

FRI-9.3-1-THPE-04

DESIGN OF FUZZY SELF-TUNING PID CONTROLLER FOR ELECTROHYDRAULIC SYSTEM

Assoc. Prof. Krasimir Ormandzhiev, PhD

Department of Power Engineering,
Faculty of Mechanical and Precision Engineering,
Technical University of Gabrovo, Bulgaria
E-mail: khormandzhiev@gmail.com

***Abstract:** The article examines the work of electrohydraulic system with rotary actuator. Developed a mathematical model describing the dynamics of the processes. A fuzzy self-adjusting PID controller with variable coefficients is synthesized. The transient processes in the system are compared to processes where the classical PID controller. The results are presented in graphical form.*

***Keywords:** Electrohydraulic System, Fuzzy Control, Mathematical Model, PID Controller, Rotary Actuator, Pressure Pipeline.*

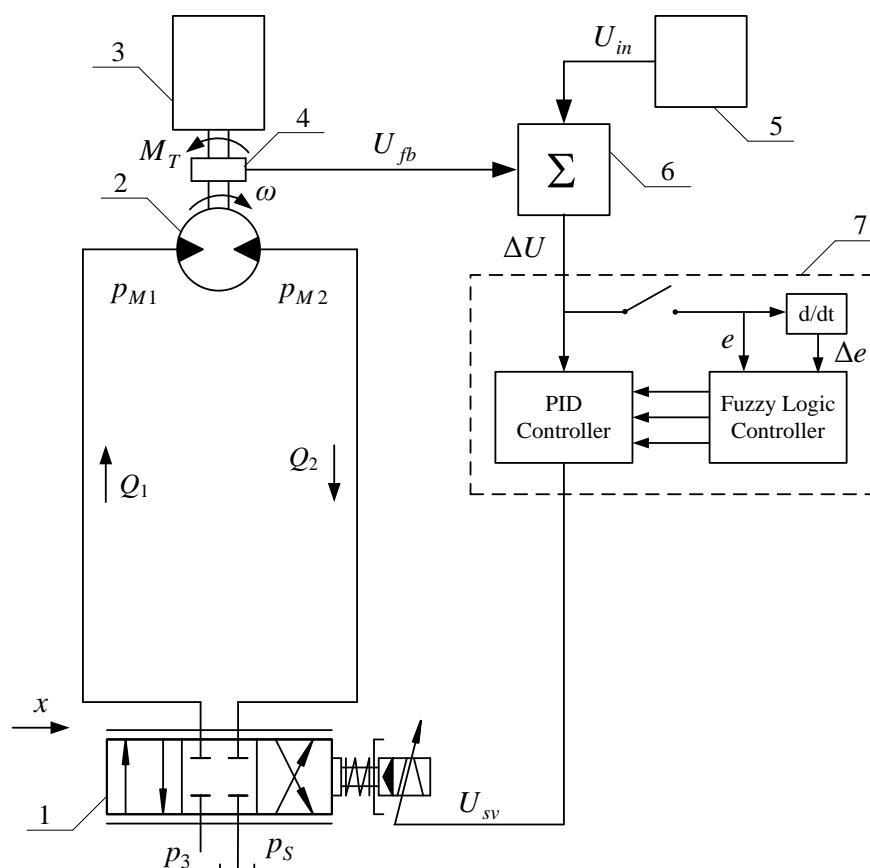
ВЪВЕДЕНИЕ

Размитите логически регулатори намират широко приложение в съвременната индустрия за управление на различни технологични процеси. Изучаването и изследването на системите с размито управление се явява едно от бързоразвиващите се научни направления. Основно се използват три типа структури на размито логическо управление: ПД, ПИ и ПИД наподобяващо управление – (Mamdani, 1974), (Harris et al, 1994) и др.

Електрохидравличните следящи системи съчетават в себе си бързодействието на електронните елементи и реализирането на големи изходни мощности от хидравличната част на системата. Математични модели на хидравлични сервосистеми за възвратно-постъпателно и възвратно-въртливо движение са представени в (AL-Assady et al, 2013), (Xu et al, 2013) и (Basmenj et al, 2014). В (Ormandzhiev, 2006) е разработен нелинеен математичен модел и са изследвани преходните процеси при различни режими на работа на електрохидравлична задвижваща система с ротационен изпълнителен механизъм. Влиянието на температурата на работния вуид върху работата на следяща електрохидравлична система е отчетено в (Hassan et al, 2009). В (Detiček et al. 2011) е изследвана електрохидравлична следяща система с размито управление. В (Shafiabadi et al, 2012) е предложена нова схема за управление на скоростта на електрохидравлична следяща система. В (Jovanovic, 2002) е представен нелинеен алгоритъм за управление на скоростта на изпълнителния механизъм.

ИЗЛОЖЕНИЕ

На фиг.1 е показана принципната схема на електрохидравлична следяща система с ротационен изпълнителен механизъм. Системата се състои от следните елементи: 1 – сервоклапан; 2 – хидравличен мотор; 3 – обект на регулиране; 4 – сензор за обороти на въртане на вала на хидромотора; 5 – задаващо устройство, 6 – сумиращо устройство, 7 – електронен блок за управление, състоящ се от ПИД регулатор и размит регулатор.



Фиг. 1. Схема на автоматичната електрохидравлична следяща система

Електронният блок за управление 7 (фиг.1) може да работи като класически ПИД регулатор и като ПИД регулатор с променливи коефициенти, които се явяват изходни величини на рамития регулатор – (размит самонастройващ се ПИД регулатор).

Математичен модел

Работата в динамичен режим на електрохидравличната следяща система с ротационен изпълнителен механизъм (фиг.1) се описва със следните уравнения:

1. Уравнения за въртенето на вала на хидромотора:

$$J \frac{d\omega}{dt} + k_f \omega = w(p_{M1} - p_{M2}) - M_T \quad (1)$$

където:

- p_{M1}, p_{M2} - налягане в тръбопроводите от двете страни на хидромотора
- ω, J - ъглова скорост и приведен инерционен момент на вала на хидромотора;
- k_f - коефициент на хидравлично триене;
- w_m - специфичен обем на хидромотора;
- M_T - товарен момент.

2. Уравнение на сумиращото устройство:

$$\Delta U = U_{in} - U_{fb} \quad (2)$$

където:

- U_{in} - задаващо напрежение;
- ΔU - напрежение на изхода на сумиращото устройство;
- $\Delta U_{fb} = k_{fb}\omega$ - напрежение на обратната връзка;
- k_{fb} - коефициент на обратната връзка.

3. Уравнение на електронния ПИД регулатор:

$$U_{sv} = k \left(\Delta U + \frac{1}{T_i} \int \Delta U dt + T_d \frac{d\Delta U}{dt} \right) \quad (3)$$

където:

- k – коефициент на усилване на регулатора;
- T_i, T_d – времеконстанти на интегриране и диференциране на регулатора;
- U_{sv} - напрежение на изхода на регулатора.

4. Уравнение на сервоклапана:

$$T_{sv} \frac{dx_{sv}}{dt} + x_{sv} = k_{sv} U_{sv} \quad (4)$$

където:

- k_{sv}, T_{sv} – коефициент на усилване и времеконстанта на сервоклапана;
- x_{sv} – преместване на плунжера на сервоклапана, $x_{\min} \leq x_{sv} \leq x_{\max}$.

5. Уравнения на дебитите протичащи през сервоклапана:

$$Q_1 = \begin{cases} \mu_1 \pi d x_{sv} \sqrt{\frac{2(p_3 - p_1)}{\rho}}, & 0 \leq x_{sv} \leq x_{\max} \\ \mu_1 \pi d x_{sv} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_s)}{\rho}}, & x_{\min} \leq x_{sv} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$Q_2 = \begin{cases} \mu_2 \pi d x_{sv} \sqrt{\frac{2(p_2 - p_s)}{\rho}}, & 0 \leq x_{sv} \leq x_{\max} \\ \mu_2 \pi d x_{sv} \sqrt{\frac{2(p_3 - p_2)}{\rho}}, & x_{\min} \leq x_{sv} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

където:

- Q_1, Q_2 – преминаващи дебита през сервоклапана;
- μ_1, μ_2 – коефициенти на дебит;
- ρ - плътност на хидравличното масло;
- d – диаметър на плунжера на сервоклапана;
- p_s, p_0 - захранващо и сливно налягане.

6. Уравнения на дебитите (постъпващ и изходящ) към лявата и от дясната страна на хидромотора:

$$Q_1 = w_m \omega + \frac{V_1}{B} \frac{dp_{1m}}{dt} \text{sign}(\omega) \quad (7)$$

$$Q_2 = w_m \omega - \frac{V_2}{B} \frac{dp_{2m}}{dt} \text{sign}(\omega) \quad (8)$$

където:

- Q_1, Q_2 – постъпващ и изходящ дебит към (от) хидромотора;
- q_m - работен обем на хидромотора, $q_m = 2\pi w_m$;
- $V_1 = V_2 = q_m / 2$.

Работата на електрохидравличната следяща система с ротационен изпълнителен механизъм (фиг.1) в динамичен режим, се описва с уравнения от (1) до (8). След преобразуване и привеждане на математичния модел в безизмерен вид, последващо линеаризиране, се достига до следната система уравнения в операторен вид:

$$\Delta u(s) = u_{in}(s) - k_{fb} \alpha(s) \quad (11)$$

$$u(s) = k \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d \right) \Delta u(s) \quad (12)$$

$$(T_{sv} s + 1)x(s) = k_{sv} u(s) \quad (13)$$

$$q_M(s) = k_x x(s) - k_p p_M(s) \quad (14)$$

$$q_M(s) = T_\alpha \alpha(s) + T_{pm} s p_M(s) \quad (15)$$

$$(T_M s + 1)\alpha(s) = k_M p_M(s) - k_T m_T(s) \quad (16)$$

където:

$$x = \frac{x_{sv}}{x_{sv0}}, \quad \alpha = \frac{\omega}{\omega_0}, \quad q_M = \frac{Q}{Q_0}, \quad p_m = \frac{p_M}{p_{max}}, \quad m_T = \frac{M_T}{M_{T0}}, \quad u = \frac{U_{sv}}{U_{max}}, \quad u_{in} = \frac{U_{in}}{U_{max}} -$$

безизмерни величини както следва: преместване на плунжера на сервоклапана, ъгловаскорост, работен обем, пад на налягане на хидромотора, товарен момент, напрежение на сервоклапана, задаващо напрежение;

$$Q - \text{осреднен дебит, } Q = \frac{Q_1 + Q_2}{2};$$

$$p_M - \text{пад на налягане на хидромотора, } p_M = p_{M1} - p_{M2}.$$

Системата уравнения от (11) до (16) описват работата с ПД регулатор на електрохидравличната следяща система от фиг. 1 в динамичен режим.

Синтез на размит регулатор

Структурна схемата на автоматичната електрохидравлична система с разработения размит самонастройващ се ПИД регулатор е показана на фиг. 2. Входни сигнали на размития регулатор са системната грешка e и моментното ѝ изменение Δe , а изходни величини са параметрите на ПИД регулатора: k - коефициента на усилване; T_i - времеконстанта на интегриране и T_d - времеконстанта на диференциране.

Логическата таблица се състои от набор от предварително съставени логически правила от типа "if-then", които описват стратегията на управлението и са получени въз основа на експертни знания. Стойността на изходната величина u при размито управление се определя чрез логически правила от типа:

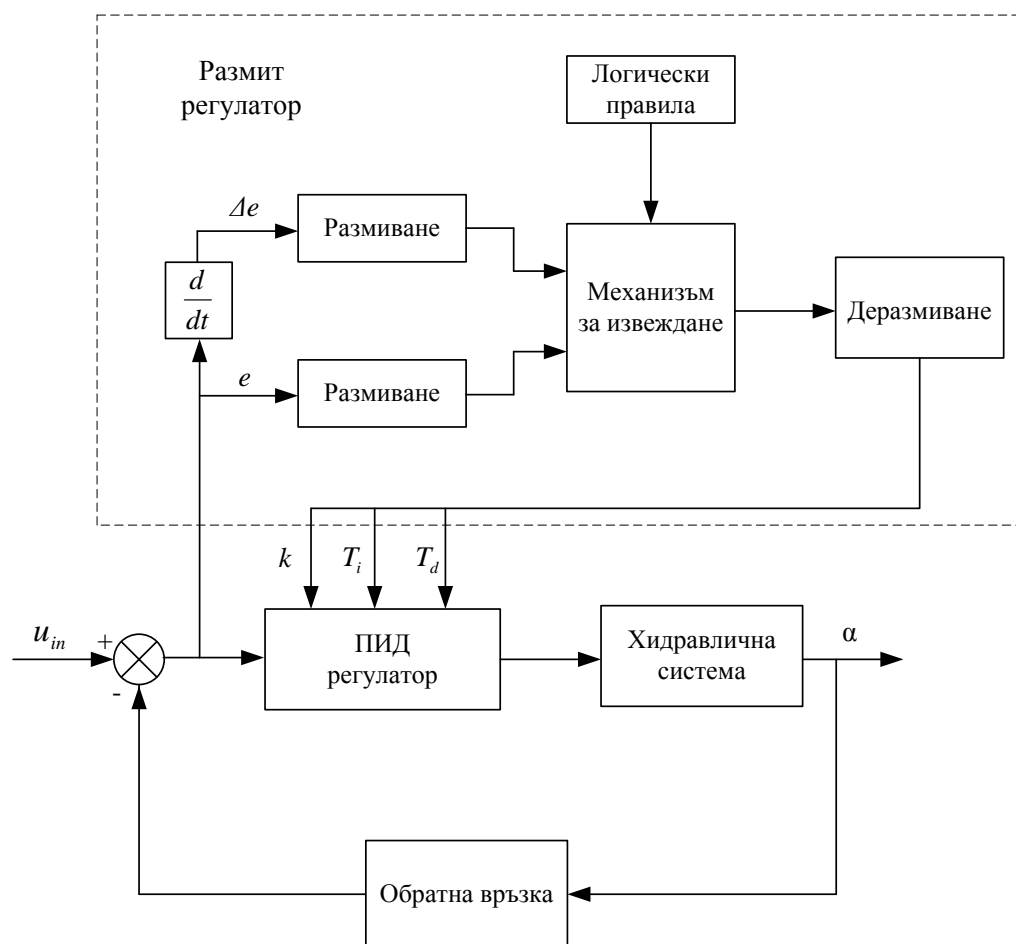
$$R^n : \text{if } e \text{ is } A_i \text{ and } \Delta e \text{ is } B_i \text{ then } k \text{ is } C_i \quad (17)$$

където e , Δe , k , T_i и T_d в случая са лингвистични променливи на съответните входно-изходни величини. Техните универсални множества са получени от диапазоните на изменение на съответните величини - $[-E, E]$, $[-\Delta E, \Delta E]$, $[-K, K]$, $[-T_i, T_i]$ и $[-T_d, T_d]$. A_i , B_i и C_i са размити множества на съответните величини, които са равномерно разпределени в тези диапазони.

Размитият механизъм за извеждане в логическия блок определя решението за параметрите на ПИД регулатора. Използван е методът на макс-минната композиция на Мамдани:

$$\mu_i = \max \left\{ \min [\mu_{Aj}, \mu_{Bk}] \right\} \quad (18)$$

където μ_{Aj} и μ_{Bk} са степените на принадлежност.



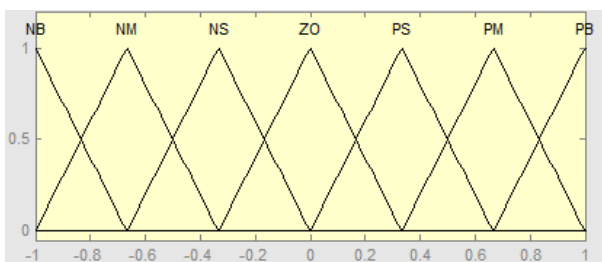
Фиг. 2. Структурната схема на автоматичната електрохидравлична системата с размит самонастройващ се ПИД регулатор

В блокът за деразмиване се реализира преминаването от размити към реални стойности на изходните величини k , T_i и T_d като е използван метода на центъра на тежестта във вида:

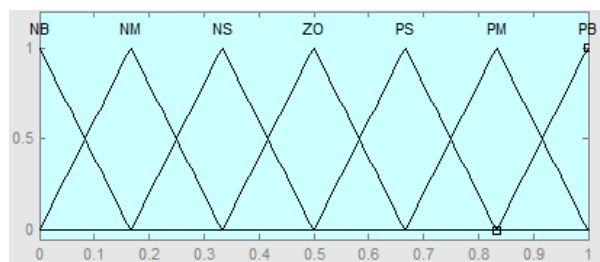
$$k_0 = \frac{\sum_{i=1}^m k_i \mu(k_i)}{\sum_{i=1}^m \mu(k_i)} \quad (19)$$

където k_i са центровете на активираните размити множества, а $\mu(k_i)$ са степените на принадлежност в тях.

Всеки вход и изход се описва с набор от терми: Negative Long (NL) Negative Middle (NM), Negative Short (NS), Zero Rule (ZE), Positive Long (NL) Positive Middle (NM), Positive Short (NS). На фиг.3 и фиг. 4 са представени функциите на принадлежност на размитите множества на входно-изходните величини e , Δe , k , T_i и T_d .



Фиг. 3. Функции на принадлежност на размитите множества на входните величини e и Δe



Фиг. 4. Функции на принадлежност на размитите множества на изходните величини k , T_i и T_d

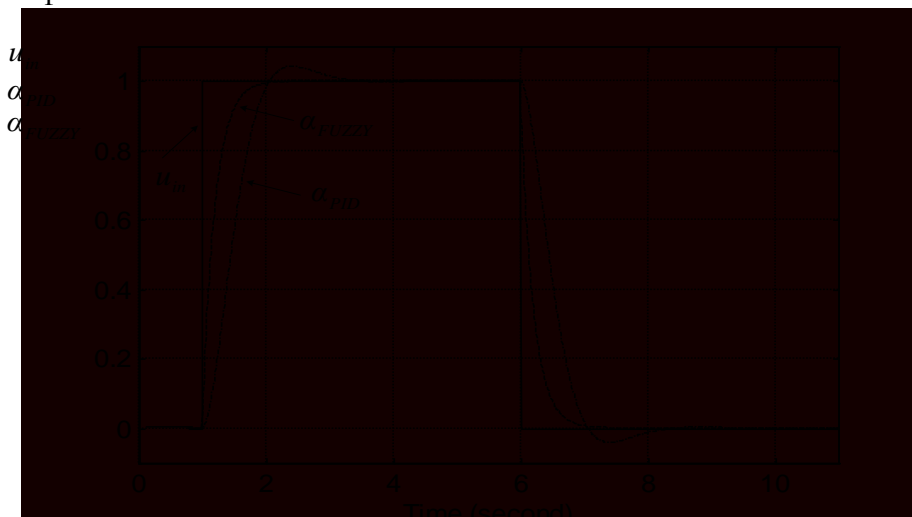
Правилата, изграждащи логиката на размития регулатор, са представени в табл. 1.

Табл. 1

$k / T_i / T_d$		Δe						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e	NB	PB/PB/NB	PB/PB/NB	PM/PB/NM	PM/PB/NM	PS/PM/NS	ZO/PM/ZO	ZO/PS/ZO
	NM	PB/PB/NB	PB/PB/NB	PM/PB/NM	PS/PM/NS	PS/PM/NS	ZO/PS/ZO	NS/ZO/ZO
	NS	PM/ZO/NB	PM/PS/NM	PM/PM/NS	PS/PM/NS	ZO/PS/ZO	NS/PS/PS	NS/ZO/PS
	ZO	PM/ZO/NM	PM/PS/NM	PS/PS/NS	ZO/NS/ZO	NS/PS/PS	NM/PS/PM	NM/ZO/PM
	PS	PS/ZO/NM	PS/ZO/NS	ZO/ZO/ZO	NS/ZO/PS	NS/ZO/PS	NM/ZO/PM	NM/ZO/PB
	PM	PS/NB/ZO	ZO/NS/ZO	NS/NS/PS	NM/NS/PM	NM/NS/PM	NM/NS/PB	NB/NB/PB
	PB	ZO/NB/ZO	ZO/NM/ZO	NM/NM/PS	NM/NM/PM	NM/NS/PM	NB/NS/PB	NB/NB/PB

Числен експеримент

На база разработения математичен модел, описващ работата на електрохидравличната следяща система от фиг. 1 в динамичен режим, е съставен съответстващ аналогов модел. За моделиране и симулиране на преходните процеси, протичащи в автоматичната система, е използван Matlab Simulink. На фиг.5 са представени преходните процеси в автоматичната система при единично степенчато изменение на входния сигнал при използване на класически ПИД регулатор и синтезирания размит самонастройващ се ПИД регулатор, съответстващ на фиг.2.



Фиг. 5. Преходни процеси в електрохидравличната система

Получените преходни процеси за автоматичната електрохидравлична система от фиг. 5 са получени при следните настройки на регулаторите: с използване на класически ПИД регулатор – $k = 1.02$, $T_i = 4.23 s$ и $T_d = 0.025 s$; с използване на размит самонастройващ се ПИД регулатор диапазоните на изменение са - $0 < k \leq 2$, $0.1 s \leq T_i \leq 8 s$ и $0 \leq T_d \leq 0.8 s$.

ИЗВОДИ

Чрез разработения математичен модел могат да бъдат изследвани динамичните процеси в автоматична електрохидравлична следяща система с ротационен изпълнителен механизъм от фиг.1 при използване на класически ПИД регулатор или размит самонастройващ се ПИД регулатор с променливи коефициенти. Използването на синтезирания размит регулатор води до подобряване на качеството на преходните процеси - процеса протича по апериодичен закон и времетраенето му намалява чувствително.

REFERENCES

- AL-Assady, A. A. Hassan, M. Talib, J. AL-Khafaji. (2013). *Design and Analysis of Electro-Hydraulic Servo System for Speed Control of Hydraulic Motor*. Jurnal of Engineering, Number 5, Volume 19, May, Baghdad.
- Basmenj, A., A. Sakhavati, Jafarghafuri, (2014). *PID Controller Design for Position Control of Electrohydraulic Actuators Using Imperialist Competitive Algorithm*. Indian J. Sci. Res., 1(1), pp. 775-779.
- Detiček, E. Župer. (2011). *U An Intelligent Electro-Hydraulic Servo Drive*. Journal of Mechanical Engineering 57 Positioning, Slovenia.
- Harris, C., C. Moore and M. Brown. (1994). *Intelligent control - Aspects of Fuzzy Logic and Neural Nets*. World Scientific, London.
- Hassan, J., Saif Yousif Ibrahim. (2009). *An Experimental Study Into The Effect of Temperature and Pressure on The Hydraulic System*. Eng. & Tech. Jurnal, Vol.27, No.14, Mechanical Engineering Department, University of Technology – Baghdad.
- Jovanovic, M. (2012). *Nonlinear Control of an Electrohydraulic Velocity Servosystem*. Proceedings of the American Control Conference Anchorage, AK May 8-10.
- Mamdani, E.. (1974). *Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant*. Proceedings IEEE, 121 , N0.12.
- Ormandzhiev, K. (2006). *Transient Processes in Electro-Hydraulic Follow-up System with Long Pressure Pipelines*. 30th SEM HIPNEF 2006, May 24 - 26, Vrnjacka Banja, , pp. 123 – 130.
- Petrov, M., I. Ganchev, A. Taneva (2002). *Fuzzy PID Control of Nonlinear Plants, Proceedings of the IEEE International Symposium on "Intelligent Systems"*. Varna, Bulgaria, 10 - 13 September, 2002, IEEE Catalog Number 02EX499, ISBN 0-7803-7601-3, Vol. 1, pp. 30 - 35.
- Shafiabadi, M., M. Jahanshahi, A. Bidaki. (2012). *Feedback Error Learning using Laguerre-based Controller to Control the Velocity of an Electro Hydraulic Servo System*. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 6(10), pp. 222-230.
- Xu, M., B. Jin, G. Chen, J. Ni. (2013). *Speed-Control of Energy Regulation Based Variable-Speed Electrohydraulic Drive*. Strojnicki vestnik – Journal of Mechanical Engineering 59(2013)7-8, pp. 433-442.