

УДК 621.314

## ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ ВАКУУМНОЙ ДУГОВОЙ ПЕЧИ. СООБЩЕНИЕ 2

*Александров А.Г.<sup>1</sup>, д.ф.-м.н., профессор, ведущий научный сотрудник (alex7@ipu.ru)*

*Ливаткин П.А.<sup>1,2</sup>, мастер по ремонту цеха КИПиА, аспирант*

*Положенцев К.А.<sup>2</sup>, старший мастер по ремонту цеха КИПиА, аспирант СТИ НИТУ «МИСиС»*

<sup>1</sup> Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук

(117997, Россия, Москва, Профсоюзная ул., 65)

<sup>2</sup> ОАО «Металлургический завод «Электросталь»

(144002, Россия, Московская обл., Электросталь, ул. Железнодорожная, 1)

**Аннотация.** Выполнено экспериментальное исследование по управлению напряжением для вакуумной дуговой печи ДВС-3.2-Г1 в условиях металлургического завода «Электросталь». Используя коэффициенты, полученные в ходе эксперимента, проведено моделирование разработанной модели управления напряжением для вакуумной дуговой печи. Представлены результаты моделирования напряжения печи с капельными замыканиями для пятого часа переплава. Установлена близость разработанной модели управления с реальным объектом. Проведено сравнение с другими исследованиями по управлению напряжением для вакуумных дуговых печей. Сделано заключение, что разработанную модель в дальнейшем можно использовать для построения системы регулирования вакуумной дуговой пещью.

**Ключевые слова:** вакуумная дуговая печь, математическая модель, экспериментальное моделирование, процесс переплава, ПИД-регулятор, программа переплава (рецепт), сравнительный анализ.

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-6-444-447

Экспериментальные испытания разработанной модели управления напряжением проводились на вакуумной дуговой печи ДВС-3.2-Г1 металлургического завода «Электросталь».

Параметры, при которых осуществлялся эксперимент: диаметр кристаллизатора 320 мм, диаметр переплавляемого электрода 250 мм, марка стали переплавляемого электрода ПШРЗ ЭП718, ток плавления 3,8 кА, напряжение печи 26,4 В. В качестве регулятора на печи использовался ПИД-регулятор фирмы Siemens (CONT\_C) [1] с отключенными интегральной и дифференциальной составляющими.

Напряжение печи, которое поступало на вход аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) контроллера Siemens [2] (разрядность АЦП 14 бит, частота опроса входа 0,052 мс), снималось с шунтов согласно электрическим схемам подключения источника питания (выпрямитель Estel Electro AS ВД-0,5М). После сравнения полученного сигнала с заданным, контроллер посылал сигнал управления на цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) с разрядностью 12 бит и частотой передачи сигнала 0,8 мс. С контроллера сигнал передавался на привод Sprint Electric 340XRi, который управлял двигателем постоянного тока П-12 [3, 4], перемещающим шток с расходуемым электродом. Работа печи происходила по программе (рецепту), представленной на рис. 1.

После вакуумирования возбуждалась электрическая дуга между поддоном кристаллизатора и нижним торцом электрода и устанавливался дуговой зазор 20 мм. Далее в течение 5 мин производился прогрев расходуемого электрода при токе 2,5 кА, затем в течение 6 мин происходило повышение тока до 5 кА и наведение «жидкой» ванны. После наведения «жидкой»



Рис. 1. Программа переплава (рецепт) для сплава ПШРЗ ЭП718

Fig. 1. Melting receipt for the alloy EP718

ванны выходили на рабочий режим переплава при токе 3,8 кА [5, 6].

Полученные экспериментальным путем значения напряжения приведены на рис. 2 (0 по оси абсцисс соответствует пятому часу переплава).

Для решения уравнений (2) – (12), приведенных в работе [7], была использована функция ode23 программы Matlab.

Численные значения коэффициентов уравнений (2) – (12) [7] приведены ниже: интервал времени усреднения ошибки,  $T = 6$  с; ток печи,  $I_{\text{п}} = 3800$  А; сопротивление 1 мм промежутка дуги,  $R_{\text{мм}} = 0,301$  Ом/мм; сопротивление якоря двигателя,  $r_{\text{я}} = 10,61$  Ом; сопротивление 1 мм капли,  $R_{\text{к}} = 0,111$  Ом/мм; сопротивление электрода и слитка,  $R_{\text{эл}} = 0,00108$  Ом; плотность электрода,  $\rho = 7874$  кг/м<sup>3</sup>; радиус слитка,  $R = 0,16$  м; радиус электрода,  $r_{\text{э}} = 0,125$  м; коэффициент передачи редуктора,  $K_{\text{р}} = 2,47 \cdot 10^{-6}$  м; момент нагрузки,  $M_{\text{н}} = 0,00691$  кг·м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>; приведенный к валу двигателя момент инерции механической системы (электрода, штока и груза),  $J = 0,00106$  кг·м<sup>2</sup>; индуктивность якоря,  $L_{\text{я}} = 0,19$  Гн; сопротивление якоря двигателя,  $r_{\text{я}} = 10,61$  Ом; конструктивная постоянная двигателя,  $k_{\text{б}} = 20$ ; конструктивная постоянная двигателя,  $k_{\text{м}} = 1,4$  (кг·м<sup>2</sup>)/(с<sup>2</sup>·А); конструктивная постоянная двигателя,  $k_{\text{е}} = 1,4$  В·с; постоянная времени выпрямителя,  $T_{\text{в}} = 0,2$  с; постоянная времени сглаживающего фильтра,  $T_{\text{ф}} = 6$  с; массы штока, груза и электрода соответственно,  $m_{\text{ш}} = 440$  кг,  $m_{\text{г}} = 370$  кг,  $m_{\text{э}} = 1040$  кг; скорость роста капли,  $v_1 = 0,03$  м/с;  $v_2 = 0,03$  м/с;  $v_4 = 0,06$  м/с; максимальная длина капли,  $l_{\text{к1}} = 0,009$  м; длина капли,  $h_{\text{к}} = 0,0074$  м; коэффициент регулятора,  $|\varepsilon| \geq 0,4$ ,  $K_{\text{рег}} = 12$ ,  $|\varepsilon| < 0,4$ ,  $K_{\text{рег}} = 80$ ; сглаженное значение напряжения,  $u_{\text{ф}} > 10$ ,  $u_{\text{ф}} = 10$ ;  $u_{\text{ф}} < -10$ ,  $u_{\text{ф}} = -10$ .

$$J = J_{\text{вала}} + J_{\text{н}}, \quad (1)$$

где  $J_{\text{вала}}$  – момент инерции вала двигателя,  $J_{\text{вала}} = 0,00106$  кг·м<sup>2</sup>;

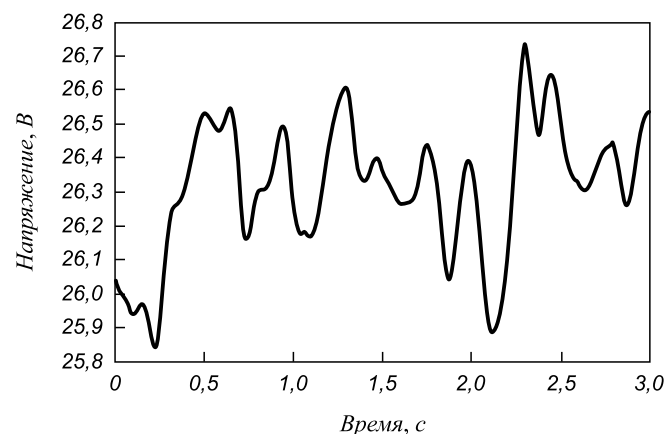


Рис. 2. Экспериментальное значение напряжения, снятое с печи

Fig. 2. Experimental voltage captured from the furnace

$$J_{\text{н}} = (m_{\text{ш}} + m_{\text{г}} + m_{\text{э}})K_{\text{р}}^2, \quad (2)$$

где  $J_{\text{н}}$  – момент инерции нагрузки,  $J_{\text{н}} = 1,13 \cdot 10^{-8}$  кг·м<sup>2</sup>;

$$F_{\text{мш}} = m_{\text{ш}}g; F_{\text{мг}} = m_{\text{г}}g; F_{\text{мэ}} = m_{\text{э}}g, \quad (3)$$

где  $F_{\text{мш}}$ ,  $F_{\text{мг}}$ ,  $F_{\text{мэ}}$  – сила тяжести штока, груза и электрода соответственно, кг·м/с<sup>2</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, 9,81 м/с<sup>2</sup>;

$$M_{\text{н}} = (F_{\text{мш}} - F_{\text{мг}} + F_{\text{мэ}})K_{\text{р}}; \quad (4)$$

$$\delta_1 = \frac{l_{\text{к1}}}{v_1}, \quad (5)$$

где  $\delta_1$  – первый момент времени,  $\delta_1 = 0,3$  с;

$$\delta_2 = \frac{l_{\text{к1}} - h_{\text{к}}}{v_2}, \quad (6)$$

где  $\delta_2$  – второй момент времени,  $\delta_2 = 0,053$  с;

$$\delta_3 = 2\sqrt{\frac{2(l_{\text{р-1}} - l_{\text{к1}})}{g}}; \quad (7)$$

$$\delta_4 = \frac{h_{\text{к}}}{v_4}, \quad (8)$$

где  $\delta_4$  – четвертый момент времени,  $\delta_4 = 0,123$  с.

Результаты моделирования напряжения печи представлены на рис. 3 (0 по оси абсцисс соответствует пятому часу переплава).

Сравнивая полученные результаты моделирования (рис. 3) с реальными показаниями напряжения процесса вакуумного дугового переплава (см. рис. 2) видно, что картина наличия капельных замыканий примерно сопоставима. Принимая это во внимание, можно считать, что модель удовлетворяет реальным показателям и параметрам исследуемой печи.

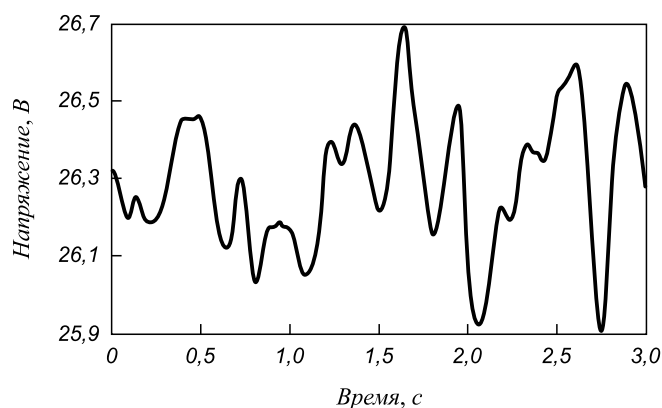


Рис. 3. Моделирование напряжения печи с капельными замыканиями

Fig. 3. Modeling of the furnace voltage with drip closures

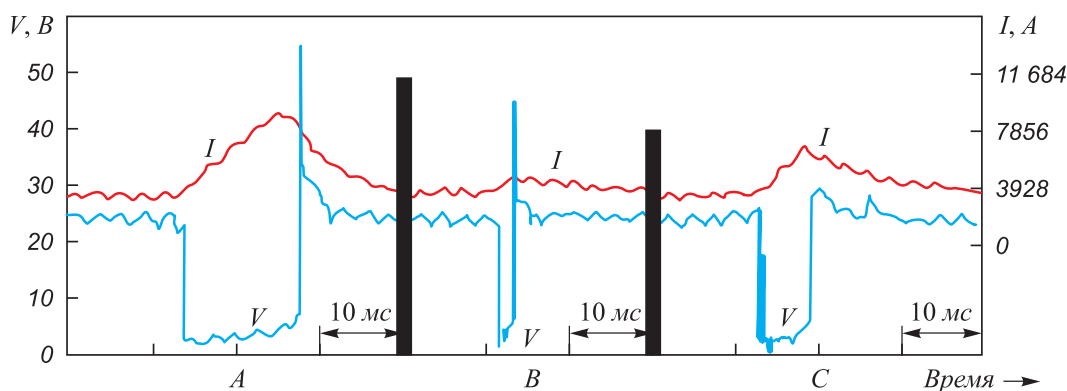


Рис. 4. Поведение напряжения и тока согласно работе [8]

Fig. 4. Diagram of voltage and current in accordance with the article [8]

Для большей схожести промоделируем модель управления напряжения [7] еще раз, используя полученные экспериментальные данные в ходе переплава сплава ПШРЗ ЭП718.

В работе [8] приведены графики, показывающие поведение сопротивления, напряжения и тока внутри вакуумной дуговой печи в момент образования, падения и слияния капли со слитком (рис. 4). Графики сопротивления и напряжения соответствуют друг другу.

Сравнивая показатели, полученные экспериментальным методом, с данными работы [8] видно, что снятые с печи ДВС-3,2-Г1 значения тока, напряжения и сопротивления с заданными интервалами соответствуют интервалам, показанным на рис. 4. Следует заметить, что данные, приведенные в работе [8], не позволяют определить диаметр кристаллизатора, а так же конструкцию самой печи и участок, на котором происходит переплав.

**Выводы.** Проведено экспериментальное исследование, осуществленное на вакуумной дуговой печи ДВС-3.2-Г1 металлургического завода «Электросталь». Результаты моделирования процесса управления напряжением вакуумной дуговой печи на основании уравнений (2) – (12) [7] и результаты эксперимента сопоставимы.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. SIEMENS SIEMATIC. Системное ПО для систем S7-300/400 и стандартные функции: Руководство. Том 2/2. A5E00739858-01, 27-1 – 27-30 с.
2. Лапшин И.В. Автоматизация дуговых печей. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 165 с.
3. Михайлов О.П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов. – М.: Машиностроение, 1990. – 304 с.
4. Ташкинов А.Ю. Разработка математических моделей и алгоритмов и их применение для исследования и усовершенствования процессов вакуумного дугового переплава: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2003. – 21 с.
5. Нехамин И.С. Разработка системы управления дуговой печью постоянного тока: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2009. – 20 с.
6. Фомин А.В. Построение имитационной модели дуговой сталеплавильной печи // Изв. тульского госуд. университета. Техн. науки. 2009. № 3. С. 315 – 321.
7. 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.
8. Zanner F.J., Williamson R.L., Harrison R.P. etc. Superalloy 718 – Metallurgy and Applications / Edited by Loria E.A. The Minerals, Metals & Materials Society, 1989. P. 17 – 32.

Поступила 6 ноября 2014 г.

## CREATING A MODEL OF VOLTAGE CONTROL IN VACUUM ARC FURNACE. REPORT 2

**Aleksandrov A.G.**<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor, Leading Researcher (alex7@ipu.ru)

**Livatkin P.A.**<sup>1,2</sup>, Master of Shop Repairing, Postgraduate of V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences

**Polozhentsev K.A.**<sup>2</sup>, Leading Master of Shop Repairing, Postgraduate of STI MISiS

<sup>1</sup> V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences (65, Profsoyuznaya str., Moscow, 117997, Russia)

<sup>2</sup> JSC “Metallurgical Plant” Electrostal” (1, Zheleznodorozhnaya str., Elektrostal, Moscow Region, 144002, Russia)

**Abstract.** The experimental studies of voltage control were performed on the vacuum arc furnace DVS-3.2-G1 of JSC “Metallurgical Plant” Electrostal”. Using the obtained coefficients the simulation model of voltage control was developed for the vacuum arc furnace. The simulation results of furnace voltage with a drip closures for 5th hour remelting are considered. The authors established the closeness of developed management model with the real object. The article describes the comparison with other studies on stress management for vacuum arc furnaces. It was concluded that the developed model can then be used as a model for the construction of the control system of the vacuum arc furnace.

**Keywords:** vacuum arc furnace, mathematical model, experimental modeling, remelting process, PID-controller, remelting program (recipe), comparative analysis.

**DOI:** 10.15825/0368-0797-2015-6-444-447

#### REFERENCES

1. SIEMENS SIEMATIC. *Sistemnoe PO dlya sistem S7-300/400 i standartnye funktsii: Rukovodstvo* [System software for systems S7-300 / 400 and standard functions: Manual]. Vol. 2/2. A5E00739858-01, pp. 27-1 – 27-30. (In Russ.).
2. Lapshin I.V. *Avtomatizatsiya dugovykh pechei* [Automation of arc furnaces]. Moscow: Izdatel'stvo MGU, 2004, 165 p. (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. Tashkinov A.Yu. *Razrabotka matematicheskikh modelei i algoritmov i ikh primeneniye dlya issledovaniya i usovershenstvovaniya protsessov vakuumnogo dugovogo pereplava: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of mathematical models and algorithms and their application to research and process improvement of vacuum arc remelting. Cand. Tech. Sci. diss.]. Ekaterinburg, 2003. 21 p. (In Russ.).
5. Nekhamin I.S. *Razrabotka sistemy upravleniya dugovoi pech'yu postoyannogo toka: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of control system of the arc furnace DC. Cand. Tech. Sci. diss.]. Moscow: 2009. 20 p. (In Russ.).
6. Fomin A.V. Creating a simulation model of the electric arc furnace. *Izvestiya tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2009, no. 3, pp. 315–321. (In Russ.).
7. 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.).
8. Zanner F.J., Williamson R.L., Harrison R.P., Flanders H.D., Thompson R.D. and Szeto W.C. *Superalloy 718-Metallurgy and Applications* Edited by Loria E.A., The Minerals, Metals & Materials Society, 1989, pp. 17–32. (In Russ.).

Received November 6, 2014