УДК 658.012.011.56:658.512

В.В.ВАСИЛЬЕВ, *канд. техн. наук, ст. инженер, 328-84-31*
Санкт-Петербургский государственный горный университет

V.V.VASILIEV, *PhD in eng. sc., senior engineer, 328-84-31*
Saint Petersburg State Mining University

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РУДНО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКА ЭЛЕКТРОДОВ

Рассмотрены особенности электроплавки в рудно-термической печи, а также взаимосвязь электрических и технологических параметров и их влияние на характер протекания процессов в рудно-термической печи. Описан метод определения текущих значений электротехнологических характеристик на основе анализа гармонического состава тока электродов. Показана структура системы управления рудно-термической печи.

***Ключевые слова*:** рудно-термическая печь, гармонический анализ тока, электрическая дуга, система управления.

CONTROL SYSTEM OF ORE-SMELTING FURNACE USING HARMONIC COMPONENTS OF ELECTRODES CURRENT

The features of electric melting in ore-smelting furnace are considered, and the correlation of electrical and technological parameters and their influence on the character of the processes in ore-smelting furnace. The method to determine the current values of electrotechnological characteristics based on the harmonic analysis of electrodes current. The structure and algorithm of control system for ore-smelting furnace is demonstrated.

***Key words*:** ore-smelting furnace, harmonic analysis, electrical arc, control system.

Электроплавка – один из важнейших технологических процессов в металлургии черных и цветных металлов. В черной металлургии электроплавка применяется в основном для производства качественных сталей и ферросплавов, в цветной – для производства сплавов и рафинирования металлов, для переработки рудного сырья и шлаков в металлургии никеля, меди, свинца, цинка, олова.

Электропечи обладают рядом преимуществ – в них можно перерабатывать сырье практически любого состава и дисперсности, и недостатков – сложностью автоматизации и утилизации бедных газов, содержащих сернистый ангидрид [4].

Стабильность работы рудно-термической печи (РТП) обусловлена поддержанием заданного распределения энергии в ванне печи. Его изменение вызывает изменение электрических и технологических параметров технологического процесса. Это предполагает возможность оценки технологических параметров по распределению энергии в ванне печи и оценки распределения энергии, в свою очередь, по электрическим параметрам.

Для управления работой электропечи необходимы следующие условия: изменение напряжения путем переключения ступеней печного трансформатора; изменение тока при неизменном вторичном напряжении за счет перемещения электродов; корректирующая загрузка компонентов шихты. Важно поддерживать с высокой точностью на за-

данном уровне не только мощность, выделяющуюся в печи, но и определенное соотношение ее составляющих, т.е. распределение этой мощности в дуге, шихте и расплаве [1].

Из-за агрессивности среды и высокой температуры невозможно использование многих необходимых датчиков для прямого непрерывного измерения степени развития электрической дуги в рудно-термической печи. Поэтому о развитии электрической дуги предлагается судить по косвенным показателям.

Связь условий возникновения и степени развития дуги с электрическими параметрами печи и свойствами шихты и расплава, появляющаяся в изменении гармонического состава напряжения и тока электродов, предполагает контроль не только степени развития дуги и распределения мощности в печи между дугой и материалами, заполняющими ванну, но и целого ряда технологических параметров, влияющих на работу печи: количество расплава в печи, его состав, степень восстановления целевого продукта и т.п.

Наличие в печи электрической дуги с ее нелинейной и несимметричной характеристикой вызывает в той или иной степени искажение формы кривых тока и напряжения на соответствующих осциллограммах. Для оценки степени развития дуги в этом случае применяется как описательная качественная характеристика осциллограмм, так и их численная расшифровка [3].

Прежде всего, представляют интерес искажения формы кривых тока и фазового напряжения в наиболее характерные моменты того или иного процесса. По этим осциллограммам можно провести общий анализ данного режима, получить сведения о характере и особенностях исследуемого процесса.

Количественная оценка несинусоидальности кривых рабочего тока электрода или фазового напряжения позволяет определить гармонические составляющие в различные периоды технологического процесса. На основании результатов измерения можно выбрать гармоники, которые наиболее точно характеризуют те или иные моменты работы электропечи, с помощью которых можно идентифицировать технологические факторы, оказывающие влияние на горение дуги.

В ходе исследований, в частности [2], были выяснены основные закономерности, показывающие взаимосвязи относительного содержания 2-й и 3-й гармоник и некоторых технологических параметров, зная которые можно использовать в алгоритмах управления:

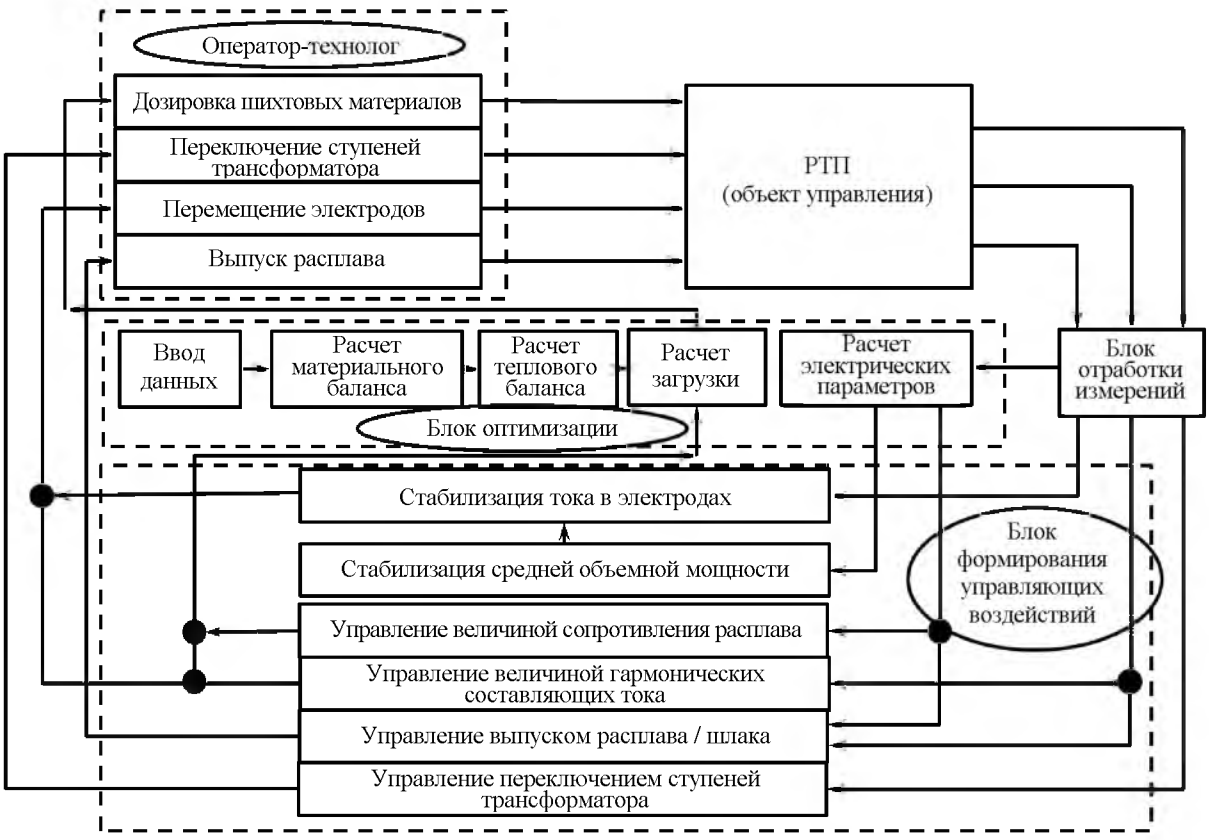
$$\left(\frac{I_3}{I_1}\right)^2 = \frac{1}{3}\frac{U_{ф} - R_0 I_1}{U_{ф}}\frac{I_{д}}{I_1}, \qquad (1)$$

где I_3/I_1 – относительное содержание 3-й гармоники с частотой 150 Гц; $U_{ф}$ – фазное напряжении электрода; I_1 – полный ток электрода, $I_{д}$ – ток дуги; R_0 – электросопротивление расплава, на который горит дуга.

Для печей, работающих с открытой дугой ($I_{д} = I_1$), уравнение (1) позволяет определить сопротивление расплава, на который горит дуга, при известном значении I_3/I_1. Величина R_0 в этом случае связана при постоянном составе расплава с его уровнем или температурой, или при постоянном уровне с его составом.

Таким образом, знание относительного содержания в токе электрода гармонической составляющей с частотой 150 Гц для рудно-термической печи, эквивалентная схема которой представляет собой сопротивление дуги, соединенное последовательно с сопротивлением расплава, на который она горит, может быть использовано для определения окончания плавки, т.е. достижения заданного уровня расплава при неизменном его составе или, наоборот, – при постоянном уровне. Уравнение (1) может быть также использовано и для определения необходимости корректировки состава расплава или своевременного перехода на другой режим при проведении плавки в несколько стадий.

В рудно-термической печи в определенных условиях дуга переменного тока также может стать причиной появления в токе электрода составляющей с частотой



Структура системы управления рудно-термической печью

100 Гц – 2-й гармоники I_2. В исследовании [3] дано объяснение природы вентильного эффекта электрической дуги переменного тока. Это вызвано разным характером реакций на электродах и различной плотностью эмиссионных токов из катодных пятен на них, если эти электроды разной природы и находятся в различных тепловых условиях.

Относительное содержание гармонической составляющей с частотой 100 Гц в токе электрода РТП имеет вид

$$\left(\frac{I_2}{I_1}\right)^2 = k_1 \frac{2E_1}{U_{\text{ô}}}\left(1-\frac{I_{\text{ä}}}{I_1}\right) \pm \frac{E_2 \pm k_2 R_0 I_1}{U_{\text{ô}}}\frac{I_{\text{ä}}}{I_1}, \quad (2)$$

где I_2/I_1 – относительное содержание 2-й гармоники с частотой 100 Гц; k_1, k_2 – коэффициенты пропорциональности; E_1 – изменение изобарного потенциала (ΔZ) той реакции, в которой участвует углерод электрода, $\mathring{A}_1 = -\frac{\Delta Z}{nF}$; E_2 – разница приэлектродных падений напряжений в соседних полупериодах.

Это уравнение справедливо в диапазоне значений $I_{\text{ä}}/I_1$ от нуля до единицы, т.е. при работе печи в режиме «сопротивления» и в дуговом, и смешанных режимах. Вместе с (1) уравнение (2) образует систему, решение которой при известных значениях I_3/I_1 и I_2/I_1, определяемых с помощью анализатора гармонического состава тока, позволяет определить электросопротивление реакционной зоны, распределение тока между дугой и шунтом и связанные с ними технологические параметры.

Величины E_1 и E_2 в уравнении (2) зависят от температуры или состава расплава, на который горит дуга. Поэтому при известных зависимостях этих величин от состава расплава или его температуры уравнения (1) и (2) позволяют не только определить значения R_0 и геометрические размеры реакционной зоны, но и состав расплава. Состав

расплава в рудно-термической печи меняется довольно медленно и в достаточно узких пределах. Поэтому предварительные ориентировочные расчеты значений E_1 и E_2 в дальнейшем при работе печи могут быть легко откорректированы и введены в соответствующие уравнения.

В отличие от методов, использующихся для оценки протекания технологического процесса, анализа состава расплава или отходящих печных газов, которые с большим опозданием отражают изменения, происходящие в ходе технологического процесса, гармонический анализ тока и напряжения дает оперативную картину состояния реакционной зоны и процессов, протекающих в ней.

На основании алгоритмов управления, использующих величины сопротивления расплава, предложена автоматизированная схема управления, позволяющую диагностировать уже в начальной стадии отклонения в ходе технологического процесса и своевременно изменять его электрические параметры: ток – перемещением электродов и напряжение – переключением ступеней напряжения трансформатора (см. рисунок).

Таким образом, комплексное использование электрических характеристик представляется обоснованным и более точным, чем используемые в данный момент субъективные методы управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вапник М.А.* Автоматическое управление рудно-термическими печами / М.А.Вапник, Э.Э.Семенов; НИИТЭХИМ. М., 1977.

2. Влияние гармонической составляющей с частотой 100 Гц в токе электрода на работу рудно-термической печи / А.А.Педро, И.Н.Белоглазов, В.В.Васильев и др. // Металлург. 2009. № 5.

3. *Сисоян Г.А.* Электрическая дуга в электрической печи. М.: Металлургия, 1974.

4. Электрохимические процессы химической технологии: Учеб. пособие для вузов / Под. ред. В.А.Ершова. Л.: Химия, 1984.

REFERENCES

1. *Vapnik M.A., Semenov E.E.* Ore smelting furnaces automatic control; NIITEKHIM. Moscow, 1977.

2. *Pedro A.A., Beloglazov I.N., Vasiliev V V.* Influence of harmonic component with frequency of 100 Hz in electrode current for ore-smelting furnace operation // Metallurg. 2009. N 5.

3. *Sisoyan G.A.* The electric arc in an electric furnace. Moscow: Metallurgiya, 1974.

4. The electrochemical processes of chemical technology: Studies. manual for high schools / Ed. V.A.Ersho . Leningrad: Khimiya, 1984.