

Practical value. The proposed method of supplying energy-efficient fuel mixture in the solid fuel boilers was tested for production facilities “Ukrainian technological systems” in the Ternopil region. As components of bio-fuels used chopped straw (humidity 25–37%) and sawdust (humidity 12–15%). During the experiment test system of control demonstrated satisfactory performance on the process equipment company. The results obtained proved that the use of technology allows us to reduce en-

ergy costs by an average of 17%. This method can be used in enterprises, which focusing on the use of alternative fuels.

Keywords: *solid biofuel, dosing regimens, electric, heat generator, energy efficiency, fuel mixture*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук П.С. Євтухом. Дата надходження рукопису 14.09.13.

УДК 007:681.516.4

**А.О. Лозинський, д-р техн. наук, проф.,
Л.І. Демків, канд. фіз.-мат. наук**

Національний університет “Львівська політехніка”, м.Львів, Україна, email: lozynsky@polynet.lviv.ua; demkivl@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КАСКАДНОГО НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЕЛЕКТРОДА ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ

**A.O. Lozynskyi, Dr. Sci. (Tech.), Prof.,
L.I. Demkiv, Cand. Sci. (Math.)**

National university “Lviv Polytechnic”, Lviv, Ukraine, email: lozynsky@polynet.lviv.ua, demkivl@gmail.com

STUDY OF THE INFLUENCE OF FUZZY CASCADE CONTROLLER ON CHARACTERISTICS OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF ARC FURNACE'S ELECTRODE MOVEMENT

Мета. Покращити динамічні характеристики системи автоматичного керування переміщенням електрода дугової сталеплавильної печі при допустимих перерегулюваннях проміжних координат.

Методика. Застосовано апарат нечітких множин для синтезу керуючих впливів в окремих точках простору станів. Для того, щоб значення проміжних координат залишались у допустимих межах, застосовано каскадний регулятор, перший каскад якого активує потрібну підсистему з відповідним ваговим коефіцієнтом, а другий обмежує вихідний сигнал регулятора у випадку перевищення проміжними координатами допустимих меж. Крім того, для спрощення синтезу нечіткого регулятора суттєво обмежено кількість термів кожної нечіткої змінної.

Результати. Проведене порівняння пропонованого підходу та підходів на основі принципу модального керування до синтезу регулятора системи автоматичного керування переміщенням електрода. Визначені кількісні та якісні переваги пропонованого підходу до синтезу нечіткого каскадного регулятора досліджуваної системи. Крім того, проведений аналіз поведінки системи із пропонованим нечітким регулятором та нечіткими регуляторами з фазифікацією однієї та двох змінних. Одержані результати свідчать про доцільність застосування каскадного регулятора в системі автоматичного керування переміщенням електрода дугової сталеплавильної печі.

Наукова новизна. У роботі запропонований метод синтезу, що забезпечує як бажаний перехідний процес за вихідною координатою, так і обмеження проміжних координат системи.

Практична значимість. Запропонований підхід дозволяє покращити адаптацію системи автоматичного керування переміщенням електрода дугової сталеплавильної печі до різних режимів роботи.

Ключові слова: *нечітка логіка, нечіткий регулятор, модальний регулятор, каскадний нечіткий регулятор, фазифікація, двомасова динамічна система, ступені свободи*

Постановка проблеми. На сьогоднішній день існуючі методи синтезу регуляторів електромеханічних систем не завжди дають змогу забезпечити техніко-економічні вимоги до їх функціонування. Адже спрощена, лінеаризована модель системи не враховує присутніх у системі нелінійностей та обмежень, що

накладено на коефіцієнти. А синтезована, з використанням такої моделі система, забезпечує оптимальне функціонування тільки в околі окремої точки.

Дана робота присвячена синтезу регулятора системи автоматичного керування (САК) переміщенням електродів дугової сталеплавильної печі (ДСП) при обмеженні на її проміжні координати, що впливають з фізичних властивостей складових ДСП.

Аналіз останніх досліджень. Переважно, для синтезу регулятора САК переміщення електрода ДСП використовують двомасову систему. Задача побудови системи керування таким об'єктом полягає в тому, щоб забезпечити бажану перехідну функцію вихідної координати.

У літературі здійснено низку спроб розв'язання даної задачі. Зокрема, у [1] запропонований підхід до розв'язання такої задачі за допомогою системи модального регулятора (СМР), що налаштований на бажану стандартну форму розподілу коренів характеристичного рівняння, у [2] досліджується можливість застосування для такого об'єкту ПД-регулятора тощо. У випадку керування за повним вектором стану формування проміжних координат у заданих межах здійснюються завдяки вибору значення середньгеометричного кореня ω_0 . Зокрема, у [3] запропоновано шукати оптимальне керування згідно з методами параметричної оптимізації, як екстремум деякої функції мети, та визначено вагові коефіцієнти (що залежать від ω_0) цієї функції, виходячи з бажаної форми перехідного процесу. Застосовуючи тут функцію покарання, можна одержати керування, що буде забезпечувати обмеження на проміжні координати виду $\bar{x} < A_{зад}$, де \bar{x} – вектор стану системи. У [4] було узагальнено цей підхід на випадок багатокритеріальної оптимізації зі змінними ваговими коефіцієнтами, тобто коли функція мети має вигляд

$$F(t) = \sum_i \lambda_i(t) F_i,$$

де F_i – функціонали якості, сформовані для i -ої точки простору станів; $\lambda_i(t)$ – змінні в часі вагові коефіцієнти. Це дає можливість змінювати значення функції мети в залежності від траєкторії системи, тим самим покращуючи її динамічні характеристики.

Ще одним можливим підходом є застосування методу поліноміальних рівнянь [5] для регулятора повного та пониженого порядків. У цьому випадку, змінюючи значення середньгеометричного кореня та положення коренів поліноміальних рівнянь, вдається покращувати динамічні характеристики системи та не допускати значних коливань проміжних координат. Однак, про якусь конкретну верхню межу значень проміжних координат, до якої би можна було їх обмежити, у згаданій роботі не йдеться.

Втім, на думку авторів, для розв'язку даної задачі доцільніше застосовувати нечіткий регулятор. Перевагою такого способу є можливість формування вихідного сигналу системи в залежності від відстані (зокрема, евклідової відстані) точки простору станів до заданої області робочої точки. Очевидно, що, якщо ця відстань є великою, то доцільно, щоб темп зміни вихідної координати був якомога більшим. А при наближенні до околу робочої точки темп повинен зменшуватись, щоб уникнути надлишкових перерегулювань та коливань.

Застосування такого підходу дозволяє краще адаптувати систему до різних режимів та умов роботи, адже системи з нечітким регулятором мають значно більшу, у порівнянні зі згаданими регуляторами, кількість ступенів свободи. Однак, з іншого боку, це також є й недоліком таких систем, адже надлишкова кількість ступенів свободи значно ускладнює синтез нечітких регуляторів. Зокрема, постають питання вибору моделі вводу-виводу (Мамдані, Такагі-Сугено, Тсукамото тощо), способу фазифікації (за допомогою трикутної, трапецієвидної, сигмоїдальної, дзвоновидної функції належності тощо), вибору кількості термів для кожної лінгвістичної змінної та бази правил (MacVicar-Whelan, Buckley-Ying, чи одержаної експертним чином тощо), t -норми (Заде, імовірнісна, Лукасевича тощо), кількості змінних (Заде, імовірнісна, Лукасевича тощо), способу дефазифікації (максимум, мінімум, центра мас, BAAD, M-SLIDE тощо).

Виділення нерозв'язаної раніше частини загальної проблеми. У загальному випадку, у системі модального керування формується вихідна координата, а розгляд проблеми синтезу модального регулятора з одночасним формуванням проміжних координат залишається невирішеним.

Формулювання цілей роботи. Цілями даної роботи є: 1) розробка методик синтезу каскадного нечіткого регулятора при керуванні за повним вектором стану з обмеженням проміжних координат на заданому рівні; 2) дослідження поведінки системи переміщення електрода при використанні запропоновано-го регулятора.

Виклад основного матеріалу. При дослідженні двомасової динамічної системи переміщення електрода синтез керуючих впливів будемо проводити за допомогою моделі Такагі-Сугено, адже відомо [6], що саме її доцільно застосовувати у випадку електродинамічних систем. Проведені авторами дослідження показали, що, залежно від кількості термів, доцільно застосовувати трикутну функцію належності та її похідні, зокрема S та Z функції (рис. 1).

Тут $B(Big)$, $NB(NeutralBig)$, $N(Neutral)$, $NS(NeutralSmall)$ та $S(Small)$ відповідні області відхилень траєкторій системи від заданого рівня функціонування. Використання цих функцій описане в подальшому викладі при синтезі відповідних регуляторів.

У роботі [7] показано, що одним з можливих підходів до синтезу нечіткого регулятора є вибір „природної бази правил“. Така база правил передбачає лише два терми для кожної лінгвістичної змінної, що суттєво спрощує її та зменшує розмір, оскільки, порівняно з класичною базою правил, залишаються тільки два полярні правила. Як зазначено в [7], база правил у такому випадку матиме вигляд

$$\begin{aligned} IF (e_i \text{ in } B)_{i=1..m} THEN u = f_B(\bar{x}); \\ IF (e_i \text{ in } S)_{i=1..m} THEN u = f_S(\bar{x}), \end{aligned} \quad (1)$$

де $e_i = e_i(t) = x_{зад,i} - x_i(t)$ – похибка регулювання; \bar{x} – вектор станів системи; $f_B(\bar{x})$ та $f_S(\bar{x})$ – функції вектора станів системи.

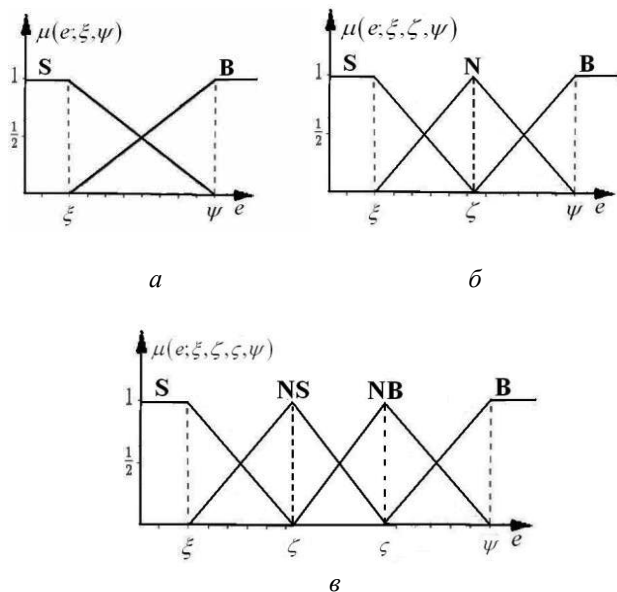


Рис. 1. Функції належності лінгвістичних змінних: а – два терми; б – три терми; в – чотири терми

У випадку регулятора за повним вектором стану, ці функції мають вигляд

$$f_i(\bar{x}) = \sum_j k_j^i x_j + u_0, \quad i \in \{B, S\}.$$

Переважно при застосування моделі Такагі-Сугено використовують дефазифікацію спрощеним гравітаційним методом, однак, якщо користуватись пропонованою базою правил, то при фазифікації більше ніж однієї змінної може виникнути ситуація, коли правдоподібність умови кожного правила є нульовою, і тоді відбуватиметься ділення на нуль (наприклад, коли функції належності двох змінних приймають різні полярні значення, а вибрана t -норма є \max). З тих же причин неможливим є застосування й деяких інших методів, зокрема, BAAD, SLIDE, M-SLIDE [8]. Один із способів вирішення цієї проблеми, що детально описаний у [7], полягає в модифікації згаданого методу дефазифікації. А саме, у згаданій роботі запропоновано використовувати доповнювальний гравітаційний метод

$$u(t) = \frac{(1 - \mu_B(e))f_B(\bar{x}) + (1 - \mu_S(e))f_S(\bar{x})}{(1 - \mu_B(e)) + (1 - \mu_S(e))}.$$

Однак, застосування такої дефазифікації у випадку, коли фазифікують лише одну змінну (як запропоновано у [9]), тобто коли $\mu_B + \mu_S = 1$, призводить до формули вигляду

$$u(t) = \mu_B(e)f_S(\bar{x}) + \mu_S(e)f_B(\bar{x}),$$

що суперечить описаному бажаному перехідному процесу в системі, адже в цьому випадку швидкодія системи на початковому етапі буде меншою та збільшуватиметься із наближенням до області робочої точки. Слід зазначити, що такий підхід до синтезу керування може бути використаний, наприклад, на початковому етапі роботи механізмів із шестернями, де важливо, щоб відбулося плавне зчеплення зубців.

У даній роботі дефазифікацію проводили спрощеним гравітаційним методом, оскільки для уникнення описаної ситуації в деяких змінних є більше ніж два терми. Застосований метод агрегації – \min .

Розглянемо динамічну систему (рис. 2) четвертого порядку [10], що задана системою диференціальних рівнянь

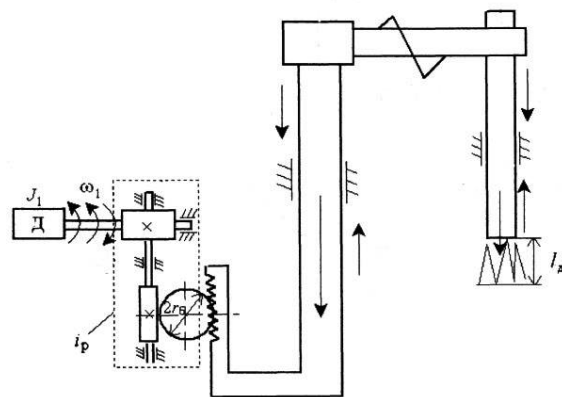


Рис. 2. Кінематична схема переміщення електрода з електроприводом

$$\begin{cases} J_1 p \omega_1(p) = M_1(p) - a_{11} \omega_1(p) - a_{12} V_1(p) \frac{r_0}{i_p} - \frac{G_k r_0}{i_p} - \\ - \frac{M_{12}(p) r_0}{L i_p} - \frac{b_{12} r_0}{L i_p} (V_1(p) - V_2(p)) \\ M_{12}(p) = \frac{C_{12}}{p} (V_1(p) - V_2(p)) \\ L m_e p V_2(p) = M_{12}(p) + b_{12} (V_1(p) - V_2(p)) - G_e L - \\ - a_2 V_2(p) L \\ l_e(p) = \frac{1}{p} V_2(p) \end{cases}$$

де $V_1(p)$ та $V_2(p)$ – лінійні швидкості першої та другої мас відповідно; $\omega_1(p)$ – кутова швидкість двигуна; $M_{12}(p)$ – момент пружного елемента; J_1 – сумарний момент інерції першої маси; $l_e(p)$ – переміщення електрода; $M_1(p)$ – момент двигуна; a_{11}, a_{12}, a_2 – коефіцієнти зовнішнього в'язкого тертя; b_{12} – коефіцієнт внутрішнього в'язкого тертя; r_0 – радіус барабана; i_p – передавальне число редуктора; G_k – вага рухомої колони; G_e – вага електрода; L –

довжина електрода; m_e – маса електрода; C_{12} – пружність.

Дослідження проводили для двигуна зі швидкістю обертання ω_1 , рівною $157c^{-1}$. Керування було синтезоване для лінійної системи, тобто для системи без обмежень типу „мертва зона“, „люфт“ тощо.

Надалі будемо вважати, що в об’єкті регулювання відсутня дія внутрішніх дисипативних сил внутрішнього та зовнішнього в’язкого тертя ($a_{11} = a_{12} = a_{22} = b_{12} = 0$), тобто об’єкт нестійкий. Крім того, вагою колони та вагою електрода нехтуватимемо, тобто $G_k = G_e = 0$.

Для порівняння характеристик динамічної системи будемо застосовувати відомі інтегральні показники якості (2) – ITSE, ITAE відповідно

$$I_1 = \int_0^T te(t)^2 dt; \quad I_2 = \int_0^T t|e(t)|dt, \quad (2)$$

Головною умовою при синтезі регулятора САК переміщення електрода є відсутність перерегулювань у вихідній координаті системи, адже це, у першу чергу, продовжує термін служби електрода, бо допомагає уникнути механічних пошкоджень. На рис. 3 зображені перехідні процеси в системі, модальний регулятор якої налаштований на стандартну біноміальну форму. Значення ω_0 обрано з умови уникнення коливань проміжних координат системи та обмеження швидкості обертання двигуна на заданому рівні.

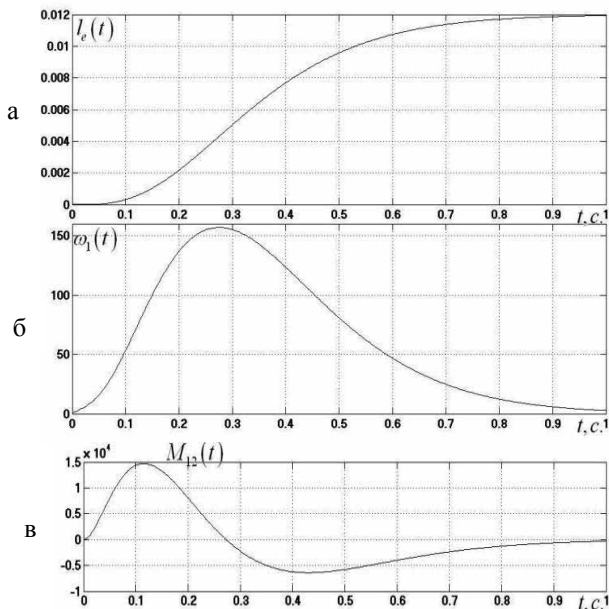


Рис. 3. Залежності траєкторій проміжних координат системи та сигналу керування від часу у випадку модального регулятора, що налаштований на стандартну лінійну біноміальну форму: а – $I_e(t)$; б – $\omega_1(t)$; в – $M_{12}(t)$

Коли в системі синтезовано нечіткий регулятор, в якому фазифікують лише вихідну координату (рис. 4, а), при тому ж значенні ω_0 вдається досягти суттєвого зменшення часу виходу на заданий рівень функціонування (рис. 5). Функції $f_i(\bar{x})$ з рис. 4, а можна синтезувати на основі стандартних лінійних форм (біноміальної, Батерворта Бесселя, Чебишева тощо). При цьому було використано базу правил (1), функції належності з рис. 1, а.

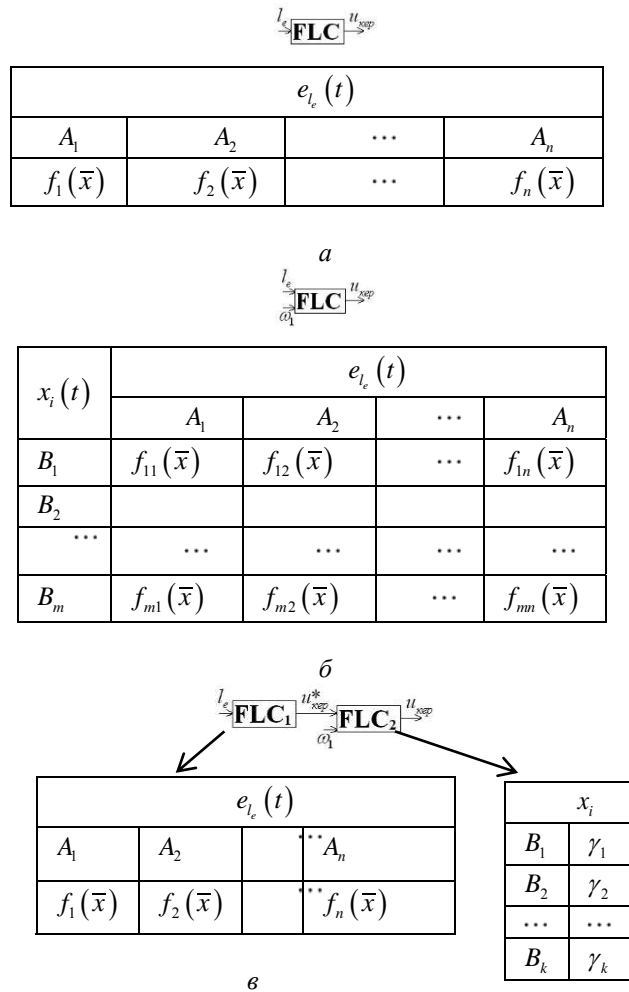


Рис. 4. Нечіткі регулятори та відповідні їм бази правил: а – нечіткий регулятор з фазифікацією однієї змінної; б – нечіткий регулятор з фазифікацією двох змінних; в – каскадний нечіткий регулятор

Однак, у цьому випадку максимальне значення кутової швидкості двигуна суттєво перевищує максимально допустиму величину. Для зменшення коливань проміжних величин можна зменшити значення ω_0 , що, при відповідних значеннях параметрів функції належності, дозволяє зменшити максимальні значення й інших проміжних координат.

Можливим способом синтезу нечіткого регулятора, що забезпечує обмеження проміжних координат, є введення цієї координати до структури нечіткого

регулятора та відповідне формування керуючих впливів (рис. 4, б). Функції $f_{ij}(\bar{x})$ з цього рисунку можна представити у вигляді $f_{ij}(\bar{x}) = \alpha_{ij} f_{ij}^*(\bar{x})$, де $f_{ij}^*(\bar{x})$ можна синтезувати на основі стандартних лінійних форм як і в попередньому випадку, а α_{ij} – деякі вагові коефіцієнти. Зокрема, у цій роботі проведено дослідження поведінки САК переміщення електрода, коли в синтезованому нечіткому регуляторі фазифікують змінні l_e та ω_1 . У цьому випадку було використано функції належності з рис. 1, а та 1, б відповідно.

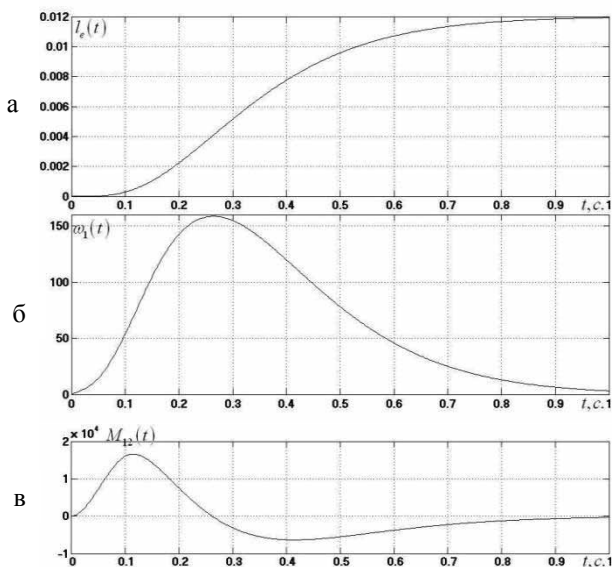


Рис. 5. Залежності траєкторій проміжних координат системи та сигналу керування від часу у випадку фазифікації лише l_e : умовні позначки див. рис. 3

Відповідні траєкторії координат вектора простору станів системи та сигналу керування наведено на рис. 6.

Наведені на рис. 6 результати свідчать про те, що запропонований регулятор забезпечує швидкодію системи на рівні системи з рис. 5 за відсутнього перерегулювання та відсутності недопустимих коливних режимів проміжних координат. Оскільки у цьому випадку основним інструментом налаштування системи є коефіцієнти α_{ij} та параметри функції належності, то значення ω_0 є навіть більшим, ніж у випадку системи з рис. 3, хоча його вибір, у даному випадку, не має принципового значення.

При такому підході немає необхідності розглядати оптимізаційну задачу синтезу керуючих впливів, що забезпечують максимальну швидкодію при заданих обмеженнях, а це для багатьох систем саме по собі є складною задачею.

Суттєво простішим варіантом синтезу нечіткого регулятора є перехід до умовного критерію, що враховує обмеження проміжних координат. Структуру такого нечіткого каскадного регулятора зображено на

рис. 4, в. Тут функції $f_i(\bar{x})$ синтезовані аналогічно з рис. 4, а, а γ_i – деякі вагові коефіцієнти. Слід зауважити, що вибір параметрів α_{ij} та γ_i з рис. 4 є додатковим ступенем свободи синтезованих нечітких регуляторів. На першому каскаді, за допомогою функції належності з рис. 1, а, фазифікують змінну l_e , а на вхід другого каскаду, окрім вихідного сигналу першого, подається змінна ω_1 , яку фазифікують за допомогою функції належності з рис. 1, в.

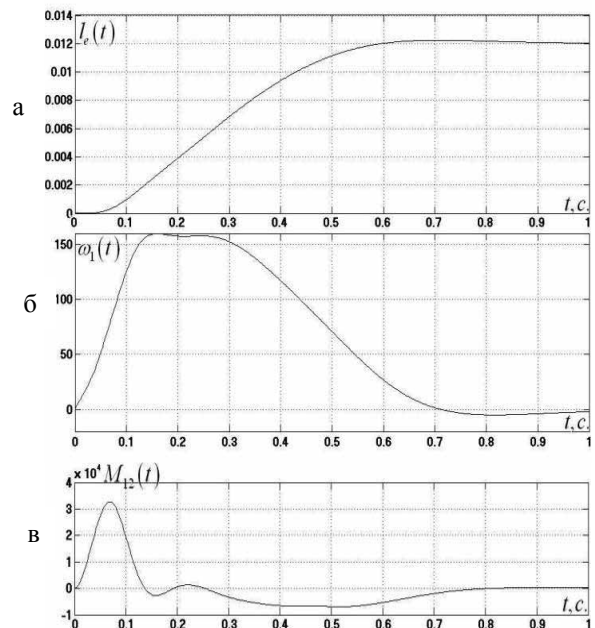


Рис. 6. Залежності траєкторій проміжних координат системи та сигналу керування від часу у випадку фазифікації ω_1 та l_e : умовні позначки див. рис. 3

При цьому застосовують бази правил, що наведені на рис. 4, в. Агрегацію в цьому випадку не застосовують. Слід зазначити, що в загальному випадку, на відміну від бази правил з рис. 4, б, що містить $n \times m$ правил, де n – кількість термів змінної l_e , m – кількість термів змінної ω_1 , база з рис. 4, в в загальному випадку містить $n + k$ правила, де n – кількість термів змінної l_e , $k \geq m$ – кількість термів змінної ω_1 , що дозволяє провести більш точне налаштування синтезованого регулятора для обмеження саме проміжної координати та спростити його структуру.

Результати моделювання зображено на рис. 7.

З одержаних результатів видно, що застосування каскадного регулятора дозволяє забезпечити бажані перехідні процеси в системі при відсутньому перерегулюванні вихідної координати та з дотриманням обмежень на проміжну координату.

Для кількісного порівняння запропонованих підходів наведемо значення інтегральних показників якості (2), а також t – часу виходу на заданий рі-

вень функціонування та максимального перерегулювання відповідних координат $\max(l_e)$ і $\max(\omega_1)$.

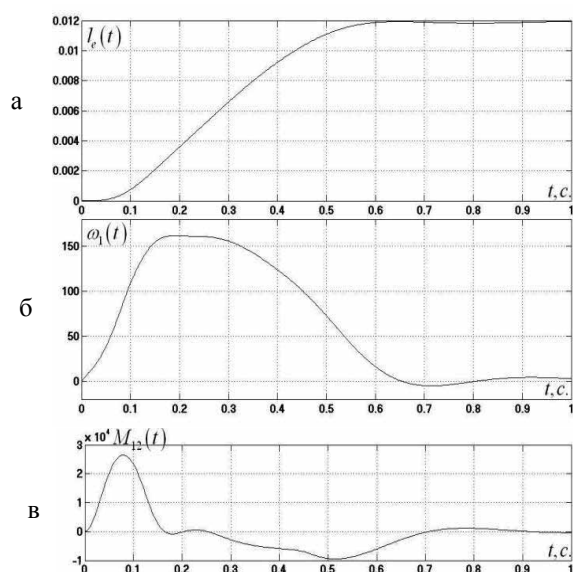


Рис. 7. Залежності траєкторій проміжних координат системи та сигналу керування від часу у випадку каскадного регулятора: умовні позначки див. рис. 3

Таблиця

Основні показники якості функціонування досліджуваної системи

Регул.	$I_1 \cdot 10^6$	$I_2 \cdot 10^3$	$\max(l_e)$	$\max(\omega_1)$	$t, c.$
бін.	6,04	4,35	0,012	157	0,85
l_e^*	5,96	4,35	0,012	158	0,85
ω_1, l_e	3,76	3,43	0,012	160	0,6
каскад.	4,03	3,53	0,012	161	0,6

Прим.: * – при значенні ω_0 , що забезпечує бажану поведінку вихідної та проміжних координат системи.

З наведених у таблиці результатів видно, що, застосовуючи запропоновані у статті регулятори, можна досягти суттєвого виграву не тільки за основними показниками якості (2), але й за часом виходу на заданий рівень функціонування. При цьому перерегулювання залишаються в допустимих межах.

Висновок. З наведених у статті результатів видно, що між системами, в яких відбувається фазифікація змінних ω_1, l_e , та системах з каскадним регулятором практично немає різниці, хоча формально показники системи з фазифікацією ω_1, l_e дещо кращі. Тобто, обидві структури доцільно застосовувати для син-

тезу регуляторів ДСП, однак у випадку каскадного регулятора є можливість забезпечувати обмеження за будь-якою проміжною координатою фактично без значних змін у самому регуляторі.

Таким чином, можна зробити висновок, що при синтезі регулятора САК переміщення електрода ДСП доцільно проводити синтез регулятора запропонованими у статті способами, адже це забезпечує суттєвий виграв у швидкодії.

Синтез параметрів α_{ij} та γ_i здійснюється за допомогою генетичних алгоритмів, і його особливості буде описано в подальших працях.

Список літератури / References

1. Марущак Я.Ю. Синтез електромеханічних систем з послідовним та паралельним коригуванням / Марущак Я.Ю. – Львів: Видавництво НУ „Львівська політехніка“, 2005. – 207 с.
Marushchak, Ya.Yu. (2005), *SynteZ elektromekhanichnykh system z poslidovnym ta paralelnym koryhuvanniam* [Synthesis of Electromechanical Systems With Serial and Parallel Correction], Vydavnytstvo NU “Lvivska politekhnikha”, Lviv, Ukraine.
2. Fitri Yakub, Andika Aji Wijaya and Mustafa Al-ani (2012), “Practical control for two-mass positioning systems in presence of saturation”, *Telkomika*, V. 10, No. 1, pp. 91–102.
3. Марущак Я.Ю. Використання стандартних форм розподілу коренів при синтезі електромеханічних систем методом параметричної оптимізації / Я.Ю. Марущак // Вісник Харківського Національного політехнічного університету. Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. – 2001. – № 10. – С. 88–90.
Marushchak, Ya.Yu. (2001), “The use of standard forms of distribution of roots in the synthesis of electromechanical systems by means of parametric optimization”, *Visnyk Kharkivskoho Natsionalnoho Politekhnichnoho Universytetu. Problemy Avtomatyzovanoho Elektropyvodu. Teoriia i Praktyka*, KhNPU, Kharkiv, no.10, pp. 88–90.
4. Лозинський А.О. Синтез багатокритеріального оптимального керування зі змінними ваговими коефіцієнтами / А.О. Лозинський, Л.І. Демків // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2012. – № 1. – С. 144–147.
Lozynskiy, A.O. and Demkiv, L.I. (2012), “Synthesis of multiobjective optimal control with variable weight coefficients”, *Radioelektronika, Informatyka, Upravlinnia*, no.1, pp. 144–147.
5. Акимов Л.В. Динамика двухмассовых систем с нетрадиционными регуляторами скорости и наблюдателями состояния / Акимов Л.В., Колотило В.И., Марков В.С. – Харків: ХГПУ, 2000. – 93 с.
Akymov, L.V., Kolotylo, V.Y. and Markov, V.S. (2000), *Dinamika dvukhmassovykh sistem s netraditsyonnyimi reguliatorami skorosti i nabludatelyami sostoyaniya* [The Dynamics of Two-Mass Systems With Non-Traditional Speed Controls and Monitors of the State], KhNPU, Kharkiv, Ukraine.

6. Piegat, A. (2003), *Modelowanie i sterowanie rozmyte*, "Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT", Warszawa.
7. Alejandro Aceves-Lopes (2006), "A simplified version of Mamdani's fuzzy controller: the natural logic controller", *IEEE Transactions on fuzzy systems*, V. 14, no.1, pp. 16–30.
8. Yager, R.R. and Filev, D.P. (1994), *Essentials of fuzzy modeling and control*, John Wiley & Sons, New York.
9. Hu B.G., Mann, G.K.I. and Gosine, R.G. (2001), "A systematic study of fuzzy PID controllers function based evaluation approach", *IEEE Trans. on fuzzy systems*, V. 9, no. 5, pp. 699–712.
10. Марущак Я.Ю. Динаміка двомасових систем стабілізації режиму в електродугових печах / Марущак Я.Ю., Лозинський А.О., Кушнір А.П. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 224 с.
- Marushchak, Ya.Yu., Lozynskyi, A.O. and Kushnir, A.P. (2011), *Dynamika dvomasovykh system stabilizatsii rezhymu v elektroduhovyykh pechakh* [Two-Mass System's Dynamics of Regime Stability in Electric Arc Furnaces], Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki, Lviv, Ukraine.

Цель. Улучшить динамические характеристики системы автоматического управления перемещением электрода дуговой сталеплавильной печи при допустимых перерегулированиях промежуточных координат.

Методика. Применен аппарат нечетких множеств для синтеза управляющих воздействий в отдельных точках пространства состояний. Для того, чтобы значения промежуточных координат оставались в допустимых пределах, применен каскадный регулятор, первый каскад которого активирует нужную подсистему с соответствующим весовым коэффициентом, а второй ограничивает выходной сигнал регулятора при превышении промежуточными координатами допустимых пределов. Кроме того, для упрощения синтеза нечеткого регулятора существенно ограничено число термов каждой нечеткой переменной.

Результаты. Проведено сравнение предлагаемого подхода и подходов на основе принципа модального управления к синтезу регулятора системы автоматического управления перемещением электрода. Определены количественные и качественные преимущества предлагаемого подхода к синтезу нечеткого каскадного регулятора исследуемой системы. Кроме того проведен анализ поведения системы с предлагаемым нечетким регулятором и нечеткими регуляторами с фазификацией одной и двух переменных. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности применения каскадного регулятора в системе автоматического

управления перемещением электрода дуговой сталеплавильной печи.

Научная новизна. В работе предложен метод синтеза, который обеспечивает как желаемый переходный процесс с исходной координатой, так и ограничения промежуточных координат системы.

Практическая значимость. Предложенный подход позволяет улучшить адаптацию системы автоматического управления перемещением электрода дуговой сталеплавильной печи к различным режимам работы.

Ключевые слова: нечеткая логика, нечеткий регулятор, модальный регулятор, каскадный нечеткий регулятор, фазификация, двухмассовая динамическая система, степени свободы

Purpose. To improve the dynamic performance of the of the arc furnaces electrode movement automatic control system with acceptable overshoot of interjacent coordinates.

Methodology. Fuzzy sets for the synthesis of control actions in certain points of the state space are applied. For the values of interjacent coordinates to be within acceptable limits the cascade regulator is applied. The first stage of it activates the desired subsystem with the corresponding weights and the second one limits the output of the regulator in case when interjacent coordinates exceed limits. In order to simplify the synthesis of fuzzy controller the number of terms of each fuzzy variable is significantly limited.

Findings. Comparison of the proposed approach and the approach based on the principle of modal controls for the synthesis of electrode moving automatic control system are held. The quantitative and qualitative benefits of the proposed approach for the synthesis of fuzzy cascade controller system are studied. Besides the analysis of the behavior of the proposed fuzzy controller and fuzzy controllers with fuzzyfication of one and two variables is done. These results demonstrate the feasibility of the cascade controller in arc furnace electrode moving automatic control system.

Originality. In this paper, a method of synthesis that provides both the desired transition process for the initial coordinate and limiting interjacent coordinate system is proposed.

Practical value. The proposed approach improves the adaptation of arc furnace electrode moving automatic control system to different modes.

Keywords: fuzzy logic, fuzzy control, modal control, fuzzy cascade controller, fuzzification, two-mass dynamic system, degree of freedom

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук Я.Ю. Марущаком. Дата надходження рукопису 07.09.13.