

УДК 621.365.2:519.876.2

Р.М. Хрестін<sup>(1)</sup>, викладач, аспірант<sup>(2)</sup>Д.Г. Алексієвський<sup>(2)</sup>, доцент, к.т.н.**РОЗРОБКА СТРУКТУРИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ**<sup>(1)</sup> Нікопольський технікум Національної металургійної академії України,<sup>(2)</sup> Запорізька державна інженерна академія

Предложена структура математической модели силовой цепи дуговой сталеплавильной печи, которая служит основой для создания системы управления механизмом перемещения электрода. На основе рассмотрения схемной реализации данной модели выделены факторы, оказывающие влияние на повышенные потери материала электродов.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, электрод, ток электрической дуги, математическая модель динамической дуги, структурное моделирование

Запропоновано структуру математичної моделі силового ланцюга дугової сталеплавильної печі, яка служить основою для створення системи управління механізмом переміщення електрода. На основі розгляду схемної реалізації моделі виділено чинники, які впливають на підвищені втрати матеріалу електродів.

Ключові слова: дугова сталеплавильна піч, електрод, струм електричної дуги, математична модель динамічної дуги, структурне моделювання

The structure of the mathematical model of the power circuit for arc steelsmelting furnace, which is serves by basis for creation of a system of control mechanism for moving the electrode has been offered. On basis a considering of scheme realization of the model the factors affecting on the increased loss of material for electrodes have been highlighted.

Keywords: arc steelsmelting furnace, electrode, current of electric arc, mathematical model of dynamic arc, structural modeling

*Актуальність роботи.* В умовах сучасних вітчизняних підприємств одним з найпотужніших агрегатів є дугова сталеплавильна піч (ДСП), яка має низку проблем щодо її енерго- та ресурсоспоживання. З цього випливає, що аналіз режимів дії ДСП є одним з найбільш перспективних напрямків їх модернізації, а також розробки та запровадження зазначеного промислового обладнання. Навіть порівняно незначне поліпшення його дії має забезпечити суттєвий загальний економічний ефект.

Вирішенню зазначеної проблеми присвячено роботи С.І.Тельнова, О.Д.Свенчанського, О.І. Сапко, Ю.Ю. Єфроймовича та багатьох інших авторів. Проте, з огляду на ускладнення технологічних процесів у ДСП, стає необхідним виконання все більш різнобічного та точного аналізу режимів дії зазначеного обладнання та здійснення на його основі модернізації системи управління ним.

*Аналіз сучасного стану проблеми.* Існуючі системи автоматичного управління ДСП є досить різноманітними та, у різній мірі, виконують головне завдання: забезпечення мінімальної тривалості плавки за мінімальної витрати електроенергії. При цьому необхідно зазначити, що найбільші витрати електроенергії мають місце під час першого періоду плавки – періоду розплавлення шихти. Для цього періоду характерними є найбільш активні

переміщення електродів, що призводить до найменш стабільного електричного режиму дуги ДСП.

Безумовно важливими вважаються питання визначення величини напруги  $U_d$ , сили струму  $i_d$ , довжини дуги  $\ell_d$ , теплових параметрів плавки, а також рівня їх стабільності. Проте майже у всіх сучасних алгоритмах управління роботою ДСП не враховують вплив умов горіння дуги на стан електрода (його механічні властивості), хоча цей фактор суттєво впливає на вище перелічені електричні та технологічні параметри. У перший період плавки шихта спочатку розплавляється місцево, безпосередньо під електродами з утворенням «колодязів», куди занурюються електроди. Глибина їх занурення визначається дією системи управління механізмом переміщення електрода. Саме на цьому етапі дуга між електродом та шихтою є найменш стійкою, її сила струму та довжина безперервно змінюються, а горіння характеризується частими обривами. Знаходження основної маси у твердому стані та наявність найбільш активних переміщень електродів (спуск, встановлення режимів) сприяють їх пошкодженню. Окрім того, слід враховувати, що стінки «колодязів» не є однорідними, а складаються з різних за масою та температурою плавлення шматків шихти, тобто щільність шихти є різною (відбувається часткове нівелювання щільності шихти під час її завалки, проте воно не зав-

жди є можливим). Обвалювання підплавлених шматків шихти у «колодязі» та стикання їх з електродами сприяють виникненню коротких замикань та обривань дуги. Такі порушення режиму плавлення зменшують корисні витрати потужності та призводять до сколення електродів (додаткової витрати матеріалу електрода та додаткового навуглювання металу). Такі порушення відбуваються кілька разів на хвилину (за нещільної завалки шихти – частіше), тому електроди швидше втрачають механічну міцність, та зменшується термін їх придатності, тобто зростають витрати електродів. Необхідно зазначити, що витрати на згоряння та відколи електродів, які мають місце під час застосування існуючих алгоритмів дії автоматичних регуляторів ДСП, є досить суттєвими.

Відомо, що собівартість тонни виплавленої сталі складається не тільки з вартості витраченої електроенергії та вартості вихідних матеріалів (руди чи шихти); помітну її частку складають витрати на електроди, які протягом експлуатації доводиться замінювати [1]. За даними роботи [2], витрати електродів для ДСП, які працюють за традиційною технологією, складають 8...15 % собівартості сталі, що свідчить про необхідність їх зниження.

Електричними засобами пониження таких витрат є:

- зменшення витрат на окислення обмеженням температури поверхні електрода за рахунок підтримання номінального струмового навантаження у відповідності до його діаметру;

- зменшення витрат електроенергії на розплення за рахунок підтримання стійкого режиму її споживання;

- зменшення витрат на огарки та уламки електродів підвищенням точності та чутливості системи управління механізмом переміщення електродів за рахунок зменшення кількості, сили та тривалості зіткнень електродів з шихтою.

Окрім планових замінювань електродів, досить частими (щонайменше – кілька разів на квартал) є випадки, коли електроди доводиться замінювати в аварійному порядку через їх зламання, у разі неточності дії або недостатньої швидкодії системи управління електроприводом механізму переміщення електродів ДСП. Аналіз роботи системи управління зазначеним механізмом показує, що причинами зламання електродів, насамперед, є втрата контролю над швидкістю їх переміщення (так званий «самохід»). Окрім того, на механічну міцність електрода, а отже, і на термін його дії, суттєво впливають непередбачені коливання сили струму та рівня температури під час аварійних обривів дуги. Зазначені аварійні обриви дуги спричиняють більш-менш тривалі простої печі, що, в свою чергу, порушує технологічний процес плавлення та підвищує витрати електроенергії на повторне нагрівання шихти.

Для сучасних ДСП характерною є значна кількість їх вимикань від мережі у ході плавки, що пов'язано з вимогами технологічного процесу або з аварійними зупинками (зламування електродів, спрацьовування захисту, різних видів пошкоджень обладнання печі). Кількість таких вимикань сягає п'яти і більш за плавку, а кожна безструмова пауза триває від одиниць до десятків хвилин.

*Постановка завдання.* Існуючі алгоритми управління режимом плавки у ДСП не є досить ефективними та потребують вдосконалення. Окрім забезпечення автоматичного загоряння дуги та регулювання потужності печі, бажано, щоб система управління механізмом переміщення електродів ДСП забезпечувала попередження або хоча б термінове усунування аварійних обривів дуги та інших аварійних ситуацій з мінімально можливим пошкодженням електродів під час обвалів шихти. З огляду на вищевказане, здається доречною побудова математичної моделі, за допомогою якої будуть вирішуватися такі задачі.

*Головна частина досліджень.* Відомо, що основою конструкції ДСП є робочий орган джерела теплової енергії, електричне обладнання для управління цим органом; теплоізолюваний робочий простір; допоміжні механізми [1]. Таким чином, задача одержання адекватної моделі ДСП може бути поділеною на низку задач щодо побудови моделей окремих складових частин печі та задачі зі «стикування» їх дії у складі цілісної моделі. Розробку структури математичних моделей визначених складових ДСП виконують методом структурного моделювання [3]. У подальшому аналіз структури виконують за допомогою пакета «*Matlab Simulink*» [4].

Як робочий орган джерела теплової енергії використовують нагрівальні елементи або електроди різного типу, що створюють електричну дугу. Тому першочерговим питанням під час розробки математичної моделі ДСП є побудова моделі підсистеми, яка описує процеси, що відбуваються безпосередньо у дуговому проміжку.

На даний час існує значна кількість математичних описувань електричної дуги [5-8]. Результатом їх аналізу та порівняння стало обрання математичної моделі динамічної дуги (ММДД), оскільки для вирішення поставленої задачі така модель виявилася найбільш придатною.

Рівняння ММДД приведено до канонічного вигляду:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} \cdot [U - i \cdot R + i \cdot i_0^{n-1}], \quad (1)$$

де  $i$  – струм дуги;  $t$  – тривалість моделювання;  $L$  – індуктивність силового ланцюга;  $U$  – напруга джерела живлення;  $i \cdot R$  – падіння напруги на рези-

сторі, що обмежує струм;  $i_0$  – струм стану дуги,  $\frac{di_0}{dt} = \frac{1}{2\theta} \cdot \frac{i^2 - i_0^2}{i_0}$ ,  $\theta$  – постійна часу дуги;  $n$  – показник ступеня.

Вольт-амперну характеристику дуги в ММДД завдають співвідношенням:

$$U(i) = U_0 \cdot \left( \frac{i_0}{I_0} \right)^n, \quad (2)$$

де  $U_0, I_0$  – напруга та струм робочої точки вольт-амперної характеристики дуги; значення показника ступеня  $n$  є змінним для різних умов горіння дуги [8].

Тоді, здійснюючи перетворення рівняння (1) на інтегральну форму, отримуємо:

$$i_d = \frac{1}{L_s} \cdot \int \left( U_c - i_d \cdot R_b - \frac{i_d}{\sqrt[3]{i_t^4}} \right) dt + i_{d0}, \quad (3)$$

де  $i_d = i$  – «трендовий» струм дуги;  $L_s = L$  – індуктивність силового ланцюга дуги;  $U = U_c$  – перетворена напруга живлячої мережі;  $i_d \cdot R_b = i \cdot R$  – падіння напруги на резисторі, що обмежує струм;  $i_t = i_0$  –

«повільний» струм дуги;  $i_t = \frac{1}{2t_0} \cdot \int \left( \frac{i_d^2 - i_t^2}{i_t} \right) dt + i_{t0}$ ;  $t_0$  – постійна часу провідності дуги;  $i_{t0}$  – струм стану дуги на початковий момент;  $i_{d0}$  – струм дуги на початковий момент;  $t_0 = \theta$  – постійна часу провідності дуги;  $U_d = U$  – напруга дуги; значення показника ступеня приймаємо  $n = -1/3$ , що відповідає умовам горіння дуги для періоду розплавлення.

Залежність між напругою та струмом дуги у відповідності до рівняння (2) має вигляд

$$U_d = U_0 \cdot \left( \frac{i_t}{I_0} \right)^{-1/3}, \quad (4)$$

Об'єднуючи рівняння (3) та (4), одержують основу для складання структури математичної моделі, яку зображено на рис. 1.

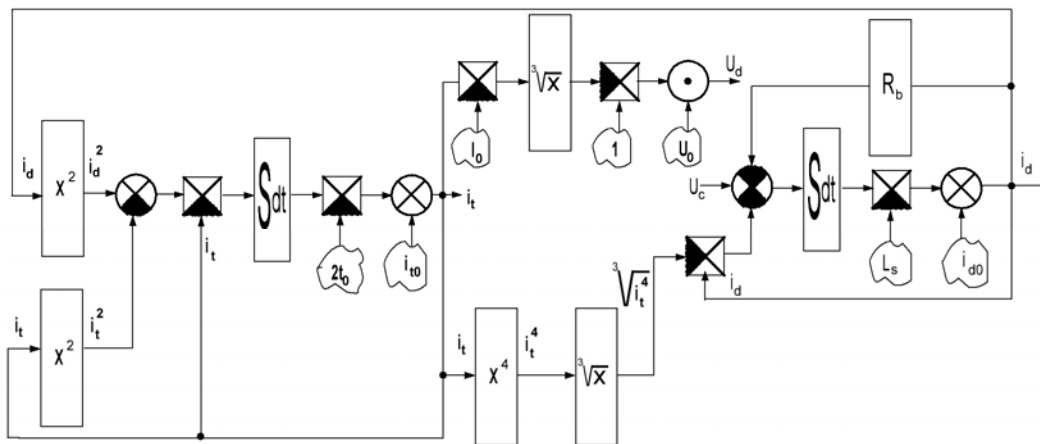


Рисунок 1 – Структура математичної моделі силового ланцюга дуги ДСП

Вхідним параметром силового кола дуги, а також всієї моделі ДСП, є вторинна напруга силового живлячого трансформатора  $U_c$ , яку в першому наближенні вважають незмінною. Вихідним параметром силового контуру є струм дуги  $i_d$ , який є основним критерієм настроювання системи управління механізмом переміщення електрода ДСП.

Запропонована модель дозволяє виявляти залежність струму дуги  $i_d$  від умов її горіння (варіація постійної часу  $t_0$ ), вибирання робочої точки ( $U_0, I_0$ ) та величини індуктивності силового ланцюга дуги  $L_s$ . Побудовану схему моделі силового ланцюга дуги було параметровано відповідно до режиму плавки ДСП ємністю 5,0 т.

Результати, які одержано за допомогою моделі (реалізовано засобами «*Matlab Simulink*»), показали, що за статичним режимом залежність між напругою та струмом дуги має вигляд симетричної експоненти (рис. 2).

В області струмів, де їх величина становить сотні ампер, напруга має порівняно великі значення (десятки вольт) та змінюється досить різко, під час переходу до області струмів, які мають величину, що складає кілоампери, напруга спадає до значень 10...20 вольт і змінюється набагато повільніше. Аналогічні характеристики було одержано іншими авторами за результатами експериментальних досліджень на ДСП [9,10].

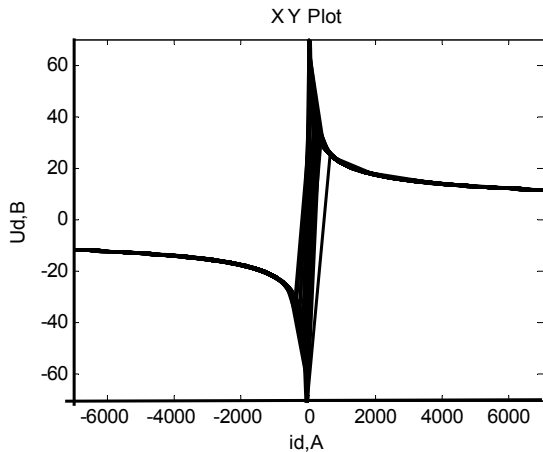


Рисунок 2 – Вольт-амперна дуги, що одержано за допомогою схемної реалізації моделі

Виконаним дослідженням (рис. 3) встановлено,

що «повільний» струм дуги  $i_t$  на протязі перших десятків секунд її горіння змінює свою полярність рідше за «трендовий» струм, а його амплітуда коливається між двома значеннями, які по чергово змінюються. Потім поступово амплітуда струму  $i_t$  зрівнюється і сягає (більш повільно ніж «трендовий» струм) встановленого незмінного значення, а змінювання полярності струму  $i_t$  стають менш частими та більш періодичними. В той же час по завершенні процесу запалювання дуги (кілька десятків секунд після подавання напруги на електрод) струм дуги  $i_d$  кожні кілька секунд має короточасні кидки з невеликою амплітудою, але взагалі дуга (за умови однорідності шихти) сягає стану сталого процесу.

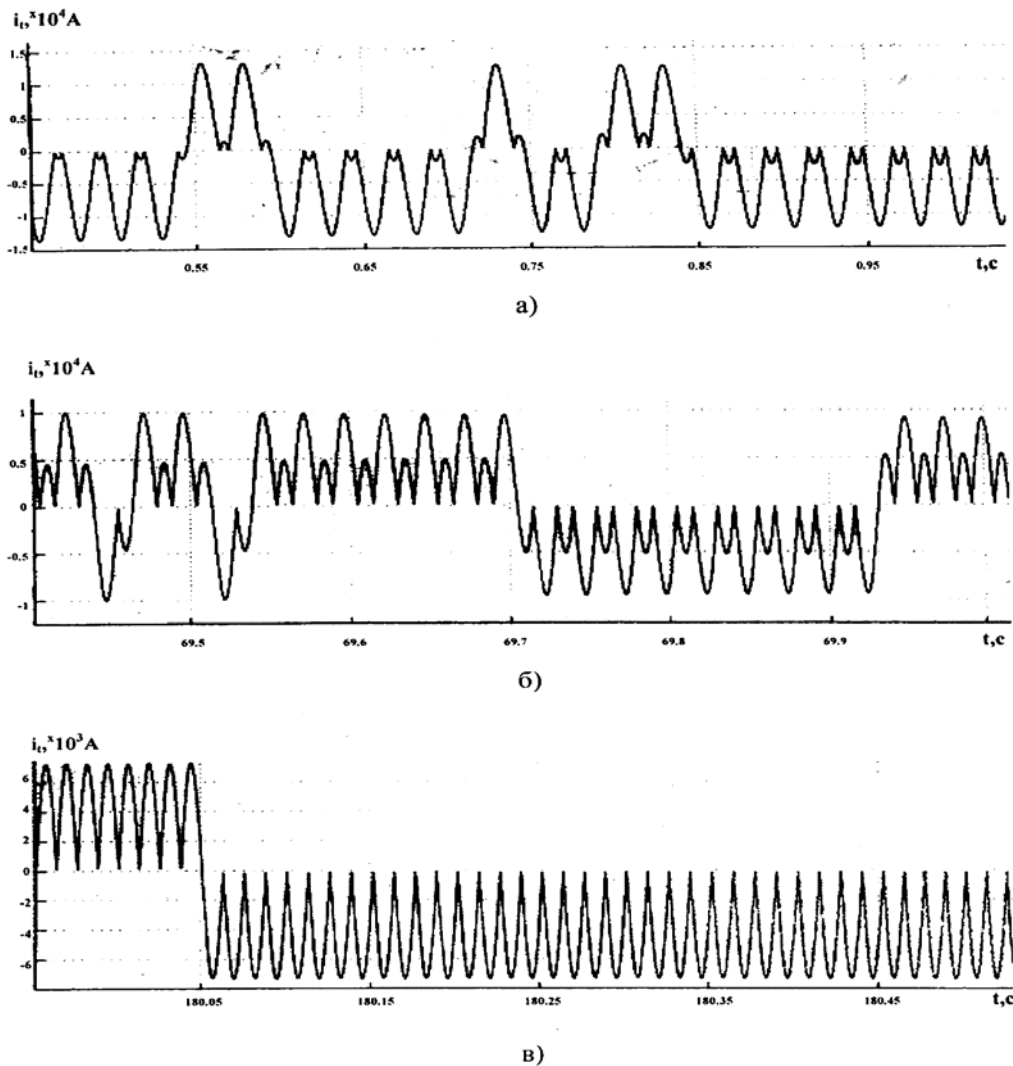


Рисунок 3 – Осцилограми «повільного» струму дуги під час її загоряння (а), на початку горіння (б) та за сталим режимом (в)

Таким чином, побудована модель вказує на принципову можливість стабілізації сталого дугового процесу, якого сягають управління параметрами дуги. Це виявляється можливим за умови по-

будови системи управління, алгоритм дії якої буде враховувати фактори порушення режиму дуги та запобігати їх розвитку. В цьому разі можна очікувати, що режим горіння дуги буде близьким до режиму, відтвореного вищенаведеною моделлю.

Характер одержаних залежностей у першому наближенні відповідає фізичним уявленням процесу горіння дуги у ДСП, а, отже, запропоновану модель можна використовувати як основу для побудови повної моделі зазначеного агрегату.

*Висновки.* Запропоновано новий напрямок підвищення економічності дії ДСП шляхом як зменшення енергетичних, так і матеріальних ресурсів (насамперед зменшення витрат електродів). Графічно показано залежність між вхідними параметрами системи управління переміщенням електродів: параметрами дуги (її струмом та напругою). Роз-

глянуто головні фактори, які впливають на підвищене руйнування електродів та їх аварійне зламвання, а також намічено дії, що мають призвести до зменшення витрати електродів. Розроблена схемна реалізація математичної моделі силового ланцюга дуги може бути використаною як основа для побудови повної математичної моделі ДСП, що буде забезпечувати зниження енергоспоживання та матеріалоемності технологічного процесу за рахунок підвищення точності управління механізмом переміщення електродів.

### Бібліографічний список

1. **Вольфовский, Г. С.** Определение экономической эффективности нового электротермического оборудования (методика и практика расчетов) [Текст] / Г. С. Вольфовский. – М. : Энергия, 1969. – 144 с. – Библиогр.: с. 81-83 (библиотека электротермиста, вып. 34). – 5000 экз.
2. **Кудрин, В. А.** Теория и технология производства стали : учебник для вузов [Текст] / В. А. Кудрин. – М. : Мир, ООО «Издательство АСТ», 2003. – 554 с. – Библиогр.: с. 542. – 3000 экз. – ISBN 5-03-003533-8 («Мир»), ISBN 5-17-013411-8 («АСТ»).
3. **Алексієвський, Д. Г.** «Основы теории систем» [Текст] : навч.-метод. посібник для студ. ЗДІА напряму 6.050802 «Електронні пристрої та системи» / Д. Г. Алексієвський. – Запоріжжя : ЗДІА, 2012. – 59 с. – Библиогр.: с. 58. – 25 экз.
4. **Дьяконов, В. П.** Simulink 5/6/7 : Самоучитель [Текст] / В. П. Дьяконов. – М. : ДМК- Пресс, 2008. – 784 с. – Библиогр.: с. 767-769. – 1500 экз. – ISBN 978-5-94074-423-8.
5. **Cassie, A. M.** A new theory of rupture and circuit severity [Text] / A. M. Cassie // CIGRE Report. – 1939. – Vol. 102. – P. 2-14. – Bibliog.: p. 13-14.
6. **Mayr, O.** Beiträge zur Theorie des Statischen und des Dynamischen Lichtbogens [Text] / O. Mayr // Archiv für Elektrotechnik. – 1943. – Vol. 37. – P. 588-608. – Bibliog.: p. 608.
7. **Новиков, О. Я.** Устойчивость электрической дуги [Текст] / О. Я. Новиков. – Л. : Энергия, 1978. – 159 с. – Библиогр.: с. 150-155. – 1850 экз.
8. **Пентегов, И. В.** Сравнительный анализ моделей динамической сварочной дуги [Текст] / И. В. Пентегов, В. Н. Сидоренко // Автоматическая сварка. – 1989. – № 2. – С. 33-36. – Библиогр.: с. 36.
9. **Утегунов, В. В.** Специальные вопросы электротехнологии [Текст] / В. В. Утегунов, И. В. Захаров, А. Д. Ижикова. – М. : Металлургия, 1985. – 227 с. – Библиогр.: с. 226. – 3000 экз.
10. **Манин, А. В.** Электротехнологические процессы и установки [Текст] / учебн. пособие / А. В. Манин. – Ч. 1. – Рыбинск : РГАТА им. П.А. Соловьева, 2010. – 188 с. – Библиогр.: с. 186. – 300 экз. – ISBN 978-5-88435-353-4.

Стаття надійшла до редакції 24.12.2014 р.  
Рецензент, проф. Т.В. Критська