$, близких к граничным.

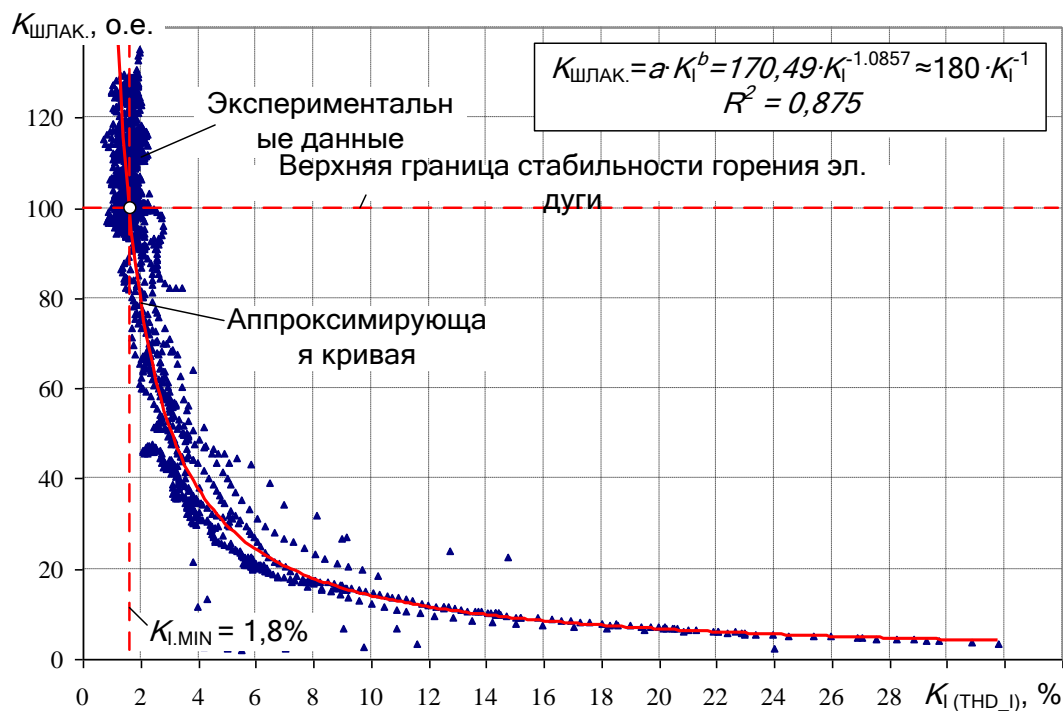


Рис. 3. Экспериментальная зависимость изменения коэффициента шлака от среднего по фазам коэффициента суммарных гармонических искажений токов дуг

Fig. 3. Experimental dependence of the change in the slag coefficient on the average phase coefficient of total harmonic distortion of arc currents

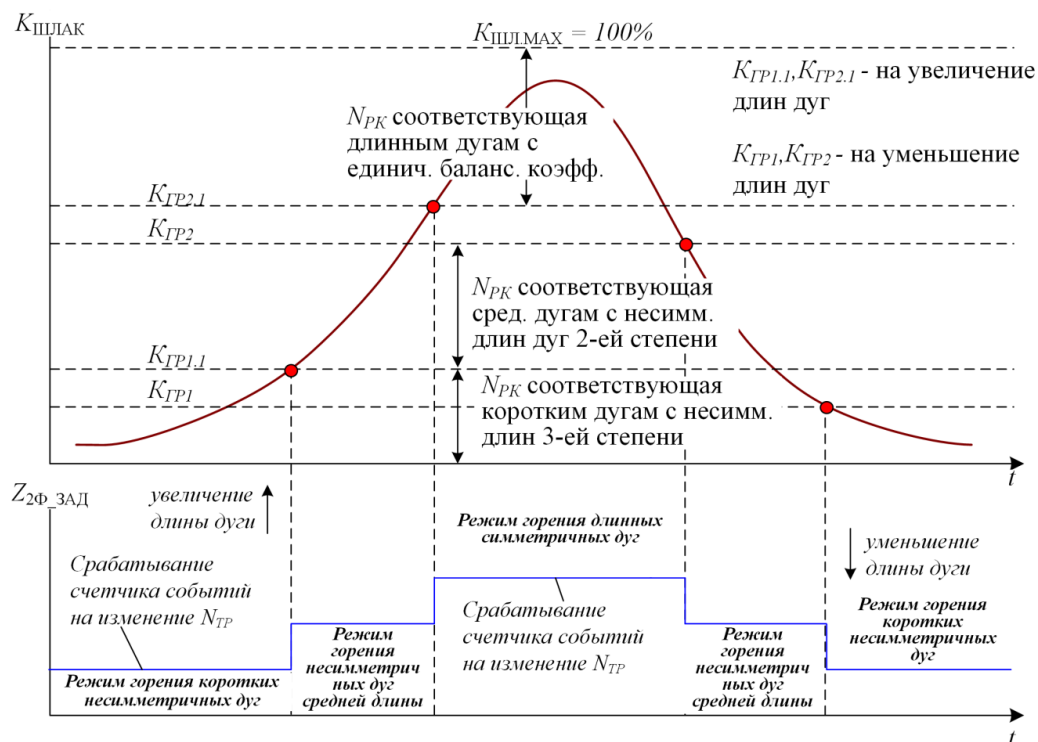


Рис. 4. Пояснение работы алгоритма автоматической адаптации электрических режимов к текущим условиям аргонной продувки и шлаковым режимам в зависимости от уровня коэффициента шлака $K_{\text{шлак}}$

Fig. 4. Explanation of the operation of the algorithm for automatic adaptation of electrical modes to the current conditions of argon purging and slag modes depending on the slag coefficient level $K_{\text{шлак}}$

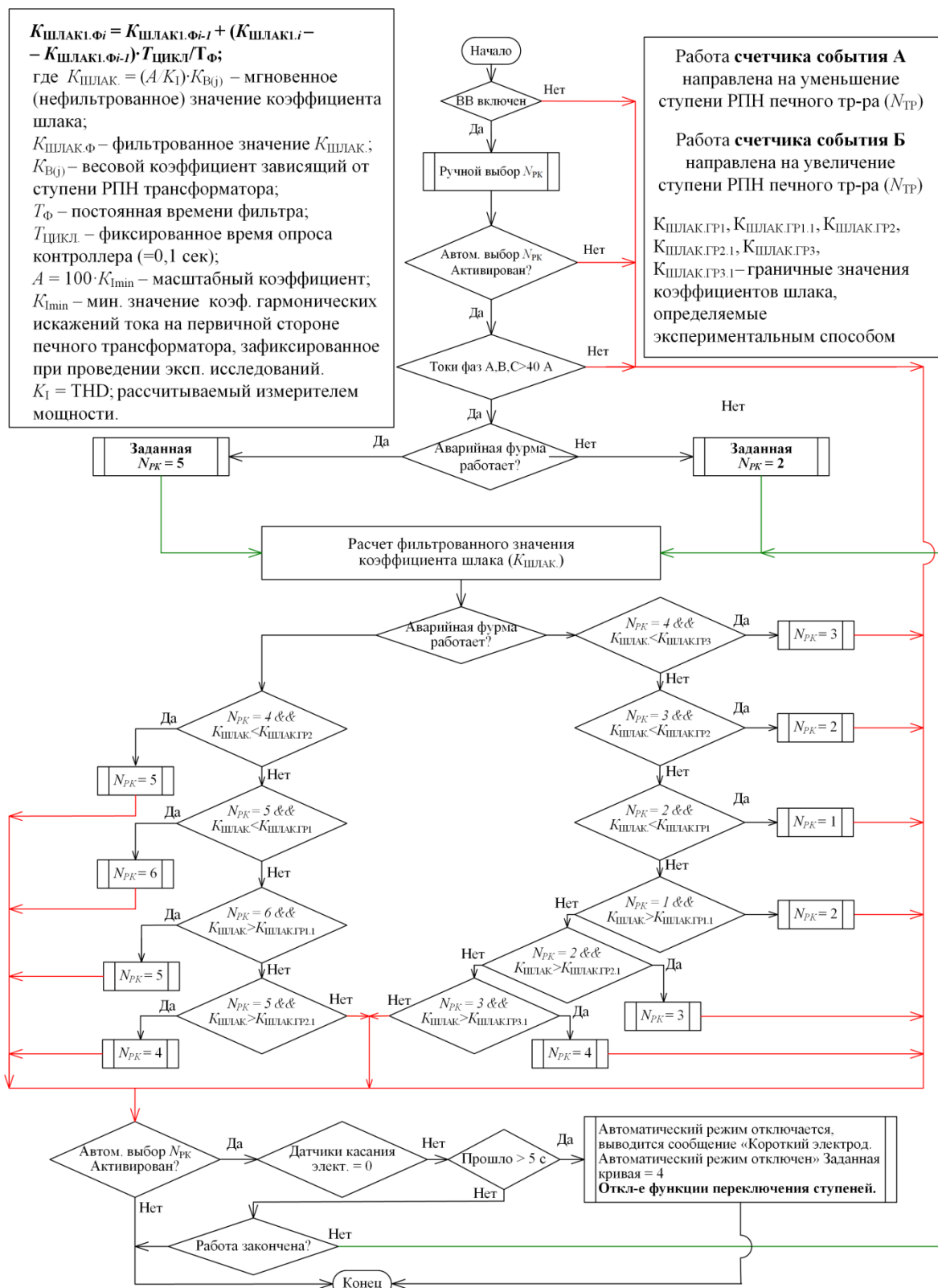


Рис. 5. Блок-схема алгоритма автоматического управления электрическими режимами УКП с динамической адаптацией длин электрических дуг и вторичного напряжения печного трансформатора

Fig. 5. Block diagram of the algorithm for automatic control of the electrical modes of the LF with dynamic adaptation of the lengths of electric arcs and the secondary voltage of the furnace transformer

Важно отметить, что для расчета $K_{\text{ШЛАК}}$ необходимо использовать информацию о гармоническом составе токов дуг, находящихся в нестабильной зоне У КП. В случае когда измерение коэффициента гармонических искажений [11, 12] осуществляется на первичной стороне печного трансформатора, следует учитывать схему соединения обмоток печного трансформатора, а также измерительных цепей.

Полученные результаты и их обсуждение

Новый алгоритм автоматического управления электрическим режимом был внедрен на исследуемом У КП. На **рис. 6** приведены осциллограммы фактической работы усовершенствованных алгоритмов автоматического переключения рабочих кривых и ступеней напряжения печного трансформатора [13-15]. Представленные осциллограммы наглядно демонстрируют принцип работы алгоритма, а именно уменьшение длин дуг при снижении $K_{\text{ШЛАК}}$.

Для анализа полученного технического эффекта от внедрения алгоритма сравнивались два периода работы агрегатов: 1) базовый – до внедрения усовершенствованных электрических режимов и алгоритмов автоматического переключения рабочих кривых $N_{\text{РК}}$ и ступеней напряжения печного трансформатора $N_{\text{ТР}}$; 2) гарантийный – период экспериментальных исследований после внедрения усовершенствованных электрических режимов и алгоритмов автоматического переключения $N_{\text{РК}}$ и $N_{\text{ТР}}$. С целью набора необходимой статистической информации для последующей оценки технического эффекта длительность экспериментальных исследований составила 3 месяца как для базового (предгарантийного) периода, так и для периода гарантийных испытаний.

В условиях влияния большого количества факторов на удельный расход электроэнергии для повышения точности оценки технического эффекта необходимо применение регрессионных моделей изменения удельного расхода электроэнергии $W_{\text{уд}}$. Регрессионная модель представляет собой уравнение, связывающее удельный расход электроэнергии $W_{\text{уд}}$ с основными факторами, которые оказывают наибольшее влияние на параметр $W_{\text{уд}}$. Данные факторы выявляются с помощью построения корреляционной таблицы для больших массивов плавов (несколько сотен или тысяч) для двух анализируемых периодов, базового и гарантийного, с примерно одинаковым месячным объемом обработанной стали. Корреляционная таблица показывает статистическую взаимосвязь между анализируемым параметром $W_{\text{уд}}$ и всеми доступными параметрами из паспортов плавов (время работы под током, время цикла обработки, расход аргона за плавку, начальная, конечная температуры и средняя величина нагрева за плавку, вес отдельных легирующих и шлакообразующих материалов, отдаваемых в ковш в процессе обработки жидкой стали и т.д.). Те факторы, которые имеют высокий коэффициент корреляции с $W_{\text{уд}}$, отбираются для подстановки в уравнение регрессии.

Перед выполнением корреляционного и регрессионного анализа осуществляется подготовка статистических выборок параметров. Статистические выборки параметров исследуемого У КП были получены на основании обработанных паспортов плавов за периоды предгарантийных и гарантийных испытаний. Статистические выборки параметров представляют собой электронные таблицы, где для каждой строки с соответствующим номером плавки приведены значения энергетических, временных и технологических показателей работы агрегатов, таких как время цикла обработки стали, время работы под током, начальная и конечная температуры металла, абсолютная величина нагрева металла, суммарный расход аргона при продувке металла, признаки плавов с повторными обработками на У КП, обработки на У ВС и другие параметры.

После первичной подготовки выборок осуществлялись проверка массива данных и отсев плавов по следующим условиям: 1) тестовые «нулевые» плавки; 2) плавки с ошибочными данными по электроэнергии (отрицательные значения), некорректными значениями начальной и конечной температуры жидкого металла (отрицательные значения температуры, значения температуры, отличающиеся на несколько сот градусов от предполагаемого фактического значения), некорректными значениями времени работы под током и общего времени обработки металла (отрицательные значения $t_{\text{РТ}}$ и $t_{\text{ОБР}}$, ошибочные значения $t_{\text{РТ}} > t_{\text{ОБР}}$).

В результате отсева плавов с некорректными данными для исследуемого У КП были получены скорректированные выборки плавов для сравниваемых периодов. Уравнение регрессии, содержащее 8 факторов, имеет следующий вид:

$$W_{\text{уд}} = a \cdot t_{\text{ОБР}} + b \cdot t_{\text{РТ}} + c \cdot G_{\text{МЕТ}} + d \cdot T_{\text{МЕТ.НАЧ.}} + e \cdot T_{\text{МЕТ}} + f \cdot Q_{\text{АРГ}} + g \cdot t_{\text{ВЫД.СК.МЕТ.}} + h \cdot N_{\text{ТР.ЭКВ.}} + n, \quad (4)$$

где $G_{\text{ПЛ}}$ – вес плавки на У КП, [т]; $t_{\text{ВЫД.}}$ – выдержка металла в стальковше перед плавкой, [мин]; $N_{\text{ПЕРЕЛИВ}}$ – доля переливных плавов, [о.е.]; $N_{\text{УВС}}$ – доля плавов с обработкой на установке вакуумирования стали перед У КП, [о.е.]; $N_{\text{АФ}}$ – доля плавов с использованием аварийной фурмы, [о.е.]; $N_{\text{ТР.ЭКВ.}}$ – эквивалентная ступень напряжения печного трансформатора; $N_{\text{П.ОБР.}}$ – доля плавов с повторной обработкой на У КП, [о.е.]; $t_{\text{МЕТ.СК.}}$ – время нахождения металла в стальковше, [мин].

Результаты проведенного регрессионного анализа приведены в **табл. 1**. Внедрение нового алгоритма управления электрическим режимом У КП с использованием информации о гармоническом составе токов дуг и динамической адаптации к шлаковым режимам и режимам аргонной продувки позволило обеспечить снижение величины удельного расхода электроэнергии на 2,2% в гарантийном периоде по сравнению с предгарантийным. Полученный результат является значимым для такого энергоёмкого технологического агрегата как У КП и обеспечит существенное снижение себестоимости конечного продукта.

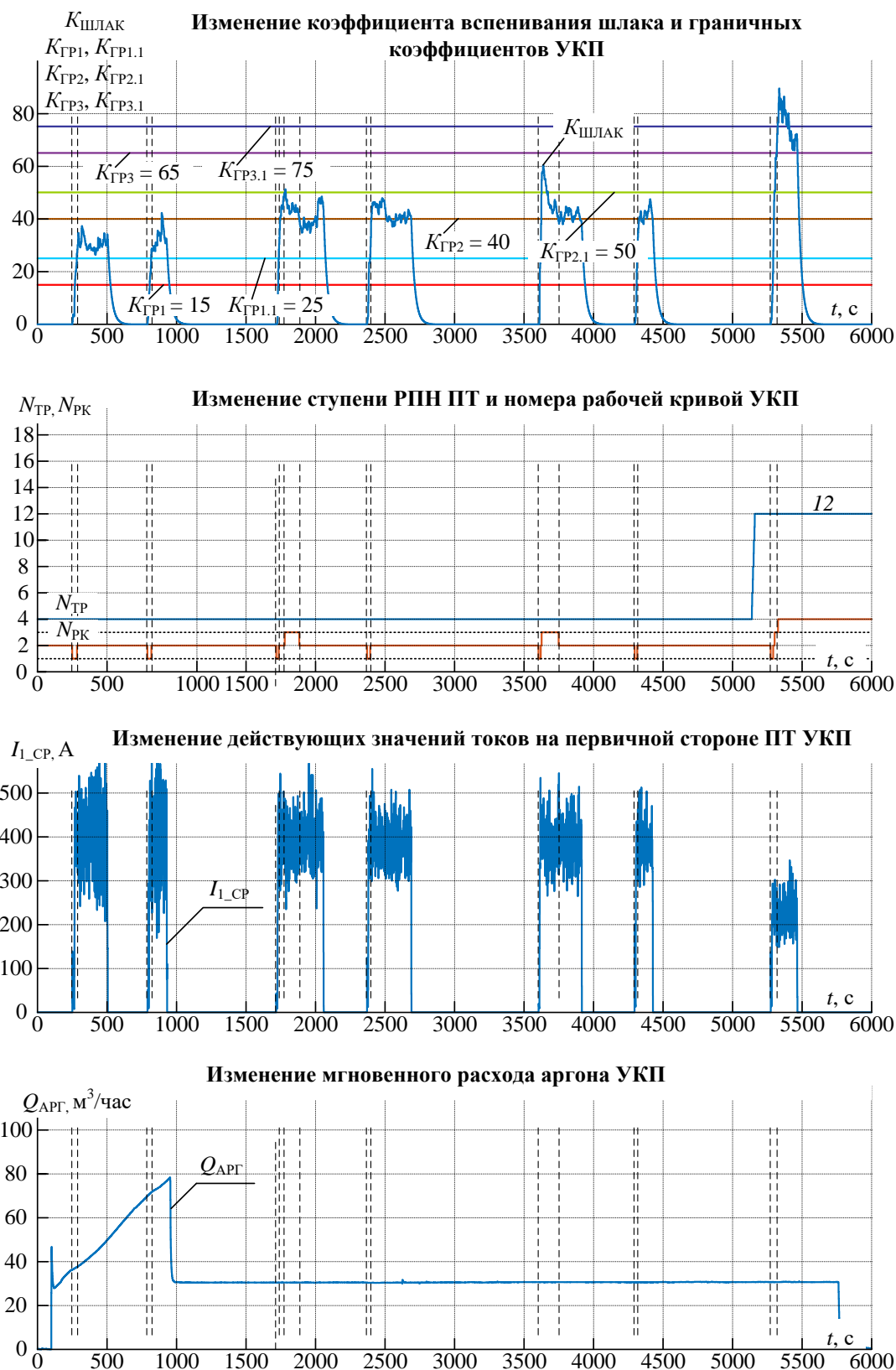


Рис. 6. Работа алгоритма автоматического переключения рабочих кривых в зависимости от уровня коэффициента шлака $K_{\text{ШЛАК}}$

Fig. 6. Operation of the automatic switching algorithm for operating curves depending on the slag coefficient level $K_{\text{ШЛАК}}$

Таблица 1. Анализ изменения удельного расхода электроэнергии УКП
Table 1. Analysis of changes in the specific energy consumption of the LF

Анализируемый период	Коэффициент уравнения регрессии	Коэффициент детерминации R^2	Средний удельный расход ЭЭ по уравнению регрессии $W_{уд.ср.}$, кВт·ч/т	Относительное изменение $\delta W_{уд.ср.}$, %
Предгарантийный период УКП	$a = 0,022977; b = 1,614704;$ $c = -0,269488; d = 0,025170;$ $e = 0,082005; f = -0,009783;$ $g = 0,000497; h = -1,204484;$ $n = 7,766345$	0,911	40,11	—
Гарантийный период УКП	$a = 0,004339; b = 1,662181;$ $c = -0,263959; d = 0,016080;$ $e = 0,057738; f = -0,033795;$ $g = 0,003581; h = -1,235336;$ $n = 19,496835$	0,908	39,24	-2,2

Закключение

При эксплуатации УКП существенное влияние на его работу оказывает режим аргонной продувки, поскольку при его высокой интенсивности возникают волны и всплески на поверхности жидкого металла, вследствие которых происходит закорачивание одной или нескольких фаз, находящихся в наибольшей близости к нестабильной зоне. Это приводит к снижению теплового КПД дуг, тем самым оказывая негативное влияние на энергоэффективность работы комплекса. Существующие системы управления УКП не учитывают данное явление и конструктивное исполнение конкретных установок (количество и расположение оборудования аргонной продувки).

В качестве решения обозначенной проблемы в рамках данного исследования разработан усовершенствованный алгоритм управления электрическим режимом с использованием информации о гармоническом составе токов дуг. Отличительной особенностью данного алгоритма является динамическая адаптация длины электрической дуги к режимам аргонной продувки и шлакового режима.

Разработанный алгоритм был внедрен на действующем производственном объекте. Регрессионный анализ, выполненный на основании большого количества плавов в гарантийном и предгарантийном периоде, показал, что внедрение нового алгоритма управления электрическим режимом УКП с использованием информации о гармоническом составе токов дуг и динамической адаптацией к шлаковым режимам и режимам аргонной продувки позволило обеспечить снижение величины удельного расхода электроэнергии на 2,2% в гарантийном периоде по сравнению с предгарантийным. Полученный результат является значимым для такого энергоёмкого технологического агрегата, как УКП, и обеспечит существенное снижение себестоимости конечного продукта.

Список источников

1. Николаев А.А., Лукьянов С.И., Тулупов П.Г. Усовершенствованный способ управления электрическим

режимом установки ковш-печь с использованием информации о гармониках токов дуг // *Сталь*. 2019. № 4. С. 16-21.

- Advanced Foaming Slag Control / T. Jansen, K. Krüger, H. Schliephake [и др.] // 10th European Electric Steelmaking Conference, Graz. 2012, 25-28 Sep, pp. 385-390.
- Регулирование мощности в электродуговой печи с использованием акустической системы распознавания вспененного шлака / Т. Янсен, К. Крюгер, Х. Шлиппаке [и др.] // *Чёрные металлы*. 2011. № 2. С. 20-25.
- Сериков В.А. Акустические и вибрационные характеристики сверхмощных дуговых сталеплавильных электропечей: дис. ... канд. техн. наук / Сериков Виктор Андреевич. Новосибирск, 2016. 147 с.
- Управление тепловым и электрическим режимами агрегата печь-ковш / Е.Б. Агапитов, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин, М.М. Ерофеев, А.А. Николаев // *Электрометаллургия*. 2006. № 6. С. 11-16.
- Развитие системы управления электродуговой установкой печь-ковш с целью повышения эффективности нагрева / Е.Б. Агапитов, Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, М.М. Ерофеев, Ю.П. Журавлёв, А.П. Мусиенко // *Изв. вузов. Электромеханика*. 2006. № 4. С. 81-84.
- Потенциал энергосбережения при обработке расплава стали в установке печь-ковш / Е.Б. Агапитов, Г.П. Корнилов, М.М. Ерофеев, С.А. Самойлин // *Образование. Наука. Производство и управление в XXI веке: материалы Междунар. науч. конференции (20 – 22 октября 2004 г.)*. Т. 2. Ст. Оскол, 2004. С. 15-17.
- Миронов Ю.М. Электрическая дуга в электротехнологических установках: монография. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013. 290 с.
- 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.
- Нехамин С.М. Создание и внедрение энергоэффективных дуговых и шлаковых электропечных комплексов с использованием постоянного тока и тока пониженной частоты: дис. ... д-ра техн. наук / Моск. энергет. ин-т. Москва, 2015. 405 с.
- Экспериментальное исследование гармонического состава токов дуг для дуговых сталеплавильных печей различной мощности / А.А. Николаев, Ж.Ж. Руссо, В. Сцымански, П.Г. Тулупов // *Вестник Магнитогорского*

государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. № 3. С. 106-120.

12. Николаев А.А., Тулупов П.Г., Омелченко 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.
13. Тулуевский Ю.Н., Зинуров И.Ю. Инновации для дуговых сталеплавильных печей. Научные основы выбора: монография // Серия монографий «Современные электротехнологии». Т. 12. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. 347 с.
14. Матросов А.П., Миронов Ю.М. Компьютерное моделирование процессов в электрических цепях дуговых печей // Электрометаллургия. 2006. № 6. С. 27-32.
15. Бикеев Р.А. Динамические режимы в электромеханических системах дуговых сталеплавильных печей и их воздействие на вводимую активную мощность: дис. ... канд. техн. наук / Новосиб. гос. техн. ун-т. Новосибирск, 2004. 182 с.

References

1. Nikolaev A.A., Lukyanov S.I., Tulupov P.G. Improved method for controlling the electrical mode of a ladle furnace installation using arc current harmonics information. *Stal* [Steel]. 2019;(4):16-21. (In Russ.)
2. Jansen T., Krüger K., Schliephake H. et al. Advanced Foaming Slag Control. 10th European Electric Steelmaking Conference, Graz. 2012:385-390.
3. Jansen T., Krüger K., Schliephake H. et al. Power control in an electric arc furnace using an acoustic foaming slag recognition system. *Chemie Metally* [Ferrous metals]. 2011;(2):20-25. (In Russ.)
4. Serikov V.A. *Akusticheskie i vibratsionnye kharakteristiki sverhmoshchnykh dugovykh staleplavilnykh elektropechey: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Acoustic and vibration characteristics of super-powerful electric arc steelmaking furnaces. PhD dissertation]. Novosibirsk, 2016. 147 p.
5. Agapitov E.B., Kornilov G.P., Khranishin T.R., Erofeev M.M., Nikolaev A.A. Control of thermal and electrical regimes of the ladle furnace unit. *Electrometallurgiya* [Electrometallurgy]. 2006;(6):11-16. (In Russ.)
6. Agapitov E.B., Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Erofeev M.M., Zhuravlyov Yu.P., Musienko A.P. Development of the control system for an electric arc ladle furnace unit to improve heating efficiency. *Izvestiya Vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics]. 2006;(4):81-84. (In Russ.)
7. Agapitov E.B., Kornilov G.P., Erofeev M.M., Samoilin S.A. Energy saving potential during melt treatment in a ladle furnace unit. *Obrazovanie. Nauka. Proizvodstvo i upravlenie v XXI veke: Materialy Mezhdunar. nauch. Konferentsii* [Education. Science. Production and management in XXI century. Proceedings of International Scientific Conference]. Stary Oskol, 2004, vol. 2, pp. 15-17. (In Russ.)
8. Mironov Yu.M. *Elektricheskaya duga v elektrotekhnologicheskikh ustanovkakh: monografiya* [Electric Arc in electrotechnological units: monograph]. Cheboksary: Chuvash University Publishing House, 2013, 290 p. (In Russ.)
9. Makarov A.N. *Zakony teploobmena elektricheskoy dugi i fakela v metallurgicheskikh pechakh i energeticheskikh ustanovkakh* [Heat transfer laws of electric arc and flame in metallurgical furnaces and power plants]. Tver: Tver State Technical University Publishing House, 2012. 164 p. (In Russ.)
10. Nekhamin S.M. *Sozдание i vnedrenie energoeffektivnykh dugovykh i shlakovykh elektropechnykh kompleksov s ispolzovaniem postoyannogo toka i toka ponizhennoy chastoty: dis. ... dokt. tekhn. nauk* [Creation and implementation of energy-efficient arc and slag electric furnace complexes using direct current and reduced frequency current. Doctoral dissertation]. Moscow, 2015. 405 p.
11. Nikolaev A.A., Russo Zh.Zh., Stsimanski V., Tulupov P.G. Experimental study of the harmonic composition of arc currents for electric arc steelmaking furnaces of various capacities. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016;(3):106-120. (In Russ.)
12. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Omelchenko E.Ya. Experimental studies of the harmonic composition of currents and voltages of arcs in a powerful shaft-type electric arc steelmaking furnace. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical engineering systems and complexes]. 2018;(4(41)):63-72. (In Russ.)
13. Tuluevskii Yu.N., Zinurov I.Yu. *Innovatsii dlya dugovykh staleplavilnykh pechey. Nauchnye osnovy vybora: monografiya. Seriya monografy «Sovremennye elektrotekhnologii»* [Innovations for electric arc steelmaking furnaces. Scientific basis for selection: monograph. A series of monographs "Modern electrical technologies"]. Vol. 12. Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2010. 347 p. (In Russ.)
14. Matrosov A.P., Mironov Yu.M. Computer simulation of processes in electric circuits of arc furnaces. *Electrometallurgiya* [Electrometallurgy]. 2006;(6):27-32. (In Russ.)
15. Bikeev R.A. *Dinamicheskie rezhimy v elektromekhanicheskikh sistemakh dugovykh staleplavilnykh pechey i ih vozdeistvie na vvodimuyu aktivnuyu moshchnost: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Dynamic modes in electromechanical systems of electric arc steelmaking furnaces and their impact on the input active power. PhD dissertation]. Novosibirsk, 2004. 182 p.

Поступила 28.10.2025; принята к публикации 17.11.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 28/10/2025; revised 17/11/2025; published 25/12/2025

Николаев Александр Аркадьевич – кандидат технических наук, 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 – кандидат технических наук, доцент 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

Буланов Михаил Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры АЭПиМ,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: bulanovv.m.v@gmail.com. ORCID 0000-0001-9051-1012

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

Platon G. Tulupov – PhD(Eng.), Associate Professor of the Department of Automated Electric Drive
and Mechatronics,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: tulupov.pg@mail.ru. ORCID 0000-0002-3058-2406

Sergey S. Ryzhev – Postgraduate Student of the Department of Automated Electric Drive and Mechatronics,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: snaffls18@gmail.com. ORCID 0000-0001-8525-279X

Mikhail V. Bulanov – PhD(Eng.), Associate Professor of the Department of Automated Electric Drive
and Mechatronics,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: bulanovv.m.v@gmail.com. ORCID 0000-0001-9051-1012