

УДК 621.311.1.064

Лозинський О.Ю., Гудим В.І., Костинюк Л.Д.
 ДУ “Львівська політехніка”, кафедри ЕАП та ТЗЕ

АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ДУГИ І ДОСЛІДЖЕННЯ АДЕКВАТНОСТІ ПРОЦЕСІВ У МОДЕЛЬОВАНІЙ ТА РЕАЛЬНІЙ ДСП

© Лозинський О.Ю., Гудим В.І., Костинюк Л.Д., 2000

Розглянуто проблеми експериментальних досліджень процесів, пов'язаних з дугами ДСП. Розроблено математичну модель динамічної дуги ДСП. Адекватність моделі перевірено порівнянням миттєвих значень струмів дуги, отриманих експериментально та методом симулювання, а також за умовою розподілу другої гармоніки струму дуги на стадії розтоплення. Розроблену модель дуги можна використовувати для дослідження режимів ДСП на різних стадіях.

Топлення сталі у дугових сталетопних печах (ДСП) є складним і енергомістким. Виконання досліджень на діючих печах вимагає значних затрат на проведення експериментів, втручання в технологічні процеси сталетоплення нерідко вимагає зупинення технологічних процесів для комутування апаратури, а також під час апробування нових принципів регулювання зміни режимів електропічного агрегату. Природно, що це вимагає пошуку таких методів досліджень, які дозволяють здешевити експерименти. Одним із них є моделювання технологічних процесів ДСП, зокрема математичне моделювання.

Методом моделювання достовірні результати можна отримати за рахунок використання адекватних моделей ДСП, основними компонентами яких є дуги та коротка мережа. Моделюванню дуг присвячено багато робіт вітчизняних і зарубіжних авторів, однак, ці моделі призначені для симулювання теплових і технологічних режимів. У нашому випадку модель дуги, як нелінійний елемент електричного кола, повинна відтворювати особливості електромагнітного характеру, тому тут доцільно використовувати модель у вигляді динамічної залежності між напругою та струмом дуги, тобто у вигляді динамічної вольт-амперної характеристики (ДВАХ) випадкової форми. Під час дослідження автоколивних процесів у контурах печі для описування ДВАХ дуги часто застосовують кусково-лінійну апроксимацію [1]. Проте така модель неефективна під час цифрової реалізації, оскільки у точках злому вимагається спряження розв'язань рівнянь стану, яке відбувається переважно за рахунок дроблення кроку інтегрування. Крім того, у цьому випадку важко реалізувати випадкову форму дуги.

Точне відображення ДВАХ дуги можна отримати за рахунок використання сплайн-функції [2], наприклад третього порядку, яка запишеться у вигляді

$$u(i, \bar{a}) = u_0 + a_{1j}(i - i_j) + a_{2j}(i - i_j)^2 + a_{3j}(i - i_j)^3 \quad (1)$$

$$j = 1, n - 1$$

де $\bar{a} = (a_1, a_2, a_3)$ – вектор параметрів кубічного сплайна; i_j – значення струму у вузлі спряження сплайн-функції; i – поточне значення струму дуги; u_0 – початкове значення напруги дуги у точці спряження.

Для досягнення високої точності апроксимації вимагається розділення характеристики на велику кількість ділянок, для яких кожен раз розраховується вектор параметрів сплайн-функції. Вихідною інформацією є координати характеристик дуги у вигляді двовимірних масивів, які формуються ручним способом, що створює чималі незручності на стадії підготовки інформації. Досвід показує, що висока точність сплайн-функції третього порядку забезпечує у точках спряження окремих ділянок характеристики, а на інтервалах між ними існують значні відхилення від дійсних значень, за рахунок чого дуже спотворюється реальна картина процесів, що є принциповим недоліком цієї функції.

Враховуючи вищенаведене ефективнішим для апроксимації ДВАХ дуги є використання кусково-аналітичних функцій у вигляді алгебричної суми елементарних, оскільки однією аналітичною функцією описати ДВАХ дуги не вдається [3].

Такий підхід використано у цій роботі, де динамічна залежність між напругою та струмом дуги описується сукупністю інтегрального і колового синусів та оберненого тангенса [4].

У цьому разі рівняння апроксимації ДВАХ дуги через відносні значення напруги і струму запишеться у вигляді

$$u_{\delta}^* = a_1 Si(k_1 i_{\delta}^*) + a_2 (1 - \text{mod}(i_{\delta}^*)) \sin(k_2 i_{\delta}^*) + pa_3 \text{arctg}(k_3 i_{\delta}^*), \quad (2)$$

де $u_{\delta}^* = u_{\delta} / U_{m\delta}$ – відносне значення напруги дуги (безрозмірна величина); $i_{\delta}^* = i_{\delta} / I_{m\delta}$ – відносне значення струму дуги (безрозмірна величина); u_{δ} – миттєве значення напруги дуги; $U_{m\delta}$ – амплітудне значення напруги дуги, яке залежить від потужності печі; i_{δ} – миттєве значення струму дуги; $I_{m\delta}$ – амплітудне значення струму дуги, яке залежить від потужності печі; k_1, k_2, k_3 – масштабувальні коефіцієнти, значення яких змінюється за випадковим законом у заданих межах; a_1, a_2 – коефіцієнти апроксимації, які визначаються один раз за усередненими експериментальними динамічними характеристиками дуг для печі такої потужності; a_3 – коефіцієнт спряження прямої і зворотної віток характеристики, який визначається під час зміни ходу ДВАХ дуги; p – перемикаючий коефіцієнт, який залежно від ходу характеристики набуває значення 0 чи 1.

Під час моделювання використовується динамічний опір дуги у вигляді похідної напруги дуги за струмом, який для апроксимації запишеться у вигляді

$$du_{\delta}^* / di_{\delta}^* = a_1 k_1 Ci(k_1 i_{\delta}^*) + a_2 k_2 \cos(k_2 i_{\delta}^*) / I_m + \frac{pa_3 k_3}{1 + (k_3 i_{\delta}^*)^2}. \quad (3)$$

Під час реалізації моделі дуги у наведеному вигляді виникають труднощі з обчисленнями напруги і динамічного опору дуги в зоні переходу струму дуги через нуль і, особливо, коли струм дорівнює нулю. Тому апроксимація ДВАХ дуги за допомогою сукупності цих функцій буде ефективнішою, якщо їх подати через розклад у степеневі ряди. У такому разі математична модель динамічної вольт-амперної характеристики дуги із врахуванням її

випадкової форми запишеться у вигляді

$$u_{\delta}^* = a_0(i_{\delta}^* - a \frac{(i_{\delta}^*)^3}{3!3} + a \frac{(i_{\delta}^*)^5}{5!5} - a_3 \frac{(i_{\delta}^*)^7}{7!7}) + a_4(|1 - \text{mod}(i_{\delta}^*)|(i_{\delta}^* - k \frac{(i_{\delta}^*)^3}{3!} + k \frac{(i_{\delta}^*)^5}{5!} - k_3 \frac{(i_{\delta}^*)^7}{7!})) + pa_5(i_{\delta}^* - k_4 \frac{(i_{\delta}^*)^3}{3} + k_5 \frac{(i_{\delta}^*)^5}{5} - k_6 \frac{(i_{\delta}^*)^7}{7}). \quad (4)$$

Увівши позначення та згрупувавши коефіцієнти рівняння (4) відносно струмів у відповідних степенях, остаточно модель ДВАХ дуги набуде вигляду

$$u_{\delta}^* = (a_0 + b + pa_5)i_{\delta}^* - (\frac{a_1}{3!3} + \frac{k_1b}{3!} + p\frac{k_4a_5}{3})(i_{\delta}^*)^3 + (\frac{a_2}{5!5} + \frac{k_2b}{5!} + p\frac{k_5a_5}{5})(i_{\delta}^*)^5 - (\frac{a_3}{7!7} + \frac{k_3b}{7!} + p\frac{k_6a_5}{7})(i_{\delta}^*)^7; \quad (5)$$

$$b = a_4|1 - \text{mod}(i_{\delta}^*)|,$$

де a_0, a_4, a_5 – коефіцієнти апроксимуючої функції, які визначаються на підставі усередненої динамічної вольт-амперної характеристики дуги для печі такої потужності; $a_1, a_2, a_3, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ – коефіцієнти, значення яких змінюється за випадковим (переважно нормальним) законом розподілу.

Тоді динамічний опір дуги запишеться у вигляді

$$r_{\delta}^* = du_{\delta}^* / di_{\delta}^* = r_0 - r_1 i_{\delta}^* - r_2 (i_{\delta}^*)^2 + r_3 (i_{\delta}^*)^3 + r_4 (i_{\delta}^*)^4 - r_5 (i_{\delta}^*)^5 - r_6 (i_{\delta}^*)^6 + r_7 (i_{\delta}^*)^7. \quad (6)$$

де

$$r_0 = (a_0 + pa_5 + b); \quad r_1 = a_4 / I_m; \quad r_2 = (\frac{a_0a_1}{3!} + \frac{bk_1}{2!} + pk_4a_5); \quad r_3 = \frac{a_4k_1}{I_m 3!};$$

$$r_4 = (\frac{a_0a_2}{5!} + \frac{bk_2}{4!} + pk_5a_5); \quad r_5 = \frac{a_4k_2}{I_m 5!}; \quad r_6 = (\frac{a_0a_3}{7!} + \frac{bk_3}{6!} + pk_6a_5); \quad r_7 = \frac{a_4k_3}{I_m 7!}.$$

Під час моделювання використано математичну модель дуги (5), в якій коефіцієнти полінома згенеровані числовим генератором випадкових чисел, який сформовано згідно з алгоритмом, наведеним у [5]. Вихідною інформацією для роботи генератора є числове значення математичного сподівання та дисперсії, на підставі яких генератор генерує масив випадкових чисел, підпорядкованих закону нормального розподілу.

Для ДСП-100, методом математичного симулювання з використанням моделі (5) отримано миттєві значення напруги та струму дуги фази “А” у функції часу для симетричного режиму ДСП-100, графіки зображено на рис. 1

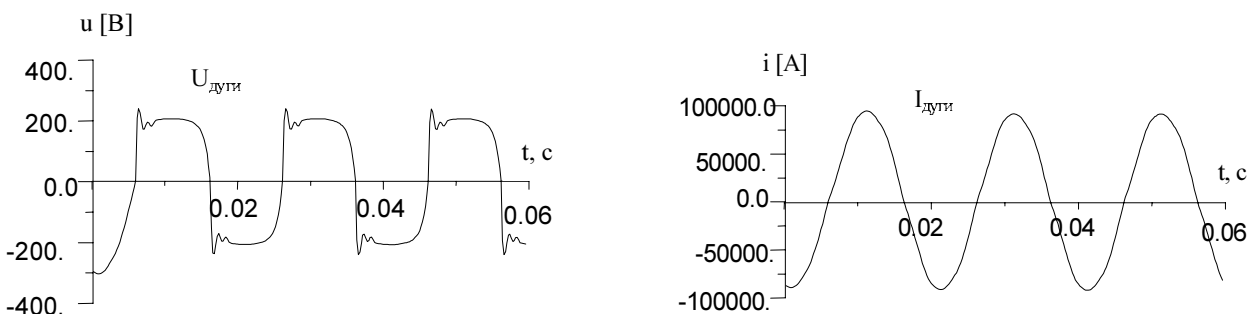


Рис.1. Напруга та струм дуги, отримані методом симулювання усталеного режиму.

На рис.2,а показана динамічна вольт-амперна характеристика дуги, яка відповідає отриманим кривим, зображеним на рис.1 на інтервалі трьох періодів. Оскільки процес усталений, то сімейство ДВАХ дуги внаслідок накладання має вигляд однієї характеристики. На цій характеристиці прямолінійна ділянка 1 відповідає лінеаризованій частині статичної характеристики дуги, яка використовується під час виходу на усталений режим. На рис.2,б зображено сімейство динамічних вольт-амперних характеристик дуги на стадії розтоплення металу, яким відповідає струм дуги на інтервалі десяти періодів промислової частоти, миттєве значення якого зображено на рис.3,а.

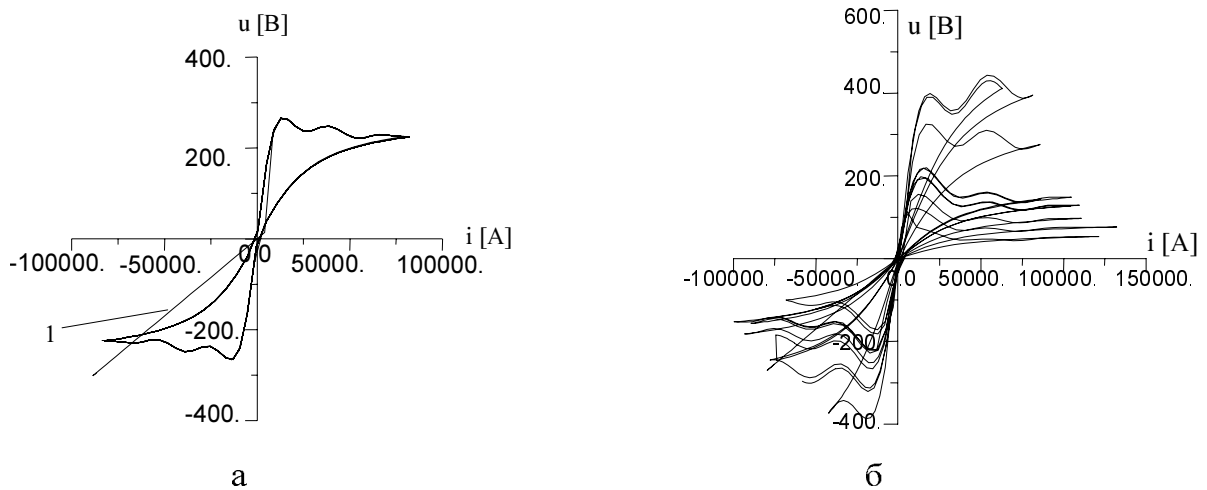


Рис.2. Динамічні вольт-амперні характеристики дуг печі:
а – симетричний режим; б – режим розтоплення металу.

Для порівняння на рис.3,б показано осцилограму струму дуги на стадії розтоплення металу у відносних одиницях. За базове значення струму прийнято номінальне значення струму дуги. Порівнюючи наведені криві видно, що характер процесів подібний, незважаючи на різні методи їх отримання. Як в одному, так і в другому випадку змінюються не лише форма та амплітуди струмів дуг а й періоди, що для стадії розтоплення є характерним.

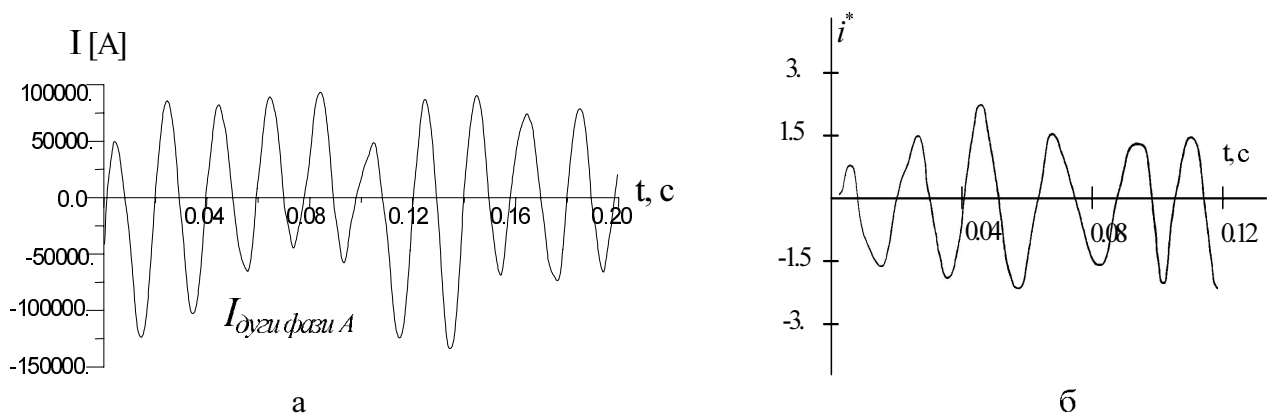


Рис.3. Миттєві значення струмів дуг ДСП на стадії розтоплення, отримані:
а – методом математичного моделювання; б – експериментально.

Адекватність процесів у наведеній моделі і реальному об'єкті підтверджується ще й виконаним гармонійним аналізом струму дуги. Як відомо системі регулювання електричного режиму задаються геометрія дуг та їх потужності, а збурення, які діють у печі, мають випадковий характер (змінюються умови іонізації дугового проміжку, обриви дуг, а також одно- і багатофазні короткі замикання електрод-шихта), які спотворюють симетричні режими горіння дуг та синусоїдну форму їх струмів. З метою перевірки відповідності процесів у реальному об'єкті і створеній математичній моделі використані, описані в роботах [6, 7], дослідження у сталеплавильному цеху на діючій ДСП-100 НЗА Донецького металургійного заводу гармонійного аналізу струмів та напруг електропічних дуг на різних технологічних стадіях для виявлення можливості моделювання режимів горіння дуг, отримання складових їх гармонійного спектра та оцінки точності моделювання порівнянням результатів, отриманих методом моделювання, з експериментальними.

На рис.4 зображені гістограми, зарахованих до величини першої гармоніки значень другої гармоніки x_i струму дуги фази "А" на стадії розтоплення шихти, отриманих експериментально $f_E(x_i)$ (рис.4,а) та методом симулювання $f_M(x_i)$ (рис.4,б), і відповідно змасштабованих. Представлені гістограми сформовані на підставі аналізу центрованих процесів за значеннями другої гармоніки.

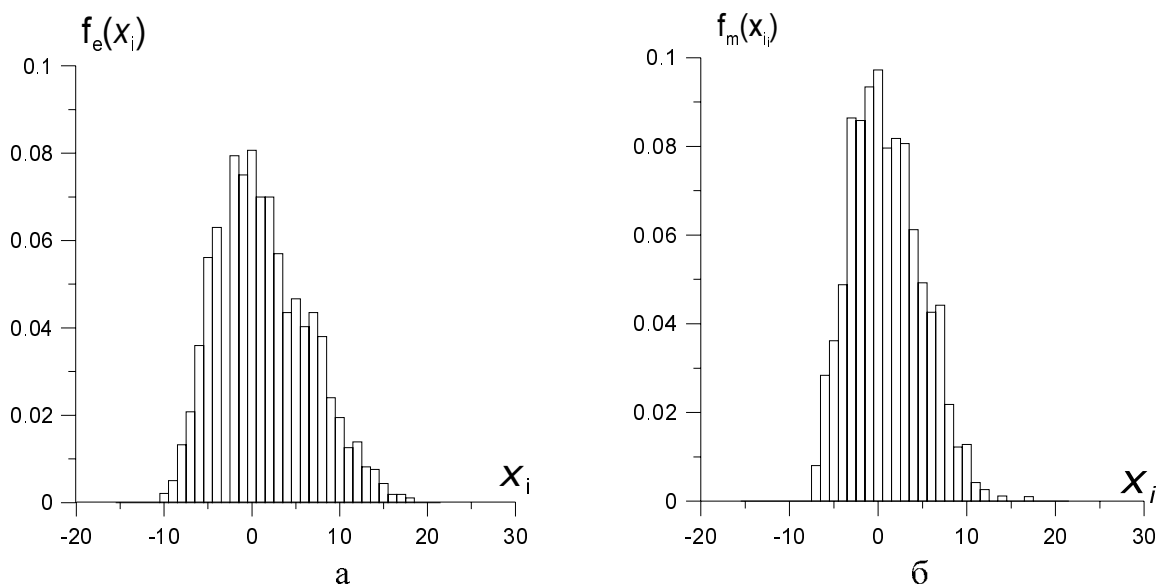


Рис.4. Гістограми розподілу струмів другої гармоніки, отримані:
а – експериментально; б – методом моделювання.

Оброблення результатів симулювання здійснювали за методикою, яку використовували під час оброблення експериментально отриманих гармонік з тією різницею, що експериментально гармоніки визначали за допомогою відповідної апаратури, а для визначення амплітуд другої гармоніки струмів печі, отриманих методом симулювання, використано спектральний метод.

Експериментально оброблено понад 1500 значень, а методом моделювання близько 500, чим пояснюється деяка розбіжність отриманих гістограм. Порівнюючи отримані результати можна зробити висновок, що адекватність розробленої математичної моделі дуги із врахуванням випадкової зміни її динамічної вольт-амперної характеристики є задовільною.

У загальному випадку розроблена і наведена в роботі математична модель дуги дає змогу з достатньою для практики точністю моделювати випадкові процеси ДСП, що дає змогу розв'язувати значний спектр задач як на стадії проектування електропостачальних систем ДСП, так і під час їх експлуатації й дослідження, не використовуючи складних експериментальних методів на чинних об'єктах.

1. Свенчанский А.Д., Цуканов В.В. Модель дуги при расчете динамических процессов в цепях ДСП // Математическое моделирование и расчет дугowych и плазменных сталеплавильных печей: Сб. научн. тр. ВНИИЭТО / Под ред. И.И.Игнатова. 1985. С.41–44.
2. Математичні задачі електроенергетики / В.С.Перхач. 3-тє вид. перероб. і доп. Львів, 1989.
3. Гудым В.И., Маруцак Я.Ю. Кусочно-аналитическая аппроксимация динамической вольт-амперной характеристики дуги сталеплавильной печи // Вестн. Львов. политехн. ин-та. 1981. № 151. С.17–19.
4. Корн Г. и Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы / Пер. с англ. М. 1970.
5. Хемминг Р.В. Численные методы для научных работников и инженеров / Пер. с англ. М., 1972.
6. Костынюк Л.Д., Перевознюк В.Я., Сметанюк Я.Б. Исследование токов дуг дуговой сталеплавильной печи как источника информации о плавке // Вестн. Львов. политехн. ин-та. 1984. № 184. С. 26–29.
7. Лозинский О.Ю., Костынюк Л.Д. и др. Автоматизированное распознавание технологических стадий расплавления шихты // Электротехника. 1986. № 9. С.34–38.

УДК 621.365.2

Лозинський О.Ю., Паранчук Я.С.
ДУ “Львівська політехніка”, кафедра ЕАП

АДАПТИВНА СТОХАСТИЧНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ СТРУМІВ ДУГ ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ

© Лозинський О.Ю., Паранчук Я.С., 2000

Запропоновано структуру стохастичної системи регулювання струмів дуг дугової сталеплавильної печі. Наведена методика адаптивної оптимізації швидкодіючого контуру регулювання струмів дуг за критерієм мінімальної середньої квадратичної похибки та алгоритм її реалізації.

Розвиток нових і вдосконалення існуючих енерго- і ресурсозберігаючих електрометалургійних технологій передбачає створення оптимальних режимів експлуатації передусім потужних електротехнологічних установок, типовими представниками яких є дугові сталеплавильні печі (ДСП). Електричне навантаження ДСП має різко перемінний, несиметричний, несинусоїдальний і ймовірнісний характер, що, зважаючи на недосконалість існую-