

УДК 681.513,621.365

Я. С. Паранчук, д-р техн. наук, професор,

Р. Я. Паранчук, канд. техн. наук,

В. Б. Цяпа, канд. техн. наук,

С. Ю. Яцута, студент

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

ОПТИМАЛЬНА СТАБІЛІЗАЦІЯ КООРДИНАТ ЕЛЕКТРИЧНОГО РЕЖИМУ ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ НА ОСНОВІ НЕЧІТКИХ РЕГУЛЯТОРІВ

Запропоновано структури системи регулювання потужності дуг дугової сталеплавильної печі з нечіткими регуляторами, оптимізованих за критерієм мінімуму дисперсії координат електричного режиму, та подано результати їх досліджень.

Ключові слова: *дугова сталеплавильна піч, нечіткий регулятор, регулятор потужності дуг, оптимізація, динаміка, закон руху електрода, дисперсія, швидкодія, час регулювання.*

Постановка проблеми. Проблема підвищення енергоефективності плавлення сталей в дугових сталеплавильних печах (ДСП) є важливою та актуальною для економіки України. Диктується вона енергозалежністю держави, високими цінами на енергоносії та світовою тенденцією зростанням частки сталей, що виплавляються в дугових сталеплавильних печах, у загальному обсязі їх виробництва.

Відомо, що одним з ефективних та дієвих підходів у напрямі успішного вирішування окресленої вище проблеми є реалізація стратегій адаптивного оптимального керування та якісної стабілізації координат електричного режиму (ЕР) в умовах неперервної дії інтенсивних координатних та параметричних збурень упродовж плавки.

Тому задача підвищення динамічної точності стабілізації координат електричного режиму дугових сталеплавильних печей є важливою, бо рівень її вирішення визначально впливає на показники електротехнологічної ефективності ДСП. Якісна стабілізація координат вимагає реалізації неколивного (аперіодичного) закону руху електродів за максимально допустимої швидкодії системи в умовах дії динамічних випадкових координатних та параметричних збурень.

Тому розроблення та використання системотехнічних рішень, що направлені на реалізацію оптимальних за критерієм мінімізації дисперсії координат електричного режиму ДСП стратегій керування процесом плавлення є ефективним та дієвим підходом.

Аналіз останніх досліджень. Системотехніка регулювання координат ЕР ґрунтується на неперервному регулюванні довжин дуг (стабілізації їх довжин на рівні заданого значення, що відповідає усталеному режиму) за одним з трьох законів: диференційним, імпе-

данним чи за відхиленням напруг дуг [1]. Але динаміка руху електродів (зміни довжин дуг) при відпрацювання збурень за цими законами є надто чутливою до параметричних збурень, що виникають у силовому колі, дугових проміжках та системі керування. Негативно впливають на показники динаміки також наявні в системі керування нелінійності, такі як люфти, зони нечутливості, обмеження, а також нелінійність силового перетворювача приводу електродів.

Реалізація системотехнічних рішень та моделей керування режимами і регулювання координат, що ґрунтуються на основі класичних методів теорії автоматичного керування, потребує наявності точного математичного опису об'єкта керування. Існуючі на їх основі системні рішення практично вичерпали свої можливості і допускають у процесі регулювання збурень значні дисперсії координат ЕР [2].

Задачею досліджень є розроблення нових ефективних системотехнічних рішень для підвищення якості регулювання координат електричного режиму, зокрема для мінімізації дисперсії регульованих координат в умовах дії інтенсивних параметричних збурень, наявної пофазної несиметрії навантажень та взаємозв'язаності режимів навантаження і процесів керування потужністю дуг дугової печі.

Виклад основного матеріалу. Для реалізації цього напрямку запропоновано системотехнічні рішення, в основу яких покладено використання нечітких регуляторів (НР) у прямому каналі регулювання довжин дуг типових (серійних) системи автоматичного регулювання (САР) потужності дуг ДСП. Ці рішення ґрунтуються на схемі послідовного включення нечіткого регулятора у прямому каналі, на включенні нечіткого регулятора паралельно до блока формування сигналу керування типового регулятора потужності дуг (тобто використання НР як нечіткого коректора), а також комбінованого послідовно-паралельного включення нечітких регуляторів. Доцільність використання принципів нечіткого керування диктується складністю системи керування, нелінійністю, пофазною несиметричністю та взаємозв'язаністю режимів навантаження та параметричною нестабільністю, що унеможливило отримання точних математичних описів режимів керування.

Як один з варіантів реалізації зазначеної вище стратегії адаптивної оптимальної стабілізації координат ЕР ДСП запропоновано використання нечіткої корекції сигналу керування на переміщення електрода зі збереження чинного диференційного закону формування сигналу керування чи його модифікованих варіантів [2].

Для формування такого корегуючого сигналу на переміщення електрода запропоновано використати нечіткий регулятор Такагі-Сугено, який включається паралельно до блока формування сигналу керування серійного регулятора потужності дуг ДСП, наприклад регулятора з електромеханічним приводом на тиристорах АРДМ-Т. Його

вхідними сигналами є сигнал розузгодження режиму, що розраховується за одним із вказаних вище законів регулювання і подає оцінку відхилення поточного електричного режиму від заданого усталеного, та сигнал похідної (приростів) сигналу розузгодження ЕР.

Вихідний корегуючий сигнал $\Delta U_{KK}^{l_0}$ НР додається до основного сигналу керування $U_{KP}^{l_0}$ регулятора потужності дуг та подається на вхід електромеханічної (електрогідравлічної в регуляторах типу АРДГ) системи переміщення електродів. Вихідний сигнал нечіткого регулятора Такагі-Сугено формується за такою моделлю правил нечітких продукцій: **IF** $U_{розк} \in A_{1k}$ і $U_{розк} \in A_{2k}$ **THEN** $\Delta U_{KK}^{l_0} \in B_k$, де B_k — значення виходу для відповідних діапазонів значень вхідних сигналів нечіткого регулятора. Сума сигналів $U_{KP}^{l_0}$ та $\Delta U_{KK}^{l_0}$ є вхідним сигналом керування САР на переміщення електрода. Запропоновано методику синтезу параметрів такого НР Такагі-Сугено, складено математичну та цифрову моделі запропонованої структури САР для реалізації адаптивної оптимальної стабілізації координат ЕР ДСП.

На рис. 1 показано структурну схему цифрової Simulink-моделі опрацьованої системи нечіткого регулювання потужності (регулювання довжин) дуг ДСП, адаптованої до параметрів структури САР потужності дуг дугової печі ДСП-200 з типовим регулятором потужності дуг типу АРДМ-Т-12. Цифрову модель розробленої САР потужності дуг з нечітким коректором реалізовано в додатку Simulink математичного пакета Matlab версії R2007b. На цій моделі отримано оцінки параметрів функцій належності та значення корегуючого сигналу для кожного піддіпазону вихідних лінгвістичних змінних за результатами аналізу отриманих реакцій САР при дії різних за амплітудою та знаком детермінованих збурень за довжиною дуги.

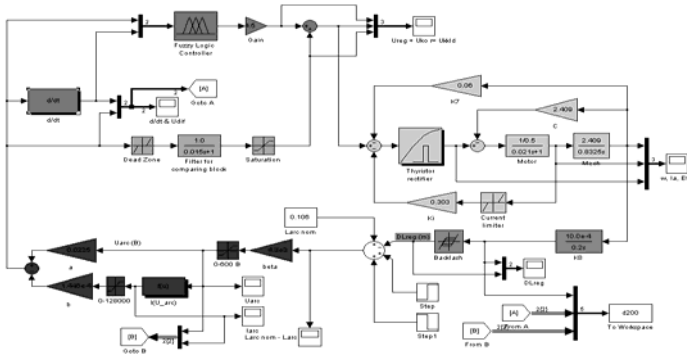


Рис. 1. Структурна схема Simulink-моделі САР потужності дуг ДСП з нечіткою паралельною корекцією

Передавальний пристрій та сама конструкція механізму переміщення електрода представлені інтегратором та елементом типу «люфт» як одномасова штивна система. Досліджено динаміку також при врахуванні реальної податливості стояків, рукавів електродотримачів та електродів, тобто досліджено також як двомасову систему.

Дугові проміжки у плавильному просторі ДСП подані суматором, що підсумовує такі складові сигнали довжини дуги: сигнал заданої довжини дуги $l_{d,зад}$, регулюючі прирости довжини дуги $\Delta l_{d,рег}$, що вносяться регулятором потужності дуги типу АРДМ-Т-12 (вихідний сигнал механізму переміщення електродів) та сигнал збурення за довжиною дуги f_{l_d} , що розраховується згідно виразу: $l_d = l_{d,зад} - \Delta l_{d,рег} + f_{l_d}$, масштабним посилювачем, що враховує точне значення градієнта напруги на стовпі дуги β та безінерційним нелінійним елементом, що відтворює природну зовнішню характеристику дугової печі $I_d(U_d)$, що розрахована за такою залежністю:

$$I_d(U_d) = \frac{-U_d r + \sqrt{(U_d r)^2 + (r^2 + x^2)(U_{2\phi}^2 + U_d^2)}}{r^2 + x^2},$$

де $r = 0.00065 \text{ Ом}$, $x = 0.0046 \text{ Ом}$ — активний та реактивний опір короткої мережі (системи живлення трифазних дуг) дугової сталеплавильної печі ДСП-200; $U_{2\phi} = 591 \text{ В}$ — вторинна напруга робочої (першої) ступені пічного трансформатора.

Обґрунтовано використання трикутних функцій належності на внутрішніх і трапецеподібних на крайніх піддіапазонах для вхідних лінгвістичних змінних — сигнала розузгодження $U_{роз}(t)$ та його похідної $U'_{роз}(t)$. Для опису вхідних лінгвістичних змінних обґрунтовано використання семи термів з нерівномірною шкалою розбиття по піддіапазонах зміни та отримано значення параметрів відповідних їм функцій належності. Графічне зображення сформованих функцій належності для вхідних лінгвістичних змінних — сигнала розузгодження $U_{роз}(t)$ (похибки регулювання диференційного регулятора потужності АРДМ-Т) та його приростів $U'_{роз}(t)$ (похідної) показано на рис. 2 та на рис. 3 відповідно. На рис. 4 показано дискретні значення вихідного сигналу нечіткого регулятора (коректора) Такагі-Сугено.

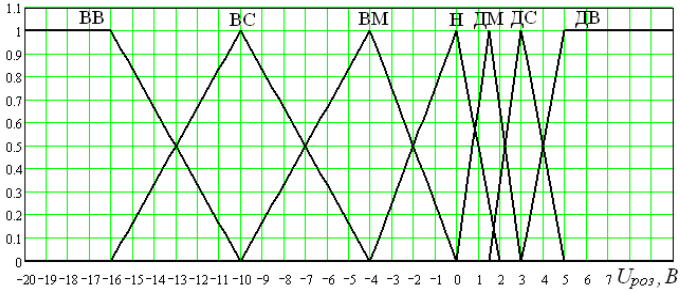


Рис. 2. Функції належності для похибки регулювання $U_{роз}(t)$ (сигнала розузгодження) диференційного регулятора АРДМ-Т-12

Оцінки показників якості процесу регулювання в існуючій САР переміщення електродів ДСП-200 отримано на основі аналізу реакції системи на екстремальні відхилення довжини дуги від точки усталеного режиму. Ці режими, а це режими відпрацювання експлуатаційного короткого замикання та обриву дуги, є «найтяжчими» як з енергетичної точки зору (втрати енергії в системі живлення трифазних дуг є максимальними), так і важливими з точки зору налаштування такої нелінійної системи на оптимальну динаміку регулювання випадкових збурень, бо при відпрацюванні менших за амплітудою детермінованих збурень показники динаміки у першому наближенні отримуватимуться не «гіршими» за налаштовані для режимів відпрацювання екстремальних збурень.

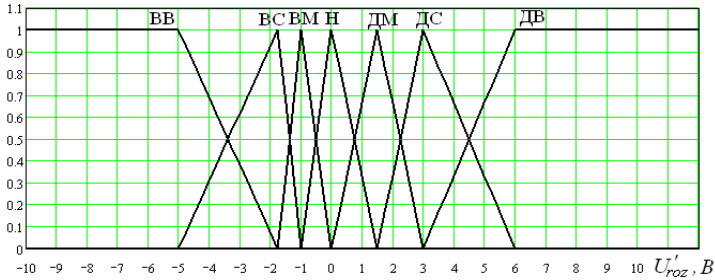


Рис. 3. Функції належності для похідної похибки регулювання $U'_{роз}(t)$ (приростів сигналу розузгодження) регулятора АРДМ-Т-12

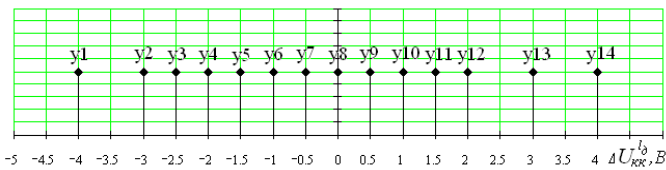


Рис. 4. Вихідні сигнали нечіткого коректора розробленої САР

Для цього на створеній цифровій Simulink-моделі електроμηχανічної САР положення електродів печі ДСП-200 з регулятором типу АРДМ-Т-12 за схемою «тиристорний перетворювач — двигун постійного струму» було виконано низку математичних експериментів з отримання часових залежностей зміни координат ЕР у процесі відпрацювання екстремальних збурень — короткого замикання та обриву дуги. На рис.5 показано отримані на цій моделі часові залежності зміни координат електроприводу: ЕРС тиристорного перетворювача $e_{mn}(t)$, струму $i_a(t)$ та кутової швидкості $\omega_{oe}(t)$ двигуна переміщення електродів без корекції (рис. 5, а) та з використанням нечіткої корекції (рис.5,б). З рис.5 випливає, що час регулювання при відпрацюванні режиму к.з. з НР скоротився майже у 2 рази за неколивним відгуком.

На рис.6 показано часові залежності зміни напруги $U_o(t)$ та струму $I_o(t)$ при відпрацюванні детермінованих збурень за довжиною дуги існуючою САР типу АРДМ-Т-12 та запропонованою САР з НР.

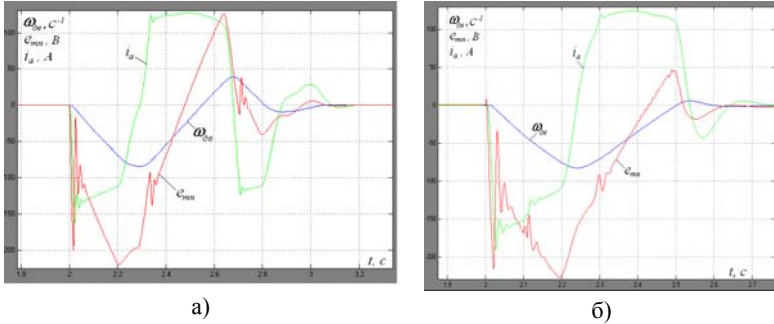


Рис. 5. Часові залежності координат електроприводу МПЕ печі ДСП-200 без корекції а) та з нечіткою корекцією б)

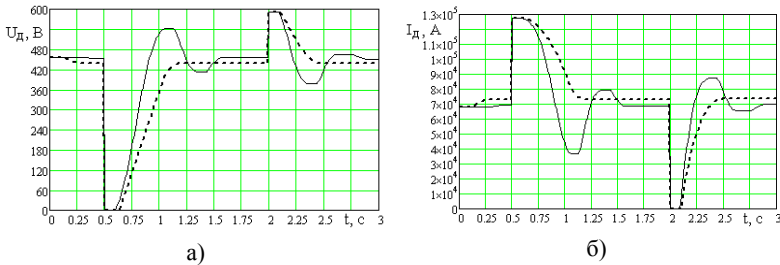
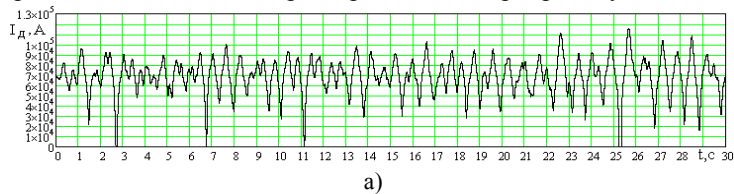


Рис. 6. Сигнали відгуків $U_o(t)$ та $I_o(t)$ існуючої САР типу АРДМ-Т-12 (—) та запропонованої САР з НР (---) на детерміновані збурення

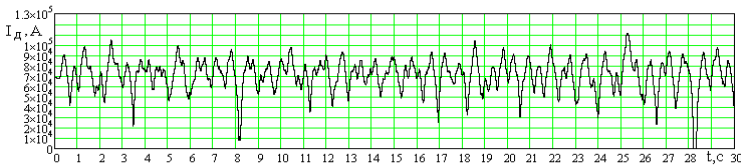
На рис. 7 зображено процеси зміни струму дуги $I_o(t)$ при відпрацюванні стаціонарних випадкових збурень за довжиною дуги існуючою САР типу АРДМ-Т-12 а) та запропонованою САР з НР б).

Аналіз наведених модельних регістрограм показує поліпшення динамічної точності регулювання координат ЕР, зокрема дисперсія струмів дуг (точність динамічної стабілізації) при відпрацюванні випадкових збурень зменшилася з $2.94 \cdot 10^8 \text{ A}^2$ до $2.34 \cdot 10^8 \text{ A}^2$, тобто на 20%.

Наведені вище результати досліджень отримані для схеми паралельного включення НР, тобто використання його як коректора. На наступному етапі було опрацьовано методику та виконано проектування алгоритмічних та параметричних ступенів свободи НР, що включає послідовно у прямому каналі регулювання і який призначався, в основному, для компенсації люфтів, зони нечутливості, «мертвої зони» силового перетворювача електроприводу МПЕ тощо.



а)



б)

Рис. 7. Часові залежності струму дуги при відпрацювання випадкових збурень за довжиною дуги АРДМ-Т-12 а) та САР з НР б)

Вхідними сигналами цього НР є сигнал керування U_c та його похідна U_c' , а вихідним — сигнал керування на переміщення електрода U_c^l . Кількість термів для кожної вхідної лінгвістичної змінної (сигналу розузгодження та його приростів) НР — два, а функції належності — трикутні. Лінгвістичні оцінки для їх терм-множин є «від'ємний» і «додатний». Функції належності сигналу керування з нечіткими множинами «додатний» і «від'ємний» формується як обмеження зверху значенням $\min(\mu(u_1), \mu(u_2))$ і формується на основі логічного об'єднання $\max(\mu^1(u_3), \mu^2(u_3))$; дефазифікація — за методом «центра ваги», де u_1, u_2, u_3 — нормовані вхідні та вихідні сигнали НР.

Для схеми послідовного (в розрив) в прямому каналі регулювання потужності дуг включення НР складено математичну та цифрову Simulink-модель, а також запропоновано та опрацьовано вказані моделі для комбінованого (одночасного) включення двох нечітких регуляторів за вказаними вище схемами і виконано дослідження їх дина-

міки при відпрацюванні аналогічних реалізацій детермінованих та стаціонарних випадкових збурень. Виконані дослідження передбачали також аналіз чутливості динаміки до зміни параметрів, зокрема до зміни градієнта напруги на дузі, зміни зони нечутливості тощо.

У табл. 1 зведено значення дисперсій струмів дуг при функціонуванні типового регулятора потужності дуг АРДМ-Т-12, а також дисперсії для САР із запропонованими схемами включення НР. Значення дисперсій досліджених САР отримані за однакових реалізацій випадкових збурень за довжиною дуги і за інших рівних умов.

Таблиця 1

Схема включення НР	Типовий регулятор АРДМ-Т-12	Паралельне включення НР	Послідовне включення НР	Комбіноване включення НР
Дисперсія струму дуги, D_{I_0} , A^2	$2.94 \cdot 10^8$	$2.34 \cdot 10^8$	$2.15 \cdot 10^8$	$2.07 \cdot 10^8$

Висновки. Аналіз динаміки досліджених структур САР електричного режиму дугових сталеплавильних печей підтвердив доцільність використання принципів нечіткого керування, що реалізується на основі різних схем включення нечітких регуляторів.

Аналіз отриманих результатів модельних досліджень показує, що реалізація оптимального (аперіодичного неколивного з максимальною швидкодією) закону руху електрода у розроблених структурах САР ЕР з нечіткими регуляторами поліпшує інтегральні показники якості регулювання (зокрема динамічну точність стабілізації) координат електричного режиму у процесі плавлення, і, відповідно, підвищує показники енергоефективності дугової сталеплавильної печі.

Схемі САР з послідовним включенням НР властива найнижча чутливість до зміни параметрів силового кола та системи регулювання. Використання паралельного нечіткого коректора у поєднанні з послідовним включенням НР дає змогу дещо підвищити швидкодію (зменшити час регулювання детермінованих збурень) при дотриманні неколивної реакції САР у широкому діапазоні амплітуд збурень.

Використання в структурі САР нечітких регуляторів дає змогу значно поліпшити інтегральні показники якості регулювання та енергоефективності, зокрема зменшити дисперсію відпрацювання випадкових збурень на 25–35%, а між собою запропоновані та досліджені структури САР з нечіткими регуляторами за показниками якості регулювання різняться незначно, але найкращі показники має САР з комбінованим включенням двох НР, проте вона є найскладнішою.

Список використаних джерел:

1. Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева : учебник для вузов / А. Д. Свенчанский, И. Т. Жердеев, А. М. Кручинин. — М. : Энергоиздат, 1981. — 296 с.

2. Lozynskyy O. Multicriterion Intelligent Control System and Optimal Stabilization of Arc Steel-Melting Furnace Electrical Regimes Coordinates / O. Lozynskyy, Y. Paranchuk, R. Paranchuk // Computational Problems of Electrical Engineering. — 2011. — Vol. 1, № 1. — P. 35–44.

The structure of arc furnace arcs power control system with fuzzy controllers, optimized by the criterion of minimum electric mode coordinates dispersion is proposed. Research results are presented.

Key words: *arc steelmaking furnace, fuzzy regulator, arcs power controller, optimization, dynamics, electrode movement law, dispersion, speed, time of control.*

Отримано: 21.03.2014

УДК 519.6

М. Р. Петрик*, д-р фіз.-мат. наук,
Д. М. Михалик*, канд. техн. наук,
М. І. Шинкарик**, канд. фіз.-мат. наук,
О. Ю. Петрик*, старший викладач,
Н. В. Бабій***, канд. техн. наук

*Тернопільський національний технічний університет
імені І. Пулюя, м. Тернопіль,

**Тернопільський національний
економічний університет, м. Тернопіль,

***Кременецький обласний гуманітарно-педагогічний
інститут імені Т. Шевченка, м. Кременець

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСІВ ДИФУЗІЙНОГО ПЕРЕНЕСЕННЯ В БАГАТОШАРОВИХ ОКСИДНИХ НАНОПЛІВКАХ

Запропоновано модель дифузійного переносу для процесу формування тонких наноплівки в обмеженому n -компонентному неоднорідному середовищі з нестационарних режимів масопереносу на масообмінних поверхнях. Для запропонованої моделі побудовано розв'язок та обґрунтовано вибір функціоналу нев'язки для проведення процедури ідентифікації коефіцієнтів дифузії. Отримано просторово-розподілені концентраційні розподіли хрому для різних технологічних зрізів оксидної наноплівки та часових тривалостей формування технологічного мультишару та проведено аналіз кінетики формування мультишару.

Ключові слова: *математичне моделювання, дифузійні процеси, багатошарові оксидні середовища.*

Вступ. Вивчення дифузії в багатошарових плівках різної природи, зокрема в тонких наноплівках, отриманих шляхом композиції матеріалів з різними властивостями, є важливим напрямом сучасної промисловості.