

УДК 681.5:629.3

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-9>

СИНТЕЗ НЕЧІТКОГО СУПЕРВІЗОРА, КОРЕКЦІЙ КОЕФІЦІЄНТІВ ПІД-РЕГУЛЯТОРА НА ПІДСТАВІ ІНФОРМАЦІЇ ПРО ПОМИЛКУ ТА ЇЇ ПОХІДНУ

Разживін Олексій Валерійович,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем

ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка»

ORCID ID: 0000-0002-1371-2651

Scopus ID: 57672166200

Ільїнський Михайло Ігорович,

аспірант

Донбаської державної машинобудівної академії

ORCID ID: 0000-0001-5219-5039

У статті розглядається методика синтезу нечіткого супервізора, корекцій коефіцієнтів ПІД-регулятора на підставі інформації про помилку та її похідну. Розглянуто методику алгоритму адаптації реакції об'єкта управління до зовнішніх збурень на підставі оцінки помилки керування та її похідної з використанням нечіткого супервізора. Ідея застосування нечіткого супервізора полягає в організації дворівневої системи, у якій на нижньому рівні перебуває звичайний ПІД-регулятор, а на верхньому – нечіткий. Нечіткий супервізор під'єднано паралельно класичному ПІД-регулятору. Застосування нечіткого супервізора дає змогу адаптивно підлаштувати фіксовані передаточні коефіцієнти ПІД-регулятора протягом усього перехідного процесу, що дає змогу значно підвищити робастність системи керування. Підвищення робастності досягається тим, що нечіткі регулятори нелінійні за своєю суттю та можуть керувати лінійними об'єктами краще, ніж класичні, і навіть керувати нелінійними об'єктами, для яких лінійні регулятори непридатні.

Класична теорія управління орієнтована переважно на синтез лінійних регуляторів для таких об'єктів. Властивість лінійності дає змогу отримати зручні алгоритми оцінки таких важливих системних властивостей, як стійкість, керованість, спостережуваність тощо.

Проте всі реальні об'єкти є нелінійними, і лінеаризація їх математичного опису вимагає розгляду певної робочої точки, щодо якої досліджують малі відхилення.

За результатами синтезу нечіткого супервізора побудовано таблиці налаштування лінгвістичних правил зміни передаточних коефіцієнтів ПІД-регулятора, отримано графічне уявлення поверхень керування супервізорою системою. Порівняно набуті графіки перехідного процесу об'єкта керування під час використання класичного ПІД-регулятора та нечіткого супервізора, корекцій коефіцієнтів ПІД-регулятора.

Ключові слова: супервізор, нечіткий регулятор, коректування, робастність, помилка, похідна.

Razzyvin Oleksii, Ilinskyi Mykhailo. Synthesis of a fuzzy supervisor, adjustment of PID controller coefficients based on information about the error and its input

The article considers the method of synthesis of a fuzzy supervisor, corrections of coefficients of the PID controller based on information about the error and its derivative. The method of the algorithm of adaptation of the reaction of the controlled object to external disturbances based on the estimation of the control error and its derivative using a fuzzy supervisor is considered. The idea of using a fuzzy supervisor is to organize a two-level system in which the lower level is a conventional PID controller, and the upper level is a fuzzy controller. The fuzzy supervisor is connected in parallel with the classical PID controller. The use of a fuzzy supervisor allows for adaptive adjustment of fixed transfer coefficients of the PID controller over the entire transient process, which allows significantly increasing the robustness of the control system. The increase in robustness is achieved by the fact that fuzzy controllers, which are inherently nonlinear, can control linear objects better than classical controllers, and even control nonlinear objects for which linear controllers are unsuitable.

Classical control theory is mainly focused on the synthesis of linear controllers for such objects. The property of linearity allows us to obtain convenient algorithms for estimating such important system properties as stability, controllability, observability, etc.

However, all real objects are nonlinear, and the linearization of their mathematical description requires consideration of a certain operating point, relative to which small deviations are considered.

Based on the results of the synthesis of a fuzzy supervisor, tables for setting linguistic rules for changing the transfer coefficients of the PID controller were constructed, and a graphical representation of the control surfaces of the supervisory system was obtained. The acquired graphs of the transient process of the control object when using a classical PID controller and a fuzzy supervisor, corrections of the coefficients of the PID controller were compared.

Key words: supervisor, fuzzy controller, adjustment, robustness, error, derivative.

Вступ. Синтез класичних ПІД-регуляторів пов'язаний з вибором трьох параметрів: пропорційного коефіцієнта, коефіцієнтів при інтегралі та похідній. Наявні ПІД-регулятори можна розділити на два класи: регулятори з фіксованим налаштуванням та адаптивні ПІД-регулятори. Регулятори з фіксованим налаштуванням споряджають одноразово, наприклад, за алгоритмом Зіглера – Ніколса [1–3], однак застосування цієї методики має недоліки, спричинені значним перегулюванням та збільшенням інерційності перехідного процесу. В адаптивних ПІД-регуляторах коефіцієнти можуть змінюватися в реальному часі, що вимагає використання додаткових знань про процес управління. Застосування нечітких супервізорів реалізують прості алгоритми адаптації на підставі оцінки помилки керування та її похідної.

Мета статті – розглянути методику алгоритму адаптації реакції об'єкта управління до зовнішніх збурень на підставі оцінки помилки керування та її похідної.

Методи та методики дослідження. Ідея нечіткого супервізора полягає в організації дворівневої системи, у якій на нижньому рівні перебуває звичайний ПІД-регулятор, а на верхньому – нечіткий (рис. 1) [3].

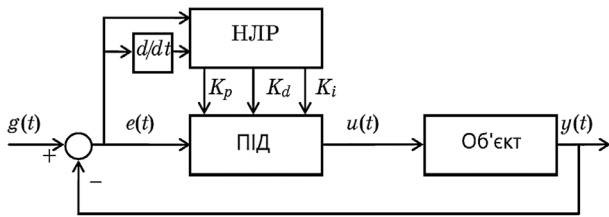


Рис. 1. Структурна схема нечіткого супервізора

Призначення нечіткого регулятора полягає в тому, щоб автоматично змінювати коефіцієнти ПІД-регулятора на різних стадіях перехідного процесу. Нечіткий регулятор має змінний коефіцієнт посилення. У нечіткого ПІД-регулятора це три вхідні змінні, тому вважатиметься, що його коефіцієнт посилення містить три складники [5]:

$$K_{PID} = K_p + K_i + K_d.$$

Розглянемо варіант організації нечіткого супервізора, у якому корекція коефіцієнтів ПІД-регулятора відбувається на підставі інформації про помилку та її похідну.

Припустимо, що відомі діапазони, у яких можуть змінюватися коефіцієнти K_p та K_d [3; 6]:

$$K_p \in [K_{p.min}, K_{p.max}],$$

$$K_d \in [K_{d.min}, K_{d.max}].$$

Вибираючи діапазон зміни коефіцієнтів, можна керуватися такими формулами:

$$K_{p.min} = 0.32K_u; \quad K_{p.max} = 0.6K_u \quad (1)$$

$$K_{d.min} = 0.08K_u T_u; \quad K_{d.max} = 0.15K_u T_u \quad (2)$$

де K_u – мінімальне значення коефіцієнта посилення П-регулятора, у якому виникають автоколивання з періодом T_u .

Вважатимемо, що значення коефіцієнтів нормалізовані:

$$K'_p = \frac{K_p - K_{p.min}}{K_{p.max} - K_{p.min}}; \quad K'_d = \frac{K_d - K_{d.min}}{K_{d.max} - K_{d.min}}$$

звідки:

$$K_p = (K_{p.max} - K_{p.min})K'_p + K_{p.min};$$

$$K_d = (K_{d.max} - K_{d.min})K'_d + K_{d.min}.$$

Згідно з методикою Зіглера – Ніколса, постійна часу інтегрування залежить від постійного часу диференціювання:

$$T_i = \alpha T_d,$$

тому:

$$K_i = \frac{K_p}{\alpha T_d} = \frac{(K_p)^2}{\alpha K_d}.$$

Супервізор містить безліч правил виду:

Якщо $(e(t) = A_i)$ та $(de(t)/dt = B_i)$,

то $(K'_p = C_i)$ і $(K'_d = D_i)$ та $\alpha = \alpha_i$;

$i = 1, 2, \dots, m$,

де A_i, B_i, C_i і D_i – нечіткі множини, α_i – константа.

Лінгвістичне опис $e(t)$ та $de(t)/dt$ показано на рис. 2.

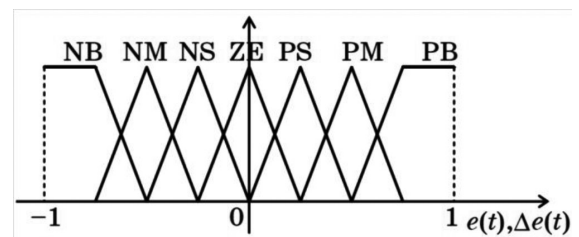


Рис. 2. Лінгвістичний опис помилки та її припущення

Лінгвістичний опис K'_p та K'_d показано на рис. 3, де використано лише два терми: *Big* та *Small* («велике» і «мале»), для їх опису можуть бути використані дзвоноподібні функції належності.

Для опису правил зміни коефіцієнтів розглянемо характерні точки типового перехідного процесу (рис. 4).

На початку перехідного процесу (точка a_1) потрібно велике значення сигналу керування для отримання малого часу наростання. Тому

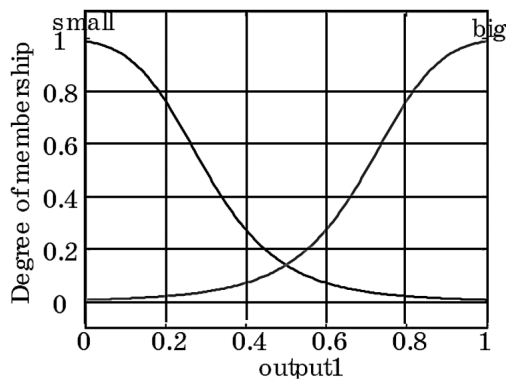


Рис. 3. Лінгвістичний опис K'_p та K'_d

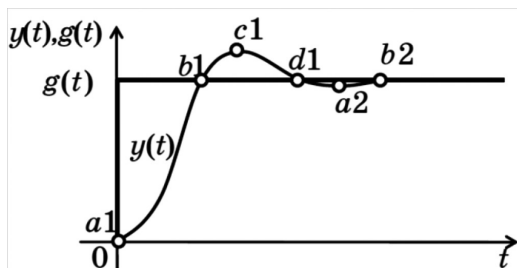


Рис. 4. Бажаний перехідний процес

ПІД-регулятор повинен мати велике значення K_p та K_i , а значення K_d має бути малим, тобто K'_p повинен мати значення *Big*, а K'_d – *Small* [3].

Для забезпечення великого значення K_i (порівняно з вихідним значенням, отриманим за методом Зіглера – Ніколса) треба, щоб значення a було мало. У методі Зіглера – Ніколса T_i задається вчетверо більше T_d ($a = 4$). Тому якщо a набуває значення менше 4, то вплив інтеграла посилюється, так у точці a_1 справедливо правило виду:

Якщо ($e(k) = PB$) та ($\Delta e(k) = ZE$), то ($K'_p = Big$) та ($K'_d = Small$) та $a = 2$.

Величина α може розглядатися як синглетон (рис. 5), де використані позначення *S-small*, *MS-medium small*, *M-medium*, *B-big*).

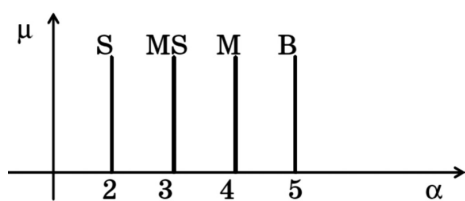


Рис. 5. Лінгвістичний опис варіантів значень α

В околиці точки b_1 (див. рис. 4) сигнал керування має бути малим для уникнення великого перегулювання. Тому ПІД-регулятор повинен мати малі K_p та K_i і великий K_d . Ці умови описує правило:

Якщо ($e(k) = ZE$) та ($\Delta e(k) = NB$),

то ($K'_p = Small$) та ($K'_d = Big$) та $\alpha = 5$.

Повторюючи наведені міркування, можна описати правила зміни K_p та K_d у вигляді таблиць (див. рис. 6)

Таблиця правил K'_p		$de(t)/dt$						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
$e(t)$	NB	B	B	B	B	B	B	B
	NM	S	B	B	B	B	B	S
	NS	S	S	B	B	B	S	S
	ZE	S	S	S	S	S	S	S
	PS	S	S	S	B	B	S	S
	PM	S	B	B	B	B	B	S
	PB	B	B	B	B	B	B	B

а

Таблиця правил K'_d		$de(t)/dt$						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
$e(t)$	NB	S	S	S	S	S	S	S
	NM	B	B	S	S	S	B	B
	NS	B	B	B	S	B	B	B
	ZE	B	B	B	B	B	B	B
	PS	B	B	B	S	B	B	B
	PM	B	B	S	S	S	B	B
	PB	S	S	S	S	S	S	S

б

Таблиця правил α		$de(t)/dt$						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
$e(t)$	NB	2	2	2	2	2	2	2
	NM	3	3	2	2	2	3	3
	NS	4	3	3	2	3	3	4
	ZE	5	4	3	3	3	4	5
	PS	4	3	3	2	3	3	4
	PM	3	3	2	2	2	3	3
	PB	2	2	2	2	2	2	2

в

Рис. 6. Таблиці налаштування лінгвістичних правил зміни K_p , K_d та α

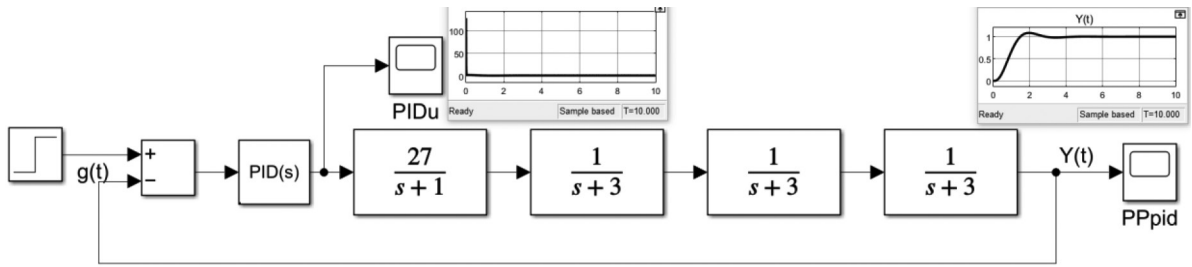


Рис.7. Математична модель замкненої системи управління з ПІД-регулятором

Результати. Проведемо синтез супервізора на підставі інформації про помилку та її похідну в Simulink MatLab для об'єкта, заданого передатною функцією:

$$W(p) = \frac{27}{(p+1)(p+3)}. \quad (3)$$

На першому етапі моделювання для замкненої системи управління об'єктом у вигляді передаточної функції (3) з ПІД-регулятором (див. рис. 7) визначаються передаточні коефіцієнти регулятора шляхом застосування вбудованої функції TUNER. Результати налаштування передаточних коефіцієнтів регулятора та графік перехідного процесу об'єкта управління при ПІД закону корекцій показано на рис. 8.

На другому етапі розроблено математичну модель системи управління із застосуванням нечіткого супервізора корекцій параметрів сигналу управління з ПІД-регулятора (див. рис. 9). Під час вибору діапазону зміни коефіцієнтів застосовано формули (1) та (2).

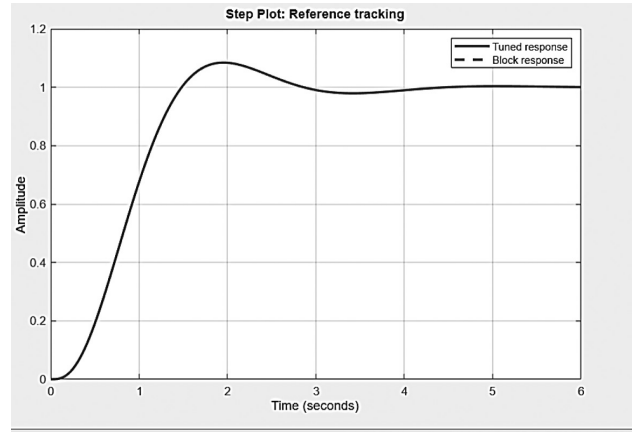


Рис. 8. Результати налаштування передаточних коефіцієнтів регулятора та графік перехідного процесу

На третьому етапі проводиться синтез нечіткого супервізора в редакторі системи нечіткого висновку (Fuzzy Inference System – FIS). Вікно налаштування головного вікна редактора нечіткої логічної системи наведено на рис. 10.

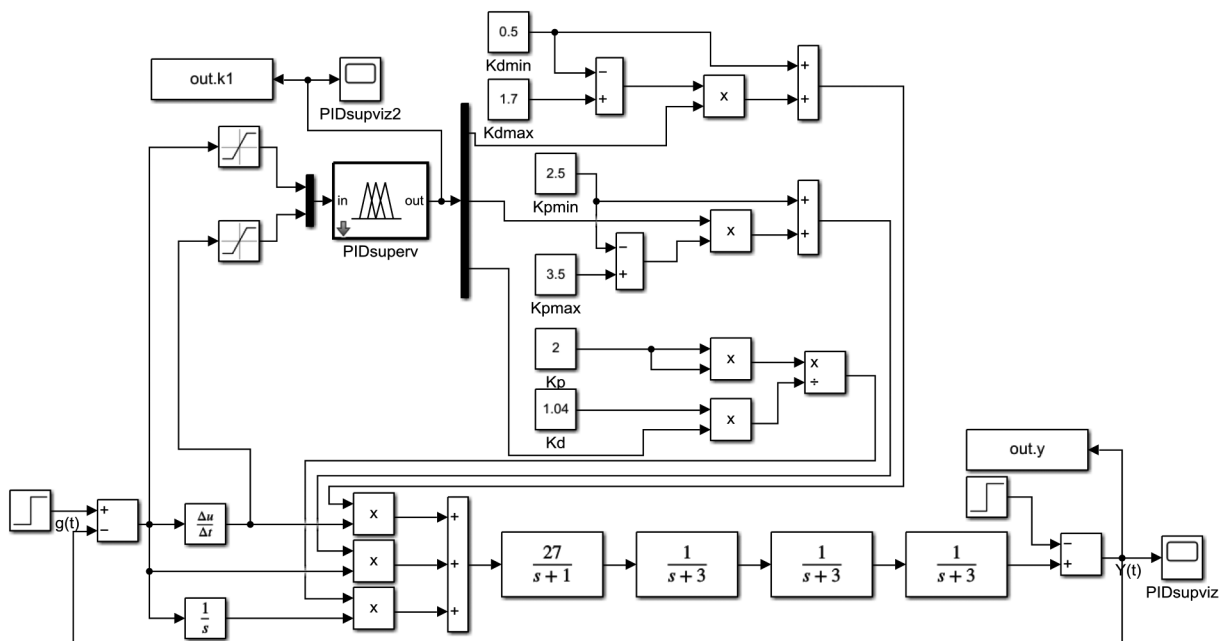


Рис. 9. Структурна схема математичної моделі системи управління з нечітким супервізором

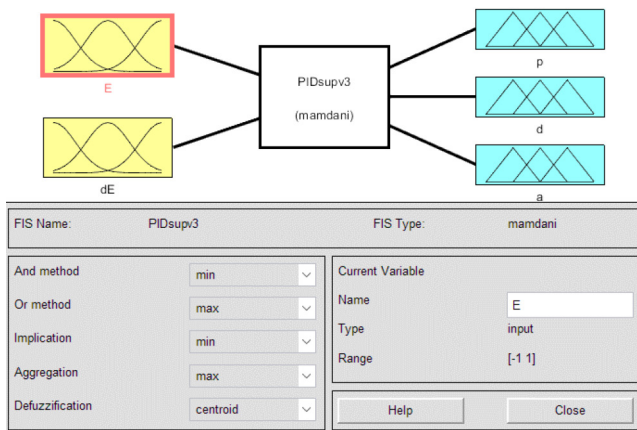


Рис. 10. Налаштування інтерфейсу FIS editor

У FIS editor задається опис системи нечіткого логічного висновку *Mamdani*. Для створеної системи обирається вид логічного зв'язку (*And method* – min) та (*Or method* – max), вид імплікації (*Implication* – min), спосіб агрегування висновків правил (*Aggregation* – max) та метод дефазифікації (*Defuzzification* – centroid). Додаються 2 вхідні змінні з розміром базової шкали (*Range* = [-1 1]) та 3 вихідні змінні з розміром базової шкали (*Range* = [0 1]).

Для опису вхідних логічних змінних у редакторі функцій належності (*Membership Function Editor*) для кожної змінної завдано трикутну функцію належності.

Терми лінгвістичної змінної «Помилка управління» розміщуються відповідно до рис. 11 із 7 параметрами функцій належності:

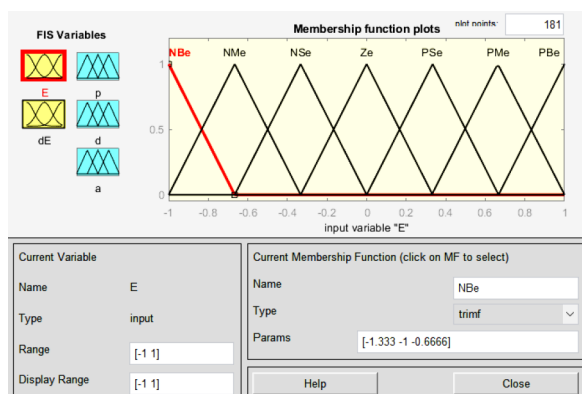


Рис. 11. Результат налаштування функцій належності вхідних змінних «Помилка управління»

Name = "NBde"; Type = "trimf"; Param = [-1.33 -1 -0.66];
 Name = "NMde"; Type = "trimf"; Param = [-1 -0.66 -0.33];
 Name = "NSde"; Type = "trimf"; Param = [-0.66 -0.33 0];
 Name = "Ze"; Type = "trimf"; Param = [-0.33 0 0.33];

Name = "PSe"; Type = "trimf"; Param = [0 0.33 0.66].
 Name = "PMe"; Type = "trimf"; Param = [0.33 0.66 1].
 Name = "PBe"; Type = "trimf"; Param = [0.66 1 1.33].

Терми вхідної лінгвістичної змінної «Похідна помилки управління» сформовано рівномірно. Для опису змінних у редакторі функцій належності (*Membership Function Editor*) для кожної вихідної змінної застосовано трикутну функцію належності. З параметрами:

Name = "NBde"; Type = "trimf"; Param = [-1.33 -1 -0.66];
 Name = "NMde"; Type = "trimf"; Param = [-1 -0.66 -0.33];
 Name = "NSde"; Type = "trimf"; Param = [-0.66 -0.33 0];
 Name = "Zde"; Type = "trimf"; Param = [-0.33 0 0.33];
 Name = "PSde"; Type = "trimf"; Param = [0 0.33 0.66].
 Name = "PMde"; Type = "trimf"; Param = [0.33 0.66 1].
 Name = "PBde"; Type = "trimf"; Param = [0.66 1 1.33].

Результат налаштування функцій належності вхідних змінних «Похідна помилки управління» наведено на рис. 12.

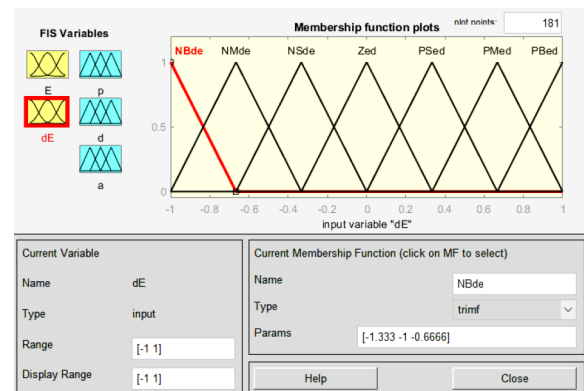


Рис. 12. Результат налаштування функцій належності вхідних змінних «Похідна помилки управління»

Для опису вихідної логічної змінної K_p' у редакторі функцій належності (*Membership Function Editor*) для кожної вихідної змінної завдано дзвоноподібну функцію належності.

Name = «Sp»; Type = «gbellmf»; Param = [0.5 2.5 0];
 Name = «Bp»; Type = «gbellmf»; Param = [0.5 2.5 1].

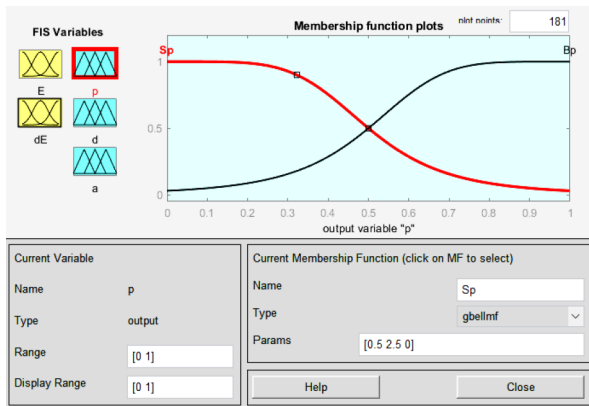


Рис. 13. Результат налаштування функцій належності вихідної змінної K'_p

Результат налаштування функцій належності вихідної змінної K'_p на рис. 13.

Для опису вихідної логічної змінної K'_d у редакторі функцій належності (*Membership Function Editor*) для кожної вихідної змінної також завдано дзвоноподібну функцію належності:

Name = "Sd"; Type = "trimf"; Param = [0.5 2.5 0];

Name = "Bd"; Type = "trimf"; Param = [0.5 2.5 1].

Результат налаштування функцій належності вхідних змінних наведено на рис. 14.

Для опису вихідної логічної змінної a в редакторі функцій належності (*Membership Function Editor*) для кожної вихідної змінної завдано трикутну функцію належності.

Name = «Sa»; Type = «gbellmf»; Param = [0.5 2.5 0];

Name = «Ba»; Type = «gbellmf»; Param = [0.5 2.5 1].

Результат налаштування функцій змінної a наведено на рис. 15.

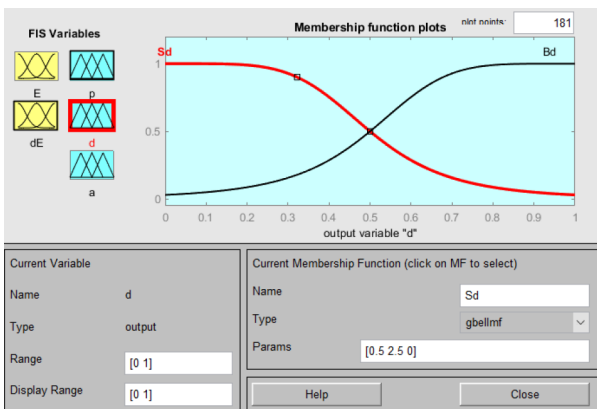


Рис. 14. Результат налаштування функцій належності вихідної змінної K'_d

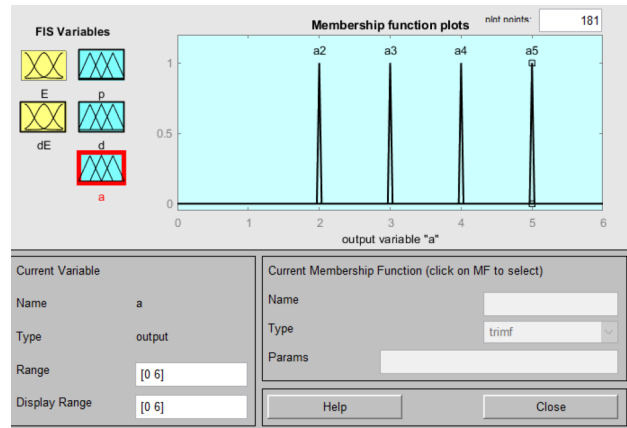


Рис. 15. Результат налаштування функцій належності вихідної змінної α

Після опису лінгвістичних змінних здійснюється опис правил у вікні редактора Rule Editor, кількість правил для цього випадку – 49:

1. if (E is NBe) and (dE is NBdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
2. if (E is NBe) and (dE is NMdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
3. if (E is NBe) and (dE is NSdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
4. if (E is NBe) and (dE is ZdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
5. if (E is NBe) and (dE is PSdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
6. if (E is NBe) and (dE is PMdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
7. if (E is NBe) and (dE is PBdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
8. if (E is NMe) and (dE is NBdE) then (p is Sp) (d is Bd) (a is a3) (1)
9. if (E is NMe) and (dE is NMdE) then (p is Bp) (d is Bd) (a is a3) (1)
10. if (E is NMe) and (dE is NSdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
11. if (E is NMe) and (dE is ZdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
12. if (E is NMe) and (dE is PSdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
13. if (E is NMe) and (dE is PMdE) then (p is Bp) (d is Bd) (a is a3) (1)
14. if (E is NMe) and (dE is PBdE) then (p is Sp) (d is Bd) (a is a3) (1)
15. if (E is NSe) and (dE is NBdE) then (p is Sp) (d is Bd) (a is a4) (1)
16. if (E is NSe) and (dE is NMdE) then (p is Sp) (d is Bd) (a is a3) (1)
17. if (E is NSe) and (dE is NSdE) then (p is Bp) (d is Bd) (a is a3) (1)
18. if (E is NSe) and (dE is ZdE) then (p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
19. if (E is NSe) and (dE is PSdE) then (p is Bp) (d is Bd) (a is a3) (1)

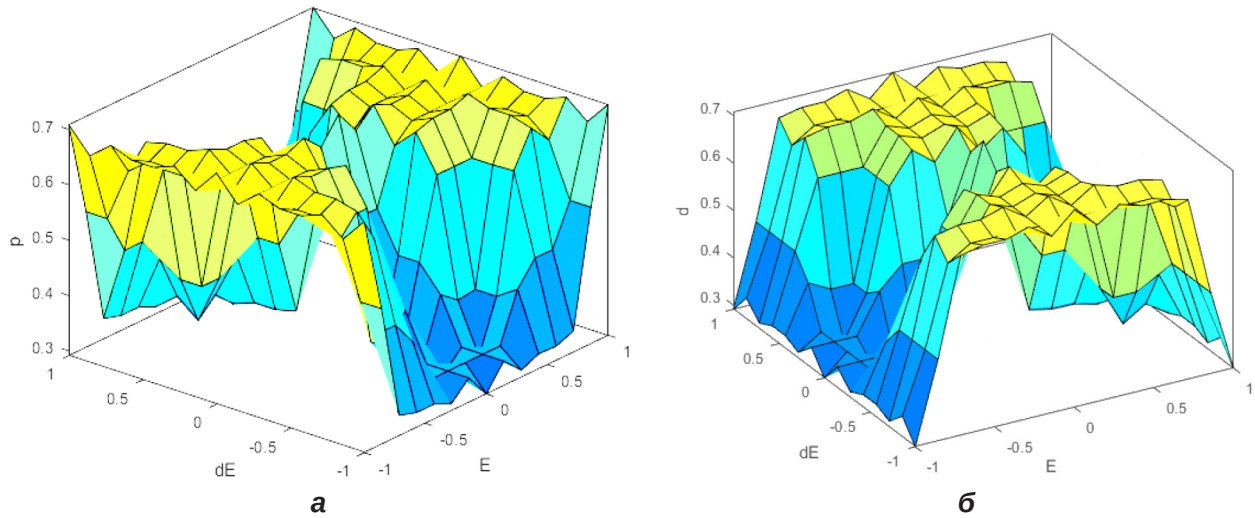


Рис. 16. Графічне подання закону управління K'_p, K'_d

20. if (E is NSe) and (dE is PMdE) then
(p is Sp) (d is Bd) (a is a3) (1)
21. if (E is NSe) and (dE is PBdE) then
(p is Sp) (d is Bd) (a is a4) (1)
22. if (E is Ze) and (dE is NBdE) then
(p is Sp) (d is Bd) (a is a5) (1)
23. if (E is Ze) and (dE is NMdE) then
(p is Sp) (d is Bd) (a is a4) (1)
24. if (E is Ze) and (dE is NSdE) then
(p is Sp) (d is Bd) (a is a3) (1)
25. if (E is Ze) and (dE is ZdE) then
(p is Bp) (d is Bd) (a is a3) (1)
26. if (E is Ze) and (dE is PSdE) then
(p is Sp) (d is Bd) (a is a3) (1)
27. if (E is Ze) and (dE is PMdE) then
(p is Sp) (d is Bd) (a is a4) (1)
28. if (E is Ze) and (dE is PBdE) then
(p is Sp) (d is Bd) (a is a5) (1)
29. if (E is PSe) and (dE is NBdE) then
(p is Sp) (d is Bd) (a is a4) (1)
30. if (E is PSe) and (dE is NMdE) then
(p is Sp) (d is Bd) (a is a3) (1)
31. if (E is PSe) and (dE is NSdE) then
(p is Bp) (d is Bd) (a is a3) (1)
32. if (E is PSe) and (dE is ZdE) then
(p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
33. if (E is PSe) and (dE is PSdE) then
(p is Bp) (d is Bd) (a is a3) (1)
34. if (E is PSe) and (dE is PMdE) then
(p is Sp) (d is Bd) (a is a3) (1)
35. if (E is PSe) and (dE is PBdE) then
(p is Sp) (d is Bd) (a is a4) (1)
36. if (E is PMe) and (dE is NBdE) then
(p is Sp) (d is Bd) (a is a3) (1)
37. if (E is PMe) and (dE is NMdE) then
(p is Bp) (d is Bd) (a is a3) (1)
38. if (E is PMe) and (dE is NSdE) then
(p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
39. if (E is PMe) and (dE is ZdE) then
(p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)

40. if (E is PMe) and (dE is PSdE) then
(p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
41. if (E is PMe) and (dE is PMdE) then
(p is Bp) (d is Bd) (a is a3) (1)
42. if (E is PMe) and (dE is PBdE) then
(p is Sp) (d is Bd) (a is a3) (1)
43. if (E is PBe) and (dE is NBdE) then
(p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
44. if (E is PBe) and (dE is NMdE) then
(p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
45. if (E is PBe) and (dE is NSdE) then
(p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
46. if (E is PBe) and (dE is ZdE) then
(p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
47. if (E is PBe) and (dE is PSdE) then
(p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
48. if (E is PBe) and (dE is PMdE) then
(p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)
49. if (E is NBe) and (dE is PBdE) then
(p is Bp) (d is Sd) (a is a2) (1)

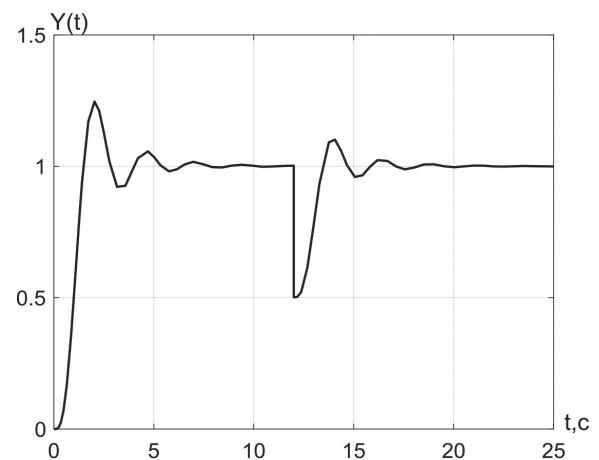


Рис. 17. Графік перехідного процесу в системі управління з нечітким супервізором ПІД-типу

Посилки в правилах пов'язані (connection) за допомогою операції *and*. Уведене правило забезпечене ваговим коефіцієнтом (*Weight* = 1).

Після опису правил за допомогою інтерфейсу *Surface Viewer* отримано графічне подання закону управління (див. рис. 16).

На четвертому етапі досліджено графік перехідного процесу в системі управління з нечітким супервізором ПІД-регулятора (див. рис. 17). На математичній моделі (див. рис. 9) у момент часу 12 с додано збурення. Як видно з графіка перехідного процесу, спроектована система управління повністю компенсує збурювальні впливи.

Висновок. ПІД-регулятори набули широкого поширення в промисловості завдяки простоті

своїєї структури та надійності в широкому діапазоні робочих умов. Розробка цих регуляторів пов'язана з вибором трьох параметрів: пропорційного коефіцієнта, коефіцієнтів при інтегралі та похідній. Наявні ПІД-регулятори можна розділити на два класи: регулятори з фіксованим налаштуванням та адаптивні ПІД-регулятори. Регулятори з фіксованим налаштуванням налаштовують одноразово, наприклад, за алгоритмом Зіглера – Ніколса. В адаптивних ПІД-регуляторах коефіцієнти можуть змінюватися в реальному часі, що вимагає використання додаткових знань про процес управління. Розглянутий варіант реалізації нечітких супервізорів реалізують прості алгоритми адаптації на підставі оцінки помилки керування та її похідної.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Ковриго Ю. М. Методи забезпечення стійкості систем регулювання на базі ПІ та ПІД-регуляторів. *Східноєвропейський журнал передових технологій*. 2013. № 3/3 (63). С. 58–63.
2. Новіков П. В., Бунке О. С. Інтелектуальна система керування інерційними технологічними параметрами на базі fuzzy-регулятора. Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: XV міжнар. наук.-прак. конф. асп., маг. і студ. : мат. конф. Київ, 2017. С. 31–32.
3. Нейронні мережі в системах автоматизації: курс лекцій з дисципліни «Нейронні мережі в системах автоматизації» / Уклад. О. В. Разживін. Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2023. 296 с.
4. Разживін О. В., Бережна О. В., Сахацький С. О., Мурат В. М. Синтез систем управління динамічними процесами у котлі із застосуванням нейронної мережі прямого поширення. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2023. Т. 3. № 103. С. 13–21.
5. Разживін О., Люта А., Сімкін О., Залятов А. Розробка автоматизованої системи управління температурним режимом випікання хлібобулочних виробів із використанням нечіткого контролера. *Challenges and Issues of Modern Science*. 2024. Т. 3. С. 100–107.
6. Штіфзон О. Й., Новіков П. В., Баган Т. Г. Розробка адаптующого fuzzy-logic пристрою для керування в умовах параметричної нестационарності. *Східно-європейський журнал передових технологій*. Харків, 2018. Т. 1. № 2. С. 30–37.
7. Taiwo O. Comparison of four methods of on-line identification and controller tuning. *IEE Proc., Control Theory Appl.* 2006. № 140(5). P. 323–327

REFERENCES:

1. Kovryho, YU.M. (2013). Metody zabezpechennya stiykosti system rehulyuvannya na bazi PI ta PID rehulyatoriv [Methods for ensuring the stability of control systems based on PI and PID controllers]. *Methods for ensuring the stability of control systems based on PI and PID controllers*, №3/3 (63), S. 58–63. [in Ukrainian].
2. Novikov, P.V., & Bunke, O.S. (2017). Intelktual'na systema keruvannya inertsinyhnyh tekhnolohichnyhnyh parametramy na bazi fuzzy-relyatora [Intelligent control system for inertial technological parameters based on fuzzy relator]. *Suchasni problemy naukovooho zabezpechennya enerhetyky: XV mizhnar. nauk.-prak. konf. asp., mah. i stud. : mat. konf. K. S.* 31–32. [in Ukrainian].
3. Razzhyvin, O.V. (2023). Neyronni merezhy v systemakh avtomatyzatsiyi: kurs lektsiy z dystsypliny «Neyronni merezhy v systemakh avtomatyzatsiyi» [Neural Networks in Automation Systems: Course of Lectures on the Discipline “Neural Networks in Automation Systems”]. Zaporizhzhya: TOV “TEKHNICHNYY UNIVERSYTET “METINVEST POLITEKHNKA”, 296 s. [in Ukrainian].
4. Razzhyvin, O.V., Berezhna, O.V., Sakhats'kyi, S.O., & Murat, V.M. (2023). Syntez system upravlinnya dynamichnyhnyh protsesamy u kotli iz zastosuvannyam neyronnoyi merezhi pryamoho poshyrennya [Synthesis of dynamic process control systems in a boiler using a feedforward neural network]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu*. T. 3 № 103. S. 13–21. [in Ukrainian].

5. Razzhyvin, O., Lyuta, A., Simkin, O., & Zalyatov, A. (2024). Rozrobka avtomatyzovanoyi systemy upravlinnya temperaturnym rezhymom vypikannya khlibobulochnykh vyrobiv iz vykorystannyam nechitkoho kontrolera [Development of an automated system for controlling the temperature regime of baking bakery products using a fuzzy controller]. *Challenges and Issues of Modern Science*. T. 3. S. 100–107. [in Ukrainian].
6. Shtifzon, O.Y., Novvikov, P.V., & Bahan, T.H. (2018). Rozrobka adaptuyuchoho fuzzy-logic prystroyu dlya keruvannya v umovakh parametrychnoyi nestatsionarnosti [Development of an adaptive fuzzy-logic device for control under conditions of parametric non-stationarity]. *Skhidno-yevropeys'kyi zhurnalпередовikh tekhnolohiy*. Kharkiv. T. 1 № 2. S. 30–37. [in Ukrainian].
7. Taiwo, O. (2006). Comparison of four methods of on-line identification and controller tuning. *IEE Proc., Control Theory Appl.* № 140(5). P. 323–327.