

I. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 007:681.516.4

А. О. Лозинський¹, Л. І. Демків²¹Д-р техн. наук, професор НУ «Львівська політехніка»² Канд. фіз.-мат. наук, старший викладач НУ «Львівська політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ФУНКЦІЙ НАЛЕЖНОСТІ НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА ЗІ СФОРМОВАНОЮ НЕСТІЙКОЮ ПІДСИСТЕМОЮ НА ПРИКЛАДІ ДВОМАСОВОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

Розглянуто динамічну систему, що складається з двох підсистем, одна з яких нестійка. Досліджено вплив вигляду функції належності нечіткого регулятора на функціонування електромеханічної системи. Визначено оптимальні значення параметрів функцій належності.

Ключові слова: нечітка логіка, функція належності, стандартні лінійні форми, оптимальне керування, синтез регуляторів.

ВСТУП

На практиці досить складно отримати точні математичні моделі більшості фізичних систем через їхню складність та існування в них невизначеностей. Електромеханічні системи переважно за своєю природою є нелінійними. Відомі методи, що дозволяють перевіряти на стійкість такі системи, не дають можливості синтезувати їх і навпаки. Нерідко при дослідженні стійкості динамічних систем задача значною мірою ускладнюється через громіздкість всієї системи.

Застосування систем зі змінною структурою з використанням режиму ковзання надає системі нові позитивні властивості такі як нечутливість до зміни параметрів системи, зовнішніх збурень та швидкісної динамічної поведінки системи (див. напр. роботи таких авторів: В. І. Уткін [1], J. Guldner [2], K. Astrom, B. Wittenmark [3], J. Slotin, W. Li [4]).

Застосування нечіткої логіки дозволяє вирішити ряд задач які не можна було вирішити засобами класичної теорії керування. За допомогою такого підходу можливим є плавний перехід від одних налаштувань регулятора до інших або навіть до іншої структури регулятора в процесі роботи системи.

Дослідженню систем адаптивного керування з нечіткою логікою присвячуються роботи, зокрема, С. Su, Y. Stepanenko [5], J. Spooner, K. Passino [6] та ін., а питання синтезу оптимального керування системами з змінною структурою досліджено, зокрема, в роботах [7, 8], проте в них не досліджено питання багатокритеріальної оптимізації. В [9] дослідження обмежене системами другого порядку, що суттєво обмежує коло використання результатів, робота [10] присвячена алгоритмам визначення точок множини Парето. Одним з важливих питань при багатокритеріальній оптимізації є питання визначення вагових коефіцієнтів впливу кожного з критеріїв. Ме-

тодика вибору таких коефіцієнтів запропонована, наприклад, в [11]. Але тут, так само як і в [9, 10] дослідження обмежується випадком постійних вагових коефіцієнтів.

Для електромеханічних систем у випадку керування за повним вектором стану системи застосовують принципи модального керування, а регулятор налаштовують так, щоб забезпечити одну з двох відомих стандартних форм. Найчастіше застосовують стандартну форму бінома або Ботерворта. Покращення характеристик системи забезпечується шляхом поєднання згаданих налаштувань регулятора між собою в системах з нечіткими регуляторами, це досліджено, зокрема в роботах Лозинського А. О. [12]. Подальший вираш можливий при використанні на початковому етапі нестійкої системи. В багатьох випадках електромеханічну систему розглядають як двомасову, причому процеси в електромагнітному контурі не досліджують [13].

Незважаючи на те, що в світовій науковій літературі досить активно проводяться дослідження стійкості динамічних систем авторами не було виявлено жодних публікацій які б досліджували системи з спеціально сформованими нестійкими підсистемами. Тобто даний підхід та пов'язані з ним дослідження можуть започаткувати новий напрямок в синтезі динамічних систем.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Так само як і в [14], розглянемо нелінійну систему яку в загальному випадку можна описати за допомогою диференціального рівняння n -го порядку та застосовуючи техніку описану, зокрема в [15] можна одержати модель системи, що складається з кількох незалежних підсистем:

$$\dot{\bar{x}}(t) = f(\bar{x}(t)) + g(\bar{x}(t))\bar{u}(t) + \bar{\xi}(t), \quad (1)$$

де $\bar{\xi}(t)$ – зовнішні збурюючі впливи, $f(\bar{x}(t))$ та $g(\bar{x}(t))$ – нелінійні функції, описані в області робочих точок систе-

ми $\bar{u}(t) \in R^n$ – вектор керуючих впливів. Використовуючи техніку описану, наприклад, в [12, 16] можемо перейти від системи (1) до лінеаризованої системи і сформулювати для всіх точок вектор керуючих впливів який визначається повним вектором стану або за допомогою модального регулятора.

$$\Delta \dot{\bar{x}}(t) = A^* \Delta \bar{x}(t) + B^* \Delta \bar{u}(t),$$

де $\Delta \bar{x}(t) = \bar{x}(t) - \bar{x}_0(t), \Delta \bar{u}(t) = \bar{u}(t) - \bar{u}_0(t), \bar{x}_0(t), \bar{u}_0(t)$ – вектори в околі яких розкладаємо нелінійні функції в ряд Тейлора,

$$A^* = (a_{i,j})_{i,j=1}^n = \frac{\Delta f_i}{\Delta x_j}, B^* = (b_{i,j})_{i,j=1}^n = \frac{\Delta g_i}{\Delta x_j}.$$

Модель системи можна побудувати використовуючи стандартну систему вводу-виводу типу Такагі-Сугено [17]

$$R_i : \text{ IF } x_1 \in M_1^i \text{ i } x_2 \in M_2^i \text{ i } \dots \text{ i } x_n \in M_n^i \text{ THEN } \dot{\bar{x}}(t) = A_i \bar{x}(t) + B_i \bar{u}(t),$$

$$\text{ IF } x_1 \in N_1^i \text{ i } x_2 \in N_2^i \text{ i } \dots \text{ i } x_n \in N_n^i \text{ THEN } \bar{u}(t) = K_i \bar{x}(t), \quad i = \overline{1, k},$$

де R_i – i -те правило, $M_j^i, N_j^i, i = \overline{1, k}, j = \overline{1, n}$ – 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).

Використовуючи дефазифікацію гравітаційним методом отримуємо таку модель системи

$$\dot{\bar{x}}(t) = \sum_{i=1}^k v_i(\bar{x}) \left(A_i + B_i \sum_{j=1}^k \mu_j(\bar{x}) K_j \right) \bar{x}(t),$$

$$\text{де } v_i = v_i(\bar{x}) = \frac{\prod_{j=1}^n M_j^i(x_j(t))}{\sum_{i=1}^k \prod_{j=1}^n M_j^i(x_j(t))}, \mu_i = \mu_i(\bar{x}) = \frac{\prod_{j=1}^n N_j^i(x_j(t))}{\sum_{i=1}^k \prod_{j=1}^n N_j^i(x_j(t))},$$

$M_j^i(x_j(t)), N_j^i(x_j(t))$ – функції належності $x_j(t)$ до відповідної області M_j^i чи N_j^i , $\sum_{i=1}^k v_i = 1, \sum_{i=1}^k \mu_i = 1$. Тобто, модель i -тої системи матиме вигляд

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

Розглянемо класичну систему керування швидкістю за повним вектором стану (див. напр. [14]) та на її основі побудуємо модель двомасової системи, що складається з двох підсистем одна з яким нестійка. Для забезпечення плавного перемикання між підсистемами та усунення ковзаючих режимів при перемиканні між підсистемами застосовано функцію належності як вагову функцію впливу кожної з підсистем на траєкторії руху усєї системи.

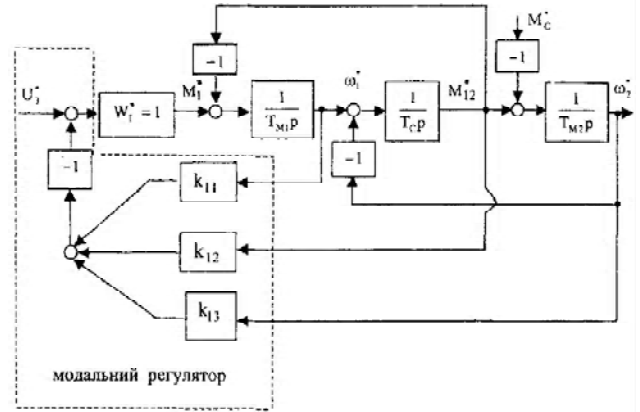


Рис. 1. Схема системи модального регулювання швидкістю

Оскільки мова йде про систему, що складається з лише двох підсистем, то немає сенсу розглядати випадки внутрішніх функцій належності (трапецієвидної, Гауса тощо). Тому проводячи дослідження було розглянуто лише випадки зовнішніх функцій належності, а саме L функції, сігмоїдальної функції та функції запропонованої в статті J. Dombi [18] та дослідженої в статтях Р. Корпінкова [19, 20]. Розглянуто випадки коли в нечіткої підсистеми є один та два корені в правій півплощині.

Під якісними показниками функціонування системи тут розумітимемо значення інтегральних показників якості

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

$$I_3 = \int_0^T |e(t)| dt; \quad I_4 = \int_0^T t |e(t)| dt, \quad (2)$$

$$e(t) = x_{зад} - x(t),$$

де T – час виходу на усталений режим тобто, фактично, завданням статті є знаходження значення параметрів функції належності при яких показники (2) набувають мінімальних значень, але оскільки ці показники можуть набувати мінімальних значень при різних налаштуваннях регулятора, то для того щоб оцінити якість функціонування системи на основі багатокритеріальної оптимізації обчислимо узагальнений інтегральний показник якості

$$I = \sum_{j=1}^4 \gamma_j I_j, \quad (3)$$

де коефіцієнти γ_j можна визначити або методом Парето-оптимальних рішень або експертним чином. Покладемо $\gamma_j = 0,25, j = \overline{1,4}$.

Для проведення дослідження в Simulink побудована модель системи, що зображена на рис. 2

Загальний вигляд характеристичного многочлена кожної з підсистем є добре відомий (див. напр. [14])

$$H(p) = p^3 + p^2 \frac{k_{11}}{T_{M1}} + p \left(\frac{1}{T_C T_{M2}} + \frac{k_{12} + 1}{T_C T_{M1}} \right) + \left(\frac{k_{11} + k_{13}}{T_C T_{M1} T_{M2}} \right).$$

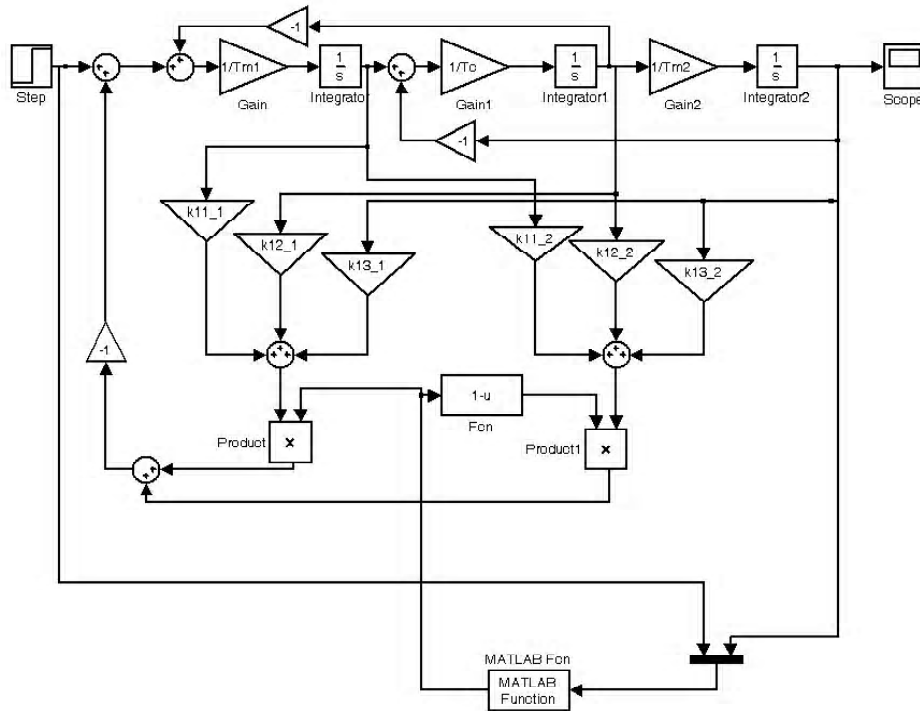


Рис. 2. Модель системи в Simulink

У випадку налаштування підсистеми на біноміальну форму коефіцієнти k_{11} , k_{12} , k_{13} визначаються за формулами (4)

$$\begin{aligned} k_{11} &= 3\omega_0 T_{M1}, \\ k_{12} &= \left(3\omega_0^2 - \frac{1}{T_C T_{M2}} \right) T_C T_{M1} - 1, \\ k_{13} &= T_C T_{M1} T_{M2} \omega_0^3 - 3T_{M1} \omega_0, \end{aligned} \quad (4)$$

якщо ж підсистем нестійка та має лише один корінь у правій півплощині то ці коефіцієнти приймають значення

$$\begin{aligned} k_{11} &= T_{M1} \omega_0, \\ k_{12} &= \left(-\omega_0^2 - \frac{1}{T_C T_{M2}} \right) T_C T_{M1} - 1, \\ k_{13} &= -\omega_0^3 T_C T_{M1} T_{M2} - T_{M1} \omega_0, \end{aligned} \quad (5)$$

де $\omega_0 = 4$ – значення середньгеометричного кореня, T_{M1} , T_{M2} , T_C – сталі часу першої, другої мас та стала часу пружного елемента відповідно, що характеризують систему та описані в [14].

Для уникнення ефекту гіперперемикання між підсистемами було застосовано апарат нечіткої логіки. Перехід між керуючими впливами підсистем реалізовано завдяки досліджуваним функціям належності, а саме:

1. Функція належності типу L (див. напр. [21])

$$L(x; \alpha, \beta) = \begin{cases} 1, & x \leq \alpha, \\ (x - \beta) / (\alpha - \beta), & \alpha < x \leq \beta, \\ 0, & x > \beta. \end{cases} \quad (6)$$

Параметри α та β визначають границі полярних значень похибки, що відповідають випадкам функціонування лише стійкої чи нестійкої підсистем відповідно

2. Ліва сігмоїдальна функція (див. напр. [22])

$$\mu(x; \alpha, \beta) = \frac{e^{-\alpha(x-\beta)}}{1 + e^{-\alpha(x-\beta)}}. \quad (7)$$

Параметр b визначає значення похибки при якому значення функції належності дорівнює 0,5, а параметр a задає ступінь нахилу графіка функції належності в точці $\mu(x; \alpha, \beta) = 0,5$.

3. Параметризована функція належності (див. [18–20])

$$\mu(x; \alpha, \beta) = \begin{cases} 0, & x < c, \\ \frac{(1-\beta)^{\alpha-1} (b-x)^\alpha}{(1-\beta)^{\alpha-1} (b-x)^\alpha + \beta^{\alpha-1} (x-c)^\alpha}, & x \in [c, b], \\ 1, & x < b. \end{cases} \quad (8)$$

Тут параметри c та b відповідають границі полярних значень похибки, параметр α задає ступінь нахилу графіка функції, а β – точка перегину кривої (див. [20]). Зміна параметрів та приводить не лише до зсуву чи масштабування графіка функції належності, а й до зміни її форми. Зокрема, при отримуємо частковий випадок функції (6).

Сформуємо оптимальну траєкторію системи таким чином, що коли похибка велика працює лише нестійка підсистема, а коли мала – стійка. У всіх випадках дефазифікацію проводитимемо однаково – спрощеним гравітаційним методом.

Дослідимо вплив значень параметрів α та β на інтегральні показники якості (3).

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ У ВИПАДКУ ОДНОГО КОРЕНЯ В ПРАВІЙ ПІВПЛОЩИНІ

Було проведено моделювання поведінки системи, що складається з двох підсистем з кожною з наведених функцій належності (6)–(8) при різних значеннях параметрів цих функцій. Значення узагальненого інтегрального показника якості (3) у випадку функції L (6) зображено на рис. 3, а. При моделюванні значення вхідного сигналу було покладене рівним одиниці. Для функції L дослідження проводилось для $\alpha \in [0, 1]$, $\beta \in [0, 1]$, що змінюються з кроком 0,01 для кожного з параметрів незалежно.

Крім того залежно від значень параметрів функції належності змінюється також значення максимального перерегулювання. Цю залежність проілюстровано на рис. 3, б. Бачимо, що характер зміни величин, зображених на рис. 1 є подібним. Такий же характер зміни є і у показників якості з (2).

З проведених обчислень випливає, що система працює оптимально при значеннях $\alpha = 0,87$; $\beta = 0,88$, при цьому відносне максимальне перерегулювання дорівнює 1,026, час входження в 5% зону – 1,987 с., час першого досягнення заданого рівня функціонування – 0,879 с. На рис. 4, а, наведено, зокрема, траєкторії руху системи у випадку налаштування на стандартну форму Батерворта

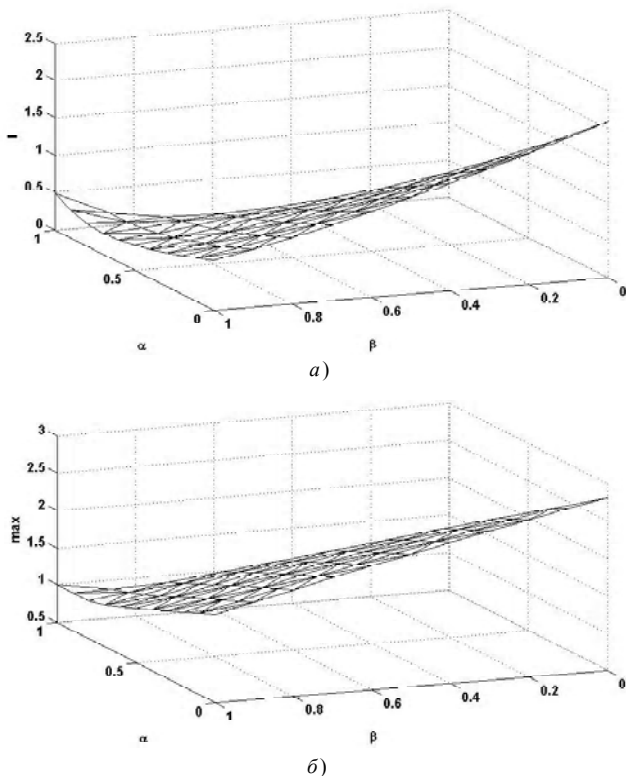


Рис. 3. Залежності величин від параметрів функції належності : а – узагальненого функціонала якості системи; б – значення максимального перерегулювання

та, біном та досліджувану систему з оптимальними параметрами.

При цьому змінюється значення вихідного сигналу регулятора для випадку використання оптимальних параметрів функції належності

$$u_{\text{опт}}(t) = \sum_{i=1}^3 k_i x_i(t),$$

$$k_i = \lambda_i^{\text{опт}}(\bar{x}) k_i^{\text{bin}} + (1 - \lambda_i^{\text{опт}}(\bar{x})) k_i^{\text{бат}}$$

стандартної форми Батерворта та бінома зображено на рис. 4, б.

Подібне моделювання поведінки системи було проведено і у випадку лівої сігмоїдальної функції належності (див. рис. 5). Для цієї функції було покладено $\alpha \in [0,5; 5,0]$ з кроком 0,05, $\beta \in [0,0; 1,0]$ з кроком 0,01.

Бачимо, що незважаючи на те, що система в цілому є стійкою, не при всіх значеннях параметрів функції належності вдається досягнути виходу на заданий рівень

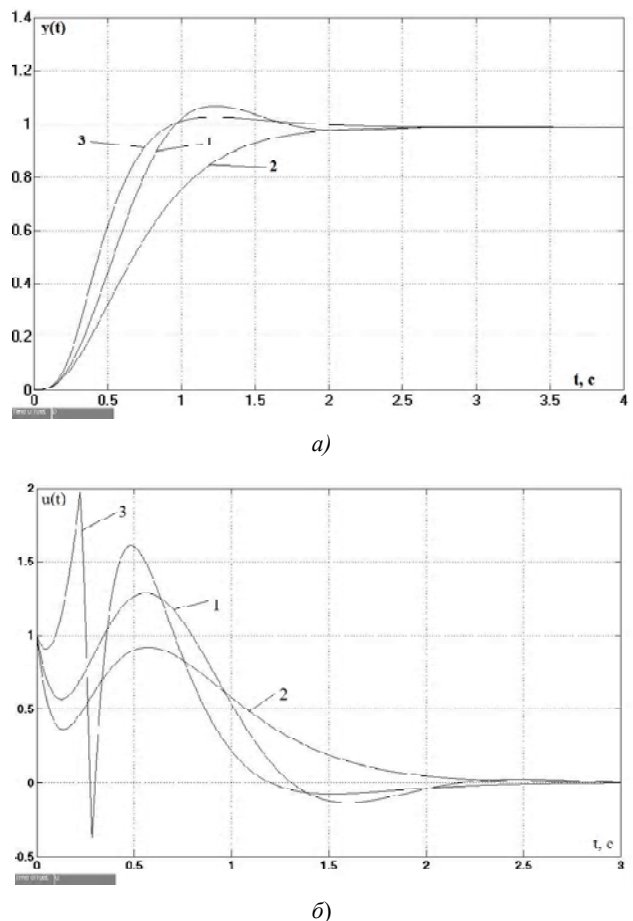


Рис. 4. Результати моделювання: а – вихідні сигнали системи у випадку налаштування на

1 – форму Батерворта, 2 – біном, 3 – $L(u; 0,87; 0,88)$ (оптимальна траєкторія); б – вихідні сигнали регуляторів 1 – $u_{\text{Батерворт}}(t)$, 2 – $u_{\text{біном}}(t)$, 3 – $u_{\text{опт}}(t)$

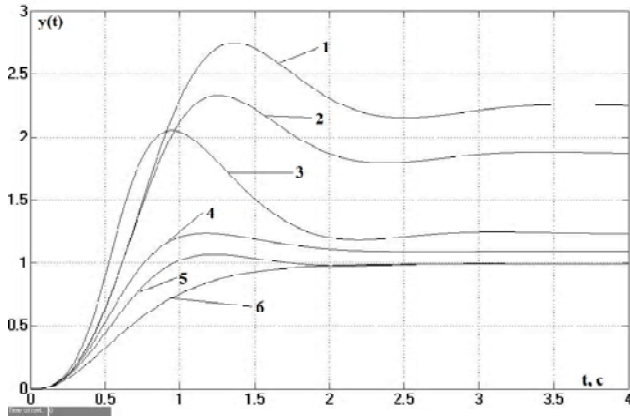


Рис. 5. Результати моделювання системи при використанні лівої сигмоїдальної функції з різними параметрами:

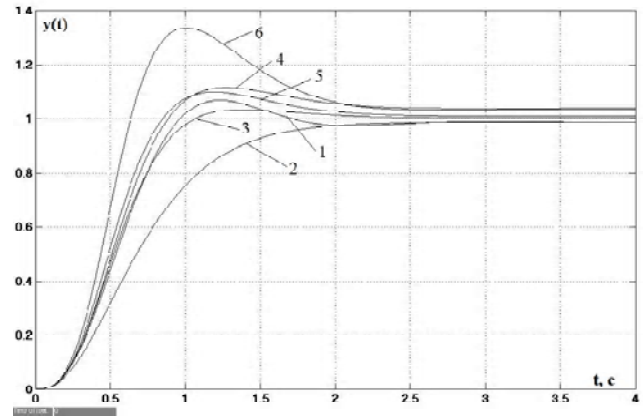
- 1 – $\alpha = 0,7; \beta = 0,1$; 2 – $\alpha = 1,0; \beta = 0,3$;
 3 – $\alpha = 4,0; \beta = 0,3$; 4 – $\alpha = 3,0; \beta = 0,9$; 5 – стандартна форма Батерворта; 6 – біном

функціонування. Тобто, не при всіх значеннях функції належності можна обчислювати значення інтегральних показників якості за описаною вище методикою. Проте, (рис. 6, а) для деяких значень таки вдається досягти виходу системи на задане значення вихідного сигналу. Це пов'язано з тим, що коли похибка дорівнює нулю, значення коренів характеристичного многочлена залежить від значень параметрів лівої сигмоїдальної функції (рис. 7), а не строго дорівнюють $-\omega_0$ як у випадку функцій (6) та (8). Розподіл коренів показує, що останній член характеристичного поліному не дорівнює ω_0^3 , а визначається як $\omega_0^2 \cdot \omega_{01}$, де ω_{01} – це корінь, який перемістився з правої частини. Відповідно, значення сигналу в усталеному режимі буде визначатися не як K/ω_0^3 , а як $K/(\omega_0^2 \omega_{01})$ і буде більшим ніж отримане при стандартному налаштуванні системи. Таким чином, використання сигмоїдальних функцій не завжди є доцільним і тому необхідним є формування функцій перемикань в яких при похибках близьких до нуля керуючий вплив при одному з коренів який перебуває у правій півплощині був рівним нулеві.

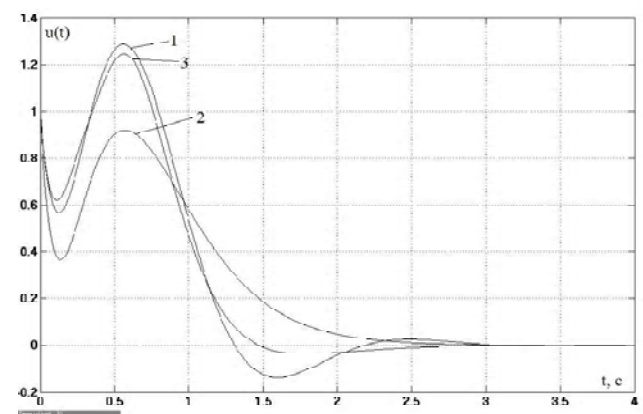
Значення лівої сигмоїдальної функції належності $\mu(0; \alpha, \beta)$ не дорівнює одиниці, а залежить від параметрів цієї функції. Детальний вплив цих параметрів на стійкість системи буде предметом подальших досліджень.

Серед тих пар параметрів функції належності, що забезпечують вихід системи на заданий рівень функціонування, система працює оптимально при $\alpha = 5,0; \beta = 1,0$ (рис. 6, а). При цьому відносне максимальне перерегулювання дорівнює 1,034, час входження в 5% зону – 0,939 с., час першого досягнення заданого рівня функціонування – 1,01 с.

Значення вихідних сигналів регуляторів для випадку оптимальних параметрів функції належності та налаштування на стандартну форму Батерворта і біном зображено на рис. 6, б.



а)



б)

Рис. 6. Результати моделювання: а – вихідні сигнали системи у випадку налаштування на

- 1 – форму Батерворта, 2 – біном, 3 – застосування лівої сигмоїдальної функції з параметрами $\alpha = 5,0; \beta = 1,0$ (опт. траєкторія), 4 – $\alpha = 3,5; \beta = 1,0$, 5 – $\alpha = 5,0; \beta = 0,9$, 6 – $\alpha = 5,0; \beta = 0,7$; б – вихідні сигнали регуляторів
 1 – $u_{\text{Батерворт}}(t)$, 2 – $u_{\text{біном}}(t)$, 3 – $u_{\text{опт}}(t)$

Дослідимо тепер вплив параметрів параметризованої функції належності на якісні показники функціонування системи при цьому $\alpha \in [0,5; 5,0]$ та змінюється з кроком 0,5, $\beta \in [0,1; 0,9]$ та змінюється з кроком 0,01.

Для визначення оптимальних значень функції належності обчислено значення інтегрального показника якості, див. рис. 8, а.

Величину відносного максимального перерегулювання зображено на рис. 8, б. Бачимо, що характер зміни значення відносного максимального перерегулювання такий же як і в інтегральних показників якості.

З проведеного аналізу випливає, що оптимальне функціонування системи відбувається при $\alpha = 5,0; \beta = 0,1$ (рис. 9, а). При цьому значення відносного максимального перерегулювання дорівнює 1,045, час входження в 5% зону дорівнює 1,471 с., час першого досягнення заданої області функціонування – 0,812 с. Значення вихідного сигналу регулятора зображено на рис. 9, б.

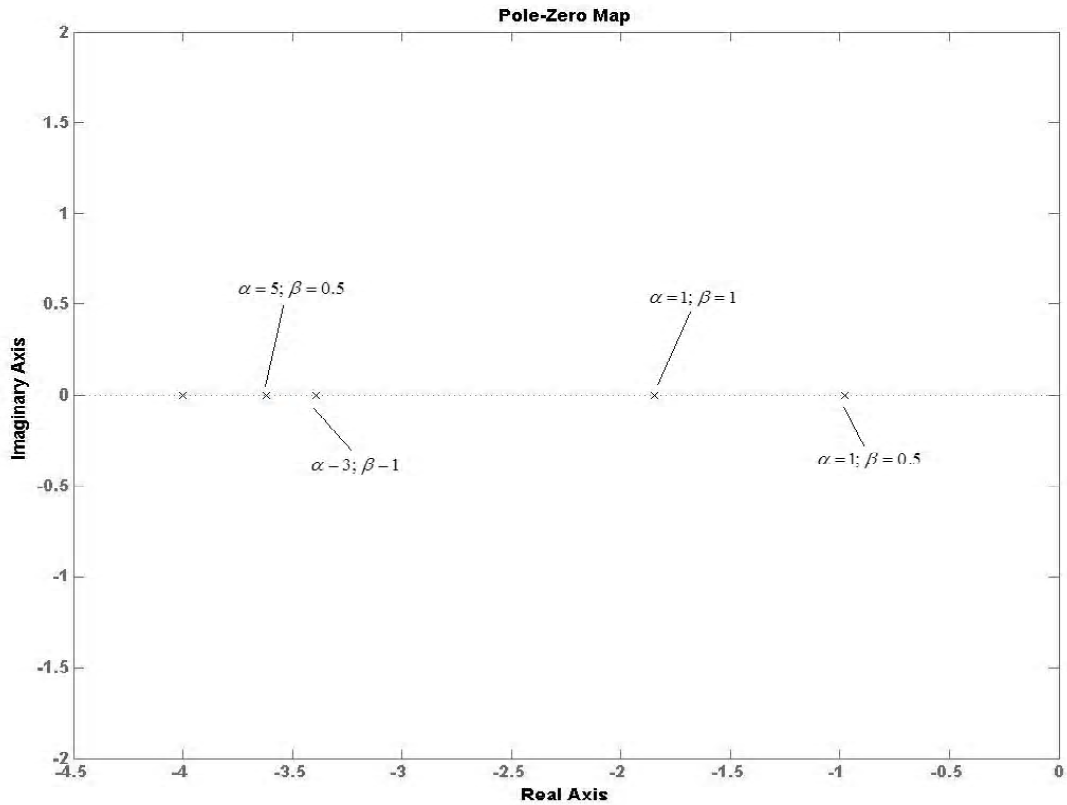


Рис. 7. Розподіл коренів характеристичного многочлена системи при застосуванні лівої сигмоїдальної функції для випадку $x=0$ при різних значеннях параметрів

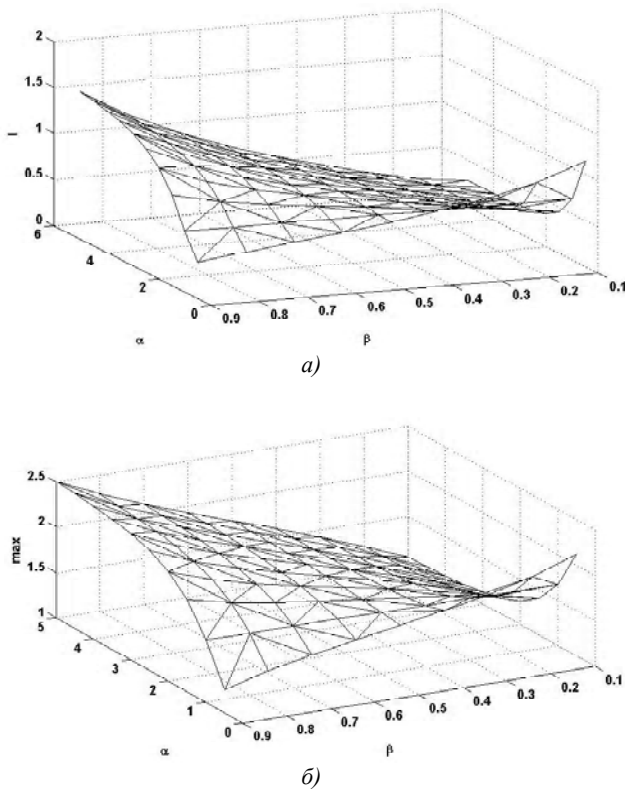


Рис. 8. Залежності значень від параметрів функції належності (8): *а* – інтегрального показника якості (3) системи, *б* – максимального перерегулювання

На підставі проведених розрахунків визначені кількісні переваги використання досліджуваних функцій належності (див. табл. 1) та порівняно застосування досліджуваних функцій з відповідними оптимальними параметрами з випадком коли система налаштована лише на біноміальний фільтр або лише на фільтр Батерворта.

У останніх шести стовпчиках таблиці обчислено частки величин, що позначені в перших п'яти стовпцях. З табл. 1 бачимо, що функція L (6) належності забезпечує вигреш в порівнянні з налаштуванням на біном та на фільтр Батерворта. Проте у неї найбільше серед трьох досліджуваних функцій (6)–(8) відносно максимальне перерегулювання та час входження в 5% зону майже вдвічі більший за час першого досягнення заданого рівня функціонування. З іншого боку, ліва сигмоїдальна функція належності має найменше, з трьох досліджуваних функцій (6)–(8), відносно максимальне перерегулювання (можна сказати, що воно зовсім відсутнє, адже його величина менша за 5%). Оптимальною з точки зору узагальненого інтегрального показника якості є параметрична функція, оскільки за значенням узагальненого інтегрального показника якості вона практично не відрізняється від функції L та забезпечує значний вигреш в порівнянні з лівою сигмоїдальною функцією належності, адже її узагальнений інтегральний показник якості є меншим. При цьому відносно максимальне перерегулювання в цієї функції теж не виходить за межі 5% зони.

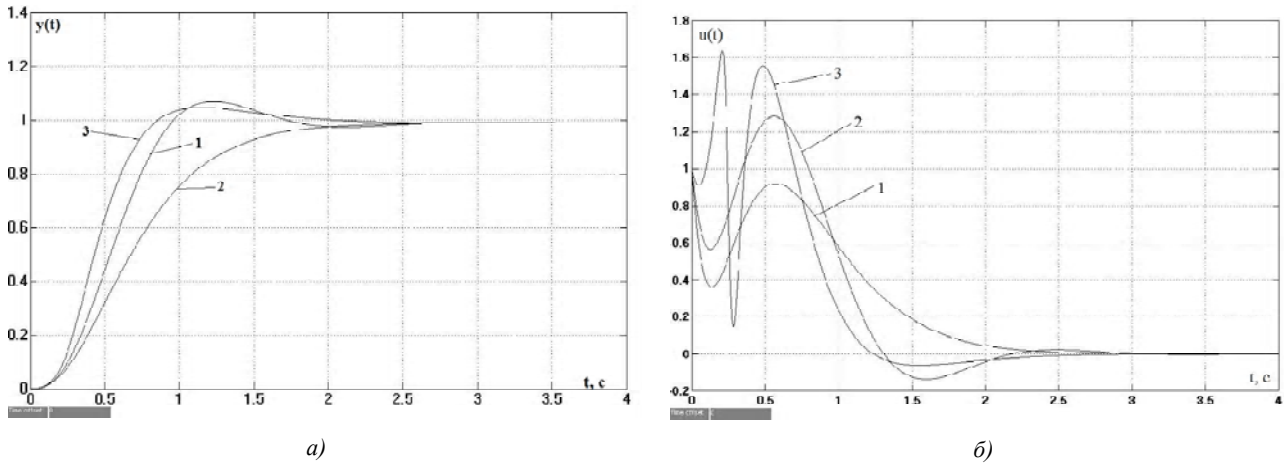


Рис. 9. Результати моделювання: а – вихідні сигнали системи у випадку налаштування на

1 – форму Батерворта, 2 – біном, 3 – застосування параметризованої функції з параметрами $\alpha = 5,0; \beta = 0,1$ (опт. траєкторія);

б – вихідні сигнали регуляторів 1 – $u_{\text{Батерворт}}(t)$, 2 – $u_{\text{біном}}(t)$, 3 – $u_{\text{опт}}(t)$

Таблиця 1. Порівняння кількісного ефекту використання досліджуваних функцій належності при відповідних оптимальних параметрах

	Функція $L(L)$	Ліва сигмоїдальна (Л)	Параметризована (П)	Біном (Бін)	Батерворт (Бат)	L / Бін	Л / Бін	П / Бін	L/Бат	Л / Бат	П / Бат
I_1	0,339	0,399	0,336	0,522	0,419	0,649	0,764	0,644	0,809	0,952	0,802
I_2	0,069	0,098	0,068	0,176	0,106	0,392	0,557	0,386	0,651	0,925	0,642
I_3	0,478	0,589	0,483	0,789	0,604	0,606	0,747	0,612	0,791	0,975	0,800
I_4	0,165	0,300	0,161	0,465	0,299	0,355	0,645	0,346	0,552	1,003	0,538
I	0,263	0,346	0,262	0,488	0,357	0,539	0,709	0,537	0,737	0,969	0,734
t, c	0,879	1,010	0,812	1,662	0,915	0,529	0,608	0,489	0,961	1,104	0,887
$t_{5\%}, c$	1,987	0,939	1,471	1,662	1,420	1,196	0,565	0,885	1,399	0,661	1,036
max	1,026	1,034	1,045	0,988	1,069	1,038	1,047	1,058	0,960	0,967	0,978

ВИСНОВОК

Дослідження показали, що у випадку одного кореня у правій півплощині краще застосовувати у нечіткому регуляторі параметричну функцію належності. Проведені розрахунки показують, що застосування запропонованого підходу дозволяє забезпечити при пуску вигреш у значенні інтегральних показників якості до 1,86 разів при практично відсутньому перерегулюванні в порівнянні з налаштуванням на біном та до 1,12 разів в порівнянні з налаштуванням лише на стандартну форму Батерворта, а для часткових критеріїв ці значення можуть бути ще більшими.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Utkin, V. I.* Sliding mode control design principles and applications to electrical drives / V. I. Utkin // IEEE Trans. on Industrial Electronics. – 1993. – V. 40, No. 1. – P. 23–36.
2. *Guldner, J.* The chattering problem in sliding mode systems. / J. Guldner, V. I. Utkin // Fourteenth International Symposium of Mathematical Theory of Networks and systems, MTNS2000. – 2000. – P. 346–350.
3. *Astrom, K. J.* Adaptive control / K. J. Astrom, B. Wittenmark. – Addison-Wesley, 1989. – 580 p.

4. Slotin, J. J. Applied nonlinear control / J. J. Slotin, W. Li. – Prentice Hall, USA, 1998. – 461 p.
5. Su, Chun-Yi. Adaptive control of a class of nonlinear systems with fuzzy logic / Chun-Yi Su, Yury Stepanenko // IEEE Trans. on Fuzzy systems. – 1994. – V. 2. No. 4. – P. 285–294.
6. Spooner, J. T. Stable adaptive control using fuzzy system and neural networks / J. T. Spooner, K. M. Passino // IEEE Trans. on Fuzzy systems. – 1996. – V. 4. No. 3. – P. 339–359.
7. Буякас, В. И. Оптимальное управление системами с переменной структурой / В. И. Буякас // Автоматика и телемеханика. – 1966. – № 4. – С. 57–68.
8. Габасов, Р. Прямой точный метод оптимизации линейной динамической системы со многими входами / Р. Габасов, Ф. М. Кирилова, О. И. Костюкова // Автоматика и телемеханика. – 1986. – № 2. – С. 6–13.
9. Хабаров, В. С. Об одной задаче оптимального управления системами с переменной структурой / В. С. Хабаров // Автоматика и телемеханика. – 1969. – № 10. – С. 68–74.
10. Генкин, М. Д. Об одном подходе к многокритериальным задачам оптимизации / М. Д. Генкин, А. Я. Крейнин // Автоматика и телемеханика. – 1988. – № 8. – С. 146–155.
11. Александрова, И. Е. К решению многокритериальной задачи аналитического конструирования оптимальных регуляторов / И. Е. Александрова, Т. Е. Александрова // Проблемы автоматизованого электроприводу. Теория і практика. – 2001. – № 10. – С. 168–170.
12. Лозинський, А. О. Дослідження стійкості систем з регулятором Такагі-Сугено-Кангі / А. О. Лозинський, Л. І. Демків // Проблеми автоматизованого електроприводу. – 2008. – Т. 30. – С. 89–90.
13. Лозинський, О. Ю. Синтез двомасових і тримасових систем автоматичного регулювання положення електродів при врахуванні випадкового характеру збурень. / О. Ю. Лозинський, Я. Ю. Марушак, Я. С. Паранчук, Н. Ю. Попова // Львівська політехніка. – 1997. – № 288. – С. 77–85.
14. Марушак, Я. Ю. Синтез електромеханічних систем з послідовним та паралельним коригуванням / Я. Ю. Марушак. – Львів : Львівська політехніка, 2005. – 207 с.
15. Лозинський, А. О. Дослідження стійкості систем з нестійкою підсистемою (частина 1) / А. О. Лозинський, Л. І. Демків // Електромеханіка та електроенергетика. – 2010. – № 1. – С. 19–29.
16. Лозинський, А. О. Аналіз стійкості систем з регулятором Такагі-Сугено / А. О. Лозинський, Л. І. Демків. – Донецьк : ПІШ МОН і НАН України «Наука і освіта», 2008. – Т. 4. – С. 545–549.
17. Takagi, T. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control / T. Takagi, M. Sugeno // IEEE Trans. on Syst. – 1985. – V. SMC-15. No. 1. – P. 116–132.
18. Dombi, J. Membership function as an evaluation / J. Dombi // Fuzzy Sets and Systems. – 1990. – V. 75. – P. 1–21.
19. Koprinkova, P. Membership function shape and its influence on the stability of fuzzy control systems / P. Koprinkova // Cybernetics and Systems : An International Journal. – 2000. – V. 31. – P. 353–371.
20. Koprinkova, P. Membership function shape and its influence on the dynamical behavior of fuzzy logic controller / P. Koprinkova // Cybernetics and Systems : An International Journal. – 2000. – No. 31. – P. 161–173.
21. Driankov, D. Wprowadzenie do sterowania rozmytego / D. Driankov, H. Hellendoorn, M. Reinfrank. – Warszawa : «Wydawnictwa Naukowo-Techniczne», 1996. – 320 p.
22. Piegat, A. Modelowanie i sterowanie rozmyte / A. Piegat – Warszawa: «Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT», 2003. – 678 p.

Стаття надійшла до редакції 27.04.2012.
Після доробки 09.09.2012.

А. О. Лозинский, Л. И. Дэмкив

Исследование влияния параметров функций принадлежности нечеткого регулятора со сформированной неустойчивой подсистемой на примере двухмассовой электромеханической системы

Рассмотрено динамическую систему, состоящую из двух подсистем, одна из которых неустойчива. Исследовано влияние вида функции принадлежности нечеткого регулятора на функционирование электромеханической системы. Определены оптимальные значения параметров функций принадлежности.

Ключевые слова: нечеткая логика, функция принадлежности, стандартная линейная форма, оптимальное управление, синтез регуляторов.

A. Lozynskiy, L. Demkiv

The influence of membership function's parameters of fuzzy controller with formed unstable subsystem on example of two-mass electromechanical system

A dynamic system consisted of two subsystems, one of which is unstable is considered. The influence of fuzzy regulator's membership function type on the electromechanical system is investigated. The optimum values of membership functions parameters are found.

Key words: fuzzy logic, membership function, standard linear form, optimal control, controller synthesis.