

УДК 621.365.3

ББК 31.292.5

А.Н. ИЛЬГАЧЁВ, Д.Г. МИХАДАРОВ

## ТОКИ В ВАННЕ МНОГОЭЛЕКТРОДНОЙ УСТАНОВКИ

**Ключевые слова:** рудотермическая печь, несимметричный режим, частичные проводимости, разностно-потенциальные коэффициенты, опыт короткого замыкания ванны, опыт холостого хода.

Действующие многоэлектродные рудотермические печи в квазистационарных и переходных режимах работают в условиях несимметричности электрического контура, образованного печными трансформаторами, токоподводом и ванной, вызванной действием различных факторов геометрического, электромагнитного, теплового и технологического характера. Они ухудшают энергетические, технологические и эксплуатационные показатели работы установок. Существующие методы исследования электрических процессов в печном контуре не позволяют в полной мере выявлять, учитывать и устранять действия факторов, приводящих к явлениям, обуславливающим несимметричность электрического режима. Асимметрия системы токов, стекающих в ванну с электрода на электрод, минуя расплав, и асимметрия системы токов, стекающих с электродов непосредственно на расплав, оказывают влияние на несимметричность электрического режима контура печи.

**Цель работы** – формирование расчетных формул для нахождения токов «звезды» и «треугольника» ванны трехэлектродной печи резистивного нагрева и исследование с их помощью влияния геометрических параметров электродов и ванны на указанные токи.

**Материалы и методы.** Объектом исследования являются токи, протекающие в ванне трехфазных трехэлектродных печей резистивного нагрева. При проведении исследований использованы методы теоретических основ электротехники и математическое компьютерное моделирование с применением программной среды COMSOL Multiphysics.

**Результаты исследования.** Новизна исследования заключается в развитии методики построения формул для расчета токов «звезды» и «треугольника» ванны трехэлектродной печи резистивного нагрева с произвольным расположением электродов и несимметричной системой токов, питающих ванну. Исследовано влияние диаметра, заглубления круглых электродов и диаметра их расплава в ванне трехэлектродной печи на токи, стекающие с поверхностей электродов на подину и с электрода на электрод, минуя расплав, для случая трехфазной симметричной системы токов электродов и геометрической симметрии их расположения в ванне.

**Выводы.** Разработана методика расчета токов «звезды» и «треугольника» ванны трехэлектродной печи резистивного нагрева с произвольным расположением электродов и несимметричной системой токов, питающих ванну, основанная на совместном использовании частичных проводимостей и разностно-потенциальных коэффициентов схем замещения.

**Введение.** Действующие многоэлектродные рудотермические печи (РТП) резистивного нагрева в квазистационарных и переходных режимах работают в условиях несимметричности электрического контура, образованного печными трансформаторами, токоподводом и ванной, вызванной взаимосвязанным действием различных факторов геометрического, электромагнитного, теплового и технологического характера. Несимметричность обнаруживается в неравенстве действующих значений токов в электродах, активных и реактивных

мощностей в фазах, в несимметричном распределении плотности тока и удельной электрической мощности по объёму ванны. Все это приводит к нарушению условий протекания электротехнологических процессов в электродах и ванне. Наблюдаются перекос активных и реактивных мощностей фаз, явление «дикий» («резкой») и «мертвой» фаз, ухудшаются энергетические, технологические и эксплуатационные показатели работы установок [2, 7, 11]. Существующие методы исследования электрических процессов в печном контуре и ванне не позволяют в полной мере выявлять, учитывать и устранять действия факторов, приводящих к явлениям, обуславливающим несимметричность электрического режима. Для улучшения показателей работы рудотермической печи, например увеличения коэффициента мощности и уменьшения несимметричности режима, применяют различные способы, средства компенсации реактивной мощности и совершенствуют алгоритмы управления установками [1, 2, 8, 9, 13]. РТП как несимметричный приемник электроэнергии, будучи подключенным к системе электроснабжения, ухудшает показатели ее работы, что требует применения средств симметрирования режима сети [10].

Асимметрия системы токов, стекающих с электрода на электрод в ванне, минуя расплав, и асимметрия системы токов, стекающих с электродов непосредственно на расплав, оказывают влияние на несимметричность электрического режима контура печи.

**Цель работы** – формирование расчетных формул для нахождения токов «звезды» и «треугольника» ванны трехэлектродной печи резистивного нагрева и исследование с их помощью влияния геометрических параметров электродов и ванны на указанные токи.

**Материалы и методы.** В работе [5] предложена методика расчета токов, стекающих с поверхностей электродов непосредственно на расплав и с электрода на электрод для двухэлектродной установки. В данной работе указанная методика разработана для трехэлектродных печей.

Реализация опытов короткого замыкания и холостого хода ванны на действующих рудовосстановительных печах связана с трудностями их технического осуществления и необходимостью применения дополнительных устройств, например источников измерительной частоты [6]. Опыты короткого замыкания и холостого хода удобнее выполнять на физических и математических моделях.

**Результаты.** Для ванны трехэлектродной печи резистивного нагрева частичные проводимости (рис. 1, а) могут быть определены по результатам опытов короткого замыкания, например на физической модели [3]:

$$g_{i,j} = \frac{I_{jk3}^{(i)}}{1_U^{(3)}}, \quad i, j = 1, 2, 3,$$

где  $1_U^{(i)}$  – единичное напряжение, приложенное к участку « $i$ -й электрод – подина» в опыте короткого замыкания ванны;  $I_{jk3}^{(i)}$  – ток, протекающий в  $j$ -м электроде в этом опыте.

Разностно-потенциальные коэффициенты ванны трехэлектродной печи (рис. 1, б) могут быть найдены из опытов холостого хода физическим [4] или компьютерным моделированием, например, с применением программной среды COMSOL Multiphysics [12]:

$$R_{i,j} = \frac{U_{jxx}^{(i)}}{I_i^{(i)}}, \quad i, j = 1, 2, 3,$$

где  $I_i^{(i)}$  – единичный ток  $i$ -го электрода в опыте холостого хода ванны;  $U_{jxx}^{(i)}$  – напряжение на участке « $j$ -й электрод – подина» (в этом опыте).

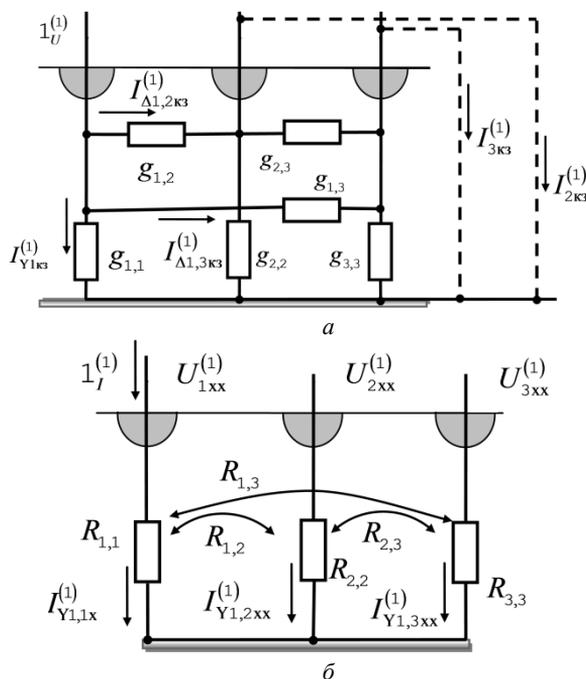


Рис. 1. Частичные проводимости (а) и разностно-потенциальные коэффициенты (б) ванны трехэлектродной печи

В опытах холостого хода ванны токи электродов, стекающие с их поверхностей непосредственно на расплав (подину):

$$I_{Yixx}^{(i)} = U_{ixx}^{(i)} g_{i,i} = I_i^{(i)} R_{i,i} g_{i,i} = I_i^{(i)} \Gamma_{i,i} G_{i,i}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

а ток, стекающий с поверхности одного электрода непосредственно на поверхность другого электрода:

$$\begin{aligned} I_{\Delta i,jxx}^{(i)} &= (U_{ixx}^{(i)} - U_{jxx}^{(i)}) g_{i,j} = I_i^{(i)} (R_{i,i} - R_{i,j}) g_{i,j} = I_i^{(i)} (\Gamma_{i,i} - \Gamma_{i,j}) G_{i,j} = \\ &= U_{jxx}^{(i)} g_{j,j} = I_i^{(i)} R_{i,j} g_{j,j} = I_i^{(i)} \Gamma_{i,j} G_{j,j}, \quad i \neq j, \quad i, j = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (2)$$

где  $R_{ij}$  – собственный ( $i = j$ ) и взаимный ( $i \neq j$ ) разностно-потенциальные коэффициенты схемы замещения ванны;  $\Gamma_{ij} = \gamma l R_{ij}$  – разностно-потенциальный коэффициент в критериальной форме;  $G_{ij} = g_{ij} / \gamma l$  – частичная проводимость

в критериальной форме;  $\gamma$  – усредненная удельная электрическая проводимость среды ванны;  $l$  – высота слабо проводящего слоя ванны.

В соответствии с первым законом Кирхгофа в опыте холостого хода ванны токи ее «звезды» и «треугольника» удовлетворяют соотношениям

$$I_{Y1xx}^{(1)} + I_{\Delta1,2xx}^{(1)} + I_{\Delta1,3xx}^{(1)} = 1_I^{(1)}, \quad (3)$$

$$I_{Y2xx}^{(2)} + I_{\Delta2,1xx}^{(2)} + I_{\Delta2,3xx}^{(2)} = 1_I^{(2)}, \quad (4)$$

$$I_{Y3xx}^{(3)} + I_{\Delta3,1xx}^{(3)} + I_{\Delta3,2xx}^{(3)} = 1_I^{(3)}. \quad (5)$$

Из (3)–(5) с учётом (1) и (2) следуют равенства

$$G_{1,1}G_{1,1} + (G_{1,1} - G_{1,2})G_{1,2} + (G_{1,1} - G_{1,3})G_{1,3} = 1,$$

$$G_{1,1}(G_{1,1} + G_{1,2} + G_{1,3}) = 1,$$

$$G_{2,2}G_{2,2} + (G_{2,2} - G_{2,1})G_{2,1} + (G_{2,2} - G_{2,3})G_{2,3} = 1,$$

$$G_{2,2}(G_{2,1} + G_{2,2} + G_{2,3}) = 1,$$

$$G_{3,3}G_{3,3} + (G_{3,3} - G_{3,1})G_{3,1} + (G_{3,3} - G_{3,2})G_{3,2} = 1,$$

$$G_{3,3}(G_{3,1} + G_{3,2} + G_{3,3}) = 1.$$

Если в электродах трехэлектродной печи протекают синусоидальные токи  $\dot{I}_{\vartheta 1}$ ,  $\dot{I}_{\vartheta 2}$  и  $\dot{I}_{\vartheta 3}$  то в соответствии с принципом суперпозиции токи «звезды» ванны

$$\dot{I}_{Y1} = \frac{I_{Y1xx}^{(1)}}{1_I^{(1)}} \dot{I}_{\vartheta 1} + \frac{I_{\Delta2,1xx}^{(2)}}{1_I^{(2)}} \dot{I}_{\vartheta 2} + \frac{I_{\Delta3,1xx}^{(3)}}{1_I^{(3)}} \dot{I}_{\vartheta 3} = G_{1,1} (G_{1,1} \dot{I}_{\vartheta 1} + G_{1,2} \dot{I}_{\vartheta 2} + G_{1,3} \dot{I}_{\vartheta 3}), \quad (6)$$

$$\dot{I}_{Y2} = \frac{I_{\Delta1,2xx}^{(1)}}{1_I^{(1)}} \dot{I}_{\vartheta 1} + \frac{I_{Y2xx}^{(2)}}{1_I^{(2)}} \dot{I}_{\vartheta 2} + \frac{I_{\Delta3,2xx}^{(3)}}{1_I^{(3)}} \dot{I}_{\vartheta 3} = G_{2,2} (G_{1,2} \dot{I}_{\vartheta 1} + G_{2,2} \dot{I}_{\vartheta 2} + G_{3,2} \dot{I}_{\vartheta 3}), \quad (7)$$

$$\dot{I}_{Y3} = \frac{I_{\Delta1,3xx}^{(1)}}{1_I^{(1)}} \dot{I}_{\vartheta 1} + \frac{I_{\Delta2,3xx}^{(2)}}{1_I^{(2)}} \dot{I}_{\vartheta 2} + \frac{I_{Y3xx}^{(3)}}{1_I^{(3)}} \dot{I}_{\vartheta 3} = G_{3,3} (G_{1,3} \dot{I}_{\vartheta 1} + G_{2,3} \dot{I}_{\vartheta 2} + G_{3,3} \dot{I}_{\vartheta 3}). \quad (8)$$

Выберем в схеме замещения ванны печи положительные направления токов «треугольника» (рис. 2) и составим уравнения по законам Кирхгофа

$$\dot{I}_{\vartheta 2} = \dot{I}_{Y2} + \dot{I}_{\Delta2,3} - \dot{I}_{\Delta1,2}, \quad \dot{I}_{\vartheta 3} = \dot{I}_{Y3} + \dot{I}_{\Delta3,1} - \dot{I}_{\Delta2,3}, \quad \frac{\dot{I}_{\Delta1,2}}{g_{1,2}} + \frac{\dot{I}_{\Delta2,3}}{g_{2,3}} + \frac{\dot{I}_{\Delta3,1}}{g_{3,1}} = 0.$$

Образую из этой совокупности уравнений системы из трех уравнений и решая их, найдем

$$\dot{I}_{\Delta1,2} = \frac{G_{1,2}G_{2,3}(\dot{I}_{\vartheta 1} - \dot{I}_{Y1}) - G_{1,2}G_{3,1}(\dot{I}_{\vartheta 2} - \dot{I}_{Y2})}{G_{1,2}G_{3,1} + G_{1,2}G_{2,3} + G_{3,1}G_{2,3}},$$

$$\dot{I}_{\Delta2,3} = \frac{G_{3,1}G_{2,3}(\dot{I}_{\vartheta 2} - \dot{I}_{Y2}) - G_{1,2}G_{2,3}(\dot{I}_{\vartheta 3} - \dot{I}_{Y3})}{G_{1,2}G_{3,1} + G_{1,2}G_{2,3} + G_{3,1}G_{2,3}},$$

$$\dot{I}_{\Delta3,1} = \frac{G_{1,2}G_{3,1}(\dot{I}_{\vartheta 3} - \dot{I}_{Y3}) - G_{3,1}G_{2,3}(\dot{I}_{\vartheta 1} - \dot{I}_{Y1})}{G_{1,2}G_{3,1} + G_{1,2}G_{2,3} + G_{3,1}G_{2,3}}.$$

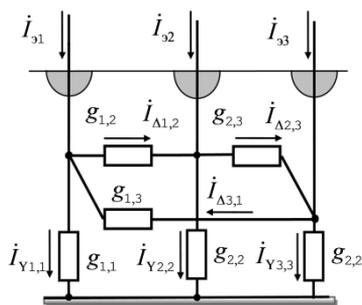


Рис. 2. Направления токов «треугольника» ванны трёхэлектродной печи

С учетом (6)–(8) выражения для токов «треугольника» примут вид

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\Delta 1,2} = & \dot{I}_{31} \frac{G_{1,2} G_{2,3} (1 - G_{1,1} \Gamma_{1,1}) + G_{1,2} G_{3,1} G_{2,2} \Gamma_{3,2}}{G_{1,2} G_{3,1} + G_{1,2} G_{2,3} + G_{3,1} G_{2,3}} - \\ & - \dot{I}_{32} \frac{G_{1,2} G_{3,1} (1 - G_{2,2} \Gamma_{2,2}) + G_{1,2} G_{2,3} G_{1,1} \Gamma_{2,1}}{G_{1,2} G_{3,1} + G_{1,2} G_{2,3} + G_{3,1} G_{2,3}} - \\ & - \dot{I}_{33} \frac{G_{1,2} G_{2,3} G_{1,1} \Gamma_{3,1} - G_{1,2} G_{3,1} G_{2,2} \Gamma_{3,2}}{G_{1,2} G_{3,1} + G_{1,2} G_{2,3} + G_{3,1} G_{2,3}}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\Delta 3,1} = & \dot{I}_{33} \frac{G_{1,2} G_{3,1} (1 - G_{3,3} \Gamma_{3,3}) + G_{1,1} G_{3,1} G_{2,3} \Gamma_{3,1}}{G_{1,2} G_{3,1} + G_{1,2} G_{2,3} + G_{3,1} G_{2,3}} - \\ & - \dot{I}_{31} \frac{G_{2,3} G_{3,1} (1 - G_{1,1} \Gamma_{1,1}) + G_{1,2} G_{3,1} G_{3,3} \Gamma_{1,3}}{G_{1,2} G_{3,1} + G_{1,2} G_{2,3} + G_{3,1} G_{2,3}} - \\ & - \dot{I}_{32} \frac{G_{1,2} G_{3,1} G_{3,3} \Gamma_{3,2} - G_{2,3} G_{3,1} G_{1,1} \Gamma_{2,1}}{G_{1,2} G_{3,1} + G_{1,2} G_{2,3} + G_{3,1} G_{2,3}}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\Delta 2,3} = & \dot{I}_{32} \frac{G_{2,2} G_{3,1} (1 - G_{2,2} \Gamma_{2,2}) + G_{1,2} G_{2,3} G_{3,3} \Gamma_{3,2}}{G_{1,2} G_{3,1} + G_{1,2} G_{2,3} + G_{3,1} G_{2,3}} - \\ & - \dot{I}_{33} \frac{G_{1,2} G_{2,3} (1 - G_{3,3} \Gamma_{3,3}) + G_{2,3} G_{3,1} G_{3,3} \Gamma_{1,3}}{G_{1,2} G_{3,1} + G_{1,2} G_{2,3} + G_{3,1} G_{2,3}} - \\ & - \dot{I}_{31} \frac{G_{2,3} G_{3,1} G_{2,2} \Gamma_{1,2} - G_{1,2} G_{2,3} G_{3,3} \Gamma_{1,3}}{G_{1,2} G_{3,1} + G_{1,2} G_{2,3} + G_{3,1} G_{2,3}}. \end{aligned} \quad (11)$$

Формулы (6)–(11) позволяют определять токи «звезды» и токи «треугольника» ванны при асимметричном расположении электродов в ванне (например, когда электроды расположены в линию, имеют неодинаковые заглабления, неодинаковые формы рабочих поверхностей) и несимметричности системы питающих электроды токов.

При симметричном расположении электродов в ванне по диаметру распада, когда они находятся в вершинах равностороннего треугольника, имеют одинаковые заглабления, формы рабочей поверхности для параметров схем замещения ванны, справедливы соотношения

$$\Gamma_{1,1} = \Gamma_{2,2} = \Gamma_{3,3} = \Gamma, \quad \Gamma_{1,2} = \Gamma_{2,3} = \Gamma_{3,1} = \Gamma_{2,1} = \Gamma_{3,2} = \Gamma_{1,3} = \bar{\Gamma},$$

$$G_{1,1} = G_{2,2} = G_{3,3} = G, \quad G_{1,2} = G_{2,3} = G_{3,1} = G_{2,1} = G_{3,2} = G_{1,3} = \bar{G}.$$

В этом случае формулы (6)–(11) для токов «звезды» и «треугольника» ванны упрощаются

$$I_{Y1} = G(\Gamma \dot{I}_{\varphi 1} + \bar{\Gamma} \dot{I}_{\varphi 2} + \bar{\Gamma} \dot{I}_{\varphi 3}) = G(\Gamma - \bar{\Gamma}) \dot{I}_{\varphi 31}, \quad (12)$$

$$I_{Y2} = G(\bar{\Gamma} \dot{I}_{\varphi 1} + \Gamma \dot{I}_{\varphi 2} + \bar{\Gamma} \dot{I}_{\varphi 3}) = G(\Gamma - \bar{\Gamma}) \dot{I}_{\varphi 32}, \quad (13)$$

$$I_{Y3} = G(\bar{\Gamma} \dot{I}_{\varphi 1} + \bar{\Gamma} \dot{I}_{\varphi 2} + \Gamma \dot{I}_{\varphi 3}) = G(\Gamma - \bar{\Gamma}) \dot{I}_{\varphi 33}, \quad (14)$$

$$\dot{I}_{\Delta 1,2} = \frac{[1 - G(\Gamma - \bar{\Gamma})] \cdot (\dot{I}_{\varphi 1} - \dot{I}_{\varphi 2})}{3}, \quad (15)$$

$$\dot{I}_{\Delta 3,1} = \frac{[1 - G(\Gamma - \bar{\Gamma})] \cdot (\dot{I}_{\varphi 3} - \dot{I}_{\varphi 1})}{3}, \quad (16)$$

$$\dot{I}_{\Delta 2,3} = \frac{[1 - G(\Gamma - \bar{\Gamma})] \cdot (\dot{I}_{\varphi 2} - \dot{I}_{\varphi 3})}{3}. \quad (17)$$

Если питание ванны печи с геометрической симметрией расположения электродов осуществляется симметричной системой токов прямой последовательности, что характерно для большинства действующих трехэлектродных печей,

$$\dot{I}_{\varphi 1} = I_3 \angle 0^\circ = I_3, \quad \dot{I}_{\varphi 2} = I_3 \angle -120^\circ = 0,5(-1 - j\sqrt{3})I_3,$$

$$\dot{I}_{\varphi 3} = I_3 \angle 120^\circ = 0,5(-1 + j\sqrt{3})I_3,$$

то из (12)–(17) следует

$$\dot{I}_{Y1} = G(\Gamma - \bar{\Gamma})I_3, \quad \dot{I}_{Y2} = G(\Gamma - \bar{\Gamma})I_3 \angle -120^\circ, \quad \dot{I}_{Y3} = G(\Gamma - \bar{\Gamma})I_3 \angle 120^\circ,$$

$$\dot{I}_{\Delta 1,2} = \frac{[1 - G(\Gamma - \bar{\Gamma})] \cdot (\sqrt{3} + j)I_3}{2\sqrt{3}} = \frac{[1 - G(\Gamma - \bar{\Gamma})]}{\sqrt{3}} I_3 \angle 30^\circ,$$

$$\dot{I}_{\Delta 2,3} = \frac{[1 - G(\Gamma - \bar{\Gamma})] \cdot (-j)I_3}{2\sqrt{3}} = \frac{[1 - G(\Gamma - \bar{\Gamma})]}{\sqrt{3}} I_3 \angle -90^\circ,$$

$$\dot{I}_{\Delta 3,1} = \frac{[1 - G(\Gamma - \bar{\Gamma})] \cdot (-\sqrt{3} + j)I_3}{2\sqrt{3}} = \frac{[1 - G(\Gamma - \bar{\Gamma})]}{\sqrt{3}} I_3 \angle 150^\circ.$$

На рис. 3 приведена векторная диаграмма токов ванны для случая симметричного расположения электродов и симметричной системы питающих токов в электродах. Как видим, токи «звезды» в рассматриваемом случае совпадают по фазе с токами электродов.

На рис. 4 приведены результаты исследования влияния диаметра распада и диаметра электродов на стекающие с поверхностей электродов токи трехэлектродной печи при ее питании симметричной системой токов прямой последовательности.

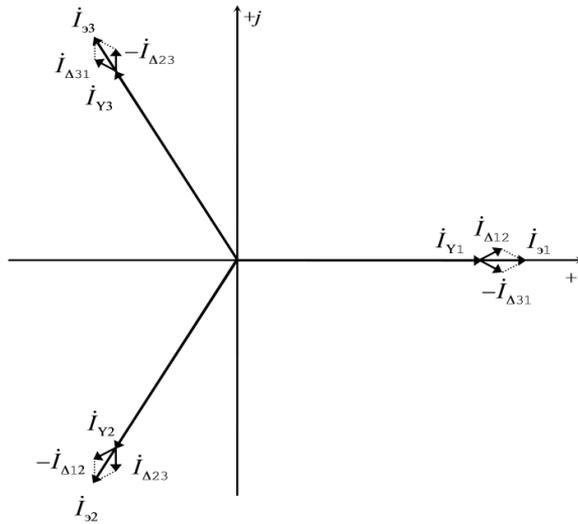


Рис. 3. Векторная диаграмма токов ванны трёхэлектродной печи

$(d_3^* = \frac{d_3}{l} = 0,6; D_p^* = \frac{D_p}{l} = 3,12$ , где  $d_3, d_3^*$  – абсолютный и относительный диаметры электрода;

$D_p, D_p^*$  – абсолютный и относительный диаметры распада электродов

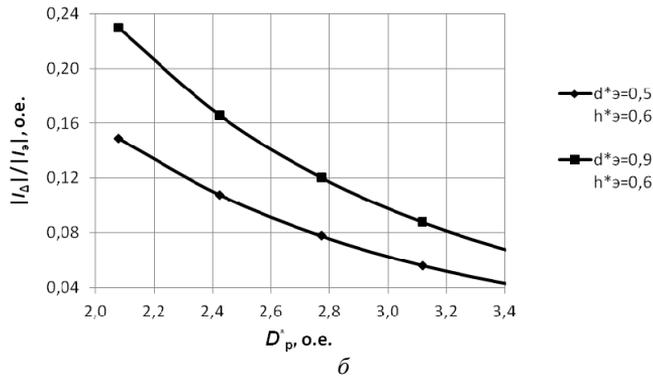
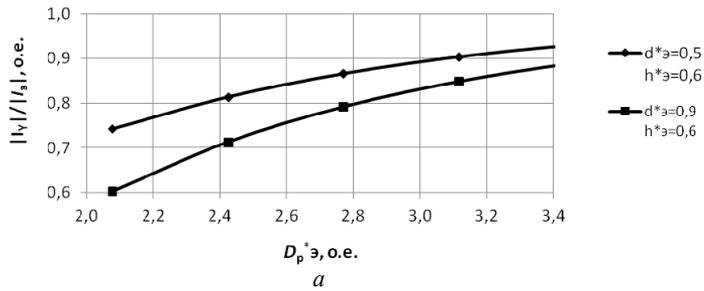


Рис. 4. Зависимости относительных действующих значений тока «звезды» (а) и тока «электрод – электрод» (б) трёхэлектродной печи от диаметра распада электродов

$$D_p^* = \frac{D_p}{l}$$

Уменьшение диаметра электродов и увеличение диаметра их распада вызывает возрастание доли тока от тока электрода, стекающего непосредственно на расплав (подину). При этом доля тока, стекающего с электрода на электрод, минуя расплав, увеличивается.

С ростом диаметра распада электродов значения токов «звезды» асимптотически стремятся к значениям токов электродов, а значения токов «треугольника» – к нулю.

**Выводы.** 1. Разработана методика построения формул для расчета токов «звезды» и «треугольника» ванны трехэлектродной установки резистивного нагрева с произвольным расположением электродов и несимметричной системой токов, питающих ванну, на основе совместного использования частичных проводимостей и разностно-потенциальных коэффициентов схем замещения ванны.

2. Исследовано влияние диаметра, заглубления круглых электродов и диаметра их распада в ванне трехэлектродной печи на токи, стекающие с поверхностей электродов на подину и с электрода на электрод, минуя расплав, для случая трехфазной симметричной системы токов, питающих электроды и геометрической симметрии расположения электродов в ванне.

#### Литература

1. *Грачев А.Н., Глухов Н.Н.* Способ текущего контроля симметричности трехфазной нагрузки в дуговых или руднотермических электропечах // Компьютерные методы в управлении электротехнологическими режимами руднотермических печей: доклады науч.-техн. совещ. «Электротермия-98» (2-3 июня 1998 г., г. Санкт-Петербург). СПб.: [Б.и.], 1998. С. 255–261.

2. *Данцис Я.Б.* Методы электротехнических расчетов мощных электропечей. Л.: Энергоиздат. Ленинград. отд-ние, 1982. 232 с.

3. *Ильгачёв А.Н.* Частичные проводимости схемы замещения электрического процесса в ванне электродных печей резистивного нагрева // Вестник Чувашского университета. 2015. № 1. С. 73–80.

4. *Ильгачёв А.Н.* Разностно-потенциальные коэффициенты как параметры схемы замещения электрического процесса в ванне многоэлектродных печей // Актуальные вопросы технических наук: материалы III Междунар. науч. конф. (г. Пермь, апрель 2015 г.). Пермь: Меркурий, 2015. С. 76–79.

5. *Ильгачёв А.Н.* Влияние геометрических параметров электродов и ванны двухэлектродной печи на ее токи «звезды» и «треугольника» // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: сб. материалов V Междунар. науч.-техн. конф. (г. Чебоксары, 2021 г.). Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. С. 345–350.

6. Пат. РФ № 2595782, МПК H05B 07/144. Способ определения электрических параметров, характеризующих состояние подэлектродных пространств ванны трехфазной трехэлектродной руднотермической печи с расположением электродов в линию / *Миронов Ю.М., Ильгачёв А.Н.*; заявитель и патентообладатель: Чуваш. гос. ун-т. № 2015127392/07 заявл. 07.07.2015; опубл. 27.08.2016, Бюл. № 24.

7. *Марков Н.А.* Электрические цепи и режимы дуговых электропечных установок. М.: Энергия, 1976. 204 с.

8. *Мартынов С.А., Бажин В.Ю.* Состояние и перспективы контроля и управления руднотермическими печами в производстве металлургического кремния // Электрометаллургия. 2019. № 5. С. 11–16.

9. *Махашев А.А., Гаврина О.А., Ключев Р.В.* Компенсация реактивной мощности в руднотермическом производстве // Вестник КРАУНЦ. Сер. Физико-математические науки. 2023. Т. 43, № 2. С. 126–140.

10. *Романов В.В., Животягин Д.А., Зимин Л.С.* Электротехнологические установки как источник возникновения несимметричной нагрузки сети на производстве. Возможные решения

снижения несимметрии // Современные материалы, электротехника и электротехнологии. 2017. № 6(14). С. 108–112.

11. Струнский Б.М. Расчеты руднотермических печей. М.: Металлургия, 1982. 192 с.

12. COMSOL Multiphysics – программное обеспечение для мультифизического моделирования [Электронный ресурс]. URL: <http://www.comsol.ru> (дата обращения 10.09.2023).

13. Martynov S.A., Bazhin V.Yu. Improving the management process of the carbothermic reduction of metallurgical silico. In: IOP Conference Series. Krasnoyarsk, 2019, vol. 537, pp. 1–4.

---

**ИЛЬГАЧЁВ АНАТОЛИЙ НИКОЛАЕВИЧ** – кандидат технических наук, доцент, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары ([anikil47@mail.ru](mailto:anikil47@mail.ru)).

**МИХАДАРОВ ДЕНИС ГЕОРГИЕВИЧ** – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнологий, электрооборудования и автоматизированных производств, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары ([denis\\_georg@mail.ru](mailto:denis_georg@mail.ru)).

---

Anatoliy N. IL'GACHEV, Denis G. MIKHADAROV

### STUDY OF THE CURRENT IN THE MULTIELECTRODE PLANT BATH

**Key words:** ore-thermal furnace, dissymmetric conditions, direct admittances, difference-potential coefficients, bath short-circuit test, bath no-load operation test.

Active resistance heating multi-electrode ore-thermal furnaces, being in quasi-stationary and transient modes, work in the conditions of electric loop dissymmetry formed by the furnace transformers, current supply and bath caused by the action of different factors of geometric, electromagnetic, thermal and technological character. They worsen the energetic, technological and operational performances. The present methods of studying the electric processes in the furnace loop do not allow in full measure to reveal, consider and eliminate factor actions resulting in phenomena causing electrical duty dissymmetry. Unbalance of the system of currents flowing from the electrode to electrode passing the melt and unbalance of the system of currents flowing directly onto the melt influence the dissymmetry of the furnace loop electrical duty.

**The work objective** is forming the calculated formulas for determining the resistance heating three-electrode furnace bath “star” and “triangle” currents and by means of them studying the electrode and bath geometrical parameters influence on the mentioned currents.

**Materials and methods.** The study object is currents flowing in the resistance heating three-phase, three-electrode furnace bath. When carrying out the studies, methods of electrical technology theory and computer mathematic simulation with COMSOL Multiphysics software environment are used.

**Results of the study.** The study novelty lies in the elaboration of procedure for constructing formulas for calculating the resistance heating three-electrode furnace bath “star” and “triangle” currents with electrode arbitrary location and dissymmetric current system feeding the bath. Influence of the round electrode embedding diameter and the diameter of their dissociation in the three-electrode furnace bath into the currents flowing from the electrode surfaces to the bottom and from the electrode to electrode passing the melt in cases of three-phase symmetric electrode current system and geometrical symmetry of electrode location in the bath is studied.

**Findings.** Calculation procedure of the resistance heating three-electrode furnace bath “star” and “triangle” currents with arbitrary electrode location is developed based on the joint use of the direct admittances and difference-potential coefficients of the equivalent circuits.

### References

1. Grachev A.N., Glukhov N.N. Sposob tekushchego kontrolya simmetrichnosti trekhfaznoi nagruzki v dugovykh ili rudnotermicheskikh elektropechakh [Method of monitoring symmetry of three-phase load in arc or ore-thermal electric furnaces]. *Kompyuternye metody v upravlenii elektrotehnologicheskimi rezhimami rudnotermicheskikh pechei: doklady nauch.-tekh. soveshch. "Elektrotermiya-98" (2-3 iyunya 1998)* [Computer methods in control of ore-thermal furnace electrotechnological modes]. St. Petersburg, 1998, pp. 255–261.

2. Dantsis Ya.B. *Metody elektrotekhnicheskikh raschetov moshchnykh elektropechei* [Methods of electrotechnical calculations for powerful electric furnaces]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1982, 232 p.

3. Il'gachev A.N. *Chastichnye provodimosti skhemy zameshcheniya elektricheskogo protsesssa v vanne elektrodnykh pechei rezistivnoye nagreva* [Direct admittances of the electric process equivalent circuit in the resistance heating electrode furnace bath]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2015, no. 1, pp. 73–80.

4. Il'gachev A.N. *Raznostno-potentsial'nye koeffitsienty kak parametry skhemy zameshcheniya elektricheskogo protsesssa v vanne mnogielektrodnykh pechei* [Difference-potential coefficients as parameters of the electric process replacement scheme in the bath of multi-electrode furnaces]. In: *Aktual'nye voprosy tekhnicheskikh nauk: materialy III Mezhdunar. nauch. konf.* [Proc. of 3<sup>rd</sup> Int. Sci. Conf. «Topical issues of technical sciences»]. Perm, Merkurii Publ., 2015, pp. 76–79.

5. Il'gachev A.N. *Vliyanie geometricheskikh parametrov elektrodov i vanny dvukhelektrodnoi pechi na ee toki «zvezdy» i «treugol'nika»* [Influence of the two-electrode furnace electrode and bath geometric parameters on its "star" and "triangle" currents]. In: *Problemy i perspektivy razvitiya energetiki, elektrotekhniki i energoeffektivnosti: sb. materialov V Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. of 5<sup>th</sup> Int. Sci. Conf. «Problems and prospects for the development of energy, electrical engineering and energy efficiency»]. Cheboksary, Chuvash University Publ., 2021, pp. 345–350.

6. Il'gachev A.N., Mironov Yu.M. *Sposob opredeleniya elektricheskikh parametrov, kharakterizuyushchikh sostoyanie podelektrodnykh prostranstv vanny trekhfaznoi trekhelektrodnoi rudnotermicheskoi pechi s raspolozheniem elektrodov v liniyu* [Method of determining electric parameters characterizing the state of bath sub-electrode spaces in three-phase three-electrode ore-thermal furnace with in line electrode location]. Patent RF, no. 2595782, 2016.

7. Markov N.A. *Elektricheskije tsepi i rezhimy dugovykh elektropechnykh ustanovok* [Electric circuits and modes of electric arc furnace installations], Moscow, Energiya Publ., 1976, 204 p.

8. Martynov S.A., Bazhin V.Yu. *Sostoyanie i perspektivy kontrolya i upravleniya rudnotermicheskimi pechami v proizvodstve metallurgicheskogo kremniya* [State and prospects for monitoring and control of ore-thermal furnaces in metallurgical silicon production]. *Elektrometallurgiya*, 2019, no. 5, pp. 11–16.

9. Makhoshev A.A., Gavrina O.A., Klyuev R.V. *Kompensatsiya reaktivnoi moshchnosti v rudno-termicheskom proizvodstve* [Reactive power compensation in ore-thermal production]. *Vestnik KRAUNTS. Fiz.-mat. nauki*, 2023, vol. 43, no 2, pp. 126–140.

10. Romanov V.V., Zhivotyagin D.A., Zimin L.S. *Elektrotekhnologicheskije ustanovki kak istochnik vozniknoveniya nesimmetrichnoi nagruzki seti na proizvodstve. Vozmozhnye resheniya snizheniya nesimmetrii* [Electricotechnical plants as a source of appearing asymmetric load in the network at production. Possible solutions to reduce asymmetry]. *Sovremennye materialy, elektrotekhnika i elektrotekhnologii*, 2017, no. 6(14), pp. 108–112.

11. Strunskii B.M. *Raschety rudnotermicheskikh pechei* [Ore-thermal Furnace Calculations]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982, 192 p.

12. COMSOL Multiphysics – programmnoe obespechenie dlya mul'tifizicheskogo modelirovaniya [COMSOL Multiphysics – Multifysical Modeling Software]. Available at: <http://www.comsol.ru> (Access Date: 2023, Sept. 10).

13. Martynov S.A., Bazhin V.Yu. Improving the management process of the carbothermic reduction of metallurgical silico. In: IOP Conference Series. Krasnoyarsk, 2019, vol. 537, pp. 1–4.

---

**ANATOLIY N. IL'GACHEV** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Russia, Cheboksary (anikil47@mail.ru).

**DENIS G. MIKHADAROV** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electrotechnology, Electrical Equipment and Automated Production, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (denis\_georg@mail.ru).

---

**Формат цитирования:** Ильгачёв А.Н., Михадаров Д.Г. Токи в ванне многоэлектродной установки // Вестник Чувашского университета. – 2023. – № 4. – С. 99–108. DOI: 10.47026/1810-1909-2023-4-99-108.