

Я. С. Паранчук¹
 І. Р. Головач¹
 А. Б. Мацігін¹
 В. Б. Цяпа¹

ДОСЛІДЖЕННЯ ОЦІНОК ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ЕЛЕКТРИЧНИЙ РЕЖИМ ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ З РЕГУЛЯТОРОМ АРДМ-Т

¹Національний університет «Львівська політехніка»

Отримано оцінки факторів впливу на електричний режим дугової сталеплавильної печі з регулятором АРДМ-Т на основі кореляційно-регресійного аналізу. Наведено результати досліджень.

Ключові слова: дугова сталеплавильна піч, регулятор АРДМ-Т, фактори впливу, кореляційно-регресійний аналіз.

Вступ

Дугові сталеплавильні печі (ДСП) знайшли широке застосування в чорній металургії для виробництва легованих сталей та прецизійних сплавів. Електричний режим (ЕР) упродовж плавлення характеризується нестабільністю і супроводжується постійними коливаннями потужності дуг. Відхилення електричного режиму від раціонального (оптимального) погіршує показники електротехнологічної ефективності ДСП. Основна вимога, що ставиться до систем автоматичного керування (САК) режимами плавлення ДСП, полягає у необхідності якісної стабілізації координат ЕР на кожній технологічній стадії плавки [1]. Режимам навантаження дугових сталеплавильних печей властивий динамічний випадковий та пофазно несиметричний і взаємозв'язаний характер. На показники енергоефективності та динаміки регулювання координат електричного режиму впливає низка чинників. Найвідчутніше впливає амплітуда та частота збурень, ширина зони нечутливості, а також градієнт потенціалу у стовпі дуги. Один з підходів для отримання інтегральних оцінок їх дії є використання статистичних методів. Застосування цих методів вимагає проведення глибокого статистичного аналізу досліджуваних показників та побудови на основі отриманих результатів математичних моделей процесів зміни координат електричного режиму ДСП.

Результати досліджень

Основним із методів отримання оцінок взаємозв'язків зазначених вище чинників є багатофакторний кореляційно-регресійний аналіз [2]. Пропонується застосовувати цей підхід для побудови факторних моделей, в яких результативним показником виступатиме дисперсія довжин дуг ДСП, а факторами впливу буде градієнт потенціалу на стовпі дуги, показники амплітуди та частоти збурень, а також ширина зони нечутливості використовуваного регулятора потужності дуг. Дослідження виконаємо для регулятора АРДМ-Т.

Багатофакторний кореляційно-регресійний аналіз дає змогу оцінити міру впливу на досліджуваний результативний показник кожного із введених у модель факторів з фіксованим положенням на середньому рівні інших факторів. Важливою умовою при цьому є відсутність функціонального зв'язку між факторами мультиколінеарності. Математично завдання зводиться до знаходження аналітичного виразу, котрий якнайкраще відображував би зв'язок факторних ознак X_1, X_2, \dots, X_n з результативною функцією Y , тобто до знаходження функції:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n). \quad (1)$$

Дослідження проводились на створеній Simulink-моделі системи автоматичного регулювання (САР) довжин дуг дугової сталеплавильної печі ДСП-200, яка реалізована на основі серійного регулятора потужності дуг типу АРДМ-Т-12 (рис. 1).

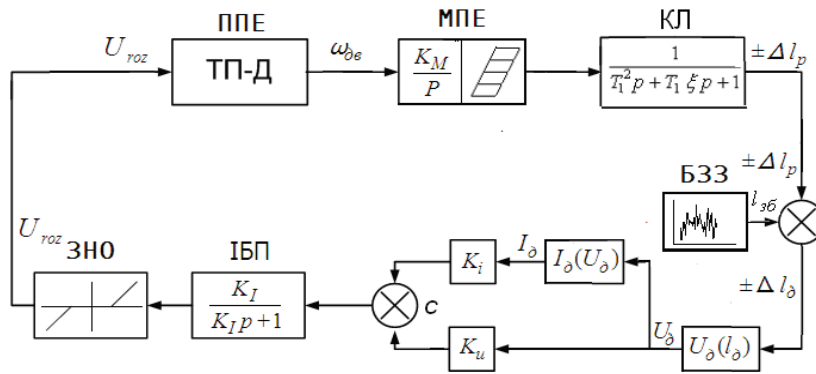


Рис. 1. Структурна блок-схема САР довжин дуг дугової сталеплавильної печі ДСП-200

У досліджуваній структурі САР електропривод переміщення електродів (ППЕ) реалізований за схемою «тиристорний перетворювач—двигун постійного струму» (ТП-Д) з формувальними від’ємними зворотними зв’язками за струмом та швидкістю двигуна, а механізм переміщення електрода (МПЕ) виконаний за схемою «шестерня–рейка». Для адекватного відтворення реальних процесів регулювання довжин дуг в модель САР ДСП увімкнено коливну ланку (КЛ) та блок задання збурень (БЗЗ). Кінематична схема є близькою до зрівноваженої. Елемент «інерційність блоку порівняння» (ІБП) відтворює в моделі інерційність процесу формування сигналу керування і разом з елементом «зона нечутливості—обмеження» (ЗНО) та суматором (С), подають модель блоку формування сигналу неузгодження U_{roz} диференційного регулятора АРДМ-Т.

Для отримання експериментальних значень факторів впливу на електричний режим ДСП виконано серію математичних експериментів на створеній Simulink-моделі САР потужності дуг дугової печі ДСП-200 з регулятором АРДМ-Т-12. Параметри цифрової Simulink-моделі отримані за результатами проведених експериментальних досліджень режимів дугової печі типу ДСП-200, а також під час відпрацювання одиничних збурень за довжиною дуги.

На рис. 2 показано отримані на створеній цифровій Simulink-моделі САР довжин (потужності) дуг печі ДСП-200 залежності зміни довжини $l_d(t)$, струму $I_d(t)$ та напруги $U_d(t)$ дуги під час відпрацювання детермінованих збурень за довжиною дуги $l_{36}(t)$.

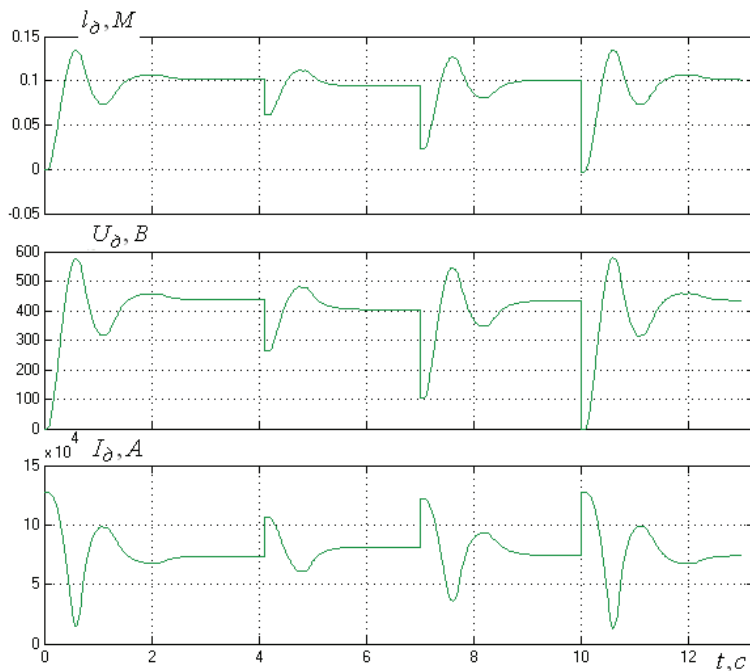


Рис. 2. Часові залежності $l_d(t)$, $U_d(t)$ та $I_d(t)$ при відпрацюванні детермінованих збурень за довжиною дуги

Виконано також дослідження показників динаміки регулювання довжин дуг печі ДСП-200 регулятором потужності АРДМ-Т-12 у разі дії стаціонарних випадкових збурень, статистичні характеристики яких відповідали характеристикам реальних збурень за довжиною дуги, що виникають у дугових проміжках дугової печі на різних технологічних етапах плавлення. Часові залежності збурень отримувались апріорно з білого шуму шляхом відповідної його фільтрації для кожної технологічної стадії плавлення. Отримані у цих дослідженнях на цифровій Simulink-моделі процеси зміни координат дугових проміжків, а саме часові залежності $l_d(t)$, $U_d(t)$ та $I_d(t)$ для значень градієнта потенціалу на стовпі дуги 4,3 В/мм та 10 В/мм з шириною частотного спектру збурень за довжиною дуги частотою 0...5 Гц, показані на рис. 3а та б, відповідно.

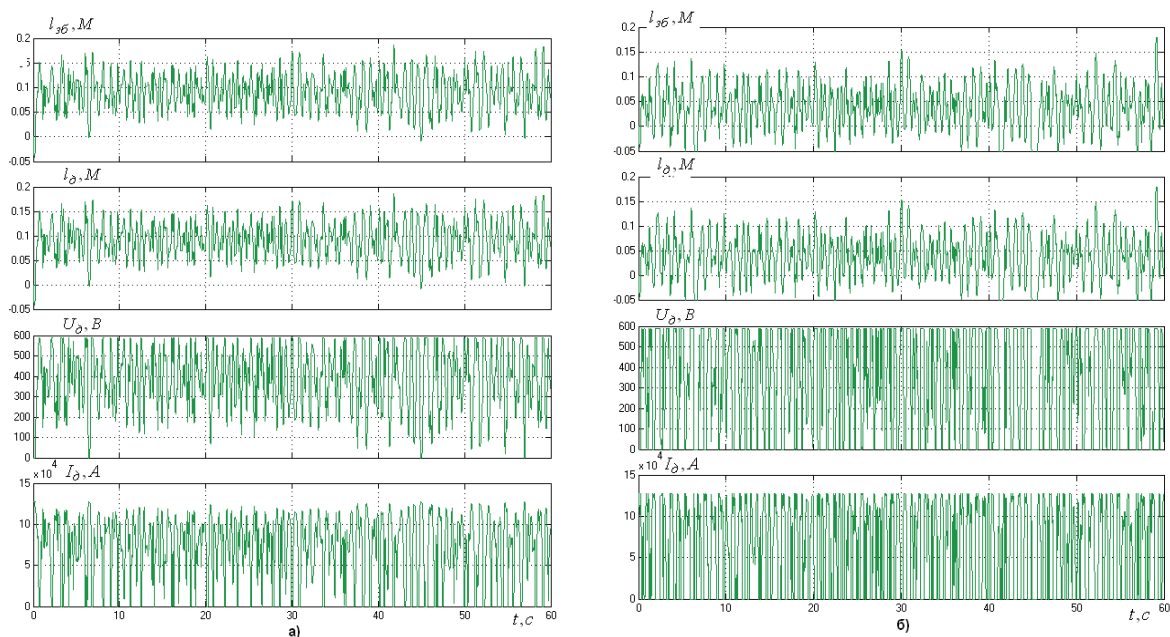


Рис. 3. Часові залежності $l_{зб}(t)$, $l_d(t)$, $I_d(t)$ та $U_d(t)$ координат дугових проміжків у разі дії випадкових збурень для градієнта потенціалу на стовпі дуги: а — 4,3 В/мм; б — 10 В/мм

Для проведення факторного аналізу на основі отриманих результатів модельних досліджень складемо таблицю інтегральних оцінок факторів впливу та результуючого показника (табл.1).

Таблиця 1

Оцінки факторів впливу та результуючого показника дугової сталеплавильної печі ДСП-200 з регулятором АРДМ-Т-12

Фактор № 1 Градієнт потенціалу в стовпі дуги, В/м	Фактор № 2 Ширина спектра збурень, Гц	Фактор № 3 Амплітуда випадкових збурень, м	Фактор № 4 Ширина зони нечутливості, %	Результуючий показник: дисперсія довжини дуги, м ²
1000	0—1	0,104	±2	0,001271
1500	0—1,7	0,0936	±4	0,001101
3500	0—3,1	0,0728	±8	0,0007721
4300	0—3,7	0,0624	±10	0,0006374
9000	0—5,8	0,0312	±16	0,0002302
10500	0—6,5	0,0208	±18	0,0001412
12000	0—7,2	0,0104	±20	0,00001878

На основі даних таблиці 1 перевіримо значення факторів впливу на властивість мультиколінеарності. Для цього складемо кореляційну матрицю факторів впливу:

$$r = \begin{pmatrix} r_{x_1x_1} & r_{x_1x_2} & r_{x_1x_3} & r_{x_1x_4} \\ r_{x_2x_1} & r_{x_2x_2} & r_{x_2x_3} & r_{x_2x_4} \\ r_{x_3x_1} & r_{x_3x_2} & r_{x_3x_3} & r_{x_3x_4} \\ r_{x_4x_1} & r_{x_4x_2} & r_{x_4x_3} & r_{x_4x_4} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Діагональні елементи матриці r дорівнюють 1. Коефіцієнти парної кореляції r_{x_j, x_k} обчислюються за відомою формулою визначення коефіцієнта парної кореляції, яка у цьому випадку трансформується у такий вираз:

$$r_{x_j, x_k} = \frac{\text{cov}(x_j, x_k)}{\sqrt{\text{var}(x_j)}\sqrt{\text{var}(x_k)}}, \quad (j=1, \bar{m}), \quad (k=1, \bar{m}), \quad (3)$$

де $\text{var}(x_j)$ — вибіркова дисперсія j -го фактора; $\text{var}(x_k)$ — вибіркова дисперсія k -го фактора; $\text{cov}(x_j, x_k)$ — вибіркового коефіцієнта коваріації між j -м і k -м факторами.

На основі формул (2)—(3) отримаємо кореляційну матрицю:

$$r = \begin{pmatrix} 1,00 & 0,99 & 0,99 & -0,99 \\ 0,99 & 1,00 & 0,99 & -1,00 \\ 0,99 & 0,99 & 1,00 & -0,99 \\ -0,99 & -1,00 & -0,99 & 1,00 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

З отриманої матриці (4) випливає, що між всіма факторами впливу існує дуже сильний зв'язок, тобто вони є мультиколінеарними. Тому провести коректний багатофакторний аналіз впливу факторів на результуючий показник неможливо. Для розв'язання окресленої вище задачі вирішено провести почерговий однофакторний аналіз кожного з факторів впливу на результуючий показник.

Побудова кореляційно-регресійної моделі включає декілька етапів [3]. Спершу будують статистично значущі залежності показників моделі. Цей етап полягає у тому, щоб за допомогою спеціальних характеристик отримати оцінки, що показують наявність чи відсутність зв'язку між показниками. Оцінка взаємозв'язку між змінними для підтвердження гіпотези про наявність зв'язку є основою для переходу до наступного кроку — встановлення аналітичної залежності між ознаками. Параметри рівняння регресії розраховуються таким чином, щоб обчислені з рівняння значення залежної ознаки найменшою мірою відрізнялися від фактичних. Це досягається розрахунком параметрів рівнянь регресії за методом найменших квадратів.

Найскладнішою задачею є вибір форми зв'язку, тобто аналітичного виразу зв'язку. На підставі цього за наявними факторами визначають результативну ознаку-функцію. Ця функція має найточніше відображати реальні зв'язки між досліджуваним показником і факторами впливу. Форму зв'язку можна визначати добором функцій різних типів, зокрема рівняння множинної регресії можна виразити у лінійній та нелінійній формах:

$$\begin{aligned} Y_1 &= 0,0005 + 0,000027 \cdot X_1; \\ Y_2 &= -0,00003 \cdot X_2^2 + 0,0002 \cdot X_2 + 0,0002; \\ Y_3 &= -0,00027 + 0,0163 \cdot X_3; \\ Y_4 &= 0,0007 - 0,0000075 \cdot X_4. \end{aligned} \quad (5)$$

де Y_i — розрахункові значення результативної ознаки-функції довжини дуги за різних факторів впливу (i — фактори впливу 1, 2, 3, 4); X_1, X_2, X_3, X_4 — факторні ознаки: градієнт потенціалу в стовпі дуги, амплітуда збурень, частота збурень і ширина зони нечутливості, відповідно.

Наступним етапом є перевірка адекватності моделей (5). Рішення про вибір теоретичної моделі, рівня її якості та вірогідності статистичних висновків у регресійному аналізі визначається значеннями статистичних оцінок адекватності моделі до реальних явищ і процесів. В множинній регресії поруч з оцінкою достовірності моделі в цілому може йти мова про оцінювання достовірності кожного параметра моделі. Ця мета досягається за допомогою критерію Стьюдента.

Після отримання оцінок достовірності кожного параметра моделі за допомогою таблиці розподілу Стьюдента зроблено висновок, що всі параметри моделі статистично значущі й їх можна використовувати для аналізу впливу вищевказаних факторів впливу на вислідну (результуючу) ознаку — дисперсію струмів дуг дугової сталеплавильної печі.

Оцінку адекватності моделі було отримано за допомогою використання F -критерію. З таблиці F -розподілу знаходимо $F_{\text{крит}} = 5,32$. Оскільки розрахункові значення $F_{\text{розн.1}} = 34,57$, $F_{\text{розн.2}} = 13,38$, $F_{\text{розн.3}} = 192,53$, $F_{\text{розн.4}} = 154,46$ перевищують критичне, то можна стверджувати, що побудовані моделі є статистично значущими.

З метою виявлення сили та величини впливу окремих факторів та їхніх резервів обчислюємо коефіцієнти кореляції та коефіцієнти еластичності (табл. 2). Коефіцієнт кореляції показує рівень впливу певного фактора на дисперсію довжини дуги ДСП. Коефіцієнт еластичності показує, на скільки відсотків змінюється дисперсія довжини дуги зі зміною будь-якого з факторів на 1 %.

Результати статистичних досліджень показників факторів впливу

Фактори впливу	Статистичні показники	
	Коефіцієнт кореляції	Коефіцієнт еластичності
Фактор № 1	0,9012	0,2255
Фактор № 2	0,8903	0,2178
Фактор № 3	0,9798	1,4154
Фактор № 4	0,9751	-0,1305

З табл. 2 випливає, що найбільший вплив на дисперсію довжин дуг спричиняє амплітуда випадкових збурень за довжиною дуги, а найменший — частотний діапазон випадкових збурень з найбільшим і найменшим коефіцієнтом кореляції, відповідно. З табл.2 випливає також, що найбільший коефіцієнт еластичності має фактор 3 — амплітуда випадкових збурень за довжиною дуги. Зі збільшенням амплітуди збурень на 1 % дисперсія довжини дуги дугової сталеплавильної печі у середньому збільшується на 1,4152 %. Коефіцієнти еластичності фактора 4 — ширина зони нечутливості, фактора 2 — ширина частотного спектру випадкових збурень та фактора 1 — градієнт потенціалу на стовпі дуги не є такими значними і становлять — 0,1305; 0,2178; 0,2255, відповідно.

Висновки

На основі отриманих результатів досліджень можна зробити висновок про адекватність та правильність складених моделей та наявність сильного зв'язку між дисперсією вихідної координати — довжиною дуги і факторами, що впливають на її значення, а саме: градієнтом потенціалу в стовпі дуги, амплітудними оцінками збурень, частотним діапазоном збурень та шириною зони нечутливості. Це дає змогу прогнозувати та проектувати бажані процеси зміни координат електричного режиму дугової печі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Минеев А. Р. Моделирование электро-технологических процессов и установок / А. Р. Минеев, А. И. Коробов, М. Я. Погребисский. — М. : Спутник+, 2004. — 124 с.
2. Райбман Н. С. Что такое идентификация? / Н. С. Райбман. — М. : Наука, 1970. — 117 с.
3. Демиденко Е. З. Оптимизация и регрессия / Е. З. Демиденко — М. : Наука, 1989. — 296 с.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 9.04.2014

Паранчук Ярослав Степанович — д-р. техн. наук, професор кафедри електроприводу та комп'ютеризованих електромеханічних систем, uranchuk@yahoo.com;

Головач Ігор Романович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроприводу та комп'ютеризованих електромеханічних систем;

Мацігін Андрій Богданович — аспірант кафедри електроприводу та комп'ютеризованих електромеханічних систем;

Цяпа Володимир Богданович — канд. техн. наук, старший викладач кафедри електроприводу та комп'ютеризованих електромеханічних систем.

Національний університет «Львівська політехніка», Львів

Ya. S. Paranchuk¹
I. R. Holovach¹
A. B. Matsyhin¹
V. B. Tsiapa¹

Research estimates of the influence factors on the arcs lengths system regulation modes of an electric arc furnace with regulator ARDM-T

¹ National University "Lviv Polytechnic"

The estimates of the influence factors on the arcs lengths system regulation modes of an electric arc furnace with regulator ARDM-T by using regression and correlation analysis are shown. The results of research have been obtained.

Keywords: arc steelmaking furnace, regulator ARDM-T, influence factors, regression and correlation analysis.

Paranchuk Yaroslav S. — Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Chair of Electric Drive and Computerized Electromechanics Systems, yparanchuk@yahoo.com;

Holovach Ihor R. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Electric Drive and Computerized Electromechanics Systems;

Matsyhin Andriy B. — Post-Graduate Student of the Chair of Electric Drive and Computerized Electromechanics Systems;

Tsiapa Volodymyr B. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Electric Drive and Computerized Electromechanics Systems

Я. С. Паранчук¹

И. Р. Головач¹

А. Б. Мацыгин¹

В. Б. Цяпа¹

Исследование оценок факторов влияния на электрический режим дуговой сталеплавильной печи с регулятором ARDM-T

¹Национальный университет «Львівська політехніка»

Получены оценки факторов влияния на электрический режим дуговой сталеплавильной печи с регулятором ARDM-T на основании корреляционно-регрессионного анализа. Представлены результаты исследований.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, регулятор ARDM-T, факторы влияния, корреляционно-регрессионный анализ.

Паранчук Ярослав Степанович — д-р. техн. наук, профессор кафедры электропривода и компьютеризированных электромеханических систем, yparanchuk@yahoo.com;

Головач Игорь Романович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электропривода и компьютеризированных электромеханических систем;

Мацыгин Андрей Богданович — аспирант кафедры электропривода и компьютеризированных электромеханических систем;

Цяпа Владимир Богданович — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры электропривода и компьютеризированных электромеханических систем