

Využitie fuzzy regulátorov pri kaskádovom riadení chemického reaktora (1)

V posledných rokoch sa pri modelovaní a riadení nelineárnych systémov stále viac využívajú algoritmy, odvodené na princípoch fuzzy logiky. Jedným z perspektívnych modelov a z nich odvodených regulátorov je fuzzy inferenčný systém typu Takagi-Sugeno. Spája výhody fuzzy a klasického prístupu a umožňuje efektívny návrh regulátora, ktorý spĺňa požiadavky na odolnosť i kvalitu regulácie. Regulátor uvedeného typu možno použiť i pri kaskádovom riadení chemického reaktora s poruchou.

Úvod

V 2. polovici 20. storočia, keď vznikli nové vedecké disciplíny a začala sa stále vo väčšej miere uplatňovať výpočtová technika, objavil sa aj problém opisu nepresných pojmov. V roku 1965 Lotfi A. Zadech, profesor kalifornskej univerzity v Berkley, publikoval článok o fuzzy množinách [1]. Tento článok znamenal začiatok rozvoja modifikovanej teórie množín, tzv. fuzzy množín ako nástroja na matematický opis vágnych a nepresných pojmov.

V praxi nastáva podobná situácia napr. pri riadení procesov. Operátor regulujúci proces vie na základe skúsenosti opísať svoju činnosť. Opis činnosti je v prirodzenom jazyku, ale takýto opis nevieme priamo použiť na prepis do matematických foriem. Riešenie poskytuje fuzzy logika, ktorá umožňuje modelovať činnosť opísanú v prirodzenom jazyku. Výsledkom je fuzzy regulátor – riadiaci algoritmus, napodobňujúci správanie operátora. Opis regulácie sa zjednodušuje na použitie pravidiel typu Ak predpoklad – potom záver.

Prácu fuzzy regulátora tvorí niekoľko krokov: zistia sa stupne príslušnosti vstupných veličín pre jednotlivé lingvistické termíny použité v pravidlách (fuzzifikácia). Pre každé pravidlo sa vyhodnotí premisa (ľavá strana pravidla) ako konjunkcia jednotlivých výrazov. Na výpočet konjunkcie sa používajú tzv. t-normy, ktoré sú zovšeobecnením logického súčinu v intervale $<0,1>$. Výsledkom je stanovenie miery významnosti pravidla, podľa ktorej sa upraví konzekvent (termíny na pravej strane pravidiel). Všetky upravené konzekventy sa zložia do jednej fuzzy množiny. Z výslednej fuzzy množiny sa tzv. defuzzifikáciou získa ostrá hodnota, ktorá je výstupom fuzzy regulátora.

Fuzzy regulátory poskytujú dobré výsledky aj v situáciách, keď klasické regulátory bez dodatočnej logiky zlyhávajú alebo sa stávajú nestabilnými. Fuzzy regulátory sú odolné, netreba ich meniť (alebo len málo) pri zmene podmienok, niekedy dokonca ani pri zmene celého procesu. Sú relatívne jednoduché, sú vhodné, ak je regulovaný proces zložitý, pretože priebeh regulácie je opísaný v prirodzenom jazyku. Proces nemusí byť identifikovaný, takže regulátor môže byť lacnejší, odpadne testovanie procesu pri rôznych podmienkach. Regulátory fuzzy sú tiež typu P, PI, PD, PID ako v klasickej regulačnej technike.

Na praktickom rozšírení fuzzy regulátorov majú najväčšiu zásluhu Japonci, ktorí začali s väčším nástupom fuzzy v r. 1987.

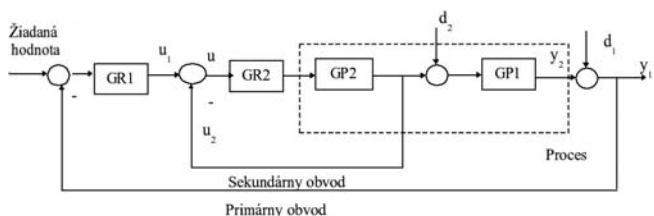
Fuzzy systémy sa nedokážu učiť, ale v súčasnosti sa kombinujú s neurónovými sieťami do rôznych hybridných systémov. Jeden z typov je neuro-fuzzy systém, ktorý sa navonok javí ako fuzzy systém, ale je realizovaný neurónovou sieťou. Najznámejšími architektúrami neuro-fuzzy systémov sú ANFIS, NARA, FALCON.

Chemické reaktory tvoria podstatné časti chemických technológií, ale z hľadiska riadenia, keďže ide o nelineárne procesy s časovo premenlivými parametrami, patria k najťažšie zvládnuteľ-

ným procesom. Bývajú problémom štandardného jednoduchého riadenia, preto sa ukazuje vhodným spôsobom uplatnenie fuzzy riadenia.

Kaskádové riadenie

Ak na regulovanú veličinu vplývajú neznáme poruchy alebo regulovaná veličina má typické nelineárne správanie, jednou z najpoužívanejších metód na zvýšenie kvality regulácie je kaskádové riadenie. Štruktúra regulačného obvodu v kaskádovom zapojení je na obr. 1.



Obr.1 Kaskádové riadenie

Súčasné metódy výpočtu koeficientov regulátorov v kaskádovom zapojení vychádzajú z klasických metód a predpokladajú dvojetapový spôsob výpočtu koeficientov. Sekundárny regulátor je nastavovaný na základe dynamického modelu vnútorného obvodu a primárny regulátor je nastavovaný na základe dynamického modelu vonkajšieho procesu, ktorý zahŕňa aj sekundárny obvod. Môže sa teda stať, že ak je sekundárny regulátor z nejakého dôvodu zle nastavený, je vlastne zle nastavený aj primárny regulátor. Parametre primárneho a sekundárneho regulátora môžu byť vypočítané na základe mnohých známych postupov [2].

Riadený systém

Predpokladáme, že riadeným systémom je prietokový chemický reaktor s dokonalým miešaním reakčnej zmesi a s dvoma paralelnými exotermickými reakciami 1. poriadku typu $A \xrightarrow{k_1} B$, $A \xrightarrow{k_2} C$.

$q = 0,015 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$	$c_p = 4,02 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
$V = 0,23 \text{ m}^3$	$c_{pc} = 4,182 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
$V_C = 0,21 \text{ m}^3$	$A = 1,51 \text{ m}^2$
$\rho = 1020 \text{ kg m}^{-3}$	$k = 42,8 \text{ kJ m}^2 \text{ min}^{-1} \text{ K}^{-1}$
$\rho_C = 998 \text{ kg m}^{-3}$	
$k_{10} = 1,55 \cdot 10^{11} \text{ min}^{-1}$	$E_2/R = 22019 \text{ K}$
$k_{20} = 4,55 \cdot 10^{25} \text{ min}^{-1}$	$\Delta_r H_1 = -8,6 \cdot 10^4 \text{ kJ kmol}^{-1}$
$E_1/R = 9850 \text{ K}$	$\Delta_r H_2 = -1,82 \cdot 10^4 \text{ kJ kmol}^{-1}$
$c_{Av} = 4,22 \text{ kmol m}^{-3}$	$\vartheta_v = 328 \text{ K}$
$c_{Bv} = 0 \text{ kmol m}^{-3}$	$\vartheta_{cv} = 298 \text{ K}$
$c_{Cv} = 0 \text{ kmol m}^{-3}$	
$q^s_c = 0,004 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$	$c^s_A = 0,4915 \text{ kmol m}^{-3}$
$\vartheta^s = 363,61 \text{ K}$	$c^s_B = 2,0042 \text{ kmol m}^{-3}$
$\vartheta^s_c = 350,15 \text{ K}$	$c^s_C = 1,7243 \text{ kmol m}^{-3}$

Tab.1 Hodnoty parametrov chemického reaktora

Pri optimálnej teplote vzniká z východiskovej látky A produkt B, ale pri vyššej teplote vzniká nežiaduci produkt B. Zjednodušený nelineárny matematický model reaktora tvorí 5 diferenciálnych rovníc [2]. Parametre reaktora sú uvedené v tab. 1.

S cieľom získať parametre regulátorov bol reaktor identifikovaný ako sústava 1. rádu s dopravným oneskorením.

$$G_p(s) = \frac{K}{T_S + 1} e^{-Ds} \quad (1)$$

Parametre náhradného prenosu časová konštanta T , zosilnenie K a dopravné oneskorenie D sa získali na základe simulácie reakcie reaktora na skokovú zmenu prietoku chladiaceho média v pôvodnom nelineárnom modeli procesu [3].

Experimentálne výsledky

Na simuláciu riadenia reaktora sa použil jeho nelineárny model. Žiadaná optimálna hodnota teploty reakčnej zmesi v reaktore bola 359 K, pri ktorej sa získa maximálne množstvo produktu B. Poruchovou veličinou, vyskytujúcou sa na vstupe do reaktora, bola meniac sa teplota v_{cv} vstupného prúdu chladiaceho média, vstupujúceho do plášťa reaktora. Táto teplota sa v čase 100 min. zmenila z hodnoty 298 na 328 K a v čase 200 min. opäť poklesla na hodnotu 293 K.

Reaktor s výskytom poruchy bol riadený v jednoduchom spätnoväzbovom obvode riadenia a výsledky boli porovnané s kaskádovou reguláciou.

Spätnoväzbové riadenie

Pri návrhu spätnoväzbového regulátora sa použili identifikované parametre prenosovej funkcie (1): $K = -1257$, $T = 14$ min., $D = 2$ min. Prenos PID regulátora sa predpokladal vo forme:

$$G_C(s) = K_C \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (2)$$

Na návrh parametrov regulátorov je známe veľké množstvo metód. Pri návrhu riadenia reaktora boli vyskúšané viaceré z nich, v príspevku sa uvádzajú iba tri, ktorými sa dosiahli najlepšie výsledky, posudzované na základe porovnania hodnôt integrálu absolútnej a kvadratickej odchýlky riadenia.

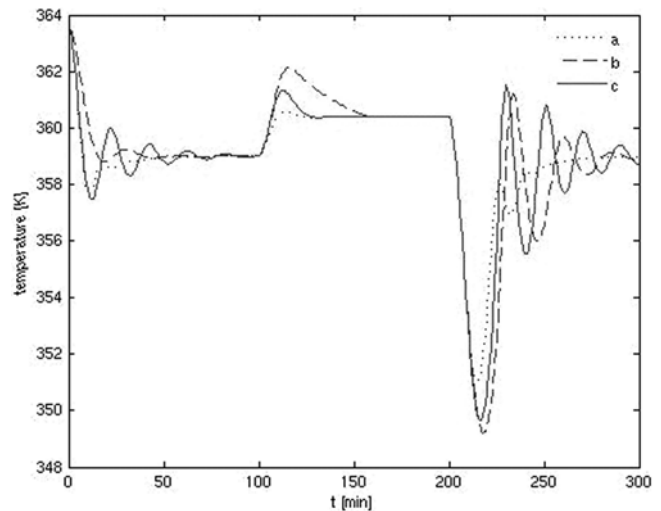
Dopravné oneskorenie možno aproximovať rôznymi spôsobmi. Pri aproximácii dopravného oneskorenia Padého rozvojom 1. rádu v tvare (3) sa parametre PID regulátora vypočítajú zo vzťahov uvedených v tab. 2 pre PID1 [6].

regulátor	K_C	T_I	T_D
PID1	$\frac{2T+D}{K(2\lambda+D)}$	$T + \frac{D}{2}$	$\frac{TD}{(2T+D)}$
PID1	$\frac{T_I}{K(\lambda+D)}$	$T + \frac{D^2}{2(\lambda+D)}$	$D^2 \left(1 - \frac{D}{3T_I} \right) / (2\lambda+D)$
PID3	$\frac{0,95T}{KD}$	$2,4D$	$0,42D$

Tab.2 Nastavovanie parametrov PIDregulátora pre sústavu 1. rádu s dopravným oneskorením

regulátor	K_C	T_I	T_D	iae	ise
PID1 $\lambda = 0,5 D$	-0,0127	16,0	1,75	308	950
PID1 $\lambda = 2 D$	-0,0019	14,33	0,32	444	1807
PID3	-0,0053	19,60	0,94	328	960

Tab.3 Parametre PID regulátorov v spätnoväzbovom obvode riadenia



Obr.2 Riadenie reaktora v spätnoväzbovom obvode

$$e^{-Ds} = \frac{1-0,5Ds}{1+0,5Ds} \quad (3)$$

Ak sa prenos regulátora nahradí prvými tromi členmi Maclaurinového rádu, parametre PID regulátora sa vypočítajú zo vzťahov uvedených v tab. 2 pre PID2 [7]. Ide o IMC metódu nastavovania parametrov PID regulátora, v oboch prípadoch má na kvalitu regulácie vplyv aj voľba časovej konštanty filtra λ .

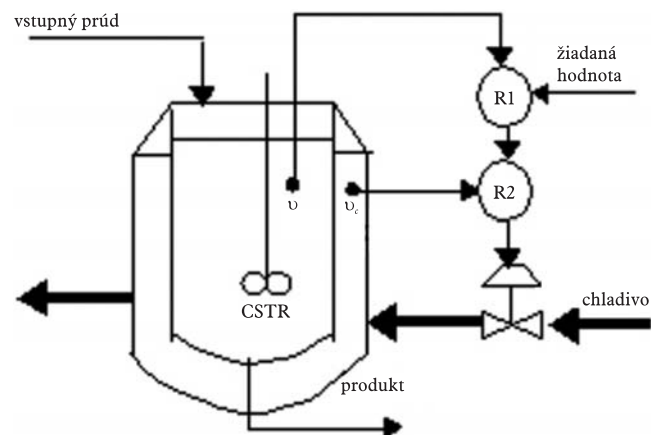
Medzi staršie, ale pomerne často používané pravidlá patria aj nastavovacie pravidlá Chiena, Hronesa a Reswicka [4], ktoré vychádzajú zo Zieglerovej-Nicholsovej metódy. V tab. 2 sú uvedené pre aperiodický priebeh regulačného pochodu.

Konkrétne hodnoty parametrov regulátorov aj s hodnotami ukazovateľov kvality riadenia sú uvedené v tab. 3. Výsledky simulácie sú znázornené na obr. 2. Bodkovaná čiara je výsledkom riadenia pomocou regulátora PID1, plná čiara je výsledkom riadenia pomocou regulátora PID3 a čiarkovaná čiara je výsledkom riadenia regulátorom PID2.

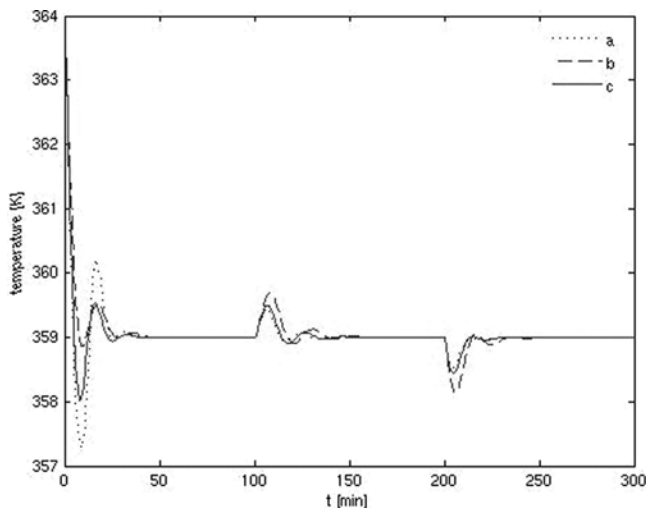
Kaskádové riadenie

V prípade riadenia reaktora s poruchami pomocou rozvetveného spätnoväzbového obvodu s pomocnou riadenou veličinou je riadenou veličinou teplota reakčnej zmesi v reaktore, jej žiadaná hodnota vstupuje do primárneho spätnoväzbového obvodu. Sekundárnou výstupnou veličinou je teplota chladiacej zmesi v plášti reaktora, žiadaná hodnota teploty chladiča je na výstupe z regulátora v primárnom spätnoväzbovom obvode. Akčnou veličinou je prietok chladiča. Meniac sa teplota vstupného prúdu chladiaceho média, ktoré vstupuje do plášťa reaktora, je poruchovou veličinou.

Kaskádové riadenie chemického reaktora je znázornené na obr. 3.



Obr.3 Schéma kaskádového riadenia chemického reaktora



Obr.4 Kaskádové riadenie reaktora

regulátor	K_C	T_I	T_D	iae	ise
PID1 $\lambda = 0,5 D$	6,39	5,75	0,65	38	65
PID1 $\lambda = 2 D$	2,92	5,25	0,23	38	62
PID3	5	5	0,75	31	53

Tab.4 Parametre primárneho regulátora pri kaskádovom riadení reaktora

Regulátor v sekundárnom obvode bol navrhnutý ako P-R so zosilnením $K_C = -0,005$ na základe parametrov identifikovaného modelu: $K_2 = -2815$, $T_2 = 12$ min., $D_2 = 0,1$ min.

Parametre regulátora v primárnom obvode boli vypočítané z parametrov $K_1 = 0,4$, $T_1 = 5$ min., $D_1 = 1,5$ min. Sú to parametre prenosu, ktorý opisuje vplyv teploty v plášti reaktora na teplotu reakčnej zmesi, pričom v činnosti je aj sekundárny regulačný obvod.

Konkrétne hodnoty parametrov primárneho regulátora vypočítané pomocou uvedených metód aj s hodnotami ukazovateľov kvality riadenia sú uvedené v tab. 4. Výsledky simulácie sú znázornené na obr. 4. Bodkovaná čiara je výsledkom riadenia pomocou regulátora PID1, plná čiara je výsledkom riadenia pomocou regulátora PID3 a prerušovaná čiara je výsledkom riadenia regulátorom PID2.

Kaskádové riadenie výrazne zlepšuje výsledky riadenia reaktora pri výskyte poruchy.

Literatúra

- [1] ZADECH, L. A. (1965): Fuzzy sets. *Inf. & Control* 8, 338-353.
- [2] BAKOŠOVÁ, M., VASIČKANINOVÁ, A., KARŠAIOVÁ, M., AND ONDROVIČOVÁ, M., (2004). PID controller tuning for cascade control of a chemical reactor. In: *Proc. 6. International Scientific-Technical Conf. Process Control 2004*. Kouty nad Desnou. University of Pardubice, p. 63. ISBN 80-7194-662-1
- [3] FIKAR, M., MIKLEŠ, J. (1999). *Identifikácia systémov*. Bratislava, STU. 114. ISBN 80-227-1177-2.
- [4] OGUNNAIKE, B. A. AND RAY, W. H. (1994). *Process Dynamics, Modeling, and Control*. 536-541. Oxford University Press. New York. 1259. ISBN 0-19-509119-1.
- [5] LÅSTRÖM, K. J. AND HÅGGLUND, T. (1995). *PID controllers: Theory, Design and Tuning*. Instrument Society of America. Research Triangle Park.
- [6] RIVERA, D. E., MORARI, M., AND SKOGESTAD, M. (1986). *Internal Model Control, 4. PID Controller Design, and Eng. Proc. Des. Dev.*, 23. 1986.
- [7] MORARI, M. AND ZAFIRIOU, F. (1989). *Robust Process Control*. Chapter, Prentice-Hall, NJ
- [8] SUGENO, M. AND YASUKAWA, T. (1993). A fuzzy logic approach to qualitative modelling. *IEEE trans. FS*, 1, 1, 7 – 31.
- [9] JANG, S. R. (1993). Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference Systems, *IEEE Trans. Systems, Man & Cybernetics* 23, 665 – 685.
- [10] NAUCK, D., KLAWONN, F. AND KRUSE, R. (1997). *Foundations of neuro-fuzzy systems*. John Wiley&Sons, Great Britain.

Pokračovanie v budúcom čísle.

Ing. Anna Vasičkaninová
doc. Ing. Monika Bakošová
doc. Ing. Ján Dvoran, PhD.

48

FCHPT STU
Katedra informatizácie a riadenia procesov,
Radlinského 9, 81237 Bratislava,
e-mail: anna.vasickaninova@stuba.sk
monika.bakosov@stuba.sk
jan.dvoran@stuba.sk