

УДК 621.365.2

## ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ, ОТКЛОНЯЮЩИХ ДУГИ ОТ ВЕРТИКАЛИ В ТРЕХФАЗНОЙ ДУГОВОЙ ПЕЧИ

*Ячиков И.М., д.т.н., профессор кафедры вычислительной техники  
и программирования (jachikov@mail.ru)*

*Костылева Е.М., аспирант кафедры вычислительной техники и программирования  
Портнова И.В., к.т.н., ответственный секретарь управления информационной политики*

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова  
(455000, Россия, Челябинская обл., Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

**Аннотация.** Знание характера и поведения сил, действующих на дугу, является важным при конструировании печей, управлении и автоматизации их работы. Эффект электромагнитного выдувания дуги оказывает отрицательное влияние на технико-экономические показатели печи, поскольку дуга выносится из углубления в металле и шлаке, при этом ее излучение на стены и свод увеличивается, а эффективная мощность, поглощаемая металлом, уменьшается. Для этой и ряда других задач необходимо знание динамического поведения дуги, которое во многом определяется мгновенными значениями и направлениями отдельных сил и результирующей силы. В работе рассматривается поведение электромагнитной силы, действующей на столб дуги, от токов, протекающих через жидкий металл, и токов, протекающих через другие параллельные дуги и графитированные электроды в трехфазной дуговой печи переменного тока. При этом полагалось, что дуги горят перпендикулярно поверхности металлической ванны (их оси совпадают с осями электродов) и действующее значение линейных токов в разных фазах одинаковое. Предложена математическая модель для расчета мгновенных значений и направлений основных электромагнитных сил, действующих на дугу в трехфазной дуговой печи, позволяющая выявить характер динамического поведения дуг. Создана компьютерная программа, дающая возможность визуализировать поведение годографа сил, действующих на дугу. Установлено, что результирующая сила является четной гармонической функцией с частотой в два раза выше промышленной частоты тока. Приведены годографы сил, действующих на дугу со стороны токов, протекающих через расплав, и результирующей силы, представляющие собой эллипсы, лежащие в горизонтальной плоскости. Установлено, что результирующая отклоняющая дугу сила является четной гармонической функцией с частотой в два раза выше промышленной частоты тока. Ее годограф представляет собой эллипс, лежащий в горизонтальной плоскости, большая полуось которого составляет угол  $20 - 80^\circ$  с линией, соединяющей центр расплава электродов и ось электрода.

**Ключевые слова:** дуговая печь, графитированный электрод, электромагнитная сила, годограф сил, столб дуги, динамическое поведение дуги, математическая модель.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-1-27-33

### ВВЕДЕНИЕ

В электрометаллургии широко применяется большое количество агрегатов, где трехфазные электрически дуги используются как источники тепловой энергии. Электрическая дуга – это легкоподвижный проводник с током и на него большое влияние оказывают как внешние, так и собственные магнитные поля, которые возникают от токов, протекающих через расплав, через параллельные горящие на расплав дуги, электроды и гибкие токоподводы.

От характера и интенсивности электромагнитных взаимодействий зависит форма дуги и ее динамическое поведение, которое, в свою очередь, существенно влияет на тепловую работу печи, износ электродов, огнеупорных керамических материалов и в целом – на технико-экономическую эффективность работы агрегатов. Знание характера и поведения сил, действующих на дугу, является важным при конструировании печей, управлении и автоматизации их работы.

Электромагнитные силы (ЭМС) могут играть существенную роль в ряде различных процессов, протекающих в дуговой печи. В работе [1] рассмотрены ЭМС и возникающие под их действием электромеханические колебания гибких кабелей в трехфазной дуговой печи (ТДП). В работе [2] получены годографы сил, действующие на графитированные электроды ТДП при прохождении через них трехфазного переменного тока. Показано, что одним из источников силового воздействия является давление на торцевую часть электрода дуги, перемещающейся со скоростью  $10 - 100$  м/с.

Во многих работах, например [3 – 9], показано, что при взаимодействии трех дуг на каждую из них действуют две основные ЭМС: осевая и отклоняющая, которые значительно влияют на технико-экономические показатели печи. Положительное воздействие оказывает осевая сила, так как электрическая дуга под ее действием погружается в шлак и металл, при этом увеличивается эффективная мощность, поглощаемая металлом. Отклоняющая электромагнитная сила влияет отрица-

тельно, поскольку дуга выносится из углубления в металле и шлаке, возрастает ее излучение на стены и свод и эффективная мощность, поглощаемая металлом, снижается.

Рядом исследователей дуговых печей постоянного тока ведутся разработки технологии плавки, где вместо подового электрода предлагается использовать двухэлектродную схему, имеющую анодный и катодный графитированный электрод (ГЭ). Однако возникает серьезная проблема, связанная с возникновением существенных электромагнитных сил, отклоняющих дуги в сторону боковых стенок ванны [10 – 12]. Для стабилизации дуг постоянного и переменного трехфазного тока предлагается использовать внешнее вертикальное магнитное поле [13]. Поведение и стабильность дуги под действием собственного и внешнего магнитного поля рассмотрено в работе [14].

Для условий трехфазной дуговой печи в работах [15 – 17] предложены математическая модель и компьютерная программа [18, 19], позволяющие определять среднеинтегральные ЭМС, которые действуют на электродуговые разряды. При этом рассмотрены ЭМС, действующие на столб дуги: от токов, протекающих через расплав; от токов, проходящих через другие дуги и ГЭ; при взаимодействии тока дуги с собственным магнитным полем. Установлено, что результирующая среднеинтегральная сила лежит в горизонтальной плоскости и может существенно отклоняться от прямой, соединяющей центр распада электродов и ось электрода. Однако для ряда задач необходимо знание динамического поведения дуги, которое во многом определяется мгновенными значениями и направлениями сил. Например, при изучении поведения пятна дуги при его движении по поверхности электрода и расплава, при расчете распределения теплового потока излучения дуги на поверхность металла, на стенки и свод печи, при определении динамики сил, действующих на электроды и расплав.

Целью данной работы является исследование динамики основных отклоняющих от вертикали ЭМС, которые действуют на электрические дуги в ТДП.

### ОПИСАНИЕ МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим ЭМС, действующую на столб дуги, от токов, протекающих через расплав в ТДП. Принимаем, что дуги горят перпендикулярно поверхности токопроводящей ванны (их оси совпадают с осями ГЭ) и действующее значение линейных токов в разных фазах одинаковое. Ось тока, протекающего между дугами, расположена на глубине  $\Delta$  от поверхности металла [15]. Ее можно принять равной примерно 1/2 глубины проникновения поля промышленной частоты в жидкую сталь  $\Delta \approx \Delta_0/2 = 3,2 - 3,6$  см, где  $\Delta_0 = \sqrt{\frac{\rho}{\pi\mu_0\nu}}$ ;  $\rho$  – удель-

ное электрическое сопротивление жидкой стали;  $\nu = 50$  Гц – промышленная частота электрического тока;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  (В·с)/(А·м) – магнитная постоянная. В работе [2] предложена формула для расчета среднеинтегральной ЭМС, действующей на ток дуги  $i_0$  со стороны тока, протекающего через металл  $i_m$  от другой дуги

$$F = \frac{\mu_0 i_0 i_m}{4\pi} \ln \left[ \frac{(\sqrt{l^2 + \Delta^2} + l)(\Delta + l_d)}{\Delta(\sqrt{(l_d + \Delta)^2 + l^2} + l)} \right], \quad (1)$$

где  $l = 0,5D\sqrt{3}$  – расстояние между осями дуг;  $D$  – диаметр распада ГЭ;  $l_d$  – длина дуги.

Определим токи, которые протекают через жидкий металл в ТДП. Считаем, что в электрической схеме замещения три фазы приемника, соединенные «треугольником», имеют одинаковые фазные сопротивления  $Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA}$ . Тогда, независимо от нагрузки, напряжение на каждой фазе приемника равно линейному  $U_\Delta = U_\phi$  и фазные токи можно определить как

$$\begin{aligned} i_{AB} &= \frac{U_{AB}}{Z_{AB}} = I \sin(\omega t); \\ i_{BC} &= \frac{U_{BC}}{Z_{BC}} = I \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right); \\ i_{CA} &= \frac{U_{CA}}{Z_{CA}} = I \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right), \end{aligned}$$

где  $\omega = 2\pi/T$  – угловая частота;  $I$  – амплитудное значение фазного тока, а линейные токи как

$$\begin{aligned} i_A &= i_0 = i_{AB} - i_{CA} = I\sqrt{3} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) = I\sqrt{3} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right); \\ i_C &= i_{CA} - i_{BC} = I\sqrt{3} \cos(\omega t); \\ i_B &= i_{BC} - i_{AB} = I\sqrt{3} \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right). \end{aligned}$$

Рассмотрим динамическую ЭМС, действующую на ток дуги  $A$  ( $i_0 = i_A$ ) со стороны трех фазных токов  $i_{AB}$ ,  $i_{BC}$ ,  $i_{CA}$ , проходящих через расплав. Результирующая мгновенная ЭМС есть сумма трех векторов  $\vec{F}_m = \vec{F}_{AB} + \vec{F}_{BC} + \vec{F}_{CA}$ . В работе [20] направление этих сил указано как вертикальное. На самом деле силы  $\vec{F}_{AB}$  и  $\vec{F}_{CA}$  направлены горизонтально вдоль прямых  $AB$  и  $AC$  соответственно (рис. 1).

$$\text{Обозначив за } \eta = \frac{\mu_0}{4\pi} \ln \left[ \frac{(\sqrt{l^2 + \Delta^2} + l)(\Delta + l_d)}{\Delta(\sqrt{(l_d + \Delta)^2 + l^2} + l)} \right], \text{ мож-}$$

но записать модули этих сил как

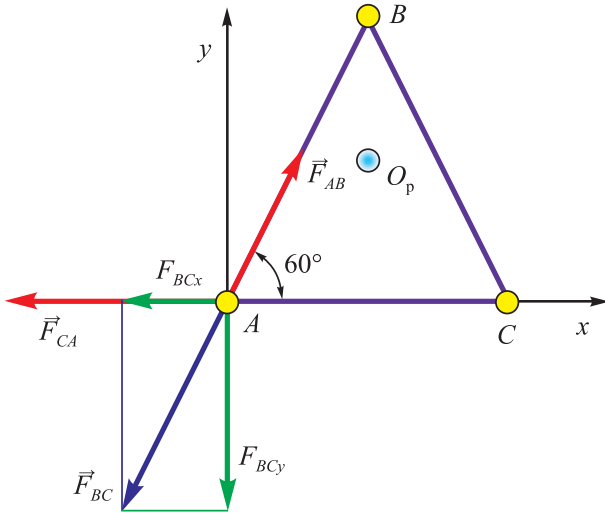


Рис. 1. Направление мгновенных электромагнитных сил  $\vec{F}_{AB}$ ,  $\vec{F}_{CA}$  и  $\vec{F}_{BC}$ , действующих со стороны фазных токов на электрическую дугу. Точка  $O_p$  – центр диаметра распада электродов

Fig. 1. Direction of instantaneous electromagnetic forces  $\vec{F}_{AB}$ ,  $\vec{F}_{CA}$  and  $\vec{F}_{BC}$ , acting from the side of phase currents on the electric arc. Point  $O_p$  – center of the diameter of electrodes decay

$$|\vec{F}_{AB}| = \eta i_A i_{AB} = \eta I^2 \sqrt{3} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) \sin(\omega t); \quad (2)$$

$$|\vec{F}_{CA}| = \eta i_A i_{CA} = \eta I^2 \sqrt{3} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right). \quad (3)$$

Определим динамическую ЭМС  $\vec{F}_{BC}$ , действующую на ток дуги  $i_0$  со стороны тока  $i_{BC} = i_3$ , протекающего по цепи BC через расплав. В работах [16 – 17] показано, что при усреднении по времени эта сила равна нулю, однако мгновенное ее значение может быть вполне сравнимо с другими силами.

Введем декартовую систему координат, показанную на рис. 2. Примем допущение, что  $\Delta \ll l_d$ . Напряженность магнитного поля в точке  $A_1$  от элемента тока  $dl$ , проходящего через точку  $B_1$ , равна  $dH = \frac{i_3}{4\pi r'^3} [\vec{dl} \times \vec{r}']$ . Координаты этих точек соответственно  $A_1(x_0; y_0; z_0) = (0; 0; z_0)$ ,  $B_1(x; y; z) = (x; y; 0)$ . Координаты вектора  $r' = (x_0 - x; y_0 - y; z_0 - z) = (-x; -y; z_0)$ , а его длина  $|r'| = |B_1A_1| = \sqrt{x^2 + y^2 + z_0^2}$ .

Уравнение прямой BC  $y = (l - x) \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{3}\right) = (l - x)\sqrt{3}$ ,  $x \in \left[\frac{l}{2}, l\right]$ . Координаты единичного вектора  $\vec{dl}$

$$dl = \left( dx \cos\left(\frac{\pi}{3}\right); dx \sin\left(\frac{\pi}{3}\right); 0 \right) = dx \left( \frac{1}{2}; \frac{\sqrt{3}}{2}; 0 \right).$$

Распишем векторное произведение

$$\vec{dl} \times \vec{r}' = \begin{vmatrix} i & j & k \\ \frac{1}{2} dx & \frac{\sqrt{3}}{2} dx & 0 \\ -x & -(l-x)\sqrt{3} & z_0 \end{vmatrix} = dx \left( \frac{\sqrt{3}}{2} z_0; -\frac{1}{2} z_0; \frac{\sqrt{3}}{2} l \right).$$

Напряженность магнитного поля от тока  $i_3$ , проходящего через BC, в точке  $A_1$

$$H = \int_{l/2}^l \frac{i_3}{4\pi r'^3} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} z_0; -\frac{1}{2} z_0; \frac{\sqrt{3}}{2} l \right) dx$$

имеет три проекции на оси координат:

$$H_x(z_0) = \frac{\sqrt{3} i_3 z_0}{8\pi} \int_{l/2}^l \frac{1}{\left(x^2 + \frac{3}{4} l^2 + z_0^2\right)^{3/2}} dx;$$

$$H_y(z_0) = \frac{i_3 z_0}{8\pi} \int_{l/2}^l \frac{1}{\left(x^2 + \frac{3}{4} l^2 + z_0^2\right)^{3/2}} dx;$$

$$H_z(z_0) = \frac{\sqrt{3} l i_3}{8\pi} \int_{l/2}^l \frac{1}{\left(x^2 + \frac{3}{4} l^2 + z_0^2\right)^{3/2}} dx.$$

В этих выражениях интеграл можно записать как

$$\int_{l/2}^l \frac{1}{\left(x^2 + \frac{3}{4} l^2 + z_0^2\right)^{3/2}} dx = \frac{l}{\frac{3}{4} l^2 + z_0^2} \left( \frac{1}{\sqrt{\frac{7}{4} l^2 + z_0^2}} - \frac{1}{2\sqrt{l^2 + z_0^2}} \right).$$

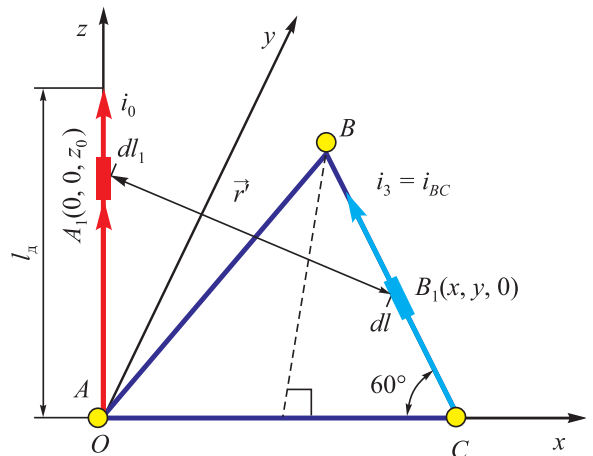


Рис. 2. К расчету вектора напряженности магнитного поля и электромагнитных сил, возникающих между токами  $i_0$  и  $i_3$

Fig. 2. To calculation of the vector of magnetic field strength and electromagnetic forces arising between the currents  $i_0$  and  $i_3$

Сила, которая действует на элемент тока  $dl_1$  со стороны тока  $i_3$ :  $d\vec{F} = i_0\mu_0 [d\vec{l}_1 \times \vec{H}]$ , где  $dl_1 = (0; 0; dz_0)$ ,

$$dl_1 \times H = \begin{vmatrix} i & j & k \\ 0 & 0 & dz_0 \\ H_x & H_y & H_z \end{vmatrix} = -iH_y dz_0 + jH_x dz_0.$$

Вектор ЭМС  $\vec{F}_{BC}$ , действующей на дугу, через которую протекает ток  $i_0$ , со стороны тока  $i_3$ , находится в горизонтальной плоскости  $O_{xy}$ , а его значения проекций с учетом обозначения

$$\eta_1 = \mu_0 \frac{l}{8\pi} \int_0^{l_d} \frac{z_0}{4} \left( \frac{1}{\sqrt{\frac{7}{4}l^2 + z_0^2}} - \frac{1}{2\sqrt{l^2 + z_0^2}} \right) dz_0$$

можно записать как

$$F_{BCx} = \sqrt{3}I^2\eta_1 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right); \quad (4)$$

$$F_{BCy} = 3I^2\eta_1 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right). \quad (5)$$

Можно увидеть, что тангенс угла наклона вектора силы  $\vec{F}_{BC}$  равен  $\sqrt{3}$ , что означает, что сила направлена вдоль прямой  $AB$  (см. рис. 2). Формулы (2) – (4) включают в себя произведение синусов, которые в свою очередь раскладываются как сумма косинусов. Например, формулу (5) можно представить как

$$F_{BCy} = \frac{3}{2}I^2\eta_1 \left[ \cos\left(-\frac{\pi}{6} + \frac{2\pi}{3}\right) - \cos\left(2\omega t - \frac{\pi}{6} - \frac{2\pi}{3}\right) \right] = \frac{3}{2}I^2\eta_1 \cos\left(2\omega t + \frac{\pi}{6}\right).$$

Силы представляют собой четные периодические функции с частотой в два раза выше промышленной частоты тока.

### РЕЗУЛЬТАТЫ, АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

Если принять, что  $\sqrt{3}I^2\eta \equiv 1$  и  $\sqrt{3}I^2\eta_1 \equiv 1$ , то можно получить качественную картину динамического поведения ЭМС, действующих на дугу со стороны токов, проходящих через расплав. Результаты компьютерного моделирования показаны на рис. 3.

Видно, что годографы суммы сил  $\vec{F}_{AB} + \vec{F}_{CA}$  и результирующей силы  $\vec{F}_M$  имеют вид эллипса. Наличие силы  $\vec{F}_{BC}$  вытягивает исходный эллипс, образованный силами  $\vec{F}_{AB} + \vec{F}_{CA}$  в вертикальном направлении. Точками на графике показано значение результирующей силы с шагом по времени  $T/36$ . Точкой  $M$  показано начальное положение суммарной силы (при  $t = 0$ ). С те-

чением времени вектор силы движется по ходу часовой стрелки.

Рассмотрим вторую силу электромагнитного взаимодействия дуги с другими дугами и токами, протекающими через ГЭ. Она действует на ток дуги  $i_0$  со стороны другого параллельного тока  $i_1$ , протекающего по ГЭ длиной  $l_{эд}$  и дуге длиной  $l_d$ . Данную силу можно определить как [16]

$$F_d = \frac{\mu_0 i_0 i_1}{4\pi l} \left( \sqrt{l^2 + l_d^2} - l - \sqrt{l^2 + l_{эд}^2} + \sqrt{l^2 + (l_d + l_{эд})^2} \right).$$

Силы  $\vec{F}_{d1}$  и  $\vec{F}_{d2}$  со стороны дуг  $B$  и  $C$  соответственно направлены вдоль прямых  $AB$  и  $AC$  (см. рис. 1). Обозначив за  $\eta_2 = \frac{\mu_0}{4\pi l} \left( \sqrt{l^2 + l_d^2} - l - \sqrt{l^2 + l_{эд}^2} + \sqrt{l^2 + (l_d + l_{эд})^2} \right)$ ,

можно записать модули этих сил как

$$|\vec{F}_{d1}| = \eta_2 i_A i_B = 3\eta_2 I^2 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) = \frac{3}{2}\eta_2 I^2 \left[ \cos(2\omega t) - \frac{1}{2} \right]; \quad (6)$$

$$|\vec{F}_{d2}| = \eta_2 i_A i_C = 3\eta_2 I^2 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) \cos(\omega t) = \frac{3}{2}\eta_2 I^2 \left[ \cos\left(2\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{1}{2} \right]. \quad (7)$$

Если принять, что  $\sqrt{3}I^2\eta_2 \equiv 1$ , то можно получить качественную картину динамического поведения ЭМС, воздействующих на дугу: со стороны токов, проходя-

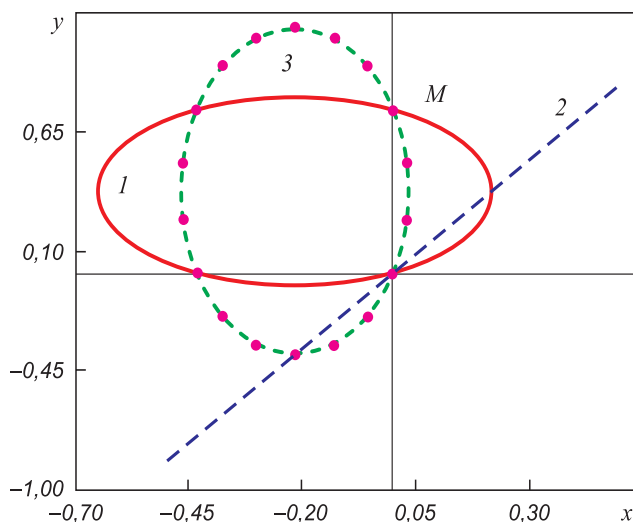


Рис. 3. Годографы сил, действующих на дугу со стороны токов, протекающих через расплав:  
1 –  $\vec{F}_{AB} + \vec{F}_{CA}$ ; 2 –  $\vec{F}_{BC}$ ; 3 –  $\vec{F}_M = \vec{F}_{AB} + \vec{F}_{CA} + \vec{F}_{BC}$

Fig. 3. Hodographs of the forces acting on the arc from the side of currents flowing through the melt:  
1 –  $\vec{F}_{AB} + \vec{F}_{CA}$ ; 2 –  $\vec{F}_{BC}$ ; 3 –  $\vec{F}_M = \vec{F}_{AB} + \vec{F}_{CA} + \vec{F}_{BC}$

щих через расплав  $\vec{F}_m$ , от токов, протекающих через параллельные дуги и ГЭ  $\vec{F}_d$ , а также совместного действия  $\vec{F}_\Sigma = \vec{F}_m + \vec{F}_d$ . Создана программа в среде Mathcad, позволяющая визуализировать поведение годографа сил, действующих на дугу. Результаты компьютерного моделирования показаны на рис. 4.

Также как и на рис. 3, точками показано значение результирующей силы с шагом по времени  $T/36$ . Точкой  $M$  показано начальное положение суммарной силы (при  $t = 0$ ). С течением времени вектор силы движется по ходу часовой стрелки. Годограф результирующей силы имеет вид эллипса, коэффициент сжатия которого и направления полуосей зависит от соотношения коэффициентов  $\eta, \eta_1, \eta_2$ .

Большая полуось эллипса имеет угол  $\varphi$  с линией, соединяющей центр распада электродов и ось электрода. Значение этого угла, как и при расчетах со средними значениями результирующей силы [16], зависит от безразмерных расстояний между электрическими дугами и высотой ГЭ и может составлять  $\varphi = 20 - 80^\circ$ .

### Выводы

Разработана математическая модель для расчета мгновенных значений и направлений основных отклоняющих дугу ЭМС в ТДП, позволяющая выявить характер динамического поведения дуг. Создана компьютерная программа, дающая возможность визуализировать поведение годографа сил, действующих на дугу.

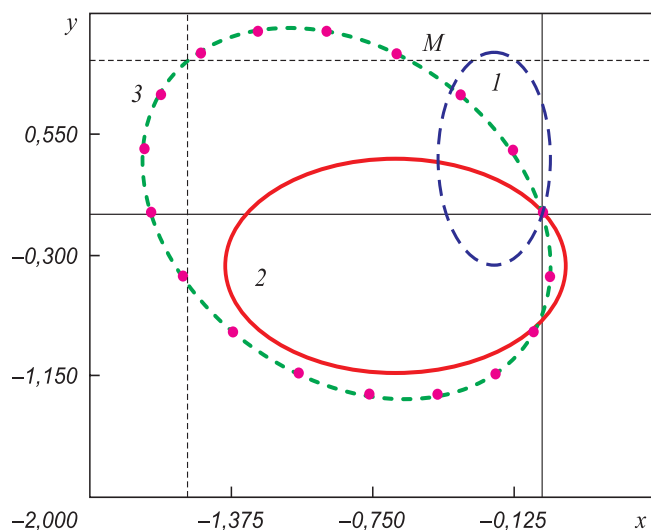


Рис. 4. Годографы сил, действующих на дугу со стороны токов, проходящих:

1 – через расплав  $\vec{F}_m$ ; 2 – через параллельные дуги и электроды  $\vec{F}_d = \vec{F}_{d1} + \vec{F}_{d2}$ ; 3 – через расплав и параллельные оси дуги и электроды  $\vec{F}_\Sigma = \vec{F}_m + \vec{F}_d$

Fig. 4. Hodographs of the forces acting on the arc from the side of currents flowing:

1 – through the melt  $\vec{F}_m$ ; 2 – through the parallel arcs and electrodes  $\vec{F}_d = \vec{F}_{d1} + \vec{F}_{d2}$ ; 3 – through the melt and parallel arcs and electrodes  $\vec{F}_\Sigma = \vec{F}_m + \vec{F}_d$

Установлено, что результирующая отклоняющая дугу сила является четной гармонической функцией с частотой в два раза выше промышленной частоты тока. Ее годограф представляет собой эллипс, лежащий в горизонтальной плоскости, большая полуось которого составляет угол  $20 - 80^\circ$  с линией, соединяющей центр распада электродов и ось электрода.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чередниченко В.С., Бикеев Р.А., Кузьмин М.Г. Математическое моделирование колебаний кабельных гирлянд в дуговых сталеплавильных печах // Электротехнология. 2005. № 4. С. 32 – 35.
2. Казанов Ю.К. Анализ динамических воздействий на электроды дуговых сталеплавильных печей // Сталь. 2000. № 11. С. 54 – 56.
3. Makarov A.N., Sokolov A. Yu., Lugovoi Yu.A. Increasing the arc efficiency by the removal of arc electromagnetic blowing in electric arc furnaces: I. Effect of electromagnetic blowing and the slag height on the arc efficiency in an electric arc furnace // Russian Metallurgy (Metally). 2012. No. 6. P. 542 – 547.
4. Makarov A.N., Rybakova V.V., Galicheva M.K. Electromagnetism and the arc efficiency of electric arc steel melting furnaces // Journal of Electromagnetic Analysis and Applications. 2014. No. 6. P. 184 – 192.
5. Миронов Ю.М. Электрическая дуга в электротехнологических установках. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013. – 290 с.
6. David F., Tudorache T., Firteanu V. Numerical evaluation of electromagnetic field effects in electric arc furnaces // COMPEL. 2001. Vol. 20. No. 2. P. 619 – 635.
7. Kiyoumars A., Nazari A., Ataei M. etc. Electromagnetic analysis of an AC electric arc furnace including the modeling of an AC arc // COMPEL. 2010. Vol. 29. No. 3. P. 667 – 685.
8. Kiyoumars A., Nazari A., Ataei M. etc. Three dimensional analysis of an AC electric arc furnace // 35<sup>th</sup> Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, Porto, 2009. P. 3697 – 3702.
9. Reynolds Q.G. The dual-electrode DC arc furnace – modelling insights // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. October 2011. Vol. 111. P. 697 – 703.
10. Ramirez M., Trapaga G. Mathematical modeling of a DC electric arc – dimensionless representation of a DC arc // ISIJ International. 2003. Vol. 43. No. 8. P. 1167 – 1176.
11. Reynolds Q.G., Jones R.T. Twin-electrode DC smelting furnaces – Theory and photographic testwork // Minerals Engineering. March 2006. Vol. 19. Issue 3. P. 325 – 333.
12. Reynolds Q.G. The dual-electrode DC arc furnace – modelling insights // Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2011. Vol. 111. No.10. P. 33 – 46.
13. Bellan P.M., Higley J.W. Magnetic suppression of arc blowout in a model arc furnace // IEEE Transactions On Plasma Science. December 1992. Vol. 20. No. 6. P. 1026 – 1035.
14. Zweben S., Karasik M.L. Experiments on arc deflection and instability. [Electronic resource]. Available at URL: [https://www.researchgate.net/publication/237285413\\_Laboratory\\_experiments\\_on\\_arc\\_deflection\\_and\\_instability](https://www.researchgate.net/publication/237285413_Laboratory_experiments_on_arc_deflection_and_instability).
15. Егоров А.В. Электроплавильные печи черной металлургии. – М.: Металлургия, 1985. – 280 с.
16. Ячиков И.М., Костылева Е.М. Поведение основных электромагнитных сил, действующих на дугу в трехфазной дуговой печи // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. Т. 58. № 7. С. 479 – 485.
17. Ячиков И.М., Вдовин К.Н., Костылева Е.М. Анализ основных электромагнитных сил, действующих на дугу в трехфазной дуговой печи // Теория и технология металлургического производства. 2014. № 2 (15). С. 70 – 76.

18. Ячиков И.М., Костылева Е.М. Комплекс программ для определения параметров электрических дуг трехфазного переменного тока, горящих на горизонтальную поверхность // Программные продукты и системы. 2017. № 3. С. 537 – 545.
19. Ячиков И.М., Костылева Е.М., Храмшин В.Р. Расчет электромагнитных сил, действующих на дуги в трехфазной дуговой печи: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2016618499.
20. Евсева Н.В., Лазуко Л.А., Черкасова Ю.Б., Хасанов С.У. Исследование электродинамических сил, действующих на дуги в трехфазной дуговой сталеплавильной печи // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2011. № 34. С. 69 – 74.

Поступила в редакцию 5 февраля 2019 г.  
После доработки 21 мая 2019 г.  
Принята к публикации 22 октября 2019 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. NO. 1, PP. 27–33.

## DYNAMICS OF ELECTROMAGNETIC FORCES REJECTING ARCS FROM VERTICALS IN A THREE-PHASE ARC FURNACE

I.M. Yachikov, E.M. Kostyleva, I.V. Portnova

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, Russia

**Abstract.** Knowledge of the nature and behavior of forces acting on an arc is important when designing furnaces, controlling and automating their work. The effect of electromagnetic arc blowing has a negative effect on technical and economic indicators of the furnace, since the arc is removed from dimples in metal and slag. Radiation of the arc on walls and arch increases. And the effective power absorbed by the metal decreases. For this and a number of other tasks, it is necessary to know the dynamic behavior of the arc, which is largely determined by the instantaneous values and directions of the individual forces and the resultant force. The paper discusses the behavior of an electromagnetic force acting on an arc column from currents flowing through a liquid metal and currents flowing through other parallel arcs and graphitized electrodes in a three-phase AC arc furnace. It was assumed that the arcs burn perpendicular to the surface of the metal bath (their axes coincide with the axes of the electrodes) and effective value of the linear currents in different phases is the same. A mathematical model is proposed for calculating the instantaneous values and directions of the main electromagnetic forces acting on arcs in a three-phase arc furnace, allowing to reveal the nature of arcs dynamic behavior. A computer program has been created that makes it possible to visualize the behavior of a hodograph of forces acting on an arc. Hodographs of forces acting on the arc from the currents flowing through the melt are shown; they are ellipses lying in a horizontal plane. The resulting force deflecting an arc is also an even harmonic function with a frequency twice as high as the industrial frequency of the current. Its hodograph is an ellipse lying in a horizontal plane, the big semi-axis of which makes an angle of 20 – 80° with a line connecting the center of decay of the electrodes and the electrode axis.

**Keywords:** arc furnace, graphite electrode, electromagnetic force, hodograph of forces, arc column, dynamic arc behavior, mathematical model.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-1-27-33

### REFERENCES

- Cherednichenko V.S., Bikeev R.A., Kuz'min M.G. Mathematical modeling of oscillations of cable chains in electric arc furnaces. *Elektrometallurgiya*. 2005. no. 4. pp. 32–35. (In Russ.).
- Kazanov Yu.K. Analysis of dynamic effects on the electrodes of electric arc furnaces. *Stal'*. 2000. no. 11, pp. 54–56. (In Russ.).
- Makarov A.N., Sokolov A.Yu., Lugovoi Yu.A. Increasing the arc efficiency by the removal of arc electromagnetic blowing in electric arc furnaces: I. Effect of electromagnetic blowing and the slag height on the arc efficiency in an electric arc furnace. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2012, no. 6, pp. 542–547.
- Makarov A.N., Rybakova V.V., Galicheva M.K. Electromagnetism and the arc efficiency of electric arc steel melting furnaces. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*. 2014, no. 6, pp. 184–192.
- Mironov Yu.M. *Elektricheskaya duga v elektrotekhnologicheskikh ustanovkakh: monografiya* [Electric arc in electrical installations]. Cheboksary: Izd-vo Chuvash. un-ta, 2013, 290 p. (In Russ.)
- David F., Tudorache T., Firteanu V. Numerical evaluation of electromagnetic field effects in electric arc furnaces. *COMPEL*. 2001, vol. 20, no. 2, pp. 619–635.
- Kiyoumarsi A., Nazari A., Ataei M., Beheshti H.K., Hooshmand R.-A. Electromagnetic analysis of an AC electric arc furnace including the modeling of an AC arc. *COMPEL*. 2010, vol. 29, no. 3, pp. 667–685.
- Kiyoumarsi A., Nazari A., Ataei M., Beheshti H.K., Karimi H. Three dimensional analysis of an AC electric arc furnace. *35<sup>th</sup> Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, Porto, 2009*, pp. 3697–3702.
- Reynolds Q.G. The dual-electrode DC arc furnace – modelling insights. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. October 2011, vol. 111, pp. 697–703.
- Ramirez M., Trapaga G. Mathematical modeling of a DC electric arc – dimensionless representation of a DC arc. *ISIJ International*. 2003, vol. 43, no. 8, pp. 1167–1176.
- Reynolds Q.G., Jones R.T. Twin-electrode DC smelting furnaces – Theory and photographic testwork. *Minerals Engineering*. March 2006, vol. 19, no. 3, pp. 325–333.
- Reynolds Q.G. The dual-electrode DC arc furnace – modelling insights. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. Oct. 2011, vol. 111, no. 10, pp. 33–46.
- Bellan P.M., Higley J.W. Magnetic Suppression of Arc Blowout in a Model Arc Furnace. *IEEE Transactions On Plasma Science*. December 1992, vol. 20, no. 6, pp. 1026–1035.
- Zweben S., Karasik M. *Laboratory Experiments on Arc Deflection and Instability*. Electronic resource. Available at URL: [https://www.researchgate.net/publication/237285413\\_Laboratory\\_experiments\\_on\\_arc\\_deflection\\_and\\_instability](https://www.researchgate.net/publication/237285413_Laboratory_experiments_on_arc_deflection_and_instability).
- Egorov A.V. *Elektroplavil'nye pechi chernoi metallurgii* [Electric arc furnaces in ferrous metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1985, 280 p. (In Russ.).
- Yachikov I.M., Kostyleva E.M. Behavior of the main electromagnetic forces acting on the arc in three-phase arc furnace. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, vol. 58, no. 7, pp. 479–485. (In Russ.).
- Yachikov I.M., Vdovin K.N., Kostyleva E.M. Analysis of main electromagnetic forces acting on the arc in a three-phase arc furnace. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2014, no. 2(15), pp. 70–76. (In Russ.).
- Yachikov I.M., Kostyleva E.M. A set of programs for determining the parameters of three-phase AC electric arcs burning on a horizontal surface. *Programmnye produkty i sistemy*. 2017, no. 3, pp. 537–545. (In Russ.).
- Yachikov I.M., Kostyleva E.M., Khrumshin V.R. *Raschet elektromagnitnykh sil, deistvuyushchikh na dugi v trekhfaznoi dugovoi pechi* [Calculation of electromagnetic forces acting on the arc in a three-phase arc furnace]. Certificate of state registration of computer program no. 2016618499. (In Russ.).

20. Evseeva N.V., Lazuko L.A., Cherkasova Yu.B., Khasanov S.U Investigation of electrodynamic forces acting on arcs in a three-phase electric arc furnace. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Energetika*. 2011, no. 34, pp. 69–74. (In Russ.).

*E.M. Kostyleva*, Postgraduate of the Chair of Computer Engineering, and Applied Mathematics

*I.V. Portnova*, Cand. Sci. (Eng.), Executive Secretary of the Information Policy Department

**Information about the authors:**

*I.M. Yachikov*, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Computer Engineering, and Applied Mathematics (jachikov@mail.ru)

Received February 5, 2019

Revised May 21, 2019

Accepted October 22, 2019

---