

Проектиране на размити ПИД регулатори

Донка Иванова, Валентин Стоянов

Design and Tuning for Fuzzy Controllers: A Han-Xiong Li's methodology is introduced for designing and tuning the scaling gains of the conventional fuzzy logic controller based on its well-tuned linear counterpart. Fuzzy transfer function is invented to connect the fuzzy gains with the corresponding scaling gains. The control system has been applied to several first-order, second-order, and fifth-order processes. Simulation results show that the fuzzy PID controllers produces superior control performance than the conventional PID controllers and demonstrates the validity of the new methodology.

Key words: Fuzzy Logic Control, PID control .

ВЪВЕДЕНИЕ

Размитите регулатори намират все по-голямо приложение при управление на различни технологични процеси. Това определя необходимостта от изучаването и съпоставянето им с регулаторите, реализиращи типови непрекъснати закони за регулиране.

Съществуват многобройни методи за избор и настройка на линейни непрекъснати регулатори [1, 2, 3]. Проектирането на размити регулатори, в повечето случаи, се извършва чрез компютърна симулация. Много разработки се отнасят до реализацията на размито ПД, ПИ и ПИД управление, избор на структура и сравнение на размитите с класическите регулатори [4, 6, 7, 8]. Обособени са две групи параметри на размитите регулатори: структурни и параметри за настройка [5]. Към структурните параметри, определяни off-line, се отнасят входно-изходните променливи и функциите им на принадлежност, базата от размити правила, механизмът за получаване на размити изводи и механизмът за деразмиване. Към параметрите за настройка, определяни on-line, се отнасят коефициентът на пропорционалност, коефициентите на интегралната и диференциалната съставки, параметрите на функциите на принадлежност и мащабните коефициенти [5]. Възниква въпросът, възможно ли е параметрите за настройка на размитите ПД, ПИ и ПИД регулатори да се получат въз основа на параметрите за настройка на съответния линеен непрекъснат регулатор (аналог). Отговорът се дава от Han-Xiong Li в разработената методика за проектиране и настройка на размити регулатори с линейна база размити правила [7].

Целта на настоящата статия е да се изследва приложимостта на предложената от Han-Xiong Li методика за проектиране и настройка на размити регулатори в системи за управление на различни технологични обекти.

ПРОЕКТИРАНЕ НА РАЗМИТИ ПД, ПИ И ПИД РЕГУЛАТОРИ

Линейните непрекъснати ПД, ПИ и ПИД регулатори реализират законите

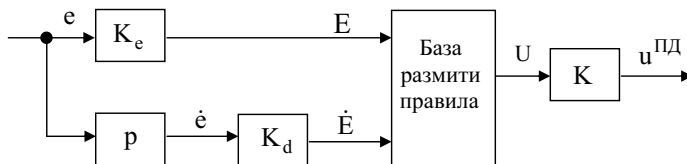
$$\begin{aligned} u^{\text{ПД}} &= K_p (e + T_d \dot{e}) \\ u^{\text{ПИ}} &= K_p e + K_I \int e dt = K_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int e dt \right), \\ u^{\text{ПИД}} &= K_p e + K_I \int e dt + K_D \dot{e} = K_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int e dt + T_d \dot{e} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

където K_p , K_I и K_D са коефициентите на пропорционалната, интегралната и диференциалната съставки;

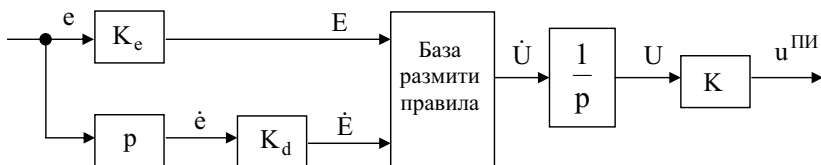
$T_i = \frac{K_p}{K_i}$ е времеконстантата на интегриране;

$T_d = \frac{K_D}{K_p}$ - времеконстантата на диференциране.

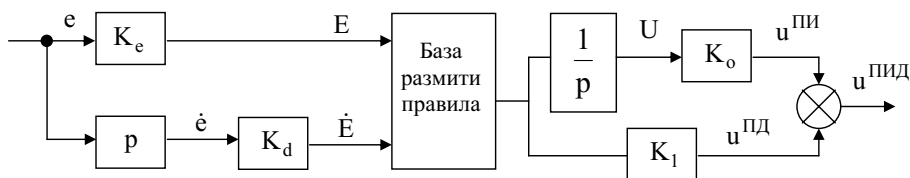
На фиг. 1, фиг. 2 и фиг. 3 са показани структурните схеми на размити ПД, ПИ и ПИД регулатори.



Фиг. 1. Размит ПД регулатор



Фиг. 2. Размит ПИ регулатор



Фиг. 3. Размит ПИД регулатор

При линейна база размити правила входовете E и $\dot{E}$ са свързани линейно $K_d = \alpha K_p$ [7].

Дефинирана е размита предавателна функция $F\{N\}$ на размитата линейна система, като „въздействие“ на входния мащабен коефициент N върху изхода. При нормализирани входни и изходни променливи в интервала $[-1, 1]$, за предавателната функция се записва [7]

$F\{N\} = 1$	при	$N \geq N_{\max}$;
$F\{N\} = 0$	при	$N = 0$;
$0 \leq F\{N\} \leq 1$	при	$N \geq 0$;
$F\{N\} \ll 1$	при	$N \ll N_{\max}$;
$F\{N\} \approx N$	при	$N \ll 1$;
$F\{\alpha N\} \approx \alpha F\{N\}$	при	$\max(N, \alpha N) < N_{\max}, \alpha \geq 0$,

където $N_{\max}$ е максималната стойност на мащабния коефициент на входната променлива.

Тогава за параметрите на размитите пропорционално-интегрален (РПИ), пропорционално-диференциален (РПД) и пропорционално-интегрално-диференциален (РПИД) регулатори, изразени чрез размитите предавателни функции, се записва

$$\begin{aligned} & K_P = KF\{K_d\} \\ \text{РПИ} \quad & K_I = KF\{K_e\} = K_P \frac{F\{K_e\}}{F\{\alpha K_e\}} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & K_P = KF\{K_e\} \\ \text{РПД} \quad & K_D = KF\{K_d\} = K_P \frac{F\{\alpha K_e\}}{F\{K_e\}} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & K_P = K_0 F\{K_d\} + K_1 F\{K_e\} \\ \text{РПИД} \quad & K_I = K_0 F\{K_e\} \\ & K_D = K_1 F\{K_d\} \end{aligned} \quad (4)$$

Сравняването на изразите (2) и (3) с израза (1) показва, че коефициентът K е аналогичен на коефициента на пропорционалност K_P и константата α е аналогична на времеконстантата на интегриране T_i на ПИ или на времеконстантата на диференциране T_d на ПД регулатора. Следователно

$$K^{ПД} = \frac{K_P}{F\{K_e\}} \geq K_P, \quad (5)$$

$$K^{ПИ} = \frac{K_P}{F\{\alpha K_e\}} \geq K_P, \quad (6)$$

$$T_d = T_i = \frac{F\{\alpha K_e\}}{F\{K_e\}} \approx \alpha. \quad (7)$$

1. Настройка на параметрите на размитите ПД и ПИ регулатори

Настройката на параметрите на размитите ПД и ПИ регулатори е в последователността [7]:

1) Началните стойности на параметрите за настройка $K_e/\alpha/K$ на размитите регулатори се получават чрез параметрите на съответния линейен непрекъснат регулатор по (5), (6) и (7).

2) Настройват се K_e/K до постигане на възможно „най-бърза“ реакция и най-малка грешка в установен режим.

Увеличаването на K води до „по-бърза реакция“ и намаляване на грешката в установен режим. Много голямата стойност на K може да доведе системата до неустойчивост. За да се избегне насищане на входа, K_e не трябва да е с твърде голяма стойност.

3) Настройва се α до постигане на възможно „най-бърза“ реакция и най-малка грешка в установен режим при РПИ или до стабилизиране на системата при РПД.

Намаляването на α (увеличаването на K_I) при РПИ води до по-бърза реакция и намаляване на грешката в установен режим. Много малката стойност на α води до увеличаване на пререгулирането и до неустойчивост на системата. Увеличаването на α (увеличаването на K_D) при РПД ще подобри устойчивостта на системата. Много голямата стойност на α може да доведе системата до неустойчивост.

Точки 2) и 3) се повтарят до постигане на преходен процес с желаното качество.

2. Настройка на параметрите на размития ПИД регулатор

Настройката на размития ПИД регулатор е в последователността [7]:

- 1) Настройват се $K_e / \alpha / K$ като при размит ПД регулатор.
- 2) При добавяне на размития ПИ регулатор, коефициентите на входа не се променят, а се настройват само коефициентите на изхода, като $K_0 + K_1 \leq K$.
- 3) Пренастройват се коефициентите до постигане на желания преходен процес в системата.

3. Резултати от моделиране на размити САУ

Компютърно са моделирани различни системи за управление с размити регулатори, настроени по изложената в т.2 методика.

Базата размити правила за входно-изходните променливи на размитите ПД, ПИ и ПИД регулатори е приведена в Табл. 1. Входните променливи на регулаторите са нормализирани в интервала $[-1, 1]$.

Таблица 1

$\dot{E}/E$	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
PL	ZR	PS	PM	PL	PL	PL	PL
PM	NS	ZR	PS	PM	PL	PL	PL
PS	NM	NS	ZR	PS	PM	PL	PL
ZR	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
NS	NL	NL	NM	NS	ZR	PS	PM
NM	NL	NL	NL	NM	NS	ZR	PS
NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	ZR

Функциите на принадлежност за входно-изходните променливи са избрани триъгълни.

Системи за автоматично управление (САУ) на различни обекти с размити регулатори са моделирани в MATLAB/SIMULINK.

3.1. Управление на обекти от първи ред със закъснение

Динамичните модели на редица технологични процеси, при които регулируеми величини са температурата, налягането, нивото на флуид и др. са от $I^{-\text{ви}}$ ред със (или без) закъснение.

Обектът на управление е с предавателна функция

$$W(p) = \frac{k}{T_p + 1} e^{-\tau p}, \quad (8)$$

$$k = 1, T = 1s, \tau = 0,2s.$$

Стойностите на параметрите за настройка, определени по метода на Ziegler-Nichols, на ПИ и ПИД линейните непрекъснати регулатори са приведени в Табл.2.

Таблица 2

	K_p	T_n, s	T_d, s	$\sigma, \%$	t_p, s
ПИ	4,5	0,66	-	54%	1,87 s
ПИД	6	0,4	0,1	62 %	1,90 s

Параметрите за настройка на размития ПИ и размития ПИД регулатори, определени по методиката от т.2, са приведени съответно в Табл. 3 и Табл. 4.

Таблица 3

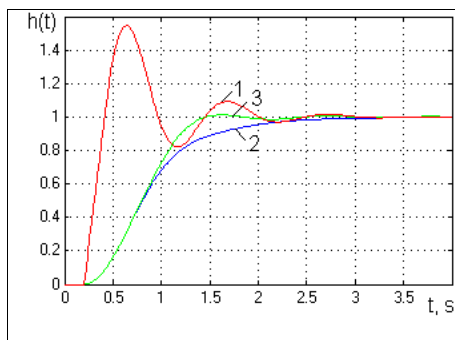
	K_e	α	K	$\sigma, \%$	t_p, s
Начални ст.	1	0,66	4,5	0	1,95
Крайни ст.	1,5	0,46	4,5	≈ 0	1,28

Таблица 4

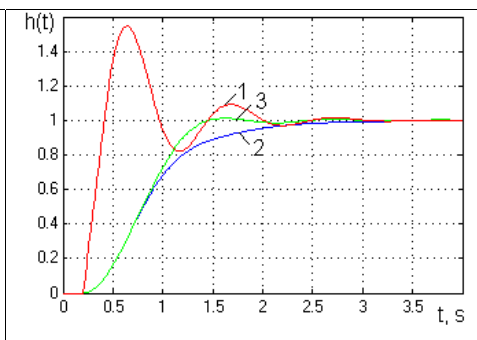
	K_e	α	K_o	K_I	$\sigma, \%$	t_p, s
Начални ст.	1	0,1	3,3	2,7	≈ 0	0,96
Крайни ст.	1,5	0,15	3,3	2,7	≈ 0	0,74

Преходните процеси в системата с ПИ, крива 1, и РПИ регулатор при началните, крива 2, и крайните, крива 3, настройки са показани на фиг.4. Увеличаването на K_e (или намаляване на α) води до „по-бърза“ реакция и намалява грешката в установен режим. На фиг. 5 са показани преходните процеси в системата с ПИД, крива 1, и РПИД регулатор при началните, крива 2, и крайните, крива 3, настройки. Показателите на качеството на преходните процеси в системата с ПИ и ПИД, РПИ и РПИД регулатори са приведени съответно в Табл. 2, Табл. 3 и Табл. 4.

Очевидно е, че и двата размити регулатора водят до значително подобряване на показателите на качеството на преходните процеси. Настройката на параметрите на размитите регулатори се получава за две, най-много три итерации.



Фиг. 4. Преходни процеси в САУ с ПИ и РПИ регулатори



Фиг. 5. Преходни процеси в САУ с ПИД и РПИД регулатори

3.2. Управление на обекти от втори ред

а) управление на обект с нулев корен на характеристичното уравнение
Обектът на управление се описва с предавателната функция

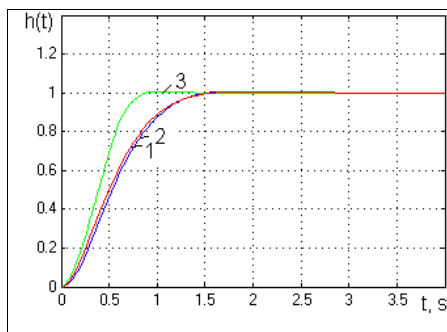
$$W(p) = \frac{5}{p(p+1)}. \quad (9)$$

За такива модели оптималният преходен процес се постига чрез ПД регулатор [5]. Параметрите за настройка на ПД и РПД регулатори (при начална и крайна настройка) са приведени в Табл. 5.

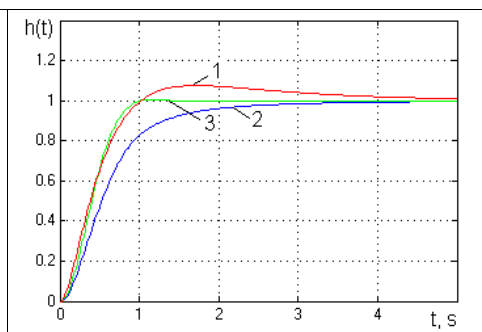
Таблица 5

	K_p	T_d, s	K_e	α	K	$\sigma, \%$	t_p, s
ПД	1	0,45				0	1,21
РПД, нач.			1	0,45	1	0	1,19
РПД, кр.			2,5	0,21	2,5	≈ 0	0,74

Преходните процеси в системата с ПД, крива 1, и РПД регулатори при началните, крива 2, и крайните, крива 3, настройки са показани на фиг. 6. Очевидно е, че чрез размития ПД регулатор, настроен по изложената в т. 2 методика, се получава по-голямо бързодействие в системата.



Фиг. 6. Преходни процеси в САУ с ПД и РПД регулатори



Фиг. 7. Преходни процеси в САУ с ПИД и РПИД регулатори

б) много обекти за управление се описват с модел от втори ред от вида

$$W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1} :$$

- коефициент на затихване $\xi \geq 1$

Предавателната функция на обекта на управление е

$$W(p) = \frac{2}{p^2 + 4p + 3}. \quad (10)$$

Параметрите за настройка на линейния непрекъснат ПИД и размития ПИД регулатори при начална и крайна настройка са приведени в Табл. 6, а преходните процеси на фиг. 7.

Преходният процес в системата с РПИД регулатор се получава апериодичен и с най-малко времетраене.

Таблица 6

	K_p	T_i	T_d	K_e	α	K_o	K_1	$\sigma, \%$	t_p, s
ПИД- (1)	10	1,5	0,3					7	2,65
РПИД, нач.(2)				1	0,3	4	6	0	1,8
РПИД, кр.(3)				1,5	0,1	3,5	6,5	≈ 0	0,8

- коефициент на затихване $\xi < 1$

Предавателната функция на обекта на управление е

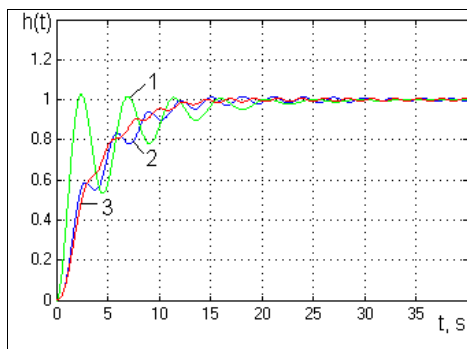
$$W(p) = \frac{2}{p^2 + 0,5 + 1}. \quad (11)$$

Параметрите за настройка на линейния непрекъснат ПИ, размития ПИ, линейния непрекъснат ПИД и размития ПИД регулатори са приведени в Табл.7, а преходните процеси на фиг. 8 и фиг. 9.

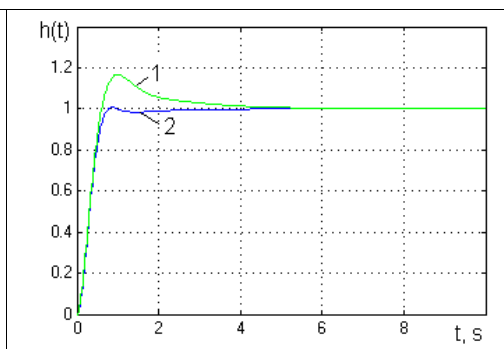
Таблица 7

	K_p	T_i	T_d	K_e	α	K	K_o	K_1	$\sigma, \%$	t_p, s
ПИ (1)	0,5	3								
ПИД (1)	10	1,5	0,3						17	2,18
РПИ, нач. (2)				1	3	0,5			≈ 0	11,2
РПИ, кр. (3)				2	3	0,5			≈ 0	9,8
РПИД (2)				1	0,3		3	7	0	0,62

Преходният процес с РПИД регулатор е с най-добро качество. Поради малкия коефициент на затихване, по-голяма тежест има диференциалната съставка, отколкото интегралната, т.е. $K_1 > K_o$. Разликата между преходните процеси с ПИД и РПИД регулатори е значителна. Системата с РПИД регулатор е без пререгулиране и много по-малко времетраене на преходния процес.



Фиг. 8. Преходни процеси в САУ с ПИ и РПИ регулатори



Фиг. 9. Преходни процеси в САУ с ПИД и РПИД регулатори

3.3. Управление на обекти от по-висок ред

Обектът на управление се описва с предавателната функция

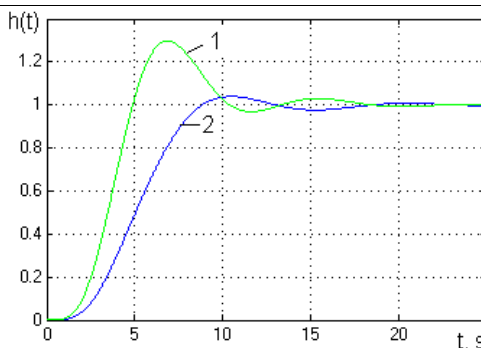
$$W(p) = \frac{1}{(p + 1)^5}. \quad (12)$$

Параметрите за настройка на линейния непрекъснат ПИД и размития ПИД регулатори са приведени в Табл.8, а преходните процеси - на фиг. 10.

Преходният процес в системата с РПИД регулатор е с по-добро качество в сравнение с преходния процес в системата с ПИД регулатор.

Таблица 8

	K_p	T_i	T_d	K_e	α	K_o	K_I	$\sigma, \%$	t_p, s
ПИД (1)	1,6	3,8	1,125					30	9,8
РПИД (2)				1	1,125	0,4	1,2	4	8,2



Фиг. 10. Преходни процеси в САУ с ПИД и РПИД регулатори

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнителният анализ на преходните процеси в системите за управление с линейни непрекъснати и с размитите регулатори - техни аналози, показва приложимостта на методиката на Han-Xiong Li за настройка на размити регулатори. Параметрите на размитите регулатори се определят чрез параметрите на съответните линейни непрекъснати регулатори. Още с началната настройка на размитите регулатори се получава добро качество на преходните процеси в САУ. За две, най-много три итерации, следвайки методиката, се получават крайните стойности на параметрите за настройка на размитите регулатори. Разгледаните размити регулатори ще осигуряват по-добра робастност на системите, отколкото съответните линейни непрекъснати регулатори - техни аналози. Чрез разгледаната методика настройката на размитите ПД, ПИ и ПИД регулатори се извършва лесно и бързо.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гарипов, Е. Проектиране на стандартни аналогови ПИД регулатори в Matlab и SIMULINK. // Автоматика и информатика, № 1, 2004, стр. 35 – 42.
2. Костов, К., Е. Николов. Инженерни емпирични методи за настройка – II.// Автоматика и информатика, № 4, 2002, стр. 52 – 54.
3. Николов, Н., Е. Николов. Методи и алгоритми за настройка на регулатори в системите за управление. Технически университет, София, 2006, 73с.
4. Chen, C.-L., F.-C Kuo. Design and Analysis of a Fuzzy Logic Controllers. International Journal of Systems Science, vol. 26, 1995, pp. 1223 – 1248.
5. Hu, B., G. K. I. Mann, R. G. Gosine. New Methodology for Analytical and Optimal Design of Fuzzy PID Controllers. IEE Transactions on Fuzzy Systems, vol.7, № 5, 1999, pp. 521 – 539.

6. Lee, C.C. Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controllers – Part 1 and Part 2. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 20, 1990, pp. 404 – 435.
7. Li, H. X. A Comparative Design and Tuning for Conventional Fuzzy Control. IEEE Transactions on Systems, Man & Cybernetics, part B, vol. 27, № 5, 1997, pp. 884 – 889.
8. Petrov, M., A. Taneva, I. Ganchev. Fuzzy PID Controller Design in Matlab Environment. Proceedings of the Int. Conf. Automatics and Informatics, Sofia, 2007, pp. 57 – 61.

За контакти:

Доц. д-р Донка Иванова, Катедра “Автоматика, информационна и управляваща техника”, Русенски университет “Ангел Кънчев”, тел.: 082-888 226, e-mail: divanova@ru.acad.bg

Докладът е рецензиран.