

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ НА РЕЖИМ ИХ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ

© Садовой А.В., Яшина К.В., 2009

**Наведено дослідження електричних процесів в дугових електросталеплавильних печах змінного струму на основі уточненої математичної моделі. Одержано залежності кількості тепла, що надходить в піч, від електричних параметрів плавлення.**

**The article cited the study of electrical processes in electric arc furnaces, AC, on the basis of the elaborated mathematical model. The dependencies of the quantity of heat incoming into the furnace from the electrical parameters of melting are received.**

**Введение.** В последние 10 лет одной из проблем, стоящих перед мировой металлургической промышленностью, является проблема энергосбережения и автоматизации электросталеплавильного производства. Эффективный способ решения данной проблемы – построение алгоритма оптимального управления работой дуговой электросталеплавильной печи (ДСП) на основе математического моделирования ее работы [1]. При этом особое внимание следует уделить электрическим, тепловым и химическим процессам, происходящим в ДСП.

**Постановка задачи.** Так как в дуговых электросталеплавильных печах происходит превращение электрической энергии в тепловую, а тепловой в химическую, то для построения модели процесса расплавления шихты в ДСП необходимо выявить зависимости, закономерности и взаимосвязи между электрическими, тепловыми и химическими процессами. Характер протекания тепловых и химических процессов определяется количеством тепла, поступающим в печь в каждый момент плавки. Данная величина зависит от мгновенного значения активной мощности, подводимой в печь. Поэтому, задачами исследования являются определение влияния электрических параметров (активного и индуктивного сопротивления дуги, активных сопротивлений шихты и расплава и ступени напряжения) на активную мощность печи. При этом исследование проводилось без учета несимметричных режимов.

**Результаты работы.** Для детального рассмотрения электрических процессов в ДСП необходимо рассмотреть трехфазную электрическую цепь, включающую в себя печной трансформатор, электроды и токопроводящую подэлектродную среду. Данную цепь нельзя рассматривать как три эквивалентных однофазных цепи. Однако, можно представить в виде схемы замещения каждой фазы. Данные схемы представляют собой сочетания различных соединений сопротивлений расплава  $R_p$ , шихты  $R_{ш}$ , электрической дуги  $R_d$  и индуктивностей электрода  $L_e$  и дуги  $L_d$ . Сопротивления расплава, шихты и индуктивность электрода являются линейными, а электрическая дуга – нелинейным элементом и, тем самым, обуславливает нелинейность всей подэлектродной токопроводящей среды. Кроме того, дуга обладает динамическими свойствами, которые определяются индуктивностью дуги [2]. Сопротивление шихты может быть включено в цепь двумя способами:

1. Последовательно с сопротивлением расплава (рис. 1).
2. Параллельно активному и индуктивному сопротивлениям дуги (рис. 2).

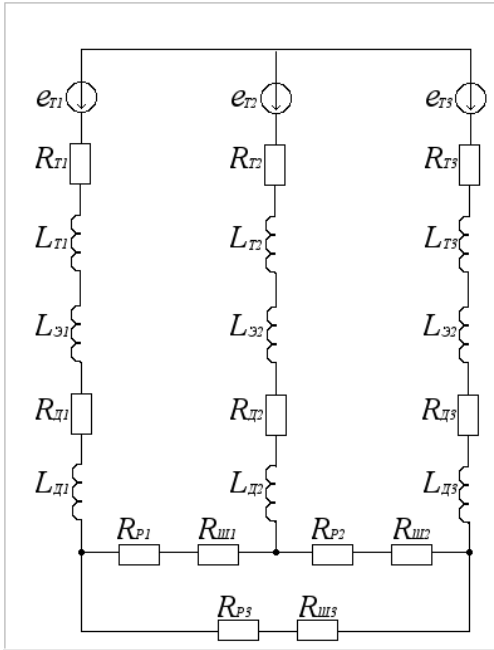


Рис. 1. Электрическая схема дуговой электросталеплавильной печи (сопротивление шихты включено последовательно с сопротивлением расплава, нагрузка соединена в треугольник)

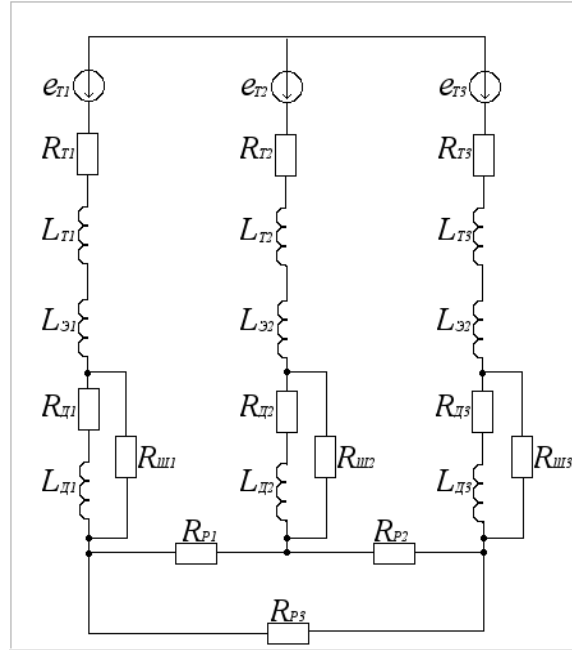


Рис. 2. Электрическая схема дуговой электросталеплавильной печи (сопротивление шихты включено параллельно активному и индуктивному сопротивлениям дуги, нагрузка соединена в треугольник)

Первый способ рассматривается в случае, когда дуги не заглублены в шихту, второй – в случае, когда дуги полностью погружены в проплавляемый дугой мениск. Рассмотрим случай, представленный на рис. 1.

Сопротивления шихты и расплава найдем по формулам:

$$R_{ui} = \rho \frac{l_{ui}}{S_{ui}}, \quad R_{pi} = \rho \frac{l_{pi}}{S_{pi}}, \quad i = 1..3, \quad (1)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление шихты (расплава)  $(\frac{\text{Ом} \cdot \text{м}^2}{\text{м}})$ ;  $l_{ui}$  – высота слоя шихты в зоне  $i$  электрода ( $\text{м}$ );  $S_{ui}$  – площадь поверхности слоя шихты в зоне  $i$  электрода ( $\text{м}^2$ );  $l_{pi}$  – высота расплава в зоне  $i$  электрода ( $\text{м}$ );  $S_{pi}$  – площадь поверхности расплава в зоне  $i$  электрода ( $\text{м}^2$ ).

Удельное сопротивление шихты (расплава) находим по формуле:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t),$$

где  $\rho_0$  – удельное сопротивление при  $0^\circ \text{C}$   $(\frac{\text{Ом} \cdot \text{м}^2}{\text{м}})$ ;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления стали ( $\text{K}^{-1}$ );  $t$  – температура шихты (расплава) ( $\text{K}$ ).

Схема, представленная на рис. 1, содержит соединение трех сопротивлений так, что они образуют собой треугольник. Перейдем к рассмотрению эквивалентной схемы, представленной на рис. 3, с соединением нагрузки в звезду.

При этом:

$$R_1 = \frac{(R_{p3} + R_{u3})(R_{p1} + R_{u1})}{(R_{p3} + R_{u3}) + (R_{p2} + R_{u2}) + (R_{p1} + R_{u1})}$$

$$R_2 = \frac{(R_{p2} + R_{u2})(R_{p3} + R_{u3})}{(R_{p3} + R_{u3}) + (R_{p2} + R_{u2}) + (R_{p1} + R_{u1})} \quad (2)$$

$$R_3 = \frac{(R_{p2} + R_{u2})(R_{p1} + R_{u1})}{(R_{p3} + R_{u3}) + (R_{p2} + R_{u2}) + (R_{p1} + R_{u1})}.$$

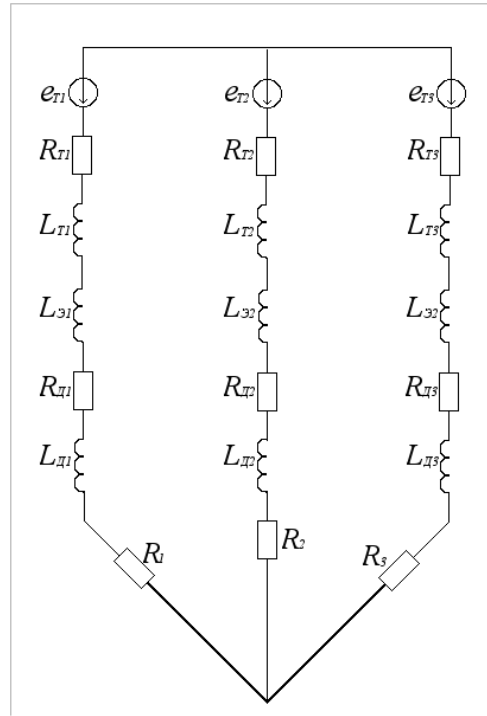


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема устройства дуговой электросталеплавильной печи (сопротивление шихты включено последовательно к сопротивлению расплава, нагрузка соединена в звезду)

Рассмотрим уравнение электрического равновесия для каждой фазы:

$$U_{\partial i} = e_{T_i} - I_{\partial i} Z_{T_i} - (L_{\partial i} + L_{Э i}) \frac{dI_{\partial i}}{dt}, \quad (3)$$

где  $U_{\partial i}$  – напряжение дуги  $i$  фазы ( $B$ );  $e_{T_i}$  – ЭДС трансформатора  $i$  фазы ( $B$ );  $I_{\partial i}$  – ток дуги  $i$  фазы ( $A$ );  $Z_{T_i}$  – сопротивление трансформатора  $i$  фазы ( $Ом$ );  $L_{\partial i}$  – индуктивность дуги  $i$  фазы ( $Гн$ );  $L_{Э i}$  – индуктивность электрода  $i$  фазы ( $Гн$ ).

Заменим формулу (2) разностным аналогом:

$$U_{\partial i} = e_{T_i} - I_{\partial i}^1 Z_{T_i} - (L_{\partial i} + L_{Э i}) \left( \frac{I_{\partial i}^1 - I_{\partial i}^0}{\tau} \right),$$

где  $I_{\partial i}^1$  – значение силы тока дуги  $i$  фазы на текущем временном шаге ( $A$ );  $I_{\partial i}^0$  – значение силы тока дуги  $i$  фазы на предыдущем временном шаге ( $A$ );  $\tau$  – шаг по времени ( $c$ ).

Значения  $U_{\partial i}$ ,  $e_{T_i}$ ,  $L_{\partial i}$  рассматриваются на текущем временном шаге.

Учитывая, что для симметричных режимов  $I_{\partial i}^1 = \frac{U_{\partial i}}{Z_i}$ , получим:

$$U_{\partial i} = \frac{e_{T_i} + (L_{Э i} + L_{\partial i}) \frac{I_{\partial i}^0}{\tau}}{\left( 1 + \frac{Z_{T_i}}{Z_i} + \frac{(L_{Э i} + L_{\partial i})}{Z_i \tau} \right)}, \quad i = 1..3.$$

$$Z_{T_i} = \sqrt{R_{T_i}^2 + (\omega L_{T_i})^2}, \quad i = 1..3,$$

$$Z_i = \sqrt{(R_{\delta i} + R_i)^2 + (\omega L_{\delta i} + \omega L_{\delta a})^2}, \quad i = 1..3,$$

где  $\omega$  – циклическая частота тока ( $\frac{1}{c}$ ), значение  $R_i$  вычисляется с помощью формулы (2).

Индуктивность электрода  $i$  фазы найдем по формуле [3]:

$$L_{\delta i} = \frac{0,063 l_{\delta i} (\ln \frac{\sqrt{3} D_p}{D_{\delta i}} + 0,25)}{\omega}, \quad i = 1..3, \quad (4)$$

где  $l_{\delta i}$  – длина электрода  $i$  фазы (м);  $D_{\delta i}$  – диаметр электродов (м);  $D_p$  – диаметр расплава электрода (м).

Активное сопротивление дуги  $i$  фазы найдем по формуле [4]:

$$R_{\delta i} = 4,96 \frac{\sqrt{l_{\delta i}}}{I_{\delta i}^{0,85}}, \quad i = 1..3, \quad (5)$$

где  $l_{\delta i}$  – длина дуги  $i$  фазы (мм);  $I_{\delta i}$  – действующий ток дуги  $i$  фазы (А).

Индуктивность дуги является нелинейным элементом рассматриваемой системы. Так как аналитические формулы для расчета индуктивности дуг на сегодняшний день отсутствуют, то при проведении исследований индуктивность дуги каждой фазы изменялась случайным образом в допустимом диапазоне значений. В будущем, при проведении синхронизации данной модели с реальным объектом, планируется по информации с датчиков определять сдвиг фаз между ЭДС на вторичной обмотке трансформатора и током дуги, с помощью полученного значения вычислять индуктивность дуги и передавать рассчитанную величину в математическую модель.

При рассмотрении схемной модели, представленной на рис. 2, воспользовавшись формулами (1)-(5), несложно получить зависимости, отражающие характер изменения тока и напряжения на дуге.

Описанные зависимости позволяют в любой момент времени определять индуктивное сопротивление электрода, активное и индуктивное сопротивления дуги, сопротивления шихты и расплава, напряжение на дуге, напряжения и токи шихты и расплава. Следовательно, с помощью данных зависимостей несложно в любой момент времени определить активную мощность, подводимую в печь. Для этого необходимо воспользоваться формулой:

$$P_a = \sum_{i=1}^3 ((I_{\delta i}^a)^2 R_{\delta i} + (I_{ui}^a)^2 R_{ui} + (I_{pi}^a)^2 R_{pi}), \quad (6)$$

где  $I_{\delta i}^a$  – активный ток дуги  $i$  фазы (А);  $I_{ui}^a$  – активный ток шихты  $i$  фазы (А);  $I_{pi}^a$  – активный ток расплава  $i$  фазы (А).

С помощью полученных зависимостей построена математическая модель электрических процессов в дуговых электросталеплавильных печах. Графические зависимости, полученные с помощью разработанной модели, приведены на рис. 4–15.

Рис. 4 и 5 отражают нелинейный характер дуги переменного тока, а также влияние длины и индуктивности дуги на форму ее вольт-амперной характеристики (ВАХ).

Из рис. 4 следует, что с увеличением длины дуги петля гистерезиса по напряжению динамической ВАХ дуги сужается, увеличивается угол наклона ВАХ к оси тока. Кроме того, увеличение длины дуги приводит к уменьшению тока дуги и увеличению падения напряжения на ней. Данный факт объясняется тем, что увеличение длины дуги приводит к росту ее активного сопротивления в соответствии с выражением (5).

Из рис. 5 следует, что увеличение индуктивности дуги приводит к увеличению ширины петли гистерезиса по напряжению ВАХ дуги. Кроме того, при увеличении индуктивности в результате роста индуктивного сопротивления увеличивается падение напряжения на дуге и уменьшается ее ток. Величина индуктивности дуги определяет сдвиг фаз между ЭДС вторичной обмотки печного трансформатора и током дуги (рис. 6). С ростом индуктивности сдвиг фаз увеличивается.

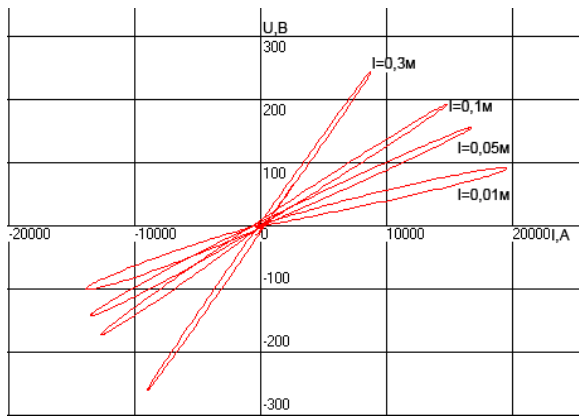


Рис. 4. Семейство динамических ВАХ дуги фазы 1,  $L_{\text{д}1}$  одинакова для дуг различной длины

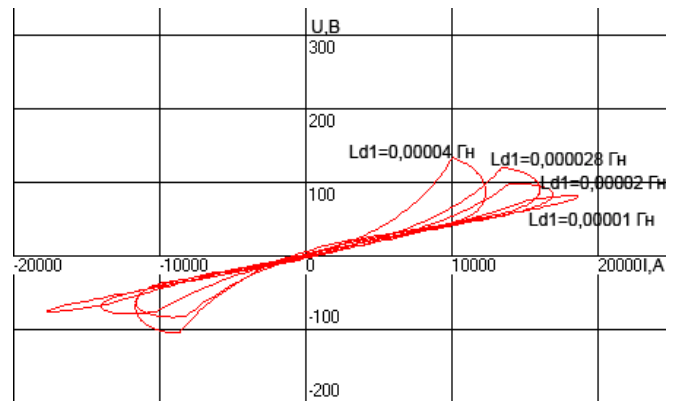


Рис. 5. Семейство динамических ВАХ дуги фазы 1,  $l_{\text{д}1}$  одинакова для дуг различной индуктивности

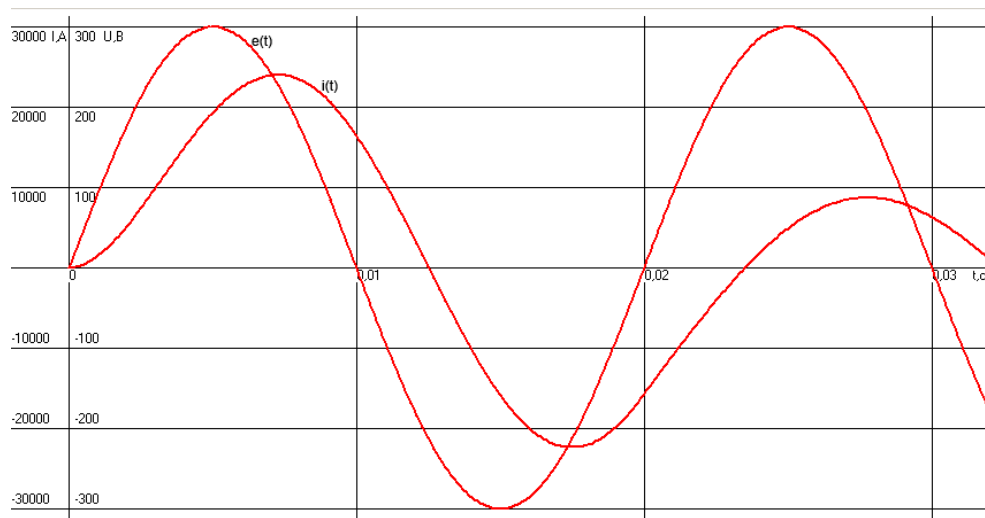


Рис. 6. Зависимость ЭДС вторичной обмотки печного трансформатора и тока дуги фазы 1 от времени,  $l_{\text{д}1} = \text{const}$ ,  $L_{\text{д}1} \neq \text{const}$ ,  $R_1 \neq R_2 \neq R_3 \neq \text{const}$

Из выражения (6) следует, что активная мощность, подводимая в печь, зависит от активных токов и активных сопротивлений дуги, шихты и расплава. Как было показано выше, активное сопротивление дуги зависит от ее длины, а активные сопротивления шихты и расплава – от температуры шихты и расплава соответственно. Значения активных токов зависят не только от длины, но и от индуктивности дуги, так как ее величина определяет индуктивное сопротивление дуги и сдвиг фаз между ЭДС вторичной обмотки печного трансформатора и током дуги. Следовательно, активная мощность, подводимая в печь, зависит от длины дуги и ее индуктивности, а также от температуры расплава и шихты. Графически данные зависимости представлены на рис. 7-15.

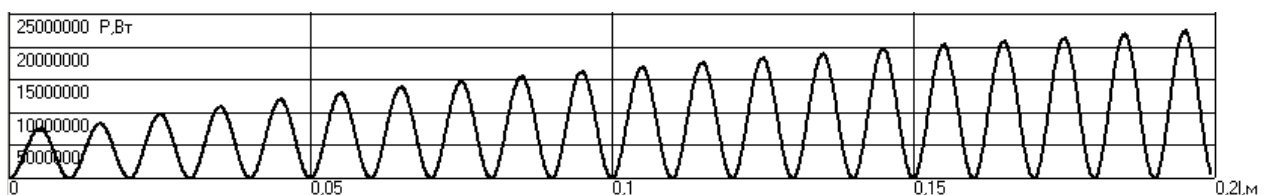


Рис. 7. Изменение мгновенной активной мощности фазы 1 при росте длины дуги

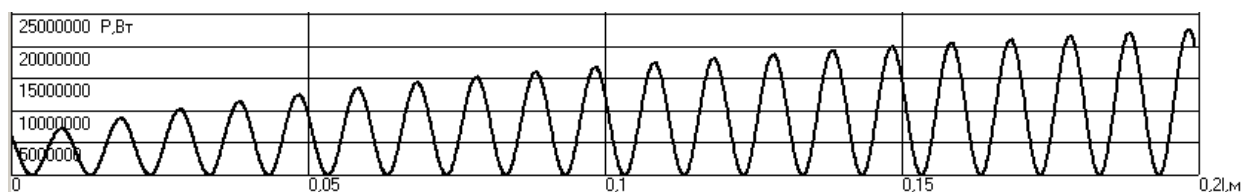


Рис. 8. Изменение мгновенной активной мощности фазы 2 при росте длины дуги

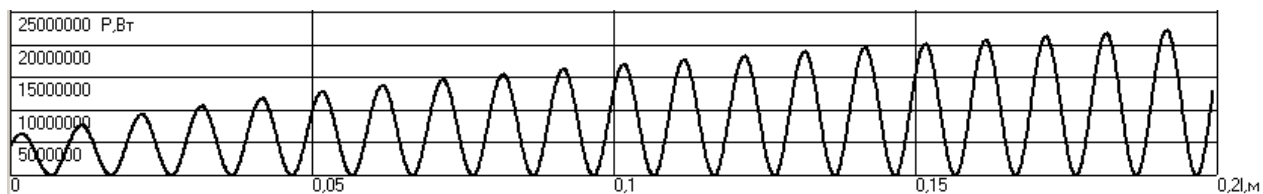


Рис. 9. Изменение мгновенной активной мощности фазы 3 при росте длины дуги

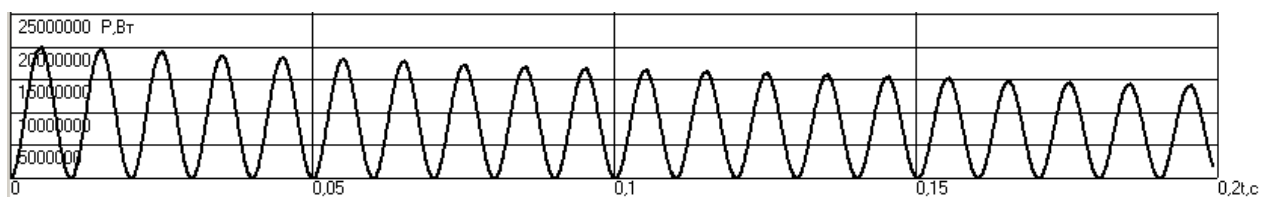


Рис. 10. Изменение мгновенной активной мощности фазы 1 при росте индуктивности дуги

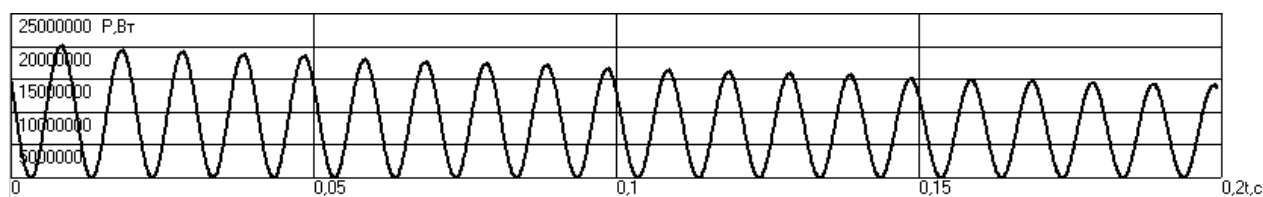


Рис. 11. Изменение мгновенной активной мощности фазы 2 при росте индуктивности дуги

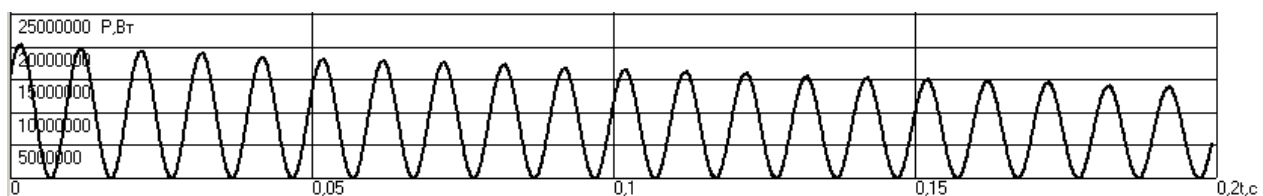


Рис. 12. Изменение мгновенной активной мощности фазы 3 при росте индуктивности дуги

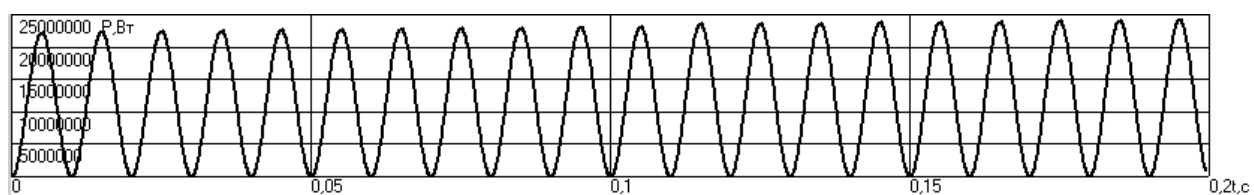


Рис. 13. Изменение мгновенной активной мощности фазы 1 при росте сопротивлений шихты и расплава

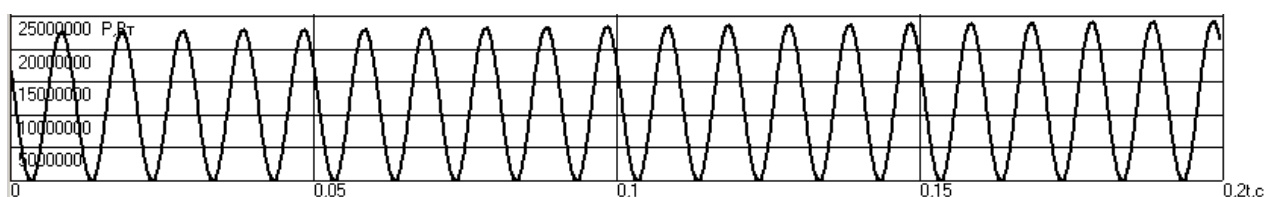


Рис. 14. Изменение мгновенной активной мощности фазы 2 при росте сопротивлений шихты и расплава

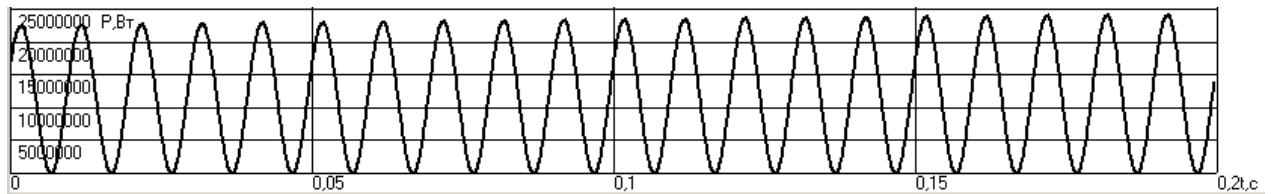


Рис. 15. Изменение мгновенной активной мощности фазы 3 при росте сопротивлений шихты и расплава

На рис. 7–9 показано, как меняются активные мощности фаз 1, 2, 3 с увеличением длины дуги. При этом индуктивность дуги, температуры шихты и расплава приняты постоянными.

Рис. 8–11 отражают характер изменения активных мощностей фаз 1, 2, 3 при постоянных длине дуги, значениях температур шихты и расплава, растущей индуктивности дуги.

Рис. 12–15 показывают влияние роста температур шихты и расплава на значения активных мощностей фаз 1, 2, 3. При этом  $I_{\partial 1} = const$ ,  $L_{\partial 1} = const$ , а сопротивления расплава и шихты увеличились за 0,2 с на 57,38 %.

Таким образом,  $P_a$  значительно возрастает с ростом длин дуг, с ростом индуктивности дуг – уменьшается, а с ростом температур шихты и расплава возрастает незначительно.

**Выводы.** В результате исследования электрических процессов, происходящих в дуговых электросталеплавильных печах, установлены зависимости активной мощности, подводимой в печь от электрических параметров плавки. Данные зависимости позволяют установить взаимосвязи между количеством тепла, поступающим в печь  $Q_{печи}$ , и электрическим режимом. Следовательно, при фиксированной ступени напряжения,  $Q_{печи}$  увеличивается с ростом длины дуги и активных сопротивлений шихты и расплава, уменьшается с ростом индуктивности дуги.

1. Качественная оценка способа автоматизированного управления работой дуговых сталеплавильных печей на основе комплексной математической модели / К.В. Яшина, В.Ю. Болотов, Ю.А. Болотова // Сб. научн. тр. Днепродзержинского государственного технического университета. – 2007 – № 8. – С. 217–221. 2. Лукашенко А.В., Фомичев А.А. Методы идентификации нелинейных динамических моделей электродуговых процессов. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2004. – 228 с. 3. Егоров А.В. Расчет мощности и параметров электропечей черной металлургии. – М.: Металлургия, 1990. – 280 с. 4. Василец С.В., Маренич К.Н. Математическое моделирование электрической дуги при замыкании в гибком кабеле участка шахты // Материалы междунар. молодежной научн. конф. “Севергеоэкотех-2005”: В 3 ч.; ч. 1. – Ухта: УГТУ, 2006. – С. 10–13.