

УДК 621.31

УПРАВЛЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО ШАГА ДЛЯ ВАКУУМНОЙ ДУГОВОЙ ПЕЧИ

*Ливаткин П.А., мастер по ремонту цеха КИПиА, аспирант Института
проблем управления им. В.А. Трапезникова (PAL2010@yandex.ru)*
*Положенцев К.А., старший мастер по ремонту цеха КИПиА,
аспирант СТИ НИТУ «МИСиС» (kirill.polozhentsev@gmail.com)*

ОАО «Металлургический завод «Электросталь»
(144002, Россия, Электросталь, Московская обл., ул. Железнодорожная, 1)

Аннотация. Настоящая статья описывает способ управления вакуумной дуговой печью с помощью программного шага. В работах [1, 2] рассмотрена модель управления напряжением вакуумной дуговой печи, однако алгоритм управления накапливает большую статическую ошибку. С целью ее снижения использован программный шаг, который представляет собой заранее рассчитанное движение расходуемого электрода с поддержанием постоянной скорости переплава и величины межэлектродного промежутка в заданных границах. Управление с помощью программного шага позволяет вслепую, без обратных связей, производить переплав в вакуумной дуговой печи для идеальных электродов. Ситуация меняется для неидеального (реального) электрода и «слепое» управление с помощью только программного шага не способно поддерживать нужные параметры переплава. Поэтому при переплаве неидеального электрода нужно пользоваться обратной связью по напряжению. Проведено моделирование для идеального и неидеального расходуемого электродов в среде Matlab.

Ключевые слова: вакуумная дуговая печь, идеальный электрод, скорость переплава, межэлектродное расстояние, программный шаг, неидеальный электрод, напряжение печи, обратная связь по напряжению, статическая ошибка.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-1-29-34

Вакуумная дуговая печь (ВДП) представляет собой сложный математический объект. Управление ВДП строится на поддержании следующих параметров: напряжение печи, ток печи, межэлектродный промежуток и т. д.

В качестве объекта исследования выбрана ВДП ДВС-3.2-Г1 с расходуемым электродом [1, 2].

Уравнение межэлектродного промежутка описывается следующим образом [1]:

$$l(t) = S_0 + S(t) - \frac{m_{\text{сл}}(t)}{\rho r} \left(\frac{1}{R^2} - \frac{1}{r_3^2} \right), \quad (1)$$

где S_0 – расстояние от электрода до дна кристаллизатора на момент начала переплава, м; $S(t)$ – перемещение электрода с момента начала переплава, м; R – радиус слитка, м; r_3 – радиус электрода (если электрод не цилиндрический, то r_3 является функцией длины электрода $l_3(t)$), м; ρ – плотность электрода, кг/м³; $m_{\text{сл}}(t)$ – масса слитка в текущий момент времени, кг.

Перемещение штока-электрододержателя с электродом запишем следующим выражением [1]:

$$\dot{S} = K_p \omega, \quad (2)$$

где K_p – коэффициент передачи редуктора, м; $\omega(t)$ – скорость вращения вала двигателя, рад/с.

Перемещение расходуемого электрода происходит с помощью цепи и противовеса, которые приводит в движение двигатель постоянного тока. Запишем уравнения двигателя постоянного тока [1, 2]:

$$L_{\text{я}} \dot{i}_{\text{я}} + r_{\text{я}} i_{\text{я}} = u_{\text{я}} - e_{\text{я}}; \quad (3)$$

$$e_{\text{я}} = k_e \omega; \quad (4)$$

$$u_{\text{я}} = L_{\text{я}} \dot{i}_{\text{я}} + r_{\text{я}} i_{\text{я}} + k_e \omega; \quad (5)$$

$$J \dot{\omega} = M + M_{\text{н}}, \quad (6)$$

где $e_{\text{я}}$ – противоэдс, создаваемое в якоре при вращении, В; J – приведенный к валу двигателя момент инерции механической системы (электрода, штока и груза), кг·м²; M – момент, создаваемый на валу двигателя, кг·м²/с²; k_e – конструктивная постоянная двигателя, В·с; $i_{\text{я}}$ – ток якоря двигателя, А; $r_{\text{я}}$ – сопротивление якоря двигателя, Ом; $L_{\text{я}}$ – индуктивность якоря, Гн; $u_{\text{я}}$ – напряжение якоря двигателя, В; $M_{\text{н}}$ – момент нагрузки, кг·м²/с².

Для формирования напряжения якорной цепи запишем следующие выражения [3]:

$$T_{\text{ф}} \dot{u}_{\text{ф}} + u_{\text{ф}} = K_{\text{рег}} \varepsilon; \quad (7)$$

$$\varepsilon = u_3 - u_{\text{п}}, \quad (8)$$

где u_3 – заданное напряжение дуговой печи, В; $K_{\text{рег}}$ – коэффициент регулятора; $u_{\text{п}}$ – напряжение печи, В; $u_{\text{ф}}$ – сглаженное значение напряжения, В; ε – разность между заданным и текущим напряжением, В; $T_{\text{ф}}$ – постоянная времени сглаживающего фильтра, с.

Проведя анализ работы ВДП [1, 2, 4, 5], был выявлен следующий недостаток: текущий регулятор накапливает статическую ошибку достаточно большой величины и не позволяет поддерживать межэлектродный промежуток на желаемом значении. График поддержания межэлектродного промежутка приведен на рис. 1.

Статическую ошибку может компенсировать ПИ-регулятор, но использование его или П-регулятора не позволяет поддерживать межэлектродный промежуток на желаемом уровне.

Поддерживать желаемый межэлектродный промежуток можно с помощью программного шага [3, 6 – 9]. Программный шаг – это этап программного управления, предназначенный для переплава одного участка аппроксимации расходоуемого электрода. Программный шаг позволяет скомпенсировать разницу между расхо-

дуемым электродом и наплавляемым слитком при условии неизменности межэлектродного промежутка в процессе переплава.

Программный шаг строится, исходя из формы одного участка аппроксимации, предполагаемой скорости переплава, геометрии печи и параметров механической передачи, но без учета обратных связей.

С другой стороны программный шаг – это задание нужного напряжения на двигатель на каждом участке аппроксимируемого электрода, чтобы скомпенсировать изменение напряжения печи и оставить межэлектродный промежуток неизменным или с минимальным изменением.

Структурная схема программного шага приведена на рис. 2.

Значение напряжения программного шага $U_{\text{прог}}(t)$ поступает на регулятор положения штока (РЕГ). Он выдает задающее напряжение $U_{\text{зпрог}}(t)$. Напряжение якоря $U_{\text{япрог}}(t)$ поступает с выпрямителя (В) на питание двигателя постоянного тока (ДПТ), на который действует меняющийся момент нагрузки $M_{\text{н}}(t)$. Вращение вала ДПТ передает скорость перемещения $v_{\text{неп}}(t)$ штока (Ш). Изменение положения штока изменяет сопротивление электрической дуги, а, следовательно, напряжение печи $U_{\text{п}}(t)$.

Программный шаг для идеального электрода в форме цилиндра будет иметь следующий вид.

Скорость переплава электрода $v_{\text{неп}}$ опишем в виде уравнения

$$v_{\text{неп}} = \dot{m}_{\text{сл}}(t). \quad (9)$$

Расстояние от электрода до слитка будем считать l , полагая r_3 константой:

$$l = S_0 + S(t) - \frac{m_{\text{сл}}(t)}{\pi r} \left(\frac{1}{R^2} - \frac{1}{r_3^2} \right), \quad r_3 = \text{const}. \quad (10)$$

Из уравнения (10) найдем путь, пройденный электродом S :

$$S(t) = l - S_0 + \frac{m_{\text{сл}}(t)}{\pi r} \left(\frac{1}{R^2} - \frac{1}{r_3^2} \right). \quad (11)$$

Тогда \dot{S} будет иметь следующий вид:

$$\dot{S} = \frac{v_{\text{неп}}}{\pi r} \left(\frac{1}{R^2} - \frac{1}{r_3^2} \right). \quad (12)$$

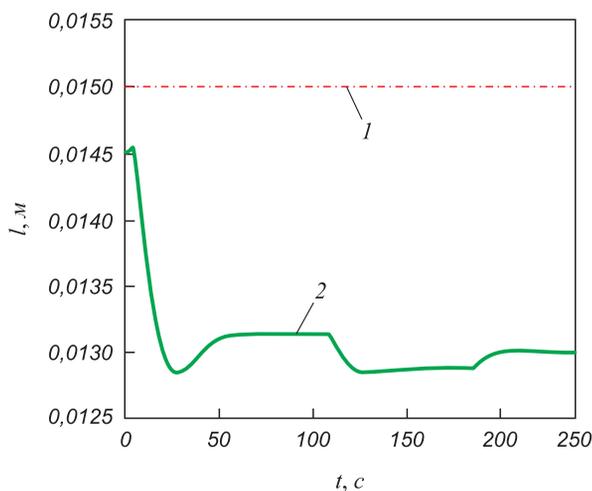


Рис. 1. График межэлектродного промежутка.

Здесь и далее к рис. 3, 4, 6, 8:

желаемое (1) и действительное (2) значения межэлектродного промежутка

Fig. 1. Plot of the electrode gap.

Hereinafter, in Fig. 3, 4, 6, 8: desired (1) and valid (2) value of the electrode gap

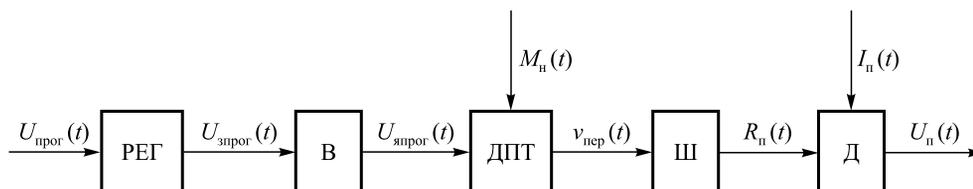


Рис. 2. Структурная схема программного шага

Fig. 2. Block diagram of the program step

Запишем в левую часть выражения (2) правую часть выражения (1) и выразим скорость вращения $\omega(t)$:

$$\omega(t) = \frac{v_{\text{пер}}}{K_p \pi \rho} \left(\frac{1}{R^2} - \frac{1}{r_3^2} \right). \quad (13)$$

В установившемся режиме производные будут равны нулю, тогда уравнения (3) – (6) примут вид:

$$0 = k_m i_{\text{я}} + M_{\text{н}}; \quad (14)$$

$$r_{\text{я}} i_{\text{я}} + k_e \omega = u_{\text{я}}. \quad (15)$$

Выразим $i_{\text{я}}$ из равенства (14):

$$i_{\text{япрог}} = -\frac{M_{\text{н}}}{k_m}, \quad (16)$$

где $i_{\text{япрог}}$ – ток якоря двигателя при программном шаге, А.

Подставим в равенство (15) скорость вращения из (13) и ток якоря программного шага из (16) и получим:

$$u_{\text{я}} = -\frac{r_{\text{я}} M_{\text{н}}}{k_m} + \frac{k_e v_{\text{пер}}}{K_p \pi \rho} \left(\frac{1}{R^2} - \frac{1}{r_3^2} \right). \quad (17)$$

С другой стороны напряжение, подаваемое на обмотки якоря выпрямителем в установившемся режиме, равно

$$u_{\text{я}} = k_{\text{в}} u_{\text{ф}}, \quad (18)$$

где $u_{\text{ф}}$ – фильтрованный сигнал задания напряжения с контроллера на выпрямитель двигателя постоянного тока, В.

Фильтрованный сигнал задания напряжения (7) в установившемся режиме будет иметь следующий вид:

$$u_{\text{ф}} = K_{\text{пер}} \varepsilon. \quad (19)$$

Выразим величину ошибки ε из (19) и (18):

$$\varepsilon = \frac{u_{\text{ф}}}{K_{\text{пер}}} = \frac{u_{\text{я}}}{K_{\text{пер}} k_{\text{в}}}. \quad (20)$$

Напряжение печи программного шага найдем из выражения (8) с учетом (17) и (20) и запишем в следующем виде:

$$u_{\text{ппрог}} = u_3 - \varepsilon = u_3 - \left(-\frac{\frac{r_{\text{я}} M_{\text{н}}}{k_m} + \frac{k_e v_{\text{пер}}}{K_p \pi \rho} \left(\frac{1}{R^2} - \frac{1}{r_3^2} \right)}{K_{\text{пер}} k_{\text{в}}} \right), \quad (21)$$

где $u_{\text{ппрог}}$ – напряжение печи согласно программному шагу, В.

Межэлектродный промежуток опишем следующим уравнением:

$$l(t) = l_0 + L_{\text{пн}} - L(t) - L_{\text{сл}}(t) + l_{\text{прим}}(t) + S(t), \quad (22)$$

где l_0 – длина межэлектродного промежутка в момент времени t_0 , м; $L_{\text{пн}} - L(t)$ – длина сплавившегося электрода от t_0 до текущего времени, м; $L(t)$ – длина электрода в текущий момент времени, м; $L_{\text{сл}}(t)$ – высота слитка в текущий момент времени, м; $l_{\text{прим}}(t)$ – длина, увеличивающая промежуток при испарении примесей, м; $S(t)$ – путь, пройденный штоком от t_0 до текущего момента времени, м.

Используя программный шаг в установившемся режиме, путь штока $S(t)$ должен компенсировать изменение длины электрода и слитка [10]:

$$L_{\text{пн}} - L(t) - L_{\text{сл}}(t) + l_{\text{прим}}(t) + S(t) = 0. \quad (23)$$

В установившемся режиме межэлектродный промежуток будет равен

$$l(t) = l_0, \quad (24)$$

а значит $u_3 = u_{\text{п}}$.

Рассчитаем программный проход для идеального электрода в форме усеченного конуса [4, 10 – 12].

Запишем выражение (10) в следующем виде:

$$l = S_0 + S(t) + (l_x - h_{\text{сл}}), \quad (25)$$

где $h_{\text{сл}}$ – высота слитка, м.

Длину расплавленной части электрода l_x для установившегося режима найдем из выражения

$$\frac{\Delta R^2}{l_3^2} l_x^3 + 3 \frac{R_2 \Delta R}{l_3} l_x^2 + 3 R_2^2 l_x - \frac{3}{\pi} v_{\text{пер}} \frac{t_{\text{пл}}}{\rho} = 0. \quad (26)$$

Высота слитка находится из уравнения

$$h_{\text{сл}} = \frac{v_{\text{пер}} t_{\text{пл}}}{R^2 \pi}. \quad (27)$$

Следовательно, для электрода конической формы

$$l(t) = S_0 + S(t) + (l_x(t) - h_{\text{сл}}(t)). \quad (28)$$

Решая уравнение (28), находим межэлектродный промежуток согласно программному шагу [13 – 15].

График поддержания межэлектродного промежутка с помощью программного шага для цилиндрического электрода приведен на рис. 3. График межэлектродного промежутка поддерживается равным 0,01525 м при желаемом промежутке $0,015 \pm 0,00075$ м.

График поддержания межэлектродного промежутка с помощью программного шага для электрода формы усеченного конуса приведен на рис. 4, из которого видно, что длина межэлектродного промежутка поддержи-

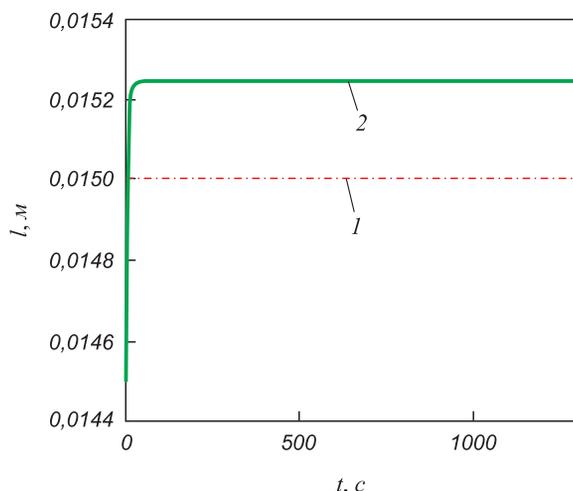


Рис. 3. График межэлектродного промежутка (программный шаг, цилиндрический электрод)

Fig. 3. Plot of the electrode gap (program step, a cylindrical electrode)

вается в заданных пределах 0,0158 мм при управлении по программному шагу.

Рассмотрим программный шаг для неидеального (реального) электрода:

$$S(t) = \frac{v_{\text{пер}}(t)}{\pi} \left(\frac{1}{\rho_1 R^2} - \frac{1}{\rho_2 r_3^2} \right) t + l_{\text{прим}}(t), \quad (29)$$

где ρ_1 – плотность слитка, кг/м³; ρ_2 – плотность электрода, кг/м³.

Действительная скорость переплава

$$v_{\text{пер}}(t) = v^* + \Delta v(t), \quad (30)$$

где v^* – заданная скорость переплава электрода, которую задают технологи, кг/мин; $\Delta v(t)$ – неизвестное отклонение скорости переплава, которое будем уточнять, кг/мин.

Полагаем:

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho. \quad (31)$$

Пренебрегаем $l_{\text{прим}}(t)$:

$$S(t) = \frac{v_{\text{пер}}(t)}{\pi \rho} \left(\frac{1}{R^2} - \frac{1}{r_3^2} \right) t. \quad (32)$$

Подставим уравнение (30) в (32):

$$S(t) = \frac{v^*}{\pi \rho} \left(\frac{1}{R^2} - \frac{1}{r_3^2} \right) t + \frac{\Delta v(t)}{\pi \rho} \left(\frac{1}{R^2} - \frac{1}{r_3^2} \right) t. \quad (33)$$

Представим:

$$S^*(t) = \frac{v^*}{\pi \rho} \left(\frac{1}{R^2} - \frac{1}{r_3^2} \right) t; \quad (34)$$

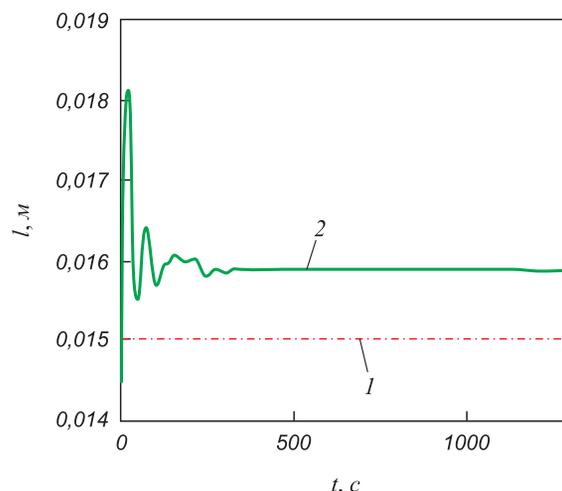


Рис. 4. График межэлектродного промежутка (программный шаг, электрод в форме усеченного конуса)

Fig. 4. Plot of the electrode gap (program step, an electrode in the form of a truncated cone)

$$\Delta S(t) = \frac{\Delta v(t)}{\pi \rho} \left(\frac{1}{R^2} - \frac{1}{r_3^2} \right) t. \quad (35)$$

Получаем:

$$S(t) = S^*(t) + \Delta S(t), \quad (36)$$

где $S^*(t)$ – рассчитанное значение положения электрода, м; $\Delta S(t)$ – изменение положения электрода, зависящее от неизвестного отклонения скорости переплава $\Delta v(t)$, м.

Текущий радиус неидеального электрода находится путем аппроксимации электрода на сумму цилиндров, из которых состоит электрод.

График желаемого и действительного напряжения печи по программному шагу с экспериментальными данными приведен на рис. 5.

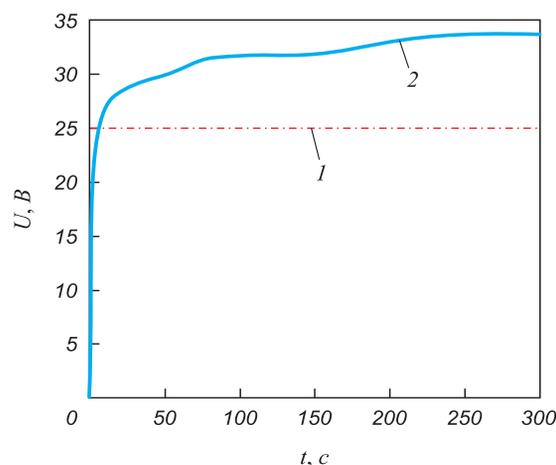


Рис. 5. График желаемого (1) и действительного (2) напряжения печи (реальный электрод)

Fig. 5. Plot of the desired (1) and actual (2) voltage furnace (real electrode)

График поддержания межэлектродного промежутка по программному шагу с экспериментальными данными приведен на рис. 6.

Из рис. 5, 6 видно, что управление по программному шагу без обратных связей на реальном электроде не справляется с поставленными задачами в поддержании напряжения печи и межэлектродного промежутка.

При добавлении к программному шагу обратной связи по напряжению (двухкомпонентное управление) получаем следующие графики:

- текущего и желаемого напряжения ВДП с программным шагом и обратной связью по напряжению (рис. 7);
- длины межэлектродного промежутка исследуемой ВДП с программным шагом и обратной связью по напряжению (рис. 8).

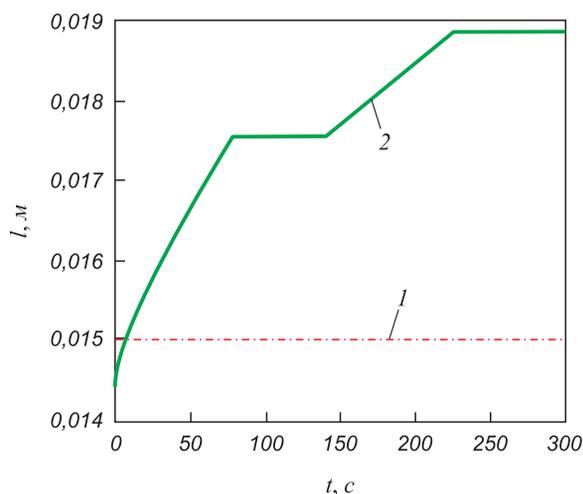


Рис. 6. График межэлектродного промежутка (реальный электрод)

Fig. 6. Plot of the electrode gap (real electrode)

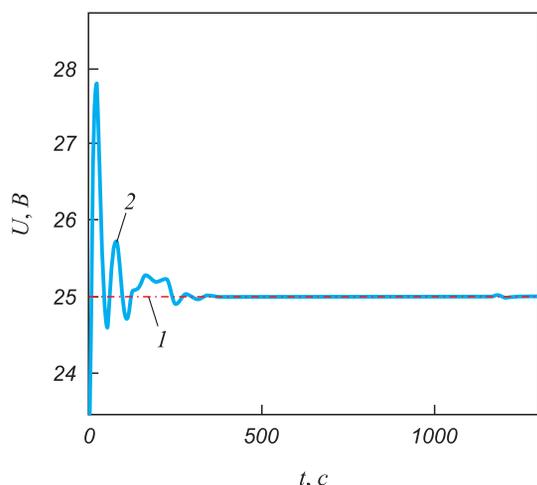


Рис. 7. График желаемого (1) и действительного (2) напряжения печи для реального электрода (программный шаг и обратная связь по напряжению)

Fig. 7. Plot of the desired (1) and actual (2) voltage of the furnace for the real electrode (program step and voltage feedback)

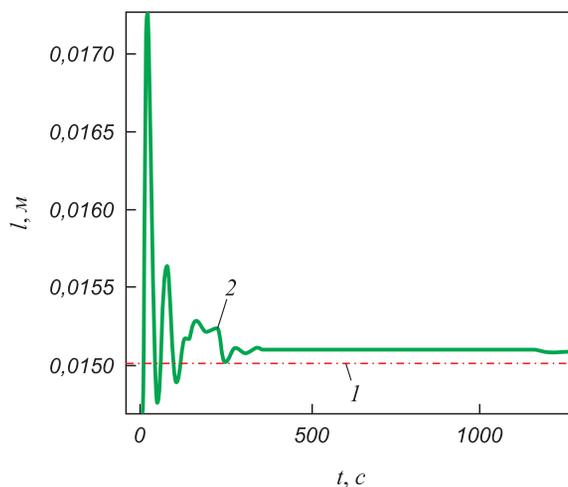


Рис. 8. График межэлектродного промежутка для реального электрода (программный шаг и обратная связь по напряжению)

Fig. 8. Plot of the electrode gap for the real electrode (program step and voltage feedback)

Программный шаг и обратная связь по напряжению устанавливают длину межэлектродного промежутка для электрода произвольной формы примерно равной 0,01515 м в соответствии с рис. 8, что удовлетворяет заданной длине межэлектродного промежутка $0,015 \pm 0,00075$ м. Напряжение печи становится равным 25 В.

Использование программного шага с обратной связью по напряжению (двухкомпонентное управление) позволяет добиться минимальных отклонений в напряжении печи и в длине межэлектродного промежутка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Положенцев К.А., Ливаткин П.А., Александров А.Г. Построение модели процесса управления напряжением вакуумной дуговой печи. Сообщение 1 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. № 3. С. 203 – 206.
2. Положенцев К.А., Ливаткин П.А., Александров А.Г. Построение модели процесса управления напряжением вакуумной дуговой печи. Сообщение 2 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. № 6. С. 444 – 447.
3. Михайлов О.П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов. – М.: Машиностроение, 1990. – 304 с.
4. Щербань И.В., Иванов С.В. Методика синтеза кусочно-программного управления маневром уклонения с учетом терминальных ограничений // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2009. № 5. С. 30 – 33.
5. Угрюмов С.А., Боровский А.Б. Реализация программного управления на базе персонального компьютера // Изв. Южного федерального университета. Технические науки. 2005. Т. 45. № 1. С. 146 – 148.
6. Сидорчик Е.В. Повышение производительности работы станков с числовым программным управлением и точности обработки деталей // Интернет-журнал Науковедение. 2013. № 4(17). С. 1 – 5.
7. Matthieu Revil-Baudard, Alain Jardy, Hervé Combeau etc. Solidification of a vacuum arc-remelted zirconium ingot // Metallurgical and Materials Transactions B. 2014. Vol. 45. Issue 1. С. 51 – 57.

8. Pierre L. Fauchais, Joachim V. R. Heberlein, Maher I. Boulos. Process Integration // *Thermal Spray Fundamentals*. Springer. 2013. С. 1351 – 1400.
9. Boronenkov V., Zinigrad M., Leontiev L. etc. Modeling and simulation of welding surfacing and coating processes // *Engineering materials*. Vol. 18. Phase Interaction in the metal – oxide melts – gas – system. 2011. P. 265 – 322.
10. Махитко В.П., Сироткина И.Б. Адаптация в интегрированные информационно-коммуникационные системы технологического оборудования с числовым программным управлением // *Изв. Самарского научного центра РАН*. 2010. № 4 – 2. Т. 12. С. 411 – 418.
11. Сосуров Г.О., Чернышов Е.А. Оптимизация режимов выдержки слитков из жаропрочных сплавов в вакуумно-дуговой печи на базе предприятия ОАО «РУСПОЛИМЕТ» // *Успехи современного естествознания*. 2012. № 6. С. 54.
12. Zhi-jun Yang, Hong-chao Kou, Xiao-hua Zhao etc. Effect of remelting current on molten pool profile of titanium alloy ingot during vacuum arc remelting process // *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*. 2011. Vol. 16. Issue 2. С. 133 – 136.
13. Белинская Ю.С., Четвериков В.Н., Ткачев С.Б. Автоматический синтез программного движения вертолета вдоль горизонтальной прямой // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2013. № 10. С. 285 – 298.
14. Нагучев Д.Ш., Сахаров В.Л., Старченко И.Б. Программное управление параметрическим гидролокатором // *Изв. Южного федерального университета. Технические науки*. 2013. № 6(143). С. 127 – 132.
15. Кабулова Е.Г. Анализ процессов моделирования и принятия решений в системах металлургического производства // *Естественные и технические науки*. 2015. № 4(82). С. 192 – 194.

Поступила 7 мая 2015 г.

IZVESTIYA VUZov. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. No. 1, pp. 29–34.

OPERATION WITH PROGRAM STEP FOR VACUUM ARC FURNACE

P.A. Livatkin, Master of Shop Repairing, Postgraduate of V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences
(PAL2010@yandex.ru)

K.A. Polozhentsev, Leading Master of Shop Repairing, Postgraduate of STI MISiS (kirill.polozhentsev@gmail.com)

JSC “Metallurgical Plant “Electrostral” (1 Zheleznodorozhnaya str., Elektrostral, Moscow Region, 144002, Russia)

Abstract. The article describes the method of control of VAR furnace by program step. The papers [1, 2] describe the model of voltage control for VAR furnace. However, furnace controller generates huge static error, and using program step can solve this problem. The program step calculates movement of consumable electrode with constant melt rate and electrode gap in right parameters. The control with program step helps to remelt ideal consumable electrodes without feedbacks in VAR furnace. Situation changes when we try to remelt a nonideal consumable electrode using only program step because it is very difficult to get right parameters. This problem can be solved by using the voltage feedback with program step. The authors have got the models of ideal and nonideal consumable electrodes in conditions of Matlab.

Keywords: vacuum arc furnace, ideal consumable electrode, remelting speed, electrode gap, program step, nonideal consumable electrode, furnace voltage, feedback voltage, static error.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-1-29-34

REFERENCES

1. Polozhentsev K.A., Livatkin P.A., Aleksandrov A.G. Creating a model of voltage control in vacuum arc furnace. Report 1. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, no. 3, pp. 203–206. (In Russ.).
2. Polozhentsev K.A., Livatkin P.A., Aleksandrov A.G. Creating a model of voltage control in vacuum arc furnace. Report 2. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, no. 6, pp. 444–447. (In Russ.).
3. Mikhailov O.P. *Avtomatizirovannyi elektroprivod stankov i promyshlennykh robotov* [Automated electric drive of machines and industrial robots]. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 304 p. (In Russ.).
4. Shcherban' I.V., Ivanov S.V. Methods of synthesis of piecewise program management of evasive action, taking into account the terminal limitations. *T-Comm – Telekommunikatsii i Transport*. 2009, no. 5, pp. 30–33. (In Russ.).
5. Ugryumov S.A., Borovskii A.B. Implementation of the software-based control of a personal computer. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2005, no. 1, vol. 45, pp. 146–148. (In Russ.).
6. Sidorchik E.V. Increasing the productivity of machine tools with CNC and accuracy of parts machining. *Internet-zhurnal Naukovedenie*. 2013, no. 4 (17), pp. 1–5. (In Russ.).
7. Matthieu Revil-Baudard, Alain Jardy, Hervé Combeau, Faustine Leclerc, Véronique Rebeyrolle Solidification of a Vacuum Arc-Remelted Zirconium Ingot. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2014, vol. 45, Issue 1, pp. 51–57.
8. Pierre L. Fauchais, Joachim V. R. Heberlein, Maher I. Boulos Process Integration. *Thermal Spray Fundamentals*. Springer. 2013, pp. 1351–1400.
9. Vladislav Boronenkov, Michael Zinigrad, Leopold Leontiev, Edward Pastukhov, Mikhail Shalimov, Sergey Shanchurov. Modeling and Simulation of Welding, Surfacing and Coating Processes. *Engineering Materials, vol. 18. Phase Interaction in the Metal – Oxide Melts – Gas – System*. 2011, vol. 18 of the, pp. 265–322.
10. Makhit'ko V.P., Sirotkina I.B. Adapting to integrated information and communication systems of manufacturing equipment with CNC. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2010, no. 4-2, vol. 12, pp. 411–418. (In Russ.).
11. Sosurov G.O., Chernyshov E.A. Optimization of exposure ingots of high-temperature alloys in vacuum arc furnace of “Ruspolimet”. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2012, no. 6, p. 54. (In Russ.).
12. Zhi-jun Yang, Hong-chao Kou, Xiao-hua Zhao, Jin-shan Li, Rui Hu, Hui Chang, Lian Zhou Effect of remelting current on molten pool profile of titanium alloy ingot during vacuum arc remelting process. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*. 2011, vol. 16, Issue 2, pp. 133–136.
13. Belinskaya Yu.S., Chetverikov V.N., Tkachev S.B. Automatic synthesis of programmed motion of the helicopter along the horizontal line. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Bauman*. 2013, no. 10, pp. 285–298. (In Russ.).
14. Naguchev D.Sh., Sakharov V.L., Starchenko I.B. Program management of parametric sonar. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2013, no. 6 (143), pp. 127–132. (In Russ.).
15. Kabulova E.G. Analysis of the processes of modeling and decision-making systems in metallurgical production. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2015, no. 4 (82), pp. 192–194. (In Russ.).

Received May 07, 2015