УДК 621.365.2

**А.А.ПЕДРО**, *д-р техн. наук, профессор,*
*зав. лабораторией высокотемературных процессов, pedro1938@mail.ru*
*ООО «ЛЕНГИПРОХИМ», Санкт-Петербург*
**И.Н.БЕЛОГЛАЗОВ**, *д-р техн. наук, профессор (812)328-82-63*
**И.И.БЕЛОГЛАЗОВ**, *аспирант, filosofem@mail.ru*
*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**A.A.PEDRO**, *Dr. in eng. sc., professor, head of laboratory, pedro1938@mail.ru*
*«LENGIPROCHIM» Co, Saint Petersburg*
**I.N.BELOGLAZOV**, *Dr. in eng. sc, professor, (812)328-82-63*
**I.I.BELOGLAZOV**, *post-graduate student, filosofem@mail.ru*
*Saint Petersburg State Mining University*

# ХАРАКТЕР ПОВЕДЕНИЯ ГАРМОНИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ С ЧАСТОТОЙ 100 Гц В ТОКЕ ЭЛЕКТРОДА РУДНО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

Присутствие в составе тока четных гармоник и, прежде всего, гармонической составляющей с частотой 100 Гц возможно лишь при наличии в электрической цепи элементов, сопротивление которых зависит от направления тока. Такими элементами могут быть контакт электрода с расплавом и электрическая дуга переменного тока. От заглубления электрода в расплав и степени развития электрической дуги зависит изменение относительного содержания в токе электрода гармонической составляющей с частотой 100 Гц.

***Ключевые слова*:** рудно-термическая печь, гармоническая составляющая, электрическая дуга, вентильный эффект, постоянная составляющая.

# ABOUT THE NATURE OF HARMONIC COMPONENT WITH FREQUENCY OF 100 Hz IN ELECTRODES CURRENT OF ORE-SMELTING FURNACE

The presence of even harmonic components of current and, above all, the harmonic component with a frequency of 100 Hz is possible only if the electric circuit elements, the resistance of which depends on the direction of current. Such elements may be a contact of electrode with the melt and the electric arc AC. Change the relative content in electrode current harmonic component with a frequency of 100 Hz dependent from the penetration of the electrode in the melt and the degree of electric arc development.

***Key words*:** ore-smelting furnace, harmonic component, electrical arc, valve effect, direct component.

Наличие составляющей с частотой 100 Гц в гармоническом составе тока электрода рудно-термической печи вызвано асимметрией осциллограмм напряжения и тока электрода относительно оси абсцисс. Очевидно, что эта асимметрия обусловлена наличием вентильного эффекта в электрической цепи, что и подтверждается присутствием постоянной составляющей в фазном напряжении рудно-термических печей [2, 3, 5]. Элементом, обладающим полупроводниковым, т.е. вентильным эффектом в рудно-термической печи, могут быть контакт электрода с расплавом и электрическая дуга переменного тока.

Контакт углеродистого электрода с шлаковым расплавом, электропроводность которого носит ионный характер, сопровождается химическим взаимодействием этого электрода с ионами $(SiO_3)^{2-}$, $(Si_2O_5)^{2-}$, $(Si_2O_7)^{6-}$, $(Al_2O_5)^{4-}$, $(AlO_3)^{3-}$, $(AlO_2)^{-}$, $(FeO_2)^{-}$, $(Fe_2O_5)^{4-}$, $(FeO_3)^{3-}$, $(FeO_4)^{5-}$ и др.

В полупериод, когда на электроде плюс, в результате химического взаимодействия углеродистого электрода с отрицательными ионами, находящимися в расплаве, падение напряжения в ванне печи ($U_{эп}$) будет на некоторую величину $E_1$ меньше. И, наоборот, когда на электроде минус, падение напряжения на ту же величину больше по сравнению с напряжением, когда этого взаимодействия нет:

$$U_{ýï1} = U_{ýï} + E_1;\ U_{ýï2} = U_{ýï} - E_1,$$

где $U_{эп1}$ и $U_{эп2}$ – падение напряжения на промежутке электрод-под в соседних полупериодах при наличии химического взаимодействия электрода с компонентами расплава.

В результате в фазном напряжении появляется постоянная составляющая

$$U_{ï.ñò} = (U_{ýï} + E) - (U_{ýï} - E) = 2E_1.$$

Величина $E$ определяется изменением изобарно-изотермического потенциала ($\Delta Z$) той реакции, в которой участвует углерод электрода:

$$E_1 = -\frac{\Delta Z}{n\mathrm{F}},$$

где F – число Фарадея; $n$ – заряд ионов-переносчиков тока;

$$\Delta Z = RT\ln K,$$

$R$ – универсальная газовая постоянная; $T$ – температура электрода в месте контакта с расплавом; $K$ – константа равновесия.

При неизменной температуре и активности компонентов реакционной зоны величина $E$ постоянна и в соответствии с теорией компенсации можно допустить, что во вторичной цепи существует источник напряжения, т.е. источник электромагнитной энергии, в котором напряжение не зависит от сопротивления приемника. Направление тока этого источника зависит от характера реакции на электроде. Практически во всех рудно-термических печах такими реакциями являются реакции, в которых находящиеся в расплаве анионы отдают свои электроны и, таким образом, в измерительной цепи направление $U_{пс}$ будет от «земли» к электроду, т.е. на последнем будет минус.

Для рудно-термической печи, работающей в режиме «сопротивления» (весь ток проходит через контакт электрода с расплавом), величина гармонической составляющей с частотой 100 Гц – 2-й гармоники

$$J_{2ð.â} = \frac{2E_1}{R_k},$$

где $R_k$ – электрическое сопротивление печного контура.

Если обе части данного выражения возвести в квадрат и разделить на $J_1^2$ ($J_1$ – величина гармонической составляющей с частотой 50 Гц (1-й гармоники), практически равной току электрода), получим

$$\left(\frac{J_{2ð.â}}{J_1}\right)^2 = \frac{4E_1^2}{R_k^2 J_1^2} = \frac{4E_1^2}{U_ô^2}$$

или

$$\left(\frac{J_{2ð.â}}{J_1}\right)^2 = \frac{\Delta P_{ð.â}}{P}, \qquad (1)$$

где $\Delta P_{ð.â}$ – разница мощностей, потребляемых печной установкой в соседних полупериодах; $P$ – полная мощность, потребляемая печной установкой.

Как следует из уравнения (1), относительное содержание 2-й гармоники в токе электрода рудно-термической печи, работающей в режиме «сопротивления», характеризует неравномерность нагрузки в полупериоды. С увеличением фазного напряжения эта неравномерность уменьшается.

Однако в большинстве случаев ток в рудно-термической печи проходит не только через контакт электрода с расплавом, но и через сопротивление электрической дуги и контактное сопротивление электрода с твердыми компонентами шихты.

Ток, проходящий через контакт электрода с расплавом $J_ø$ (ток шунта) в отли-

чие от тока дуги $J_{\text{д}}$, обусловленного химическим взаимодействием электрода с расплавом, определяется выражением

$$J_{2\text{х.в}} = \sqrt{\frac{2E_1 J_1}{R_k}\frac{J_{\text{ф}}}{J_1}},$$

а неравномерность нагрузки в полупериоды в результате этого взаимодействия отношением

$$\left(\frac{J_{2\text{х.в}}}{J_1}\right)^2 = \frac{2E_1 J_1}{R_k J_1^2}\frac{J_{\text{ф}}}{J_1} = \frac{2E_1}{U_{\text{ф}}}\frac{J_{\text{ф}}}{J_1}, \qquad (2)$$

или

$$\left(\frac{J_{2\text{х.в}}}{J_1}\right)^2 = \frac{\Delta P_{\text{х.в}}}{P}. \qquad (3)$$

Как было сказано выше, вторым элементом в рудно-термической печи, обладающим вентильным эффектом, может быть электрическая дуга переменного тока. При работе печи с открытой дугой величина гармонической составляющей с частотой 100 Гц в токе электрода, обусловленная вентильным эффектом электрической дуги переменного тока $J_{2\text{д}}$,

$$J_{2\text{д}} = \frac{E_{2\text{д}} \pm aR_0 J_1}{R_k}. \qquad (4)$$

Величина постоянной составляющей фазного напряжения ($U_{\text{пс.д}}$), обусловленной вентильным эффектом электрической дуги переменного тока, при работе печи с открытой дугой,

$$U_{\text{пп.д}} = E_2 \pm aJ_1 R_0, \qquad (5)$$

где $E_2 = U_{\text{ад1}} - U_{\text{ад}}$ – разница прикатодных и прианодных падений напряжения в дуге в соседних полупериодах; $\grave{a} = \Delta j_{\text{д}} / j_{\text{д}}$ – отношение разностей плотностей эмиссионного тока в соседних полупериодах к среднему значению этой плотности; $R_0$ – электросопротивление расплава, над которым горит дуга; $J_1$ – ток электрода, в данном случае равный току дуги $J_{\text{д}}$; $\grave{a}J_1$ – разница токов электрической дуги в соседних полупериодах.

Величина $E_2$ определяется работой выхода электронов из электродов, между которыми горит дуга, а также реакциями на их поверхности, т.е. в конечном итоге материалом электродов [1].

Плотность эмиссионного тока, в конечном итоге коэффициент $a$, определяется материалом и температурой катодных пятен [4].

Таким образом, в цепи, содержащей электрическую дугу, находятся источник напряжения, т.е. источник, напряжение которого не зависит от нагрузки, – $E_2$, и источник тока, т.е. источник электромагнитной энергии, ток которого также не зависит от нагрузки, – $\grave{a}J_1$.

Действительно, работа выхода электронов из катодов и изменение изобарно-изотермического потенциала в результате реакции на поверхности катода зависят только от его материала и состава газов, контактирующих с ним. Также при неизменном токе дуги, разница токов дуги в полупериодах не будет зависеть от величины нагрузки.

Произведя, как и в случае с гармонической составляющей, обусловленной химическим взаимодействием электрода с расплавом, те же математические операции, получим

$$\left(\frac{J_{2\text{х.в}}}{J_1}\right)^2 = \frac{\left(E_{2\text{д}} \pm aR_0 J_1\right)^2}{R_k^2 J^2} = \frac{U_{\text{п д}}\Delta J_{\text{д}}}{U_{\text{ф}} J_1}$$

или

$$\left(\frac{J_{2\text{х.в}}}{J_1}\right)^2 = \frac{\Delta P_{\text{д}}}{P}. \qquad (6)$$

Как и в случае с вентильным эффектом, обусловленным вентильным эффектом контакта электрода с расплавом, в электропечи с открытой дугой относительное содержание в токе электрода гармонической составляющей с частотой 100 Гц отражает неравномерность нагрузки в полупериоды.

Если дуга шунтирована сопротивлением шихты и расплава, то относительное содержание в токе гармонической составляющей с частотой 100 Гц, обусловленное вентильным эффектом дуги переменного тока,

$$\left(\frac{J_{2ä}}{J_1}\right)^2 = \left(E_{2ä} \pm aR_0J_1\right)^2 \frac{1}{U_ô}\frac{J_ä}{J_1}, \qquad (7)$$

или

$$\left(\frac{J_2}{J_1}\right)^2 = \left(E_{2ä} \pm a\frac{R_0}{R_k}\right)^2 \frac{1}{U_ô}\frac{J_ä}{J_1}. \qquad (8)$$

При существовании в рудно-термической печи обоих вентильных эффектов относительное содержание в токе электрода гармонической составляющей определяется выражением

$$\left(\frac{J_2}{J_1}\right)^2 = \frac{2E_1}{U_ô}\frac{J_ø}{J_1} \pm \frac{E_2 \pm aJ_1R_0}{U_ô}\frac{J_ä}{J_1}. \qquad (9)$$

Подставив в уравнение (9) вместо $J_ø / J_1$ равное ему $\left(1 - \frac{J_ä}{J_1}\right)$, после преобразования получим

$$\left(\frac{J_2}{J_1}\right)^2 = \frac{2E_1}{U_ô} - K\left(2E_1 \pm E_2 \pm aJ_1R_0\right), \qquad (10)$$

где $K = \frac{1}{U_ô}\frac{J_ä}{J_1}$; $В^{-1}$.

При работе печи в режиме сопротивления (при отсутствии дуги) уравнение (10) принимает вид (3), так как $K = 0$.

При работе печи с открытой дугой уравнение (10) примет вид (6), так как

$$K2E_1 = \frac{2E}{U_ô}\frac{J_ä}{J_1},$$

где $\frac{J_ä}{J_1} = 1$.

Таким образом, представляет интерес относительное содержание гармонической составляющей с частотой 100 Гц в токе электрода печи РКЗ-10,5 для плавки нормального электрокорунда.

Процесс плавки нормального электрокорунда носит периодический характер и состоит из стадий наплавления ванны, доводки образовавшегося расплава до заданного содержания в нем $Al_2O_3$ и перегрева его до жидкоподвижного состояния и последующего выпуска из печи.

Особенностью плавки нормального электрокорунда является высокая по сравнению с обычными силикатными шлаками электропроводность получаемого расплава. Поэтому для поддержания установленных условиями эксплуатации печного трансформатора и требованиями плавки силы тока и мощности электропечь работает в двух режимах:

1) на стадии расплавления шихты – в режиме сопротивления при погруженных на ту или иную глубину в слой шихты или шлака электродах;

2) на стадии доводки расплава – в дуговом режиме.

В первом случае энергия выделяется в шихте и расплаве, во втором, в расплаве и в дуге.

На стадии расплавления шихты появление в токе электрода 3-й и 5-й гармоник носит случайный и нерегулярный характер, обусловленный нарушениями хода технологического процесса, например, при зависании шихты.

Гармоническая составляющая с частотой 100 Гц в этот период невелика и изменения ее содержания в токе аналогичны изменению самого тока, т.е. с увеличением тока увеличивается относительное содержание 2-й гармоники в нем и, наоборот, с уменьшением тока электрода падает и содержание 2-й гармоники. Ее наличие на данной стадии вызвано вентильным эффектом контакта электрода с расплавом, о чем свидетельствует и постоянная составляющая фазного напряжения, имеющая направление от «земли» к электроду, т.е. на электроде находится минус. Это значит, что на поверхности углеродистого электрода идут реакции восстановления оксидов железа и кремния, находящихся в расплаве.

После проплавления шихты и вскрытия колошника в результате уменьшения электрического сопротивления расплава электроды постепенно выводятся из него для сохранения заданных силы тока и мощности. В определенный момент возникает дуга. С возникновением устойчивой электри-

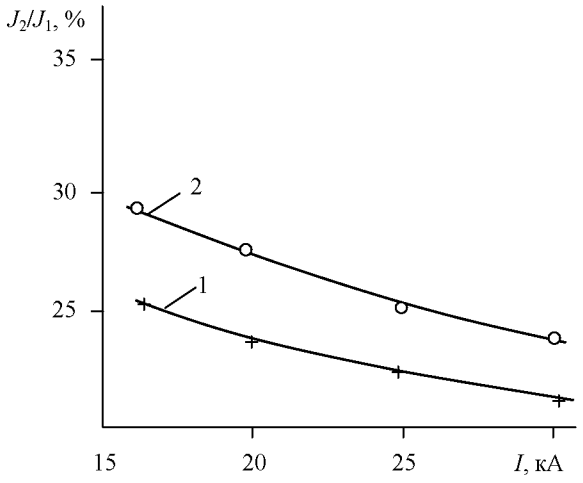



Рис.1. Зависимость относительного содержания в токе электрода печи РКО-10,5 для плавки нормального электрокорунда гармонической составляющей с частотой 100 Гц от величины тока 2-й гармоники – $J_2/J_1$. Содержание $Al_2O_3$ в расплаве; %: 1 – 93; 2 – 94

ческой дуги наряду с гармонической составляющей с частотой 100 Гц в токе электрода появляется и постепенно увеличивается относительное содержание гармонических составляющих с частотой 150 и 250 Гц. В отличие от стадии расплавления, на стадии доводки при увеличении тока электрода, т.е. уменьшении степени развития дуги, относительное содержание 2-й гармоники, как 3-й и 5-й уменьшается и, наоборот, возрастает, если ток уменьшается.

Этот факт, а также то, что на этой стадии постоянная составляющая фазного напряжения меняет знак (плюс на электроде) свидетельствует о том, что наличие 2-й гармоники, т.е. ассиметрии вольт-амперной характеристики относительно оси абсцисс, обусловлено вентильным эффектом электрической дуги. Температура катодного пятна, когда он находится на твердом электроде, выше, чем в полупериод, когда катодом является жидкоподвижный шлак. Поэтому эмиссия электронов, а следовательно и ток, больше (а напряжение меньше), когда катод – электрод.

На этой стадии зависимость относительного содержания в токе электрода гармонической составляющей с частотой 100 Гц абсолютно соответствует уравнению (6) и ее наклон определяется сопротивлением $R_0$, т.е. температурой и составом расплава (рис.1) [3].

На рис.2 показаны зависимости относительного содержания в токе электрода фосфорной печи РКЗ-80Ф гармонической составляющей с частотой 100 Гц от тока электрода и активного сопротивления фазы.

Так как постоянная составляющая напряжения имела направление от электрода к расплаву, т.е. плюс в измерительной цепи находился на электроде, то наличие 2-й гармоники в данном случае можно объяснить преобладающим действием вентильного эффекта дуги по сравнению с выпрямляющим действием контакта электрода с расплавом. Однако с увеличением тока при неизменном напряжении, т.е. с увеличением заглубления электрода, наблюдается влияние вентильного эффекта контакта электрода с расплавом, что находит отражение в нелинейности полученных кривых.

На рис.2 пунктирными линиями показаны зависимости, когда при том же напряжении и токе была отмечена более глубокая посадка электродов.

Эти же зависимости, полученные на фосфорной печи с установленной мощностью печного трансформатора 24 МВ·А в г.Пистериц (Германия), носят другой характер: с увеличением тока растет и относительное содержание 2-й гармоники, а с увеличением активного сопротивления фазы – падает. Если в предыдущем случае направление постоянной составляющей фазного напряжения было от электрода к «земле» (на электроде был плюс), то во втором наоборот – плюс находился на расплаве. Это указывает на то, что на немецкой печи преобладает вентильный эффект контакта электрода с расплавом, т.е. электроды расположены глубже в реакционной зоне по сравнению с печью РКЗ-80Ф и электрическая дуга, которая в фосфорной печи развита незначительно [1], в печи 24 МВ·А практически отсутствует.

Последнее можно объяснить использованием на немецком заводе в качестве фосфорсодержащего сырья апатита, обладающего более высокой температурой плавления, чем применяемый на печи РКЗ-80Ф

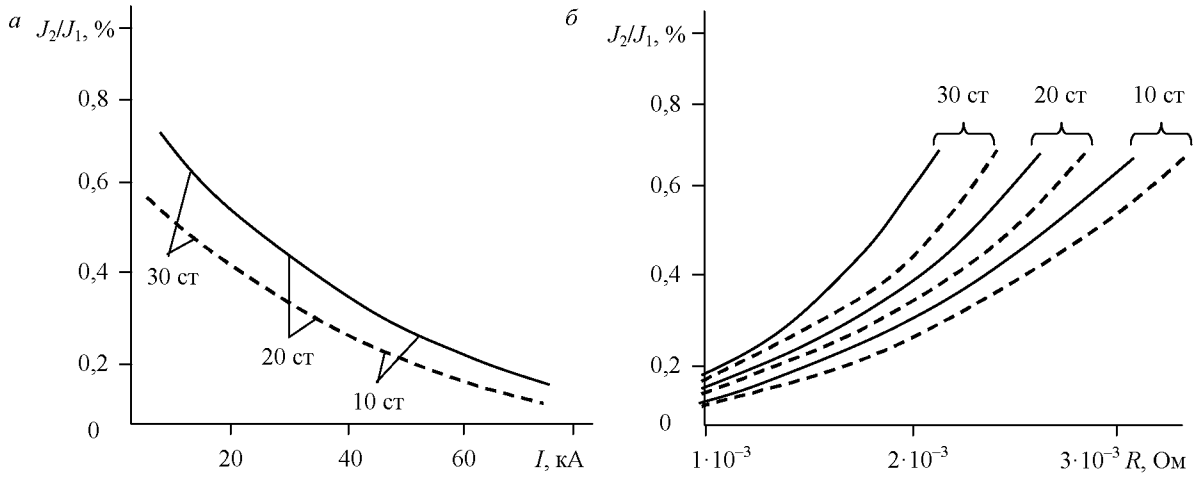



Рис.2. Зависимость относительного содержания в токе электрода печи РКЗ-80Ф гармонической составляющей с частотой 100 Гц от тока (*а*) и электросопротивления печного контура

фосфорит Каратау. Поэтому вязкость расплава, а следовательно, и электросопротивление на печах 24 МВ·А выше, чем на печах РКЗ-80Ф.

Кроме того, на немецких печах модуль кислотности и остаточное содержание $P_2O_5$ в шлаке выше по сравнению с печами РКЗ-80Ф – соответственно 0,95 и 1,5 % против 0,90 и 1 %.

Как известно [1], с повышением содержания кремнезема, т.е. с повышением модуля кислотности, а также с увеличением содержания $P_2O_5$, в шлаке растет электросопротивление.

Именно эти два последних обстоятельства и ведут к повышенному заглублению электродов в реакционную зону. Следствием этого и является превалирующее воздействие вентильного эффекта контакта электрода с расплавом над вентильным эффектом электрической дуги переменного тока.

Это сопровождается изменением напряжения постоянной составляющей фазного напряжения и характера изменения относительного содержания гармонической составляющей с частотой 100 Гц от величины тока на печи 24 МВ·А по сравнению с печью 80 МВ·А.

## Выводы

1. Присутствие в гармоническом составе тока электрода рудно-термической печи составляющей с частотой 100 Гц вызвано существованием вентильного эффекта электрической дуги переменного тока или контакта электрода с расплавом.

2. При существовании обоих вентильных эффектов результирующее значение относительного содержания в токе электрода гармонической составляющей с частотой 100 Гц зависит от распределения тока электрода между дугой и шунтирующим ее сопротивлением шихты или расплава.

3. Относительное содержание в токе электрода гармонической составляющей с частотой 100 Гц характеризует неравномерность нагрузки в соседних полупериодах.

4. Относительное содержание в токе электрода гармонической составляющей с частотой 100 Гц может быть использовано для оценки состава расплава и оценки положения рабочего конца электрода относительно этого уровня.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ершов В.А. Электротермия фосфора / В.А.Ершов, С.Д.Пименов. СПб: Химия, 1996. 248 с.

2. *Педро А.А.* О природе постоянной составляющей напряжения электрической дуги в печи для получения нормального электрокорунда // Промышленная энергетика. 1993. № 5. С.28-31.

3. *Сергеев П.В.* Энергетические закономерности рудно-термических электропечей, электролиза и электрической дуги. Алма-Ата: Изд-во Академии наук КазССР, 1963. 252 с.

4. *Сисоян Г.А.* Электрическая дуга в электрической печи. М.: Металлургия, 1974. 304 с.

5. Электротермические промышленные печи. Дуговые печи и установки специального нагрева: Учебник для вузов / Под ред. А.Д.Свечанского. М.: Энергоиздат, 1981, 296 с.

**REFERENCES**

1. *Ershov V.A., Pimenov S.D.* Elektroterm of phosphorus. Saint Petersburg: Himiya, 1996. 248 p.

2. *Pedro A.A.* About a nature of direct component of an electric arc phase voltage in the normal corundum furnace. Promyshlennaya energetika. 1993. N 5. P.28-31.

3. *Sergeev P.V.* Ore smelting furnaces, electrolysis and electric arc power regularities. Alma-Ata: Publishing House of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR, 1963. 252 p.

4. *Sisoyan G.A.* The electric arc in an electric furnace. Moscow: Metallurgiya, 1974. 304 p.

5. Thermal-electric oven. Electric arc furnace and the installation of a special heating: textbook for high schools / Ed. by A.D.Svechanskiy. Moscow: Energoizdat, 1981. 296 p.