

Я.С. Паранчук, Р.Я. Паранчук

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО РЕЖИМУ ДУГОВОЇ ПЕЧІ З НЕЧІТКОЮ МОДЕЛЮ КЕРУВАННЯ

Запропоновано нечіткий закон керування електричним режимом (ЕР) дугової сталеплавильної печі (ДСП). Створено структурну Simulink-модель системи керування ЕР на основі нечіткого закону. Проведено комп'ютерні дослідження динаміки регулювання координат ЕР дугової печі ДСП-200 з використанням диференційного та нечіткого законів керування. Результати досліджень показали, що при використанні нечіткого закону зменшуються дисперсія струмів дуг і питомі витрати електроенергії та зростає продуктивність дугової печі. Бібл. 17, рис.7.

Ключові слова: дугова сталеплавильна піч, електричний режим, нечітке регулювання, автономність, дисперсія.

Предложен нечеткий закон управления электрическим режимом (ЭР) дуговой сталеплавильной печи (ДСП). Разработано структурную Simulink-модель системы управления ЭР на основе нечеткого закона. Проведены компьютерные исследования динамики регулирования координат ЭР дуговой печи ДСП-200 с использованием дифференциального и нечеткого законов управления. Результаты исследований показали, что при использовании нечеткого закона уменьшаются дисперсия токов дуг удельный расход электроэнергии и увеличивается производительность дуговой печи. Библ. 17 рис.7.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, электрический режим, нечеткое регулирование, автономность, дисперсия.

Вступ. Технологічні процеси електromеталургійної галузі характеризуються споживанням значних обсягів електричної енергії. Її основними електротехнологічними агрегатами є дугові сталеплавильні печі (ДСП), в яких виплавляють високолеговані сталі та прецизійні сплави в основному з металевого лому.

Електричний режим (ЕР) ДСП формується сукупністю таких координат, як напруга, струм та потужність системи трифазних дуг, і характеризується нестационарним випадковим та пофазно несиметричним характером зміни. Основною причиною такого складного характеру зміни координат ЕР є неперервна упродовж плавки дія інтенсивних випадкових параметричних збурень у силовому колі живлення трифазних дуг без нульового провідника та флуктуацій довжин дуг, статистичні характеристики яких змінюються упродовж плавки у широких межах, а також недосконалість систем автоматичного керування (САК).

Однією з підсистем в ієрархічній структурі сучасних САК ЕР дугових печей є підсистема регулювання положення електродів. Її основною задачею є якісна стабілізація координат ЕР на рівні заданих оптимальних значень, що оперативно формуються на вищому рівні ієрархії САК ЕР, а інтегральною оцінкою якості їх роботи є дисперсія координат ЕР і перш за все струмів дуг [1-3].

Постановка наукової проблеми та обґрунтування її актуальності. Якісна стабілізація координат ЕР підсистемою нижчого рівня дає змогу поліпшити показники енергоефективності та електромагнітної сумісності і, крім цього, додатково посилює ефективність реалізації стратегій оптимального керування. Тому задача розроблення рішень для покращення показників якості стабілізації координат ЕР ДСП на рівні заданих значень, і, особливо, потужних та надпотужних печей, є важливою та актуальною, так як це дасть змогу комплексно поліпшити показники енергоефективності та електромагнітної сумісності режимів ДСП та електромережі живлення.

Огляд літературних джерел. Більшість сучасних систем автоматичного регулювання (САР) положення електродів ДСП представляються електромеханічними чи електрогідравлічними регуляторами потужності дуг, наприклад АРДМ-Т чи АРДГ відповідно [1-5].

Вказані САР положення електродів використовують переважно чотири моделі формування сигналу керування на переміщення електродів: диференційну та імпедансну моделі та моделі керування за відхиленням напруги та струму дуги від заданих значень [4, 5]. Під моделлю (законом) керування розуміємо математичну модель формування сигналу розузгодження ЕР, який САР трансформує у відповідні переміщення електродів. Кожній з цих моделей властиві певні переваги та недоліки при регулюванні збурень у різних станах ЕР.

Результати дослідження показників динаміки при використанні різних законів у двоконтурній структурі САК електричного режиму ДСП приводяться у роботах [6, 7]. У такій структурі закони керування ЕР проявляються особливо. З отриманих у [6, 7] результатів випливає, що закони керування суттєво впливають на показники динаміки, енергоефективності та електромагнітної сумісності як в одно-, так і в двоконтурних структурах САК ЕР ДСП. У них показано, що оптимізаційними параметрами моделей формування сигналу розузгодження є сама залежність формування сигналу розузгодження $U_r(U_a, I_a)$ та її коефіцієнти, а також залежність штучної зовнішньої характеристики $I_a(U_a)$ двоконтурної САК ЕР ДСП.

Більшість з існуючих регуляторів потужності дуги в одноконтурних САК функціонують за диференційною моделлю формування сигналу розузгодження ЕР [4, 5]:

$$U_r(U_a, I_a) = a \cdot U_a - b \cdot I_a, \quad (1)$$

де a, b – сталі коефіцієнти, які задають усталені значення напруги, струму та потужності дуги; U_a, I_a –

поточні значення напруги та струму дуги; U_r – сигнал розузгодження електричного режиму.

За використання моделі (1) виконується надійне запалювання дуг у режимах обривах дуг (о.д.) та коротких замикань (к.з.), тобто виконується адекватне відпрацювання екстремальних збурень ЕР та близьких до них. Але при дії малих та середніх відхилень довжин дуг сигнал розузгодження за цією моделлю не завжди адекватно відповідає реальній довжині дуги – стану ЕР у цій фазі. Причиною цього є використання струму дуги у моделі диференційного закону (1), бо струм фази за чинної трифазної системи живлення трифазних дуг без нульового провідника визначається не лише довжиною (напругою) дуги даної фази, але залежить від довжин дуг (збурень) інших фаз.

Саме на цей недолік наголошується в роботах [8, 9]. Там вказується, що використання струмів дуг в моделях керування рухом електродів призводить до порушення автономності фазних каналів регулювання довжин (напруг, струмів, потужностей) дуг.

Відоме регулювання ЕР і за відхиленням напруги дуги від заданого значення (напругова модель)

$$U_{r,1}(U_a) = k \cdot (U_a - U_{a.set}), \quad (2)$$

де $U_{r,1}(U_a)$ – залежність сигналу розузгодження ЕР; k – коефіцієнт підсилення регулятора; $U_{a.set}$ – уставка регулятора за напругою дуги [4, 5].

За цим законом отримується досконале регулювання в режимах малих та середніх відхилень довжин дуг, але при екстремальних збуреннях ЕР за причини зміщення нульової точки вектора напруг дуг, погіршується динаміка руху електродів у режимах запалювання дуг.

У деяких регуляторах ЕР фірм Siemens та Danieli використовують варіанти імпедансного закону регулювання, за якими регулювання довжин дуг виконується за відхилення повного імпедансу фази від заданого значення (адаптивний регулятор імпеданса) [10-12]. Але при обчислюванні фазних імпедансів теж використовуються струми фаз, що за вказаних вище причини не дає змоги у повній мірі отримувати пофазну автономність процесу регулювання довжин дуг.

У роботах [12, 13] розглядається удосконалений гідропривод механізму переміщення електродів з сервоклапаном та нелінійною регульовальною характеристикою та адаптивною нелінійною моделлю стабілізації імпеданса фази. У роботах [8, 11, 14] розглядається регулювання за нелінійною моделлю адмітанса. В цих роботах наголошується, що такі моделі є простішими у налагодженні та мають покращені динамічні характеристики у порівнянні з іншими регуляторами ЕР. Але ці моделі в околі точки заданого ЕР є чутливими до дії збурень інших фаз, що апріорно негативно впливає на динамічну точність стабілізації координат ЕР.

Аналіз інших сучасних технічних рішень для САР ЕР показує, що удосконалення моделі формування сигналу розузгодження U_r , у функції якого формуються сигнали U_c^{la} керування рухами електродів, є дієвим чинником і важливою та актуальною задачею у поліпшенні показників енергоефективності ДСП.

Метою даної роботи є підвищення ефективності керування режимами роботи дугової сталеплавильної печі на основі удосконалення моделі регулювання довжин дуг.

Обґрунтування напрямку дослідження. Процес керування ЕР та регулювання координат ДСП в умовах дії нестационарних випадкових збурень проходить в умовах неповної інформації про зміну параметрів елементів та координат електричного кола живлення трифазних дуг ДСП, бо реалізувати точний оперативний в режимі on-line їх експлуатаційний контроль неможливо. Тому за умов складності процесів у силовому колі та їх математичного опису, наявності чинників невизначеності в керуванні, доцільним для задач керування ЕР ДСП є використання інтелектуальних методів, зокрема використання моделей нечіткого керування, бо вказані особливості та природа процесів в ДСП відповідають особливостям застосування та функціонування моделей нечіткого керування [15].

Основні результати дослідження. З наведеного випливає, що основна увага дослідження повинна бути приділена удосконаленню системотехніки САР довжин дуг.

На рис. 1 показано блок-схему електромеханічного регулятора потужності дуг типу АРДМ-Т, на основі якого ґрунтується запропонована системотехніка нечіткого адаптивного регулювання довжин дуг ДСП.

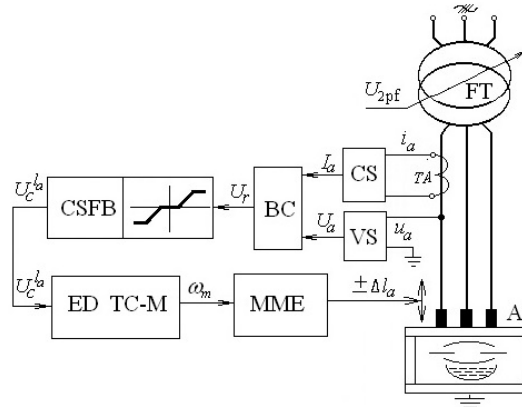


Рис. 1. Функціональна блок-схема САР довжин дуг ДСП

Трифазна система дуг дугової печі АФ живиться від вторинної обмотки пічного трансформатора FT з фазною напругою U_{2pf} . Електричний режим у наведеній САР регулятора АРДМ-Т регулюється за диференціальним законом, а сигнал розузгодження $U_r(U_a, I_a)$ ЕР формується у блоці порівняння ВС за моделлю (1). Поточні діючі значення напруги U_a та струму I_a дуги формуються на виходах датчиків напруги VS та струму CS дуги відповідно. На виході блока формування сигналу керування CSFB у функції сигналу розузгодження U_r з врахуванням зони нечутливості, коефіцієнтів підсилення САР на підняття та опускання електродів, обмежень на максимальні швидкості підняття та опускання електродів формується сигнал керування U_c^{la} рухом електродів. Електропривод, що в регуляторі АРДМ-Т-12 представлений реверсивною системою «тиристорний перетворювач – двигун постійного струму» (ED TC-M), та механізм переміщення електрода (ММЕ) типу «шестерня-рейка» трансфо-

рмують сигнал керування U_c^{la} у відповідні рухи електрода $\pm \Delta l_a$ в напрямі ліквідації збурень.

На рис. 2 зображено природну зовнішню характеристику $I_a(U_a)$ та залежність потужності дуги $P_a(U_a)$ дугової сталеплавильної печі ДСП-200. На цьому ж рисунку показано точки усталеного режиму печі $A(U_{a.set}, I_{a.set})$ та заданої потужності дуг $B(U_{a.set}, P_{a.set})$, де $U_{a.set}=198,3$ В; $I_{a.set}=43,97$ А; $P_{a.set}=8,72$ МВт – уставки за напругою, струмом та потужністю дуги відповідно.

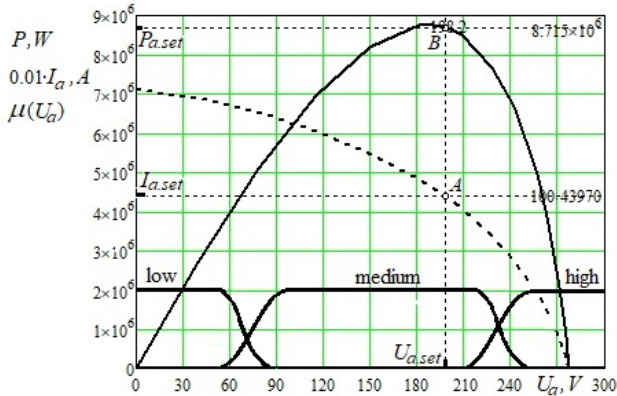


Рис. 2. Зовнішня характеристика $I_a(U_a)$ і характеристика потужності $P_a(U_a)$ дуг дугової печі ДСП-200 та функції приналежності $\mu(U_a)$ лінгвістичної змінної «напруга дуги»

Основною задачею САР ЕР ДСП є зменшення дисперсії координат ЕР у процесі плавлення, тобто максимально збільшити час роботи печі в режимах околу робочої точки A печі, тоді значення всіх показників енергоефективності наблизяться до максимальних, а дисперсія координат ЕР при цьому мінімізується.

Для цього замість моделі (1) в блоці порівняння БП запропоновано використовувати адаптивну до зміни станів ЕР модель керування, яка на основі принципів нечіткої логіки об'єднує модель модифікованого диференційного закону

$$U_{r,2}(U_a, I_a) = a \cdot U_a - b \cdot (I_a - I_{a.set}) \quad (3)$$

та напругового закону (2).

За такого рішення в режимі on-line активним у кожній фазі встановлюється закон керування $U_r(U_a, I_a)$, що відповідає поточному стану ЕР у цій фазі. Стани ЕР у фазах ідентифікуються за напругою дуги фази, бо напруга на стовпі дуги однозначно і лінійно залежить від її довжини $U_a = \alpha + \beta \cdot l_a$, де α, β – анод-катодні падіння напруги на стовпі дуги; l_a – довжина дуги. Експлуатаційний контроль напруги U_a дуги пропонується виконувати пристроєм, що функціонує на основі нейромережевих технологій ідентифікації [16]. Прийнята вище відповідність напруг на дугах станам ЕР (довжинам дуг) описується показаними на рис. 3 функціями приналежності $\mu(U_a)$. Зміну законів керування (моделей розрахунку $U_r(U_a, I_a)$) у фазах запропоновано виконувати за нечіткою моделлю Такагі-Сугено.

У процесі керування ідентифікуються три стани ЕР: режим експлуатаційного короткого замикання та близькі до нього (це короткі дуги), раціональні режими (середні дуги) – це режими в околі робочої точки печі A , та режим обриву дуги та близькі до нього (довгі дуги).

Діапазон низьких напруг (це короткі дуги) в моделі системи нечіткого виводу Такагі-Сугено описується термом *low* (це стан к.з. чи близьких до нього режимів), середніх – *medium*, а довгих – *high* (це стани о.д. чи близьких до нього) (рис. 2). Терми лінгвістично змінної U_a подані функціями приналежності типу *gauss2mf*.

У станах ЕР в околі робочої точки A сигнал розузгодження обчислюється за напруговим законом (2), бо він дає змогу реалізувати автономне (пофазно незалежне) регулювання довжин дуг. Це підвищує динамічну точність стабілізації координат ЕР на рівні уставок.

У станах ЕР, що виникають при дії екстремальних збурень – к.з., о.д. чи близьких до них, активним для формування сигналу розузгодження $U_r(U_a, I_a)$ встановлюється удосконалений диференційний закон (3), за якого, на відміну від напругового (2), краще реалізуються процеси запалювання дуг.

На рис. 3 показано розроблену структурну схему блока порівняння БП (рис. 1), що реалізує у кожній фазі регулювання нечітку адаптивну до стану ЕР модель формування сигналу розузгодження

$$U_r(U_a, I_a) = (1 - k(U_a)) \cdot U_{r,1}(U_a) + k(U_a) \cdot U_{r,2}(U_a, I_a) \quad (4)$$

Наведена структурна схема ілюструє реалізацію запропонованої нечіткої адаптивної до станів ЕР моделі (4) обчислювання сигналу розузгодження $U_r(U_a, I_a)$ ЕР. У функції цього сигналу у блоці CSFB (рис. 1) формується сигнал керування рухом електродів U_c^{la} .

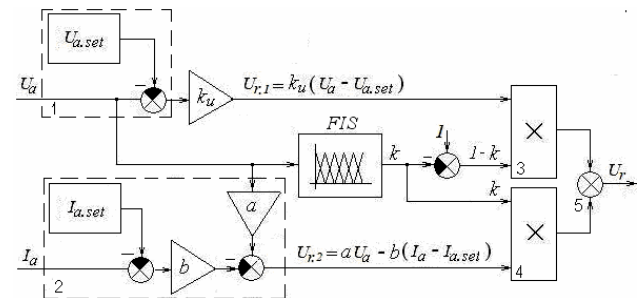


Рис. 3. Структурна схема БП з адаптивною до зміни станів ЕР нечіткою моделлю формування сигналу розузгодження

Нечітка адаптація процесу регулювання реалізується системою нечіткого виведення FIS, яка функціонує на основі моделі Такагі-Сугено (рис. 3). Вхідною лінгвістичною змінною FIS є діюче значення напруги дуги U_a . Для її оперативного опрацювання в блоці FIS реалізовано наступну базу правил нечітких продукцій:

1. if $U_a \in low$ then $k = 1$ [1] ;
2. if $U_a \in medium$ then $k = 0$ [1] ;
3. if $U_a \in high$ then $k = 1$ [1] .

Прийнятим вище алгоритмічним та параметричним степеням свободи системи нечіткого виведення FIS відповідає показана на рис. 4 залежність $k(U_a)$.

У процесі відпрацювання збурень ЕР у блоці 1 (рис. 3) неперервно формується сигнал розузгодження за законом відхилення напруги $U_{r,1}(U_a)$ (2), та за модифікованим диференційним законом $U_{r,2}(U_a, I_a)$ (3) у блоці 2. Ці сигнали розузгодження у блоках 3 та 4 перемножуються на $1-k$ та k відповідно, а далі у сума-

торі 5 у відповідності з моделлю (4) розраховується $U_r(U_a, I_a)$. Із запропонованої нечіткої моделі керування (4) випливає, що у точці A заданого режиму сигнал розузгодження $U_r(U_{a,set}, I_{a,set}) = 0$.

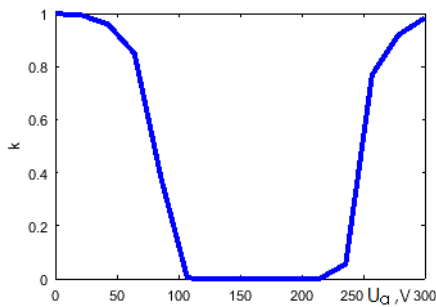


Рис. 4. Залежність $k(U_a)$ системи нечіткого виведення FIS

У режимах дії екстремальних збурень керування рухом електродів виконується за диференціальним законом ($k \cong 1$), за якого реалізується ефективне для надійного запалювання дуг керування рухами електродів.

У режимах близьких до заданого ЕР ($k \cong 0$) – окол точки $A(U_{a,set}, I_{a,set})$ керування рухом електродів реалізується за законом відхилення напруги дуги (2). При цьому отримується автономне пофазне керування рухом електрода.

Дослідження ефективності розробленої нечіткої адаптивної до станів ЕР моделі регулювання довжин дуг проведено на трифазній у миттєвих координатах Simulink-моделі САР положення електродів дугової печі ДСП-200 [6, 17]. Ця модель прийнята базовою. На ній досліджувалася динаміка САР ЕР з регулятором потужності АРДМ-Т-12, що використовується на цій печі. У подальшому, в блоці порівняння цієї Simulink-моделі реалізувався нечіткий закон (4) формування сигналу розузгодження (рис. 3). На такій Simulink-моделі досліджувалася динаміка регулювання координат ЕР з використанням запропонованої нечіткої моделі регулювання довжин дуг.

Для адекватного відтворення в Simulink-моделях станів та динаміки регулювання координат ЕР у різних технологічних стадіях плавлення, в них закладено можливість реалізації відповідних стадіям плавлення моделей динамічних вольт-амперних характеристик (ДВАХ) дуг $u_a(i_a)$ та моделей генерування випадкових процесів збурень $f_{ia}(t)$ за довжинами дуг.

Для цього в Simulink-моделях передбачено можливість реалізації трьох моделей ДВАХ: лінійної $u_a(t) = R_a(t) \cdot i_a(t)$, нелінійної на основі функції арктангенса

$$u_a(t) = 2 \cdot E_{am} \cdot \arctan(k \cdot i_a(t)) / \pi,$$

та нелінійної на основі диференційного рівняння Кассі

$$\theta_a \cdot \frac{dg_a(t)}{dt} = \left(\frac{u_a(t)}{E_{am}} \right)^2 \cdot g_a(t),$$

де $g_a(t)$, $R_a(t)$ – миттєва провідність та опір дуги; E_{am} – проти-ЕРС дуги; $u_a(t)$, $i_a(t)$ – миттєві напруга та струм дуги, θ_a – стала часу дуги, що характеризує її теплову інерційність.

В Simulink-моделях САР ЕР реалізовано 3 генератори незалежних випадкових процесів зі змінюва-

ними параметрами їх стохастичних характеристик. У процесі комп'ютерних досліджень генерувалися випадкові процеси, які різнилися частотним спектром та амплітудними характеристиками, і які відповідали процесам збурень, що діють на технологічних стадіях проплавлення колодязів в шихті, обвалів шихти та окислювання розплаву у дугової печі ДСП-200.

Комп'ютерні дослідження показників динаміки регулювання довжин дуг виконувалися при реалізації в Simulink-моделі САР ЕР диференційного закону (1) формування сигналу розузгодження, що використовується в регуляторі АРДМ-Т-12 дугової печі ДСП-200, та при використанні запропонованого нечіткого закону $U_r(U_a, I_a)$. (4). З метою коректного порівняння динаміки обох законів, дослідження виконувалися при дії однакових реалізацій детермінованих та випадкових збурень, що відповідали досліджуваному стадію плавлення.

За результатами порівняльного аналізу показників динаміки регулювання координат ЕР при використанні обох законів регулювання довжин дуг формулювалися висновки про ефективність запропонованої нечіткої моделі (4) у порівнянні з диференційною (1).

На рис. 5 показано отримані на Simulink-моделях часові залежності напруг та струмів дуг печі ДСП-200 при відпрацюванні послідовності детермінованих збурень, а саме, симетричного трифазного експлуатаційного к.з. $t \in 0.5-1.75$ с; однофазного к.з. у фазі С $t \in 1.75-2.8$ с та близького до обриву дуги у фазах А та В $t \in 2.8-4$ с, диференційною (1) та нечіткою (4) моделями регулювання.

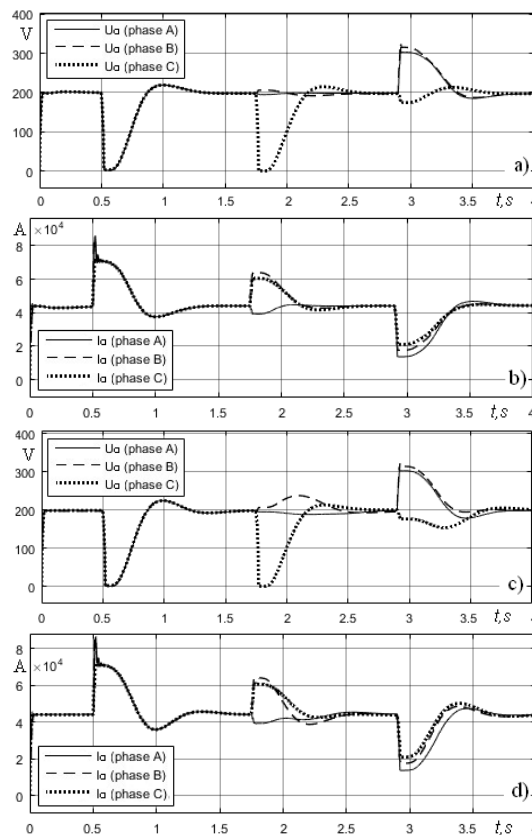


Рис. 5. Часові залежності напруг та струмів дуг печі ДСП-200 при регулюванні детермінованих збурень: a, b – нечітка модель (4), c, d – диференціальна модель (1)

Трифазне симетричне експлуатаційне к.з. відпрацьовується обома моделями $U_r(U_a, I_a)$ однаково, бо у цьому режимі взаємовпливи фазних навантажень відсутні. Аналіз отриманих процесів $U_{aj}(t)$ ($j=A,B,C$) відпрацьованні несиметричних детермінованих збурень показує, що при нечіткій моделі (4) регулювання довжини дуги відбуваються лише у тих фазах, де виникли відхилення довжини дуги. При цьому рухи електродів у фазах, де збурення відсутні, є мінімальні. Виникають вони лише у перші моменти дії екстремальних збурень, коли використовується диференційний закон (1) для запалювання дуг. При диференційній моделі (1) регулювання (регулятор АРДМ-Т-12) переміщення електродів у певних станах ЕР є хибними, вони не завжди відповідають фазним станам ЕР.

Ці висновки підтверджується також і аналізом часових залежностей фазних сигналів розузгодження $U_{rj}(t)$ і швидкостей $\omega_j(t)$ двигунів переміщення електродів при відпрацьованні цих же детермінованих збурень, які показані на рис. 6.

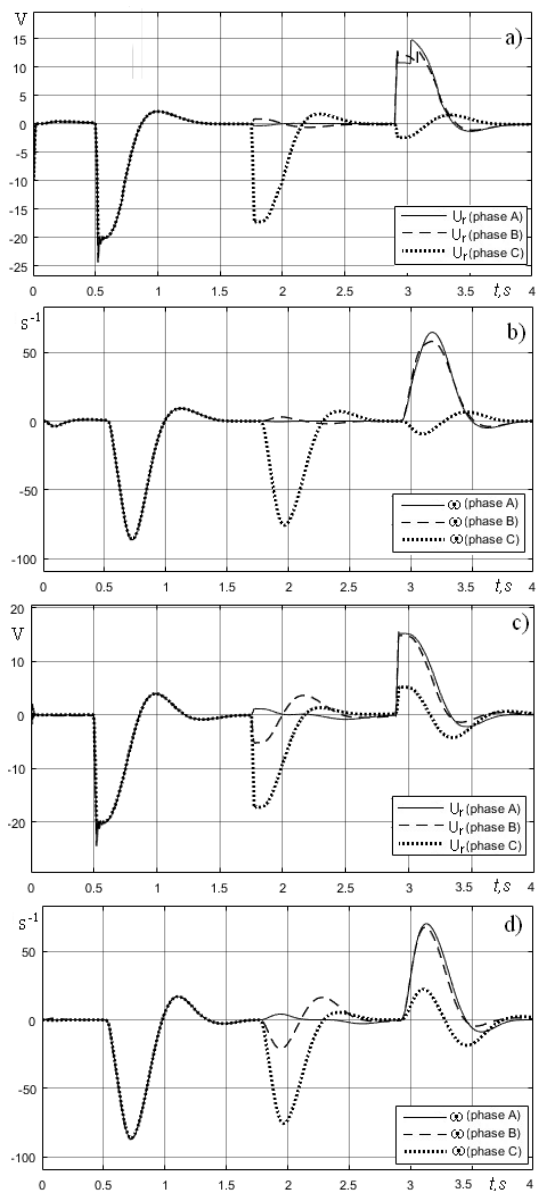


Рис. 6. Часові залежності сигналів розузгодження $U_{rj}(t)$ та швидкостей $\omega_j(t)$ двигунів ММЕ при нечіткій (4) (a, b) та диференційній (1) (c, d) моделях регулювання довжин дуг

Показані на рис. 5 та рис. 6 динамічні процеси регулювання детермінованих збурень у такому «числовому» вигляді на інтервалі плавки трапляються рідко. Тому їх дослідження та аналіз проведено лише як тестування з метою підтвердження коректності функціонування спроектованої системи нечіткого виведення FIS в структурі САР ЕР. Для повноти їх аналізу зазначимо, що час регулювання досліджених детермінованих збурень при використанні нечіткої моделі (4) блока порівняння БП є на 10-20 % меншим за використання диференційної (1). Середня по фазах інтегральна квадратична оцінка якості $I_{sq} = \int_0^4 (\bar{I}_a - I_a(t))^2 dt$ регулювання цих збурень на інтервалі $t \in [0,4]$ с покращилася на 8,6 %. Значення цієї оцінки пропорційне зменшенню втрат потужності в короткій мережі ДСП.

Отримані значення показують підвищення швидкодії регулювання, покращення динамічної точності стабілізації координат ЕР та поліпшення енергоефективності ДСП при регулюванні детермінованих збурень нечіткою моделлю (4) БП.

Але отримати інтегральну оцінку ефективності запропонованої нечіткої моделі регулювання довжин дуг можна лише на прикладах регулювання пофазно несиметричних випадкових збурень за довжинами дуг, які є основними збуреннями у процесі плавлення в ДСП.

Для цього проводилися комп'ютерні симулювання режимів регулювання випадкових збурень на інтервалах стаціонарності $T_c = 180-240$ с їх зміни для різних технологічних стадій плавлення при використанні обох моделей регулювання. На рис. 7 показано отримані на Simulink-моделях фрагменти $t \in 0-30$ с цих процесів регулювання координат ЕР за використання розробленої нечіткої моделі (4) (рис. 7,b, рис. 7,c) та за диференційного закону (1) (регулятор АРДМ-Т-12) (рис. 7,d, рис. 7,e) печі ДСП-200. При цьому процеси збурень $f_{aj}(t)$ (рис. 7,a) відповідали стадії обвалів шихти.

На цьому рисунку показано процеси зміни напруг $U_{aA}(t)$ та струмів $I_{aA}(t)$ дуг фази А. Аналіз отриманих у цих комп'ютерних експериментах процесів $I_{a,j}(t)$ показує, що дисперсія струмів дуг за використання нечіткої (4) моделі регулювання склала: $D_{I_A} = 168,3 \text{ кА}^2$; $D_{I_B} = 159,3 \text{ кА}^2$; $D_{I_C} = 181,2 \text{ кА}^2$, а за диференційної моделі $D_{I_A} = 236,3 \text{ кА}^2$; $D_{I_B} = 235,1 \text{ кА}^2$; $D_{I_C} = 219,9 \text{ кА}^2$. При цьому середня по фазах дисперсія струмів дуг для цих моделей регулювання склала: $D_{I_{fuz}} = 169,6 \text{ кА}^2$, $D_{I_{dif}} = 203,3 \text{ кА}^2$ відповідно, а середнє по фазах зменшення дисперсії струмів дуг $\Delta D_I = 33,7 \text{ кА}^2$ або 4,5 % від максимально можливої дисперсії струмів дуг.

Дослідження динаміки регулювання струмів дуг на інших технологічних стадіях плавлення, тобто за дії випадкових збурень з іншими амплітудними та частотними характеристиками, показали, що дисперсія струмів дуг при використанні запропонованої нечіткої моделі регулювання зменшувалася на 3-7,5 %.

Згідно відомих результатів досліджень, за отриманої оцінки зниження дисперсії струмів дуг на

3-7,5 %, продуктивність дугової печі підвищується на 4-5 %, а питомі витрати електроенергії знижуються на 3-4 %. Для надпотужної печі ДСП-200 це дає суттєве поліпшення показників електротехнологічної ефективності.

У подальшому планується дослідити вплив на показники динаміки інших алгоритмічних та параметричних степенів свободи моделі системи нечіткого виведення FIS на динаміку регулювання координат ЕР та на показники енергоефективності дугової печі.

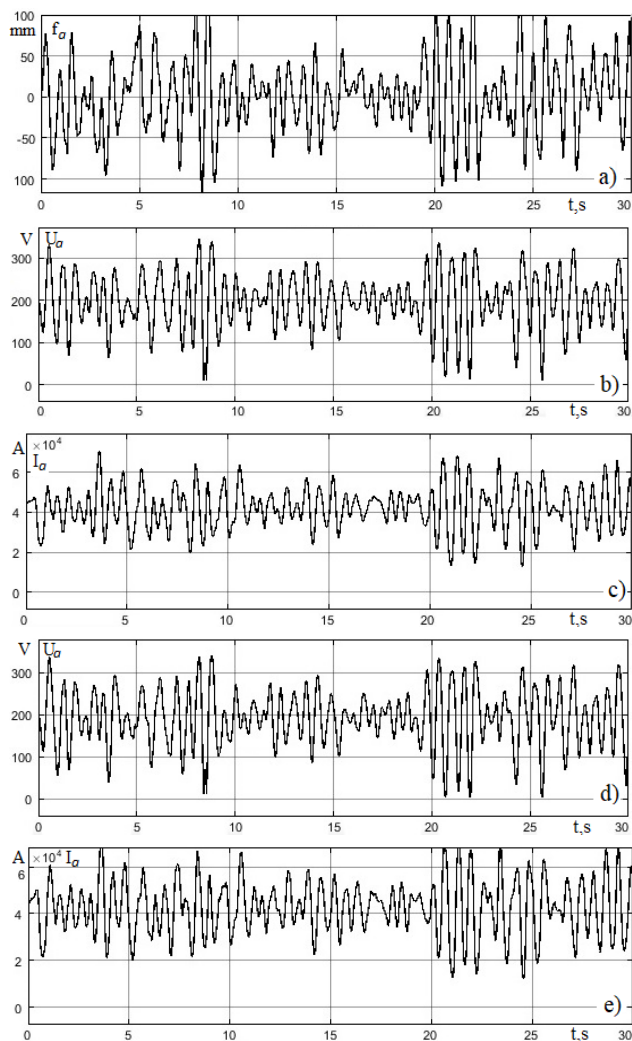


Рис. 7. Часові залежності збурень $f_{a,A}(t)$ (a), напруг $U_{a,A}(t)$, струмів $I_{a,A}(t)$ дуг при використанні нечіткої (4) (b, c) та диференційної (1) (d, e) моделей регулювання довжин дуг

Висновки.

1. Запропонована нечітка модель формування сигналу розузгодження ЕР з оперативною адаптацією до його поточного стану у кожній фазі у порівнянні з відомими моделями керування дає змогу реалізувати пофазно автономне регулювання довжин дуг і підвищити ефективність керування режимами роботи ДСП.

2. Підтверджено можливість реалізації пофазного автономного відпрацювання детермінованих та випадкових збурень ЕР в діапазоні середніх довжин дуг при використанні запропонованої нечіткої моделі, що дає змогу у середньому по фазах на різних стадіях плавлення зменшити дисперсію струмів дуг ДСП на 3-7,5 %, та на цій основі підвищити продуктивність

ДСП на 4-5 %, і зменшити питомі витрати електроенергії на 3-4 %.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Казаков С.В., Гартен В. Восьмая международная конференция по электрометаллургии стали. *Электрометаллургия*, 2005, № 12, С. 36-43.
2. Кудрин Б.И. Ретроспективные и перспективные взгляды на электропотребление в электрометаллургии. *Электрометаллургия*, 2003, № 10, С. 2-13.
3. Лопухов Г.А. Состояние и тенденции развития электросталеплавильного производства (по материалам 33 Конференции ПСИ). *Электрометаллургия*, 2000, № 7, С. 35-37.
4. Маслов Д.В. Разработка алгоритмов и систем управления дуговыми сталеплавильными печами, снижающих поломки электродов: автореф. дис. канд. техн. наук. – Москва, 2014.
5. Люта А.В. Удосконалена система управління приводом переміщення электродів дугових сталеплавильних печей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Донецьк, 2013.
6. Lozynskiy O., Paranchuk Y., Stakhiv P. The study of dynamics of the two-loop arc furnace electric mode ACS on a Simulink-model. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2018, no. 12, pp. 24-27. doi: 10.15199/48.2018.12.06.
7. Lozynskii, O.Y., Paranchuk, Y.S. System for the optimum control of the electrical conditions of an arc furnace powered through a controlled reactor. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2007, no. 8, pp. 737-743. doi: 10.1134/S0036029507080204.
8. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Anufriev A.V., Pekhterev S.V., Povelitsa E.V. Electrical optimization of superpowerful arc furnaces. *Steel in Translation*, 2014, vol. 44, no. 4, pp. 289-297. doi: 10.3103/S0967091214040135.
9. Mees H., Hohl J., Krüger K. Dynamic Condition-Based Scrap Melt Control: Results of the Application at Thyssenkrupp Nirosta in Bochum. *10th European Electric Steelmaking Conference*, Graz, 25-28 September, 2012.
10. Николаев А.А., Тулупов П.Г. Разработка усовершенствованных алгоритмов управления гидроприводом перемещения электродов сверхмощной электродуговой сталеплавильной печи ДСП-250. *Электротехнические системы и комплексы*, 2015, № 3 (28), С. 20-27.
11. Николаев А.А., Корнилов Г.П., Тулупов П.Г., Повелица Е.В. Анализ различных вариантов построения систем автоматического управления перемещением электродов дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2015, № 2, С. 90-100.
12. Nikolaev A.A., Tulupov P.G. Method of setting optimum asymmetric mode of operation of electric arc furnace. *2016 11th France-Japan & 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS) / 17th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM)*, Jun. 2016. doi: 10.1109/mecatronics.2016.7547111.
13. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Savinov D.A. Mathematical model of electrode positioning hydraulic drive of electric arc steel-making furnace taking into account stochastic disturbances of arcs. *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, May 2017. doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076205.
14. Nikolaev A., Povelitsa E., Kornilov G., Anufriev A. Research and development of automatic control system for electric arc furnace electrode positioning. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 785, pp. 707-713. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.785.707.
15. Lozynskyy O., Paranchuk Y., Paranchuk R. Fuzzy control law of electrode travel in arc steelmaking furnace. *16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, Sep. 2015. doi: 10.1109/cpee.2015.7333349.

16. Paranchuk Ya.S., Paranchuk R.Ya. Neural network system for continuous voltage monitoring in electric arc furnace. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2016, no. 2 (152), pp. 74-80.

17. Lozynskyy O., Paranchuk Y., Kobylianskiy O. Simulink model of electric modes in electric arc furnace. *2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*, Oct. 2017. pp. 54-57. doi: 10.1109/YSF.2017.8126591.

REFERENCES

1. Kazakov S.V., Garten, V. The 8th international Conference on Electrometallurgy of Steel (part I). *Electrometallurgy*, 2005, no. 12, pp. 36-43. (Rus).
2. Kudrin B.I. Retrospective and perspective views on electrical consumption in electrometallurgy. *Electrometallurgy*, 2003, no. 10, pp. 2-13. (Rus).
3. Lopukhov G.A. The state and tendencies of development of electro-smelting production (based on materials 33 of the IISI Conference). *Electrometallurgy*, 2000, no. 7, pp. 35-37. (Rus).
4. Maslov D.V. *Razrabotka algoritmov i sistem upravleniia dugovymi staleplavil'nymi pechami, snizhaiushchikh polomki elektrodov. Avtoref. diss. kand. tehn. nauk* [Development of algorithms and control systems for arc steelmaking furnaces that reduce electrode breakage. Abstracts of cand. techn. sci. diss.]. Moscow, 2014. (Rus).
5. Lyuta A.V. *Udoskonalena sistema upravlinnia pryvodom peremishchennia elektrodiv duhovyykh staleplavnykh pechei Avtoref. diss. kand. tehn. nauk* [Improved control system for moving water of electrodes of arc steelmaking furnaces. Abstracts of cand. techn. sci. diss.]. Donetsk, 2013. (Ukr).
6. Lozynskyy O., Paranchuk Y., Stakhiv P. The study of dynamics of the two-loop arc furnace electric mode ACS on a Simulink-model. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2018, no. 12, pp. 24-27. doi: 10.15199/48.2018.12.06.
7. Lozinskii, O.Y., Paranchuk, Y.S. System for the optimum control of the electrical conditions of an arc furnace powered through a controlled reactor. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2007, no. 8, pp. 737-743. doi: 10.1134/S0036029507080204.
8. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Anufriev A.V., Pekhterev S.V., Povelitsa E.V. Electrical optimization of superpowerful arc furnaces. *Steel in Translation*, 2014, vol. 44, no. 4, pp. 289-297. doi: 10.3103/S0967091214040135.
9. Mees H., Hohl J., Krüger K. Dynamic Condition-Based Scrap Melt Control: Results of the Application at Thyssenkrupp Nirosta in Bochum. *10th European Electric Steelmaking Conference*, Graz, 25-28 September, 2012.
10. Nikolaev A.A., Tulupov P.G. Development of the improved control algorithms for ultra-high power electric arc furnace EAF-250 electrode motion system. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2015, no. 3 (28), pp. 20-27. (Rus).
11. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Povelitsa E.V., Tulupov P.G. Study of different methods to design automated electrode position control systems for electric arc furnaces and ladle furnaces. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2015, no. 2, pp. 90-100. (Rus).
12. Nikolaev A.A., Tulupov P.G. Method of setting optimum asymmetric mode of operation of electric arc furnace. *2016 11th France-Japan & 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS) /17th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM)*, Jun. 2016. doi: 10.1109/mecatronics.2016.7547111.
13. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Savinov D.A. Mathematical model of electrode positioning hydraulic drive of electric arc steel-making furnace taking into account stochastic disturbances of arcs. *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, May 2017. doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076205.
14. Nikolaev A., Povelitsa E., Kornilov G., Anufriev A. Research and development of automatic control system for electric arc furnace electrode positioning. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 785, pp. 707-713. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.785.707.
15. Lozynskyy O., Paranchuk Y., Paranchuk R. Fuzzy control law of electrode travel in arc steelmaking furnace. *16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, Sep. 2015. doi: 10.1109/cpee.2015.7333349.
16. Paranchuk Ya.S., Paranchuk R.Ya. Neural network system for continuous voltage monitoring in electric arc furnace. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2016, no. 2 (152), pp. 74-80.
17. Lozynskyy O., Paranchuk Y., Kobylianskiy O. Simulink model of electric modes in electric arc furnace. *2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*, Oct. 2017. pp. 54-57. doi: 10.1109/YSF.2017.8126591.

Надійшла (received) 25.02.2020

Паранчук Ярослав Степанович¹, д.т.н., проф.,
 Паранчук Роман Ярославович¹, к.т.н.,
¹ Національний університет «Львівська політехніка»,
 79013, Львів, вул. С. Бандери, 12,
 e-mail: yparanchuk@yahoo.com

Y.S. Paranchuk¹, R.Y. Paranchuk¹
¹ Lviv Polytechnic National University,
 12, S. Bandera Str., Lviv, 79013, Ukraine.

Research of arc furnace electrical mode with a fuzzy control model.

Goal. The purpose of the paper is to increase the efficiency of arc steelmaking furnace (ASF) operating modes control basing on the improvement of arc lengths control model. **Method.** The control model is based on the fuzzy set theory, and the structural modelling methodology is used to study the dynamics indices. **Results.** The structural scheme of a furnace arc lengths fuzzy control system and the electrical mode (EM) coordinate control dynamics parameters values in response to the deterministic and random arc lengths fluctuations were obtained. **Scientific novelty.** For the first time, a fuzzy model of an EM mismatch signal generation with operational adaptation to its current state in each phase was developed, which enabled by-phase independent control of arc lengths and improved energy efficiency. **Practical value.** Dynamic accuracy of EM coordinates stabilization at the setpoint level is improved, in particular the arc currents dispersion is reduced, which leads to a corresponding power loss decrease in arc furnace short network, an increase of the furnace productivity, as well as to an improvement of the electromagnetic compatibility of the arc furnace and power supply network. References 17, figures 7.

Key words: arc steelmaking furnace, electric mode, fuzzy control, autonomy, dispersion.