

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДУГИ ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ

Запропоновано математичну модель блоку дуги дугової сталеплавильної печі, якою керує механізм переміщення електрода. Модель призначена для аналізу електромагнітних процесів дуги зі змінною довжиною. Порівняльний аналіз результатів моделювання на основі побудованої блок-схеми моделі і результатів, які отримані на реальних печах, показав адекватність моделі. Запропоновано параметр, що визначає етап процесу плавки. Проаналізовано зміни параметрів дуги при зміні її довжини. Проведено аналіз змін цих параметрів при зміні термоінерційних умов горіння дуги. Бібл. 13, рис. 4.

Ключові слова: дугова сталеплавильна піч, управління параметрами дуги, довжина дуги, емпіричні коефіцієнти, математична модель дуги, вольт-амперна характеристика дуги.

Предложена математическая модель блока дуги дуговой сталеплавильной печи, которой управляет механизм перемещения электрода. Модель предназначена для анализа электромагнитных процессов дуги с изменяющейся длиной. Сравнительный анализ результатов моделирования на основе построенной блок-схемы модели и результатов, которые получены на реальных печах, показал адекватность модели. Предложен параметр, определяющий этап процесса плавки. Проанализированы изменения электрических параметров дуги при изменении ее длины. Проведен анализ изменений этих параметров при изменении термоинерционных условий горения дуги. Библ. 13, рис. 4.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, управление параметрами дуги, длина дуги, эмпирические коэффициенты, математическая модель дуги, вольт-амперная характеристика дуги.

Постановка проблеми. Широке використання електричної дуги у ряді технологічних процесів обумовлює необхідність математичного опису зв'язків між головними параметрами дуги: напругою дуги U_d , силою струму дуги i_d та довжиною дуги d . Ці параметри визначають властивості дуги і можливість досягнення оптимального режиму плавки. При побудові блок-схем математичної моделі дуги бажано виділяти ряд коефіцієнтів, які дозволяють врахувати змінні умови протікання плавки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розгляду та математичному опису процесів, що відбуваються в дугах змінного струму, присвячено цілий ряд фундаментальних праць [1-6]. В останній час цим питанням також займалися А.А. Андріанов, В.М. Сидорець [7], Є.М. Верещаго, В.І. Костюченко [8] та багато інших авторів.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Складність процесів, що відбуваються при запалюванні, горінні, згасанні та повторному запалюванні дуги призводить до того, що математичний опис цих процесів виявляється або достатньо спрощеним, або містить цілий ряд емпіричних залежностей.

Спрощений опис неприйнятний при наявному рівні складності технологічних процесів та їх потужності (а отже при відповідних вимогах до точності керування ними). Використання математичних моделей з емпіричними коефіцієнтами вимагає уважного розгляду умов експериментів, в ході яких ці коефіцієнти були отримані. В більшості випадків такі емпіричні коефіцієнти можуть бути використані не для всіх дугових процесів, але тільки для вузького діапазону потужностей або частот і т.ін. [6]. При цьому в кожному випадку може бути відсутній зв'язок навіть між головними параметрами дуги.

Мета статті. З огляду на вищевказане, метою роботи є побудова порівняно простої математичної моделі дуги дугової сталеплавильної печі (ДСП), яка

в той же час з достатньою адекватністю відтворювала б процеси дуги. У роботі [7] запропоновано використання математичної моделі дуги, з огляду на її адекватність динаміці електричної дуги. В моделі використані наступні рівняння:

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_S} \cdot [U_c - R_b \cdot i_d - i_d \cdot i_t^{(n-1)}], \quad (1)$$

де i_d – струм дуги; L_S – індуктивність силового ланцюга; U_c – напруга джерела живлення; $i_d R_b$ – падіння напруги на резисторі, що обмежує струм; i_t – струм стану дуги; n – значення показника ступеня, змінне для різних умов горіння дуги.

$$\frac{di_t}{dt} = \frac{1}{2 \cdot t_0} \cdot \frac{i_d^2 - i_t^2}{i_t}, \quad (2)$$

де t_0 – постійна часу дуги.

ВАХ дуги завдається співвідношенням:

$$U_d = U_0 \cdot \left(\frac{i_t}{I_0} \right)^n, \quad (3)$$

де U_d – напруга дуги; U_0, I_0 – напруга та струм робочої точки ВАХ дуги.

Підкреслюється, що всі параметри приведених рівнянь безрозмірні. Значення U_0 та I_0 є емпіричними і стосуються випадку зварювальної дуги незмінної довжини. Та ж сама модель використана в роботі [8], де її позиціоновано як найбільш загальну та як таку, що може бути використана для випадків дуг зі змінною довжиною та рухливих дуг. Вищезгадані дослідження переконливо підтвердили ці положення. Але в запропонованому в роботах [7, 8] вигляді модель не відображає зв'язок між напругою U_d (струмом дуги i_d) та довжиною дуги d . Отже описані співвідношення придатні для опису електричних дуг подібних до зварювальних.

Для моделювання ж процесів, в яких довжина дуги суттєво впливає на параметри цих процесів,

необхідна модель, що враховує цю довжину в явному вигляді. Таким чином, згадана модель в такому вигляді не може бути використана для моделювання потужних дуг ДСП, хоч за всіма іншими ознаками вона є найбільш адекватною.

Виклад основного матеріалу. При порівнянні формули (1) з рівнянням Кірхгофа виявляється, що складова $i_d \cdot i_t^{(n-1)}$ грає роль модулюючої величини M_d . Попередні фундаментальні дослідження [9] довели, що для випадку рухливих дуг великої потужності та змінної довжини найбільш простим і, в той же час, достатньо прийнятним рівнянням ВАХ є формула Фреліха:

$$U_d = a + b \cdot d, \quad (4)$$

де a – падіння напруги у прианодній та прикатодній ділянках дуги; b – напруженість стовпа дуги; d – довжина дуги.

Перекладаючи рівняння (1), (2) в інтегральну форму та суміщаючи їх з рівнянням (4), отримаємо основу нової математичної моделі дуги:

$$i_d = \frac{1}{L_S} \cdot \int [U_c - R_b \cdot i_d - M_d \cdot (a + b \cdot d) \cdot i_t^{(n-1)}] dt + i_{d0}, \quad (5)$$

де i_{d0} – струм дуги в початковий момент.

$$i_t = \frac{1}{2 \cdot t_0} \cdot \int \left(\frac{i_d^2 - i_t^2}{i_t} \right) dt + i_{t0}, \quad (6)$$

де i_{t0} – струм стану дуги в початковий момент.

Рівняння (5), (6) дають можливість побудувати блок-схему математичної моделі дуги у середі «Matlab Simulink» [10]. При побудові схемної реалізації отриманої математичної моделі (рис. 1) приймаємо значення $n = -1/3$, що відповідає вільному горінню дуги.

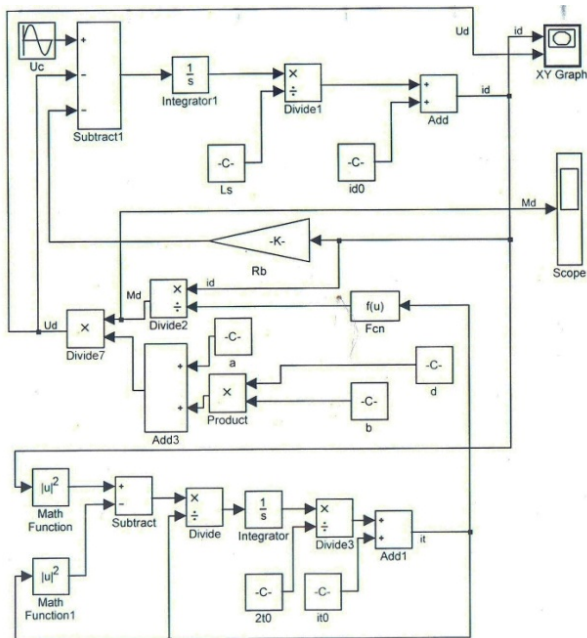


Рис. 1. Блок-схема математичної моделі дуги

Аналіз процесів за допомогою побудованої моделі показав, що при її відносній простоті, модель дає адекватні реальним процесам у ДСП результати. Наприклад, при збільшенні довжини дуги підвищується напруга дуги і зменшується її струм; зменшення довжини дуги призводить до протилежних наслідків (рис. 2).

Також модель показує, що при граничному збільшенні довжини дуги до значень в сотні міліметрів дуга не запалюється. При зменшенні довжини дуги до значень десятків часток міліметра дуга перестає змінюватись за напругою та струмом. Такий характер реакції на зміну довжини дуги (моделюється керування дугою за допомогою привода переміщення електрода) відповідає поведінці реальної дуги ДСП [11]. Модель також адекватно реагує на зміну постійної часу дуги t_0 , що моделює зміну термоінерційних процесів у стовпі дуги по мірі його прогрівання (рис. 3). Так, при мінімальних значеннях $2t_0$ порядку 10^{-4} с, струм дуги близький до нуля, що відповідає безплазмовому стану дугового проміжку. При значеннях $2t_0$ порядку 10^{-3} с, динамічна ВАХ дуги має характерний вигляд «нахиленої вісімки».

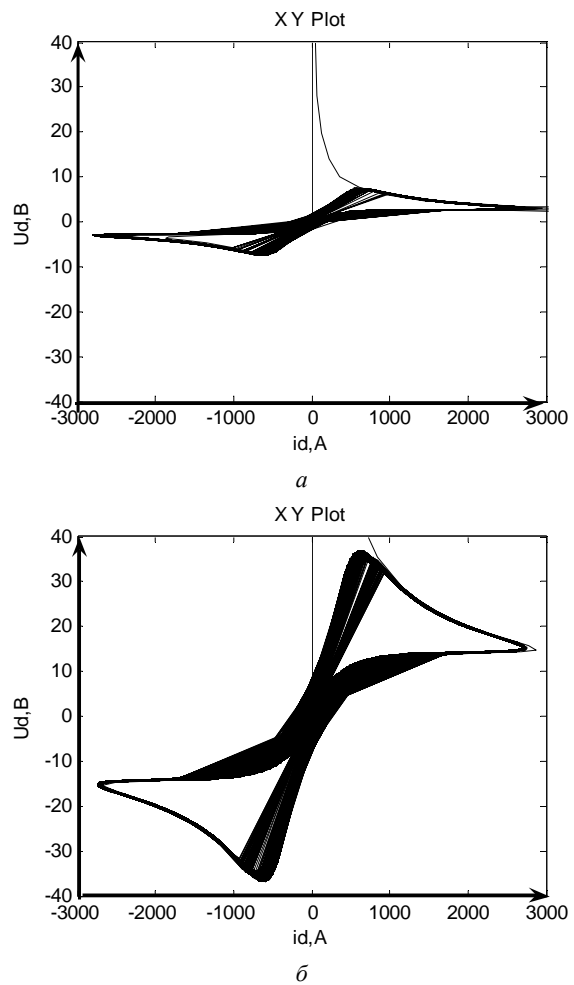


Рис. 2. Динамічна ВАХ моделі дуги ДСП при $d = 1,5$ мм (а) та $d = 15$ мм (б) за умови однаковості постійної часу дуги ($2t_0 = 10^{-3}$)

При значеннях $2t_0$ порядку 10^{-2} с, динамічна ВАХ дуги має вигляд овалу. В роботі [12] наведено дослідження дії ДСП обсягом від 5 т до 200 т. Результатом цієї роботи стали кілька сотень динамічних ВАХ дуги, знятих методом фотоосцилографування. Їх вигляд в достатній мірі співпадає з ВАХ, наведеними на рис. 3. Проведені досліди вказують, що при зміні значення $2t_0$ в бік підвищення динамічна ВАХ дуги змінює форму з такої, що наведено на рис. 3,а на форму, що наведено на рис. 3,б. Цей процес відповідає

переходу твердої шихти в рідкий розплав. Індикатором стадії плавки може служити форма та амплітуда модулюючої величини M_d , яка поступово згладжується та зменшується (рис. 4). Такий процес має місце внаслідок того, що складаються більш вигідні термоелектричні умови для іонізації у стовпі дуги (постійна часу дуги поступово зростає). Дуга стабілізується, меншим стає кількість перекидів дуги та їх розкид у просторі ванни ДСП [13]. Параметруючи запропоновану модель у відповідності до параметрів печі, можливо отримати вірогідний результат для ДСП будь-якого обсягу та режиму керування.

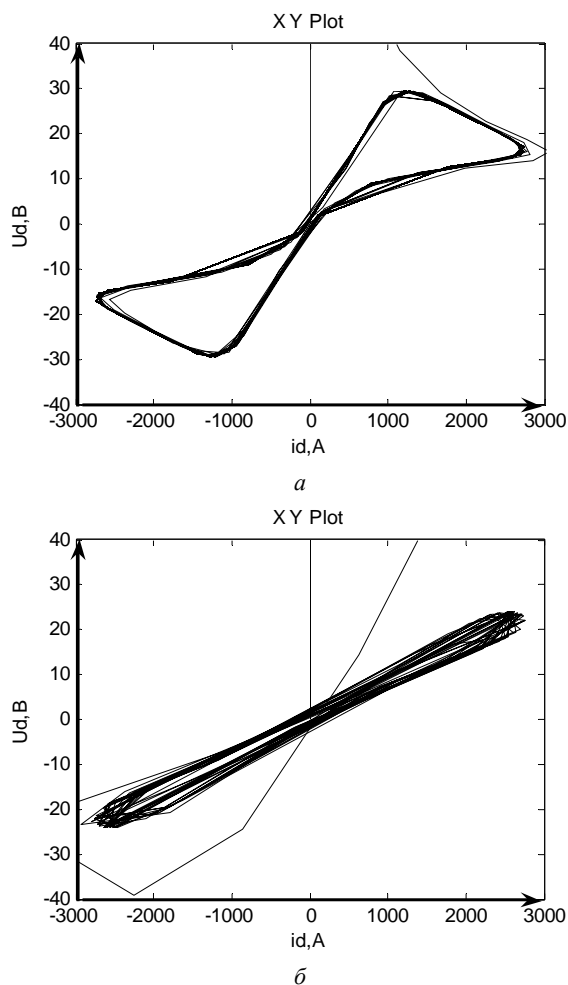


Рис. 3. Динамічна ВАХ моделі дуги ДСП при $2t_0 = 2 \cdot 10^{-3}$ с (а) та $2t_0 = 10^{-2}$ с (б) за умови однаковості довжини дуги $d = 15$ мм

Висновки і пропозиції. Запропоновано математичну модель дуги, яка, на відміну від раніш відомих моделей, дозволяє явно показати залежності між напругою (струмом) дуги ДСП та її довжиною. Динамічне керування режимом плавки відбувається шляхом регулювання довжини дуги. Завдяки цьому дану модель вигідно використовувати як складовий блок загальної моделі керування режимами плавки ДСП. Підтверджено адекватність запропонованої моделі на основі порівняння результатів моделювання та результатів досліджень реальних ДСП широкого діапазону потужностей. Виділений критерій, за яким можливо ідентифікувати стадію процесу – характер змінення модулюючої величини M_d . Наведено ВАХ та осцилограми моделі дуги ДСП, які відображають характер залеж-

ності між напругою U_d , силою струму дуги i_d під впливом довжини дуги d та постійної часу дуги t_0 .

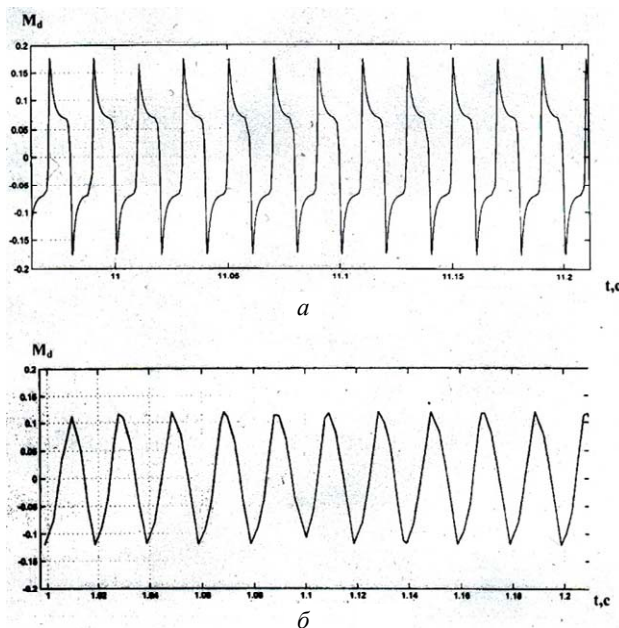


Рис. 4. Осцилограми модулюючої величини напруги дуги ДСП при $2t_0 = 1 \cdot 10^{-3}$ с (а) та $2t_0 = 10^{-2}$ с (б) за умови однаковості довжини дуги $d = 15$ мм

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Cassie A.M. A new theory of rupture and circuit severity. – CIGRE Report, Paris, France, 1939. – Vol.102. – pp. 2-14.
2. Mayr O. Beiträge Zur Theorie Des Statischen Und Des Dynamischen Lichtbogens. – Archiv für Elektrotechnik. – 1943. – vol.37. – no.12. – pp. 588-608.
3. Сисоян Г.А. Электрическая дуга в электрической печи. – М.: Металлургия, 1974. – 304 с.
4. Новиков О.Я. Устойчивость электрической дуги. – Л.: Энергия, Ленингр. отд., 1978. – 159 с.
5. Пентегов И.В., Сидорец В.Н. Сравнительный анализ моделей динамической сварочной дуги // Автоматическая сварка. – 1989. – №2. – С. 33-36.
6. Свенчанский А.Д., Смелянский М.Я. Электрические промышленные печи. Учебн. пособие для вузов. Ч.2. – М.: Энергия, 1970. – 264 с.
7. Андрианов А.А., Сидорец В.Н. Оптимизация режимов стабилизации сварочной дуги переменного тока // Электротехника і електромеханіка. – 2009. – №2. – С. 5-8.
8. Верещаго Е.Н., Костюченко В.И. Модель электрической дуги в Matlab/Simulink // Электротехника та електроенергетика. – 2013. – №2. – С. 40-45.
9. Сапко А.И. Исполнительные механизмы регуляторов мощности дуговых электропечей. – М.: Энергия, 1969. – №33. – 128 с.
10. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. Учебн. пособие. – СПб.: КОРОНА, 2001. – 320 с.
11. Ефроймович Ю.Е., Фейгин В.И. Автоматическое регулирование дуговых металлургических печей. – М.: Металлургиздат, 1951. – 235 с.
12. Минеев А.Р., Рубцов В.П. Статистические и динамические показатели качества работы электротехнических установок (на примере электропечей) // Электротехника. – 2000. – №1. – С. 42-51.
13. Хаинсон А.В., Дрогин В.И., Пирогов Н.А. Исследование электрических режимов дуговых сталеплавильных печей с учетом случайных колебаний напряжений дуг // Электротехника. – 1983. – №7. – С. 11-13.

REFERENCES

1. Cassie A.M. A new theory of rupture and circuit severity. *CIGRE Report*, Paris, France, 1939, vol.102, pp. 2-14.
 2. Mayr O. Beiträge Zur Theorie Des Statischen Und Des Dynamischen Lichtbogens. *Archiv für Elektrotechnik*, 1943, vol.37, no.12, pp. 588-608. doi: 10.1007/BF02084317. (Ger).
 3. Sisojan G.A. *Elektricheskaja duga v elektricheskoi pechi* [The electric arc in an electric furnace]. Moscow, Metallurgija Publ., 1974. 304 p. (Rus).
 4. Novikov O.J. *Ustoichivost' elektricheskoi dugi* [The stability of the electric arc]. Leningrad, Leningrad department of Energija Publ., 1978. 159 p. (Rus).
 5. Pentegov I.V., Sidorets V.N. Comparative analysis of models of dynamic arc. *Avtomaticheskaja svarka – Automatic welding*, 1989, no.2, pp. 33-36. (Rus).
 6. Svenchanskii A.D., Smelianskii M.J. *Elektricheskie promyshlennye pechi: uchebn. posobie dlja vuzov* [Electric industrial furnaces: textbook for high schools]. Moscow, Energija Publ., 1970. 264 p. (Rus).
 7. Andrianov A.A., Sidorets V.N. Optimization of stabilization regimes for alternating current welding arc. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2009, no.2, pp. 5-8. (Rus).
 8. Vereshchaho E.M., Kostyuchenko V.I. Model of an electric arc in Matlab/Simulink. *Elektrotehnika ta elektroenergetika – Electrical engineering & Electric power industry*, 2013, no.2, pp. 40-45. (Rus).
 9. Sapko A.I. *Ispolnitel'nye mekhanizmy regulatorov moshchnosti dugovykh elektropechei* [Actuators power regulators of electric arc furnaces]. Moscow, Energija Publ., 1969, vol.33, 128 p. (Rus).
 10. German-Galkin S.G. *Komp'uternoe modelirovanie poluprovodnikovyykh sistem v MATLAB 6.0: uchebn. posobie* [Computer simulation of semiconductor systems in MATLAB 6.0: training manual]. Saint Petersburg, KORONA Publ., 2001. 320 p. (Rus).
 11. Efroimovich J.E., Feigin V.I. *Avtomaticheskoe regulirovanie dugovykh metallurgicheskikh pechej* [Automatic control of the arc steel furnaces]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1951. 235 p. (Rus).
 12. Mineev A.R., Rubtsov V.P. Statistics and dynamic performance measures of electrotechnic settings (for example, electric furnaces). *Elektrotehnika – Electrical engineering*, 2000, no.1, pp. 42-51. (Rus).
 13. Hainson A.V., Drogin V.I., Pirogov N.A. The electrical arc furnaces modes based on random vibration stress arcs. *Elektrotehnika – Electrical engineering*, 1983, no.7, pp. 11-13. (Rus).
- Надійшла (received) 14.05.2015*

Хрестін Роман Миколайович, аспірант, Нікопольський технікум Національної металургійної академії України, 53200, Дніпропетровська обл., Нікополь, пр. Трубників, 18, тел/phone +38 066 6400610, e-mail: serebro0@yandex.ua

*R.N. Khrestin
Nikopol College of National Metallurgical Academy of Ukraine, 18, Trubnikov Ave., Nikopol, Dnepropetrovsk region, 53200, Ukraine.*

Modeling parameters of arc of electric arc furnace.

Purpose. *The aim is to build a mathematical model of the electric arc of arc furnace (EAF). The model should clearly show the relationship between the main parameters of the arc. These parameters determine the properties of the arc and the possibility of optimization of melting mode. Methodology.* *We have built a fairly simple model of the arc, which satisfies the above requirements. The model is designed for the analysis of electromagnetic processes arc of varying length. We have compared the results obtained when testing the model with the results obtained on actual furnaces. Results.* *During melting in real chipboard under the influence of changes in temperature changes its properties arc plasma. The proposed model takes into account these changes. Adjusting the length of the arc is the main way to regulate the mode of smelting chipboard. The arc length is controlled by the movement of the drive electrode. The model reflects the dynamic changes in the parameters of the arc when changing her length. We got the dynamic current-voltage characteristics (CVC) of the arc for the different stages of melting. We got the arc voltage waveform and identified criteria by which possible identified stage of smelting. Originality.* *In contrast to the previously known models, this model clearly shows the relationship between the main parameters of the arc EAF: arc voltage U_{a} , amperage arc i_{a} and length arc d . Comparison of the simulation results and experimental data obtained from real particleboard showed the adequacy of the constructed model. It was found that character of change of magnitude M_{a} helps determine the stage of melting. Practical value.* *It turned out that the model can be used to simulate smelting in EAF any capacity. Thus, when designing the system of control mechanism for moving the electrode, the model takes into account changes in the parameters of the arc and it can significantly reduce electrode material consumption and energy consumption during smelting. References 13, figures 4.*

Key words: **electric arc furnace, parameters of the arc control, arc of varying length, empirically determined coefficients, mathematical model of the arc, current-voltage characteristic of the arc.**