

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ФУНКЦІЙ НАЛЕЖНОСТІ НА ЯКІСНІ ПОКАЗНИКИ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ З ДВОМА КОРЕНЯМИ В ПРАВІЙ ПІВПЛОЩИНІ

© Демків Л.І., 2012

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

Ключові слова: нечітка логіка, функція належності, динамічна система, оптимальне керування

A dynamic system that consists of two subsystems, one of which is unstable is considered. The influence of type membership function on quality indicators of the system is investigated. The optimum values of membership functions parameters are found.

Key words: fuzzy logic, membership function, dynamical system, optimal control

Вступ

Під час дослідження електромеханічних систем передусім важливими є їх динамічні характеристики. Одним із способів покращення цих характеристик є застосування в області великих відхилень нестійкої підсистеми, що забезпечить швидший вихід системи на заданий рівень функціонування. У разі наближення до області робочої точки (область малих відхилень) збільшується вплив стійкої підсистеми, що дозволяє системі плавно вийти на заданий рівень функціонування та залишатись стійкою, загалом. Стійкість таких систем було досліджено, зокрема, в [2]. Оскільки часто під час синтезу електромеханічних систем слід враховувати кілька критеріїв, які можуть суперечити один одному, то доцільно застосовувати багатокритеріальну оптимізацію. Питання синтезу оптимального керування при багатокритеріальній оптимізації досліджувались, зокрема в [1, 9, 11]. Проте питання синтезу оптимального керування для системи з нестійкою підсистемою залишається недослідженим.

Постановка задачі

Так само як і в [4] розглянемо нелінійну систему, яку в загальному випадку можна описати за допомогою диференціального рівняння n -го порядку та застосовуючи методику, описану зокрема в [3], можна одержати модель системи, що складається з кількох незалежних підсистем.

Розглянемо класичну систему керування швидкістю за повним вектором стану (див. напр. [4]) та на її основі побудуємо модель двомасової системи, що складається з двох підсистем, одна з яких є нестійкою. Для забезпечення плавного перемикання між підсистемами та усунення ковзних режимів під час перемикання між підсистемами застосовано функцію належності як вагову функцію впливу кожної з підсистем на траєкторію руху усієї системи.

Оскільки йдеться про систему, що складається з лише двох підсистем, то немає сенсу розглядати випадки внутрішніх функцій належності (трапецієподібної, Гаусса тощо). Тому проводячи дослідження, розглядали лише випадки зовнішніх функцій належності, а саме L функції, сигмоїдальної функції та функції, запропонованої в статті J. Dombi [5] та дослідженої в статтях Р. Корінкова [7, 8]. Розглянуто випадки коли в нечіткій підсистемі є два корені в правій півплощині.

Під якісними показниками функціонування системи тут розумітимемо значення інтегральних показників якості

$$\begin{aligned} I_1 &= \int_0^T u^2(t) dt; & I_2 &= \int_0^T tu^2(t) dt; \\ I_3 &= \int_0^T |u(t)| dt; & I_4 &= \int_0^T t|u(t)| dt, \end{aligned} \quad (1)$$

тобто, фактично, завданням статті є знаходження значення параметрів функції належності, за яких показники (1) набувають мінімальних значень. Але, оскільки ці показники можуть набувати мінімальних значень при неоднакових налаштуваннях регулятора, то для того, щоб оцінити якість функціонування системи на основі багатокритеріальної оптимізації обчислимо узагальнений інтегральний показник якості

$$I = \sum_{j=1}^4 g_j I_j, \quad (2)$$

де коефіцієнти g_j можна визначити або методом Парето-оптимальних рішень або експертним способом. Прийmemo $g_j = 0.25, j = \overline{1..4}$.

Загальний вигляд характеристичного многочлена кожної з підсистем є добре відомий (див. напр. [4])

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

У разі налаштування підсистеми на біноміальну форму коефіцієнти k_{11}, k_{12}, k_{13} визначаються за формулами (3)

$$\begin{aligned} k_{11} &= 3w_0 T_{M1}, \\ k_{12} &= \left(3w_0^2 - \frac{1}{T_C T_{M2}} \right) T_C T_{M1} - 1, \\ k_{13} &= T_C T_{M1} T_{M2} w_0^3 - 3T_{M1} w_0, \end{aligned} \quad (3)$$

а у разі нестійкої підсистеми з двома коренями у правій півплощині

$$\begin{aligned} k_{11} &= T_{M1} (w_0 + 2a), \\ k_{12} &= \left((2w_0 a + a^2 + b^2) - \frac{1}{T_C T_{M2}} \right) T_C T_{M1} - 1, \\ k_{13} &= (w_0 a^2 + w_0 b^2) T_C T_{M1} T_{M2} - T_{M1} (w_0 + 2a), \end{aligned} \quad (4)$$

де $w_0 = 4$ – значення середньгеометричного кореня, $b = 1, a = -\sqrt{w_0^2 - b^2}$ – параметри, що задають траєкторію руху кореня, T_{M1}, T_{M2}, T_C – коефіцієнти, що характеризують систему та описані в [4].

У функції MATLAB Function реалізовано досліджувані функції належності, а саме:

1) функція належності типу L (див. напр. [6])

$$L(x; a, b) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ (x - b) / (a - b), & a < x \leq b \\ 0, & x > b \end{cases} \quad (5)$$

Параметри a та b визначають границі полярних значень похибки, що відповідають випадкам функціонування лише відповідно стійкої чи нестійкої підсистем;

2) ліва сигмоїдальна функція (див. напр. [10])

$$m(x; a, b) = \frac{e^{-a(x-b)}}{1 + e^{-a(x-b)}}. \quad (6)$$

Параметр b визначає значення похибки, за якого значення функції належності дорівнює 0.5, а параметр a задає ступінь нахилу графіка функції належності в точці $m(x; a, b) = 0.5$;

3) параметризована функція належності (див. [5, 7, 8])

$$m(x; a, b) = \frac{(1-b)^{a-1} (b-x)^a}{(1-b)^{a-1} (b-x)^a + b^{a-1} (x-c)^a}, \quad x = [c, b]. \quad (7)$$

Тут параметри c та b відповідають границі полярних значень похибки, параметр a задає ступінь нахилу графіка функції, а b – точка перегину кривої (див. [7]). Зміна параметрів a та b приводить не лише до зсуву чи масштабування графіка функції належності, а й до зміни її форми. Зокрема, при $a = 1$ отримуємо частковий випадок функції (5).

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

Дослідимо вплив значень параметрів a та b та інтегральні показники якості (2).

Результати дослідження у випадку двох коренів в правій півплощині

Спочатку розглянемо випадок функції належності L (5). Характер зміни узагальненого інтегрального показника якості (2) зображено на рис. 1, а). Під час моделювання значення вхідного сигналу прийняли таким, що дорівнює одиниці. Для функції L дослідження проводилось для $a \in [0, 1]$, $b \in [a, 1]$, що змінюються з кроком 0.01 для кожного з параметрів незалежно.

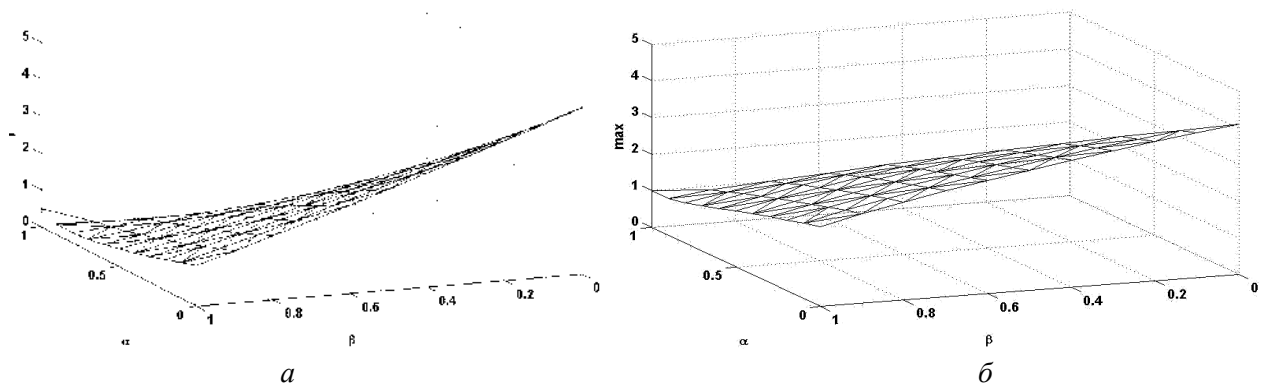


Рис. 1. Залежність значення:
 a – інтегрального показника якості (2) системи;
 b – максимального перерегулювання; від параметрів функції належності (5)

При цьому зміна максимального перерегулювання залежить від параметрів цієї функції належності так як це показано на рис. 1б). Характер залежності цих величин та значень (1) від зміни параметрів відповідних функцій належності є подібним.

Звідси можна зробити висновок, що система функціонує оптимально за таких значень параметрів функції належності $a = 0,9$, $b = 0,96$. При цьому значення максимального перерегулювання дорівнює 1,035, час входження в 5 % зону – 0.731 с, а час першого виходу на заданий рівень функціонування – 0,805 с.

На рис. 2 наведено траєкторії руху системи у разі налаштування на стандартну форму бінома та досліджувану систему з оптимальними параметрами.

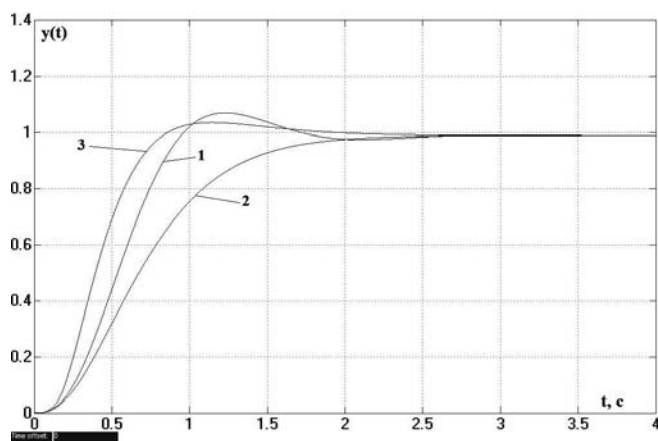


Рис. 2. Результати моделювання системи у разі налаштування на 1 – форму Батерворта; 2 – біном; 3 – $L(u; 0.8, 1.0)$ (оптимальна траєкторія)

При цьому значення вихідного сигналу регулятора зображено на рис. 3.

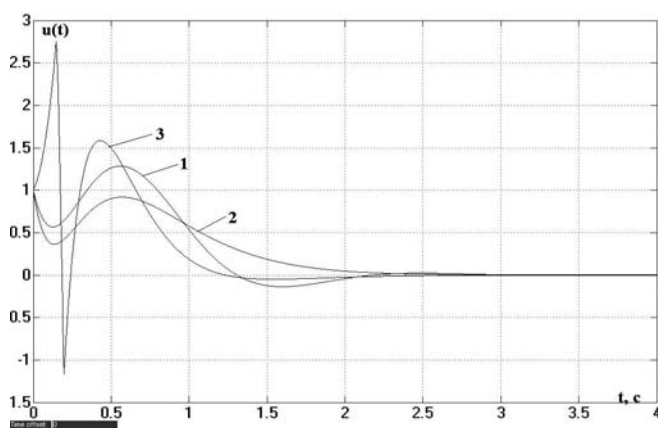


Рис. 3. Вихідний сигнал регуляторів для 1 – $u_{\text{Батерворт}}(t)$; 2 – $u_{\text{біном}}(t)$; 3 – $u_{\text{опт}}(t)$

Під час застосування лівої сигмоїдальної функції система виходить на заданий рівень функціонування при майже всіх парах значень параметрів функції належності. Значення узагальненого інтегрального показника якості (2) для випадку цієї функції зображено на рис. 4, а), а зміну відносного значення максимального перерегулювання зображено на рис. 4, б). Для цієї функції було прийнято $a \in [0.5, 5.0]$ з кроком 0.05, $b \in [0.0, 1.0]$ з кроком 0.01.

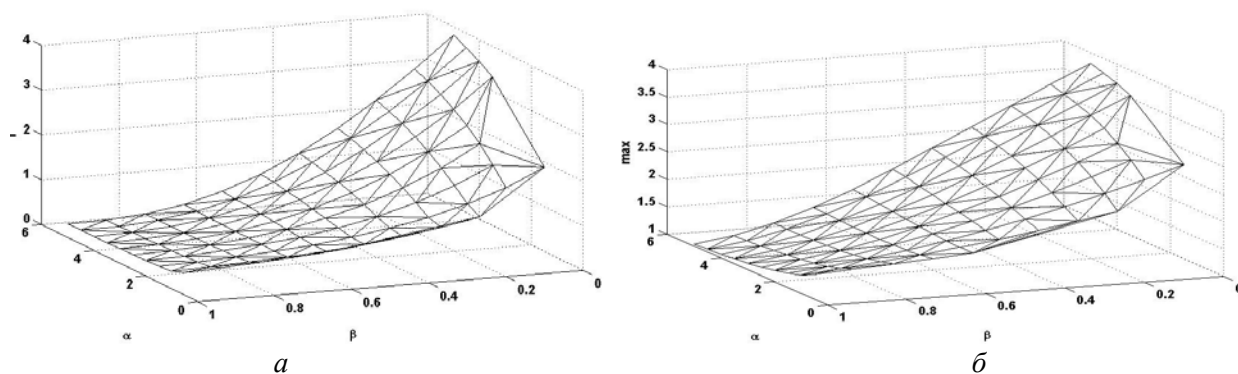


Рис. 4. Залежність значень:
а – узагальненого інтегрального показників якості системи;
б – максимального перерегулювання; від параметрів функції належності (б)

Для лівої сигмоїдальної функції у випадку, коли характеристичний поліном передавальної функції нестійкої підсистеми має два корені в правій півплощині, оптимальна поведінка системи досягається при $a = 5.0$, $b = 0.98$. При цьому значення максимального перерегулювання дорівнює 1.040, час виходу в 5% зону – 0.848 с, час першого досягнення заданого рівня функціонування – 0.930 с.

На рис. 5 подано траєкторію руху системи у разі використання лівої сигмоїдальної функції належності для перемикання між підсистемами,

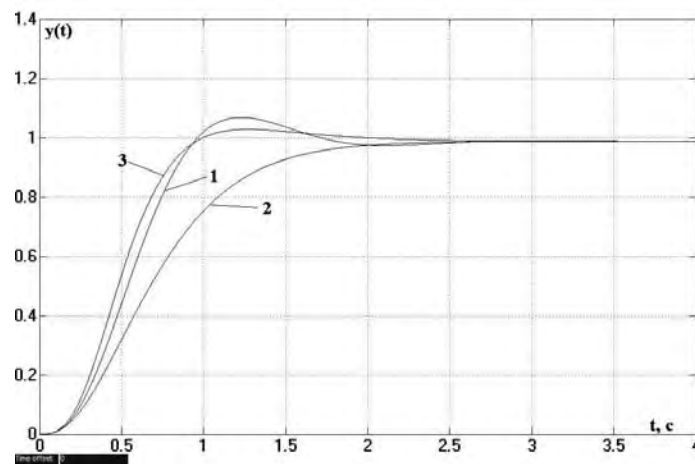


Рис. 5. Результати моделювання вихідного сигналу системи у разі налаштування на: 1 – форму Батерворта; 2 – біном; 3 – застосування лівої сигмоїдальної функції з параметрами $a = 5.0$, $b = 1.0$ (опт. траєкторія)

а на рис. 6 – значення вихідного сигналу регулятора.

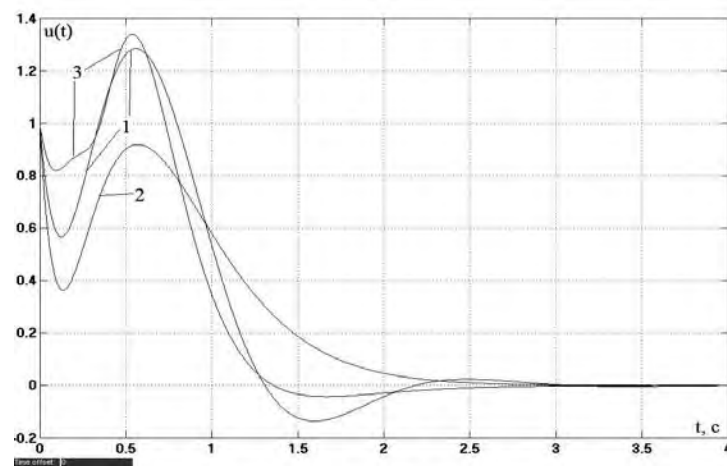


Рис. 6. Вихідний сигнал регуляторів для 1 – $u_{\text{Батерворт}}(t)$; 2 – $u_{\text{біном}}(t)$; 3 – $u_{\text{опт}}(t)$

Для випадку параметризованої функції значення інтегральних показників якості подано на рис. 7, а), а зміну відносного значення максимального перерегулювання зображено на рис. 7, б). При цьому $a \in [0.5, 5.0]$ та змінюється з кроком 0.05, $b \in [0.1, 0.9]$ та змінюється з кроком 0.01.

З проведених розрахунків випливає, що система має оптимальні налаштування при $a = 0.5$, $b = 0.1$. Значення максимального перерегулювання в цьому випадку дорівнює 1.26, час входження в 5% зону дорівнює 1.819 с, а час першого досягнення заданого рівня функціонування – 0.530 с. Траєкторію руху системи з такими налаштуваннями зображено на рис. 8, а зміну значень вихідного сигналу регулятора – на рис. 9. Подальшого зменшення максимального перерегулювання

можна досягти, збільшуючи параметр a , наприклад, при $a = 170$ максимальне перерегулювання дорівнює 1.101, проте тоді перемикання між підсистемами відбуватиметься ще різкіше.

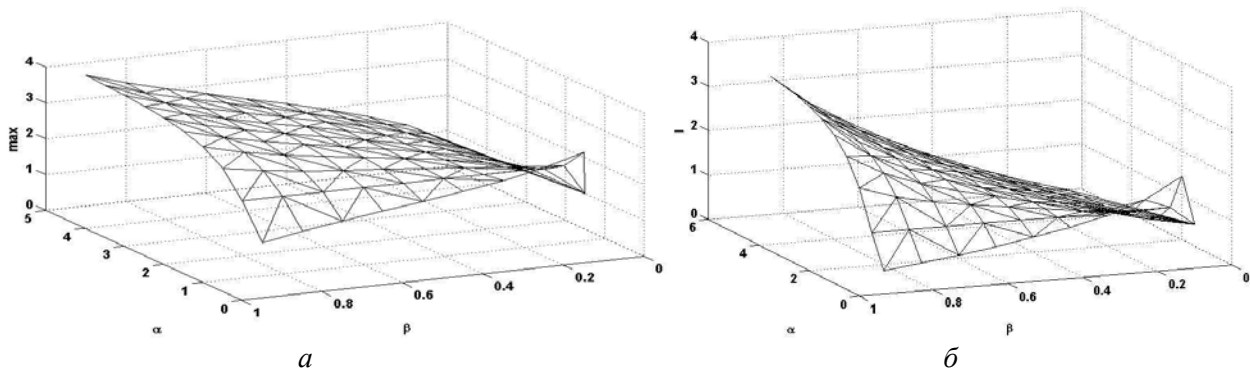


Рис. 7. Залежність значень:
 a – узагальненого інтегрального показників якості системи;
 b – максимального перерегулювання; від параметрів функції належності (7)

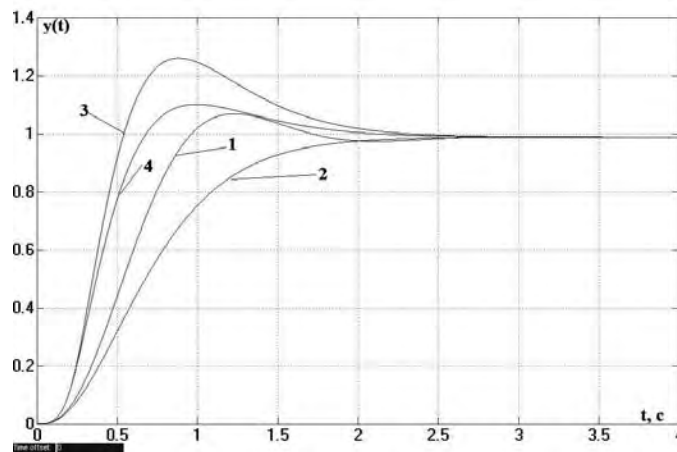


Рис. 8. Результати моделювання вихідного сигналу системи у випадку налаштування на:
 1 – форму Батерворта; 2 – біном; 3 – застосування параметризованої функції з параметрами
 $a = 5.0, b = 0.1$ (оптимальна траєкторія); 4 – $a = 170, b = 0.1$

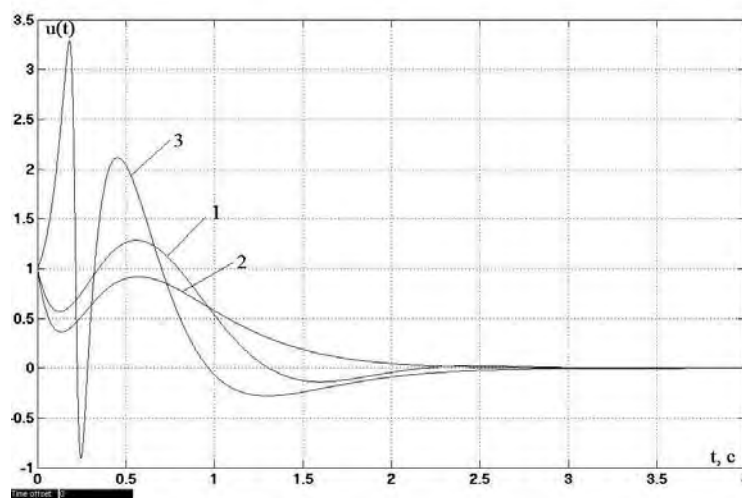


Рис. 9. Вихідний сигнал регуляторів для 1 – $u_{\text{Батерворт}}(t)$; 2 – $u_{\text{біном}}(t)$; 3 – $u_{\text{опт}}(t)$

Було визначено кількісні переваги використання досліджуваних функцій належності (див. таблицю) та порівняно застосування досліджуваних функції з відповідними оптимальними параметрами з випадком, коли система налаштована лише на біноміальний фільтр або лише на стандартну форму Батерворта.

Порівняння кількісного ефекту використання досліджуваних функцій належності за відповідних оптимальних параметрів

	Функція L (L)	Ліва сигмоїдальна (Л)	Параметрична (П)	Біном (Бін)	Батерворт (Бат)	L/Бін	Л/Бін	П/Бін	L/Бат	Л/Бат	П/Бат
I_1	0,306	0,361	0,316	0,522	0,419	0,586	0,692	0,605	0,730	0,862	0,754
I_2	0,057	0,079	0,087	0,176	0,106	0,324	0,449	0,494	0,538	0,745	0,821
I_3	0,444	0,515	0,569	0,789	0,604	0,563	0,653	0,721	0,735	0,853	0,942
I_4	0,153	0,195	0,331	0,465	0,299	0,329	0,419	0,712	0,512	0,652	1,107
I	0,239	0,288	0,326	0,488	0,357	0,490	0,590	0,668	0,669	0,807	0,913
t, c	0,805	0,930	0,530	1,662	0,915	0,484	0,560	0,319	0,880	1,016	0,579
$t_{5\%}$, c	0,731	0,848	1,819	1,662	1,42	0,440	0,510	1,094	0,515	0,597	1,281
max	1,035	1,040	1,26	0,988	1,069	1,048	1,053	1,275	0,968	0,973	1,179

З таблиці видно, що значення інтегральних показників якості та значення масимального перерегулювання при застосуванні параметричної функції належності є найбільшими серед трьох функцій належності, але навіть у цьому разі можна одержати вигреш порівняно з системою, налаштованою на біном та стандартну форму Батерворта. Порівнюючи між собою функцію L та ліву сигмоїдальну функції належності, бачимо, що для першої значення узагальненого інтегрального показника якості є меншим, тому незважаючи на різницю максимальних перерегулювань, можна стверджувати, що у цьому випадку оптимально застосовувати саме функцію належності L, що дає вигреш до трьох разів порівняно з налаштуванням на біном та до 1.8 раза у разі налаштування на стандартну форму Батерворта.

Висновки

Запропонований підхід поєднання нестійкої та стійкої підсистем дає змогу отримати покращення інтегральних показників якості порівняно з використанням налаштувань системи на одну зі стандартних форм. Значення показників якості істотно залежить від параметрів функції належності. Проведені дослідження показали, що у випадку двох коренів у правій півплощині оптимально застосовувати функцію належності L (5). з параметрами $a = 0.9$, $b = 0.96$.

Проведені розрахунки показують, що застосування нестійкої підсистеми на початковому етапі функціонування системи дає змогу забезпечити вигреш до трьох разів у разі незначного перерегулювання порівняно з налаштуванням на біном та до 1.8 разів порівняно з налаштуванням лише на стандартну форму Батерворта за узагальненим інтегральним показником якості (2). Вигреш за окремими іншими показниками може бути навіть більшим.

Перспективи подальших досліджень

У подальших дослідження увагу буде приділено розвитку одержаних результатів на випадок систем з істотними нелінійностями. Крім того подальші дослідження будуть присвячені вибору оптимальних параметрів для інших налаштувань регулятора (стандартну форму Чебишева, Бесселя тощо) та визначенню оптимальних параметрів функції належності системи під дією зовнішнього збурення.

1. Александрова И.Е. К решению многокритериальной задачи аналитического конструирования оптимальных регуляторов / И.Е. Александрова, Александрова Т.Е. // Вісник Харків. Нац. політехн. ун-ту. Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. Харків: ХНПУ.

– 2001. – № 10. – С. 168–170. 2. Лозинський А.О. Аналіз стійкості систем з регулятором Такагі-Сугено / А.О. Лозинський, Л.І. Демків // Донецьк:ІПШ МОН і НАН України «Наука і освіта». – 2008. – Т. 4. – С. 545–549. 3. Лозинський А.О. Дослідження стійкості систем з нестійкою підсистемою (частина 1) / А.О. Лозинський, Демків Л.І. // Електромеханіка та електроенергетика. – 2010. – № 1. – С. 19–29. 4. Марущак Я.Ю. Синтез електромеханічних систем з послідовним та паралельним коригуванням / Я.Ю. Марущак – Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2005. – 207 с. 5. Dombi J. Membership function as an evaluation / J. Dombi // Fuzzy Sets and Systems. – 1990. – Vol. 75. – P. 1–21. 6. Driankov D. Wprowadzenie do sterowania rozmytego / D. Driankov, H.Hellendoorn, M. Reinfrank–Warszawa: «Wydawnictwa Naukowo-Techniczne», 1996. – 320 p. 7. 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. 8. Koprinkova P. Membership function shape and its influence on the stability of fuzzy control systems / P. Koprinkova // Cybernetics and Systems: An International Journal. – 2000. – Vol. 31. – P. 353–371. 9. Loetamonphong J. Multi-objective optimization problems with fuzzy relation equation constrains / J. Loetamonphong, S.C. Fang, R.E. Young // Fuzzy Sets and Systems. – 2002. – No. 127.– P. 141–164. 10. Piegat A. Modelowanie i sterowanie rozmyte / A. Piegat–Warszawa: “Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT”, 2003. – 678 p. 11. Zhu Y. A fuzzy optimal control model / Y. Zhu // Journal of Uncertain Systems.–2009. – Vol. 3. No. 4. – P. 270–279.

УДК 621.314.224.8

А.В. Журахівський, Б.М. Кінаш, А.Я. Яцейко, Р.Я. Ференсович
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра ЕСМ

АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВТОРИННИХ КІЛ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ ЗА ЇХ РОЗКОРОЧЕННЯ

© Журахівський А.В., Кінаш Б.М., Яцейко А.Я., Ференсович Р.Я., 2012

Розроблено метод обчислення основних показників безпечної роботи трансформаторів струму, який базується на застосуванні теореми повної ймовірності. Метод дозволяє враховувати миттєві значення змінного первинного струму трансформатора струму, а також добові, річні та перспективні графіки діючих значень первинного струму.

Запропонована принципова схема уникнення крахових подій шляхом закорочення вторинної обмотки трансформатора струму в аварійних ситуаціях.

Ключові слова: трансформатор струму, крахова подія, рівень безпечної роботи, ймовірність, захист.

The basic indicators calculation method of current transformers safety operation, based on the consistent application of the full probability theorem was developed. The method allows to take into account the instantaneous values of AC primary current of current transformer, as well as daily, annual and future schedules of existing values of primary current.

The basic scheme for avoiding of crash events through short circuit of current transformer secondary winding in emergency situations was proposed. Byblos 6, fig. 5.

Key words: current transformer, crash event, the level of safety operation, probability, protection.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень

Трансформатори струму (ТС) високовольтних електроустановок працюють у режимі малого опору навантаження вторинної обмотки, тобто в режимі, близькому до короткого замикання [4]. У разі