

УДОСКОНАЛЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИМ АГРЕГАТОМ НА ОСНОВІ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИХ РЕГУЛЯТОРІВ

Г.Н. Семенцов, А.І. Лагойда

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727167,
e-mail: And_ij@mail.ru

Проведено аналіз роботи відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегата (ВН ГПА) з fuzzy-регуляторами. Наведено методіку побудови fuzzy ПІ та ПІД регуляторів. На основі розроблених структурних схем у програмному продукті Matlab та сформованих баз правил у Fuzzy Logic Toolboxes для досліджуваних регуляторів проведено моделювання технологічного процесу. Здійснено порівняльний аналіз перехідних процесів з відповідними регуляторами.

Ключові слова: регулятор, відцентровий нагнітач, налаштування, функція передачі, швидкодія.

Проведен анализ работы центробежного нагнетателя газоперекачивающего агрегата (ВН ГПА) с fuzzy-регуляторами. Приведена методика построения fuzzy ПИ и ПИД регуляторов. На основе разработанных структурных схем в программном продукте Matlab и сформированных баз правил в Fuzzy Logic Toolboxes для исследуемых регуляторов проведено моделирование технологического процесса. Осуществлен сравнительный анализ переходных процессов с соответствующими регуляторами.

Ключевые слова: регулятор, центробежный нагнетатель, настройка, функция передачи, быстродействие.

The operation of the centrifugal pumping unit supercharger (BH SBS) with fuzzy regulators was analyzed. The technique for constructing fuzzy PI and PID regulators was suggested. Modeling of the technological process was conducted on the basis of the block diagrams developed in Matlab software product and rule databases formed in the Fuzzy Logic Toolboxes for the regulators under study. The comparative analysis of the transient processes with the relevant regulators was carried out.

Key words: regulator, centrifugal supercharger, setting, transmission function, operation speed.

Вступ. Аналізуваня літературних джерел [1, 2, 4, 10] свідчить про те, що ПІД-регулятори мають погані показники якості при керуванні нечіткими і складними об'єктами, а також при недостатній інформації про об'єкт керування. Проте характеристики ПІД-регуляторів у таких випадках можна покращити за допомогою методів Fuzzy Logic (FL), ШНМ і генетичних алгоритмів, які називаються «soft-computing» [1]. В одному контролері можуть застосовуватись комбінації перерахованих методів: Fuzzy-PID, Neuro-PID, Neuro-Fuzzy-PID-контролери з генетичними алгоритмами [11-14]. Основними недоліками Fuzzy- та Neuro-контролерів є складність їх налаштування, тобто створення бази правил і навчання ШНМ.

Керування на основі методів теорії нечітких множин і нечіткої логіки (Fuzzy-Control (FC)) використовують [11-14] при нестачі інформації про об'єкт керування, але за наявності досвіду керування ним, а також в нелінійних системах, ідентифікація яких є складною задачею, та у випадках, коли за умовами задачі необхідно використовувати знання експертів.

Оскільки інформація, що отримана від оператора, виражена словесно, для її використання в PID-контролерах застосовують лінгвістичні змінні і апарат теорії нечітких множин, розроблений професором Лотфі Заде в 1965 році [15].

У 1974 році Е.Н. Mamdani [16] довів можливість застосування ідеї нечіткої логіки для побудови системи керування динамічним

об'єктом, а пізніше він з Assilianі розробив і описав нечіткий ПІ-регулятор для керування парогенератором. Надалі область застосування Fuzzy-контролерів постійно розширюється, удосконалюються їх структури і функції.

Застосування регуляторів вказаних структур у роботі газоперекачувального агрегата є актуальною науково-практичною задачею, оскільки це дасть змогу підвищити швидкодію системи антипомпажного регулювання.

Постановка завдання. Метою даної роботи є розроблення fuzzy-регулятора, який дасть можливість захистити відцентровий нагнітач від помпажу, що сприятиме підвищенню надійності роботи ГПА. В якості такого об'єкту розглянемо відцентровий нагнітач газоперекачувального агрегату (ВН ГПА) з газотурбінним приводом.

Результати. На сьогодні FL в ПІД-контролерах використовується переважно у двох випадках - для побудови структури контролера і для організації налаштування коефіцієнтів ПІД-контролера, або одночасно і для побудови структури і налаштування параметрів контролера. Найбільш поширена структура FC на базі ПІ-контролера наведена на рисунку 1, а розроблена в програмному продукті Matlab – на рисунку 2.

На вхід регулятора подається сигнал похибки e , який використовується для обчислення

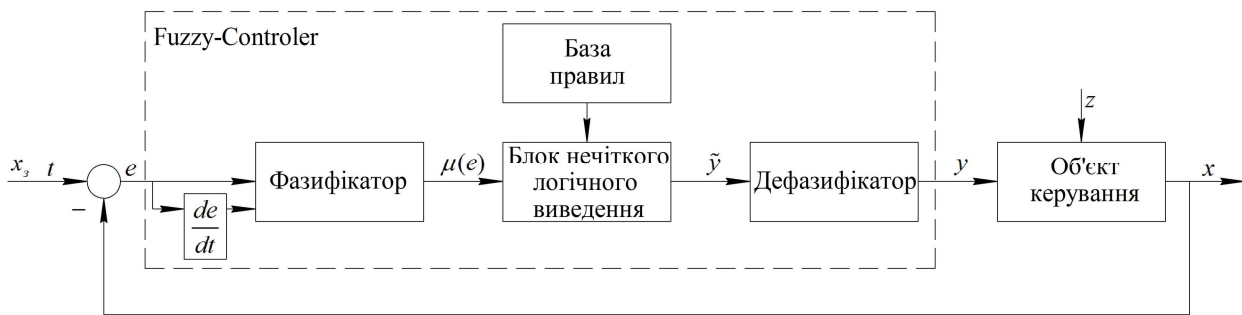


Рисунок 1 – Структура система керування з Fuzzy-PI-контролером

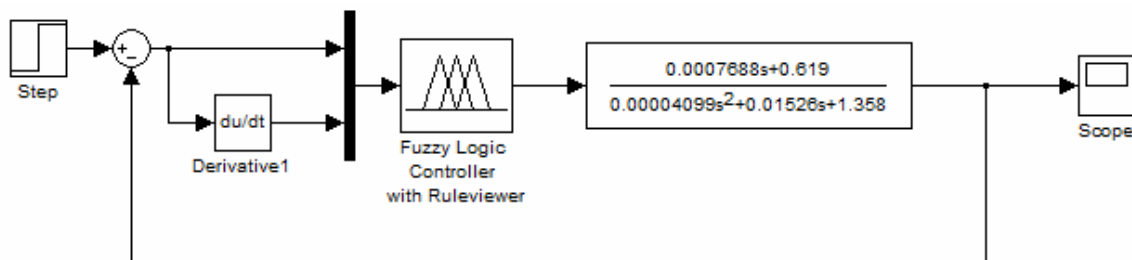
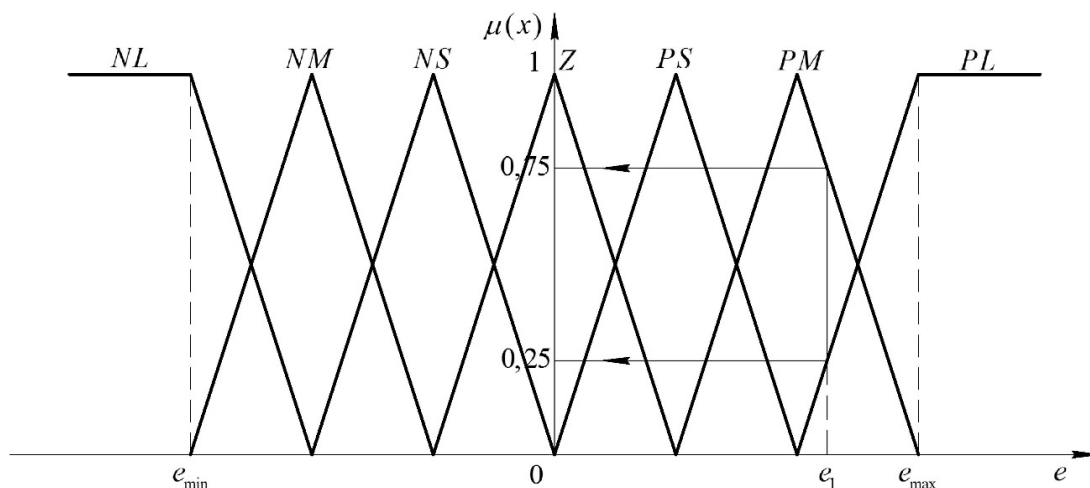


Рисунок 2 – Структура системи керування з Fuzzy-контролером в Matlab



N - негативний (negative); *Z* - нульовий (zero); *P* - позитивний (positive); *S* - малий (small); *M* - середній (medium); *L* - великий (large); *PS* - позитивно малий; *PM* - позитивно середній; *PL* - позитивно великий; *NS* - негативно малий; *NM* - негативно середній; *NL* - негативно великий

Рисунок 3 – Ілюстрація процесу фазифікації змінної *e* з функціями належності трикутної форми і термами

похідної за часом $\frac{de}{dt}$. Ці два сигнали перетворюються фазифікатором в нечіткі змінні, які використовуються у блоці нечіткого логічного виведення для отримання керувальної дії \tilde{u} на об'єкт керування, яка після використання операції дефазифікації поступає на вихід контролера у вигляді керувальної дії *u*.

Процес фазифікації змінної *e* наведено на рисунку 3.

Якщо величина похибки *e* на вході нечіткого регулятора дорівнює e_1 , тоді відповідне значення вихідної змінної буде *PM* зі ступенем належності до підмножини *PM* рівному $\mu(e_1) = 0,75$, або буде дорівнювати *PL* зі ступенем

належності $\mu(e_1) = 0,25$. Ступінь належності похибки e_1 іншим множинам (*PS*, *Z*, *NS*, *NM*, *NL*) дорівнює нулю. Отже, величина похибки e_1 перетворена в нечіткі змінні.

Далі для виконання функції регулювання над нечіткими змінними мають бути виконані операції, побудовані на основі нечітких правил, сформульованих оператором. Сукупність нечітких правил і нечітких змінних використовується для здійснення нечіткого логічного висновку, результатом якого є керувальна дія на об'єкт керування.

Нечітке виведення виконується наступним чином. Припустимо, що область зміни похибки *e* поділена на п'ять множин: *NL*, *NM*, *Z*,

Таблиця 1 – База правил Fuzzy-PI-контролера

	E	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
EC	U							
NL		PL	PL	PL	PL	PM	PS	Z
NM		PL	PL	PM	PM	PS	Z	NS
NS		PL	PL	PM	PS	Z	NS	NM
Z		PL	PM	PS	Z	NS	NM	NL
PS		PM	PM	Z	NS	NM	NL	NL
PM		PS	Z	NS	NM	NM	NL	NL
PL		Z	NS	NM	NL	NL	NL	NL

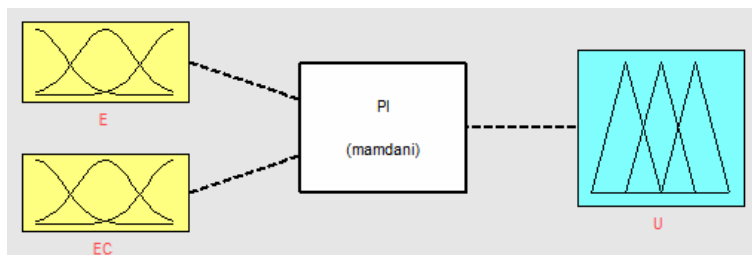


Рисунок 4 – Структура входів-виходів

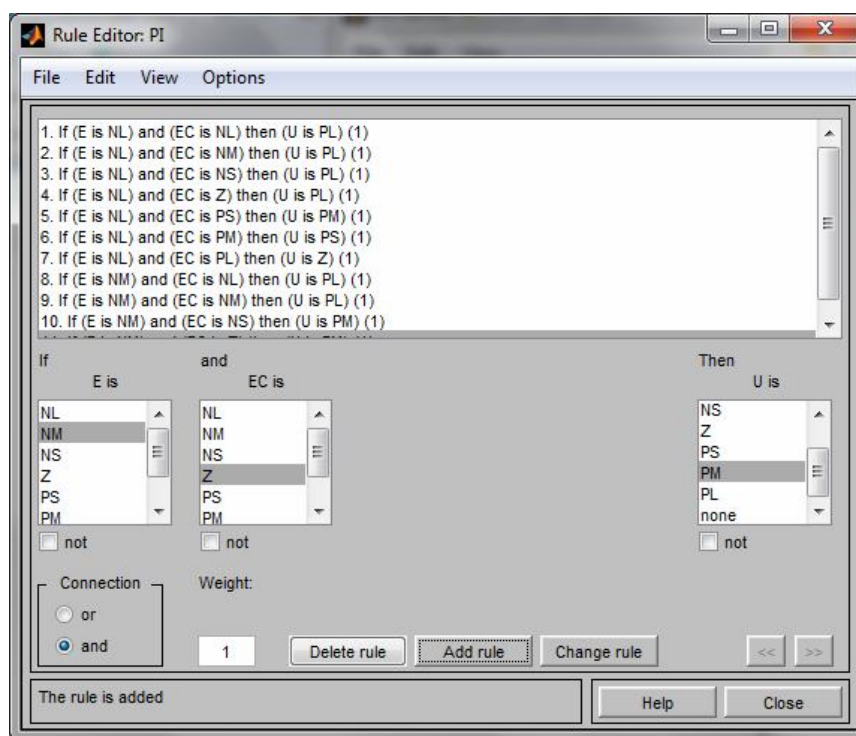


Рисунок 5 – База правил

PM, PL і область зміни керувальної дії (\tilde{y}) так само поділена на 5 множин (NL, NM, Z, PM, PL). За допомогою експерта [8] сформульовано таку базу правил роботи регулятора (табл. 1).

Процес налаштування fuzzy-PI-регулятора наведений на рисунках 4 та 5.

Провівши моделювання за допомогою структурної схеми (рис. 2) та відповідного контролера (рис. 4), отримаємо перехідну характеристику, яка зображена на рисунку 6.

Відзначимо, що реалізація нечіткого ПІД контролера є більш складною оскільки він повинен мати тримірну таблицю правил у відповідності з трьома складовими в рівнянні типового ПІД-регулятора, яку складно заповнити, користуючись відповідями експерта. Певну кількість структур нечітких ПІД-контролерів розглянуто в роботі [17].

Остаточне налаштування параметрів FC до цього часу залишається складною задачею, для розв'язання якої використовують генетичні

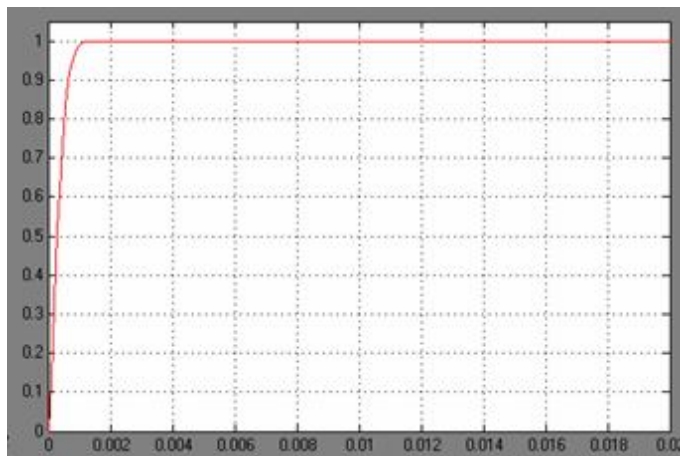
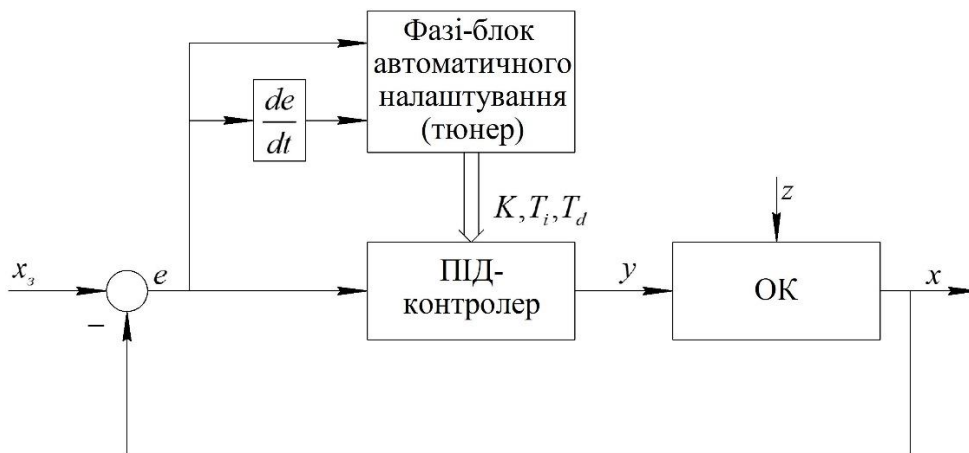


Рисунок 6 – Перехідний процес з fuzzy-ПД-регулятором



K, T_i, T_d – відповідно пропорційний коефіцієнт, стала інтегрування та диференціювання ПД-контролера

Рисунок 7 – Структура ПД-регулятора з фазі-блоком автоматичного налаштування коефіцієнтів

пошукові методи, що вимагають значних обчислювальних ресурсів і часу.

Другий варіант застосування FL – це підлаштування коефіцієнтів ПД-контролера, оскільки вибір параметрів налаштування типового ПД-контролера аналітичним методом, як правило, не є оптимальним. Підлаштування може бути виконано оператором на основі евристичних правил або автоматично за допомогою FL (рис. 7).

Фазі-блок використовує базу правил і методи нечіткого виведення, а фазі-підлаштування дозволяє зменшити перерегулювання, тривалість перехідного процесу і підвищити робастність ПД-контролера [11].

На сьогодні ПД-контролери є найбільш розповсюдженими регуляторами: 90-95 % регуляторів, що експлуатуються, – це ПД-контролери [4]. З них 64 % експлуатуються в одноконтурних системах, а 36 % в багатоконтурних. ПД контролери реалізують також наступний алгоритм:

$$y(t) = Ke(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (1)$$

де $y(t)$ - вихідна величина регулятора;
 $e(t)$ - сигнал розузгодження або помилки;
 t - час;

K, T_i, T_d - пропорційний коефіцієнт, стала інтегрування і стала диференціювання відповідно.

Використовуючи перетворення Лапласа при нульових початкових умовах, отримаємо функцію передачі ПД-контролера у такому виді:

$$W_R(s) = K + \frac{1}{T_i s} + T_d s = K \left(1 + \frac{1}{KT_i s} + \frac{T_d}{K} s \right), \quad (2)$$

де $s = \frac{d}{dt}$ - оператор Лапласа (комплексна частота).

Процес автоматичного налаштування ПД-контролера за допомогою фазі-блока починається з пошуку початкових наближених значень коефіцієнтів регулятора K, T_i, T_d . Для пошуку даних параметрів налаштування регулятора було використано елемент блоку оптимізації Signal Constraint – Check Step Response

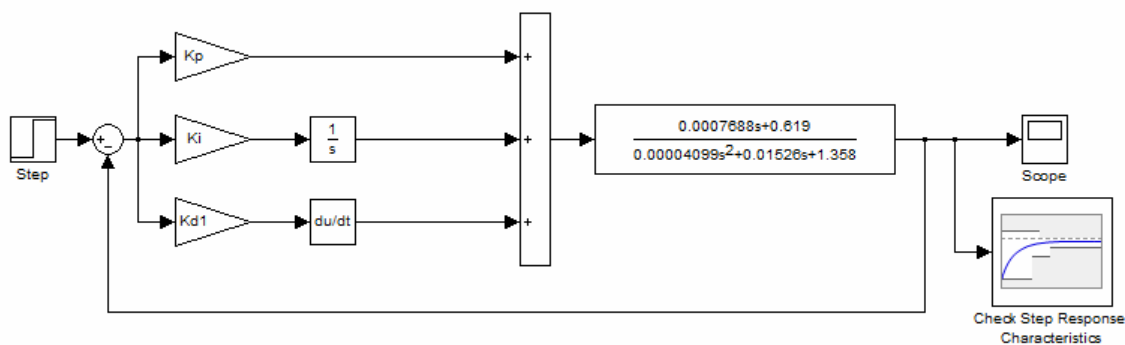


Рисунок 8 – Моделювання з ПІД-регулятором

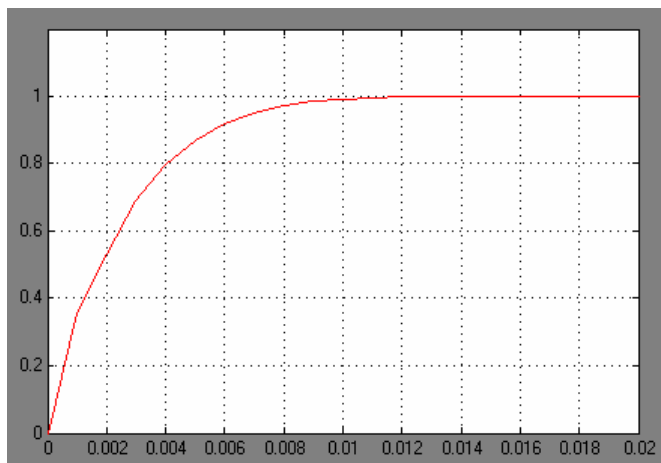


Рисунок 9 – Перехідний процес з ПІД-регулятором

Таблиця 2 – Параметри налаштування ПІД-регулятора

Регулятор	Параметри налаштування		
	K_p	K_i	K_D
ПІД	29,7958	867,4924	0,0579

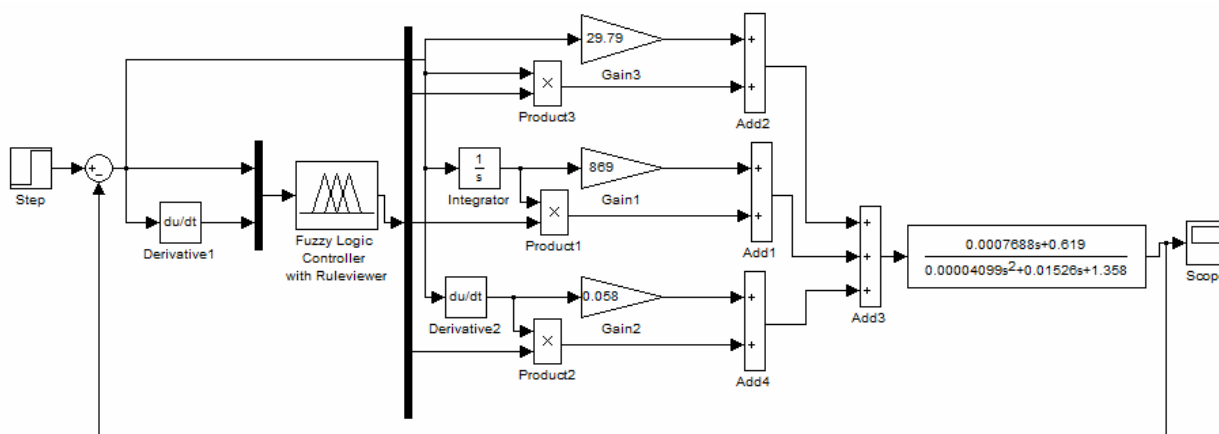


Рисунок 10 – Структура ПІД-регулятора з фазі-блоком автоматичного налаштування в Matlab

Characteristics, який знаходиться в бібліотеці Simulink. Результати моделювання перехідних процесів з відповідним регуляторами наведені на рисунках 8 та 9 і таблиці 2.

Далі формулюється критеріальна функція, необхідна для пошуку оптимальних значень параметрів налаштування ПІД-контролера ме-

тодом оптимізації. В процесі налаштування контролера використовують декілька кроків [18]. Спочатку вибирають діапазони вхідних і вихідних сигналів тюнера (блока автоматичного налаштування), форму функцій належності шуканих параметрів, правила нечіткого виведення, метод дефазифікації і діапазони масштабних

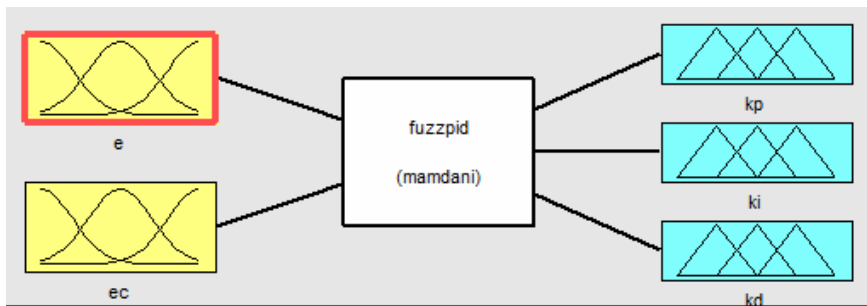


Рисунок 11 – Структура входів-виходів ПІД-регулятора з фазі-блоком

Таблиця 3 – База правил для K

K		ec						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e	NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
	NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	ZO
	NS	PM	PM	PM	PM	ZO	ZO	NS
	ZE	PM	PM	PS	ZO	NS	NS	NM
	PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
	PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
	PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

Таблиця 4 – База правил для T_i

T_i		ec						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
	NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
	NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
	ZE	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
	PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
	PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
	PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

Таблиця 5 – База правил для T_d

T_d		ec						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e	NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
	NM	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
	NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
	ZE	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

множників, необхідних для перерахунку чітких змінних в нечіткі. Пошук параметрів налаштування ПІД-контролера виконується методом оптимізації, для чого вибирається цільова функція як інтеграл від суми квадратів помилки регулювання і тривалості перехідного процесу. Цей критерій іноді доповнюють швидкістю зростання вихідної змінної об'єкта керування [4]. Як шукані параметри обирають положення максимумів функцій належності і масштабні

коефіцієнти на вході і виході тюнера. Задача оптимізації доповнюється обмеженнями на діапазон зміни позиції функцій належності.

На основі структури входів-виходів ПІД-регулятора (рис. 11) та правил (табл. 3-5) створена база правил, яка наведена на рисунку 12.

Провівши моделювання за допомогою структурної схеми (рис. 10) та відповідного контролера (рис. 11), отримуємо перехідну характеристику, яка зображена на рисунку 13.

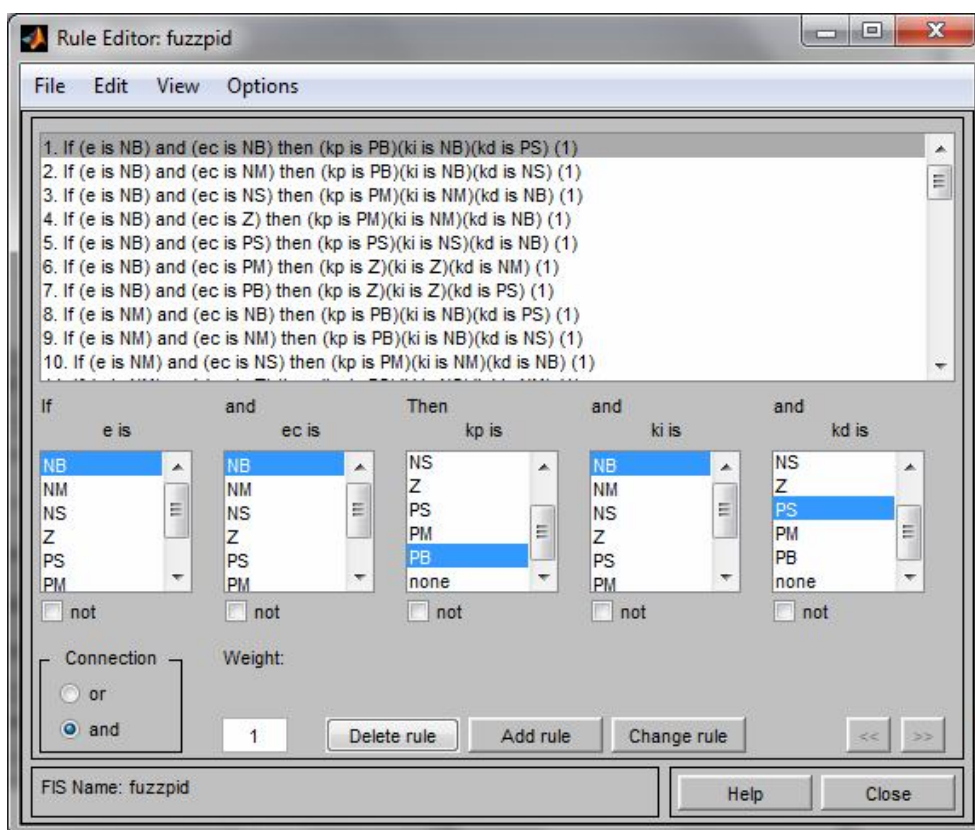


Рисунок 12 – База правил ПІД-регулятора з фазі-блоком автоматичного налаштування

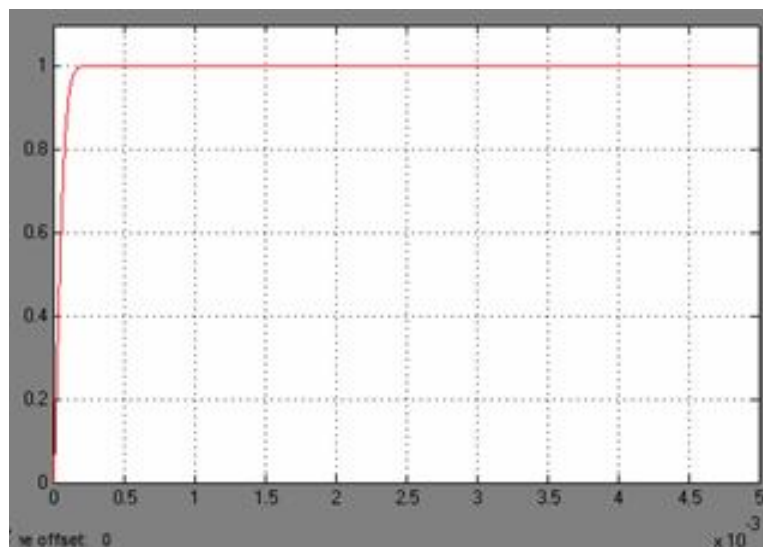


Рисунок 13 – Перехідна характеристика системи з ПІД-регулятором з фазі-блоком автоматичного налаштування

Таблиця 6 – Показники якості перехідного процесу

Тип регулятора	Показники якості перехідного процесу	
	час розгону, с	перерегулювання
fuzzy-ПІ	0.0012	0%
ПІД	0.01125	0%
fuzzy-ПІД	0.0002	0%

Висновки. В результаті проведених досліджень розроблено метод синтезу fuzzy-регулятора, який значно підвищив швидкодію досліджуваної системи антипомпажного керування за рахунок зміни структури регулятора.

Література

- 1 Денисенко В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации. Ч. 1. / В. Денисенко // Современные технологии автоматизации. – 2006. – № 4. – С. 66-74.
- 2 Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: учебник / под ред. Н. Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. – 744 с.
- 3 Новак В. Математические принципы нечеткой логики / В. Новак, И. Перфильева, И. Мочкож. – М.: Физматлит, 2006. – 352 с.
- 4 Денисенко В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации. Ч. 2. / В. Денисенко // Современные технологии автоматизации. – 2007. – №1. – С. 78-88.
- 5 Ang, K. H. PID control system analysis, design, and technology / K. H. Ang, G. Chong, Y. Li // IEEE Trans. on Control Syst. Tech, 2005. – Vol. 13, № 4. – P. 559–576.
- 6 O'Dwyer A. PID compensation of time delayed processes 1998-2002: a survey / A. O'Dwyer // Proceedings of the American Control Conference, Denver, 2003, p. 1494-1499.
- 7 Quevedo I. Digital control: past, present and future of PID control / I. Quevedo // Proceedings of the IFAC Workshop, Eds., Terrassa, Spain, 5 - 7 April 2000.
- 8 Astrom K. J. Advanced PID control / K. J. Astrom, T. Hagglund - ISA (The Instrumentation, Systems, and Automation Society), 2006 - 460 p.
- 9 Li Y. Patents, software, and hardware for PID control / Y. Li, K. H. Ang, G. C. Y. Chong // An overview and analysis of the current art. IEEE Control Systems Magazine. - 2006. - P. 41-54.
- 10 A. Leva, C. Hands-on PID autotuning: a guide to better utilisation / A. Leva, C. Cox, A. Ruano // IFAC Professional Brief, 2002.
- 11 Yesil E. Internal model control based fuzzy gain scheduling technique of PID controllers / E. Yesil, M. Guzelkaya, I. Eksin // World Automation Congress, 28 June - 1 July 2004. Proceedings. Vol. 17. P. 501-506.
- 12 Kato M. A skill-based PID controller using artificial neural networks / M. Kato, T. Yamamoto, S. Fujisawa // Computational Intelligence for Modeling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce, 28_30 Nov. 2005. Vol. 1. P. 702-707.
- 13 Kawafuku R. Self-tuning PID control of a flexible micro-actuator using neural networks / R. Kawafuku, M. Sasaki, S. Kato // IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 11-14 Oct. 1998. Vol. 3. P. 3067-3072.
- 14 Pereira D.S. Genetic algorithm based system identification and PID tuning for optimum adaptive control / D.S. Pereira, J.O.P. Pinto // IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2005. Proceedings. P. 801-806.
- 15 Zadeh L.A. Fuzzy sets / L.A. Zadeh // Information and Control. 1965. № 8. P. 338 - 353.
- 16 Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithm for simple dynamic plant / E.H. Mamdani // Proc. IEEE. 1974. № 12. P. 1585 - 1588.
- 17 Mann G.K.I. Analysis of direct action fuzzy PID controller structures / G.K.I. Mann, Hu Bao Gang, R.G. Gosine // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B. Jun. 1999. Vol. 29. Issue 3. P. 371 - 388.
- 18 Feng H.-M. A self-tuning fuzzy control system design / H.-M. Feng // IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference, 25_28 July 2001. Vol. 1. P. 209-214.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
15.05.15*

*Рекомендована до друку
професором Горбійчуком М.І.
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором Кондратенком Ю.П.
(Чорноморський державний університет
ім. Петра Могили, м. Миколаїв)*