

УДК 007:681.516.4

ЗАСТОСУВАННЯ НЕЧІТКОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ПРИ СИНТЕЗІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ НЕЛІНІЙНИМИ ОБ'ЄКТАМИ

А. О. Лозинський, Л. І. Демків

Національний університет "Львівська політехніка"

вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна. E-mail: lozynsky@polynet.lviv.ua, demkivl@gmail.com

Запропоновано підхід до апроксимації нелінійностей в електромеханічних системах. Даний підхід передбачає синтез нечіткого регулятора, що забезпечує перемикання між векторами керуючих впливів залежно від значення сигналу на вході в нелінійність, що апроксимують. Пропонований підхід апробовано на прикладі нелінійної моделі дугової сталеплавильної печі. У такому випадку за допомогою запропонованого підходу апроксимовано нелінійну модель тиристорного перетворювача, а перемикання відбувається між векторами керуючих впливів, що синтезовані для різних значень коефіцієнтів підсилення лінеаризованого тиристорного перетворювача. Одержані якісні та кількісні результати свідчать про доцільність його застосування, адже він забезпечує не лише належну апроксимацію нелінійностей, а й дозволяє одержати бажані перехідні процеси як у вихідному сигналі системи, так і в проміжних.

Ключові слова: нечітка логіка, нечіткий регулятор, динамічна система, апроксимація нелінійностей, дугова сталеплавильна піч.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ПРИ СИНТЕЗЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

А. О. Лозинский, Л. И. Демкив

Национальный университет "Львовская политехника"

ул. С. Бандеры, 12, г. Львов, 79013, Украина. E-mail: lozynsky@polynet.lviv.ua, demkivl@gmail.com

Предложен подход к аппроксимации нелинейностей в электромеханических системах. Данный подход предполагает синтез нечеткого регулятора, обеспечивающий переключение между векторами управляющих воздействий в зависимости от значения сигнала на входе в нелинейность, которую аппроксимируют. Предлагаемый подход апробирован на примере нелинейной модели дуговой сталеплавильной печи. В таком случае с помощью предлагаемого подхода аппроксимирована нелинейная модель тиристорного преобразователя, а переключение происходит между векторами управляющих воздействий, синтезированных для различных значений коэффициентов усиления линейризованного тиристорного преобразователя. Полученные качественные и количественные результаты свидетельствуют о целесообразности его применения, поскольку он обеспечивает не только надлежащую аппроксимацию нелинейностей, но и позволяет получить желаемые переходные процессы как в исходном сигнале системы, так и в промежуточных.

Ключевые слова: нечеткая логика, нечеткий регулятор, динамическая система, аппроксимация нелинейностей, дуговая сталеплавильная печь.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. На сьогодні при дослідженні електромеханічних систем актуальними є задачі максимальної відповідності досліджуваної моделі системи реальному об'єкту. Це дозволяє синтезувати регулятори, що забезпечують бажані перехідні процеси в системі. У багатьох роботах, зокрема [1], використовується модальний регулятор, але при цьому не враховуються можливі наявні в системі нелінійності, тому характеристики такого регулятора будуть відрізнятися від бажаних. При цьому значення параметрів, які неможливо виміряти, можна визначати, наприклад, за допомогою підходів, що описані у [2].

Часто нелінійні системи синтезуються на основі методів нелінійної теорії, які забезпечують стійку роботу, не формуючи якісних показників. Це, наприклад, методи систем зі змінною структурою [3], методи на основі теорії Ляпунова, теорії збурень [4] тощо. Сучасні методи, такі як feedback лінеаризація [5], методи геометричної теорії керування [6], у багатьох випадках складно застосувати, тому

вони не набули значного поширення. Останнім часом все частіше застосовують нечіткі регулятори [7, 8].

Метою роботи є розробка підходу до апроксимації нелінійностей у системі за допомогою апарату нечіткої логіки, що дозволяє синтезувати нечіткий регулятор, що

а) враховує існуючі нелінійності в системі;
б) забезпечує бажані перехідні процеси в системі;

в) має базу правил невеликого розміру (розмір бази правил визначається, в першу чергу, характером нелінійності).

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Традиційно в електротехнічних системах для апроксимації нелінійностей функцію наближають прямою $f(x) \approx f_1(x) = K_p^1 x$, розкладаючи цю нелінійну функцію в ряд Тейлора на початку координат та наступуючи доданками вище другого порядку. Однак таке наближення справедливе лише в невеликій області зміни аргумента вхідної напруги (рис. 1,а, 2,а, 3,а, прями 1, 2).

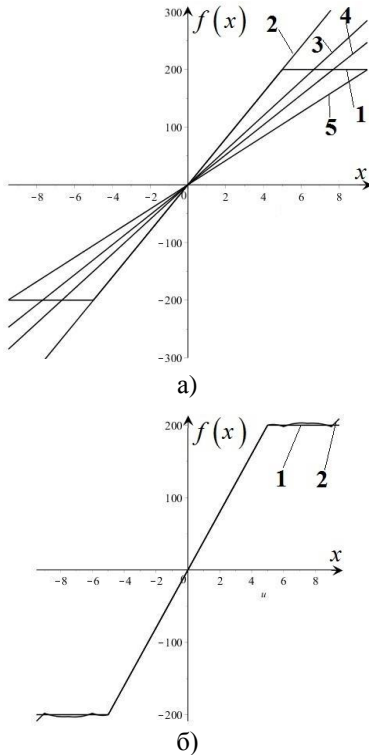


Рисунок 1 – Наближення функції насичення за допомогою апарату нечіткої логіки:
 а) традиційний варіант: 1 – крива, яку апроксимують, 2–5 – прями $f_i(x) = K_{ip}^i x, i = \overline{1...n}, K_{ip}^i > K_{ip}^{i+1}$;
 б) із застосуванням нечіткої логіки

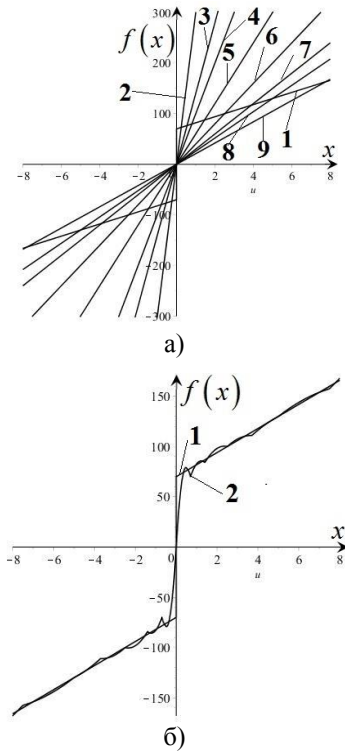


Рисунок 2 – Наближення функції зміщення за допомогою апарату нечіткої логіки:
 а) традиційний варіант: 1 – крива, яку апроксимують, 2–9 – прями; б) із застосуванням нечіткої логіки

У даній роботі для апроксимації функції застосовано апарат нечіткої логіки, а саме: запропоновано наближати функцію не однією прямою, а кількома $f_i(x) = K_{ip}^i x, i = \overline{1...n}, K_{ip}^i > K_{ip}^{i+1}$, (рис. 1,а, 3,а, прями 2–5 та 2,а, прями 2–9).

Залежно від значення вхідного сигналу нелінійності, що апроксимують, відбувається перемикання між цими функціями. У такому випадку $f(x) \approx \sum_{i=1}^n \mu_i(x) f_i(x)$, де $\mu_i(x)$ – функція належності, що буде визначена нижче. Застосування апарату нечіткої логіки забезпечує плавне перемикання між функціями, що наближають нелінійну функцію в різних точках. Графіки точного та наближеного значення нелінійної функції наведено на рис. 1,б, 2,б, 3,б, прями 1 та 2. Наведені на цих рисунках результати свідчать, що такий підхід дозволяє суттєво підвищити точність апроксимації.

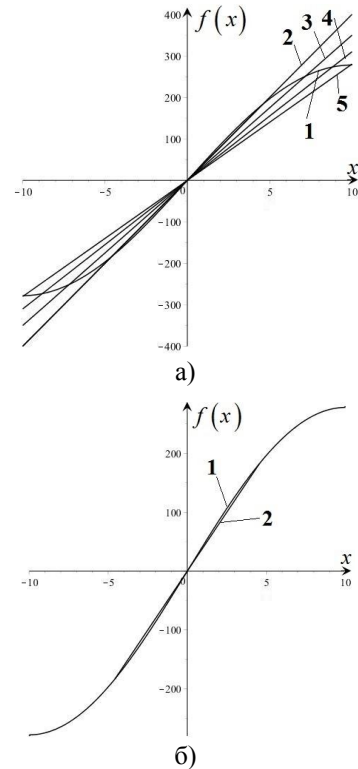


Рисунок 3 – Наближення функції намагнічення за допомогою апарату нечіткої логіки:
 а) традиційний варіант: 1 – крива, яку апроксимують, 2–5 – прями $f_i(x) = K_{ip}^i x, i = \overline{1...n}, K_{ip}^i > K_{ip}^{i+1}$;
 б) із застосуванням нечіткої логіки

Для реалізації запропонованого підходу було застосовано нечіткий регулятор типу Такагі-Сугено [9]. Апарат нечіткої логіки дозволяє застосовувати широкий набір функцій належності [10]. У даному випадку для лінгвістичної змінної “аргумент” та її термів $U_i, i = \overline{1...n}$ застосовуємо функції належності, що зображено на рис. 4 [11]. Слід зазначити, що у даному дослідженні функція належності не оптимізувалась, як це зроблено в роботі [12].

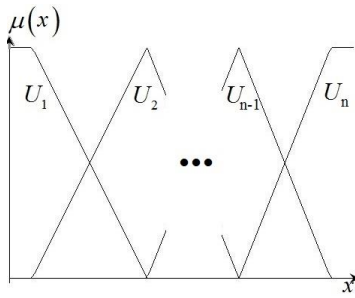


Рисунок 4 – Функції належності

База правил має вигляд

$$IF (x \text{ in } U_i) THEN \bar{u}(t) = g_i(\bar{x}),$$

де $g_i(\bar{x})$ – відповідні функції вектора станів системи; U_i – області розбиття. Для кожної з функцій $g_i(\bar{x})$ синтезовано відповідний регулятор за повним вектором станів, який має вигляд

$$g_i(\bar{x}) = K_i \bar{x}(t), \quad i = \overline{1 \dots n},$$

де K_i визначає налаштування на ту чи іншу стандартну лінійну форму. При такому підході фазифікують лише одну змінну, а тому кількість правил дорівнює кількості областей розбиття.

У даній роботі дослідження проведено для випадку налаштування на стандартну лінійну форму Бесселя за різними коефіцієнтами підсилення [13]. Дана форма характеризується доволі швидким виходом системи в окіл робочої точки при відсутніх коливаннях.

Дефазифікацію проводимемо спрощеним гравітаційним методом:

$$u(\bar{t}) = \sum_{i=1}^n \mu_i(t) g_i(\bar{x}).$$

Тоді досліджувану нелінійну систему можна описати сімейством лінійних підсистем [14]. Робочу область розбито на n підобластей, а загальну модель нелінійної системи утворено набором n нечітких правил виду

$$R^i: IF \quad x_1 \in M_1^i \wedge x_2 \in M_2^i \wedge \dots \wedge x_n \in M_n^i \quad THEN \\ \dot{\bar{x}}(t) = A_i \bar{x}(t) + B_i \bar{u}(t); \quad i = \overline{1, k} \\ \bar{u}(t) = K_i \bar{x}(t),$$

де R^i – i -те правило; $M_j^i, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n}$ – області розбиття; $A_i, B_i, K_i \in R^{n \times n}$ – матриці, що формують модель системи в околі певної робочої точки (локальна модель); $\bar{u}(t) \in R^n$ – вектор керуючих впливів.

Ми отримаємо таку модель системи

$$\dot{\bar{x}}(t) = \sum_{i=1}^n \mu_i(\bar{x})(A_i + B_i K_i) \bar{x}(t), \quad \sum_{i=1}^n \mu_i = 1,$$

тобто модель i -тої підсистеми матиме вигляд:

$$\dot{\bar{x}}(t) = (A_i + B_i K_i) \bar{x}(t).$$

Застосування даного підходу розглянуто на прикладі системи керування переміщенням електроду дугової сталеплавильної печі (ДСП).

На сьогодні важливим завданням є зменшення витрат енергії при роботі ДСП. Існує багато підходів до вирішення цієї задачі. Зокрема, в [15, 16] запропоновано застосовувати нечіткий регулятор із самоналаштуванням у поєднанні з ПІД регулятором, а дослідження проводились для лінійної моделі ДСП. У роботі [17] запропоновано для лінійної моделі ДСП застосовувати ПІД регулятор з нечітким коректором. Однак база правил у запропонованих підходах є доволі великою та складається з $3 \cdot 7^2$ правил, що суттєво ускладнює процес синтезу нечіткого регулятора. Таку ж кількість правил запропоновано застосовувати в роботі [18]. Ще більшою базою правил (5^4 правил) запропоновано скористатись у [19], де для синтезу регулятора переміщення електроду ДСП запропоновано застосовувати прямий адаптивний робастний нечіткий регулятор. Серед інших підходів можна виділити також застосування нейронних мереж [20], методи на основі теорії збурень [21, 22], feedback лінеаризацію [23].

У всіх перелічених роботах основну увагу приділено виходу вихідного сигналу (довжини дуги) системи на заданий рівень функціонування. Однак важливою є також поведінка системи при відпрацюванні типових ситуацій, що виникають при роботі ДСП – коротке замикання, завал шихти, порожнини в шихті. Також важливим є дослідження значення проміжних сигналів системи: струму якоря двигуна, швидкості його обертання тощо. Комплексне дослідження поведінки ДСП при застосуванні пропонованого в роботі підходу зумовлює її актуальність.

Для прикладу розглянемо систему з типовою нелінійністю – нелінійний тиристорний перетворювач. Даний підхід може бути використаний для нелінійностей насичення кривої намагнічення тощо. Дослідження проводилось на прикладі нелінійної двомасової моделі системи керування переміщення електроду. Цю систему можна описати системою диференціальних рівнянь першого порядку (1) [1].

$$\begin{aligned} U_p(p) &= (l_e(p) - l_{mp})k_5 - I_j(p)k_1 - \\ &- \omega_1(p)k_2 - M_{12}(p)k_3 - V_2(p)k_4; \\ T_p p E_p(p) &= f(U_p(p)) - E_p(p); \\ T_j R_j p I_j(p) &= E_p(p) - R_j I_j(p) - c \omega_1(p); \\ J_1 p \omega_1(p) &= \\ &= c I_j(p) - \frac{M_{12}(p)r}{Li} - \frac{b_{12} r_b}{Li_p} \left(\frac{r_b}{i_p} \omega_1(p) - V_2(p) \right); \\ p M_{12}(p) &= C_{12} \left(\frac{r_b}{i_p} \omega_1(p) - V_2(p) \right); \\ L m_e p V_2(p) &= M_{12}(p) + b_{12} \left(\frac{r_b}{i_p} \omega_1(p) - V_2(p) \right); \\ l_e &= \frac{1}{p} V_2(p); \end{aligned} \quad (1)$$

$$f(U_p(p)) = K_p \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{20} U_p(p)\right), \quad (2)$$

де $V_2(p)$ – лінійна швидкість переміщення другої маси, м/с; $\omega_1(p)$ – кутова швидкість двигуна, рад/с; $M_{12}(p)$ – момент пружного елемента, Н*м.; J_1 – сумарний момент інерції першої маси, кг*кв.м.; $l_e(p)$ – переміщення електрода, м; $U_p(p)$ – напруга на вході тиристорного перетворювача, В; b_{12} – коефіцієнт внутрішнього в'язкого тертя, Па*с; r_d – радіус барабана, м; i_p – передавальне число редуктора; L – довжина електрода, м; C_{12} – пружність, Н*м/рад.

Якщо даний підхід для лінійної системи перенесемо на нелінійну систему, то характер перехідних процесів буде іншим. Традиційно таку систему лінеаризують і для неї синтезують регулятор, але синтезовані таким чином коефіцієнти не забезпечують бажаних перехідних процесів у нелінійній системі. Неврахування нелінійності тиристорного перетворювача призводить до спотворення перехідних процесів у системі.

Дослідження проводилось для випадку, коли тиристорний перетворювач моделюється за допомогою рівняння (2). Запропоновано застосовувати нечіткий регулятор, що забезпечує адекватну пове-

дінку системи при насиченні вхідної напруги тиристорного перетворювача.

При дослідженні нелінійної системи для апроксимації нелінійної моделі тиристорного перетворювача було застосовано підхід із попереднього розділу. Фактично при такому підході відбувається перемикавання між регуляторами, що синтезовані для різних значень коефіцієнтів підсилення лінеаризованого тиристорного перетворювача.

Застосовуючи описаний у попередньому розділі підхід, функцію (2) було апроксимовано за допомогою чотирьох прямих (рис. 3).

Було проведено порівняння проведеного підходу з класичним. Для цього було побудовано відповідні моделі в середовищі Matlab (рис. 5, 6). При моделюванні значення середньгеометричного кореня було покладено рівним $\omega_0 = 12$.

Результати моделювання системи зображено на рис. 7. Наведені результати свідчать, що застосування пропонованого підходу дозволяє одержати перехідні процеси, які відповідають реальній системі. Крім того, як видно з рис. 7, у випадку застосування нечіткого регулятора, тобто при максимальній відповідності моделі реальній ДСП, відсутні перерегулювання довжини дуги, відсутня статична похибка в усталеному режимі, більш швидкий вихід вихідного сигналу системи на задане значення. При цьому в проміжних координатах системи також відсутні недопустимі перерегулювання тощо.

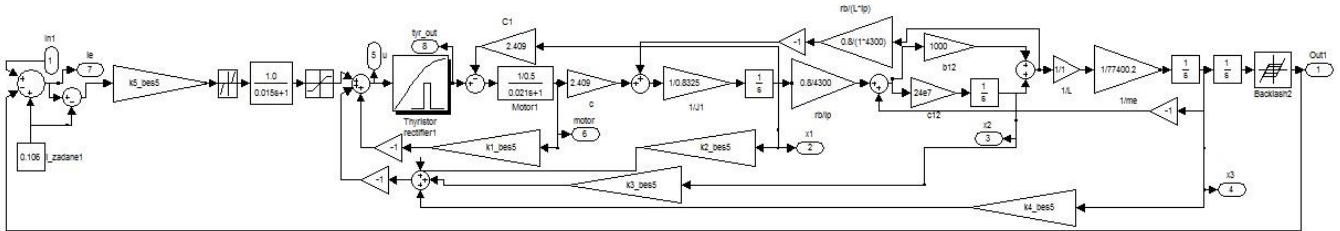


Рисунок 5 – Модель лінійної системи з обмеженнями в середовищі Matlab

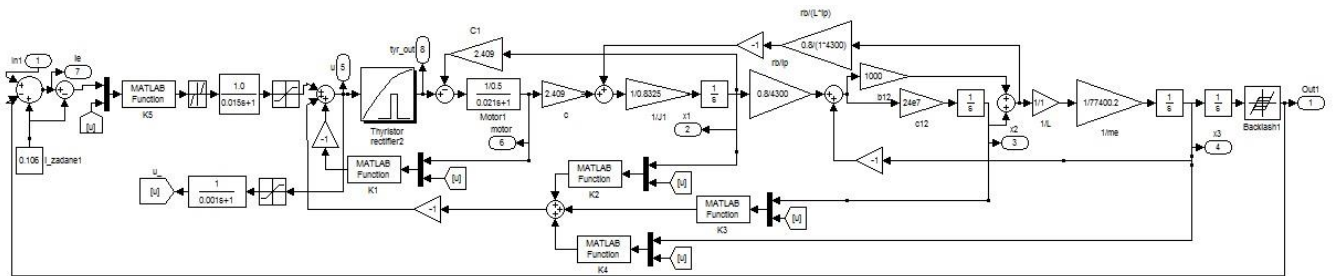


Рисунок 6 – Модель нелінійної системи з обмеженнями в середовищі Matlab

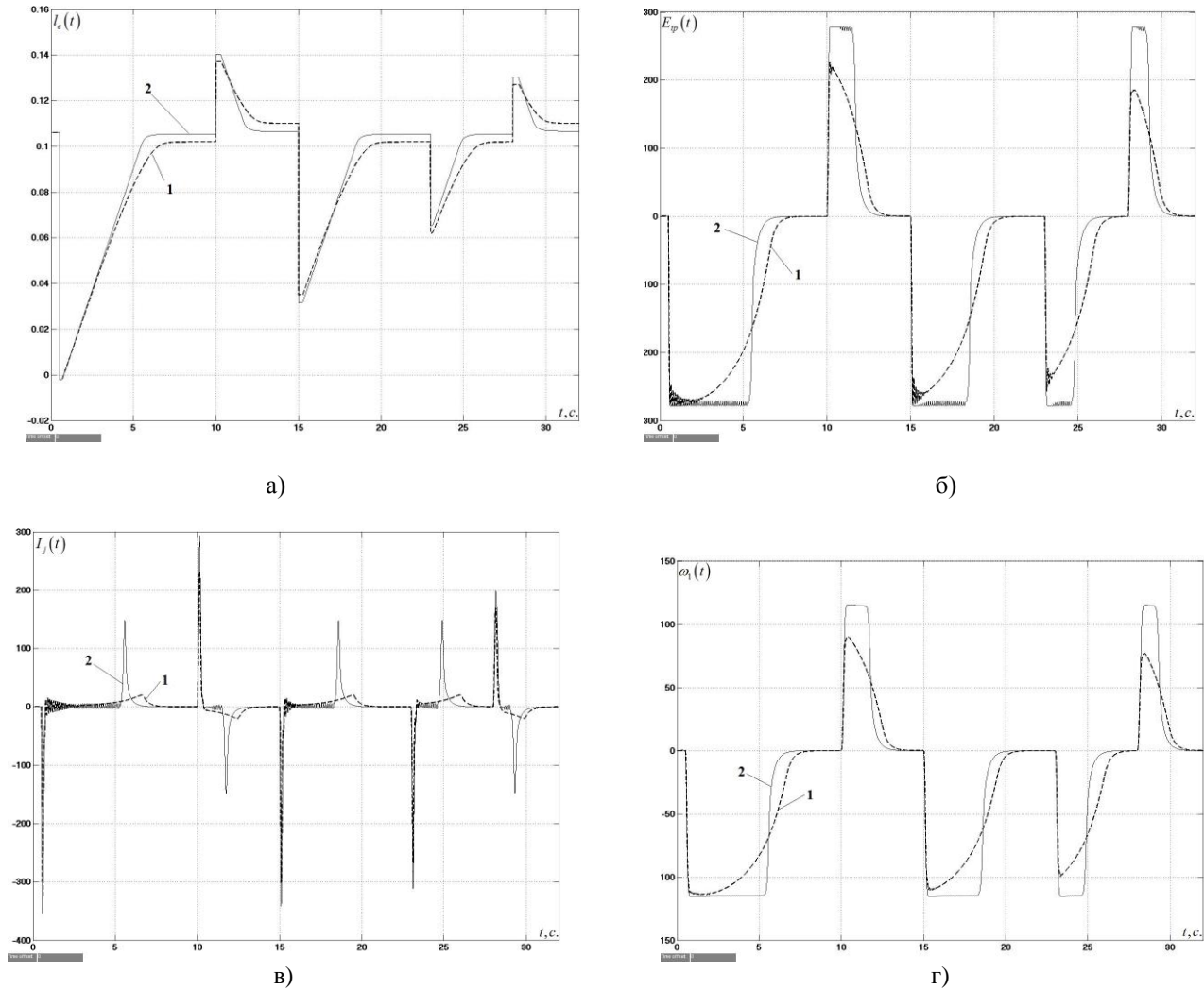


Рисунок 7 – Залежності а) довжини дуги електрода, б) вихідного сигналу тиристорного перетворювача, в) струму якоря двигуна від часу, г) кутової швидкості обертання двигуна для випадків: 1) лінійний регулятор; 2) нечіткий регулятор

Наведені результати свідчать, що запропонований регулятор забезпечує більшу швидкодію та відсутність недопустимих перерегулювань порівняно з класичним варіантом.

Для кількісного порівняння одержаних результатів було обчислено основні показники функціонування динамічної системи з різними регуляторами (табл. 1).

Таблиця 1 – Кількісні характеристики динамічної системи

Тип регулятора	Характеристика					
	Час виходу на усталений режим, с			Макс. похибка в усталеному режимі, %		
	к.з.	збільш. довж. дуги	зменш. довж. дуги	к.з.	збільш. довж. дуги	зменш. довж. дуги
Лінійний	7,5	3,5–4	6	3,8		
Нечіткий	6,5	3	3–5	0,5		

Наведені дані свідчать про перевагу при застосуванні нечіткого регулятора, адже в цьому випадку вихідні сигнали всіх досліджуваних координат вектора стану системи близькі до бажаних.

ВИСНОВКИ. Отже, запропонований підхід до апроксимації нелінійностей дозволяє одержати адекватну модель системи та синтезувати регулятор із використанням класичної теорії керування, щоб забезпечити бажані перехідні процеси в системі.

Застосування згаданого підходу для синтезу ДСП дозволяє покращити швидкодію системи і тим самим підвищити її техніко-економічні показники. Наведений підхід до синтезу нечіткого регулятора ДСП дозволяє синтезувати регулятор, який забезпечує бажані перехідні процеси в системі. Одержані результати свідчать, що застосування апарату нечітких множин дозволяє одержати адекватну модель нелінійного тиристорного перетворювача. Керувачий вплив формується на основі значення вхідної напруги в тиристорний перетворювач.

Проте в літературі не повною мірою розкритим залишається питання врахування зовнішніх детермінованих та недетермінованих збурень, що й буде предметом подальших досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Марущак Я.Ю., Лозинський А.О., Кушнір А.П. Динаміка двомасових систем стабілізації режиму в електродугових печах. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 224 с.
2. Пивняк Г.Г., Бешта А.С. Идентификация динамических параметров электроприводов // *Электричество*. – 2002. – Вып. 11/2002. – С. 29–31.
3. Емельянов С.В., Уткин В.И., Таран В.А. та ін. Теория систем с переменной структурой. – М.: Наука, 1970. – 592 с.
4. Гельднер К., Кубик С. Нелинейные системы управления. – М.: Мир, 1987. – 368 с.
5. Isidori A. *Nonlinear control systems*. – Springer-Verlag, 1995. – 550 p.
6. Краснощеченко В., Крищенко А. Нелинейные системы. Геометрические методы анализа и синтеза, М.: Издательство МГТУ им. Н. Баумана, 2005. – 520 p.
7. Лозинський А.О., Паранчук Я.С., Демків Л.І. Дослідження системи переміщення електродів дугової сталеплавильної печі з нечітким регулятором // *Технічна електродинаміка*. – 2014. – Вып. 2. – С. 73–77.
8. Лозинський О.Ю., Паранчук Я.С., Мороз В.І., Паранчук Р.Я. Дослідження режимів електромеханічної системи регулювання потужності дуг дугової сталеплавильної печі з нечітким паралельним коректором // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – 2012. – Т. 3. – С. 524–525.
9. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control // *IEEE Trans. on Syst.* – 1985. – Т. SMC–15. – Iss. 1. – PP. 116–132.
10. Driankov D., Hellendoorn H., Reinfrank M. *Wprowadzenie do sterowania rozmytego*. – Warszawa: «Wydawnictwa Naukowo-Techniczne», 1996. – 320 p.
11. Piegat A. *Modelowanie i sterowanie rozmyte*. – Warszawa: “Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT”, 2003. – 678 p.
12. Демків Л.І. Дослідження впливу вибору параметрів функції належності, як ступенів свободи нечіткого регулятора, на характеристики динамічної

системи // *Вісник НУ "Львівська політехніка", серія "Фізико-математичні науки"*. – 2013. – Вип. 768. – С. 105–110.

13. Осичев А.В., Котляров В.О., Марков В.С. Стандартные распределения корней в задачах синтеза в электроприводе // *Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика*. – Харьков: Основа, 1997. – С. 104–109.

14. Лозинський А.О., Демків Л.І. Аналіз стійкості систем з регулятором Такагі-Сугено // *Искусственный интеллект*. – 2008. – Вып. 4. – С. 545–550.

15. Wang Yuhua The Fuzzy Control of Electrode Regulator System // *International Conference on IHMSC '09*. – Iss. 2. – PP. 49–52.

16. Wang Yuhua Based on Fuzzy Control of Ore Smelting Electric Arc Furnace Electrode Regulator System // *Second International Conference on ICICTA '09*. – Iss. 2. – PP. 668–671.

17. Xiaoyan Li, Xiuhe Lu, Dongmei Wang. Arc furnace electrode control system design // *International Conference on CMCE, 2010*. – Iss. 4. – PP. 364–366.

18. Taslimian M., Shabaninia F., Vaziri M., Vadhva S. Fuzzy type-2 electrode position controls for an Electric Arc Furnace // *IEEE 13th International Conference on IRI, 2012*. – PP. 498–501.

19. Ping Guan, Xiao-he Liu, Xiang-jun Zhang, Ming-hui Li Direct adaptive fuzzy robust control of arc furnace // *8th IEEE International Conference on ICCA, 2010*. – PP. 1227–1232.

20. Feng Yu, Zhizhong Mao Internal model control for electrode in electric arc furnace based on rbf neural networks // *24th Chinese CCDC, 2012*. – PP. 4074–4077.

21. Wang Yuhua, Miao Jianlin. Electrode regulator system for ore smelting electric arc furnace based on active disturbance rejection control technology // *2nd International Conference on ICACC, 2010*. – Iss. 2. – PP. 109–113.

22. Wang Yuhua, Lu Xiuhe, Wang Shirong. Double Close Loop Electrode Regulator System Based on Active Disturbance Rejection Control Technology // *Second International Symposium on ISISE, 2009*. – PP. 565–569.

23. Wu Zheng-lan, Liu Xiao-he Robust. Control of Regulator System of Arc Furnace Based on Feedback Linearization // *Third International Symposium on ITAW '09*. – PP. 165–168.

FUZZY MODEL APPLICATION FOR SYNTHESIS OF SYSTEMS OF NONLINEAR OBJECTS AUTOMATIC CONTROL

A. Lozynsky, L. Demkiv

National University "Lviv Polytechnic"

vul. S. Bandery, 12, Lviv, 79013, Ukraine. E-mail: lozynsky@polynet.lviv.ua, demkivl@gmail.com

In this paper an approach to the approximation of nonlinearities in electromechanical systems is proposed. This approach involves the synthesis of fuzzy controller, which provides switching between the vectors of control actions depending on the value of the signal at the input of non-linearity, which is approximated. The proposed approach is tested on the example of nonlinear model of the electric arc furnace Nonlinear model of thyristor converter is approximated using the proposed approach. Switching occurs between feedback coefficients that are synthesized for

different values of the linear thyristor converter's gain. Qualitative and quantitative results which indicate the feasibility of its application are obtained. They indicate the feasibility of the proposed approach, because it provides not only a proper approximation of nonlinearities, but also allows your transients in the output signal of the system and in the interim, thereby improving key performance indicators of the investigated system.

Key words: fuzzy logic, fuzzy controller, dynamical system, approximation of nonlinearities, electric arc furnace.

REFERENCES

1. Marushchak, Ja., Lozynskyy, A. and Kushnir, A. (2011), *Dynamika dvomasovykh system stabilizatsii rezhymu v elektroduhovyykh pechakh* [Dynamics of two-mass systems for regime stabilization in electric arc furnaces], Lvivska Polytechnica, Lviv. (in Ukrainian)
2. Pivnyak, G.G., Beshta, A.S. (2002), An identification of the dynamic parameters of electric drives, *Elektrichestvo*, no. 11, pp. 29–31. (in Russian)
3. Emelyanov, S.V., Utkin, V.I., Taran, V.A. et al. (1970), *Teoriya system s peremennoy strukturoy* [The theory of systems with variable structure], Nauka, Moscow. (in Russian)
4. Heldner, K. and Kubik, S. (1987), *Nelyneinye systemy upravleniya* [Nonlinear control systems], Mir, Moscow. (in Russian)
5. Isidori, A. (1995), *Nonlinear control systems*, Springer-Verlag.
6. Krasnoschechenko, V. and Kryshchenko, A. (2005), *Nelyneinye systemy. Geometrycheskiye metody analiza i synteza* [Nonlinear systems: a geometric method for the analysis and synthesis], MGTU im. N. Bauman, Moscow. (in Russian)
7. Lozynskyy, A., Paranchuk, J. and Demkiv, L. (2014), "Survey on moving electrode arc furnace with a fuzzy controller", *Tekhnichna elektrodynamika*, Vol. 2, pp. 73–77. (in Ukrainian)
8. Lozynskyy, O., Paranchuk, J., Moroz, V. and Paranchuk, R. (2012), "Arcs power control mode of electromechanical system of arc furnace with fuzzy parallel proof reader investigation", *Elektromekhanichni i enerho-zberihaiuchi systemy*, Vol. 3, pp. 524–525. (in Ukrainian)
9. Takagi, T. and Sugeno, M. (1985), "Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control", *IEEE Trans. on Syst.*, V. SMC–15, no. 1, pp. 116–132.
10. Driankov, D., Hellendoorn, H. and Reinfrank, M. (1996), *Wprowadzenie do sterowania rozmytego*, Warszawa: "Wydawnictwa Naukowo-Techniczne", 320 p.
11. Piegat, A. (2003), *Modelowanie i sterowanie rozmyte*, Warszawa: "Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT", 678 p.
12. Demkiv, L.I. (2013), "The influence choice of parameters of membership function as degrees of freedom fuzzy controller, the dynamic characteristics of the system", *Bulletin "Lviv Polytechnic", series "Physical mathematical science"*, no. 768, pp. 105–110. (in Ukrainian)
13. Osichev, A.V., Kotlyarov, V.O. and Markov, V.S. (1997), "Point to the apportionment roots in problems in drive synthesis", *Problems of automotive drive. Theory and Practice: [Proceedings conference]*, osnova, Kharkiv. (in Russian)
14. Lozynskyy, A. and Demkiv, L. (2008), "Stability analysis of Takagi-Sugeno control systems", *Artificial Intelligence*, no. 4, pp. 545–550.
15. Wang, Yuhua (2009), "The Fuzzy Control of Electrode Regulator System", *International Conference on IHMSC '09*, Vol. 2., pp. 49–52.
16. Wang, Yuhua (2009), "Based on Fuzzy Control of Ore Smelting Electric Arc Furnace Electrode Regulator System", *Second International Conference on ICICTA '09*, Vol. 2, pp. 668–671.
17. Xiaoyan, Li, Xiuhe Lu and Dongmei, Wang (2010), "Arc furnace electrode control system design", *International Conference on CMCE*, Vol. 4, pp. 364–366.
18. Taslimian, M., Shabaninia, F., Vaziri, M. and Vadhva, S. (2012), "Fuzzy type-2 electrode position controls for an Electric Arc Furnace", *IEEE 13th International Conference on IRI*, pp. 498–501.
19. Ping, Guan, Xiao-he, Liu, Xiang-jun, Zhang and Ming-hui, Li (2010), "Direct adaptive fuzzy robust control of arc furnace", *8th IEEE International Conference on ICCA*, pp. 1227–1232.
20. Feng, Yu and Zhizhong, Mao (2012), "Internal model control for electrode in electric arc furnace based on rbf neural networks", *24th Chinese CCDC*, pp. 4074–4077.
21. Wang, Yuhua and Miao, Jianlin (2010), "Electrode regulator system for ore smelting electric arc furnace based on active disturbance rejection control technology", *2nd International Conference on ICACC*, Vol. 2, pp. 109–113.
22. Wang, Yuhua, Lu, Xiuhe and Wang, Shirong (2009), "Double Close Loop Electrode Regulator System Based on Active Disturbance Rejection Control Technology", *Second International Symposium on ISISE*, pp. 565–569.
23. Wu, Zheng-lan and Liu Xiao-he (2009), "Robust Control of Regulator System of Arc Furnace Based on Feedback Linearization", *Third International Symposium on IITAW '09*, pp. 165–168.

Стаття надійшла 27.04.2015.