

УДК 681.5

doi:10.20998/2413-4295.2018.26.19

## МОДАЛЬНИЙ РЕГУЛЯТОР ПРИВОДА ПЕРЕМІЩЕННЯ ЕЛЕКТРОДА ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ

**Р. М. ХРЕСТІН\***

електротехнічне відділення, Нікопольський технікум Національної металургійної академії України, Нікополь, УКРАЇНА  
\* e-mail: [uznalvas@ukr.net](mailto:uznalvas@ukr.net)

**АНОТАЦІЯ** В роботі розглянуто питання керування дуговою сталеплавильною печі. Розрахунки проводяться на основі лінеаризованої математичної моделі системи печі. Складено матричну форму представлені моделі в змінних стану. Порівняння результатів матричних обчислень з біноміальним розподілом Ньютона дозволило розробити структуру керуючого модального регулятора. Проведено порівняне моделювання дій систем дугової сталеплавильної печі, що керуються класичним та модальним регуляторами. Порівняння показало, що використання розробленого модального регулятора дозволяє мінімізувати величину перерегулювання та тривалість перехідного процесу при випадкових зрушеннях режиму плавки.

**Ключові слова:** дугова сталеплавильна піч; об'єкт управління; математична модель; розподіл Ньютона; модальний регулятор.

## MODAL REGULATOR OF DRIVE MOVING ELECTRODE OF THE ARC FURNACE

**R. KHRESTIN\***

Electrical department, Nikopol College of National Metallurgical Academy of Ukraine, Nikopol, UKRAINE

**ABSTRACT** In this article the questions of management of the arc-furnace (EAF) are considered. The aim is to construction of automatic furnace regulator. The basis for constructing such a regulator is the mathematical model of the control object – EAF. Experience shows that the use of classical automatic regulators does not provide sufficient quality control of the EAF modes. It is proposed to use a modal regulator. The procedure for calculating the parameters of a modal regulator for a particleboard system is given. The basis for the calculation is a linearized mathematical model of the EAF system. Basic calculations are performed using standard software. Based on the linearized model of the chipboard, a matrix form of the model is constructed in the state of the variables. Using the matrix calculations we obtain the characteristic equation of a closed system of EAF. Comparing the obtained expression with the standard binomial distribution of Newton we calculate the coefficients of the modal regulator for EAF. In steady state, the current of the arc should be equal to the given value, and all increments of variables should be equal to zero. From these conditions we calculate the last coefficient of the modal controller from the system of equations, which is represented in the matrix form. The proposed procedure for calculating the modal regulator for EAF system is relatively simple. It does not require significant computational resources, even in the case of such a complex control object as the EAF. A comparative modeling of the control system of the EAF with the synthesized modal and classical regulators was carried out. The simulation results indicate a shorter duration of transients and a low level of overregulation of the drive for moving the electrodes of the chipboard. The use of the developed modal regulator should provide an opportunity for better control of the main processes of chipboard. In addition, such a control system avoids the share of emergency situations that occur when the charge is melting.

**Keywords:** electric arc furnace; object of management; mathematical model; Newton's distribution; modal regulator.

### Вступ

На даний час теорія автоматичного управління пропонує велику кількість підходів до побудови систем керування промисловим технологічним устаткуванням. При цьому в умовах реального виробництва найширше

продовжують використовуватись системи керування, засновані на класичних ПД-регуляторах. Цей підхід реалізований, зокрема, в системах управління дугових сталеплавильних печей (ДСП). При цьому, з огляду на особливості режимів плавки у ДСП, доводиться відзначати велику кількість аварійних та

попередніх аварійних ситуацій, в яких згадані системи керування неспроможні виключити аварійний стан ДСП або звести до мінімуму його наслідки. Ці недоліки є наслідком недостатньо швидкого, точного та стійкого реагування згаданих класичних регуляторів на відхилення від завданого режиму дії ДСП. З огляду на викладене, постає питання побудови автоматичних регуляторів, які забезпечують оптимізацію роботи приводів переміщення електродів ДСП.

### Мета роботи

Таким чином, метою роботи є розробка якісного регулятора, об'єктом керування якого є ДСП. Основою для побудови такого регулятора є математична модель об'єкта керування – ДСП.

### Виклад основного матеріалу

Розплавлення шихти в ході плавильного процесу відбувається поступово: починаючи від твердого стану всієї шихти і закінчуючи повним перетворенням її у рідкий розплав. Перш за все шихта розплавляється безпосередньо під електродом, при цьому остання шихта ще лишається твердою. В утворені «колодязі» електроди опускаються під дією системи керування привода переміщення електродів. Для регуляторів печі цей етап плавки є найбільш відповідальним: неоднорідність твердих ділянок шихти, наявність в них порожнин викликають різкі коливання довжини (а отже й струму) дуги або навіть її переривання. На цьому етапі регулятор повинен швидко реагувати на відхилення параметрів електричних, теплових та механічних процесів системи ДСП відновленням та стійким підтриманням цих параметрів.

Недоліком існуючих систем керування ДСП є те, що вони або не враховують деяких особливостей процесів, важливих з точки зору керування системою ДСП, або засновані на регуляторах, що за своєю структурою не можуть забезпечити достатню якість керування. У роботах [1-11] проведено порівняльний аналіз використання автоматичних регуляторів різних типів, методик їх розрахунків та побудови. Виходячи з цього аналізу найбільш прийнятним видається застосування в системі ДСП модального регулятора.

Використовуючи порівняно простий метод модального керування, отримуємо можливість побудови порівняно простого та ефективного регулятора. На відміну від класичного ПІД-регулятора, побудова модального регулятора

передбачає знання мод, тобто базується на знанні реального об'єкта керування, його математичної моделі. Лінійна модель системи ДСП, що представлена в попередній роботі [12], складається з 13 основних рівнянь.

На основі цієї моделі виявляється можливим скласти матричну форму моделі в змінних стану:

$$\begin{cases} \dot{x} = A \cdot x + B \cdot u \\ y = C \cdot x \end{cases} \quad (1)$$

У системі (1) матриця  $[x]$  є матрицею похідних змінних стану, матриця  $[A]$  включає до свого складу коефіцієнти при змінних стану, матриця  $[x]$  є матрицею змінних стану, матриця  $[B]$  складається з коефіцієнтів при змінних керування, матриця  $[u]$  є матрицею змінних керування, матриця  $[y]$  є матрицею вихідних змінних, матриця  $[C]$  є матрицею коефіцієнтів при вхідних змінних.

За допомогою матричних обчислень отримуємо характеристичне рівняння замкнутої системи. Зважаючи на незначні величини коефіцієнтів при окремих складових рівняння має вигляд:

$$\begin{aligned} |s \cdot I - A| = & s^{13} + s^{12} \cdot (a_{12} + b_{12} \cdot kk_1) + s^{11} \cdot (a_{11} + b_{11} \cdot kk_1 + \\ & + c_{11} \cdot kk_2) + s^{10} \cdot (a_{10} + b_{10} \cdot kk_1 + c_{10} \cdot kk_2 + e_{10} \cdot kk_3) + \\ & s^9 \cdot (a_9 + b_9 \cdot kk_1 + c_9 \cdot kk_2 + e_9 \cdot kk_3 + g_9 \cdot kk_4) + \dots + s^1 \cdot (a_1 + \\ & + b_1 \cdot kk_1 + c_1 \cdot kk_2 + e_1 \cdot kk_3 + g_1 \cdot kk_4) + a_{13}, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $I$  – одинична матриця;  $a_1 \dots a_{13}$ ,  $b_1 \dots b_{12}$ ,  $c_1 \dots c_{11}$ ,  $e_1 \dots e_{10}$ ,  $g_1 \dots g_9$  – постійні коефіцієнти, які залежать від параметрів даної системи ДСП;  $kk_1 \dots kk_4$  – коефіцієнти модального регулятора за обраними параметрами системи ДСП.

Біноміальний розподіл Ньютона наступний:

$$\begin{aligned} H(p) = & s^{13} + 13 \cdot \omega_0 \cdot s^{12} + 78 \cdot \omega_0^2 \cdot s^{11} + 286 \cdot \omega_0^3 \cdot s^{10} + 715 \cdot \omega_0^4 \cdot s^9 + \\ & + 1287 \cdot \omega_0^5 \cdot s^8 + 1716 \cdot \omega_0^6 \cdot s^7 + 1716 \cdot \omega_0^7 \cdot s^6 + 1287 \cdot \omega_0^8 \cdot s^5 + \\ & + 715 \cdot \omega_0^9 \cdot s^4 + 286 \cdot \omega_0^{10} \cdot s^3 + 78 \cdot \omega_0^{11} \cdot s^2 + 13 \cdot \omega_0^{12} \cdot s + \omega_0^{13} \end{aligned} \quad (3)$$

Порівнюючи отриманий вираз з стандартним біноміальним розподілом Ньютона та приймаючи  $\omega_0 = 14,3/t_p$ , розраховуємо числові значення коефіцієнтів модального регулятора:

$$13 \cdot \omega_0 = a_{12} + b_{12} \cdot kk_1 \quad (4)$$

$$78 \cdot \omega_0^2 = a_{11} + b_{11} \cdot kk_1 + c_{11} \cdot kk_2 \quad (5)$$

$$286 \cdot \omega_0^3 = a_{10} + b_{10} \cdot kk_1 + c_{10} \cdot kk_2 + e_{10} \cdot kk_3 \quad (6)$$

$$715 \cdot \omega_0^4 = a_9 + b_9 \cdot kk_1 + c_9 \cdot kk_2 + e_9 \cdot kk_3 + g_9 \cdot kk_4 \quad (7)$$

звідки отримуємо:

$$kk_1 = \frac{13 \cdot \omega_0 - a_{12}}{b_{12}} \quad (8)$$

$$kk_2 = \frac{78 \cdot \omega_0^2 - a_{11} - b_{11} \cdot kk_1}{c_{11}} \quad (9)$$

$$kk_3 = \frac{286 \cdot \omega_0^3 - a_{10} - b_{10} \cdot kk_1 - c_{10} \cdot kk_2}{e_{10}} \quad (10)$$

$$kk_4 = \frac{715 \cdot \omega_0^4 - a_9 - b_9 \cdot kk_1 - c_9 \cdot kk_2 - e_9 \cdot kk_3}{g_9} \quad (11)$$

Вважаючи, що у сталому режимі струм дуги дорівнює завданому значенню  $i_d = i_{d3}$ , а всі прирощення змінних дорівнюють нулю, розраховуємо останній коефіцієнт модального регулятора з математичної моделі системи ДСП, яка представлена у матричній формі виду:

$$[X] = [Y]^{-1} \cdot [Z] \quad (12)$$

де матриця  $[Y]$  є матрицею коефіцієнтів при змінних стану, матриця  $[X]$  складається з коефіцієнтів модального регулятора, матриця  $[Z]$  є матрицею вихідних змінних у сталому режимі.

За результатами матричних розрахунків отримуємо останній коефіцієнт модального регулятора  $kk_0$ .

### Обговорення результатів

Результати порівняння дії моделей з стандартним та модальним регулятором показали, що при використанні запропонованого модального регулятора, за наявності випадкових зрушень встановленого режиму, система керування приводу переміщення електрода ДСП має вищу швидкодію. За наявності великих перепадів довжини дуги модель з стандартним регулятором переходить до аварійного режиму (коротке замикання між електродом та шихтою та зупинка процесу плавки ДСП). За тих же умов модель з модальним регулятором продовжує діяти в штатному режимі.

### Висновки

Запропоновано лінеаризовану модель ДСП, яка є основою для побудови керуючого модального регулятора. Для складнопов'язаного процесу плавлення шихти у ДСП проведено синтез просторів станів модального регулятора. Проведене порівняльне моделювання дії системи керування ДСП з синтезованим модальним та класичним регуляторами. Результати моделювання вказують на меншу тривалість перехідних процесів та прийнятний рівень перерегулювання у системі керування приводу переміщення електродів ДСП при несистематичних зрушеннях режиму плавки. Використання розробленого модального регулятора має надати можливість більш якісного керування головними процесами ДСП, запобігання частки аварійних ситуацій, що відбуваються при плавленні шихти.

### Список літератури

1. **Hildebrand, R.** Identification for control: Optimal input intended to identify a minimum variance controller / **R. Hildebrand, G. Solari** // *Automatica*. – 2007. – Vol. 43, Issue 5. – P. 758-767. – doi: 10.1016/j.automatica.2006.11.003.
2. **Kumar, R.** Design of input shapers using modal cost for multi-mode systems / **R. Kumar, T. Singh** // *Automatica*. – 2010. – Vol. 46, Issue 3. – P. 598-604. – doi: 10.1016/j.automatica.2010.01.016.
3. **Aguilar-Ibanez, C.** A nonlinear robust PI controller for an uncertain system / **C. Aguilar-Ibanez, Ju. A. Mendoza-Mendoza, M. S. Suarez-Castanon, J. Davila** // *International Journal of Control*. – 2013. – Vol. 87, Issue 5. – P. 1094-1102. – doi:10.1080/00207179.2013.868606.
4. **Лозинський, А. О.** Дослідження впливу каскадного нечіткого регулятора на характеристики системи автоматичного керування переміщення електрода дугової сталеплавильної печі / **А. О. Лозинський, Л. І. Демків** // *Науковий вісник Національного гірничого університету*. – 2014. – № 4. – С. 32-38.
5. **Чепкунов, Р. А.** Повышение качества регулирования электроприводов с косвенным измерением скорости / **Р. А. Чепкунов, Д. И. Левинзон** // *Науковий вісник Національного гірничого університету*. – 2014. – № 3. – С. 18-22.
6. **Weijtens, W.** Operational modal parameter estimation of MIMO systems using transmissibility functions / **W. Weijtens, G. De Sitter, Ch. Devriendt, P. Guillaume** // *Automatica*. – 2014. – Vol. 50, Issue 2. – P. 335-339. – doi: 10.1016/j.automatica.2013.11.021.
7. **Taleb, M.** Adaptive robust controller based on integral sliding mode concept / **M. Taleb, F. Plestan** // *International Journal of Control*. – 2015.

- Vol. 89, Issue 9. – P. 1788-1797. – doi:10.1080/00207179.2016.1147083.
8. **Безрядин, М. М.** Построение модальных регуляторов для объектов низкого порядка, заданных в общем виде / **М. М. Безрядин, В. Г. Ляликова, В. Г. Рудалев** // *Вестник ВГУ, Серия: системный анализ и информационные технологии*. – 2015. – № 2. – С. 27-30.
  9. **Michailidis, I.** Adaptive optimal control for large-scale nonlinear systems / **I. Michailidis, S. Baldi, E. B. Kosmatopoulos, P. A. Ioannou** // *IEEE Transactions on Automatic Control*. – 2017. – Vol. 62, Issue 11. – P. 5567-5577. – doi:10.1109/TAC.2017.2684458.
  10. **Миронов, Ю. М.** Анализ характеристик дуговых печей как объектов управления / **Ю. М. Миронов, А. Н. Миронова** // *Электротехника*. – 2017. – №7. С. 2-6.
  11. **Kersting, S.** The combinatorics of authentication and secrecy codes / **S. Kersting, M. Buss** // *IEEE Transactions on Automatic Control*. – 2017. – Vol. 62, Issue 11. – P. 5634-5649. – doi:10.1109/TAC.2017.2690060.
  12. **Хрестін, Р. М.** Визначення передаточної функції дугової сталеплавильної печі як об'єкта управління / **Р. М. Хрестін** // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2016. – № 4(1). – С. 114-118.
- fuzzy controller on the characteristics of the system of automatic control of moving an electrode of an arc furnace]. *Naukovii visnyk Natsionalnogo girnychogo universytetu*[*Scientific Bulletin of National Mining University*], 2014, **4**, 32-38.
5. **Chepkunov, R. A., Levinzon, D. I.** Povyshenie kachestva regulirovaniya eliektroprivodov s kosvennym izmereniam skorosti [Improving the quality of regulation of electric drives with indirect measurement of speed]. *Naukovii visnyk Natsionalnogo girnychogo universytetu* [*Scientific Bulletin of National Mining University*], 2014, **3**, 18-22.
  6. **Weijtjens, W., De Sitter, G., Devriendt, Ch., Guillaume, P.** Operational modal parameter estimation of MIMO systems using transmissibility functions. *Automatica*, 2014, **50**, 335-339, doi: 10.1016/j.automatica.2013.11.021.
  7. **Taleb, M., Plestan, F.** Adaptive robust controller based on integral sliding mode concept. *International Journal of Control*, 2015, **89**, 1788-1797, doi:10.1080/00207179.2016.1147083.
  8. **Bezriadin, M. M., Lialikova, V. G., Rudaliyov, V. G.** Postroenie modal'nykh regulatorov dlia ob'iektov nizkogo poriadka, zadannykh v obshchem vide [The construction of modal regulators for low-order objects given in general form]. *Vestnik VGU, Seria: sistemnyi analiz i informatsionnye tekhnologii*, 2015, **2**, 27-30.
  9. **Michailidis, I., Baldi, S., Kosmatopoulos, E. B., Ioannou, P. A.** Adaptive optimal control for large-scale nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, **62**, 5567-5577, doi:10.1109/TAC.2017.2684458.
  10. **Mironov, Yu. M., Mironova, A. N.** Analiz kharakteristik dugovykh pechei kak ob'iektov upravleniia [Analysis of the characteristics of arc furnaces as control objects]. *Elektrotehnika* [*Electrical engineering*], 2017, **7**, 2-6.
  11. **Kersting, S., Buss, M.** Direct and indirect model reference adaptive control for multivariable piecewise affine systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, **62**, 5634-5649, doi:10.1109/TAC.2017.2690060.
  12. **Khrestin, R. N.** Vyznachennia peredatochnoi funktsii dugovoi staleplavil'noi pechi yak ob'iektu upravleniia [Determination of transfer function of arc furnace as a control object]. *Elektrotehnika i elektromehhanika* [*Electrical engineering & electromechanics*], 2016, **4(1)**, 114-118.

#### Bibliography (transliterated)

1. **Hildebrand, R.** Identification for control: Optimal input intended to identify a minimum variance controller. *Automatica*, 2007, **43**, 758-767, doi: 10.1016/j.automatica.2006.11.003.
2. **Kumar, R., Singh, T.** Design of input shapers using modal cost for multi-mode systems. *Automatica*, 2010, **46**, 598-604, doi: 10.1016/j.automatica.2010.01.016.
3. **Aguilar-Ibanez, C., Mendoza-Mendoza, Ju. A., Suarez-Castanon, M. S., Davila, J.** A nonlinear robust PI controller for an uncertain system. *International Journal of Control*, 2013, **87**, 1094-1102, doi:10.1080/00207179.2013.868606.
4. **Lozynskiy, A. O., Demkiv, L. I.** Doslidzhennia vplyvu kaskadnogo nechitkogo regulatora na kharakterystyky systemy avtomatichnogo keruvannia peremishchennia elektroda dugovoi staleplavil'noi pechi [Investigation of the influence of a cascade

#### Відомості про автора (About authors)

**Хрестін Роман Миколайович** – викладач вищої категорії, Нікопольський технікум Національної металургійної академії України, викладач електротехнічного відділення; м. Нікополь, Україна; e-mail: uznavas@ukr.net.

**Roman Khrestin** – lecturer of the highest category, Nikopol College of National Metallurgical Academy of Ukraine, lecturer of Electrical department; Nikopol, Ukraine; e-mail: uznavas@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

**Хрестін, Р. М.** Модальний регулятор привода переміщення електрода дугової сталеплавильної печі / **Р. М. Хрестін** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 26 (1302). – Т. 1. – С. 135-139. – doi:10.20998/2413-4295.2018.26.19.

*Please cite this article as:*

**Khrestin, R.** Modal regulator of drive moving electrode of the arc furnace. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **26** (1302), 1, 135-139, doi:10.20998/2413-4295.2018.26.19.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Хрестин, Р. Н.** Модальный регулятор привода перемещения электрода дуговой сталеплавильной печи / **Р. Н. Хрестин** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 26 (1302). – Т. 1. – С. 135-139. – doi:10.20998/2413-4295.2018.26.19.

**АННОТАЦИЯ** В работе рассмотрены вопросы управления дуговой сталеплавильной печи. Расчеты проводятся на основе линеаризованной математической модели системы печи. Составлена матричная форма представленной модели в переменных состояния. Сравнение результатов матричных вычислений с биномиальным распределением Ньютона позволило разработать структуру управляющего модального регулятора. Проведено сравнительное моделирование действий систем дуговой сталеплавильной печи, управляемых стандартным и модальным регуляторами. Сравнение показало, что использование разработанного модального регулятора позволяет минимизировать величину перерегулирования и продолжительность переходного процесса при случайных нарушениях режима плавки.

**Ключевые слова:** дуговая сталеплавильная печь; объект управления; математическая модель; распределение Ньютона; модальный регулятор.

*Поступила (received) 14.06.2018*