

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKEJ A POTRAVINÁRSKEJ TECHNOLOGIE
ÚSTAV INFORMATIZÁCIE, AUTOMATIZÁCIE A MATEMATIKY
Oddelenie matematiky

Diplomová práca

Fuzzy riadenie s vnútorným modelom sústavy (IMC)

Bc. Tomáš Rubický

2009

Čestne prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne
a použitú literatúru som uviedol.

Podakovanie

Ďakujem p. Ing. Anne Vasičkaninovej za rady, odbornú pomoc, ochotu a trpezlivosť pri vypracovaní tejto diplomovej práce.

OBSAH

ÚVOD.....	5
TEORETICKÁ ČASŤ	
1. FUZZY SYSTÉMY.....	6
1.1 Fuzzy logika.....	6
1.2 Fuzzy množiny.....	6
1.2.1 Príklad fuzzy množiny.....	7
1.3 Fuzzy odvodzovanie.....	7
1.3.1 Jazyková premenná.....	8
1.3.2 Metódy približného odvodzovania.....	8
1.3.3 Príklad fuzzy uvažovania.....	10
1.4 Fuzzy regulátory.....	13
1.4.1 Mamdaniho fuzzy regulátor.....	13
1.4.2 Defuzzifikácia.....	16
1.4.3 Tagaki-Sugenov fuzzy regulátor.....	17
2. METÓDA ANFIS.....	19
2.1 Architektúra siete ANFIS.....	19
2.2 Postup výpočtu pomocou metódy ANFIS v toolboxe MATLABU.....	20
3. VNÚTORNÝ MODEL SÚSTAVY (IMC).....	21
3.1 Princíp metódy s vnútorným modelom.....	21
3.2 Návrh PID regulátora metódou IMC.....	24
3.3 Vnútorná stabilita.....	26
3.4 Implementácia klasickej štruktúry a IMC.....	28
3.5 IMC štruktúra a robustnosť.....	28
PRAKTICKÁ ČASŤ	
4. REGULÁCIA CHEMICKÉHO REAKTORA.....	30
4.1 Matematický model.....	30
4.2 Realizácia regulátora.....	31
4.3 Vyhodnotenie.....	35
ZÁVER.....	37
DODATOK.....	38
POUŽITÁ LITERATÚRA.....	40

ÚVOD

*Ak matematika popisuje realitu, nie je presná.
A ak je presná, nepopisuje realitu.*

Albert Einstein

Už dávno samotný Albert Einstein vyjadril názor, že „klasickou“ matematikou sa realita presne popísať nedá. Tento výrok ilustruje aj nasledujúci príklad: je skupina mladých a starých ľudí a úlohou je vytvoriť dve príslušné množiny. Do prvej množiny treba priradiť mladých ľudí a do druhej starých. V skutočnosti však, kto je mladý a kto starý? Je mladý človek ten, ktorý má 35 rokov? A ak je mladý, stáva sa starým, keď dosiahne vek 36 rokov? Realita je jednoducho relatívna...

Takéto „relatívne pojmy“ sa prakticky vyskytujú v bežnom živote denne: auto ide nízkou rýchlosťou 65 km/hod... ide auto naozaj nízkou rýchlosťou? Ak pôjde auto rýchlosťou 66 km/hod, dá sa hovoriť už o vysokej rýchlosti? Evidentne je často problém určiť hraničné body, ktoré sú nutné pri zavádzaní klasických množín [1].

Ako teda presnejšie, reálnejšie popísať skutočnosť? Riešenie ponúkol v roku 1965 profesor Kalifornskej univerzity v Berkley, Lotfi A. Zadeh, ktorý publikoval článok o fuzzy množinách, a tak ako prvý definoval pojem fuzzy logika. Slovo fuzzy znamená neostrý, matný, mlhavý, neurčitý, vágny a zodpovedá tomu aj to, čím sa fuzzy teória zaoberá: snaží sa pokryť realitu v jej nepresnosti a neurčitosti [1].

V klasickej teórii množín prvok do množiny buď patrí (úplné členstvo v množine) alebo nepatrí (žiadne členstvo v množine). Fuzzy množina je množina, ktorá okrem úplného alebo neúplného členstva pripúšťa aj členstvo čiastočné. To znamená, že prvok patrí do množiny s určitou pravdepodobnosťou (stupeň príslušnosti) [1].

Fuzzy logika našla svoje uplatnenie aj v praxi riadenia procesov. Existujú desiatky prípadov, kedy riadiaci systém zlyháva a vyžaduje časté zásahy od operátora. Práve vtedy je možnosť využiť fuzzy riadenie, teda riadenie, ktoré napodobuje experta-operátora tým, že sa snaží využiť jeho znalosti nadobudnuté pri riadení daného procesu. Fuzzy regulátor nie je potom nič viac a nič menej než statická nelineárna funkcia, ktorá je však definovaná neštandardným spôsobom – množinou produkčných pravidiel a zodpovedajúcimi funkciami príslušnosti, odvodenými z praxe [2].

Prednosti fuzzy regulácie sú hlavne v koncepcnej jednoduchosti, flexibilita (ľahké pridávanie ďalších pravidiel), robustnosti vzhľadom k nepresným údajom, možnosti realizovať akúkoľvek zložitú nelineárnu funkciu, možnosti jednoduchého prepisu pravidiel stanovených expertom do počítačového algoritmu, možnosti kombinovať konvenčný regulátor (P, PD, PI, PID) s fuzzy logikou a skutočnosť, že fuzzy logika je založená na prirodzenom jazyku [2].

TEORETICKÁ ČASŤ

1. FUZZY SYSTÉMY

1.1 Fuzzy logika

Fuzzy logika je odbor matematiky odvodený z teórie fuzzy množín, v ktorom sa logické výroky ohodnocujú stupňom príslušnosti (tiež index vágnosti), ktorého hodnoty sú v intervale od 0 do 1. V klasickej výrokovej a predikátovej logike, sa výroky ohodnocujú buď ako pravdivé, alebo nepravdivé — v binárnom vyjadrení ako 1 alebo 0. Fuzzy logika je vhodnejšia pre množstvo reálnych rozhodovacích úloh. Používa sa napríklad v umývačkách riadu, pračkách, autopilotoch, parkovacích senzoroach atď..

Fuzzy logika bola formulovaná roku 1965 Lotfím A. Zadehom z Kalifornskej univerzity v Berkeley. Funkcia príslušnosti vo fuzzy logike umožňuje priradiť príslušnosť k množinám v rozmedzí od 0 do 1, vrátane oboch hraničných hodnôt. Fuzzy logika tak umožňuje matematicky vyjadriť pojmy ako „trochu“, „dosť“ alebo „veľa“. Presnejšie, umožňuje vyjadriť čiastočnú príslušnosť k množine.

Stupeň príslušnosti je často zamieňaný s pravdepodobnosťou. Tieto pojmy sú ale rozdielne. Fuzzy hodnota je priradená funkcii príslušnosti k vágne definovaným množinám a nepredstavuje pravdepodobnosť nejakého javu. Príkladom môže byť napríklad 30 ml vody v 100 mililitrovom pohári spolu s dvoma fuzzy množinami: *plná* a *prázdna*. Čiastočne naplnený pohár potom pripadá z 0,7 k *prázdnej* a z 0,3 k *plnej*.

Fuzzy logika sa používa, ak sa systém nedá exaktne opísať a je v ňom veľký rozptyl hodnôt. Príkladom je ľudská reč. Ľudská reč (prevedená do počítača ako napr. wav súbor) sa dá zapísať ako poradie nejakých hodnôt v čase. Ale ani ten istý človek nepovie to isté slovo úplne rovnako, a preto pre to isté slovo od toho istého človeka sú vytvorené dva rôzne wav súbory, ktoré sa ale graficky podobajú. Keď sa však porovnávajú bajt po bajte, tak sa nerovnajú. Na riešenie tohto problému možno použiť fuzzy logiku.

Čo sú fuzzy hodnoty? Napríklad, keď je potrebné vyjadriť, či je človek bohatý alebo chudobný. U niektorých ľudí sa to dá povedať jasne, napr. Bill Gates je jasne bohatý a bezdomovec je jasne chudobný. Ale u mnohých ľudí sa to tak jasne povedať nedá. U väčšiny ľudí sa to dá povedať zhruba: je na 60 % chudobný a na 40 % bohatý. Alebo ešte inak: niekedy je nemožné rozhodnúť či áno alebo nie – je to skôr na 30 % áno a na 70 % nie. Ak existuje len jedna takáto otázka-odpoveď, tak je možné povedať, dobre, tak keď 70 % áno, tak áno. Ale keď existuje takýchto áno/nie odpovedí na jednu tému veľa, tak tu nastupuje fuzzy logika [3].

1.2 Fuzzy množiny

Formálne sú fuzzy množiny zovšeobecnením klasických množín. Pod pojmom fuzzy množina sa zvyčajne rozumie matematický aparát, ktorý definuje samotný pojem fuzzy množiny a operácie, ktoré možno s fuzzy množinami robiť. Ak sú uvažované klasické množiny, je možné pre každý prvok x rozhodnúť, že do množiny A buď patrí (1) alebo nepatrí (0). Príslušnosť prvku x do fuzzy množiny A udáva tzv. hodnota funkcia príslušnosti, ktorá môže

nadobúdať hodnoty z intervalu $[0;1]$. Je potrebné rozlíšiť, že nejde o pravdepodobnosť, s ktorou prvok patrí do fuzzy množiny, ale skôr o silu, s ktorou do nej patrí [4].

1.2.1 Príklad fuzzy množiny

Nech je uvažované množina všetkých červených farieb. V klasickej teórii množín by sa muselo predchádzajúce tvrdenie upresniť tým, že by bola pridaná podmienka, podľa ktorej je možné rozhodnúť, či je nejaká farba červená alebo nie je červená. V bežnom zmysle sa však tomuto tvrdeniu rozumie celkom dobre. Dá sa rozlíšiť veľké množstvo červených farieb. Niektoré z nich sú viac červené, iné menej červené. Od tejto skutočnosti je už len krôčik k zavedeniu pojmu fuzzy množiny červených farieb. K ľubovoľnej farbe treba pridať reálne číslo z intervalu $[0;1]$, ktoré udáva ako veľmi je daná farba červená. Hodnota 0 značí, že ide určite o nečervenú farbu (napríklad zelenú), naopak hodnota 1 je priradená tej jedinej skutočne červenej či všetkým najčervenejším farbám.

Na základe predchádzajúceho príkladu sa zdá rozumné definovať fuzzy množinu A ako množinu všetkých usporiadaných dvojíc $x, \mu_A(x)$, kde $\mu_A(x)$ je funkcia príslušnosti (tiež charakteristická funkcia) a x patrí univerzálnej množine X .

Teda

$$A = \{[x, \mu_A(x)] : x \in X\}$$

Potom už je ľahké definovať prienik a zjednotenie fuzzy množín:

$$\begin{aligned} A \cap B &= \{[x, \mu_{A \cap B}(x)] : \mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, x \in X\} \\ A \cup B &= \{[x, \mu_{A \cup B}(x)] : \mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, x \in X\} \end{aligned}$$

Inak povedané, ak je definovaná fuzzy množina červených a oranžových farieb, dá sa jednoducho zostaviť množina všetkých farieb, ktoré sú súčasne červené a oranžové, alebo fuzzy množina všetkých farieb, ktoré sú buď červené alebo oranžové. Potom je zrejmé, že na základe pojmu fuzzy množina je možné zaviesť prirodzeným spôsobom operáciu fuzzy logiky [2].

Predchádzajúci príklad potvrdzuje teóriu, že základnými štandardnými operáciami s fuzzy množinami sú operácie prieniku, zjednotenia a poslednou je doplnok fuzzy množiny [5]:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

1.3 Fuzzy odvodzovanie

Fuzzy odvodzovanie je proces, v ktorom sa odvodzujú závery na základe informácií, ktoré obsahujú vágne pojmy. Tieto informácie sa v prvom rade sformulujú do tzv. fuzzy „Ak-potom“ pravidiel a potom sa pomocou fuzzy logiky a fuzzy množín odvodzujú príslušné závery [5].

1.3.1 Jazyková premenná

Pri fuzzy odvodzovaní je dôležitým pojmom tzv. jazyková premenná. Jednoducho možno povedať, že jazyková premenná je premenná, ktorej hodnoty sú vyjadrené pomocou slov. Napríklad *rýchlosť* je jazyková premenná, ak nie sú jej hodnoty vyjadrené konkrétnymi číselnými hodnotami, ale pomocou slov, napr.: *malá, stredná, viac-menej vysoká, vysoká, veľmi vysoká, atď.* Podobne je možné interpretovať aj *vek* ľudí ako jazykovú premennú, pretože v bežnom živote sa používajú skôr hodnoty veku vyjadrené slovami ako napr. *veľmi mladý, dosť mladý, mladý, viac-menej mladý, veľmi starý a pod.* Formálne sa zavádza jazyková premenná ako päťica:

$$(X, T(X), X, G, M),$$

kde

- X je meno jazykovej premennej,
- $T(X)$ je množina slovných hodnôt jazykovej premennej,
- X je univerzum jej hodnôt,
- G je gramatika, obsahujúca syntaktické pravidlá na vytváranie hodnôt jazykovej premennej,
- $M : T(X) \longrightarrow F(X)$ je sémantické pravidlo, ktoré každej slovnej hodnote priradí fuzzy podmnožinu univerza X , čím sa definuje jej význam [5].

1.3.2 Metódy približného odvodzovania

Zovšeobecnený modus ponens

V klasickej logike je základným pravidlom odvodzovania *modus ponens*. Jednoducho povedané, ak p a q sú nejaké výrokové formuly, tak ak vieme, že platí implikácia $p \Rightarrow q$ a platí predpoklad p , tak platí aj záver q .

$$\frac{p \Rightarrow q \quad p}{q}$$

Príklad:

Pravidlo (antecedent): Ak obsluha v reštaurácii je dobrá, **potom** sprepitné je vysoké.

Pozorovanie: Obsluha v reštaurácii je dobrá.

Záver (consequent al. succedent): Sprepitné je vysoké.

Vo fuzzy logike sa zapíše tento príklad nasledovne:

Pravidlo (antecedent): Ak X je A , **potom** Y je B

Pozorovanie: X je A'.

Záver (consequent al. succedent): Y je B'.

(*)

kde je označená premenná *obsluhu v reštaurácii* ako X a jej slovné hodnoty A resp. A' ako *dobrá* resp. *veľmi dobrá* a premenná *sprepítané* ako Y a jej slovné hodnoty *vysoké* resp. *veľmi vysoké* ako B resp. B'.

Tieto dve schémy sa zdanlivo podobajú, avšak druhá situácia sa líši od tej prvej klasickej v tom, že v nej nevystupujú klasické výroky s pravdivostnou hodnotou 0 alebo 1, ale fuzzy tvrdenia, a navyše, aktuálne pozorovanie „X je A“ sa nemusí zhodovať s predpokladom „X je A“ v pravidle.

Pretože aktuálne pozorovanie sa nemusí zhodovať s predpokladom v pravidle, pri odvodzovaní, zjednodušene povedané, treba posúdiť mieru zhody predpokladu „X je A“ v pravidle a aktuálneho pozorovania „X je A“ (určiť mieru splnenia predpokladu), a pomocou nej vhodne modifikovať záver „Y je B“ v pravidle, čím sa získa hodnota B' premennej Y prislúchajúca hodnote A' premennej X. Prirodzenou požiadavkou aj pre fuzzy odvodzovanie je, aby pre pozorovania zhodné s predpokladom v pravidle bol vždy výsledkom pozorovania záver rovnaký ako záver v pravidle. Preto je nutné vyžadovať, aby pozorovanie „X je A“ viedlo vždy k záveru „Y je B“, t.j. aby platilo

$$\text{Ak } A'=A, \text{ tak } B'=B \quad (**)$$

Proces odvodzovania podľa schémy (*), pre ktorú platí vlastnosť (**), sa nazýva *zovšeobecnený modus ponens* [5].

Kompozičné pravidlo odvodzovania

Ľuďom je blízky spôsob uvažovania, ktorý celkom prirodzene pracuje s vágne vyjadrenými hodnotami. Preto sa približné odvodzovanie môže diať aj intuitívne, na základe skúseností, bez matematických prostriedkov a formalizmu. Ak je však zámerom proces približného odvodzovania zautomatizovať, naprogramovať, naučiť pracovať s vágnymi informáciami aj stroje, tak je vhodné

- Slovné hodnoty premenných interpretovať pomocou fuzzy množín A, B
- Pomocou zadaného fuzzy pravidla: **Ak** X je A, **potom** Y je B, definovať fuzzy reláciu R (A, B) popisujúcu vzťah premenných X a Y
- Na určenie hodnoty B' premennej Y, ktorá prislúcha novej hodnote A' premennej X, použiť ako matematický prostriedok odvodzovania tzv. *kompozičné pravidlo odvodzovania*.

Uvedený postup možno schematicky znázorniť nasledovne:

(X, Y)	je R
X	je A
Y	je B', B' = A' ◦ R

S využitím uvedeného *kompozičného pravidla inferencie* sa dajú vytvárať zložité multidimenzionálne závislosti. Podmienka je vyjadrená vo forme implikácie dvoch fuzzy výrokov väčšinou ako

Ak <fuzzy výrok> **tak** <fuzzy výrok>,

často čiastočne v angličtine

IF<fuzzy výrok> **THEN** <fuzzy výrok>.

Situácie v praxi sú zvyčajne zložité, bývajú opísané viacerými pravidlami, vyjadrujúcimi vzťah medzi vstupnými premennými $X_1, \dots, X_n$ a výstupnými premennými $Y_1, \dots, Y_n$, ktoré možno modelovať pomocou fuzzy relácií. Poznatky z teórie fuzzy množín a fuzzy logiky sa využívajú vo fuzzy systémoch ako sú napr. fuzzy regulátory [5].

1.3.3 Príklad fuzzy uvažovania

Pre objasnenie základného princípu fuzzy uvažovania je možné použiť príklad z bežného života.

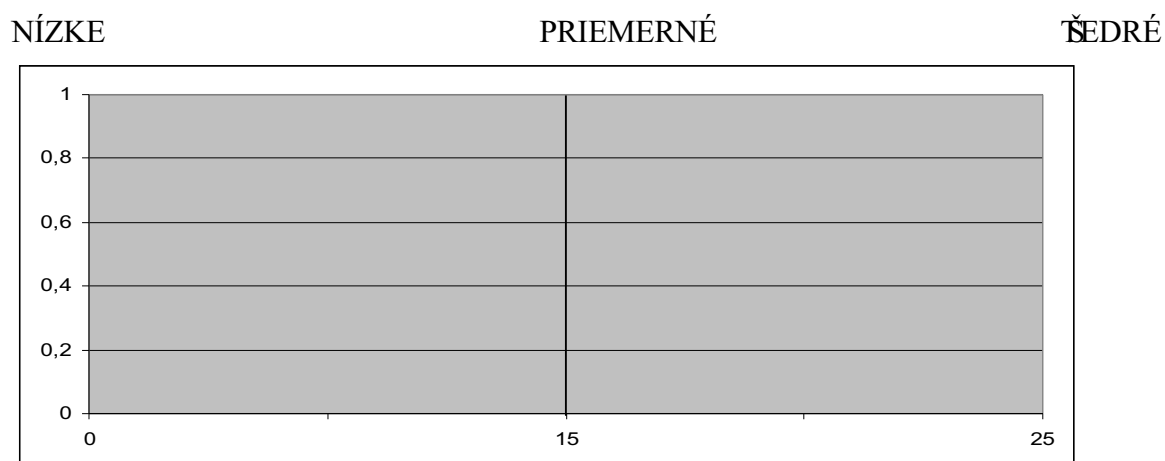
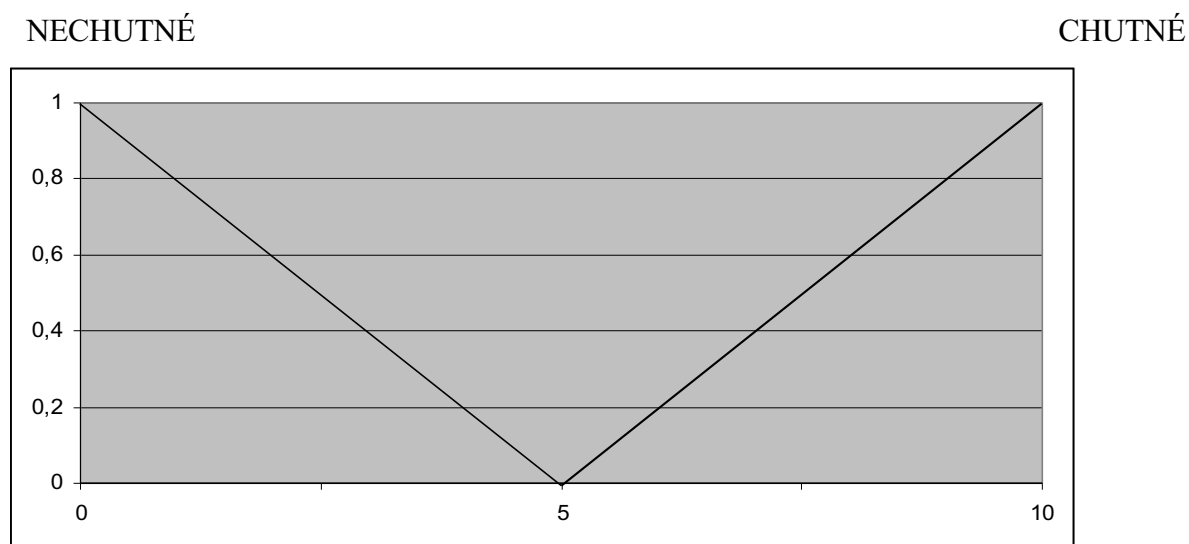
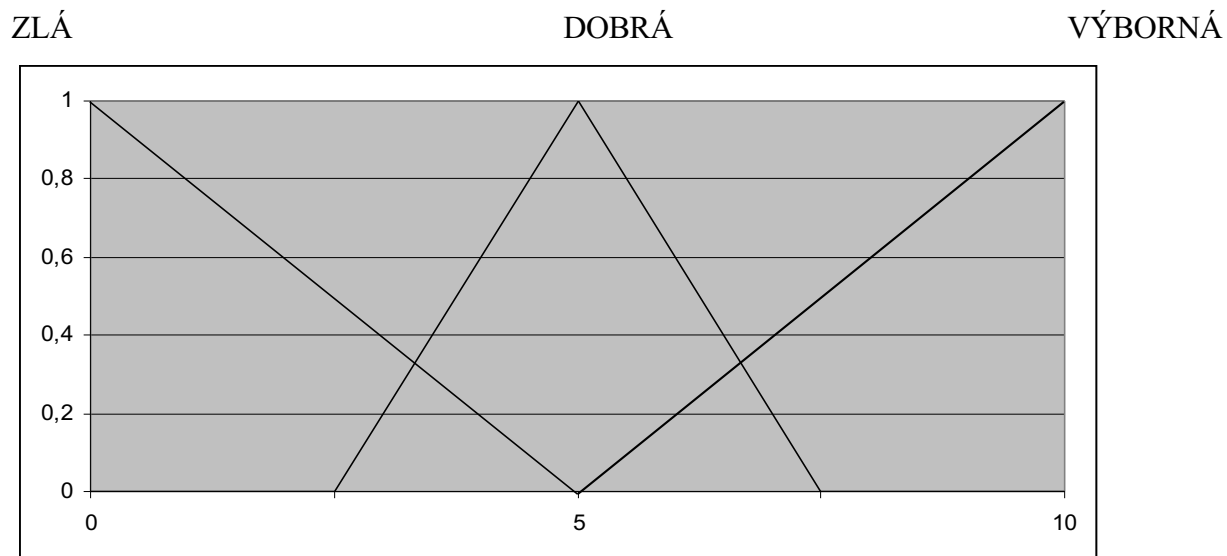
Problém sprepitného [2].

Obsluha a kvalita jedla v reštaurácii sa bude hodnotiť číslami 0 až 10, pričom 0 značí najhoršie a 10 najlepšie ocenenie. Aké by malo byť potom sprepitné, ak je predpoklad, že jeho priemerná hodnota je 15%?

Nech sú expertné pravidlá pre tento účel nasledujúce (sú získané od pravidelných návštevníkov reštaurácie):

- 1) **Ak** je obsluha zlá, **potom** je sprepitné nízke.
- 2) **Ak** je obsluha dobrá, **potom** je sprepitné priemerné.
- 3) **Ak** je obsluha výborná, **potom** je sprepitné štedré.
- 4) **Ak** je jedlo nechutné, **potom** je sprepitné nízke.
- 5) **Ak** je jedlo chutné, **potom** je sprepitné štedré.

Je potrebné zdôrazniť, že pravidlá majú formu „Ak..., potom...“, a že obsahujú určité jazykové výrazy ako zlé, nízke, dobrá, priemerné,.... Aby bolo možné použiť operáciu fuzzy logiky, je nutné dodefinovať funkcie príslušnosti týchto výrazov. V tomto prípade to znamená pre každý jazykový výraz určiť funkciu príslušnosti definovanú v intervale $[0;10]$. Z dôvodu jednoduchosti sa použije trojuholníkový tvar funkcií (triumf) pre výrazy vyjadrené v predpokladoch (to je za slovom „ak“) a impulzné funkcie (singleton) pre výrazy vyjadrené za slovom „potom“. Treba poznamenať, že impulzné funkcie sú rovné 0 všade s výnimkou jedinej hodnoty z definičného oboru. Teda príslušné jazykové výrazy nie sú fuzzy, ale sú presné alebo ostré. Konkrétne sú funkcie príslušnosti jazykových výrazov použitých v expertných pravidlách definované na obrázku *obr. 1*:



Obr. 1. Funkcie príslušnosti k problému sprepitného

Teraz je už možné určiť sprepitné použitím fuzzy inferencie. Fuzzy inferencia je proces, v ktorom sa daným spôsobom priradzuje výstup použitím fuzzy logiky. Tento proces sa skladá z troch krokov:

Fuzzifikácia: Prevedenie aktuálnych vstupov na miery pravdivosti výrokov vyskytujúcich sa v časti „ak“.

Inferencia: Spracovanie množiny pravidiel. Vyhodnotenie stupňa pravdivosti predpokladu (časti „ak“) a určenie príslušnosti výstupu (časť „potom“) pre každé pravidlo.

Defuzzifikácia: Výpočet numerickej hodnoty výstupu vážením výsledných funkcií príslušnosti jednotlivých pravidiel.

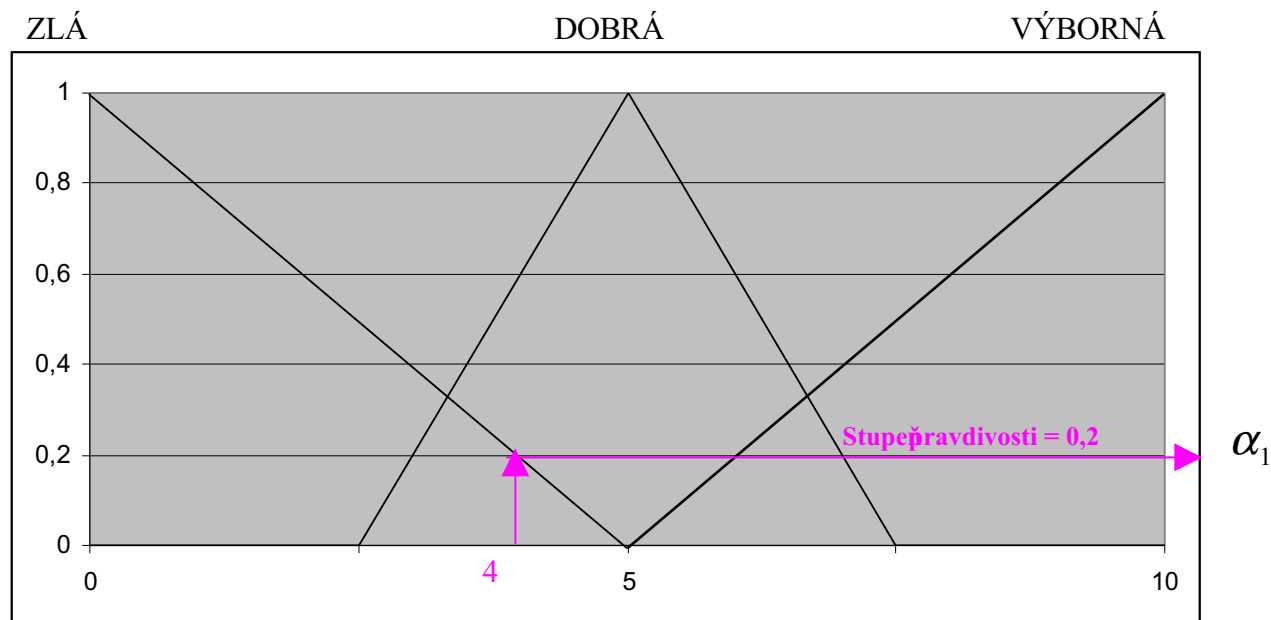
Celý postup bude teraz objasnený na probléme sprejitného. Najprv treba uvažovať pravidlo 1):

Ak je obsluha zlá, **potom** je sprejitné nízke.

V tomto pravidle sa vyskytuje iba jeden výrok „obsluha je zlá“, ktorý hodnotí obsluhu. Nech je ohodnotená číslom 4. Stupeň pravdivosti tohto pravidla, nech je to α_1 , je teda určený funkciou príslušnosti zodpovedajúcemu výrazu zlá a to spôsobom naznačeným na obrázku *obr. 2*. V prípade, že predpoklad pravidla obsahuje viacej výrokov spojených spojkou „a“, treba najprv určiť miery pravdivosti všetkých výrokov a potom treba za stupeň pravdivosti pravidla zobrať v zhode so vzťahom

$$A \cap B = \{[x, \mu_{A \cap B}(x)] : \mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, x \in X\}$$

minimum týchto hodnôt.



Obr. 2. Určenie miery pravdivosti pravidla

Podobným spôsobom sa priradí stupeň pravdivosti ostatným pravidlám. Ak bola obsluha ocenená číslom 4 a jedlo číslom 6, boli obdržané nasledujúce stupne pravdivosti pravidiel.

$$\alpha_1 = 0,2; \alpha_2 = 0,6; \alpha_3 = 0; \alpha_4 = 0; \alpha_5 = 0,2$$

Pretože všetky funkcie príslušnosti výstupu (časti „potom“) sú impulzné funkcie, nie je potrebné špeciálne ich vyhodnocovať. Zostáva už len určiť numerickú hodnotu sprepitného. Tu sa určí vážený priemer hodnôt výstupu definovaných v pravidlách uvedených na začiatku tieto časti podľa vzťahu:

$$y = \frac{\alpha_1 y_1 + \alpha_2 y_2 + \dots + \alpha_5 y_5}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_5} = 15$$

Treba dodať, že sa môžu použiť aj iné metódy defuzzyfikácie. Práve uvedený spôsob (Sugeno constant conclusions) je však výhodný pre realizáciu priemyslových fuzzy regulátorov, pretože vhodnou voľbou expertných pravidiel ide ľahko dosiahnuť aj krajné hodnoty výstupného rozsahu. Úplné otvorenie alebo uzavretie ventilu je príklad takejto požiadavky.

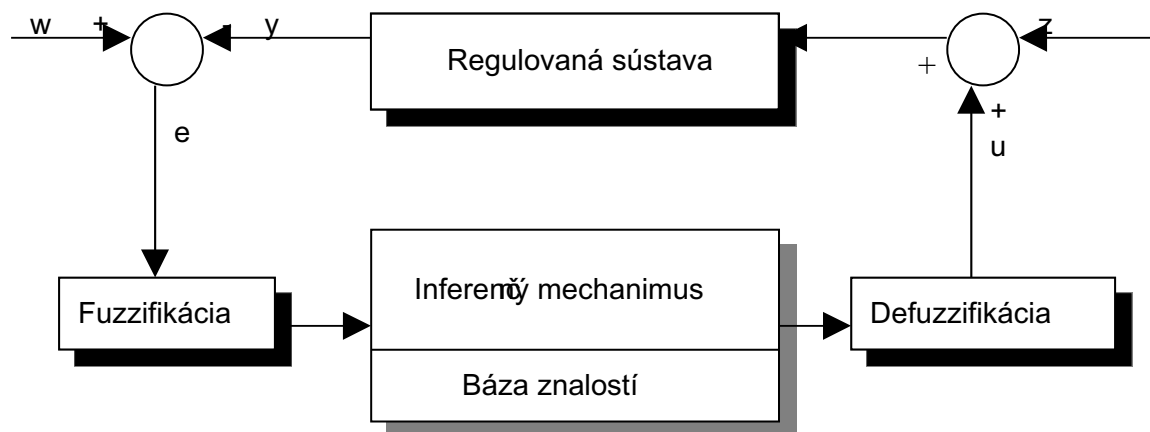
1.4 Fuzzy regulátory

Fuzzy regulátory sú fuzzy systémy s bázou znalostí, ktoré pomocou fuzzifikácie, vhodného spôsobu odvodzovania záverou (inferencie) a defuzzifikácie priradujú hodnotám veličín sledovaných na vstupe hodnoty veličín sledovaných na výstupe, takže z matematického hľadiska vytvárajú funkcie aproximujúce neznáme závislosti medzi sledovanými výstupmi a vstupnými veličinami. Najdôležitejšie typy fuzzy regulátorov sú Mamdaniho a Takagiho-Sugenove regulátory.

V klasickej teórii regulácie je potrebné poznať matematický popis riešeného problému pomocou diferenciálnych rovníc. Ak je skutočný matematický model zložitý, silne nelineárny, prijímajú sa rôzne zjednodušenia, a preto výsledky získané pomocou klasickej teórie regulácie nemusia byť uspokojivé. V mnohých prípadoch je ťažké, dokonca i nemožné, získať matematický popis problému, a preto nie je možné použiť klasické metódy. Niekedy je identifikácia modelu tak časovo alebo finančne náročná, že aj keby bolo možné použiť klasické regulátory, často sa siahla k alternatívnemu riešeniu pomocou fuzzy regulátorov. Okrem relatívne jednoduchého návrhu fuzzy regulátorov aj pre dosť zložité procesy, je ich výhodou aj veľká robustnosť [5].

1.4.1 Mamdaniho fuzzy regulátor

Štruktúra fuzzy regulátora podľa Mamdaniho je znázornená na obrázku *obr. 3*. Skladá sa z troch základných blokov, fuzzifikačného a defuzzifikačného, a ústredného člena regulátora. Fuzzifikačný člen prevádza ostré dáta na fuzzy dáta a defuzzifikačný člen priradí výstupnej fuzzy množine určitú ostrú hodnotu. Ústredný člen regulátora sa skladá z bázy znalostí a inferenčného mechanizmu.



Obr. 3. Štruktúra fuzzy regulátora

V Mamdaniho fuzzy regulátoroch sa modelujú hodnoty vstupných aj výstupných premenných pomocou fuzzy množín.

Báza znalostí $\beta = \{P_1, \dots, P_k\}$ obsahuje k fuzzy pravidiel pre n vstupných premenných a jednu výstupnú premennú. Úlohou inferencie na základe danej bázy znalostí odvodiť pre aktuálne pozorovanie vstupných hodnôt, ktoré môže byť vo všeobecnosti vyjadrené vágne v tvare:

$$X_1 \text{ je } A'_1 \text{ a } X_2 \text{ je } A'_2 \text{ a...a } X_n \text{ je } A'_n,$$

záver

$$Y \text{ je } B'.$$

Symboly $A', \dots, A'_n$ predstavujú pozorované hodnoty vstupných premenných a symbol B' pre odvodenú hodnotu výstupnej premennej. Ak ide o prípad s jednou vstupnou premennou X a jednou výstupnou premennou Y predpokladá sa, že v báze β je od experta len jedno riadiace fuzzy pravidlo tvaru

$$\text{Ak } X \text{ je } A, \text{ potom } Y \text{ je } B,$$

pomocou ktorého na základe vstupnej informácie, že “ X je A' ”, treba odvodiť záver “ Y je B' ”. Mamdaniho a Assilianov nápad spočíval v tom, že na modelovanie relácie R , vyjadrujúcej vzťah medzi výstupnou a vstupnou premennou, použili štandardný karteziánsky súčin fuzzy množín, t.j. $R = A \times B$, s funkciou príslušnosti

$$\mu_R(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)), \quad (x, y) \in X \times Y$$

teda nie implikáciu.

Pre hodnotu A' vstupnej premennej X pomocou tohto pravidla a štandardného kompozičného pravidla odvodzovania, treba odvodiť hodnotu B' výstupnej premennej s funkciou príslušnosti

$$\mu_R(x, y) = \sup_{x \in X} \min(\mu_A(x), \min(\mu_A(x), \mu_B(y)))$$

Pri takomto spôsobe odvodzovania kompozičné pravidlo rešpektuje zovšeobecnenú schému modus ponens.

Využitím asociatívosti minima a možnosti zámeny operácií sup a min, sa dá upraviť predchádzajúci vzťah do tvaru:

$$\mu_B(y) = \min \left(\sup_{x \in X} \min(\mu_A(x), \mu_A(x)), \mu_B(y) = \min(w, \mu_B(y)) \right)$$

pričom ako w je číslo

$$w = \sup_{x \in X} \min(\mu_A(x), \mu_A(x))$$

čiže výška štandardného prieniku fuzzy množín A a A', $w = \text{hgt}(A \cap A)$. Číslo w sa nazýva váha pravidla alebo stupeň zapálenia pravidla. Číslo w vyjadruje mieru “zhody”, “podobnosti” predpokladu A v pravidle a aktuálneho pozorovania A'. Potom platí

$$\mu_B(y) = \min(w, \mu_B(y)) \quad y \in Y$$

to znamená, pomocou váhy w sa modifikuje záver B v pravidle na záver B' zodpovedajúci novej situácii.

Ak sa uvažuje situácia s jednou vstupnou premennou X, s jednou výstupnou premennou Y, ale nech báza znalostí obsahuje k pravidiel, $\beta = \{P_1, \dots, P_k\}$, tvaru

$$P_j : \quad \text{AK } X \text{ je } A_j, \text{ potom } Y \text{ je } B_j, \quad j \in \{1, 2, 3, \dots, k\}$$

Nech celkový vzťah medzi premennými X a Y určený touto bázou znalostí popisuje relácia R; čiastkové vzťahy vyjadrené jednotlivými pravidlami nech popisujú relácie R_j , kde

$$\mu_{R_j}(x, y) = \min(\mu_{A_j}(x), \mu_{B_j}(y)) \quad \text{pre } j = 1, \dots, k$$

Jednotlivé pravidlá bázy v Mamdaniho fuzzy regulátoroch sa spájajú disjunktívne:

$$P_1 \text{ alebo } P_2 \text{ alebo } \dots \text{ alebo } P_k,$$

a pre reláciu R zodpovedajúcu celkovej báze platí

$$R = \bigcap_{j=1}^k R_j, \quad t.j. \quad \mu_R(x, y) = \max_{j=1}^k \mu_{R_j}(x, y) = \max_{j=1}^k \min(\mu_A(x), \mu_{B_j}(y))$$

Nech vstupná premenná X má hodnotu modelovanú fuzzy množinou A'. Pretože vzťah premenných X a Y vyjadruje relácia R, príslušná hodnota premennej Y je $B' = A' \circ R$. Platí

$$B' = A' \circ R = A' \circ \bigcap_{j=1}^k R_j = \bigcap_{j=1}^k (A' \circ R_j) = \bigcap_{j=1}^k B'_j$$

Na základe tohto vzťahu, pre funkciu príslušnosti záveru platí

$$\mu_{B'}(y) = \max_{j=1}^k \mu_{B'_j}(y), \quad y \in Y$$

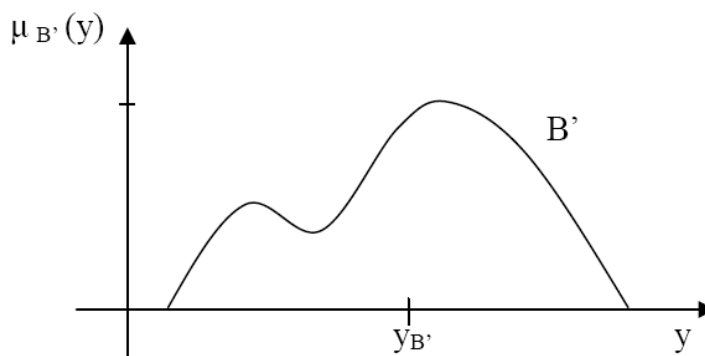
Pre Mamdaniho fuzzy regulátory je možné dostať rovnaký výsledok, ak

- 1) najskôr sa vytvorí celková relácia R zjednotením čiastkových relácií R_j a potom sa odvodí celkový záver B' ,
- 2) najskôr sa odvodzia závery B'_j pomocou jednotlivých pravidiel a potom sa vytvorí celkový záver B' ich zjednotením.

Celkový záver B' v bode 2) sa získa zjednotením (dizjunkciou) individuálnych záverov B'_j . Vo všeobecnosti, vo fuzzy regulátoroch sa používajú aj iné typy agregáčnych operátorov, napríklad aritmetický priemer. Nahradením Zadehových fuzzy spojok v Mamdaniho regulátore inými t-normami, t-konormami, fuzzy implikačnými funkciami a fuzzy agregátormi, možno získať ďalšie typy fuzzy regulátorov. Ich výber a vhodnosť závisí od konkrétneho regulovaného fuzzy systému [5, 6].

1.4.2 Defuzzifikácia

Pre ostré vstupné hodnoty sa pri odvodzovaní získali závery reprezentované pomocou fuzzy množín. Spätý akčný zásah do systému musí byť konkrétny, vyjadrený reálnym číslom. Preto je nutné záver B' defuzzifikovať. Defuzzifikácia zväčša prebieha metódou COG, čo znamená “center of gravity”. Touto metódou sa priradí fuzzy množine B' prvá súradnica ťažiska (hmotného homogénneho) rovinného obrazca, ktorý je ohraničený funkciou príslušnosti $\mu_{B'}$ tejto fuzzy množiny a príslušnou súradnou osou, ako je znázornené na obrázku obr.4 [5]:



Obr.4. Defuzzifikácia metódou COG

1.4.3 Takagi-Sugenov fuzzy regulátor

Najjednoduchším regulátorom tohto typu je Sugenov regulátor, ktorý má bázu znalostí:

$P_j : \mathbf{AK} X_1 \text{ je } A_{1j} \text{ a } X_2 \text{ je } A_{2j} \text{ a...a } X_n \text{ je } A_{nj}, \mathbf{POTOM} Y \text{ je } b_j,$

kde $b_j, j = 1, \dots, k$, sú reálne čísla.

Hodnoty vstupných premenných v predpokladoch pravidiel sú vyjadrené vágne a sú modelované pomocou fuzzy množín. Hodnoty výstupnej premennej Y sú ostré. Príkladom takéhoto typu je pravidlo tvaru:

Ak teplota je asi 20 °C a vlhkosť je asi 80 %, **potom** nastav otáčky na stupeň 5.

Tieto fuzzy regulátory sú špeciálnym typom tzv. Takagiho-Sugenových regulátorov.

T. Takagi a M. Sugeno navrhli fuzzy regulátory, ktorých báza znalostí obsahuje pravidlá typu:

$P_j : \mathbf{Ak} X_1 \text{ je } A_{1j} \text{ a } X_2 \text{ je } A_{2j} \text{ a...a } X_n \text{ je } A_{nj}, \mathbf{potom} Y \text{ je } b_j + a_{1j} x_1 + a_{2j} x_2 + \dots + a_{nj} x_n,$
 $j = 1, \dots, k,$

kde b_j, a_{ij} pre $i = 1, \dots, n$ a $j = 1, \dots, k$, sú reálne čísla a $x_1, \dots, x_n$ sú ostré pozorovania vstupných premenných $X_1, \dots, X_n$.

Hodnoty vstupných premenných v predpokladoch pravidiel sú vyjadrené vágne a modelované pomocou fuzzy množín. Hodnoty výstupnej premennej sú ostré, ale na rozdiel od Sugenovho regulátora, nie sú konštantné, ale závisia lineárne od nameraných vstupných hodnôt.

Príkladom je pravidlo tvaru:

Ak teplota je asi 20 °C a vlhkosť je asi 80 %, **potom** nastav otáčky na stupeň $0,2x_1 + 0,015x_2$.

Napr. pre nameranú teplotu $x_1 = 19,4$ °C a vlhkosť $x_2 = 75$ % to znamená $y = 5$.

Ak sa zoberie do úvahy celú bázu, ktorá má k pravidiel, tak na n -tici nameraných ostrých vstupných hodnôt $x = (x_1, \dots, x_n)$ pomocou tejto bázy znalostí sa priradí hodnota y_x výstupnej premennej:

$$y_x = \frac{\sum_{j=1}^k w_j (b_j + a_{1j}x_1 + \dots + a_{nj}x_n)}{\sum_{j=1}^k w_j}$$

kde w_j , $j = 1, \dots, k$, je váha j -teho pravidla.

Značnou výhodou tohto typu fuzzy regulátorov je, že výsledok inferencie netreba špeciálne defuzzifikovať. Vypočítaný vážený aritmetický priemer y_x je výsledok agregácie príspevkových jednotlivých pravidiel.

Vstupno-výstupná funkcia pre Takagi-Sugenove fuzzy regulátory má teda tvar [5]:

$$\varphi(x_1, \dots, x_n) = \frac{\sum_{j=1}^k w_j (b_j + a_{1j}x_1 + \dots + a_{nj}x_n)}{\sum_{j=1}^k w_j}$$

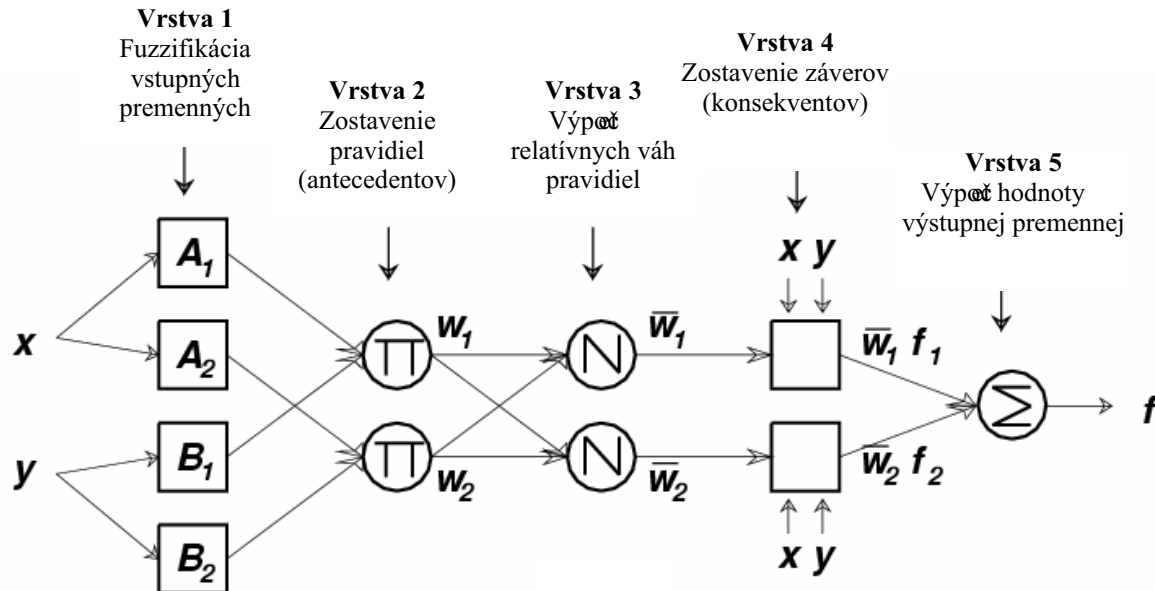
2. METÓDA ANFIS

V predchádzajúcej kapitole boli spomenuté dva typy fuzzy regulátorov, a síce Mamdaniho a Takagi-Sugenovými regulátormi. Takagi-Sugenov regulátor prináša (v porovnaní s Mamdaniho regulátorom) výhodu v tom, že nie je potrebná defuzzifikácia, a už výstupom kompozície sú reálne hodnoty (pre každé pravidlo). Z nich sa potom váženým priemerom určí výsledná hodnota [4].

Pri simuláciách, analýze a návrhu systémov majú dôležité miesto modely, pričom vytvorenie matematického modelu býva prvým krokom, ktorý sa musí vykonať pred návrhom regulátora. Z modelu sa získavajú informácie o stave systému v procese riadenia. Veľa informácií o modeli sa dá ťažko opísať vo forme algebrických a diferenciálnych rovníc, ale vyvíjajú sa metódy, ktoré dokážu zaviesť tieto informácie do modelu. Významné miesto tu patrí metódam, založeným na princípoch fuzzy modelovania a fuzzy logiky, metódam ako ANFIS [7].

2.1 Architektúra siete ANFIS

ANFIS (Adaptive Network-based Fuzzy Inference system) je päťvrstvová dopredná neurónová sieť, ktorá je funkčne ekvivalentná fuzzy inferenčnému systému typu Takagi-Sugeno. Znázornenie je ponúknuté na nasledujúcom obrázku obr. 5:



Obr. 5. Architektúra siete Anfis

- Vrstvu 1 tvoria adaptívne uzly, každý uzol predstavuje lingvistickú hodnotu vstupnej premennej.

- Vrstvu 2 tvoria neadaptívne uzly, ktoré iba násobia prichádzajúce signály a na výstupe tak poskytujú váhu w pravidiel, ktorých antecedent je daný kombináciou lingvistických hodnôt jednotlivých premenných.
- Vrstvu 3 tvoria neadaptívne uzly, ktoré poskytujú na výstupe pomer váhy jednotlivých pravidiel a súčtu váh všetkých pravidiel w.
- Vrstvu 4 tvoria adaptívne uzly, ktorých prenosové funkcie sú dané požadovaným tvarom konsekventu. Môžu byť konštantné alebo lineárne.
- Vrstvu 5 tvorí jeden neadaptívny uzol, ktorý počíta celkový výstup ako súčet všetkých vstupných signálov.

Na trénovanie siete používa Anfis hybridnú učiacu metódu. Parametre v antecedente pravidla (určujúce funkcie príslušnosti vstupných premenných) sú optimalizované gradientovou metódou, parametre konsekventu (konštanty alebo koeficienty lineárnej funkcie) sa počítajú metódou najmenších štvorcov [7, 8, 10].

2.2 Postup výpočtu metódou ANFIS v toolboxe MATLABU

Na inicializácia výpočtu v Matlabe pomocou Anfis metódy je najprv potrebné zadať súbor cvičných údajov (training data set), ktoré obsahujú želané vstupné/výstupné údaje cieľového systému, ktorý chceme namodelovať. Niekedy je tiež dobré mať k dispozícii súbor overujúcich údajov (checking data set), ktorý môže overiť zovšeobecňovaciu schopnosť výsledného fuzzy systému. Obyčajne sa tieto dáta zbierajú pri pozorovaní správania sa cieľového systému.

Výpočet je teda opísaný nasledujúcimi krokmi [9, 11]:

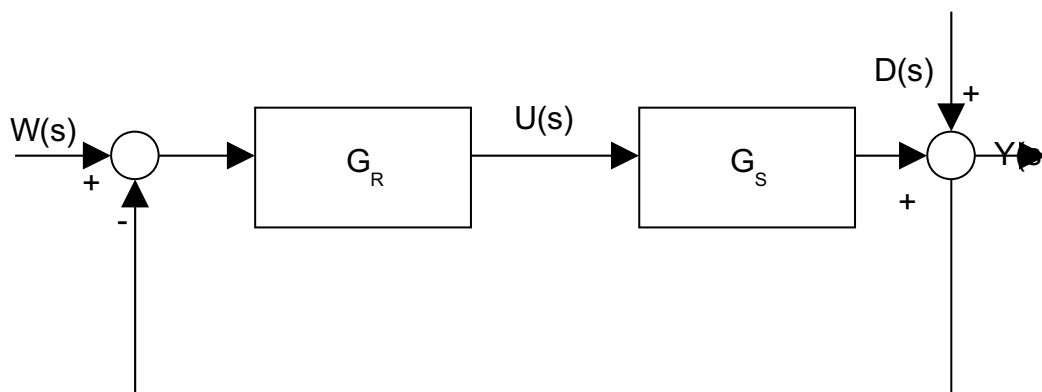
- 1) Vygenerovanie a zadanie cvičných údajov „load data“
- 2) Príkaz „genfis“ spustí skúšanie cvičných údajov a vytvorí FIS output
- 3) Zadanie parametrov potrebných na učenie (training options): počet epoch
- 4) Spustenie procesu učenia príkazom „train now“
- 5) Po spracovaní všetkých epoch, spustenie príkazom „test now“ na overenie výsledkov učenia
- 6) Overenie správnosti výpočtu s nezávislými údajmi
- 7) Načítanie výstupných údajov do FIS mat

3. VNÚTORNÝ MODEL SÚSTAVY (IMC)

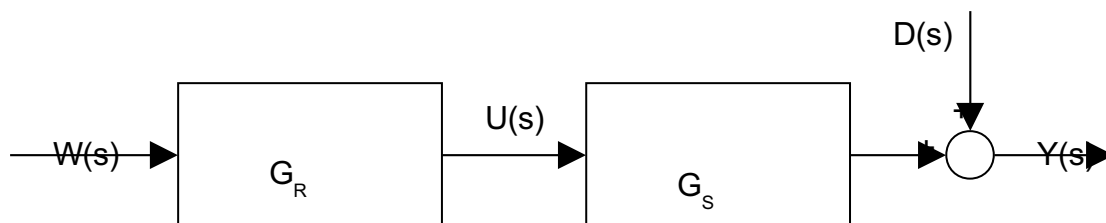
Riadiaca sústava obsahujúca vnútorný model (nazývaná tiež IMC štruktúra) bola pravdepodobne „objavená“ v roku 1957, avšak je veľmi ťažké identifikovať osobu alebo osoby zodpovedné za tento objav. Idea IMC štruktúry bola rozšírená hlavne Morarim, Graciou a Zifiriouom (Garcia 1982, Morari 1989).

3.1 Princíp metódy vnútorného modelu

V klasickej teórii riadenia figuruje buď regulátor spätnoväzbový, alebo priamoväzbový (obr. 6 a 7). Spätnoväzbový regulátor dokáže reagovať na nemerateľné poruchy (aj keď s určitým oneskorením, až sa ich vplyv prejaví na výstupe sústavy) a jeho návrh nevyžaduje znalosť presného modelu sústavy (postačuje aj hrubý opis systému). Existuje však nebezpečenstvo vzniku nestability po uzavretí spätnoväzbovej slučky. U priamoväzbového riadenia nemôže byť regulačný obvod nestabilný, pokiaľ sú regulátor a sústava stabilné. Kvalita jeho regulácie je však závislá na presnosti modelu sústavy a regulátor nemôže eliminovať vplyv nemerateľných porúch.



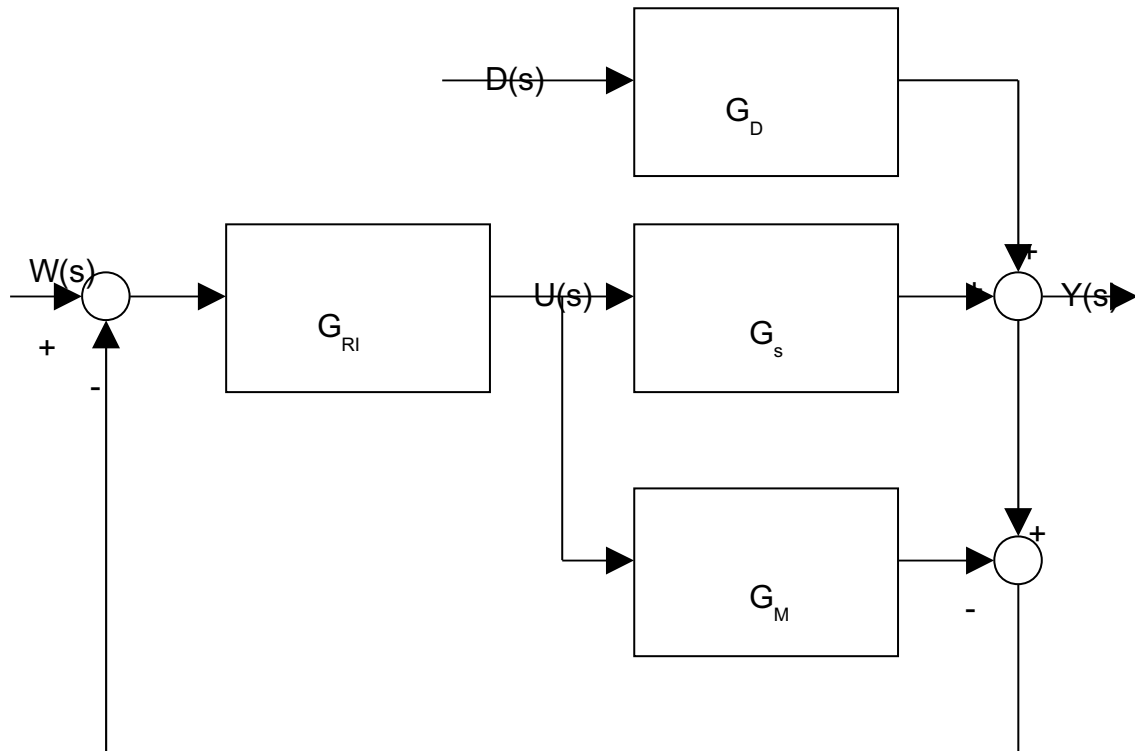
Obr.6. Bloková schéma spätnoväzbového riadenia



Obr.7. Bloková schéma priamoväzbového riadenia

Bloková schéma regulačného obvodu s IMC regulátorom je znázornená na obrázku obr.

8. Prenosový blok G_M predstavuje model regulovanej sústavy G_S , blok s označením G_{RI} je regulátor. V prípade, že model sústavy je presný ($G_M = G_S$) a na sústavu nepôsobí žiadna porucha ($d=0$), je spätnoväzbový signál nulový a spätná väzba je teda rozpojená (obvod sa chová ako priamoväzbový). Pri nesúlase modelu a pri výskyte poruchy začne pôsobiť spätná väzba.



Obr. 8. Regulačný obvod s IMC regulátorom

Pre uzavretý regulačný obvod na obr. 8 platí:

$$Y(s) = \frac{G_S(s)G_{RI}(s)}{1 + G_S(s)G_{RI}(s) - G_M(s)G_{RI}(s)} W(s) + \frac{G_D(s) - G_M(s)G_{RI}(s)G_D(s)}{1 + G_S(s)G_{RI}(s) - G_M(s)G_{RI}(s)} D(s)$$

Ak je model presný ($G_M(s) = G_S(s)$), zjednoduší sa rovnica uvedená vyššie na tvar:

$$Y(s) = G_S(s)G_{RI}(s)W(s) + [G_D(s) - G_M(s)G_{RI}(s)G_D(s)]D(s)$$

kde

$$G(s) = \frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{G_S(s)G_{RI}(s)}{1 + G_S(s)G_{RI}(s) - G_M(s)G_{RI}(s)}$$

Ak sa porovnáva klasický uzavretý regulačný obvod (obr. 6) s IMC modelom:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{G_S(s)G_R(s)}{1 + G_S(s)G_R(s)}$$

$$G_R(s) = \frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{G_{RI}(s)}{1 - G_{RI}(s)G(s)}$$

$$G(s) = \frac{G_S(s)G_{RI}(s)}{1 + G_S(s)G_{RI}(s) - G_M(s)G_{RI}(s)}$$

Návrh regulátora metódou IMC je v princípe podobný ako u priamoväzbového riadenia – prenos regulátora je rovný prevrátenej hodnote prenosu sústavy. Metódu je možné použiť pre stabilné sústavy, tzv. sústavy so stabilnými pólmi. Aby bola zaistená stabilita a fyzikálna realizovateľnosť regulátora, je potrebné z modelu sústavy G_M vopred oddeliť nestabilné nuly a dopravné oneskorenie. Nestabilné nuly sa po inverzii zmenia na nestabilné póly a dopravné oneskorenie na fyzikálne nerealizovateľné záporné oneskorenie (predbiehanie). Rozdelenie prenosu modelu na stabilné a nestabilné časti (faktorizácia) je dané vzťahom:

$$G_M = G^p(s)G^n(s)$$

Prenosová funkcia filtra:

$$F(s) = \frac{1}{(\lambda s + 1)^r}$$

kde sa rádom menovateľa r zaisťuje požadovaný výsledný rád prenosu regulátoru.

Po dosadení za G_{RI} z poslednej uvedenej rovnice a následnom vykrátení stabilných častí je výsledný tvar rovnice

$$Y(s) = G_S(s)G_{RI}(s)W(s) + [G_D(s) - G_M(s)G_{RI}(s)G_D(s)]D(s)$$

prepísaný na:

$$Y(s) = G^n(s)F(s)W(s) + [G_D(s) - G_D(s)G^n(s)F(s)]D(s)$$

Z poslednej rovnice vyplýva, že voľbou časovej konštanty filtra λ sa dá nastaviť rýchlosť odozvy uzavretého regulačného obvodu.

IMC regulátor hrá úlohu dopredného (feedforward) regulátora. Ale IMC štruktúra nemá nevýhody doprednej regulácie, pretože dokáže potláčať vplyv porúch spätnoväzbovým signálom. Spätnoväzbový signál je nenulový len v prípade nenulového poruchového signálu. Spätnoväzbový signál je rovný poruchovému signálu a podľa neho len predstavuje žiadanú hodnotu.

Ak model nevystihuje presne dynamické správanie sústavy, potom spätnoväzbový signál vyjadruje vplyv poruchového signálu a vplyv nepresnosti modelu. Nepresnosť modelu spôsobuje, že v IMC štruktúre vzniká nutnosť brať do úvahy spätnoväzbovú stabilitu. Preto je potrebné „rozladiť“ pôvodne ideálny dopredný IMC regulátor (spravidla s vysokým pásmom priepustnosti) za účelom dosiahnutia robustnosti.

Syntéza IMC regulátora prebieha v dvoch krokoch. V prvom kroku je regulátor navrhnutý ako optimálny pre sledovanie vstupu (setpoint tracking) a/alebo potláčanie porúch (disturbance rejection) podľa niektorého kritéria optimality s ohľadom na uvažovaný model sústavy. V druhom kroku môže byť IMC regulátor doplnený IMC filtrom (znižujúcim pásmo priepustnosti regulátora) tak, aby sa zabezpečilo dosiahnutia predpísaného stupňa robustnej stability a kvality pri známom rozsahu neurčitosti sústavy resp. nepresnosti modelu [12].

3.2 Návrh PID regulátora metódou IMC

Štruktúra PID regulátora je zdanlivo odlišná od štruktúry IMC regulátora podľa *obr. 8*, ale po prevode do ekvivalentného spätnoväzbového zapojenia je možné pre väčšinu modelov používaných v praxi navrhnuť metódou IMC regulátor typu PID (alebo jednoduchšie typy PI, PD či P). Postup odvádzania týchto vzťahov bude ukázaný na sústave prvého rádu s dopravným oneskorením, ktorá má prenosovú funkciu:

$$G(s) = \frac{Z}{(Ts + 1)} e^{-ds}$$

Podľa spôsobu aproximácie dopravného oneskorenia je možné odvodiť rôzne vzťahy pre nastavenie PID regulátora. Pri aproximácii dopravného oneskorenia Padého rozvojom prvého rádu:

$$e^{-ds} = \frac{1 - \frac{d}{2}s}{1 + \frac{d}{2}s}$$

je faktorizácia podľa $G_M = G^P(s)G^n(s)$ rovná:

$$G^n(s) = 1 - \frac{d}{2}s$$

$$G^p(s) = \frac{Z}{(1 + \frac{d}{2}s)(Ts + 1)}$$

Pre filter $Y(s) = G^n(s)F(s)W(s) + [G_D(s) - G_D(s)G^n(s)F(s)]D(s)$ prvého rádu

($r = 1$) je prenos regulátora G_{RI} podľa $F(s) = \frac{1}{(\lambda s + 1)^r}$ rovný:

$$G_{RI}(s) = \frac{(1 + \frac{d}{2}s)(Ts + 1)}{Z(\lambda s + 1)}$$

a prenos ekvivalentného spätnoväzbového regulátora podľa

$$G_R(s) = \frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{G_{RI}(s)}{1 - G_{RI}(s)G(s)}$$

má výsledný tvar:

$$G_{RI}(s) = \frac{(1 + \frac{d}{2}s)(Ts + 1)}{Z(\lambda + \frac{d}{2})s}$$

Jednoduchou úpravou je možné prenos PID regulátora previesť do klasického tvaru:

$$G_R(s) = Z_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$$

kde jednotlivé parametre regulátora sa vypočítajú porovnaním posledných dvoch rovníc:

$$Z_R = \frac{2T + d}{Z(2\lambda + d)}$$

$$T_I = \frac{d}{2} + T$$

$$T_D = \frac{Td}{2T + d}$$

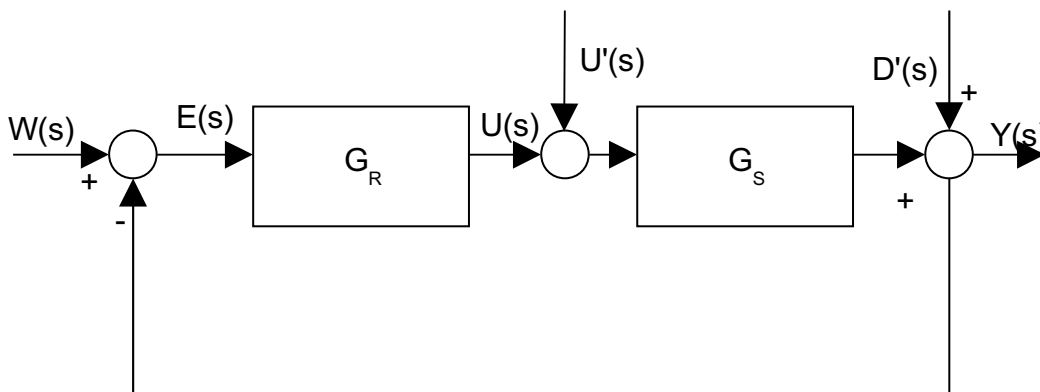
Časová konštanta filtra λ , ktorá je jediným voliteľným parametrom regulátora, ovplyvňuje len zosilnenie regulátora.

3.3 Vnútorná stabilita

Pojem vnútornej stability je jednoduché ozřejmit zavedením nasledujúcich dvoch definícií [12]:

Definícia 1: Systém je vnútorne stabilný ak na ohraničené signály vstupujúce do ľubovolnej časti systému reaguje systém ohraničenou odozvou v ľubovolnej inej časti systému.

Definícia 2: Lineárny, časovo invariantný systém je vnútorne stabilný, ak prenosové funkcie medzi ľubovoľnými dvoma bodmi systému sú stabilné, t.j. majú všetky póly v otvorenej ľavej polrovine.



Obr. 9. Blokový diagram pre diskusiu o vnútornej stabilite klasickej štruktúry

Vnútorná stabilita klasickej spätnoväzbovej štruktúry

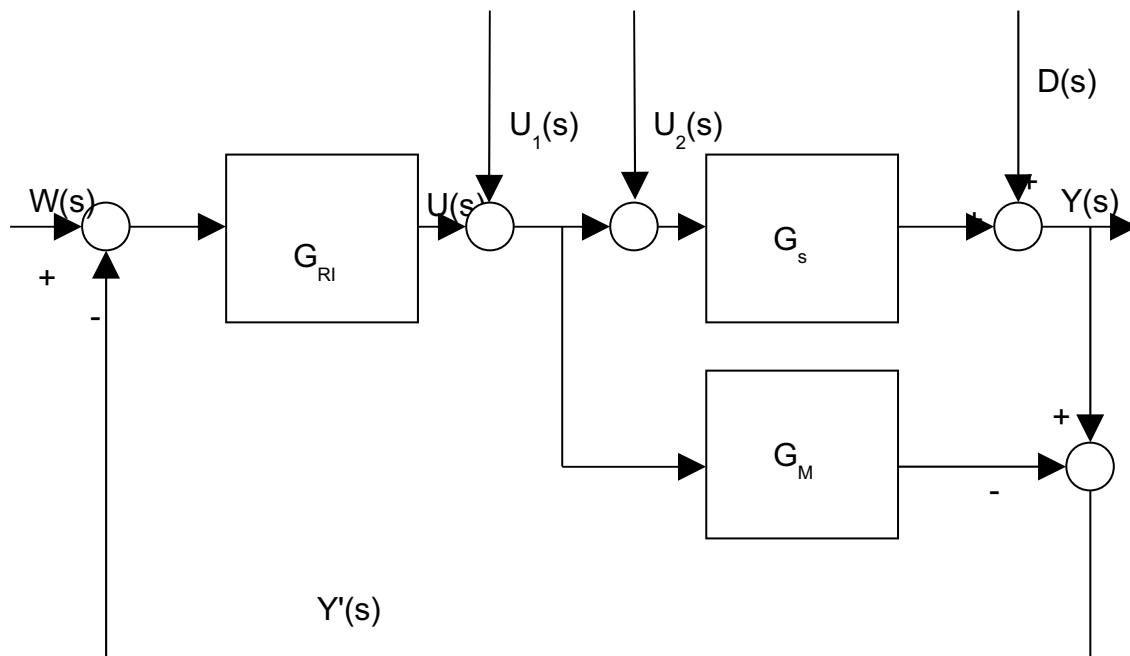
Na obr. 9 je znázornená klasická spätnoväzbová štruktúra. Pre zistenie, či táto štruktúra je vnútorne stabilná v zmysle *Definícia 2*, je potrebné vyšetriť stabilitu prenosových funkcií medzi ľubovoľnými dvoma bodmi štruktúry. V schéme na obr. 9 je možné nájsť viacero bodov

pre vstup testovacieho signálu ($W(s)$, $U'(s)$ a $D'(s)$) a bodov pre pozorovanie odozvy ($E(s)$, $U(s)$ a $Y(s)$). Avšak $Y(s)$ a $E(s)$ sa líšia len o veľkosť ohraňovaného signálu $E(s)$. Preto sú v systéme vlastne len dva „nezávislé“ výstupy (napr. $Y(s)$ a $U(s)$). Podobne, systém má len dva „nezávislé“ vstupy (napr. $W(s)$ a $U'(s)$), lebo $W(s)$ a $D'(s)$ vstupujú do toho istého miesta v schéme. Preto klasický spätnoväzbový systém je vnútorne stabilný práve vtedy, keď všetky prvky matice prenosových funkcií, znázornenej nižšie, majú póly v otvorenej ľavej polrovine.

$$\begin{pmatrix} Y(s) \\ U(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{G_S G_R}{1 + G_S G_R} & \frac{G_S}{1 + G_S G_R} \\ \frac{G_R}{1 + G_S G_R} & -\frac{G_S G_R}{1 + G_S G_R} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W(s) \\ U'(s) \end{pmatrix}$$

Zavedenie pojmu vnútorná stabilita umožní kompletnejšiu koncepciu vyšetřovania stability ako je obvyklá koncepcia založená len na vyšetření koreňov charakteristickej rovnice $1 + G_S G_R = 0$, v tom zmysle, že vylučuje prípad presného krátenia nestabilných pólov a núl v súčine prenosových funkcií regulátora a procesu. Podľa horeuvedenej matice je zrejmé, že ak G_P a G_R sú stabilné, potom klasický spätnoväzbový systém je vnútorne stabilný práve vtedy, keď všetky korene $1 + G_S G_R = 0$ ležia v otvorenej ľavej polrovine [12].

Vnútorná stabilita IMC štruktúry



Obr. 10. Blokový diagram pre odvodenie podmienok vnútornej stability IMC štruktúry

Na obr. 10 je vidieť, že v IMC štruktúre je možné nájsť tri nezávislé vstupy ($W(s)$, $U_1(s)$ a $U_2(s)$) a tri nezávislé výstupy ($Y(s)$, $U(s)$ a $Y'(s)$). Ak je presná zhoda medzi modelom a riadeným procesom ($G_M = G_S$), potom vzťahy medzi vstupmi a výstupmi sú určené nasledovnou

maticou prenosových funkcií [12]:

$$\begin{pmatrix} Y(s) \\ U(s) \\ Y'(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_S G_{RI}, (1 - G_S G_{RI}) G_S, G_S \\ G_{RI}, -G_S G_{RI}, 0 \\ G_S G_{RI}, -G_S^2 G_{RI}, G_S \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W(s) \\ U_1(s) \\ U_2(s) \end{pmatrix}$$

Teorém 1: Predpokladá sa, že model je presnou aproximáciou procesu ($G_M = G_S$). Potom je IMC štruktúra vnútorne stabilná práve vtedy, keď proces G_S a regulátor G_{RI} sú stabilné.

Nasledujúca *teoréma 2* poskytuje parametrizáciu všetkých regulátorov G_R stabilizujúcich proces G_S . Parametrom v uvedenej parametrizácii je stabilná prenosová funkcia G_{RI} .

Teorém 2: Predpokladá sa, že model je presnou aproximáciou procesu ($G_M = G_S$) a G_S je stabilné. Potom klasický spätnoväzbový systém s regulátorom

$$G_R = \frac{G_{RI}}{1 - G_M G_{RI}}$$

je stabilný práve vtedy, keď prenos G_{RI} je stabilný.

3.4 Implementácia klasickej štruktúry a IMC

IMC štruktúra poskytuje nielen vhodnú parametrizáciu klasického regulátora použiteľnú pre design, ale je výhodná aj v implementácii riadiaceho algoritmu. V praxi je často akčný zásah ohraničený hornou a dolnou hranicou. V klasickej štruktúre sa potom stretávame s nasledovným problémom: ak regulátor G_R obsahuje integračnú zložku, pri prekročení ohraničenia akčnej veličiny nastáva tzv. „reset windup“. Tento problém je možné potlačiť použitím IMC implementácie. Ak do modelu zavedieme rovnaké ohraničenie, aké je v reálnom procese, IMC implementácia garantuje globálnu stabilitu ($G_M = G_S$). Avšak použitie IMC implementácie je možné len vtedy, ak je zabezpečená vnútorná stabilita, to znamená, iba v prípade riadenia stabilného procesu [12].

3.5 IMC štruktúra a robustnosť

IMC forma a klasická spätnoväzbová forma predstavujú len rôzne spôsoby zápisu toho istého uzavretého regulačného obvodu. V prípade, keď do procesu nevstupujú neurčitosti, to znamená, že model presne vystihuje proces ($G_M = G_S$) a ak proces G_S je navyše stabilný, návrh IMC regulátora G'_{RI} redukuje na návrh priamoväzbového optimálneho regulátora, navrhovaného podľa zvoleného kritéria optimality. Ak je proces G_S nestabilný, musí navyše regulátor stabilizovať proces.

Prínosom IMC štruktúry pre zvýšenie robustnosti je to, že v prípade pôsobenia neurčitostí na proces riadenia ($G_M \neq G_S$), IMC štruktúra umožňuje, aby IMC regulátor G'_{RI} mohol byť doplnený IMC filtrom s prenosovou funkciou f tak, aby doplnený regulátor G_{RI}

$$G_{RI} = G'_{RI} f$$

bol schopný aj pre $G_M \neq G_S$ zabezpečiť stabilizáciu procesu a v čo najväčšej možnej miere zachovať kvalitu podľa zvoleného kritéria optimality aj pre $G_M \neq G_S$. IMC filter je z frekvenčného hľadiska spravidla dolnopriepustný filter, ktorý „zoslabuje“ účinky spätnej väzby v IMC štruktúre a referenčného signálu $W(s)$ na akčný. Zaradenie filtra je teda na úkor zníženia kvality z hľadiska zvoleného kritéria optimality oproti použitiu pôvodného regulátora G'_{RI} pre nominálny prípad $G_M = G_S$, pretože zaradenie dolnopriepustného filtra spôsobuje znižovanie pásma priepustnosti regulačného obvodu [12].

PRAKTICKÁ ČASŤ

Riadený systém

Riadeným systémom bol chemický reaktor opísaný nižšie.

4. REGULÁCIA CHEMICKÉHO REAKTORA

Chemické reaktory tvoria podstatné časti chemických technológií, ale z hľadiska riadenia, keďže ide o nelineárne procesy s časovo premenlivými parametrami, patria k najťažšie zvládnuteľným procesom. Bývajú problémom štandardného jednoduchého riadenia, preto sa ukazuje vhodným spôsobom uplatnenie fuzzy riadenia.

4.1 Matematický model

Nech je riadeným systémom prietokový chemický reaktor s dokonalým miešaním reakčnej zmesi a s dvoma paralelnými exotermickými reakciami 1. poriadku typu $A \xrightarrow{k_1} B, \quad A \xrightarrow{k_2} C$. (Vasičkaninová, A. and M. Bakošová. (2005). Cascade fuzzy logic control of a chemical reactor. In Proc. 15. Int. Conference Process Control '05, Štrbské Pleso, High Tatras; Vasičkaninová, A. and M. Bakošová. (2006). Fuzzy modelling and identification of the chemical technological processes. In Proc. 7. Int. Scientific-Technical Conf. Process Control 2006, University of Pardubice, Kouty nad Desnou).

Pri optimálnej teplote vzniká z východiskovej látky A produkt B, ale pri vyššej teplote vzniká nežiaduci produkt C. Zjednodušený nelineárny matematický model reaktora tvorí 5 diferenciálnych rovníc:

$$V \frac{dc_A(t)}{dt} = q c_{A_v} - q c_A(t) - k_1(t) c_A(t) V - k_2(t) c_A(t), \quad c_A(t_0) = c_A^s$$

$$V \frac{dc_B(t)}{dt} = q c_{B_v} - q c_B(t) + k_1(t) c_A(t) V, \quad c_B(t_0) = c_B^s$$

$$V \frac{dc_C(t)}{dt} = q c_{C_v} - q c_C(t) + k_2(t) c_A(t) V, \quad c_C(t_0) = c_C^s$$

$$V \rho c_p \frac{d\vartheta(t)}{dt} = q \rho c_p \vartheta_v - q \rho c_p \vartheta(t) - A k(\vartheta(t) - \vartheta_C(t)) - \dot{Q}(t), \quad \vartheta(t_0) = \vartheta^s$$

$$V_C \rho_C c_{pc} \frac{d\vartheta_C(t)}{dt} = q_C(t) \rho_C c_{pc} \vartheta_{cv} - q_C(t) \rho_C c_{pc} \vartheta_C(t) + A k(\vartheta(t) - \vartheta_C(t)), \quad \vartheta_C(t_0) = \vartheta_C^s$$

kde

$$k_1(t) = k_{10} e^{-\frac{E_1}{R(t)}}, \quad k_2(t) = k_{20} e^{-\frac{E_2}{R(t)}}$$

$$\dot{Q}_r(t) = k_1(t)c_A(t)V(\Delta H_{r_1}) + k_2(t)c_A(t)V(\Delta H_{r_2}).$$

Parametre chemického reaktora sú v tab. 1.:

$q = 0,015 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$	
$\rho = 1020 \text{ kg m}^{-3}$	$\rho_v = 998 \text{ kg m}^{-3}$
$c_p = 4,02 \text{ kJ kg K}^{-1}$	$c_{pc} = 4,182 \text{ kJ kg K}^{-1}$
$V = 0,23 \text{ m}^3$	$V_c = 0,21 \text{ m}^3$
$A = 1,51 \text{ m}^2$	$k = 42,8 \text{ kJ m}^2 \text{ min}^{-1} \text{ K}^{-1}$
$c_{Av} = 4,22 \text{ kmol m}^{-3}$	$c_{Bv} = c_{cv} = 0 \text{ kmol m}^{-3}$
$\vartheta_v = 328 \text{ K}$	$\vartheta_{cv} = 298 \text{ K}$
$k_{10} = 1,55 \cdot 10^{11} \text{ min}^{-1}$	$k_{10} = 4,55 \cdot 10^{25} \text{ min}^{-1}$
$\frac{E_1}{R} = 9850 \text{ K}$	$\frac{E_2}{R} = 22019 \text{ K}$
$\Delta_r H_1 = -8,6 \cdot 10^4 \text{ kJ kmol}^{-1}$	$\Delta_r H_2 = -1,82 \cdot 10^4 \text{ kJ kmol}^{-1}$
Hodnoty vstupnej veličiny q_c a stavových veličín v pôvodnom ustálenom stave	
$q_c^s = 0,004 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$	$c_A^s = 0,4915 \text{ kmol m}^{-3}$
$c_B^s = 2,0042 \text{ kmol m}^{-3}$	$c_C^s = 1,7243 \text{ kmol m}^{-3}$
$\vartheta^s = 363,61 \text{ K}$	$\vartheta_c^s = 350,15 \text{ K}$

Tab. 1. Parametre chemického reaktora

Predtým ako sa vôbec navrhnutý reaktor zrealizuje v praxi, predchádza tomu nespočetné množstvo simulácií, kde sa testujú rôzne podmienky. Na to je potrebná schéma, ktorá zastupuje celkový systém chemického reaktora. Simulácia prebehne v programe MATLAB od firmy MathWorks.

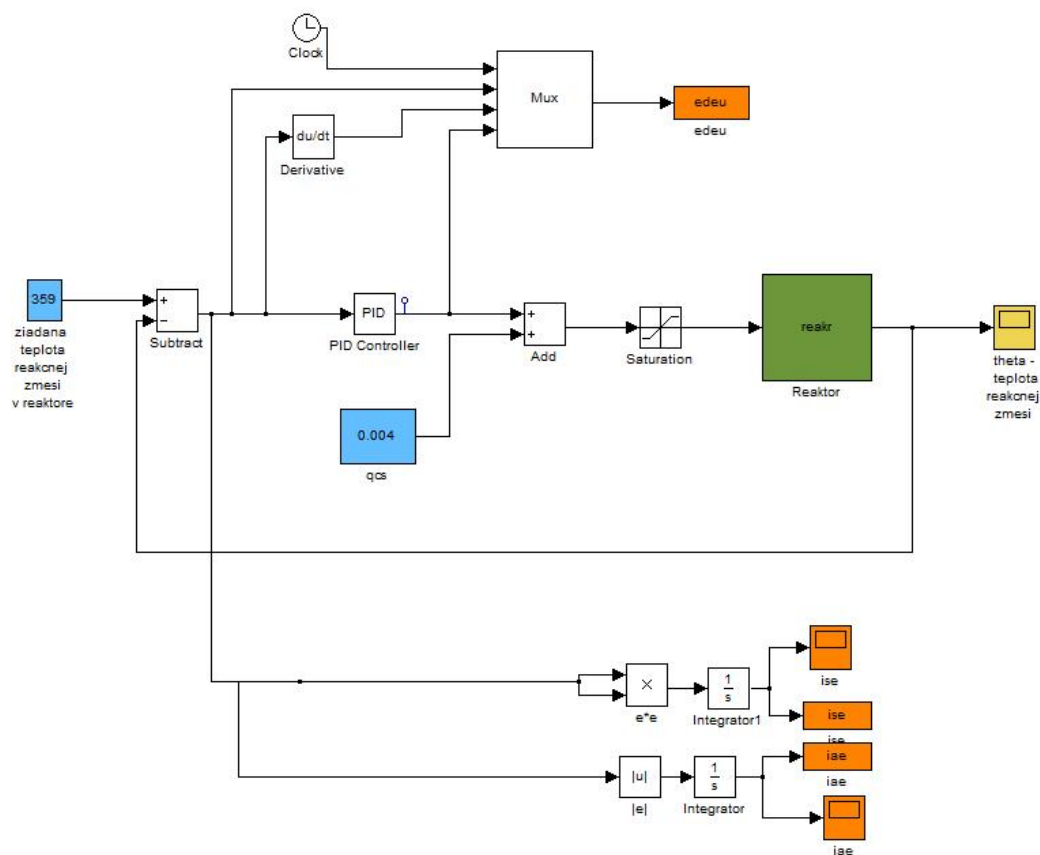
4.2 Realizácia regulátora

- 1) Dynamický systém bol identifikovaný Strejcovou metódou ako systém druhého rádu.
- 2) Použitý PID regulátor bol syntetizovaný metódou umiestnenia pólov. Parametre regulátora sú v tab. 2.:

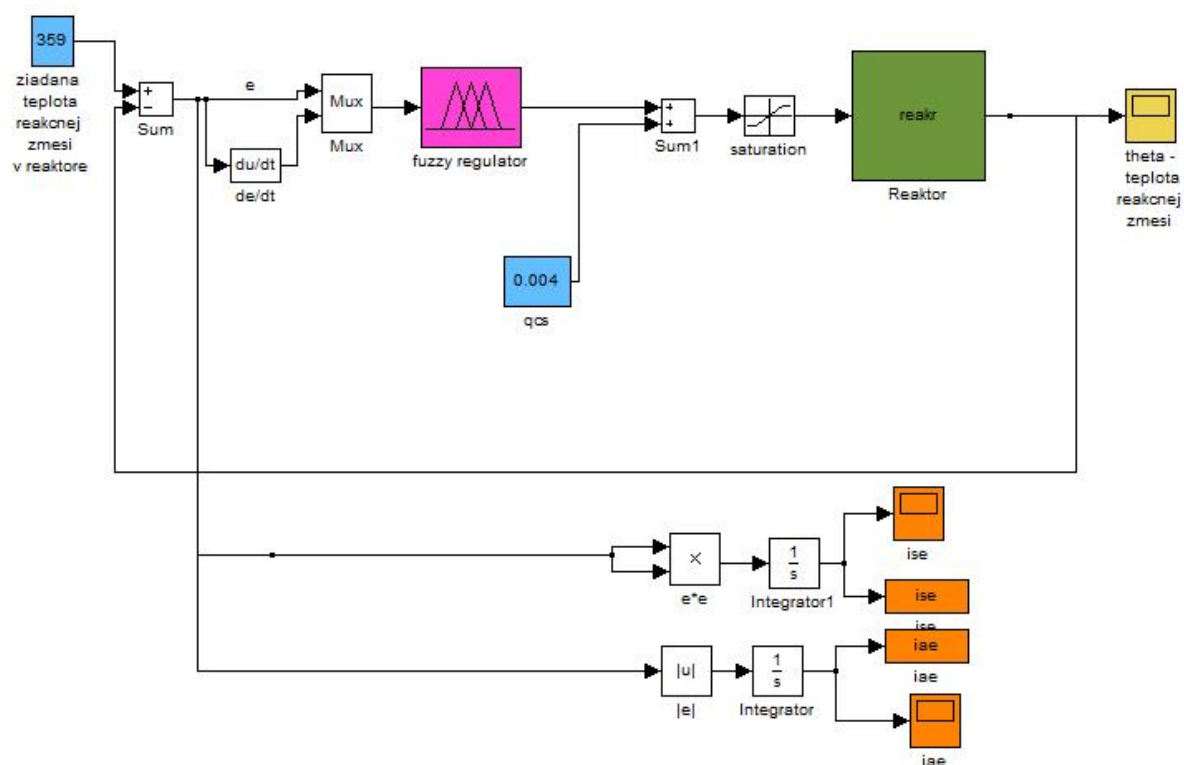
Regulátor	Zr	Ti	Td
PID	-0,0138	8,1084	2,2097

Tab. 2. Parametre PID regulátora

3) Následne bol PID regulátor použitý v klasickom spätnoväzbovom zapojení (obr.11) na získanie dátového súboru potrebného pre tréning v ANFIS editore a realizáciu fuzzy regulátora a jeho použitie v spätnoväzbovej štruktúre (obr. 12):

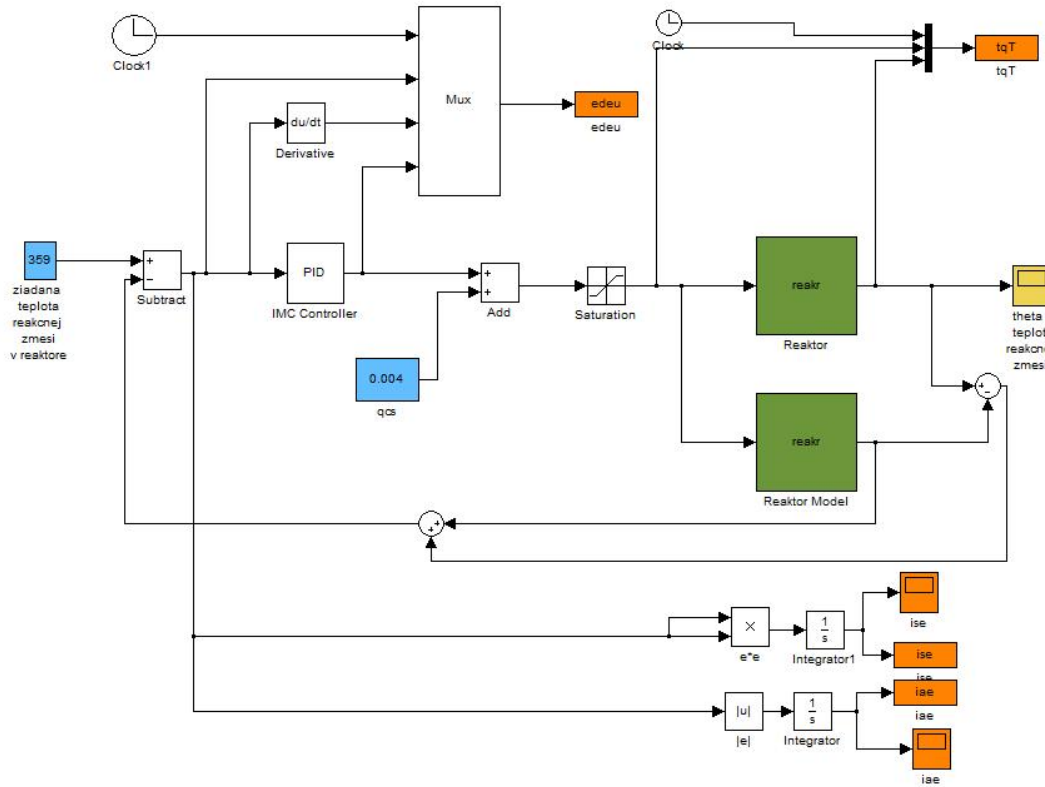


Obr. 11. Klasická spätnoväzbová štruktúra

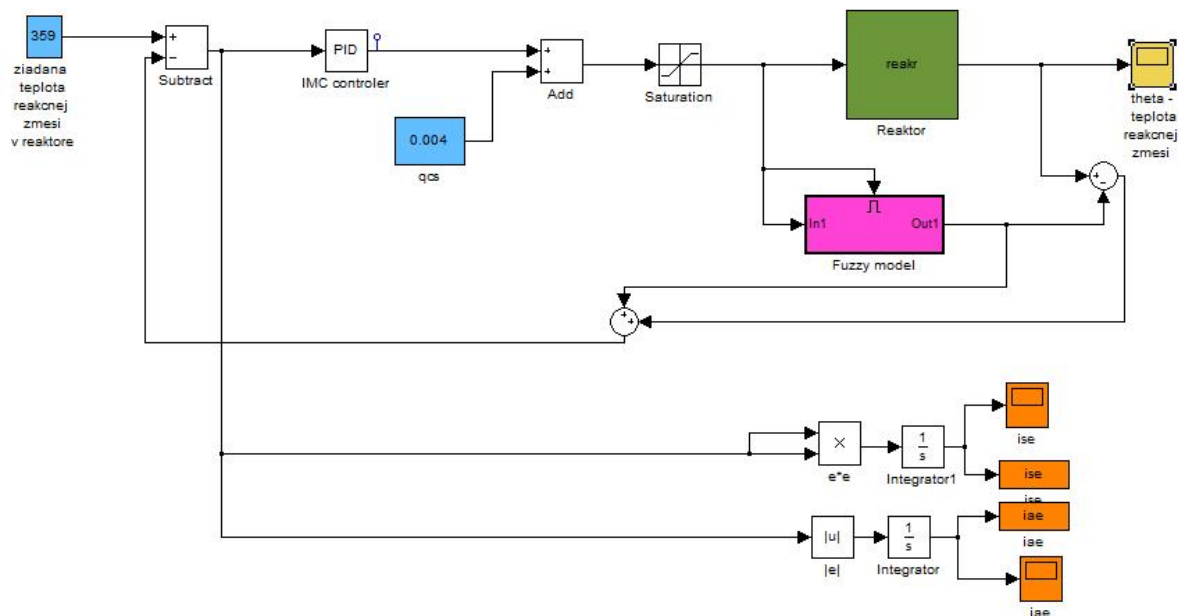


Obr. 12. Spätnoväzbová štruktúra v zapojení s fuzzy regulátorom

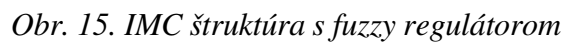
4) Ďalším krokom bolo zostrojenie IMC štruktúry (obr. 13), syntéza IMC regulátora a opäť sa získanie dátových súborov potrebných pre „tréning“ a realizáciu fuzzy regulátora a fuzzy modelu reaktora v zapojení IMC (obr. 14,15):



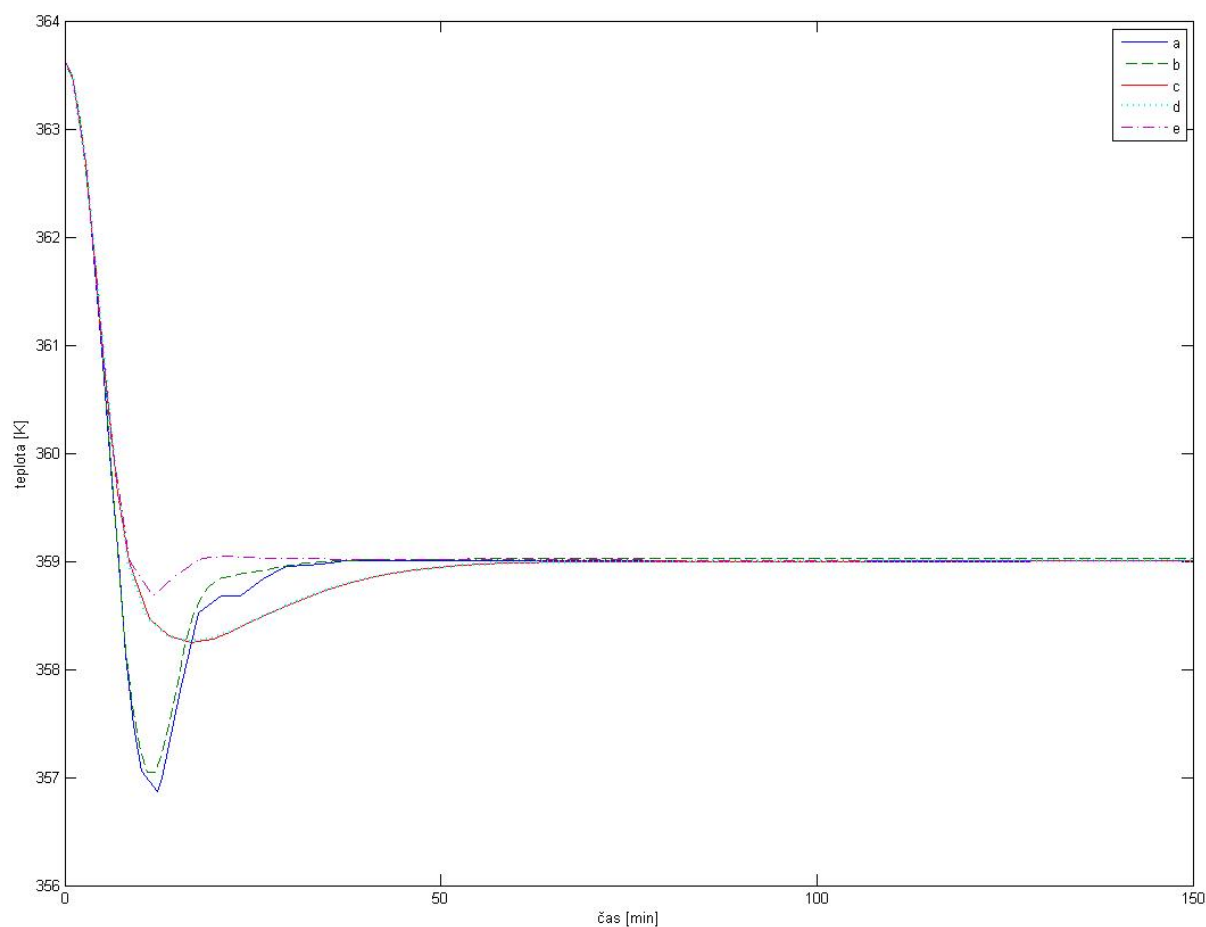
Obr. 13. IMC štruktúra



Obr. 14. IMC štruktúra s fuzzy modelom reaktora



Tab. 3. Parametre IMC regulátora



Obr. 16. Priebeh regulovanej veličiny; *a* - spätnoväzbová štruk. (PID reg.), *b* - spätnoväzbová štruk. (fuzzy reg.), *c* - IMC štruk., *d* - IMC štruk. (fuzzy model reak.), *e* - IMC štruk. (fuzzy regulátor)

Porovnanie výsledkov riadenia na základe hodnôt integrálnych ukazovateľov kvality je v tab. 4.:

Typ regulátora	ise	iae
PID - spätnoväzbová štruktúra	98,20	38,63
Fuzzy - spätnoväzbová štruktúra	92,99	37,84
IMC - IMC štruktúra	81,95	36,94
IMC - fuzzy model reaktor	81,35	37,93
Fuzzy - IMC štruktúra	73,59	24,47

Tab.4. Integrálne ukazovatele kvality riadenia

ZÁVER

V úvodnej časti práce je stručný náhľad na fuzzy logiku, fuzzy regulátory, výhody fuzzy regulátorov pri regulovaní systémov a možnosti ich súčasného zapojenia s klasickými regulátormi typu P, PI, PD alebo PID.

Teoretická časť je zameraná na oboznámenie sa s fuzzy systémami, metódou ANFIS a vnútorným modelom sústavy. Prvá časť sa zaoberá fuzzy logikou, fuzzy množinami, fuzzy odvodzovaním a fuzzy regulátormi Mandaniho a Takagi-Sugenovho typu. V druhej časti je popísaná metóda ANFIS, architektúra siete ANFIS a postup výpočtu pomocou tejto metódy. Tretia časť sa zaoberá vnútorným modelom sústavy, princípom metódy vnútorného modelu a návrhom PID regulátora metódou IMC.

Po všeobecnom opise prietokového chemického reaktora s dokonalým miešaním a s dvoma paralelnými exotermickými reakciami 1. poriadku bolo v praktickej časti cieľom navrhnuť fuzzy model chemického reaktora a fuzzy regulátor metódou IMC. Fuzzy regulátor bol pre porovnanie ukazovateľov kvality riadenia zapojený aj v klasickej spätnoväzbovej štruktúre a v IMC štruktúre. IMC regulátor hrá úlohu dopredného regulátora, ale IMC štruktúra nemá nevýhody doprednej regulácie, pretože dokáže potláčať vplyv porúch spätnoväzbovým signálom. Na základe simulácií a integrálnych ukazovateľov kvality možno usúdiť, že fuzzy IMC regulátor dokáže regulovanú sústavu riadiť lepšie než klasický PID regulátor, poprípade fuzzy regulátor zapojený v spätnoväzbovej štruktúre, alebo IMC regulátor. Na druhej strane použitie fuzzy modelu chemického reaktora v IMC štruktúre neprinieslo výrazné zlepšenie kvality riadenia.

V súčasnosti sa fuzzy regulátory v značnej miere využívajú v mnohých odvetviach. Preto možno predpokladať, že uplatnenie týchto regulátorov bude mať v budúcnosti svoje miesto v riadení procesov.

DODATOK

S-funkcia reprezentujúca chemický reaktor

```
function[sys,x0]=reakrt(t,x,u,flag)
q=.015;qc=0.004;
ro=1020;roc=998;
cp=4.02;cpc=4.182;
v=.23;vc=.21;
a=1.51;k=42.8;
cva=4.22;cvb=0;cvc=0;tv=328;tcv=298;
k10=1.55e11;k20=4.55e25;
e1lr=9850;e2lr=22019;
dr1h=8.6e4;dr2h=1.82e4;
cas=0.4915;cbs=2.0042;ccs=1.7243;ts=363.61;tcs=350.15;
if flag==0,
x0(1)=cas;
x0(2)=cbs;
x0(3)=ccs;
x0(4)=ts;
x0(5)=tcs;
sys=[5,0,1,1,0,0];
elseif flag==1,
k1=k10*exp(-e1lr/x(4));
k2=k20*exp(-e2lr/x(4));
hr=(dr1h*k1+dr2h*k2)*x(1);
dx(1)=q/v*(cva-x(1))-(k1+k2)*x(1);
dx(2)=q/v*(cvb-x(2))+k1*x(1);
dx(3)=q/v*(cvc-x(3))+k2*x(1);
dx(4)=hr/ro/cp+q/v*(tv-x(4))-a*k/v/ro/cp*(x(4)-x(5));
dx(5)=u(1)/vc*(tcv-x(5))+a*k/vc/roc/cpc*(x(4)-x(5));
sys=dx;
elseif flag==3,
sys(1)=x(4);%+.1*(rand-.5);
else
sys=[];
end
```

Fuzzy regulátory a fuzzy model interpretované ako matica FIS

Fuzzy regulátor – spätnoväzbová štruktúra

```
[System]
Name='fis01'
Type='sugeno'
Version=2.0
NumInputs=2
NumOutputs=1
NumRules=9
AndMethod='prod'
OrMethod='probor'
ImpMethod='prod'
AggMethod='sum'
DefuzzMethod='wtaver'

[Input1]
Name='input1'
Range=[-4.61 2.1524738]
NumMFs=3
MF1='in1mf1': 'gbellmf', [1.73 1.95 -4.61]
MF2='in1mf2': 'gbellmf', [1.81 1.99 -1.23]
MF3='in1mf3': 'gbellmf', [1.74 1.98 2.13]

[Input2]
Name='input2'
Range=[-0.36 1.02]
NumMFs=3
MF1='in2mf1': 'gbellmf', [0.32 1.99 -0.46]
MF2='in2mf2': 'gbellmf', [0.42 2.01 0.17]
MF3='in2mf3': 'gbellmf', [0.14 2.03 1.03]

[Output1]
Name='output'
Range=[-0.01 0.06]
NumMFs=9
MF1='out1mf1': 'constant', [0.06]
MF2='out1mf2': 'constant', [0.07]
MF3='out1mf3': 'constant', [0.50]
MF4='out1mf4': 'constant', [0.030]
MF5='out1mf5': 'constant', [0.0009]
MF6='out1mf6': 'constant', [-0.0005]
```

```
MF7='out1mf7': 'constant', [0.002]
MF8='out1mf8': 'constant', [-0.01]
MF9='out1mf9': 'constant', [-0.01]
```

[Rules]

```
1 1, 1 (1) : 1
1 2, 2 (1) : 1
1 3, 3 (1) : 1
2 1, 4 (1) : 1
2 2, 5 (1) : 1
2 3, 6 (1) : 1
3 1, 7 (1) : 1
3 2, 8 (1) : 1
3 3, 9 (1) : 1
```

Fuzzy regulátor – IMC štruktúra

[System]

```
Name='fis01'
Type='sugeno'
Version=2.0
NumInputs=2
NumOutputs=1
NumRules=9
AndMethod='prod'
OrMethod='probor'
ImpMethod='prod'
AggMethod='sum'
DefuzzMethod='wtaver'
```

[Input1]

```
Name='input1'
Range=[-4.61 0.75]
NumMFs=3
MF1='in1mf1': 'gaussmf', [1.44 -4.38]
MF2='in1mf2': 'gaussmf', [1.31 -2.04]
MF3='in1mf3': 'gaussmf', [1.25 0.62]
```

[Input2]

```
Name='input2'
Range=[-0.04 1.27]
NumMFs=3
MF1='in2mf1': 'gaussmf', [0.76 -0.008]
MF2='in2mf2': 'gaussmf', [0.38 0.22]
MF3='in2mf3': 'gaussmf', [0.33 1.19]
```

```
[Output1]
Name='output'
Range=[-0.006 0.05]
NumMFs=9
MF1='out1mf1': 'constant',[0.09]
MF2='out1mf2': 'constant',[0.02]
MF3='out1mf3': 'constant',[-0.04]
MF4='out1mf4': 'constant',[0.02]
MF5='out1mf5': 'constant',[-0.03]
MF6='out1mf6': 'constant',[-0.007]
MF7='out1mf7': 'constant',[0.03]
MF8='out1mf8': 'constant',[-0.02]
MF9='out1mf9': 'constant',[-0.06]
```

```
[Rules]
1 1, 1 (1) : 1
1 2, 2 (1) : 1
1 3, 3 (1) : 1
2 1, 4 (1) : 1
2 2, 5 (1) : 1
2 3, 6 (1) : 1
3 1, 7 (1) : 1
3 2, 8 (1) : 1
3 3, 9 (1) : 1
```

Fuzzy model reaktora – IMC štruktúra

```
[System]
Name='fis02'
Type='sugeno'
Version=2.0
NumInputs=1
NumOutputs=1
NumRules=4
AndMethod='prod'
OrMethod='probor'
ImpMethod='prod'
AggMethod='sum'
DefuzzMethod='wtaver'
```

```
[Input1]
Name='input1'
Range=[0 0.02]
NumMFs=4
MF1='in1mf1': 'gaussmf',[-0.0003 -0.002]
MF2='in1mf2': 'gaussmf',[0.009 0.01]
MF3='in1mf3': 'gaussmf',[-0.00214 0.03]
```

MF4='in1mf4':gaussmf,[6.82e-005 0.02]

[Output1]

Name='output'

Range=[358.25 363.61]

NumMFs=4

MF1='out1mf1':constant',[0.0006]

MF2='out1mf2':constant',[0.79]

MF3='out1mf3':constant',[0.006]

MF4='out1mf4':constant',[0.003]

[Rules]

1, 1 (1) : 1

2, 2 (1) : 1

3, 3 (1) : 1

4, 4 (1) : 1

Použitá literatúra

- [1] <http://www.rydval.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2005061701>
- [2] http://www.rexcontrols.cz/downloads/clanky/flcu_tutor.pdf
- [3] http://sk.wikipedia.org/wiki/Fuzzy_logika%20
- [4] <http://www.root.cz/clanky/ako-pracuju-fuzzy-systemy/>
- [5] Kolesárová, A., Kováčová, M.: **Fuzzy množiny a ich aplikácie**, Vydavateľstvo STU v Bratislave, 2004
- [6] Mamdani, E.H., Assilian, S.: **An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller**, Int. J. Man Mach. Studies 7, 1975
- [7] Vasičkaninová, A., Bakošová, M., Dvoran, J.: **Tvorba neuro-fuzzy modelov metódou Anfis**, AT&P journal, 11/2006, s73-76
- [8] http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/MATLAB05/prispevky/zitta/zitta.pdf
- [9] Roger Jang, J.-S., Gulley, N.: **Matlab, Fuzzy logic toolbox, User's guide**
- [10] <http://equipe.nce.ufrj.br/adriano/fuzzy/transparencias/anfis/anfis.pdf>
- [11] <http://www.mathworks.com>
- [12] <http://www.kasr.elf.stuba.sk/predmety/pmr>
- [13] Piegat, A.: **Fuzzy modeling and control**, Springer, 2001