

Я. С. Паранчук

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем,
yaroslav.s.paranchuk@lpnu.ua

Б. Г. Бойчук

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем,
bohdan.h.boichuk@lpnu.ua

Т. В. Рудий

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем,
taras.v.rudyi@lpnu.ua

В. Б. Цяпа

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем,
volodymyr.b.tsiapa@lpnu.ua

О. А. Голубєв

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем,
oleksandr.holubiev.ee.2018@lpnu.ua

СИСТЕМА АДАПТИВНОГО НЕЧІТКОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМ РЕЖИМОМ ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ

<http://doi.org/10.23939/sepes2022.01.037>

© Паранчук Я. С., Бойчук Б. Г., Рудий Т. В., Цяпа В. Б., Голубєв О. А., 2022

Для електричного режиму (ЕР) дугових сталеплавильних печей (ДСП) характерні динамічні випадкові нестационарні пофазно несиметричні й пофазно взаємозв’язані зміни. Керування проходить в умовах неповної інформації про стан ЕР і технологічного процесу та зміни параметрів елементів силового кола та трифазної системи дуг. Досягти якісної стабілізації координат електричного режиму за вказаних його характеристик можливо на основі реалізації адаптивних нечітких моделей керування. У статті розроблено нечітку адаптивну модель для пофазно незалежного регулювання координат електричного режиму ДСП. Для цього запропоновано системотехнічні рішення для формування сигналу розузгодження ЕР, що надає відповідну до стану горіння системи трифазних дуг оцінку відхилення електричного режиму від заданого. Виконано проектування системи нечіткого висновку (СНВ) Mamdani для реалізації нечіткої моделі формування сигналу розузгодження ЕР та запропоновано модель адаптації її параметричних

степенів свободи до параметрів і характеристик збурень поточної стадії плавлення. Розроблено структурну Simulink-модель трифазної у миттєвих координатах запропонованої електромеханічної системи нечіткого адаптивного регулювання координат ЕР ДСП та виконано комп'ютерні дослідження динаміки відпрацювання екстремальних детермінованих збурень. Результати досліджень підтвердили доцільність реалізації автономного пофазно незалежного регулювання збурень електричного режиму. У фазних каналах, де збурення відсутні, електроди не переміщуються, і, отже, усуваються хибні переміщення електродів у разі регулювання збурень із використанням опрацьованої у статті нечіткої моделі керування, і, крім цього, зменшується час регулювання збурень, тобто зростає швидкодія системи. Ці фактори, як відомо, позитивно впливають на підвищення динамічної точності стабілізації координат ЕР під час регулювання випадкових збурень електричного режиму, тобто знижується їх дисперсія, завдяки чому покращуються показники енергоефективності та електромагнітної сумісності режимів дугової печі та електропостачальної мережі.

Ключові слова: дугова піч; довжина дуги; система нечіткого висновку; дисперсія; модель регулювання; електричний режим; адаптація.

Постановка проблеми

Дугові сталеплавильні печі (ДСП) є основними електротехнологічними комплексами для виробництва високоякісних сталей та прецизійних сплавів із вторинної сировини (металобрухту) та попередньо відновленого оксиду заліза (металізованих окатишів) чи рідкого чавуну. Розвиток технологій та обладнання цього напрямку виробництва вивів ці електротехнологічні агрегати в категорію найпотужніших споживачів електроенергії із неперервно-циклічним пофазно несиметричним споживанням значних обсягів активної та реактивної потужності. Застосування на наявних ДСП трансформаторів потужністю 100–150 МВА визначає необхідність розглядати такі дугові печі як надвисокопотужні технологічні агрегати, робочі фазні струми яких сягають 100–150 кА [1, 2]. Випадковий нестаціонарний характер зміни цих струмів у межах від нуля до струмів експлуатаційних коротких замикань призводить до виникнення значних електродинамічних сил в обмотках трансформаторів, реакторів та шинопроводах, а також до перенесення потужності між фазами. Вказані сили спричиняють пружні коливання елементів кінематичної схеми механізму переміщення електродів, до яких належать рукави електродотримачів, електроди та гнучкі струмопроводи тощо.

Вказаний динамічний пофазно несиметричний характер навантаження та електромеханічні коливання можуть спричинити резонансні явища в замкнутій системі автоматичного регулювання потужності дуг, що істотно погіршує динамічну точність стабілізації координат електричного режиму та призводить до відхилення інтегральних значень показників якості керування електричним режимом від оптимальних налаштувань: зокрема, до зниження потужності дуг, коефіцієнта потужності, погіршення показників електромагнітної сумісності, посилення негативного впливу роботи дугової печі на навколишнє середовище тощо.

Використовувані сьогодні методи проєктування та експлуатації ДСП ґрунтуються на традиційних підходах до аналізу та вибору експлуатаційних режимів на основі статичних електричних та робочих характеристик дугових печей. Сучасна тенденція до збільшення одиничної встановленої потужності силового електрообладнання ДСП не тільки потребує зміни конструктивних рішень ДСП, але й показує, що дугові електропечі необхідно розглядати як електромеханічну стохастичну пофазно несиметричну трифазну систему із параметрами, що неперервно змінюються в реальному часі в ході плавки [3]. До того ж змінюються не тільки параметри елементів силового кола та системи трифазних дуг ДСП, але і параметри стохастичних характеристик збурень, що виникають у силовому колі та у системі живлення [4].

Аналіз інших відомих технічних рішень для різних приводів переміщення електродів показав, що моделі формування сигналів розузгодження U_r ЕР, сигналів керування на переміщення електродів

U_c^{1a} є ефективними варіативними впливами в задачах оптимізації динаміки руху електродів [5]. Це стосується як гідро-, так і електромеханічних приводів, бо спільним для них є завдання удосконалення моделі формування сигналу керування на переміщення електродів та її параметрів.

Актуальність дослідження

Вказані фактори негативно впливають на показники енергоефективності дугових печей та на показники електромагнітної сумісності режимів дугової печі та електромережі. Ця проблема особливо загострюється на сучасному етапі через світові тенденції збільшення одиничної встановленої потужності та питомої потужності основного силового електротехнологічного обладнання дугових печей. Тому, зважаючи на обмеженість енергоресурсів, зокрема електричної енергії, а також на жорсткі сучасні вимоги до показників якості електроенергії, розроблення рішень для покращення показників динаміки регулювання координат ЕР, показників енергоефективності та електромагнітної сумісності є важливою та актуальною проблемою світової електротехнології.

Формулювання мети та завдань статті

Зважаючи на флуктуації параметрів елементів короткої мережі ДСП та стохастичних характеристик збурень, **метою цього дослідження** є створення системотехнічних рішень, спрямованих на удосконалення систем автоматичного керування і регулювання координат ЕР на основі використання стратегій оптимального керування та адаптивного регулювання координат електричного режиму.

Для досягнення поставленої мети **потрібно вирішити такі завдання:**

• обґрунтування методологічних засад для адаптивного оптимального керування ЕР за критерієм мінімізації дисперсії координат електричного режиму – напруг, струмів та потужності дуг;

• розроблення закону формування сигналу розузгодження електричного режиму для реалізації пофазно незалежного (інваріантного до збурень інших фаз) регулювання довжин дуг ДСП;

• створення комп'ютерних моделей систем автоматичного керування електричним режимом, що реалізують пофазно незалежні (автономні) процеси регулювання координат;

• виконання комп'ютерних досліджень показників динаміки регулювання координат ЕР за дії пофазно несиметричних детермінованих збурень за довжинами дуг.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Нагальна необхідність істотного покращення показників енергоефективності та електромагнітної сумісності режимів дугових печей, і, передусім, надпотужних ДСП, є вимогою часу. Одним із ефективних та дієвих підходів до вирішення цієї проблеми є удосконалення чи створення нових систем автоматичного керування (САК) режимами плавлення та системи автоматичного регулювання (САР) координат електричного режиму, які називають регуляторами потужності дуг ДСП.

Більшість із наявних регуляторів потужності дуг одноконтурних САК ЕР ДСП функціонують за диференціальним законом (моделлю) формування сигналу розузгодження електричного режиму [5, 6]:

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

де a , b – сталі коефіцієнти, які задають усталений електричний режим (потужність дуг); U_a , I_a – поточні діючі значення напруги та струму дуги; U_r – сигнал розузгодження електричного режиму.

Дотримання цього закону забезпечує надійне запалювання дуг у разі виникнення режимів обривів дуг (о.д.) та експлуатаційних коротких замикань (к.з.), тобто виконується адекватне відпрацювання екстремальних збурень та близьких до них. Але за дії малих (в околі точки усталеного режиму) та середніх пофазно несиметричних відхилень довжин дуг отримуваний за цією моделлю сигнал розузгодження ЕР не завжди адекватно відображає реальний стан дуг. Сигнал керування $U_c(t)$ на переміщення електродів, що формується на основі такого сигналу розузгодження $U_r(t)$, у певних несиметричних режимах призводить до виникнення хибних переміщень електродів, тобто до переміщень, що не відповідають значенню та знаку відхилення ЕР.

Причиною цього є використання струму дуги у моделі диференційного закону (1), бо струм фази за чинної системи живлення трифазних дуг без нульового провідника визначається не лише довжиною (напругою) дуги у цій фазі, але й залежить від довжин дуг (збурень) інших фаз. Тому за певних комбінацій довжин дуг у фазах за цим законом можуть формуватися невідповідні поточним станам ЕР сигнали керування (можуть виникати навіть протилежні рухи електродів). Унаслідок цього зростає час регулювання збурень (зниження швидкодії) і, як наслідок, додатково збільшуються дисперсії координат ЕР, електричні втрати в елементах короткої мережі дугової печі тощо.

Саме на цій обставині наголошено в роботах [7, 8], де зазначено, що використання струмів дуг у моделях синтезу сигналу керування на переміщення електродів призводить до порушення автономності фазних каналів регулювання довжин (напруг, струмів, потужностей) дуг.

Відоме регулювання координат ЕР і за законом відхилення напруги дуги від заданого значення (напругова модель)

$$U_r = k_U \cdot (U_a - U_{a,уст}), \quad (2)$$

де $U_{a,уст}$ – уставка регулятора за напругою дуги [4, 5]; k_U – сталий коефіцієнт, що визначає координати усталеного режиму.

За цим законом забезпечується досконале регулювання у режимах малих та середніх відхилень довжин дуг, але під час відпрацювання екстремальних збурень, насамперед пофазно несиметричних обривів дуг, через зміщення нульової точки вектора напруг дуг погіршується динаміка руху електродів у режимах запалювання дуг. Це теж є причиною необґрунтованого додаткового погіршення динамічної точності стабілізації координат ЕР за заданих директивних, зокрема оптимальних, значень.

У деяких регуляторах потужності дуг фірм Siemens та Danieli використовують варіанти імпедансного закону регулювання, за якими довжини дуг регулюють за відхилення повного імпедансу фази від заданого значення [9].

$$U_r = k_Z \cdot (Z_a - Z_{a,уст}), \quad (3)$$

де Z_a , $Z_{a,уст}$ – поточне та задане значення імпедансу дуги; k_Z – сталий коефіцієнт, що визначає координати усталеного електричного режиму.

Але в моделі обчислення імпедансу теж використано струм фази, що через вказані вище причини не дає змоги повною мірою забезпечувати високоточну пофазну автономність процесу регулювання довжин дуг, а отже, і напруг, струмів та потужностей дуг.

Керування режимами та регулювання електричних координат ДСП в умовах дії нестационарних випадкових збурень здійснюється в умовах неповної інформації про зміну параметрів елементів та координат силового кола ДСП, бо реалізувати точне оперативне в режимі онлайн їх вимірювання технічно неможливо. Тому унаслідок стохастичної нестационарності процесів у силовому колі та складності математичного їх опису для задач керування режимами та регулювання координат доцільно використовувати інтелектуальні методи, зокрема моделі нечіткого керування та ідентифікації. Доцільність використання такого керування підтверджується відповідністю природи процесів у силовому колі та САК ЕР під час відпрацювання випадкових збурень за довжинами дуг вказаним вище особливостям застосування та функціонування моделей нечіткого керування [10–12].

Новизна запропонованого підходу полягає у створенні нечіткої моделі формування сигналу сигналу розузгодження ЕР та її оперативної адаптації до стану горіння дуг і зміни стохастичних характеристик збурень, що порівняно із відомими моделями дає змогу підвищити рівень пофазної автономності відпрацювання збурень ЕР і, як результат, збільшити динамічну точність стабілізації координат ЕР на рівні оптимальних уставок.

Виклад основного матеріалу

На рис. 1 подано функціональну блок-схему запропонованої адаптивної електромеханічної системи регулювання координат електричного режиму дугової печі, що є удосконаленим варіантом відомого електромеханічного регулятора потужності дуг типу АРДМ-Т-12, встановленого на надпотужній дуговій печі ДСП-200.

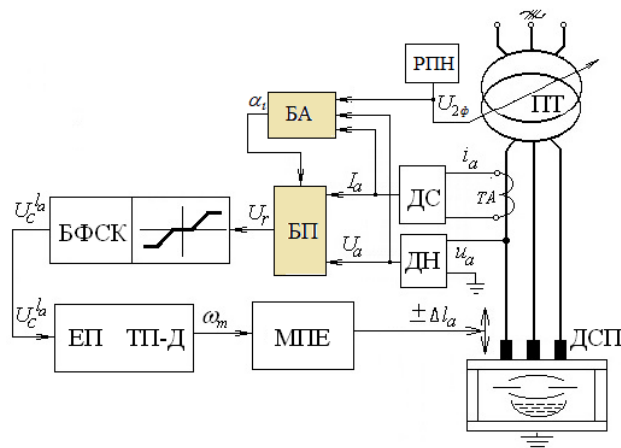


Рис. 1. Функціональна блок-схема адаптивної системи регулювання координат електричного режиму ДСП

Координати ЕР у серійному регуляторі потужності дуг типу АРДМ-Т-12 дугової печі ДСП-200 регулюються за диференціальним законом, а сигнал розузгодження $U_r(U_a, I_a)$ ЕР формується у блоці порівняння БП за моделлю (1). Поточні діючі значення напруги U_a та струму I_a дуги формуються на виходах давачів ДН та струму ДС дуги відповідно. На виході блока формування сигналу керування БФСК у функції сигналу $U_r(U_a, I_a)$ із урахуванням зони нечутливості, коефіцієнтів підсилення на піднімання та опускання електродів, обмеження на максимальні швидкості піднімання та опускання електродів формується сигнал керування $U_c^{I_a}$ на переміщення електродів. Цей сигнал електроприводом ЕП, що в регуляторі АРДМ-Т-12 представлений реверсивною системою “тиристорний перетворювач – двигун постійного струму” (ТП-Д), та механізмом переміщення електрода МПЕ типу “шестерня – рейка” трансформується у відповідні дозовані переміщення електродів $\pm \Delta l_a$ у напрямі ліквідації збурень. Перемикання ступенів напруги $U_{2\phi}$ пічного трансформатора ПТ виконується пристроєм РПН у функції зміни технологічних стадій плавлення і директивного графіка плавки.

Основне завдання системи стабілізації координат ЕР ДСП – мінімізувати їх дисперсії, тобто максимально збільшити час роботи печі в околі точки заданого електричного режиму, що відповідає заданому критерію оптимальності.

Для цього замість моделі (1) в блоці порівняння БП запропоновано використовувати адаптивний до зміни станів ЕР (режимів горіння трифазних дуг) нечіткий закон, який на основі принципів нечіткої логіки об’єднає модель модифікованого диференціального закону $U_r = a \cdot U_a - b \cdot (I_a - I_{a.set})$ та напругового закону $U_r = k_U \cdot (U_a - U_{a.set})$ (2). За такого рішення у режимі онлайн активно у певній фазі встановлюється модель формування сигналу розузгодження, що відповідає поточному стану ЕР цієї фази. Стани горіння дуг у кожній фазі ідентифікуються за напругою дуги цієї фази. Перехід від однієї моделі $U_r(U_a, I_a)$ формування сигналу розузгодження у фазі до іншої виконується за нечітким алгоритмом Mamdani. Для цього розрізняють (ідентифікують) три стани електричного режиму: режим експлуатаційного короткого замикання та близькі до нього (короткі дуги), раціональні режими (середні дуги) – в околі заданого ЕР, та режим обриву дуги і близькі до нього (довгі дуги). Належність поточної довжини дуги до вказаних вище градацій ЕР виконується у функції поточного значення напруги на дузі, бо напруга на стовпі дуги однозначно і лінійно залежить від її довжини $U_a = a + b \lambda_a$, де a – анод-катодне падіння напруги на стовпі дуги; b – градієнт напруги на стовпі дуги; λ_a – довжина дуги.

Для реалізації сформованої нечіткої моделі регулювання координат ЕР експлуатаційний контроль напруг дуги $U_a(t)$ запропоновано виконувати пристроєм, що функціонує на основі нейромережових технологій ідентифікації напруг дуг та параметрів елементів короткої мережі ДСП [13]. Передбачену відповідність напруг на дугах вказаним вище станам ЕР проілюстровано показаними на рис. 3 функціями приналежності системи нечіткого виведення Mamdani.

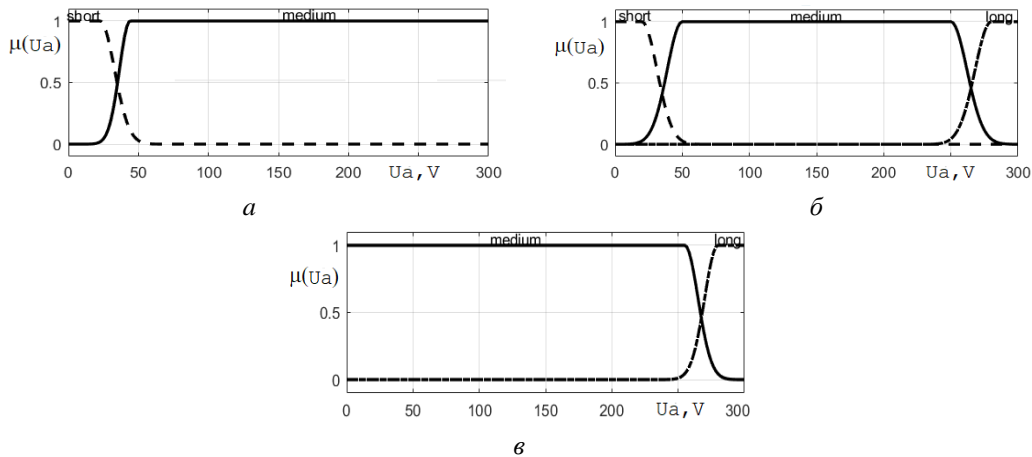


Рис. 2. Функції приналежності СНВ для ідентифікації режимів коротких (а), середніх (б) та довгих (в) дуг

Діапазон низьких напруг (це короткі дуги) в моделі системи нечіткого виведення Mamdani описується термом *low* (це стан к.з. чи близькі до нього), середніх – *medium*, а довгих – *high* (це стани о.д. чи близькі до нього) (рис. 2). Терми подано функціями приналежності типу *gauss2mf*.

У станах ЕР в околі робочої точки печі сигнал розузгодження обчислюється за напруговим законом $U_r = k \cdot (U_a - U_{a.set})$, бо ця модель формування сигналу розузгодження інваріантна до станів ЕР (навантажень) інших фаз. Використовуючи її, отримуємо автономне (пофазно незалежне) регулювання довжин дуг.

У станах електричного режиму, що виникають за дії екстремальних збурень – к.з., о.д. (чи близьких до них) чинним для формування сигналу розузгодження U_r встановлюється модифікований диференціальний закон, за якого, на відміну від напругового, досконало реалізуються процеси запалювання дуг. Таке поєднання на основі нечіткої логіки (4) вказаних часткових законів дає змогу забезпечити автономне пофазне регулювання довжин дуг та, водночас, надійне їх запалювання у режимах дії екстремальних збурень (к.з. та о.д.):

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

де k – ваговий коефіцієнт, що неперервно ідентифікується за нечіткою моделлю.

Нечітка адаптація регулювання довжин дуг реалізується системами нечіткого виведення в кожному фазному каналі, які функціонують на основі нечітких моделей Mamdani. Вхідною лінгвістичною змінною СНВ є діюче значення напруги дуги U_a , бо напруга дуги інваріантна до флуктуацій довжин дуг та параметрів силових елементів короткої мережі дугової печі. На рис. 2 наведено графіки функцій приналежності термів типу *gauss2mf* цієї лінгвістичної змінної.

Для реалізації адаптивної до зміни станів трифазних дуг моделі формування сигналу розузгодження згідно із (4) для системи нечіткого виведення складено таку базу нечітких правил:

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

У спроектованій нечіткій моделі Mamdani для процедури дефазифікації вибрано метод центра ваги (центроїд площі).

Алгоритм адаптації процесу керування ЕР до зміни стохастичних характеристик збурень (технологічних стадій плавлення) реалізовано у блоці адаптації БА (рис. 1). Алгоритм її виконання передбачає неперервний контроль дисперсії напруг та струмів дуг і ступеня напруги пічного трансформатора ПТ. У разі зміни ступеня напруги виконується дискретна зміна варіативних параметрів фазних систем нечіткого висновку Mamdani, а у функції зміни дисперсій струмів та напруг дуг реалізується плавне їх корегування за критерієм мінімізації дисперсій напруг дуг.

Дослідження ефективності розробленої нечіткої адаптивної до станів трифазних дуг та стохастичних характеристик збурень ЕР моделі керування ЕР виконано на трифазній у миттєвих координатах Simulink-моделі САР положення електродів дугової сталеплавильної печі ДСП-200 [14].

Для адекватного відтворення збурень ЕР за довжинами дуг та динаміки регулювання координат ЕР на різних технологічних стадіях плавлення у цій комп'ютерній моделі реалізовано відповідні цим стадіям плавлення моделі динамічних вольт-амперних характеристик (ДВАХ) дуг та моделі генерування випадкових процесів збурень за довжинами дуг.

Для цього, зокрема, передбачено можливість реалізації трьох типів моделей ДВАХ, а саме: лінійної $u_a(t) = R_a(t) \cdot i_a(t)$, нелінійної на основі функції арктангенса: $u_a(t) = 2E_{am}(t) \cdot \arctan(k \cdot i_a(t))/\pi$, та

нелінійної на основі диференційного рівняння Кассі: $\theta_a \frac{d g_a(t)}{dt} = \left(\frac{u_a(t)^2}{E_{am}^2} \right) g_a(t)$, 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, що характеризує теплову інерційність дуги.

У цій Simulink-моделі САР ЕР ДСП-200 реалізовано три фазні генератори незалежних випадкових процесів зі змінюваними параметрами для генерування процесів із бажаними статистичними характеристиками, які відповідають характеристикам випадкових процесів досліджуваних стадій плавлення: а саме технологічним стадіям проплавлення колодязів шихти, обвалів шихти та стадії горіння дуг у товщі шлаку на розплав шихти (окиснювання розплаву). Генеровані випадкові процеси різняться частотним спектром та амплітудними характеристиками. Вони відповідають процесам збурень досліджуваних стадій плавлення. На цій комп'ютерній моделі виконано дослідження динаміки регулювання координат ЕР печі ДСП-200 із використанням запропонованої нечіткої моделі (4) формування сигналу розузгодження $U_r(U_a, I_a)$, а також (для порівняння показників динаміки) у разі функціонування диференційного закону (структура САР на основі регулятора потужності дуг типу АРДМ-Т-12) під час відпрацювання детермінованих збурень.

За результатами порівняльного аналізу отримуваних показників динаміки регулювання координат ЕР із використанням диференційної (1) та запропонованої нечіткої адаптивної моделі (4) регулювання збурень сформульовано висновки про їх ефективність.

На рис. 3 подано отримані на Simulink-моделі часові залежності збурень за довжиною дуги, вагового коефіцієнта k моделі (4) СНВ фази С, напруг та струмів дуг і швидкості фазних двигунів переміщення електродів печі ДСП-200 під час відпрацювання послідовності детермінованих пофазно несиметричних екстремальних збурень, а саме: обриву дуги (о.д.) у фазі В та експлуатаційного короткого замикання (к.з.) у фазі С \hat{t} 0,25–1,25 с; о.д. у фазі А \hat{t} 1,25–2,25 с; о.д. у фазі А та к.з. у фазі С \hat{t} 2,25–3,5 с; к.з. у фазі В \hat{t} 3,5–4,75 с та двофазного к.з. у фазах В та С \hat{t} 4,75–6,0 с із використанням запропонованої нечіткої адаптивної моделі (4) формування сигналу розузгодження ЕР печі ДСП-200.

На рис. 4 наведено отримані на Simulink-моделі часові залежності збурень за довжиною дуги, напруг та струмів дуг і швидкості фазних двигунів переміщення електродів печі ДСП-200 під час відпрацювання послідовності таких самих детермінованих пофазно несиметричних екстремальних збурень, але із застосуванням регулятора потужності дуг типу АРДМ-Т-12 печі ДСП-200 (диференційна модель (1)).

Порівняльний аналіз наведених на рис. 3 та рис. 4 часових залежностей підтверджує реалізацію автономного (пофазно незалежного) регулювання детермінованих збурень. Найочевидніше цей факт підтверджується аналізом зміни швидкості двигунів переміщення електродів (рис. 3, з та рис. 4, з): у фазах на часових відтинках без збурень швидкість $\omega(t) \approx 0$, тобто електроди нерухомі. За диференційної моделі (регулятор АРДМ-Т-12) спостерігаються хибні, неадекватні до виниклих у фазах збурень, рухи електродів.

Показані на рис. 3 та рис. 4 динамічні процеси регулювання детермінованих збурень у такому "чистому" вигляді упродовж плавки трапляються рідко. Тому їх дослідження та аналіз здійснено лише з метою тестування для підтвердження коректності функціонування спроектованої системи нечіткого висновку Mamdani в структурі САР ЕР для задачі реалізації пофазно незалежного адаптивного до станів ЕР регулювання довжин дуг, а отже, і регулювання інших координат ЕР печі ДСП-200. Для повноти аналізу зазначимо, що час регулювання досліджених детермінованих збурень у разі застосування запропонованої нечіткої моделі (4) блока порівняння БП на 10–20 % менший, ніж за використання диференційної. Це позитивний результат, бо свідчить про підвищення швидкодії відпрацювання збурень у разі використання нечіткої моделі (4) формування сигналу $U_r(t)$ в БП.

Вказане покращення динаміки сприяє зменшенню електричних втрат в елементах короткої мережі та, загалом, знижує питомі витрати електроенергії. Покращуються також і коефіцієнт потужності та показники якості електроенергії на шинах живлення дугової печі.

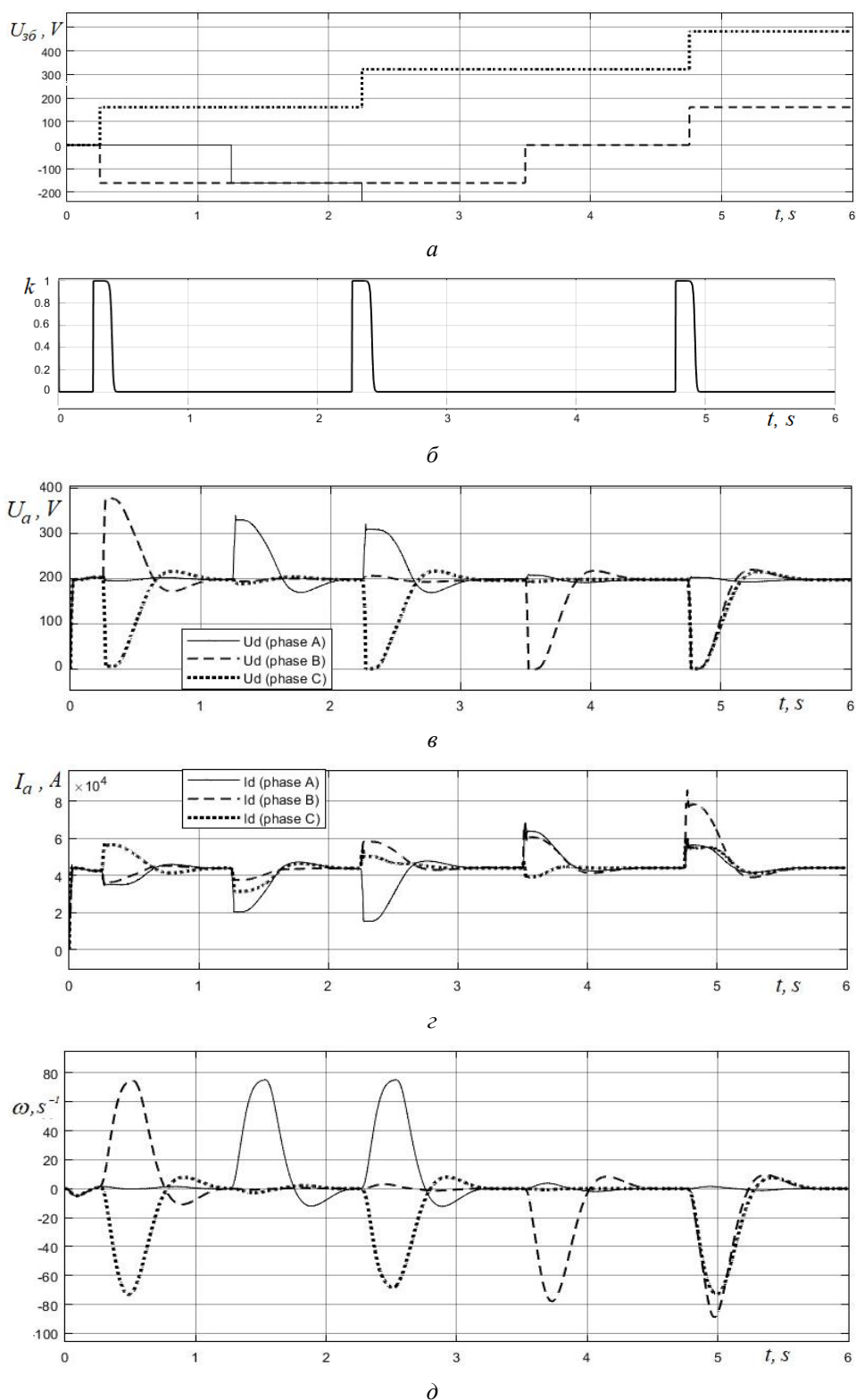


Рис. 3. Часові залежності детермінованих збурень (а), вагового коефіцієнта k СНВ фази С (б), напруг (в) і струмів (з) дуг та швидкості двигунів переміщення електродів (д) печі ДСП-200 за нечіткої адаптивної моделі (4) блока порівняння БП

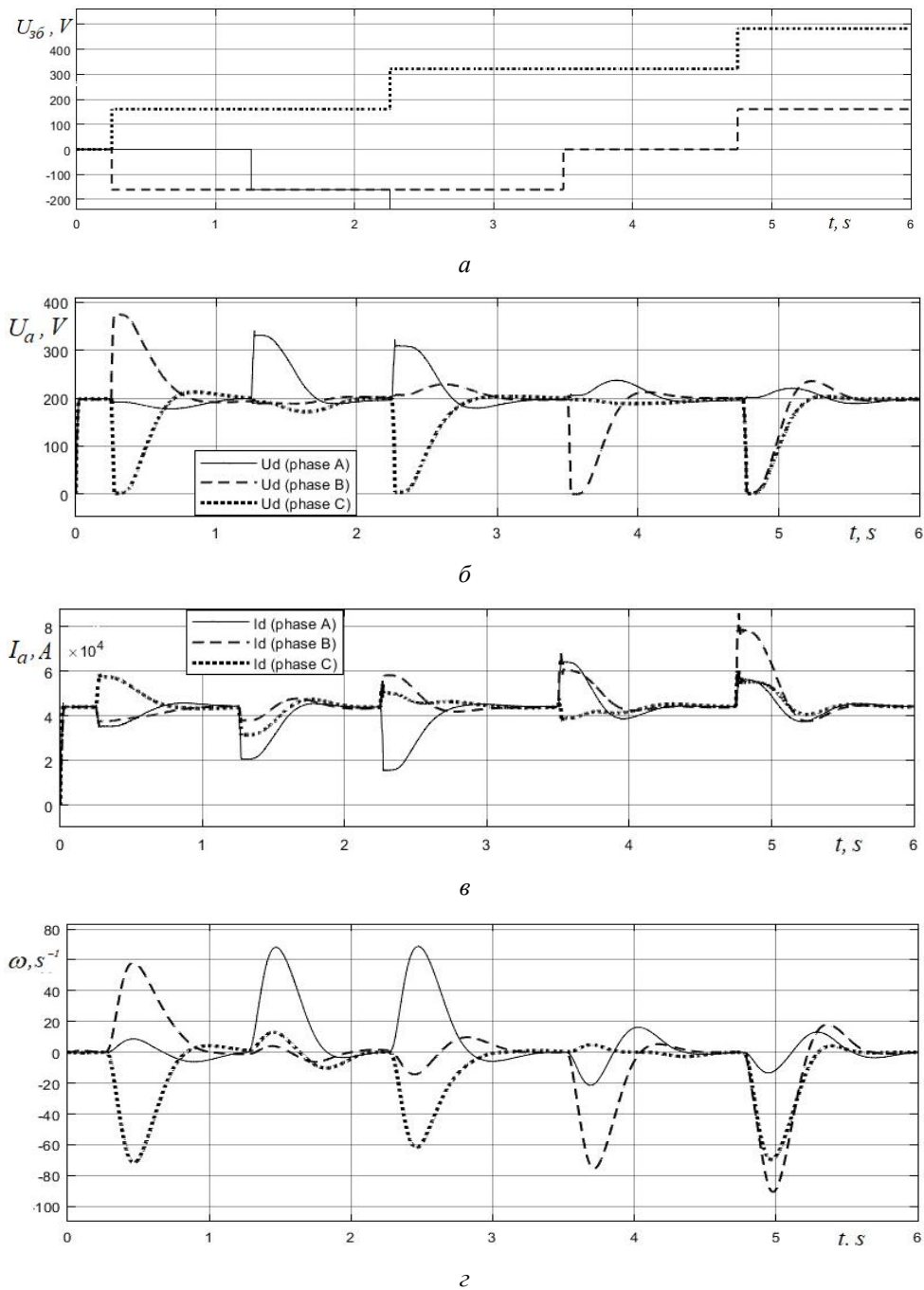


Рис. 4. Часові залежності детермінованих збурень (а), напруг (б) і струмів (в) дуг та швидкості двигунів переміщення електродів (г) печі ДСП-200 за диференційної моделі (1) блока порівняння БП

Висновки

1. Запропоновано нечітку адаптивну до станів горіння трифазних дуг модель формування сигналу розузгодження електричного режиму ДСП.
2. Виконано проектування системи нечіткого виведення Mamdani для реалізації автономного пофазно незалежного регулювання координат ЕР дугової печі.
3. Складено структурну Simulink-модель нечіткої адаптивної системи регулювання довжин дуг печі ДСП-200 та виконано дослідження показників динаміки відпрацювання детермінованих збурень.

4. Отримані результати модельних досліджень підтвердили досягнення пофазно автономного регулювання детермінованих збурень ЕР із використанням запропонованої нечіткої моделі формування сигналу розузгодження ЕР ДСП.

5. Реалізація пофазно автономного регулювання збурень ЕР підвищує швидкодію і динамічну точність стабілізації координат ЕР. Завдяки цьому покращуються показники електротехнологічної ефективності та електромагнітної сумісності режимів ДСП та електромережі.

Перспективи подальших досліджень

Подальші дослідження будуть спрямовані на отримання інтегральних оцінок якості динаміки регулювання випадкових збурень електричного режиму із використанням запропонованої нечіткої моделі (4) формування сигналу розузгодження ЕР ДСП. Досліджуватиметься також ефективність різних алгоритмів адаптації вектора оптимального керування запропонованої двоконтурної структури системи нечіткого регулювання координат ЕР ДСП.

Список літератури

1. Cundeva, Snezana, Digalovski, Mihail. Calculation of electric arc furnace secondary circuit – analytical and numerical approach // *Przegląd Elektrotechniczny*. ISSN 0033-2097, R. 92 Nr 12/2016, pp. 21–25. DOI:10.15199/48.2016.12.06.
2. Nezamaddin Ravanbakhsh, Rahim Zahedi and Abolfazl Ahmadi. A Review of Recent Developments in Optimizing and Reducing Energy Consumption in Steel Industry Arc Furnaces // *Recent Adv Petrochem Sci* 7(2): RAPSCI.MS.ID.555710 (2022), pp. 1–22. DOI: 10.19080/RAPSCI.2022.07.555710
3. Saboohi Y., Fathi A., Škrjanc I. and Logar V., Optimization of the Electric Arc Furnace Process, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 66, No. 10, pp. 8030-8039, Oct. 2019. DOI: 10.1109/TIE.2018.2883247.
4. Wanjari, A. Methods to optimize energy consumption in Conarc furnaces. *SN Appl. Sci.* 3, 873 (2021). <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04852-6>
5. Ghiormez, Loredana and Manuela Panoiu. Current control of a 3-phase electric arc furnace using fuzzy (2015).
6. Yuhua W. Based on Fuzzy Control of Ore Smelting Electric Arc Furnace Electrode Regulator System, 2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2009, pp. 668–671. DOI: 10.1109/ICICTA.2009.396
7. Luta A. V. An improved control system of the drive for moving the electrodes of arc steel-melting furnaces: Autoref. thesis ... candidate technical of science Donetsk, 2013.
8. Electrical Optimization of Superpowerful Arc Furnaces / A. A. Nikolaev, G. P. Kornilov, A. V. Anufriev, S. V. Pekhterev, E. V. Povelitsa. *Steel in Translation*, 2014, Vol. 44, No. 4, pp. 289–297.
9. Mees H., Hohl J., Krüger K., et al. Dynamic condition based scrap melt control: results of the application at Thyssenkrupp Nierosta in Bochum, 10th European Electric Steelmaking Conference, Graz, 2012.
10. 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'2015), September 2–5, 2015. Lviv. Ukraine, pp. 103–106.
11. Paranchuk Ya. S., Paranchuk R. Ya. Neural Network System for Continuous Voltage Monitoring in Electric Arc Furnace // *Scientific Bulletin of National mining University. Scientific and Technical Journal*, No. 2 (152), 2016, pp. 74–80.
12. Lothar Tomczyk. Stochastic processes in electric arc furnaces for steel production // DOI: 10.13140/RG.2.2.15534.05445. (9) (PDF) Stochastic processes in electric arc furnaces for steel production L. TOMCZYK (researchgate.net)
13. Paranchuk Ya. S., Paranchuk R. Ya. Neural Network System for Continuous Voltage Monitoring in Electric Arc Furnace // *Scientific Bulletin of National mining University. Scientific and Technical Journal*. No. 2 (152), 2016. pp. 74–80. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2016_2_14.
14. Lozynskyy O., Paranchuk Y., Kobylanskyi O. Simulink Model of Electric Modes in Electric Arc Furnace // 2017 IEEE International Young Scientists on Applied physics and Engineering YSF-2017, pp. 54–57. DOI: 10.1109/YSF.2017.8126591.

Ya. Paranchuk

Lviv Polytechnic National University,
Department of Electromechatronics and Computerized Electromechanical Systems,
yaroslav.s.paranchuk@lpnu.ua

B. Boichuk

Lviv Polytechnic National University,
Department of Electromechatronics and Computerized Electromechanical Systems,
bohdan.h.boichuk@lpnu.ua

T. Rudyi

Lviv Polytechnic National University,
Department of Electromechatronics and Computerized Electromechanical Systems,
taras.v.rudyi@lpnu.ua

V. Tsiapa

Lviv Polytechnic National University,
Department of Electromechatronics and Computerized Electromechanical Systems,
volodymyr.b.tsiapa@lpnu.ua

O. Golubiev

Lviv Polytechnic National University,
Department of Electromechatronics and Computerized Electromechanical Systems,
oleksandr.holubiev.ee.2018@lpnu.ua

SYSTEM OF ADAPTIVE FUZZY CONTROL OF THE ELECTRICAL MODE OF THE ARC STEEL ARCHING FURNACE

© Paranchuk Ya., Boichuk B., Rudyi T., Tsiapa B., Golubiev O., 2022

The electrical mode (ER) of arc steel-melting furnaces (ASF) is characterized by a dynamic, random, non-stationary, phase-by-phase asymmetric and phase-by-phase interconnected nature of the change. Control takes place in the conditions of incomplete information about the state of the ER and the technological process and changes in the parameters of the elements of the power circuit and the three-phase system of arcs. It is possible to obtain high-quality stabilization of the coordinates of the electrical mode with the specified characteristics based on the implementation of adaptive fuzzy control models. The article developed a fuzzy adaptive model for phase-independent adjustment of the coordinates of the electrical mode of chipboard. For this purpose, system engineering solutions are proposed for the formation of the EP mismatch signal, which provides an estimate of the deviation of the electrical mode from the given one, corresponding to the state of combustion of the three-phase arc system. The design of the Mamdani fuzzy inference (Fuzzy inference) system for the implementation of a fuzzy model of the generation of the EP discordant signal was carried out, and a model for adapting its parametric degrees of freedom to the parameters and characteristics of disturbances of the current melting stage was proposed. A structural Simulink model of the three-phase in instantaneous coordinates of the proposed electromechanical system of fuzzy adaptive control of EP chipboard coordinates was developed, and computer studies of the dynamics of working out extreme deterministic disturbances were performed. The obtained research results confirmed the expediency of implementing autonomous phase-independent regulation of electrical regime disturbances. In phase channels where there are no disturbances, the electrodes do not move, and thus, false electrode movements are eliminated during disturbance regulation using the fuzzy control model developed in the article, and, in addition, the disturbance regulation time is reduced, i.e., the speed of the system increases. These factors, as is known, have a positive effect on increasing the dynamic accuracy of stabilization of ER coordinates when adjusting random disturbances of the electrical regime, i.e., their dispersion decreases, as a result, indicators of energy efficiency and electromagnetic compatibility of the modes of the arc furnace and the power supply network improve.

Key words: arc furnace; arc length; fuzzy inference system; dispersion; regulation model; electric mode; adaptation.