

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
ГРУЗИНСКОЙ ССР

ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГРУЗИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ им. В.И. ЛЕНИНА

---

На правах рукописи

инж. ЧАЧАНИДЗЕ С.Б.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ  
ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ФЕРРОСПЛАВНЫХ  
ПЕЧАЙ

(05.254 Автоматическое управление и регу-  
лирование - металлургия)

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тбилиси

1971

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
ГРУЗИНСКОЙ ССР

ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГРУЗИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ им. В.И. ЛЕНИНА

---

На правах рукописи

инж. ЧАЧАНИДЗЕ О.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ  
ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ФЕРРОСПЛАВНЫХ  
ПЕЧЕЙ

(05.254 Автоматическое управление и регу-  
лирование - металлургия)

**А в т о р е ф е р а т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тбилиси

1971



669.18

А 62

Работа выполнена в Тбилиском научно-исследовательском институте приборостроения и средств автоматизации (ТНИИСА).

Научный руководитель: кандидат технических наук  
МИКАДЗЕ И.С.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор СИСОЯН Г.А.

доктор технических наук, профессор КЕРЕСЕЛИДЗЕ А.Е.

Ведущее предприятие - Всесоюзный научно-исследовательский институт электротермического оборудования (ВНИИЭТО), г. Москва

Автореферат разослан 26 Февраля 1971 г.

Защита диссертации состоится 29 марта 1971 г. в 15 час. на заседании Совета по присуждению ученых степеней факультета автоматики и вычислительной техники Грузинского политехнического института им. В.И.Ленина по адресу: г.Тбилиси, ул. Ленина, 77, энергокорпус, ауд. 248.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГПИ им. В.И.Ленина по адресу: г.Тбилиси, ул. Ленина, 77, административный корпус.

Ученый секретарь Совета по присуждению ученых степеней факультета автоматики и вычислительной техники, доцент, канд.техн. наук

ГУРГЕНИДЗЕ М.З.

Получение качественных малоуглеродистых ферросплавов в трехфазных электродуговых печах неразрывно связано со степенью оснащения этих печей контрольно-измерительной и регулирующей аппаратурой.

Уровень автоматизации ферросплавных электродуговых печей до сих пор остается низким, так как целый ряд вопросов недостаточно изучен. Это обстоятельство мешает созданию совершенных систем автоматического контроля и управления.

Как правило, разработка систем автоматического регулирования и контроля для отдельных производств наталкивается на отсутствие параметров для извлечения достаточного количества информации об изменениях контролируемых величин.

Известно, что в существующих системах регулирования ферросплавными печами узким местом является отсутствие средств автоматического контроля наличия электрической дуги под электродами, иначе говоря, отсутствие возможности предотвращения соприкосновения электрода с поверхностью расплава.

Естественно, для рафинировочных процессов, т.е. для печей, выплавляющих малоуглеродистые сплавы, контроль наличия дуги под электродами имеет решающее значение, так как соприкосновение электрода с расплавом вызывает науглероживание сплава и делает его некондиционным.

Работ отечественных, а также зарубежных исследователей по контролю наличия дуги под электродами почти не имеется. Наблюдается отставание теории от практики. Поэтому необходимо ликвидировать в какой-то степени существующий пробел в исследовании этого вопроса.

В настоящей диссертационной работе исследован параметр "направление мощности третьей гармоники отдельных фаз", четко контролирующей наличие дуги под электродом в трехфазных электродуговых рафинировочных печах, выплавляющих малоуглеродистые сплавы; дается математическое обоснование этого параметра; на базе математической интерпретации выведены новые условия наличия и отсутствия электрической дуги под электродами в трехфазных электродуговых печах.

Для получения качественных показателей в работе исследован и разработан аналоговый прибор для измерения активного сопротивления

$$R_{\text{общ}} = R_{\text{части электрода}} + R_{\text{дуга}} + R_{\text{расплава}}$$

при разных условиях горения дуги под электродами (обвал шихты, добавление шихты).

В работе дается новый параметр регулирования электрического режима, суммарное значение абсолютных величин фазовых токов  $|i_1| + |i_2| + |i_3|$  с применением второго параметра "направление мощности третьей гармоники в отдельных фазах", обеспечивающего пофазное (индивидуальное) регулирование электродов, когда регулирующим параметром является "ток".

В работе дается новый метод вывода фактического электрического нуля (расплавленный металл).

Для закрытых ферросплавных печей в работе исследован и разработан прибор, осуществляющий автоматический учет отдельных компонентов шихты.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка цитированной литературы из 18 наименований.

ний и 28 рисунков. Общий объем работы 114 страниц машинописного текста.

Некоторыми авторами были сделаны попытки создания устройства, контролирующего наличие электрической дуги под электродами, основанного на параметре "уровень напряжения третьей гармоники в фазном напряжении". При этом подразумевалось, что электрическая дуга под электродами существует, если в фазном напряжении имеется определенный уровень напряжения третьей гармоники, и отсутствует, если в фазном напряжении исчезает напряжение третьей гармоники.

Как показали эксперименты, параметр "уровень напряжения третьей гармоники в фазном напряжении" не может служить достоверным параметром контроля наличия электрической дуги в трехфазных электродуговых печах.

При разработке нового способа контроля электрической дуги под электродами для трехфазных электродуговых печей был принят параметр "направление мощности третьей гармоники в отдельных фазах". Новый способ контроля наличия электрической дуги под электродами заключается в следующем.

Рассмотрим силовую цепь печи (рис. I).

Соединение низкой стороны силового печного трансформатора не имеет значения, так как генераторами токов высших гармоник являются электрические дуги.

При симметричном горении дуг трех фаз, т.е. при равенстве нелинейных сопротивлений дуг (подразумевается, что печь симметрична и что сопротивление коротких сетей одинаково) токи третьих гармоник во всех трех фазах отсутствуют.

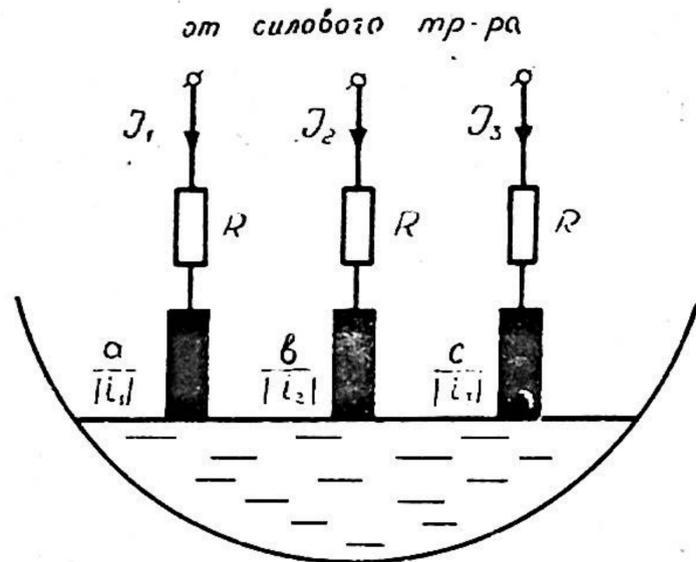


Рис. 1

При нарушении симметрии, т.е. при выходе одного или двух электродов из симметричного горения дуг трех фаз (или соприкосновения электрода с поверхностью расплава), в фазовых токах  $i_1, i_2, i_3$  печи появляются токи третьих гармоник  $i_{13}, i_{23}, i_{33}$ , которые имеют определенное направление. Например, при соприкосновении I-го электрода с поверхностью металла (короткое замыкание I-ой фазы с металлом) сумма третьих гармоник 2 и 3 фаз проходит в I фазе в обратном направлении, т.е. имеем:

$$i_{13} = -(i_{23} + i_{33})$$

При соприкосновении 2-го электрода с металлом имеем (короткое замыкание 2-й фазы с металлом)

$$i_{23} = -(i_{13} + i_{33})$$

При соприкосновении 3-го электрода с поверхностью металла имеем (короткое замыкание 3-й фазы с металлом)

$$i_{33} = -(i_{13} + i_{23})$$

При соприкосновении двух электродов I-го и 2-го (короткое замыкание I-й и 2-й фаз с металлом) будем иметь:

$$i_{13} = i_{23} = -\frac{1}{2} i_{33}$$

С целью определения направления токов третьих гармоник в отдельных фазах разработан прибор, приведенный на рис. 2.

Чтобы определить направление токов третьих гармоник в отдельных фазах, т.е. определить электрод, вышедший из симметричного горения дуг, надо иметь опорное напряжение, по отношению к которому определяется направление токов третьих гармоник. Как опорное напряжение нами взято напряжение третьей гармоники выхода утроителя частоты  $(U_{g1} + U_{g2} + U_{g3})$ , на вход которого подаются напряжения дуг трех фаз, снятых с электродов.

Прибор (рис. 2) работает следующим образом. Во вторичных цепях печных трансформаторов тока ПТТ включаются специальные измерительные трансформаторы тока ИТТ. Во вторичных обмотках последних включаются активные сопротивления  $R$ , с которых снимаются напряжения, имитирующие фазовые токи печи в виде напряжений  $U_{i1}, U_{i2}, U_{i3}$ .

Далее напряжения  $U_{i1}, U_{i2}, U_{i3}$  подаются на выходы полосовых фильтров ПФ<sub>1</sub>, ПФ<sub>2</sub>, ПФ<sub>3</sub>, настроенных на частоту  $f_0 = 150$  гц.

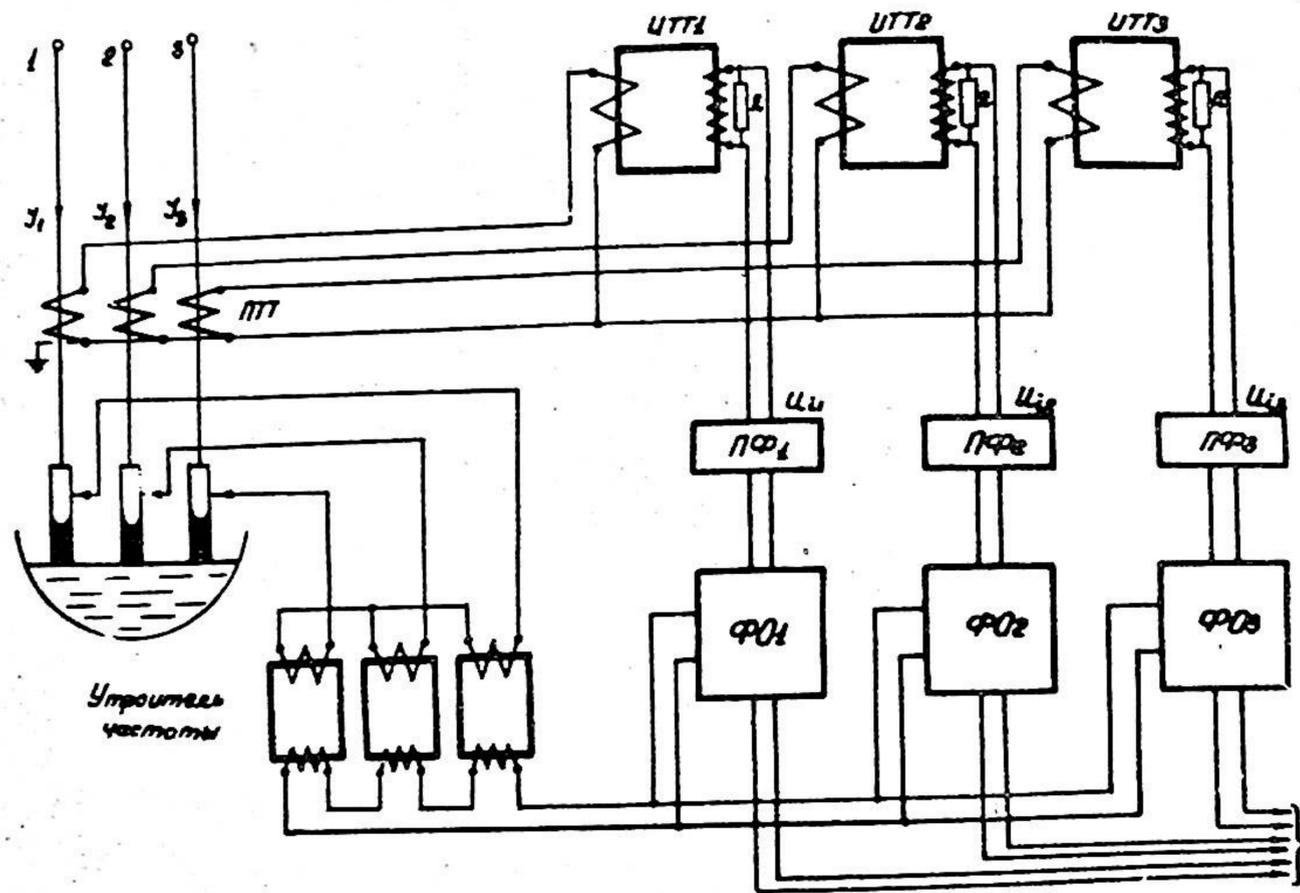


Рис. 2

Выходы полосовых фильтров с целью определения направления токов третьих гармоник подаются на одни входы фазочувствительных органов  $\Phi_{01}$ ,  $\Phi_{02}$ ,  $\Phi_{03}$ , а на вторые входы —  $\Phi_{01}$ ,  $\Phi_{02}$ ,  $\Phi_{03}$  — подается опорное напряжение (выход утроителя частоты). Выходы фазочувствительных органов  $\Phi_{01}$ ,  $\Phi_{02}$ ,  $\Phi_{03}$  в виде напряжения постоянного тока определенной полярности соответствуют определенным направлениям токов третьих гармоник в отдельных фазах (полярность и величина выходного напряжения фазочувствительных органов зависят от угла сдвига между опорным напряжением  $U_{он}$  и входным сигналом  $U_{i13}$  (токи третьей гармоники

отдельной фазы).

С целью математического обоснования нового параметра контроля наличия дуги под электродами рассматривается электрическая схема печной установки (рис. 1).  $R$  — активное сопротивление, равное

$$R = R_{кc} + R_{части электрода} + R_{расплава},$$

где  $R_{кc}$  — сопротивление короткой сети.

Здесь (рис. 1) вносится новое обозначение нелинейных сопротивлений дуг ( $R_g$ ) отдельных фаз

$$R_{g1} = \frac{a}{|i_{11}|}, \quad R_{g2} = \frac{b}{|i_{22}|}, \quad R_{g3} = \frac{c}{|i_{33}|}, \quad (1)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  — постоянные величины, но могут принимать разные дискретные значения;

$|i_{11}|$ ,  $|i_{22}|$ ,  $|i_{33}|$  — модули фазовых токов печи.

Так как мгновенное значение напряжения дуги при ее горении является постоянной величиной  $U_g = a = const$ , то принятое нами обозначение (1) вполне справедливо.

Составим уравнения, описывающие схему (рис. 1)

$$\left. \begin{aligned} Ri_1 - Ri_2 + a \frac{i_1}{|i_{11}|} - b \frac{i_2}{|i_{22}|} &= E_0 \sin(\omega t + \alpha_1) - E_0 \sin(\omega t + \alpha_2) \\ Ri_3 - Ri_2 + c \frac{i_3}{|i_{33}|} - b \frac{i_2}{|i_{22}|} &= E_0 \sin(\omega t + \alpha_3) - E_0 \sin(\omega t + \alpha_2) \end{aligned} \right\} (2)$$

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

При составлении системы уравнений (2) индуктивность цепей  $L$  (в основном короткой сети) не принимается во внимание. Как показали эксперименты, для данной задачи  $L$  имеет количественное, но не качественное значение.

Задача заключается в нахождении фазовых токов  $i_1, i_2, i_3$ , а также токов третьей гармоники этих же токов  $i_{13}, i_{23}, i_{33}$  с целью определения направления последних по отношению к опорному напряжению третьей гармоники  $U_{on(3)}$  (выхода утроителя частоты  $U_{g_1} + U_{g_2} + U_{g_3}$ ).

При решении системы (2) принято во внимание то обстоятельство, что фазовые токи  $i_1, i_2, i_3$  являются периодическими функциями с периодом  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ . Поэтому достаточно найти значения этих функций в промежутке  $T' \leq t < T' + \frac{2\pi}{\omega}$ , где  $T'$  произвольное число.

$T', (T'', T''')$  определяются из следующих условий

$$\left. \begin{aligned} i_1 = 0, i_2 > 0, i_3 < 0 \text{ при } t = T' \\ i_1 \geq 0, i_2 > 0, i_3 < 0 \text{ при } T' \leq t < T'' \end{aligned} \right\} (3)$$

Имея в виду периодичность фазовых токов  $i_1, i_2, i_3$ , аналогично условию (3) составляем ряд условий при  $T'' \leq t < T'' + \frac{\pi}{\omega}, T'' + \frac{\pi}{\omega} \leq t < T' + \frac{\pi}{\omega}, T' + \frac{\pi}{\omega} \leq t < T'' + \frac{\pi}{\omega}, T'' + \frac{\pi}{\omega} \leq t < T' + \frac{2\pi}{\omega}$ .

Таким образом определяются значения  $T', T'', T'''$  из вышеприведенных условий при  $\alpha_1 = 0, \alpha = 120^\circ, \alpha = 240^\circ$ .

$$\left. \begin{aligned} T' &= \frac{\pi}{2\omega} + \frac{1}{\omega} \arccos \frac{-2a - b + c}{3E_0} \\ T'' &= \frac{5\pi}{6\omega} + \frac{1}{\omega} \arccos \frac{a - 2b - c}{3E_0} \end{aligned} \right\} (4)$$

Из (2) находим значения фазовых токов  $i_1, i_2, i_3$ , из условий (3) и аналогичных при

$$T' \leq t < T'', T'' \leq t < T''', \dots T''' + \frac{\pi}{\omega} \leq t < T' + \frac{2\pi}{\omega}.$$

С помощью полученных значений  $i_1, i_2, i_3$  составим следующую величину (опорное напряжение, по отношению к которому определяется направление токов третьих гармоник отдельных фаз)

$$U_{on} = a \frac{i_1}{|i_1|} + b \frac{i_2}{|i_2|} + c \frac{i_3}{|i_3|} + R(i_1 + i_2 + i_3). \quad (5)$$

Находим третью гармонику  $i_{13}, i_{23}, i_{33}$  из фазовых токов  $i_1, i_2, i_3$ ; имеем

$$\left. \begin{aligned} i_{13} &= A' \cos 3\omega t + B' \sin 3\omega t && \text{третья гармоника } i_1 \\ i_{23} &= A'' \cos 3\omega t + B'' \sin 3\omega t && \text{" } i_2 \\ i_{33} &= A''' \cos 3\omega t + B''' \sin 3\omega t && \text{третья гармоника } i_3 \\ U_{on(3)} &= A \cos 3\omega t + B \sin 3\omega t && \text{" } U_{on} \end{aligned} \right\} (6)$$

Коэффициенты Фурье  $A', B', A'', B'', A''', B''', A, B$  вычисляются по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} A' &= \frac{\omega}{\pi} \int_{T'}^{T' + \frac{2\pi}{\omega}} i_1(t) \cos 3\omega t \, dt \\ B' &= \frac{\omega}{\pi} \int_{T'}^{T' + \frac{2\pi}{\omega}} i_1(t) \sin 3\omega t \, dt \end{aligned} \right\} (7)$$

Подставляя значения  $i_1, i_2, i_3$  в (7), получим окончательные значения коэффициентов Фурье

$$\left. \begin{aligned} A' &= \frac{4}{9\pi R} (2a \sin 3\omega T' + b \sin 3\omega T'' - c \sin 3\omega T''') \\ B' &= -\frac{4}{9\pi R} (2a \cos 3\omega T' + b \cos 3\omega T'' - c \cos 3\omega T''') \end{aligned} \right\} (8)$$

$$\left. \begin{aligned} A'' &= -\frac{4}{9\lambda R} (a \sin 3\omega T' + 2b \sin 3\omega T'' + c \sin 3\omega T''') \\ B'' &= \frac{4}{9\lambda R} (a \cos 3\omega T' + 2b \cos 3\omega T'' + c \cos 3\omega T''') \end{aligned} \right\} (9)$$

$$\left. \begin{aligned} A''' &= \frac{4}{9\lambda R} (-a \sin 3\omega T' + b \sin 3\omega T'' + 2c \sin 3\omega T''') \\ B''' &= -\frac{4}{9\lambda R} (-a \cos 3\omega T' + b \cos 3\omega T'' + 2c \cos 3\omega T''') \end{aligned} \right\} (10)$$

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{4}{3\lambda} (-a \sin 3\omega T' + b \sin 3\omega T'' - c \sin 3\omega T''') \\ B &= \frac{4}{3\lambda} (a \cos 3\omega T' - b \cos 3\omega T'' + c \cos 3\omega T''') \end{aligned} \right\} (11)$$

Рассмотрим разные случаи горения дуг под электродами.

1)  $a=b=c=a_0$  (симметричное горение дуг).

В этом случае из (4) получим:

$$T' = \frac{\lambda}{2\omega} + \frac{1}{\omega} \arccos \cos \left( -\frac{2a_0}{3E_0} \right)$$

$$T'' = \frac{5\lambda}{6\omega} + \frac{1}{\omega} \arccos \cos \left( -\frac{2a_0}{3E_0} \right)$$

$$T''' = \frac{7\lambda}{6\omega} + \frac{1}{\omega} \arccos \cos \left( -\frac{2a_0}{3E_0} \right)$$

Если обозначим  $\alpha \arccos \cos \left( -\frac{2a_0}{3E_0} \right) = \mathcal{D}$ , получим для коэффициентов Фурье  $A'=0, A''=0, A'''=0, B'=0, B''=0, B'''=0$ .

Следовательно, можно считать, что при симметричном горении дуг ток третьей гармоники отсутствует.

$a=0, b=c=a_0$  (короткое замыкание I-й фазы с металлом).

В этом случае из (4) определяются  $T', T'', T'''$ .

Подставив эти значения  $T', T'', T'''$  в (8), (9), (10), (11), получим:

$$\left. \begin{aligned} A' &= -\frac{8a_0}{9\lambda R} \cos 3\alpha \arccos \cos \frac{a_0}{E_0} & B' &= -\frac{8a_0}{9\lambda R} \sin 3\alpha \arccos \cos \frac{a_0}{E_0} \\ A'' &= \frac{4a_0}{9\lambda R} \cos 3\alpha \arccos \cos \frac{a_0}{E_0} & B'' &= \frac{4a_0}{9\lambda R} \sin 3\alpha \arccos \cos \frac{a_0}{E_0} \\ A''' &= \frac{4a_0}{9\lambda R} \cos 3\alpha \arccos \cos \frac{a_0}{E_0} & B''' &= \frac{4a_0}{9\lambda R} \sin 3\alpha \arccos \cos \frac{a_0}{E_0} \\ A &= -\frac{8a_0}{3\lambda} \cos 3\alpha \arccos \cos \frac{a_0}{E_0} & B &= -\frac{8a_0}{3\lambda} \sin 3\alpha \arccos \cos \frac{a_0}{E_0} \end{aligned} \right\} (12)$$

Как видно из (12), ток третьей гармоники I-й фазы совпадает по фазе с третьей гармоникой опорного напряжения, а токи третьей гармоники 2-й и 3-й фаз находятся в противофазе с последней. При этом ток третьей гармоники I-й фазы является суммой токов третьих гармоник 2-й и 3-й фаз.

3)  $a=b=0, c=a_0$  (короткое замыкание I-й и 2-й фаз с металлом).

Аналогично определяем значения  $T', T'', T'''$  из (4) и, подставив их в (8), (9), (10), (11), получим:

$$\left. \begin{aligned} A' &= -\frac{4a_0}{9\lambda R} \cos 3\alpha \arccos \cos \frac{2a_0}{3E_0} & B' &= -\frac{4a_0}{9\lambda R} \sin 3\alpha \arccos \cos \frac{2a_0}{3E_0} \\ A'' &= -\frac{4a_0}{9\lambda R} \cos 3\alpha \arccos \cos \frac{2a_0}{3E_0} & B'' &= -\frac{4a_0}{9\lambda R} \sin 3\alpha \arccos \cos \frac{2a_0}{3E_0} \end{aligned} \right\} (13)$$

$$\left. \begin{aligned} A''' &= \frac{8a_0}{9\pi R} \cos 3\alpha \cos \frac{2a_0}{3E_0} & B''' &= \frac{8a_0}{9\pi R} \sin 3\alpha \cos \frac{2a_0}{3E_0} \\ A &= -\frac{4a_0}{3\pi} \cos 3\alpha \cos \frac{2a_0}{3E_0} & B &= -\frac{4a_0}{3\pi} \sin 3\alpha \cos \frac{2a_0}{3E_0} \end{aligned} \right\}$$

Из (13) видно, что токи третьей гармоники I-й и 2-й фаз по фазе совпадают с третьей гармоникой опорного напряжения, а токи третьей гармоники 3-й фазы находятся в противофазе с последним.

4) Общий случай, когда  $a = \alpha a_0$ ,  
 $b = c = a_0$  при  $0 \leq \alpha \leq 1$ .

В этом случае рассмотрена только I фаза с коэффициентами  $A', B'$  и опорное напряжение с коэффициентами  $A, B$ .

Определив значения  $T', T'', T'''$  из (4) и подставив эти значения в (8) и (11), получим значения коэффициентов  $A', B', A, B$ . Далее определяем значения:

$$\cos \varphi = \frac{A'A + B'B}{\sqrt{(A')^2 + (B')^2} \cdot \sqrt{A^2 + B^2}}$$

подставив значения коэффициентов  $A', B', A, B$ , получим:

$$\cos \varphi = \frac{2 - \alpha^2 - \alpha \cos(\frac{\alpha-1}{E_0} a_0)}{\sqrt{1 + \alpha^2 - 2\alpha \cos \frac{\alpha-1}{E_0} a_0} \sqrt{4 + \alpha^2 + 4\alpha \cos \frac{\alpha-1}{E_0} a_0}} \quad (14)$$

Рассмотрим два частных случая:

а) при  $\alpha = 1$ , т.е.  $a = b = c = a_0$  - (симметричное горение дуг трех фаз) имеем из (14)

$$\cos \varphi = 0 \quad \varphi = 90^\circ$$

При этом на выходе фазочувствительного органа  $U_{\text{вых}} = 0$ , что и требуется.

б) при  $\alpha = 0$ , т.е.  $a = 0, b = c = a_0$  - (короткое замыкание I-й фазы с металлом); из (14) имеем:

$$\cos \varphi = 1, \quad \varphi = 0 \quad (15)$$

Последнее (15) вполне удовлетворяет (12)-му случаю. Учитывая характеристику фазочувствительного органа при (15) на выходе будет максимальный сигнал, что и требуется.

Из вышерассмотренных случаев получены новые условия наличия и отсутствия электрической дуги под электродом в трехфазных электродуговых печах.

1) Условие наличия электрической дуги под электродами трехфазной электродуговой печи, когда угол сдвига между током третьей гармоники данной фазы и опорным напряжением третьей гармоники  $U_{on(3)}$  из напряжения  $(U_{g1} + U_{g2} + U_{g3})$  больше нуля

$$i_{\varphi 3} \wedge U_{on(3)} > 0$$

2) Условие отсутствия электрической дуги под электродом в трехфазной электродуговой печи, когда угол сдвига между током третьей гармоники данной фазы и опорным напряжением третьей гармоники  $U_{on(3)}$  из напряжения  $(U_{g1} + U_{g2} + U_{g3})$  равен нулю:

$$i_{\varphi 3} \wedge U_{on(3)} = 0$$

Для изучения режима в момент соприкосновения электрода с поверхностью расплава, а также получения качественных показателей изменения общего сопротивления фазы "Z" при разных условиях горения дуги под электродами (обвалы шихты, добавление шихты) производилось измерение общего активного сопротивления, равного

$$R_{\text{общ}} = R_{\text{части электрода}} + R_{\text{дуги}} + R_{\text{расплава}} \quad (16)$$

От величины  $R_{\text{общ}}$  зависит общее сопротивление Z, а от последнего - действия автоматических регуляторов, работающих по параметру,  $Z = \frac{U}{I}$ .

В работе предложено измерение  $R_{общ}$  специальным аналого-вым прибором (рис. 3), состоящим из операционных усилителей (У) постоянного тока, умножающих блоков (УБ), делительного блока (ДБ).

Работа прибора (рис. 3) основана на измерении фазного тока  $I_{\phi}$ , измерения напряжений измеряемой зоны, а затем вычислении активного сопротивления  $R_{общ}$  по следующей общеизвестной формуле

$$R = \frac{P}{I_{\phi}^2},$$

где  $P$  - активная мощность измеряемого участка.

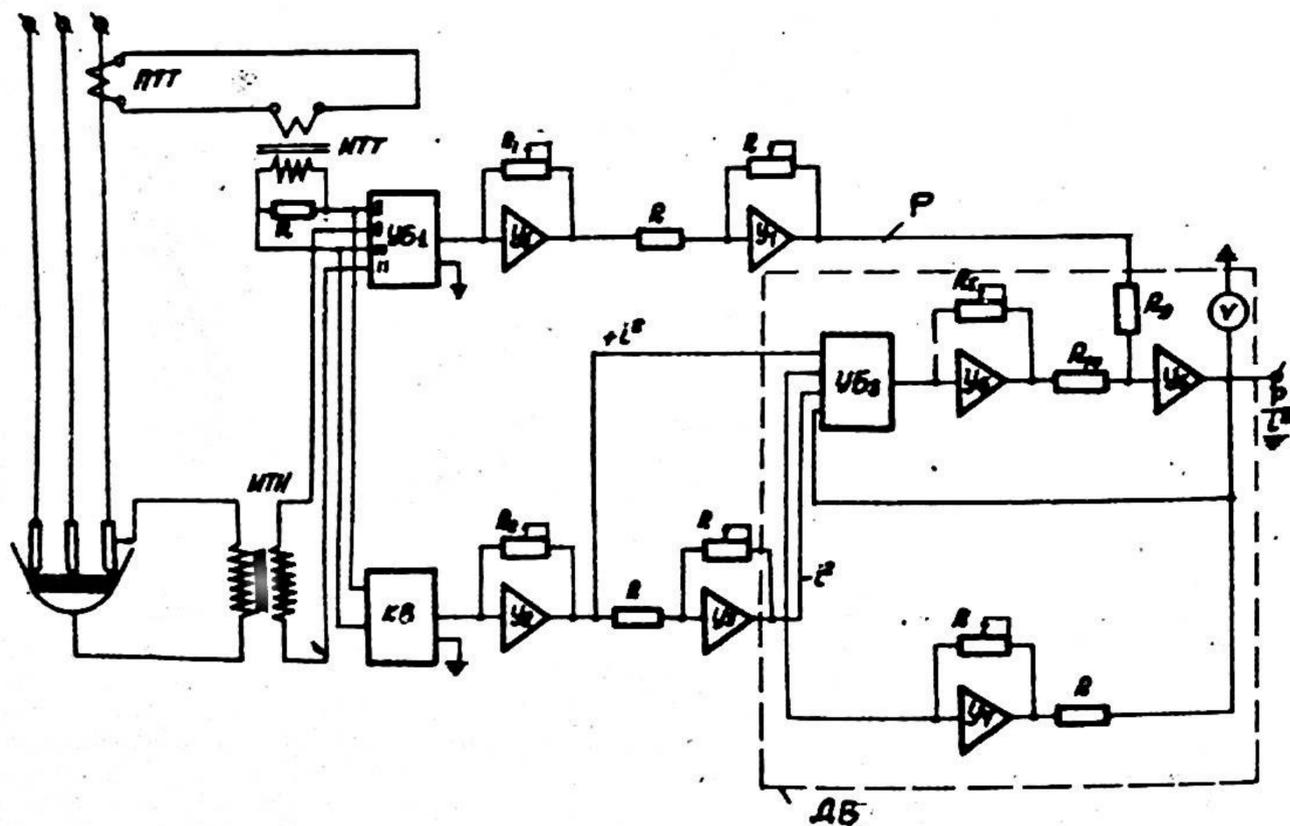


Рис. 3

Первичная обмотка измерительного трансформатора ИТТ (рис.3) включается в цепь печного трансформатора тока ПТТ, а во вторичную обмотку включено активное сопротивление  $R$ , с которого

снимается напряжение  $U_i$ , имитирующее фазовый ток печи  $I_{\phi}$  (конденсатор  $C$  подключается при измерении реактивного сопротивления  $X$ ).

На первичную обмотку измерительного трансформатора напряжения ИТН подается напряжение измеряемого участка, а со вторичной снимается напряжение  $U_i$ .

Предложенный прибор прошел успешные испытания на Зестафонском заводе ферросплавов. По мнению технологов прибор может найти применение для определения фаз плавки на печах ферросплавных заводов.

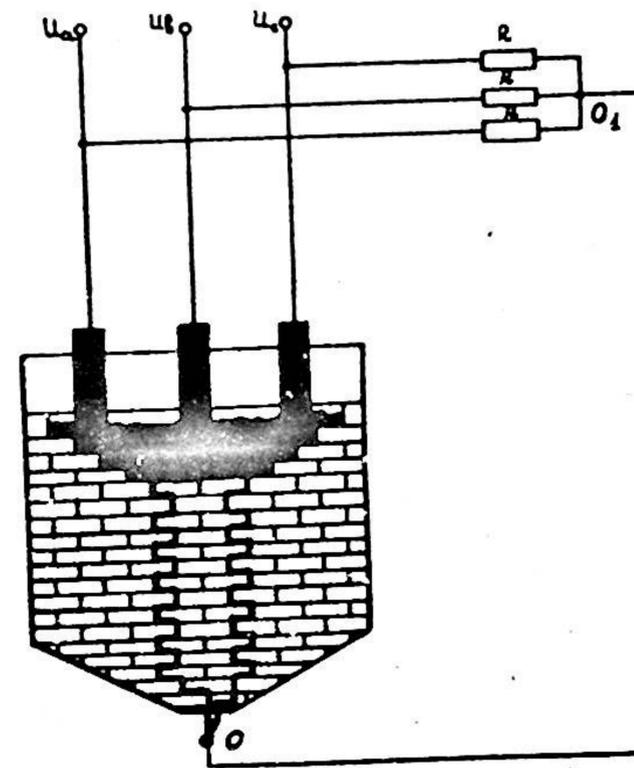


Рис. 4

При измерении  $R_{общ}$  аналоговым прибором был использован настоящий электрический нуль, выведенный из ванны печи (расплавленный металл) по новому методу, предложенному автором.

На существующих электродуговых ферросплавных (сталеплавильных) печах с целью измерения контроля и управления требуется иметь электрический нуль для снятия напряжения дуги. Вынесение (рис. 4) настоящего электрического нуля (точка "0") сверху из ванны печи введением стального стержня для стационарного пользования не представляется возможным, так как расплав имеет высокую температуру и является активной средой, что создает определенные неудобства.

В настоящее время почти во всех случаях в электродуговых печах в качестве электрического нуля используется искусственный нуль (точки "0<sub>I</sub>"), полученный путем соединения трех равных сопротивлений "R" в звезду .

В работе рассматривается новый метод вывода настоящего электрического нуля из ванны печи, который заключается в следующем. Электрический нуль (точка "0", расплавленный металл) выносятся из ванны печи тонким, диаметром 2+3 мм, стальным проводом, который вкладывается в ванну вертикально (рис. 4) при закладке футеровки печи огнеупорным кирпичом. Обычно в ванну печи вкладываются два отдельных провода, второй делается для 100%-го резерва, а также для того, чтобы в любое время можно было тестером проверить цельность обоих проводов.

На первый взгляд такой метод вывода настоящего электрического нуля кажется даже сомнительным, так как тонкие провода, соприкасаясь с жидким расплавом, сразу же плавятся, но жидкий расплав все время следует за проводами (так как провода находятся в вертикальном положении) и где-то остывают, так что контакт между проводом и металлом всегда имеется.

Вывод настоящего электрического нуля вышеприведенным методом осуществлен на Зестафонском заводе ферросплавов несколько раз в цехе № 2 на печи № 13 и при этом не наблюдалось ни одного случая потери настоящего электрического нуля до закладки в ванну печи новой футеровки.

Большинство электродуговых ферросплавных печей как в СССР, так и за рубежом снабжено регуляторами, поддерживающими постоянство соотношения напряжения и силы тока дуги

$$x = \frac{U}{I}$$

При регулировании по параметру  $x$ , как известно, изменение напряжения в сети  $U_c$  вызывает изменение мощности  $P = cU_c^2$ . Последнее является недостатком; положительная сторона та, что в этом случае можно регулировать пофазно. Во время регулирования по параметру "I" (ток) при изменении напряжения сети  $U_c$  мощность печи  $P = cU_c$ , последнее является положительной стороной, но недостатком регулирования при этом будет то, что не имеется возможности пофазного регулирования (начинает перемещаться все три электрода).

В трехфазных электродуговых печах, где фазовые токи являются несинусоидальными, предложено регулировать электрический режим по параметру "суммарное абсолютное значение фазовых токов печи"  $|i_1| + |i_2| + |i_3|$  с применением второго параметра "направление мощности третьей гармоники в отдельных фазах", позволяющего осуществлять пофазное регулирование, так как последнее определяет электрод, вышедший из симметричного горения дуг трех фаз.

На рис. 5 дана структурная схема регулирования электрического режима по предлагаемым параметрам.

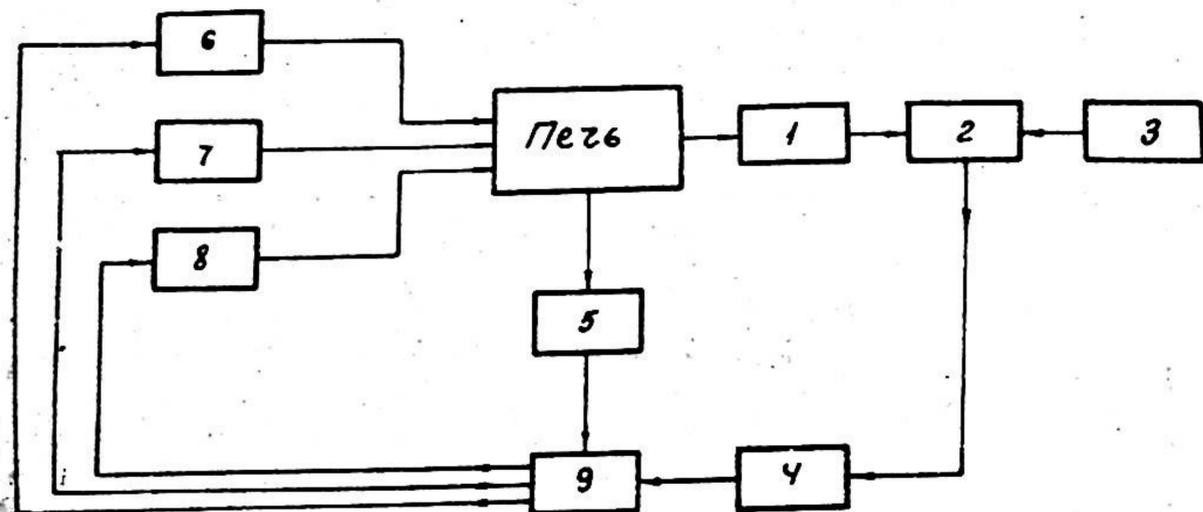


Рис. 5

В схеме: 1 - измерительный орган, 2 - узел сравнения, 3 - узел задания, 4 - узел усиления, 5 - узел для определения электрода, подвергающегося перемещению, 6, 7, 8 - исполнительные органы, 9 - узел пофазного регулирования.

Особо надо подчеркнуть, что действие автоматического регулятора для поддержания электрического режима (АРЭ) и устройства, контролирующего наличие электрической дуги под электродом (УКД), т.е. устройства, предотвращающего соприкосновение электрода с расплавом, направлены друг против друга. Поэтому для печей, выплавляющих малоуглеродистые сплавы, требующих, кроме регулирования электрического режима, предотвращения соприкосновения электрода с поверхностью расплава, при работе (УКД) автоматический регулятор электрического режима (АРЭ) отключается на некоторое время, пока холодная шихта под электродом не прож-

жется. На существующих и вновь строящихся ферросплавных заводах вопросы автоматического производственного учета отдельных компонентов шихты совсем не затронуты. На данном этапе количество отдельных компонентов, поступающих в печь через автоматические дозаторы, вообще неизвестно, а знание последнего имеет большее значение для корректировки и уточнения технологии, принятой для печи.

На рис. 6 дана схема предложенного автором прибора (пунктиром), осуществляющая автоматический учет компонентов шихты. Информацию о производительности дозатора прибор получает от электромеханического датчика типа ЭЗД-1 (преобразователь вал-ток), встроенного в автоматический дозатор в виде постоянного тока 0 + 5 ма.

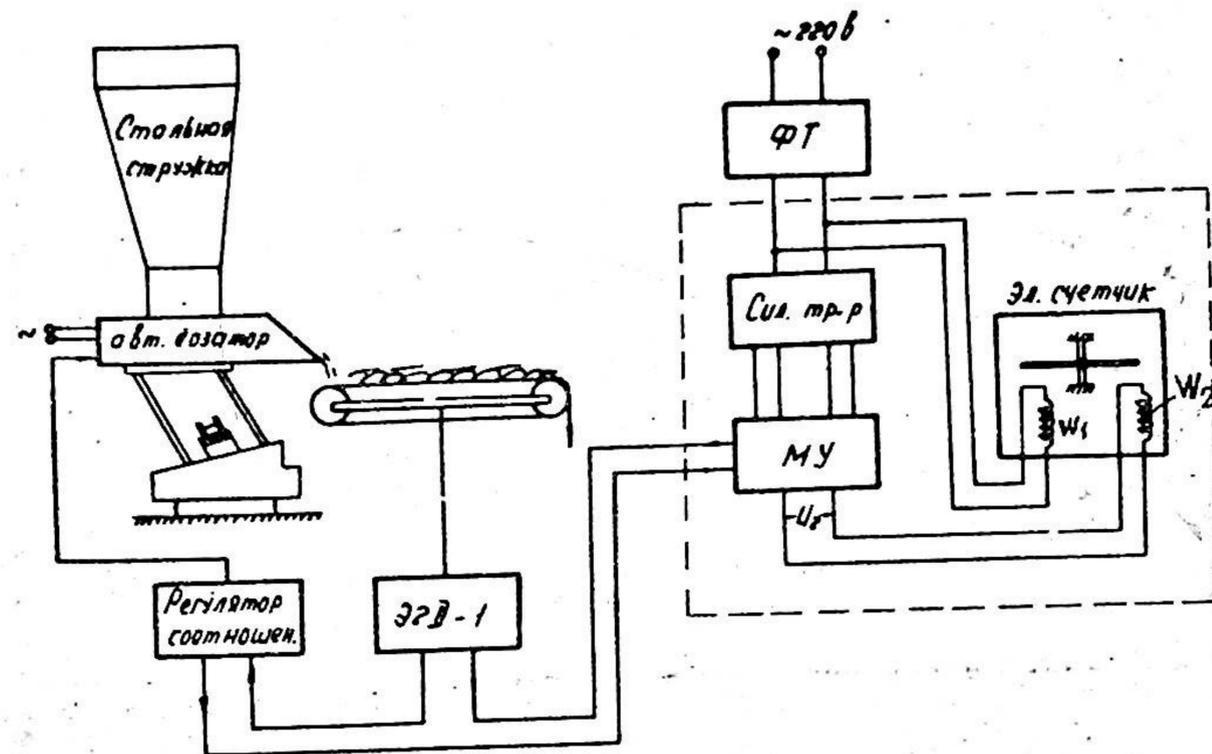


Рис. 6

Автоматический учет осуществляется однофазным коммунальным счетчиком, который видоизменен так, что обмотка тока  $W_2$  перемотана также на обмотку напряжения.

На обмотку  $W_1$  подается напряжение от феррорезонансного стабилизатора (ФС). От ФС питается также силовой трансформатор, питающий обмотки переменного тока и обмотку смещения магнитного усилителя, которая включена по мостовой схеме. Выходное напряжение магнитного усилителя  $U_2$  пропорционально текущей производительности дозатора  $U_2 = f(Q_T)$ .

Вращающий момент диска электрического счетчика равен

$$M = U_1 U_2 \cos \varphi;$$

для данного случая имеем  $U_1 \cos \varphi = \text{const} = K$ .

Поэтому  $M = K U_2$ .

Получается, что вращающий момент пропорционален текущей производительности автоматического дозатора, так как  $U_2 = f(Q_T)$ .

Количество компонентов, проходящих через дозатор, равно:

$$Q = K_1 N,$$

где  $N$  - показание счетчика;

$K_1$  - постоянный коэффициент, который для разных дозаторов (по производительности) имеет разное значение и определяется следующим образом

$$K_1 = \frac{Q_{\text{max}} \cdot \text{час}}{N \cdot \text{час}}$$

## ВЫВОДЫ

I. Проведенные исследования существующего метода контроля наличия дуги под электродами в трехфазных электродуговых печах показывают, что этот метод контроля наличия дуги под электродами неприемлем.

2. Исследования и анализ показали, что токи третьей гармоники в отдельных фазах в трехфазной электродуговой печи существуют даже в тех случаях, когда отсутствует нулевой провод между нулем силового печного трансформатора и фактическим электрическим нулем печи.

3. Экспериментальные и математические исследования показали, что наиболее целесообразный метод контроля наличия дуги под электродами в трехфазных электродуговых печах может быть осуществлен по параметру "направление мощности третьей гармоники в отдельных фазах".

4. На базе теоретических и экспериментальных исследований предложена схема для определения направления мощности третьей гармоники в отдельных фазах, т.е. схема, определяющая электрод, вышедший из симметричного горения дуг трех фаз.

На предложенный способ имеется авторское свидетельство № 187184 с приоритетом с 1963 года.

5. На базе математического анализа выведены условия:

а) условие наличия дуги под электродом в трехфазных электродуговых печах, когда угол сдвига между током третьей гармоники данной фазы  $i_{\varphi(3)}$  и опорным напряжением третьей гармоники  $U_{on(3)}$  (напряжение  $U_{g_1} + U_{g_2} + U_{g_3}$ ) больше нуля

$$i_{\varphi(3)} \overset{\wedge}{U_{on(3)}} > 0;$$

б) условие отсутствия дуги под электродом в трехфазных электродуговых печах, когда угол сдвига между током третьей гармоники данной фазы  $i_{\varphi(3)}$  и опорным напряжением третьей гармоники  $U_{on(3)}$  (напряжение  $U_{g_1} + U_{g_2} + U_{g_3}$ ) равен нулю

$$i_{\varphi(3)} \overset{\wedge}{U_{on(3)}} = 0$$

6. Предложенный параметр для контроля наличия дуги под электродом "направление мощности третьей гармоники в отдельных фазах" может быть использован в качестве регулирующего параметра электрического режима в трехфазных электродугсовых печах (в печах, где фазные токи несинусоидальные) с целью достижения пофазного управления электродами, когда регулируемым параметром выбрано суммарное абсолютное значение фазных токов  $|i_1| + |i_2| + |i_3|$ .

7. Проведенные эксперименты и анализ полученных диаграмм на Запорожском заводе ферросплавов при измерении активного сопротивления  $R_{общ} = R_{части эл} + R_{расплава} + R_{дуги}$  прибором аналогового типа с целью получения качественных показателей в разных условиях горения дуги переменного тока (обвал шихты, добавление шихты) показывают целесообразность применения данного прибора и для определения фаз технологического процесса, т.е. определения конца плавки.

8. Продолжительный положительный опыт и анализ эксплуатации подтверждают целесообразность применения нового метода вывода фактического электрического нуля из ванны печи тонким, 2 + 3 мм, стальным проводом, таким же способом, как это приводится в диссертационной работе.

9. Продолжительные испытания на Зестафонском ферросплавном заводе на закрытых печах показали целесообразность применения предложенного в работе прибора для автоматического учета отдельных компонентов шихты.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Микадзе И.С., Инджия Г.А., Лазарашвили И.Г., Чачанидзе О.В., Чикобава И.М., "Управляющая вычислительная машина для

регулирования режима работы ферросплавных дуговых печей по энергетическому балансу", Труды Тбилисского научно-исследовательского института приборостроения и средств автоматизации, том I, 1957.

2. Чачанидзе О.В., "Контроль наличия дуги в ферросплавных печах", Труды Тбилисского научно-исследовательского института приборостроения и средств автоматизации, том 8, 1968.

3. Долидзе Г.Ф., Чачанидзе О.В., Трапанидзе Н.И., "Способ контроля дуги под электродами", Бюллетень изобретений, № 20, 1966.

4. Чачанидзе О.В., Гай А.М., "Управляющая машина для регулирования процесса выплавки ферросплавов в дуговых электрических печах", Научно-технический сборник "Электротермия", № 9, 1965.

ლ. 2. ზაქარია

საბჭოთა ელექტროტექნიკური უნივერსიტეტის  
რეზერვების კონსტრუქციისა და მართვის  
მუშაკების გამომკვლევება

УЭ 05513

Отдел технической документации ТНИИСА

Зак.5. Тпр.180. 8/1-1971 г. г.Тбилиси, ул.Камо,37