

УДК 621.31:62-53

О. Ю. Лозинський, Я. С. Паранчук, доктори техн. наук,
В. Б. Цяпа, Л. Ф. Карплюк, кандидати техн. наук

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ НЕЧІТКОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЕЛЕКТРОДІВ ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ

Анотація. Обґрунтовано доцільність використання принципів нечіткого керування електроприводом переміщення електродів дугової сталеплавильної печі. Запропоновано методику синтезу нечітких регуляторів системи регулювання положення електродів. Виконані дослідження показали підвищення динамічної та статичної точності регулювання довжин дуг при використанні нечіткого керування.

Ключові слова: дугова сталеплавильна піч, нечіткий регулятор, синтез, показники динаміки, модель

O. Y. Lozynsky, ScD., Y. S. Paranchuk, ScD.,
V. B. Tsyapa, PhD., L. F. Karplyuk, PhD.

STUDY OF FUZZY CONTROL SYSTEM FOR ARC FURNACE ELECTRODES MOVEMENT

Abstract. The expedience of utilization of fuzzy control principles for arc furnace electrodes movement control is substantiated. The method of fuzzy controllers synthesis for electrodes position control system is proposed. The carried out research shows increase of dynamic and static accuracy of arc lengths control under use of fuzzy controllers.

Keywords: arc steelmaking furnace, fuzzy controller, synthesis, dynamic indices, mode

О. Ю. Лозинский, Я. С. Паранчук, доктора техн. наук,
В. Б. Цяпа, Л. Ф. Карплюк, кандидаты техн. наук

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Аннотация. Обосновано целесообразность использования принципов нечеткого управления электроприводом перемещения электродов дуговой сталеплавильной печи. Предложена методика синтеза нечетких регуляторов системы регулирования положения электродов. Выполненные исследования показали повышение динамической и статической точности регулирования длин дуг при использовании нечеткого управления.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, нечеткий регулятор, синтез, показатели динамики, модель

Вступ. Дугові сталеплавильні печі (ДСП) – це потужні електротехнологічні об'єкти для плавлення високоякісних сталей і сплавів. Світова тенденція удосконалення їх систем автоматичного керування (САК) направлена на зростання продуктивності, зниження питомих витрат електроенергії, підвищення надійності та ресурсу ДСП. Зокрема проектується та впроваджуються високоімпедансні ДСП з підвищеною питомою потужністю силового електрообладнання та значною інтенсифікацією процесу плавлення твердої шихти. Останнє ставить жорсткі вимоги до показників динаміки регулювання довжин (напруг, струмів, потужностей) дуг. ДСП відносяться до класу складних об'єктів керування (ОК) і характеризуються динамічними стохастичними пофазно взаємозв'язаними і несиметричними режимами та випадковими параметричними і координатними збуреннями, що унеможливує отримання їх точних математичних моделей [1 – 3].

Результати дослідження. Зважаючи на наведені характеристики, для задач керування режимами ДСП доцільним є використання принципів нечіткого керування, яке не потребує точної математичної моделі ОК, а ґрунтується на основах теорії нечітких множин, що оперують лінгвістичними змінними, які подаються не числовими змінними, а сукупністю нечітких множин [4 – 9].

© Лозинський О.Ю., Паранчук Я.С., Цяпа В.Б.,
Карплюк Л.Ф., 2014

Метою статті є дослідження ефективності використання нечіткого керування в структурі електромеханічної системи регулювання (САР) довжин (напруг, струмів, потужностей) дуг ДСП. Для цього розроблено низку структур системи автоматичного (САР) координат електричного режиму (ЕР) ДСП, що використовують різні типи нечітких регуляторів (НР) та схеми їх включення, запропоновано методики синтезу НР, складено їх математичні та структурні Simulink-моделі, що реалізовані у пакеті MatLab версії R2011a [9, 10].

Матеріал дослідження. На рис. 1 показано структурну схему однієї із запропонованих структур САР координат ЕР, у якій використовуються два нечітких регулятори. Усі запропоновані структури САР функціонують на основі серійних електромеханічних регуляторів потужності дуг (зокрема типу АРДМ-Т), що включають давачі струму ДС і напруги ДН дуги, блок формування сигналу керування БФСР, електропривод механізму переміщення електрода ПМПЕ і механізм переміщення електроду МПЕ, пічний трансформатор ПТ з пристроями ПБЗ чи РПН перемикання ступенів напруги. В основу принципу регулювання положення електродів у запропонованих САК ЕР з нечітким керуванням покладено диференціальний закон: $U_{роз} = aU_{\delta} - bI_{\delta}$, де \bar{U}_{δ} і \bar{I}_{δ} – усереднені на періоді напруги мережі живлення напруга та струм дуги, які формуються на виходах фільтрів низької частоти каналу напруги та

струму дуги відповідно; a, b – сталі коефіцієнти, що визначають заданий ЕР; $I_{\partial,уст}$ – уставка за струмом дуги диференційного регулятора (системи регулювання) потужності дуг. У показаному на рис. 1 варіанті САР довжини дуг для зменшення чутливості до параметричних змін і реалізації доцільного з точки зору якості динаміки регулювання координат ЕР та показників енергоефективності неколивного (апериодичного) закону відпрацювання одиничних (детермінованих, зокрема екстремальних) збурень за довжиною дуги, включено нечіткий регулятор (НР) та нечіткий коректор.

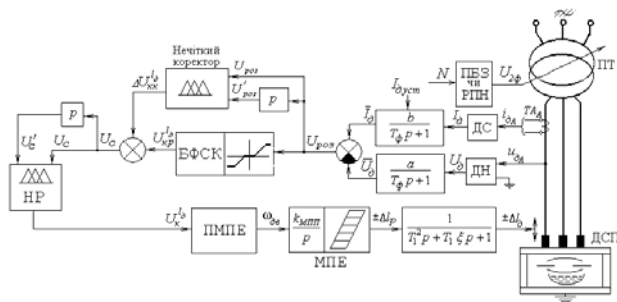


Рис. 1. Функціональна блок-схема САР положення електрода ДСП на основі нечітких регуляторів

Коректор реалізовано на основі нечіткого регулятора Такагі-Сугено з постійним виходом, що включений паралельно до БФС. Вхідними його сигналами є сигнал розузгодження $U_{роз}$ (що опосередковано подає оцінку похибки регулювання довжини дуги), та приріст цього сигналу $U'_{роз}$ (похідна похибки) (рис. 1). Вихідний корегуючий сигнал $\Delta U_{кр}^{\partial}$ нечіткого коректора додається до основного сигналу керування $U_{кр}^{\partial}$ регулятора АРДМ-Т, що формується за диференціальним законом.

Вихідний сигнал нечіткого коректора формується за такою моделлю правил нечітких продукцій:

якщо $U_{роз_к} \in A_{I_k}$ і $U'_{роз_к} \in A_{2_k}$ **тоді** $\Delta U_{кр_к}^{\partial} \in B_k$, де

B_k - значення виходу для відповідного діапазону. Оцінка параметрів функцій належності та значення вихідного сигналу для кожного діапазону отримані на основі опрацювання перехідних характеристик електромеханічної САР положення електродів (серійного регулятора потужності дуг типу АРДМ-Т-12) при дії в системі різних за амплітудою та знаком детермінованих збурень за довжиною дуги, що отримані на її цифровій моделі. У подальшому параметри функцій належності нечіткого коректора уточнювалися на цифровій моделі за розробленою методикою. Отримані їх оптимальні значення відповідали критерію мінімуму дисперсії напруг, струмів та потужності дуг у режимах відпрацювання стаціонарних випадкових збурень за довжиною дуг для різних технологічних стадій плавки.

Створені цифрові Simulink-моделі розроблених електромеханічних САР положення електродів ДСП з нечітким керуванням адаптовані до параметрів печі

ДСП-200 з регулятором типу АРДМ-Т-12, який містить електропривод за схемою «тиристорний перетворювач – двигун постійного струму». На цих цифрових Simulink-моделях виконано низку математичних експериментів з отримання часових залежностей зміни координат ЕР у процесі відпрацювання екстремальних збурень – короткого замикання (КЗ) та обриву дуги, а також при дії стаціонарних випадкових збурень за довжиною дуги, статистичні характеристики яких відповідали певним періодам плавлення в ДСП.

На рис. 2 показано отримані на моделі САР з нечітким коректором часові залежності зміни координат електроприводу МРЕ: ЕРС тиристорного перетворювача $e_{mn}(t)$, струму $i_a(t)$ та кутової швидкості $\omega_{\partial\phi}(t)$ двигуна переміщення електродів без корекції (рис. 2, а) та з використанням нечіткої корекції (рис. 2, б).

З рис. 2 випливає, що час регулювання при відпрацюванні режиму КЗ з НР скоротився майже у два рази за неколивного процесу регулювання довжини дуги.

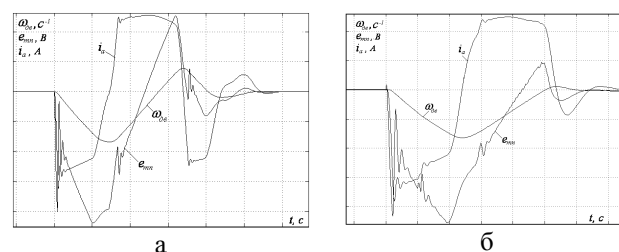


Рис. 2. Часові залежності координат електроприводу МРЕ без корекції (а) та з нечіткою корекцією (б)

Як показали результати досліджень, використання нечіткого коректора загалом позитивно впливає на поліпшення динаміки, але ефективність такої нечіткої корекції не є однаковою у всьому амплітудному діапазоні збурень за довжиною дуги. Якщо налаштувати параметри нечіткого коректора на максимальні збурення, то при відпрацюванні середніх виникає незначне відхилення від доцільної неколивної реакції, і навпаки.

Для отримання неколивної реакції САР за будь-якої амплітуди збурення досліджено ефективність включення НР у прямий канал (в розрив) регулювання довжини дуги. Таке включення НР доцільне для компенсації існуючих в типових САР (регуляторах АРДМ-Т) люфтів, зони нечутливості, «мертвої» зони силового перетворювача електроприводу МРЕ тощо. Опрацьована методика проектування параметрів НР, що включається у прямому каналі регулювання. Його вхідними сигналами є сигнал керування U_c та його похідна U'_c , а вихідний – сигнал керування на переміщення електрода $U_{кр}^{\partial}$. Кількість термів для кожної вхідної лінгвістичної змінної (сигналу розузгодження та його приростів) НР – два, а функції належності – трикутні з лінгвістичними оцінками «від'ємний» і «додатний». Функції належності сигналу керування з нечіткими множинами «додатний» і «від'ємний» формуються як обмеження зверху $\min(\mu(u_1), \mu(u_2))$ і розраховуються 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.

На рис. 3 показано отримані на Simulink-моделі відповідної структури САР часові залежності зміни діючих значень напруги напруги $U_d(t)$ та струму $I_d(t)$ дуги при відпрацюванні детермінованих збурень за довжиною дуги існуючою САР (АРДМ-Т-12) та запропонованою САР з нечітким регулятором.

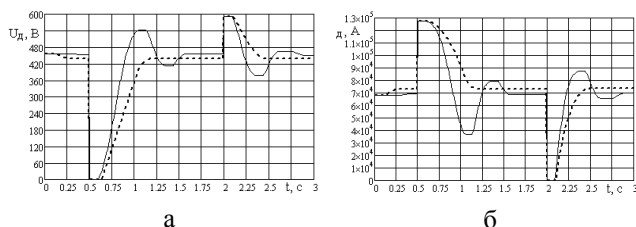


Рис. 3. Сигнали відгуків $U_d(t)$ (а) та $I_d(t)$ (б) регулятора АРДМ-Т-12 (—) та запропонованої САР з послідовно включеним НР (----) за дії детермінованих збурень

На рис. 4 зображено процеси зміни струму дуги $I_d(t)$ при відпрацюванні стаціонарних випадкових збурень за довжиною дуги існуючою САР типу АРДМ-Т-12 а) та запропонованою САР з НР б).

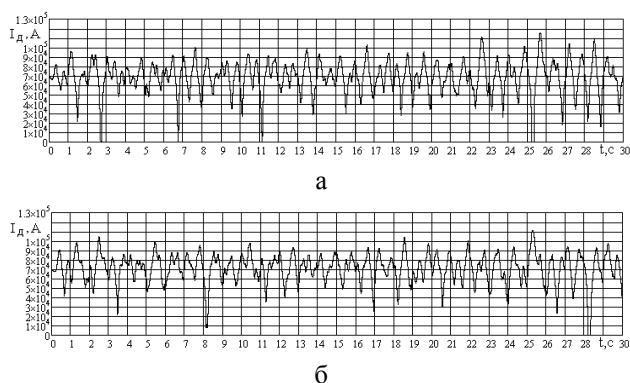


Рис.4. Процеси $I_d(t)$ при відпрацювання випадкових збурень регулятором АРДМ-Т-12 (а) та САР з НР (б)

Аналіз наведених модельних реєстрограм показує поліпшення динамічної точності регулювання струму дуги, зокрема дисперсія струмів дуг (точність 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 %.

Виконано дослідження показників динаміки регулювання довжин дуг для комбінованого (одноточного) включення двох нечітких регуляторів (рис. 1) при дії детермінованих та стаціонарних випадкових збурень. Виконані дослідження передбачали також аналіз чутливості показників динаміки до зміни параметрів, зокрема до зміни градієнта напруги на дузі, зміни ширини зони нечутливості регулятора тощо.

У таблиці зведено значення дисперсій струму D_{I_d} дуги при функціонуванні досліджуваних структур САР, отриманих за однакових реалізацій випадкових збурень за довжиною дуги і за інших рівних умов.

1. Інтегральні показники досліджених структур САР

Схема САР	АРДМ-Т-12	Нечіткий коректор	Послідовний НР	Комбіноване включення нечіткого коректора та НР
D_{I_d}, A^2	$2,94 \cdot 10^8$	$2,34 \cdot 10^8$	$2,15 \cdot 10^8$	$2,07 \cdot 10^8$

Висновки

1. Аналіз динаміки досліджених структур САР ЕР ДСП підтвердив доцільність використання принципів нечіткого керування, що реалізується на основі різних схем включення нечітких регуляторів.

2. Реалізація оптимального (неколивного з максимальною швидкістю) закону руху електрода у розроблених структурах САР ЕР з нечіткими регуляторами поліпшує інтегральні показники якості регулювання (зокрема динамічну точність стабілізації) координат ЕР у процесі плавлення, і, відповідно, підвищує показники енергоефективності роботи ДСП.

3. Схемі САР з послідовним НР властива найнижча чутливість до зміни параметрів силового кола та САР. Використання паралельного нечіткого коректора у поєднанні з послідовним включенням НР дає змогу дещо підвищити швидкість (зменшити час регулювання детермінованих збурень) при дотриманні неколивної реакції САР для будь-яких збурень.

4. Використання в структурі САР нечітких регуляторів дає змогу значно поліпшити інтегральні показники якості регулювання та енергоефективності, зокрема зменшити дисперсію регулювання випадкових збурень на 20 – 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 використаної літератури

1. Свенчанский А. Д. 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. Минеев А. Моделирование электротехнологических процессов и установок / А. Минеев, А. Коробов, М. Погребиский. – М. : Спутник+, 2004. – 124 с.
3. Кудрин Б. Ретроспективный и перспективный взгляды на электропотребление в электрометаллургии (Часть III) / Б. Кудрин // Электрометаллургия. – 2003. – 12. – С. 3 – 11.
4. Лозинский А. О. Повышение динамической устойчивости регулирования токов дуг с использованием fuzzy-logic регулятора / А. О. Лозинский, Я. С. Паранчук, В. М. Эдемский, А. Я. Андрианова // Труды IV-й Международной конференции по электромеханике и электротехнологии: МКЭЭ-2000. – М. : Изд. МЭИ – 2000. – 405 с.
5. Андрианова А. Я. Некоторые вопросы использования интеллектуального управления в дуговых сталеплавильных печах / А. Я. Андрианова., Я. С. Паранчук, А.

О. Лозинский // *Электрометаллургия*. – 2004. – № 3. – С. 30 – 37.

6. Lozynskiy O.Y., and Paranchuk Y.S., (2011), Multicriterion Intelligent Control System and Optimal Stabilization of Arc Steel-Melting Furnace Electrical Regimes Coordinates, *Computational Problems of Electrical Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 35 – 44.

7. Лозинский О. Ю. Оптимизация режимов системы управления процессом электросталеплавления в дуговых сталеплавильных печах / О. Ю. Лозинский, Я. С. Паранчук // *Электротехника*. – 2004. – № 6. – С. 50 – 54.

8. Гостев В. И. Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления. / В. И. Гостев. – К. : Радиоаматор, 2005. – 708.

9. Lozynskiy O.Y., Lozynskiy A.O., and Paranchuk Y.S. (2009). Energy Efficient, Multicriterion Intelligent Control System of the Electrical Regimes of arc steel Melting Furnace, *Bydgoszcs. Elektrotechnika*, No.14, , pp.5 – 16.

10. Lozynskiy O.Y., and Paranchuk Y.S., (2013), Modeling of Power Control of Arc Steel Melting Furnace with Fuzzy Correction of Regulation Signal, *Przegląd elektrotechniczny*, No. 3, a, pp. 265 – 267.

Отримано 14.07.2014

References

1. Svenchanskiy A.D., Zherdeev I.T., and Kruchinin A.M. *Elektricheskie promyshlennye pechi: Dugovye pechi i ustanovki spetsialnogo nagreva*, [Electric Industrial Furnaces: arc Furnaces and Special Heating], (1981), Moscow, Russian Federation, *Energoizdat*, 296 p. (In Russian).

2. Mineev A.R., Korobov A.I., and Pogrebisskiy M.Y. *Modelirovanie elektrotehnologicheskikh protsesov i ustanovok*, [Electrotechnological Complexes and Appliances Simulation], (2002), Moscow, Russian Federation, *Sputnik+*, 124 p. (In Russian).

3. Kudrin B.I. *Retrospektivnyy i perspektivnyy vzglyad na elektropotreblenie v elektrometallurgii* / [Retrospective and Prospective Views on the Power Consumption in Electric Metal Production], (2003), *Elektrometallurgiya*, No. 12, pp. 3 – 11 (In Russian).

4. Lozynskiy O.Y., Lozynskiy A.O., Paranchuk Y.S., Edemskiy V.M., and Andrianova A.Y. *Povyshenie dinamicheskoy ustoychivosti regulirovaniya tokov i dug s ispolzonaniem fuzzy-logic regulatora* / [Increase Dynamic Stability of arc Current Controls Using fuzzy-logic Controller], (2000), *Trudy IV Mezhdunarodnoy Konferentsii po Elektromekhanike i Elektrotehnologii Part 3, MKEE-2000*, Moscow, Russian Federation, *Izd.: MEI*, 405 p. (In Russian).

5. Andrianova A.Y., Paranchuk Y.S., and Lozynskiy A.O. *Nekotorye voprosu ispolzovaniya intellektnogo upravleniya v dugovykh staleplavilnykh pechakh*, [Some Questions of use of Intelligent Control in Electric arc Furnaces], (2004), *Elektrometallurgiya*, No. 3, pp. 30 – 37 (In Russian)

6. Lozynskiy O.Y., and Paranchuk Y.S. (2011), Multicriterion Intelligent Control System and Optimal Stabilization of Arc Steel-Melting Furnace Electrical Regimes Coordinates, *Computational Problems of Electrical Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 35 – 44 (In English).

7. Lozynskiy O., and Y. Paranchuk. *Optimizatsiya rezhimov sistema upravleniya procesom elektrostaleplavleniya v duhovyykh snaleplavilnykh pechakh*, [Optimization of the Steel Melting Process Control System Modes in Electric arc Furnaces], (2004), *Elektrotehnika*, No. 6, pp. 50 – 54 (In Russian).

8. Gostev V.I. *Sintez nechetkikh regulyatorov sistem avtomaticheskoho upravleniya* / [Synthesis of Fuzzy Controllers for Automatic Control Systems], (2005), Kiev, Ukraine, *Radioamator*, 708 p. (In Russian).

9. Lozynskiy O.Y., Lozynskiy A.O., and Paranchuk Y.S. *Enerhoefektyvna bagatokryterialna intelektualna systema upravlinnya rezhymiv dugovoyi staleplavylnoyi pechi*. [Energy Efficient, Multicriterion Intelligent Control System of the Electrical Regimes of arc Steel Melting Furnace], (2009), *Bydgoszcs. Elektrotechnika*, No. 14, pp. 5 – 16 (In English).

10. Lozynskiy O.Y. and Paranchuk Y.S., (2013), Modeling of Power Control of Arc Steel Melting Furnace with Fuzzy Correction of Regulation Signal, *Przegląd elektrotechniczny*, No. 3,a, pp. 265 – 267 (in English).



Лозинський

Орест Юліанович, д-р техн. наук,
проф., зав. каф. електроприводу НУ
“Львівська політехніка”,
Львів-13, вул. Бандери 12.
Тел. (032) 258-24-68,
E-mail:
olozynsky@polynet.lviv.ua



Паранчук

Ярослав Степанович, д-р техн. наук,
проф., каф. електроприводу НУ
“Львівська політехніка”, Львів-13,
вул. Бандери 12.
Тел. (032) 258-26-20,
м/т: 0672813764.
E-mail: yparanchuk@yahoo.com,



Цяпа

Володимир Богданович,
канд. техн. наук, доц. каф. електроприводу НУ
“Львівська політехніка”, Львів-13,
вул. Бандери 12.
Тел. (032) 258-26-20,
м/т: 0978399851.
E-mail: tsjapa@ukr.net



Карплюк

Леонід Федорович, канд. техн. наук,
доц. каф. електроприводу НУ
“Львівська політехніка”, Львів-13,
вул. Бандери 12.
Тел. (032) 258-26-20,
м/т: 0674944974