

## СИНТЕЗ НЕЧІТКОГО ДРОБОВОГО РЕГУЛЯТОРА І ДОСЛІДЖЕННЯ ЙОГО ВПЛИВУ НА РОБАСТНІСТЬ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

© Копчак Б. Л., 2015

Розроблено модифікацію методу характеристичного поліному для синтезу нечіткого дробового регулятора нелінійної електромеханічної системи за виконання умов робастності та його перевірку на прикладі системи керування напруги асинхронного генератора з самозбудженням вітроенергетичної установки. Наведені результати аналізу, отримані за допомогою математичного моделювання в середовищі MATLAB, показали ефективність застосування нечіткого дробового регулятора для робастного керування нелійними системами.

*Ключові слова:* електромеханічна система, асинхронний генератор з самозбудженням, робастне керування, регулятор дробового порядку.

The modification of characteristic polynomial method for the synthesis of a fuzzy fractional controller for nonlinear electromechanical system for the fulfilment of its robustness and examination as exemplified by the voltage control of self-excitation induction generator of the wind energy set. The results of the analysis obtained by mathematical modelling in MATLAB, have demonstrated efficiency of fuzzy fractional controller for robust control of nonlinear systems.

*Key words:* electromechanical system, self-excitation induction generator, robust control, fractional order controller.

### Постановка проблеми

У системах керування різними об'єктами, і зокрема в електромеханічних системах (ЕМС), виникають задачі, пов'язані з їх робастністю. Застосування нечітких регуляторів (НР) дає змогу вирішувати низку проблем, зокрема, таких, як: оптимізація нелінійних ЕМС, мінімізація впливу змін параметрів силового кола ЕМС тощо [1]. Якщо врахувати, що деякі явища в ЕМС мають фрактальний характер, тобто динамічні процеси в силовому колі описуються диференціальними рівняннями дробового порядку, то виникає доцільність застосування для їх оптимізації нечітких регуляторів з дробовими інтегральною і диференціальною складовими.

### Аналіз останніх досліджень

Дослідження деяких авторів показали, що застосування регуляторів нецілого порядку для об'єктів керування цілого порядку, забезпечує кращу гнучкість у налагодженні порівняно з регуляторами цілого порядку. Ця гнучкість робить керування дробового порядку потужним інструментом в проектуванні робастних систем керування з меншою кількістю параметрів налагодження. Проте одночасно виникають проблеми, зокрема, частотних впливів: високої частоти в каналі керування (завдання) і низькочастотних з боку навантаження, а також стійкості ЕМС у разі невизначеності її параметрів (робастної стійкості). У цій царині є роботи, головною метою яких є намагання авторів звернути увагу на нетрадиційні способи робастного керування на основі дробового числення [2].

## Формування цілей статті

Метою статті є розроблення методики синтезу нечіткого дробового регулятора електро-механічної системи на прикладі системи керування напруги асинхронного генератора (АГ) зі самозбудженням і з врахуванням нелінійності його характеристики на основі методу характеристичного поліному і дослідження впливу такого регулятора на робастність ЕМС.

## Виклад основного матеріалу

Розроблення методів нечіткого керування робить їх перспективними у випадку керування напруги АГ з самозбудженням у зв'язку з нелінійністю його коефіцієнта підсилення, тому об'єктом досліджень є двоконтурна система підпорядкованого керування (СПР) напруги з пропорційно-інтегральними регуляторами струму (РС) і напруги (РН), у якій керування напруги здійснюється тиристорним компенсатором реактивної потужності (ТКРП) [3]. Структурна схема контуру керування напруги такої системи наведена на рис. 1. Як об'єкт керування використано модель випробувального стенда вітроенергетичної установки з асинхронним генератором з такими параметрами:  $P_H = 55\text{кВт}$ ,  $U_{\phi, H} = 220\text{В}$ ,  $I_{\phi, H} = 106\text{А}$ . За результатами експериментальних досліджень АГ в режимі самозбудження на експериментальній установці автор отримав його динамічні характеристики в каналі збудження за струмом збудження [4] і на основі проведеного порівняльного аналізу різних варіантів апроксимації АГ з самозбудженням рекомендовано використовувати ланку дробового порядку з ПФ

$$W_{AG.I}(s) = \frac{U_{AG.0}(s)}{I_p(s)} = \frac{5.5}{0.266s^{0.787} + 1}, \quad (1)$$

яка забезпечує високу точність апроксимації і є простішою порівняно з іншими у реалізації.

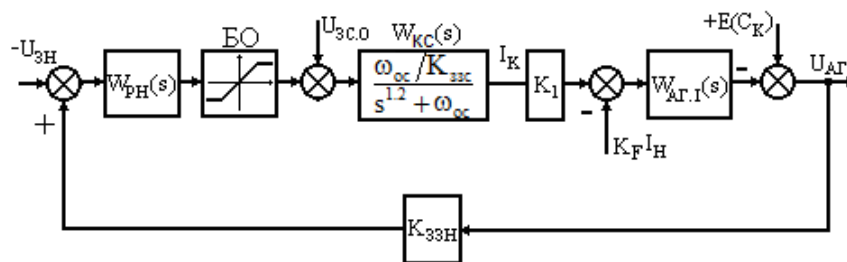


Рис.1. Структурна схема контуру напруги автономної асинхронної генераторної установки

На рис. 1:  $W_{PH}(s)$ ,  $W_{KC}(s)$  – передавальні функції РН і оптимізованого контуру струму, відповідно; БО – блок обмеження регулятора напруги;  $U_{3C.0}$  – напруга завдання на мінімальний струм ТКРП,  $I_K$  – струм у колі навантаження ТКРП;  $K_1=0,816$  – коефіцієнт пропорційності між випрямленим і фазним струмами для трифазної мостової схеми,  $E(C_K)$  – ЕРС створена на затискачах АГ батареєю конденсаторів в режимі неробочого ходу,  $K_{zz} = 0.0068\text{В/В}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку за напругою  $U_{AG}$ ,  $K_F I_H$  – розмагнічувальна дія струму навантаження АГ.

Особливості синтезу зовнішнього контуру напруги такої ЕМС пов'язані з необхідністю врахування нелінійності коефіцієнта підсилення АГ ( $K_{AG}$ ) і параметричних змін в її електромагнітних контурах силового кола. Зокрема, якщо отримані результати якості перехідних функцій за зміни певних параметрів не задовільні, наприклад, за ступенем розбіжності з бажаною якістю перехідного процесу, то очевидно, що необхідно розраховувати регулятор для різних значень параметрів об'єкта керування, які змінюються, і реалізувати адаптацію до певного варіативного параметра (вихідної координати тощо).

Одним із підходів до реалізації такого робастного керування є застосування нечіткої логіки. Синтез нечіткого дробового ПІД-регулятора, робастного до зміни певних заданих параметрів, запропоновано здійснювати за таким алгоритмом:

1. Проаналізувати ЕМС і встановити структуру контурів керування, вхідних і вихідних величин, нечіткого дробового регулятора:

- встановити параметр у ПФ об'єкта керування, робастність до зміни якого в допустимих межах  $[a_{\min}, a_{\max}]$  по відношенню до  $a_{\text{норм}}$  необхідно забезпечити;
- розрахувати три варіанти дробового регулятора для  $a_{\min}, a_{\text{норм}}, a_{\max}$ .

2. Встановити алгоритмічні ступені свободи.

3. Встановити параметричні ступені свободи. Цей етап є центральним кроком розроблення нечіткого регулятора і складається з трьох кроків:

- встановити можливі інтервали зміни вхідних та вихідних величин;
- встановити форми та параметри функцій приналежності;
- скласти бази нечітких правил.

4. Дослідити вплив синтезованого регулятора на робастність ЕМС.

У статті, як приклад для оцінювання робастності такого підходу, розглядається варіант синтезу контуру напруги АГ з самозбудженням (рис.1) з врахуванням нелінійності його характеристики намагнічування за запропонованим методом характеристичного дробового полінома у разі реалізації бажаної динамічної характеристики, яка відповідає дробовій стандартній формі Баттерворта розподілу коренів характеристичного рівняння [5]

$$W_{\text{ст.Бат.}}(s) = \frac{\omega_0/K_3}{s^{1.2} + \omega_0}, \quad (2)$$

де  $\omega_0$  – бажане значення середньо-геометричного кореня ланки САК, який визначає її швидкодію.

Для оцінювання ступеня робастності ЕМС під час синтезу доцільно контролювати інформативні параметри (фактори) [6].

**Запас за фазою ( $\phi_m$ ) і частота зрізу ( $\omega_{зр}$ ).** При цьому повинні виконуватися такі умови:

$$\text{Arg}(W(j\omega_{зр})) = \text{Arg}(W_C(j\omega_{зр})W_G(j\omega_{зр})) = -\pi + \phi_m, \quad (3)$$

$$|W(j\omega_{зр})|_{\text{dB}} = |W_C(j\omega_{зр})W_G(j\omega_{зр})|_{\text{dB}} = 0\text{dB}, \quad (4)$$

де  $W(s)$ ,  $W_C(s)$ ,  $W_G(s)$  – ПФ розімкненої системи, регулятора та об'єкта керування, відповідно.

**Робастність до зміни коефіцієнта підсилення об'єкта (Rb).** Для цього повинна виконуватися така умова [6]:

$$Rb = \left( \frac{d(\text{Arg}(W_C(j\omega)W_G(j\omega)))}{d\omega} \right)_{\omega=\omega_{зр}} = 0. \quad (5)$$

За цієї умови запас за фазою  $\phi_m$  є практично незмінним у діапазоні біля  $\omega_{зр}$ . Це означає, що система більш робастна до зміни коефіцієнта підсилення, і перерегулювання перехідної характеристики є практично постійне у межах інтервалу його зміни.

Очевидно, що процедуру синтезу необхідно здійснювати з врахуванням робастної стійкості. Автор встановив, що параметр  $\phi_m$  є інформативним з погляду аналізу робастної стійкості ЕМС і під час синтезу його величину слід обмежувати на допустимому рівні. Умови, сформульовані в рівняннях (3)–(5), забезпечують робастні характеристики контрольованої системи до зміни коефіцієнта підсилення. Умова ж відсутності похибки в усталеному режимі роботи САК виконується за наявності дробової складової інтегратора.

Процедура синтезу методом характеристичного дробового полінома згідно з запропонованим алгоритмом полягає ось у чому. Якщо врахувати, що ПФ попередньо синтезованого контуру струму  $W_{\text{кк}}(s)$  за стандартною дробовою формою (2) має вигляд

$$W_{\text{кк}}(s) = \frac{\omega_{\text{оц}}/K_{33\text{с}}}{s^{1.2} + \omega_{\text{оц}}},$$

то ПФ замкненого контуру напруги  $W_{\text{кн}}(s)$  згідно з рис. 1 запишемо у вигляді

$$W_{\text{кн}}(s) = \frac{W_{\text{рн}}(s) \frac{\omega_{\text{оц}}/K_{33\text{с}}}{s^{1.2} + \omega_{\text{оц}}} K_1 W_{\text{АГ.І}}(s)}{1 + W_{\text{рн}}(s) \frac{\omega_{\text{оц}}/K_{33\text{с}}}{s^{1.2} + \omega_{\text{оц}}} K_1 W_{\text{АГ.І}}(s) K_{33\text{н}}}. \quad (6)$$

Розділивши чисельник і знаменник отриманої ПФ на чисельник, а також вибравши, як бажану за показниками якості перехідного процесу, дробову стандартну форму Баттерворта (2), з умови тотожності  $W_{KH}(s)$  і  $W_{CT.H}(s)$ , отримуємо

$$\frac{1}{\frac{(s^{1.2} + \omega_{oc})K_{ззс}}{W_{PH}(s)\omega_{oc}K_I W_{AG.I}(s)} + K_{ззН}} = \frac{\omega_{OH}/K_{ззН}}{s^{1.2} + \omega_{OH}} \quad (7)$$

Підставивши наведені вище параметри об'єкта керування для  $K_{AG2} = 5.5 \text{ В/А}$  і  $\omega_{OH} = 100 \text{ с}^{-1}$  і дробову модель АГ (1), отримаємо ПФ дробового РН

$$W_{PH2}(s) = 0.256 + 25.57s^{-1.2} + 6.81s^{-0.413} + 0.068s^{0.787} \quad (8)$$

На рис. 2 для порівняння показані, отримані автором в [7] у режимі накиду навантаження в момент часу  $t = 2 \text{ с}$ , перехідні функції СПР напруги за різної структури регуляторів: крива "1" вихідна двоконтурна система з класичними ПІ-РН, ПІД-РС; крива "2" дробовим регулятором струму з  $\omega_{oc} = 100 \text{ с}^{-1}$  і класичними ПІ-РН  $\omega_{OH} = 100 \text{ с}^{-1}$ ; а також крива "3" з дробовим регулятором струму і дробовим регулятором напруги, реалізованим згідно з (8).

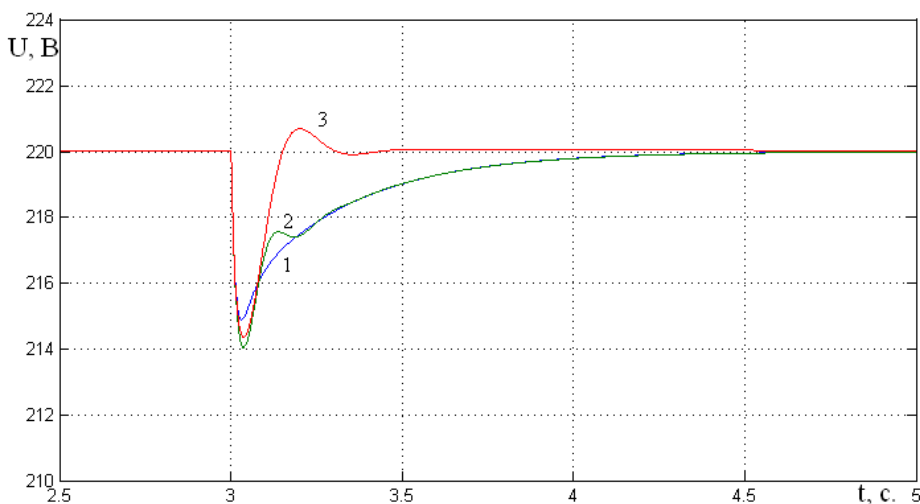


Рис. 2. Перехідні функції контуру керування напруги АГ за різної структури РС і РН

Як видно з отриманих результатів застосування дробових регуляторів напруги і струму синтезованих методом характеристичного полінома дає змогу отримати значно кращу динамічну характеристику (крива "3"), порівняно з класичним РН.

Проведемо дослідження робастності зовнішнього контуру СПР напруги АГ з дробовим регулятором, синтезованого методом характеристичного полінома для  $K_{AG} = 5.5 \text{ В/А}$ , при зміні  $K_{AG}$  в межах  $4.5 - 6.5 \text{ В/А}$ , що пов'язано з нелінійністю характеристики. На рис. 3 показані результати цих досліджень, а в табл. 1 наведені параметри робастності  $R_b$  і  $\phi_m$ , а також проведені розрахунки середньоквадратичного відхилення параметрів якості перехідних функцій від заданих, які відповідають дробовій стандартній формі (2), за використання виразів абсолютного  $\sigma$  і відносного  $\delta$  відхилення [8]. Рівність нулю параметра  $R_b$  вказує на той факт, що запропонований підхід до синтезу на основі модифікації методу характеристичного дробового полінома забезпечує робастність ЕМС до зміни коефіцієнта підсилення об'єкта.

Проведемо синтез нечіткого дробового регулятора і оцінку робастності контуру напруги з таким регулятором до зміни  $K_{AG}$ . Для цього, враховуючи нелінійність характеристики АГ, задаємося діапазоном зміни  $K_{AG} = 4,5 - 6,5$  і за аналогією з (8) розраховуємо варіанти параметрів ПФ дробового РН на межах діапазону для  $K_{AG1} = 4,5$  і  $K_{AG3} = 6,5$  при  $\omega_{OH} = 100 \text{ с}^{-1}$ .

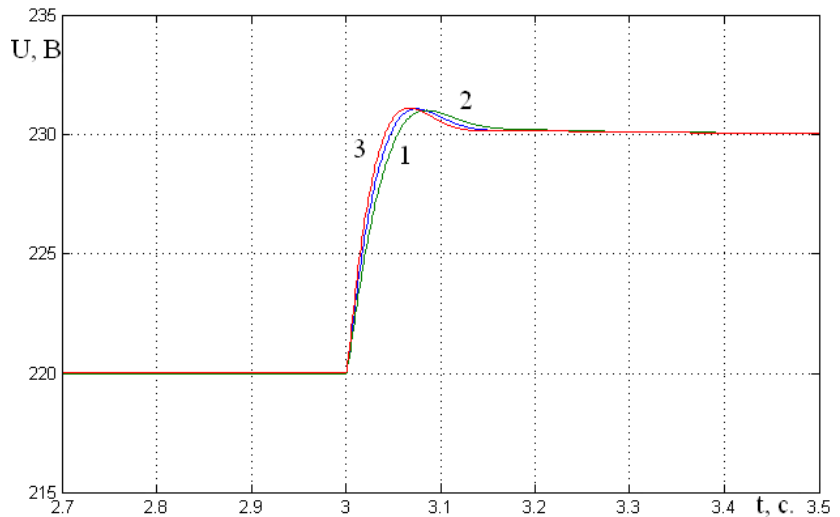
$$K_{AG1}=4,5: W_{PH1}(s) = 0.313 + 31.246s^{-1.2} + 8.32s^{-0.413} + 0.083s^{0.787}; \quad (9)$$

$$K_{AG3}=6,5: W_{PH3}(s) = 0.216 + 21.64s^{-1.2} + 5.76s^{-0.413} + 0.058s^{0.787}.$$

Встановлюємо можливі інтервали зміни вхідних та вихідних величин: завдання змінюється в інтервалі  $[-10, 10]$ ,  $K_{AG} - [4.05, 6.05]$ , інтервал зміни вихідної величини –  $[0, 1]$ .

Границі термів спочатку встановлюємо приблизно в межах інтервалів зміни вхідних величин, а потім уточнюються за результатами моделювання системи. Остаточні прийняті для лінгвістичної змінної “Коефіцієнт підсилення  $K_{AG}$ ” функції приналежності зображені на рис. 4, а параметри їх термів наведені в табл. 2.

Рис. 3. Перехідні функції контуру керування напруги з дробовими РС і РН (ПФ (8)) для  $\omega_{oc} = \omega_{oh} = 100c^{-1}$  при зміні  $K_{AG}$

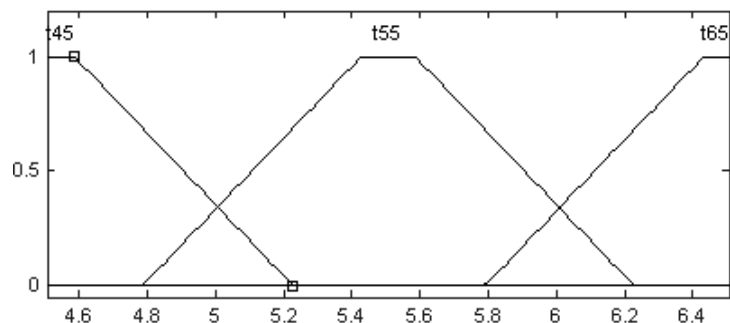


Таблиця 1

### Параметри робастності $Rb$ і $\phi_m$

Відхилення параметра $K_{AG}$ [ В/А ]	Параметри робастності		Ступінь розбіжності перехідних функцій	
	$Rb$	$\phi_m$ , [град]	$\sigma$	$\delta_{п}$ , [%]
Схема з дробовим регулятором				
4.5	0	72	4.237	3.31
5.5	0	72	0	0
6.5	0	72	1.422	1.11
Схема з нечітким дробовим регулятором				
4.5	0	72	0.014	0.006
5.0 проміжна	0	72	0.00596	0.0042
5.5	0	72	0	0
6.0 проміжна	0	72	0.02174	0.00945
6.5	0	72	0.028	0.012

Рис. 4. Функції приналежності нечіткого регулятора напруги для вхідної змінної “ $K_{AG}$ ”



## Параметри функцій приналежності вхідних змінних

Вхідні змінні	Терм	Форма терму	Характерні точки
“Завдання”	signal	трапеція	[-11, -10, 10, 11]
“Коефіцієнт підсилення $K_{AG}$ ”	t45	трапеція	[3.786 4.426 4.586 5.226]
	t55	трапеція	[4.786 5.426 5.586 6.226]
	t65	трапеція	[5.791 6.431 6.591 7.231]

Правила складаються на основі інтуїтивних знань експерта. У нашому випадку як експертні знання використовуються результати аналізу перехідних процесів, які були отримані під час моделювання системи з класичною системою регулювання.

На основі (9) синтезуємо в середовищі MATLAB Simulink нечіткий дробовий регулятор напруги і оцінюємо його робастність до зміни  $K_{AG}$ . Структурна схема моделі дробового регулятора показана на рис. 5.

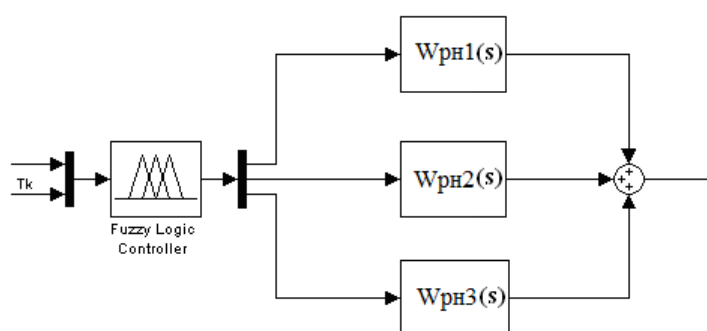


Рис. 5. Структурна схема нечіткої моделі дробового РН

На рис. 6 показано перехідні процеси контуру напруги з нечітким дробовим регулятором налаштованим на зміну  $K_{AG}$  у діапазоні 4.5–6.5: крива "1" –  $K_{AG1} = 4.5$ , крива "2" –  $K_{AG2} = 5.5$ , крива "3" –  $K_{AG3} = 6.5$ , а в табл. 2 внесені результати аналізу ступеня розбіжності показників якості перехідних процесів, отриманих за використання нечіткого дробового регулятора, з бажаним стандартним, який відповідає дробовій стандартній формі (2). Для оцінювання робастності проведені дослідження і отримані результати і для заданих значень  $K_{AG}$ , і для проміжних, які підтверджують робастність такого підходу до керування нелінійною ЕМС.

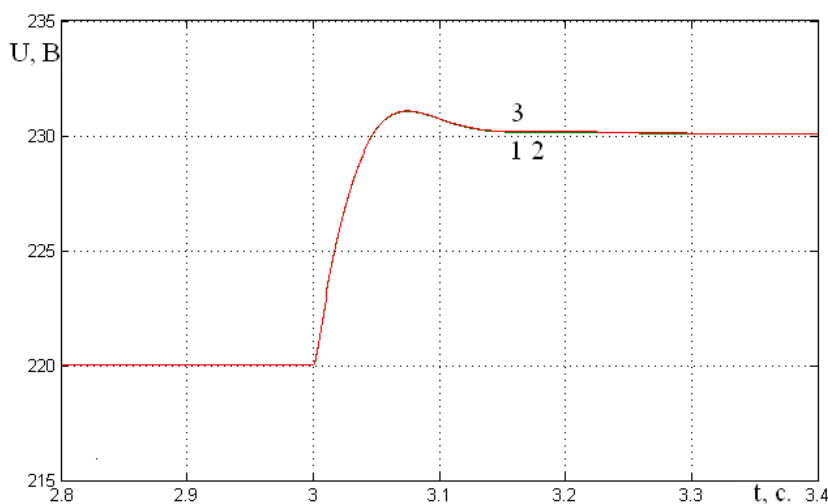


Рис. 6. Перехідні функції замкнутого контуру напруги

з нечітким дробовим регулятором напруги з ПФ (8, 9) для  $\omega_{OC} = \omega_{OH} = 100 \text{ c}^{-1}$ :

крива "1" –  $K_{AG1} = 4.5$ , крива "2" –  $K_{AG2} = 5.5$ , крива "3" –  $K_{AG3} = 6.5$

Згідно з результатами, наведеними у табл. 2, застосування нечіткого дробового регулятора забезпечує значне зменшення розбіжності між показниками якості перехідних процесів вихідної координати за зміни  $K_{AG}$  і бажаного. Високий ступінь робастності ЕМС до зміни  $K_{AG}$  забезпечується і на границях діапазону, і у проміжних точках діапазону зміни параметра.

### Висновки

1. Застосування для синтезу регуляторів дробового порядку запропонованої модифікації методу характеристичного полінома забезпечує виконання умови робастності ЕМС до зміни коефіцієнта підсилення об'єкта керування, що важливо для нелінійних систем.

2. Синтез нечіткого блока дробового регулятора забезпечує значно нижчий ступінь розбіжності показників якості перехідних функцій в усьому діапазоні зміни коефіцієнта підсилення асинхронного генератора від заданих, які відповідають дробовій стандартній формі. Відносне відхилення при цьому не перевищує  $\delta_{\Pi} < 0.012\%$  і значно нижче порівняно з базовим дробовим регулятором, для якого  $\delta_{\Pi} < 3.5\%$ . Тому для підвищення робастності ЕМС необхідно поєднувати застосування дробових і нечітких дробових регуляторів за їх синтезу методом характеристичного дробового полінома.

3. Запропонований підхід до побудови робастних ЕМС є універсальний і не залежить від кількості параметрів ( $n$ ), які змінюються в певних межах, проте за їх зростання ускладнюється математична модель, а кількість рівнянь становить  $2^n$ .

1. Леоненков В. А. *Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH [Текст]* / В. А. Леоненков. – СПб.: БХВ-Перербург, 2003. – 736 с. 2. Machado J.A.T. *A New Method for Approximating Fractional Derivatives: Application in Non-linear Control [Текст]* / J. A. T. Machado, A. Galhano // ENOC-2008, Saint Petersburg, Russia, 30 June– 4 July. – 2008. – 5 с. 3. Ткачук В. І., Копчак Б. Л. *Генераторне джерело електроенергії. Патент України № 62286 А 7 Н02Р9/44. Бюлетень № 12, 15.12.2003 р.* 4. Копчак Б. Л. *Аналіз точності апроксимації об'єктів електромеханічних систем високого порядку дробовими передавальними функціями різного типу [Текст]* / Б. Л. Копчак // Вісник НУЛП „Електроенергетичні та електромеханічні системи”. – 2014. – № 785. – С. 33–38. 5. Маруцак Я.Ю. *Дробові стандартні форми для синтезу електромеханічних систем [Текст]* / Я. Ю. Маруцак, Б. Л. Копчак // Одеський національний політехнічний університет. *Науково-технічний журнал «Електротехнічні та комп'ютерні системи».* – 2014. – № 15 (91). – С. 57–60. 6. Monje C.A. *Proposal for fractional  $P^{\lambda}D^{\mu}$  tuning [Текст]* / C. A. Monje, B. M. Vinagre, Y. Q. Chen, V. Feliu, P. Lanusse, J.Sabatier. *Proceedings of The First IFAC Symposium on Fractional Differentiation and its Applications (FDA04).* – 2014. – С. 115–120. 7. Маруцак Я. Ю. *Дослідження системи автоматичного керування напруги автономного асинхронного генератора з регуляторами дробового порядку [Текст]* / Я. Ю. Маруцак, Б. Л. Копчак, Л. С. Копчак, В. Б. Цяпа // *Електромеханічні та енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» науково-виробничого журналу.* – 2012. – Вип. 3/2012 (19). – С. 405–407. 8. Fortuna L. *Approximation of High-Order Lumped Systems by using Non-Integer Order Transfer Functions [Текст]* / L. Fortuna, S. Graziani, G. Muscato, G. Nunnari, D. Porto // *Proceedings of the 7th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED99) Haifa, Israel –June 28–30.* – 1999. – С. 2222–2230.