

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 дуговых 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-

чих систем регулювання електричного режиму (ЕР), спричинює негативний вплив як на техніко-економічні показники роботи самої ДСП, так і на якість електроенергії мережі живлення, зокрема на значення коефіцієнта потужності і коливання напруги.

Існуючі системи автоматичного регулювання (САР) ДСП, в основі яких лежать детерміновані моделі процесів керування, не дають змоги в умовах дії інтенсивних випадкових нестаціонарних збурень реалізувати бажані (оптимальні за вибраними критеріями) режими роботи ДСП і допускають, зокрема, значний рівень дисперсії координат електричного режиму (струму, напруги та потужності дуг). Тому проблема створення нових високо-ефективних швидкодіючих систем регулювання координат електричного режиму ДСП, що спрямовані на покращання якості регулювання і реалізації оптимальних режимів, є важливою і актуальною науково-технічною задачею.

Одним із напрямків вирішення окресленої проблеми є включення в систему живлення дуг ДСП магнітно-тиристорного перетворювача напруги (МТПН) і створення на його основі в структурі системи регулювання електричного режиму додаткового контуру регулювання струмів дуг [1]. Значне підвищення швидкодії регулювання струму у такій структурі за умови реалізації, адекватного до характеру збурень, оптимального закону регулювання дасть змогу значно покращити динамічну і статичну точність регулювання струму дуги.

Такий контур регулювання, зважаючи на відсутність у його структурі інерційних механічних елементів, має щонайменше на порядок вищу швидкодію (стала часу цього контуру не перевищує  $0,01\text{с}$ ), що дає змогу за умови реалізації в цьому контурі ефективних принципів керування значно підвищити швидкодію регулювання, а значить, і зменшити значення дисперсії струмів дуг, що призводить до покращання техніко-економічних показників функціонування ДСП і зменшення негативного впливу її роботи на показники якості електроенергії в мережі живлення.

Розроблена двоконтурна структура системи керування використовує в контурі струму пропорційно-інтегральний регулятор струму дуги зі сталим на певних часових відтинках сигналом завдання струму дуги, значення якого на кожному стадію визначається директивним графіком проведення плавки. Беручи до уваги яскраво виражену стохастичну природу процесів об'єкта керування [2, 3], аналіз і оптимізацію контуру регулювання струму дуги ДСП проводяться з використанням адекватних цим процесам стохастичних методів, а для аналізу якості регулювання вибираються відповідні кількісні оцінки випадкових процесів. Відповідно з цим для оптимізації регулювання струму в [4] запропонована стохастична методика синтезу за функцією спектральної густини на поточному відтинку стаціонарності збурень параметрів ПІ-регулятора струму дуги. У загальному випадку цю методику можна покласти в основу синтезу цього контуру з іншим типом регулятора: пропорційним, інтегральним, пропорційно-інтегрально-диференціальним тощо, за тим же інтегральним критерієм – мінімумом середньої квадратичної похибки регулювання.

Для реалізації оптимального регулювання струмів дуг упродовж всієї плавки і в різних плавках (при виплавленні різних марок сталі, використанні різного роду шихти тощо) необхідно передбачити адаптацію параметрів (а в загальному випадку, як зазначено вище, і структури) регулятора струму дуги до зміни умов плавки, що віддзеркалюються у зміні стохастичних параметрів збурень, зокрема їх функції спектральної густини. Для розв'язання сформульованої задачі розроблено структуру адаптивної стохастичної системи регулювання струмів дуг ДСП, функціональна блок-схема якої показана на рис. 1.

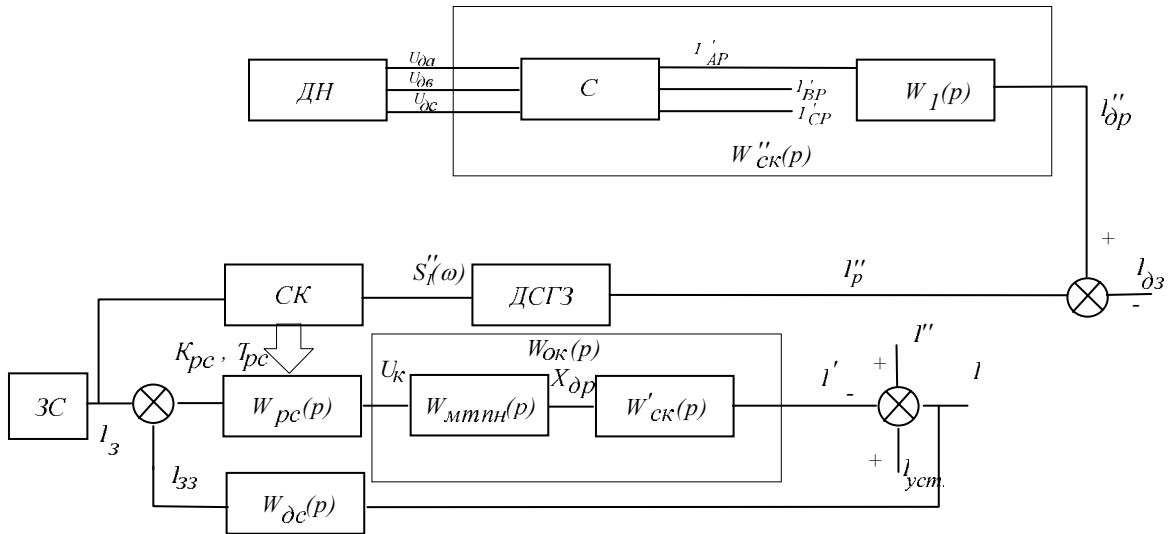


Рис.1. Структурна схема адаптивної стохастичної САР струмів дуг ДСП.

На цій структурній схемі прийнято такі позначення:  $W_{pc}(p)$  і  $W_{dc}(p)$  – передавальні функції регулятора і давача струму дуги;  $W_{ок}(p)$  – передавальна функція об'єкта керування, що складається з передавальних функцій МТПН  $W_{мтпн}(p)$  і силового кола печі за зміною індуктивного опору  $W'_{ск}(p)$ ;  $W''_{ск}(p)$  – передавальна функція силового кола печі за зміною напруги на стовпі дуги, що включає спостерігач  $C$  і інерційну ланку  $W_I(p)$ ;  $ДН$  – давач усереднених напруг на дугах;  $СК$  – стохастичний коректор;  $ДСГЗ$  – давач спектральної густини збурень;  $I_3, I_{33}$  – сигнал завдання і зворотного зв'язку за струмом дуги, що надходять з виходів задавача  $ЗС$  і давача  $ДС$  струму дуги відповідно;  $I, I', I''$  – повний струм дуги і його складові, що є реакціями на зміну еквівалентного індуктивного опору дроселя МТПН і напруги на стовпі дуги  $U_d$  відповідно;  $I_{уст}$  – значення уставки струму електромеханічного контуру;  $U_k$  – напруга керування МТПН;  $X_{dp}$  – прирости еквівалентного індуктивного опору дроселя; МТПН – керуючий вплив електричного контуру регулювання струму дуги.

Основним збурюючим чинником електричного контуру, що спричиняє відхилення струму дуги від заданого  $I_3$  – це прирости струму дуги  $I'$  від зміни напруги на дугах, які своєю чергою визначаються флуктуаціями довжин дуг  $l_d$ , зміною градієнта напруги на стовпі дуги  $\beta$ , а також коливанням анод-катодного спаду напруги на стовпі дуги  $\alpha$ . Для реалізації оптимального регулювання струму дуги в швидкодіючому контурі за критерієм мінімальної середньої квадратичної похибки, на підставі оперативної інформації про спектральну густину процесу збурень  $I''(t)$  цього контуру виконується синтез і здійснюється налагодження параметрів регулятора струму РС. Ця процедура циклічно повторюється упродовж плавки на кожному з відтинків стаціонарності процесу  $I''(t)$  і реалізується стохастичним коректором СК.

Отже, під час функціонування розробленої адаптивної САР струму дуги розв'язуються такі чотири підзадачі:

- отримання поточних процесів збурень  $I''_p(t)$  електричного контуру в кожній фазі;
- оперативний під час плавки розрахунок статистичних характеристик збурень, зокрема функції спектральної густини і отримання її аналітичного виразу;
- синтез параметрів регулятора струму дуги;
- реалізація отриманої оптимальної передавальної функції регулятора струму дуги.

Безпосереднє вимірювання поточних значень вказаних параметрів стовпа дуги при жорстких вимогах до точності є доволі складним технічним завданням. Зважаючи на це, для отримання інформації про процес збурень  $I''(t)$  запропоновано за первинне джерело інформації використовувати поточні усереднені значення напруг на дугах  $U_{\partial A}(t)$ ,  $U_{\partial B}(t)$ ,  $U_{\partial C}(t)$ , оскільки вони тісно пов'язані з параметрами  $I_{\partial}$ ,  $\beta$  і  $\alpha$  і не залежать від струмів дуг:  $U_{\partial} = \alpha + I_{\partial}\beta$ , до того ж безпосереднє вимірювання у фазах процесів  $U_{\partial}(t)$  при тих же вимогах до точності є технічно простішим завданням.

Для отримання процесу  $I''(t)$  на основі контролю напруги на дузі  $U_{\partial}(t)$  у кожній фазі регулювання треба відтворити (змодельовати) процеси, що існують у силовому колі печі при зміні напруги на всьому діапазоні, які описуються передавальною функцією  $W''_{ск}(p)$ . Ця передавальна функція є нелінійною і в першому наближенні її можна подати аперіодичною ланкою першого порядку зі змінним коефіцієнтом

$$W''_{ск}(p) = \frac{K(U_{\partial})}{Tp+1}, \quad (1)$$

де  $K(U_{\partial})$  – статичний коефіцієнт передачі, що визначається із зовнішньої характеристики електропечі;  $T$  – стала часу, значення якої можна визначити експериментально і для різних печей знаходиться в межах 0,01–0,02 с.

Процедуру обчислень з отримання розрахункового процесу збурень  $I''_p(t)$  за усередненим значенням напруги на стовпі дуги  $U_{\partial}$  в кожній фазі можна проводити двома способами, що різняться обсягом необхідних обчислень і точністю отримання шуканого процесу збурень  $I''(t)$ . Процедуру обчислень для отримання процесу за першим способом, що базується на однофазній моделі процесів в ДСП, ілюструє структурна схема, яка показана на рис.2.

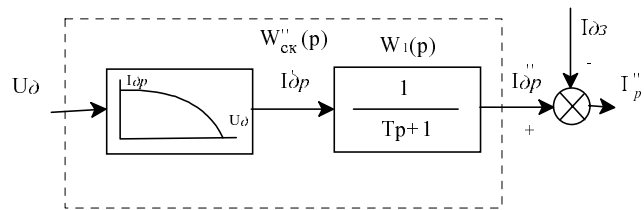


Рис.2. Структурна схема процедури обчислення процесу збурень  $I''(t)$ .

Поточні розрахункові значення струму дуги  $I'_{dp}$  і подальших приростів збурень  $I''_p$  відповідної фази обчислюються на основі однофазної заступної схеми за методикою, наведеною у [5]. Але аналіз результатів, отриманих за цією методикою, показує, що задовільна точність розрахунку процесу збурень  $I''_p(t)$  досягається лише в симетричних режимах роботи печі або близьких до них, що має місце в останніх “спокійних” періодах плавки. Тому обчислення струму дуги  $I'_{dp}$  лише за напругою дуги цієї фази у несиметричних режимах призводить до значної похибки отримання розрахункового процесу збурень  $I''_p(t)$ .

Зважаючи на це, для підвищення точності обчислення процесу  $I''_p(t)$  використано трифазну модель електричних режимів ДСП, яка потребує значно більшого обсягу обчислень у реальному масштабі часу, але дає вищу точність розрахунку процесу збурень  $I''_p(t)$ . Заступна схема кола живлення дуг для розрахунку струмів дуг  $I'_{dp}$  збурень у фазах зображена на рис.3.

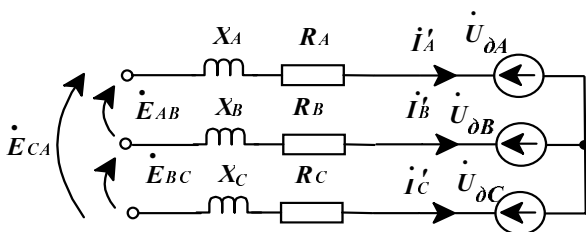


Рис.3. Трифазна заступна схема кола живлення дуг ДСП.

До такої розрахункової схеми за допомогою еквівалентних перетворень можна звести схеми живлення дуг діючих ДСП у будь-якому технологічному періоді плавки, що різняться схемами з'єднань її елементів (короткої мережі, пічного трансформатора, дроселя). Активні  $R_j$  та індуктивні  $X_j$  ( $j=A, B, C$ ) опори фаз зведені до напруг вторинної обмотки пічного трансформатора і враховують відповідні опори всіх елементів схеми живлення, зокрема взаємні індуктивні зв'язки між ділянками короткої мережі. Розрахунок за цією заступною схемою виконується з урахуванням всіх видів несиметрії в колі живлення, в тому числі і напруг для синусоїдальних режимів. Отримані на виходах давачів напруг на дугах значення  $U_{dj}$  у розрахунковій схемі приймаються як еквівалентні ЕРС дуг, що під час обчислень дає змогу врахувати постійність напруг на дугах (їх незалежність від струмів дуг) і виключати з розрахунку нелінійність опору дуги. Для розрахунку струмів дуг  $I_j$  необхідно задати значення опорів  $X_j, R_j$ , або отримати їх з виходів відповідних давачів, вектори лінійних напруг  $\dot{E}_{AB}, \dot{E}_{BC}, \dot{E}_{CA}$  та модулі поточних значень напруг на дугах  $U_{dj}$  і розв'язати подану нижче систему трьох нелінійних рівнянь (3) відносно величин  $\psi, \alpha_1$  та  $\alpha_2$

$$\begin{aligned}
 & \frac{E_{AB}}{Z_4} \sin(\psi - \varphi_4) + \frac{E_{BC}}{Z_2} \sin(\psi - \beta_1 - \varphi_2) + \frac{U_{дА}}{Z_4} \sin \varphi_4 - \\
 & - \frac{U_{дВ}}{Z_3} \sin(\alpha_1 + \varphi_3) + \frac{U_{дС}}{Z_2} \sin(\alpha_3 - \varphi_2) = 0 \\
 & \frac{E_{BC}}{Z_1} \sin(\psi - \beta_1 + \alpha_1 - \varphi_1) - \frac{E_{AB}}{Z_3} \sin(\psi + \alpha_1 - \varphi_3) + \frac{U_{дА}}{Z_3} \sin(\alpha_1 - \varphi_3) + \\
 & + \frac{U_{дВ}}{Z_5} \sin \varphi_5 - \frac{U_{дС}}{Z_1} \sin(\varphi_1 - \alpha_1 - \alpha_3) = 0 \\
 & \frac{E_{BC}}{Z_6} \sin(\psi - \beta_3 - \alpha_3 - \varphi_1) + \frac{E_{AB}}{Z_2} \sin(\psi - \alpha_3 - \varphi_2) + \frac{U_{дА}}{Z_2} \sin(\alpha_3 + \varphi_2) + \\
 & + \frac{U_{дВ}}{Z_1} \sin(\alpha_1 + \alpha_3 + \varphi_1) - \frac{U_{дС}}{Z_6} \sin \varphi_6 = 0
 \end{aligned} \tag{3}$$

далі обчислити значення струмів дуг за такими трьома виразами:

$$\begin{aligned}
 I'_{pA} &= \frac{E_{AB}}{Z_4} \cos(\psi - \varphi_4) - \frac{E_{BC}}{Z_2} \cos(\psi - \beta_1 - \varphi_2) - \frac{U_{дА}}{Z_4} \cos \varphi_4 + \\
 & + \frac{U_{дВ}}{Z_3} \cos(\alpha_1 + \varphi_3) + \frac{U_{дС}}{Z_2} \cos(\alpha_3 - \varphi_2); \\
 I'_{pA} &= \frac{E_{BC}}{Z_1} \cos(\psi - \beta_1 + \alpha_1 - \varphi_1) - \frac{E_{AB}}{Z_3} \cos(\psi + \alpha_1 - \varphi_3) - \frac{U_{дВ}}{Z_5} \cos \varphi_5 + \\
 & + \frac{U_{дА}}{Z_3} \cos(\alpha_1 - \varphi_3) + \frac{U_{дС}}{Z_1} \cos(-\varphi_1 + \alpha_3 + \alpha_1);
 \end{aligned}$$

$$I'_{pC} = -\frac{E_{BC}}{Z_6} \cos(\psi - \beta_3 - \alpha_3 - \varphi_6) - \frac{E_{AB}}{Z_2} \cos(\psi - \alpha_3 - \varphi_2) + \frac{U_{дВ}}{Z_1} \cos(\alpha_3 + \alpha_1 + \varphi_1) + \frac{U_{дА}}{Z_2} \cos(\alpha_3 + \varphi_2) - \frac{U_{дС}}{Z_6} \cos \varphi_6; \quad (4)$$

де  $z_1 e^{j\varphi_1} = B/Z_A$ ;  $z_2 e^{j\varphi_2} = B/Z_B$ ;  $z_3 e^{j\varphi_3} = B/Z_C$ ;  $z_4 e^{j\varphi_4} = B/(Z_B + Z_C)$ ;  $z_5 e^{j\varphi_5} = B/(Z_A + Z_C)$ ;  $z_6 e^{j\varphi_6} = B/(Z_A + Z_B)$ ;  $\psi$  – кут між векторами напруги  $E_{AB}$  і струму  $I_A$ ;  $\alpha_1, \alpha_3$  – кути між векторами струмів  $I_A$  і  $I_B$  та  $I_C$  і  $I_A$ ;  $B = Z_A Z_B + Z_B Z_C + Z_A Z_C$ ;  $\beta_1, \beta_2$  – кути між векторами напруг  $E_{AB}$  і  $E_{BC}$  та  $E_{CA}$  і  $E_{AB}$ .

$$Z_A = \sqrt{R_A^2 + X_A^2}; \quad Z_B = \sqrt{R_B^2 + X_B^2}; \quad Z_C = \sqrt{R_C^2 + X_C^2}.$$

Надалі за розрахованими значеннями струмів  $I'_p$  кожної фази інтегруванням диференційного рівняння (5)

$$\frac{dI''_{дp}}{dt} = \frac{I'_p - I''_{дp}}{T}, \quad (5)$$

отримують розрахункові струми дуг  $I''_{дp}$ . Прирости струмів дуг від зміни напруг на дугах, що є збуреннями швидкодіючого контуру регулювання струмів дуг, запишемо як

$$I''_p = I_{дp}'' - I_{дз}, \quad (6)$$

де  $I_{дз}$  – струм дуги, що пропорційний сигналу завдання контуру регулювання струму дуги.

Описана вище процедура обчислень з визначення вектора приростів струмів дуг  $I''_p$  у кожній фазі виконується на спеціалізованих чи універсальних цифрових обчислювальних пристроях і циклічно повторюється на поточному інтервалі стаціонарності з кроком  $\Delta t$ , значення якого визначається максимальною частотою  $f_{max}$ , яка присутня у спектрі квантованого за часом процесу  $I''(t)$ :  $\Delta t \leq 1/(2f_{max})$ . Експериментальні дослідження статистичних характеристик процесу зміни напруги  $U_d(t)$  на дугах ДСП показують, що інтервал стаціонарності  $T$  для різних печей знаходиться в межах 100–200 с, а максимальна частота  $f_{max}$  у спектрі цього процесу не перевищує 10 Гц. Тому період  $\Delta t$ , з яким необхідно повторювати процедуру обчислення поточного значення збурень  $I''_p$  не повинен перевищувати 0,05с, а нижнє його значення обмежується продуктивністю цифрового обчислювального пристрою, що визначає час виконання описаної процедури обчислень.

Внаслідок циклічного повторення цієї процедури на поточному інтервалі стаціонарності  $T$  отримуємо розрахункові масиви приростів струмів дуг  $I''_p(t_i)$  для кожної фази, що еквівалентні квантованому за часом реальному процесу збурень  $I''(t)$  контуру струмів дуг. На кожному інтервалі  $T$  для отриманих процесів збурень розраховуються значення функції спектральної густини  $S_{I''}(\omega_k)$ , яку для стаціонарного випадкового процесу  $I''(t)$  можна визначити як перетворення Фур'є кореляційної функції цього процесу, тобто

$$S_{I''}(\omega) \cong \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} R(\Delta t \cdot j) \cos(\omega_k \cdot \Delta t \cdot j), \quad (7)$$

де  $R_I(\tau)$  – кореляційна функція процесу  $I(t)$ , яка відповідно з ергодичною теоремою для стаціонарного випадкового процесу обчислюється як середнє за часом від добутку  $I(t)$  і  $I(t+\tau)$ , тобто

$$\begin{aligned} R_I(t) &= M[I(t) \cdot I(t+\tau)] \cong \\ &\cong \frac{1}{N-j} \sum_{i=1}^{N-j} (I(t_i) - M) \cdot (I(t_{i+j}) - M), \end{aligned} \quad (8)$$

де  $M = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T I(t) dt \cong \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(t_i)$  – середнє за часом значення процесу збурень;  $I(t)$  –

отримана реалізація випадкового процесу на поточному інтервалі стаціонарності  $T$ . Спектральну густину  $S_I(\omega)$  можна отримати також безпосередньо по реалізації випадкового процесу  $I(t)$  без попереднього обчислення кореляційної функції прямим перетворенням Фур'є для поточної реалізації цього випадкового процесу [6].

Для проведення за розробленою стохастичною методикою синтезу контуру регулювання струму дуги [4] необхідно мати аналітичний вираз функції спектральної густини поточної реалізації процесу збурень  $I(t)$  у вигляді дробово-раціональної функції з парними степенями поліномів чисельника і знаменника, яка за своїми властивостями є найближчою до наближуваної функції  $S_I(\omega)$ , тобто постає задача наближення таблично-заданої функції спектральної густини збурень  $S_I(\omega_k)$ , визначеної на скінченній множині значень аргументу і отриманої за одним із описаних вище способів. Наведений у [2] аналіз точності наближення функцій спектральних густин збурень, що мають місце у різних технологічних періодах плавки показує, що задовільну точність наближення ( $\leq 3,0\%$ ) для найскладнішої за характером зміни залежності  $S_I(\omega)$  (з максимумом на відрізку частот 1...3 Гц) досягається при використанні такого виразу:

$$S_I(\omega) = \frac{a_0 + a_1 \omega^2}{1 + a_2 \omega^2 + a_3 \omega^4}, \quad (9)$$

Зважаючи на те, що таблично задана функція спектральної густини є недетермінованою, то для визначення параметрів  $a_0, a_1, a_2, a_3$  дробово-раціональної функції (9) застосовувався апарат теорії апроксимації, що ґрунтується на аналітичному методі дослідження екстремумів функцій багатьох незалежних змінних.

Крім сигналу збурень  $I(t)$ , до зовнішніх впливів контуру регулювання струму дуги (рис.2) належить і сигнал керування контуру  $I_3(t)$ , який для проведення синтезу зручно подавати так:

$$I_3(t) = m_{I_3}(t) + I_3(t), \quad (10)$$

де  $m_{I_3}(t)$  – складова сигналу  $I_3(t)$ , яка містить у собі як математичне сподівання випадкової складової сигналу керування, так і регулярну складову цього сигналу;  $I_3(t)$  – центрована випадкова складова сигналу керування. Тому для синтезу контуру струму необхідно як і для процесу збурень  $I(t)$ , оперативно обчислювати необхідні статистичні характеристики сигналу  $I_3(t)$ . Ця процедура виконується аналогічно як і для процесу  $I(t)$  і реалізована у

стохастичному коректорі СК. У разі відсутності випадкової складової в сигналі керування  $I_3(t)$ , для синтезу контуру використовується лише математичне сподівання цього сигналу.

За критерій оптимальності функціонування системи регулювання струму дуги, як сказано вище, приймається мінімум середньої квадратичної похибки  $\varepsilon^2$ . Математичну модель у відповідній фазі керування за цим критерієм можна подати таким функціоналом:

$$I(C) = \frac{1}{T} \int_0^T \varepsilon^2(\bar{X}, \bar{C}) = \min, \quad (11)$$

де  $\varepsilon^2(\bar{X}, \bar{C})$  – вираз середньої квадратичної похибки, що залежить від вектора  $\bar{C}$  параметрів контуру регулювання струму дуги і вектора  $\bar{X}$  випадкових впливів системи. Стосовно розв’язуваної задачі оптимізації за функціоналом (11) вважається, що оптимальний процес керування визначається вектором  $\bar{C}$  параметрів, який становлять налагоджувані параметри регулятора струму дуги, а вектор випадкових впливів – випадковий процес збурень  $I'(t)$  і сигнал керування контуру  $I_3(t)$ , а оптимальність забезпечується відповідним синтезом параметрів  $\bar{C}$  регулятора струму, що дає змогу отримати мінімум функціоналу (11) для поточної сукупності випадкових впливів  $\bar{X}$  і дотриманні обмежень, що накладаються на параметри і координати системи.

Адаптивна оптимізація регулювання струмів дуг у розробленій САР виконується на кожному з відтинків стаціонарності процесу збурень контуру на основі поточної інформації про стохастичні характеристики вектора випадкових впливів  $\bar{X}$ . Внаслідок виконаного синтезу отримуються і реалізуються оптимальні значення параметрів регулятора струму дуги у кожній фазі, тобто виконується адаптація параметрів регулятора струму дуги до відповідної зміни стохастичних характеристик випадкових впливів об’єкта керування. Зазначена процедура виконується розробленою структурою адаптивної стохастичної САР струмів дуг ДСП (рис.2).

Впровадження розробленої адаптивної стохастичної системи регулювання струмів дуг на діючих дугових сталеплавильних печах призводить до зменшення дисперсії струмів дуг у два–три рази, що, своєю чергою, позитивно впливає на техніко-економічні показники ДСП і зменшує негативний вплив на якість напруги в мережі живлення, зокрема зменшує амплітуду коливань напруги.

1. А. с. 1042211 ССРСР, МКИН05В 7/148 Регулятор мощности многофазной электропечи / Б.Д.Денис, О.Ю.Лозинский, Я.С.Паранчук // Открытия. Изобрет. 1983. № 34.
2. Лозинский О., Мазепа С., Паранчук Я. Аппроксимация с использованием ЭВМ спектральных плотностей возмущений, действующих в дуговых сталеплавильных печах // Вестн. Львов. политех. ин-та. 1980. № 140. С.54–56.
3. Лозинский О., Костынюк Л., Паранчук Я. та ін. Автоматизированное распознавание технологических стадий расплавления шихты // Электротехника. 1986. № 9 С.39–42.
4. Паранчук Я. Синтез контура регулювання струму дуги з мінімальною середньоквадратичною похибкою // Вестн. ХПТУ. Спец. вып. по материалам науч.-техн. конф. “Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика”. Крым, Алушта, 13-18 вересня 1999. С.243–246.
5. Марков Н.Д. Электрические цепи и режимы дуговых электропечных установок. М., 1978.
6. Гольденберг Л.М. и др. Цифровая обработка сигналов: Справочник. М., 1985.