

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

FAKULTA CHEMICKÉJ A POTRAVINÁRSKEJ TECHNOLOGIE

ÚSTAV INFORMATIZÁCIE, AUTOMATIZÁCIE A MATEMATIKY

Návrh neuro-fuzzy regulátorov v prostredí Matlab

Tomáš Hulata

BAKALÁRSKA PRÁCA

2009

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKÉJ A POTRAVINÁRSKEJ TECHNOLOGIE
ÚSTAV INFORMATIZÁCIE, AUTOMATIZÁCIE A MATEMATIKY

Návrh neuro-fuzzy regulátorov v prostredí Matlab

BAKALÁRSKA PRÁCA

Tomáš Hulata

Vedúci bakalárskej práce:

Ing. Vasičkaninová Anna

Bratislava 2009

Ďakujem vedúcej bakalárskej
práce Ing. Anne Vasičkaninovej za
pomoc pri získavaní vedomostí z oblasti
fuzzy riadenia a celkovo za vedenie,
rady a pripomienky, ktoré mi poskytla
pri vypracovaní bakalárskej práce

ABSTRAKT

Práca sa zaoberá návrhom fuzzy regulátora pre riadenie výšky hladiny kvapaliny v dvoch zásobníkoch, ktoré sú zapojené s interakciou. Pre riadenie zásobníkov boli vybranými experimentálnymi metódami navrhnuté PID regulátory, ktoré boli porovnané s fuzzy regulátorom. Pravidlá fuzzy regulátora boli navrhnuté pomocou metódy ANFIS (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System) zo vstupných a výstupných údajov (trénovacích) PID regulátora, riadiaceho výšku hladiny v druhom zásobníku. Bol vytvorený nelineárny model zásobníkov v tvare s-funkcie a použitý v simulinkovej simulačnej schéme.

Pri návrhu fuzzy regulátora boli využité prostriedky fuzzy logiky, ktoré sú súčasťou Fuzzy Logic Toolboxu Matlabu. Simulačné výsledky riadenia zásobníkov kvapaliny ukazujú, že je možné navrhnuť fuzzy regulátor s lepšími ukazovateľmi kvality ako s klasickými PID regulátormi.

ABSTRACT

The work deals with the fuzzy controllers design for two interacting tanks in series. The system of two tanks was modeled in Matlab/Simulink. The output variable was level of liquid in second tank. The input variables were flow rates of input streams. Fuzzy control is the practical alternative for the variety of challenging control applications since it provides the convenient method for constructing nonlinear controllers. The simulation results demonstrate that the fuzzy controllers can be successfully applied in control of a two interacting tanks. The fuzzy controllers parameters were designed following the equivalence between a type of FLC and the conventional ones.

Obsah

Zoznam obrázkov	7
Zoznam tabuliek	8
Zoznam symbolov a skratiek	9
Úvod	10
1 VZNIK FUZZY LOGIKY	12
1.1 Aplikácia Fuzzy logiky	12
2 FUZZY MNOŽINY	13
2.1 Operácie s fuzzy množinami	14
3 FUZZY REGULÁTOR.....	16
3.1 Architektúra fuzzy regulátora.....	17
3.2 Typy fuzzy regulátorov	18
3.3 Anfis (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System).....	18
4 RIADENIE POMOCOU PID REGULÁTORA	20
4.1 Matematický model zásobníkov kvapalín.....	20
4.2 Návrh PID regulátora	21
4.3 Kritéria kvality riadenia	22
4.4 Riadenie systému	22
5 RIADENIE POMOCOU FUZZY REGULÁTORA.....	24
5.1 Syntéza fuzzy regulátora	24
5.2 Fuzzy regulátor s jedným vstupom e.....	24
5.2.1 Porovnanie kvality riadenia.....	26
5.3 Fuzzy regulátor s dvomi vstupmi e a de.....	28
6 ZÁVER	32
Zoznam použitej literatury	33
Prílohy	34

Zoznam obrázkov

Obr.1 Príklad funkcií príslušnosti.	14
Obr.2 Grafické porovnanie operácií s množinami	15
Obr.3 Architektúra fuzzy regulátora.....	17
Obr.4 Neurónová sieť ANFIS.....	19
Obr.5 Schéma zapojenia zásobníkov	20
Obr.6 Prechodová charakteristika.....	21
Obr.7 Lichobežníkové funkcie príslušnosti pre vstup e	25
Obr.8 Akčný zásah fuzzy regulátora	25
Obr.9 Pravidlá fuzzy regulátora	26
Obr.10 Priebeh výšky hladín	27
Obr.11 Zvonové funkcie príslušnosti pre vstup e	28
Obr.12 Pravidlá fuzzy regulátora	28
Obr.13 Zvonové funkcie pre vstup e	29
Obr.14 Zvonové funkcie pre vstup de	29
Obr.15 Výstupný povrch regulátora, $u=f(e, de)$	30
Obr.16 Akčný zásah fuzzy regulátora	30
Obr.17 Priebehy regulácie	31

Zoznam tabuliek

Tab.1 Hodnoty parametrov PID regulátorov	22
Tab.2 Porovnanie kvality PID regulátorov	22
Tab.3 Porovnanie kvality fuzzy a PID regulátora	26
Tab.4 Porovnanie kvality fuzzy a PID regulátorov	27
Tab.5 Porovnanie kvality fuzzy a PID regulátora	31
Tab.6 Porovnanie kvality fuzzy a PID regulátorov	31

Zoznam symbolov a skratiek

SI	Systéme International
m	meter , základná jednotka dĺžky v sústave SI
s	sekunda , základná jednotka dĺžky času v sústave SI
min	minúta , jednotka dĺžky času (60s)
FM	fuzzy m nožina
FP	funkcia p ríslušnosti
FR	fuzzy r egulátor
PCH	p rechodová c harakteristika
PID	p roporcionálny, i ntegračný a d erivačný
Anfis	A daptive N etwork-based F uzzy I nterference S ystem
e	regulačná odchýlka
de	derivácia regulačnej odchýlky
w	požadovaná výška hladiny
u	akčný zásah

Úvod

Automatické riadenie je potrebné na stabilizáciu činnosti rôznych technických zariadení alebo na optimalizáciu prevádzky technologického procesu. V teórii automatického riadenia bolo rozpracovaných viacero prístupov pre návrh regulátora, resp. riadiaceho systému. Väčšina z nich je založená na predpoklade vytvorenia kvantitatívneho modelu, ktorý je potrebné získať fyzikálno-matematickou analýzou (napr. vo forme diferenciálnych rovníc) alebo experimentálnou identifikáciou.

Úspech regulácie závisí na tom, ako dobre je popísaný proces, ktorý chceme riadiť. V praxi sa často vyskytujú procesy, ktoré nevieme matematicky popísať, alebo je ich opis tak zložitý, že nie je možné ho použiť. Ak chceme takýto systém aspoň približne regulovať, potom existuje možnosť použiť fuzzy regulátor. Pri jeho použití postačuje poznať zjednodušený popis systému, ktorý chceme regulovať.

Pri konštrukcii regulátora je možné využívať skúsenosti operátora regulujúceho daný proces. Operátor vie na základe skúsenosti opísať svoju činnosť. Opis činnosti je v prirodzenom (ľudskom) jazyku, ten však nevieme priamo použiť na prepis do matematických formúl. Riešenie poskytuje fuzzy logika, ktorá umožňuje modelovať činnosť opísanú v prirodzenom jazyku. Fuzzy regulátor napodobňuje správanie operátora. Opis regulácie sa zjednodušuje na použitie pravidiel typu “ak predpoklad-potom, záver”.

Okrem nesporných výhod, ktoré priniesla implementácia teórie fuzzy množín, trpia čisté fuzzy systémy aj nedostatkami. Najväčším je neschopnosť “učiť sa” teda vytvoriť look-up tabuľku (tabuľku pravidiel) alebo definovať funkcie príslušnosti iba na základe spracovávaných údajov ako je tomu napríklad u neurónových sietí. Tento nedostatok je však možné odstrániť použitím hybridných systémov, rôznymi spôsobmi kombinujúcich neurónové siete a fuzzy systémy.

Fuzzy regulátory sú nelineárne regulátory, ktoré sa dajú navrhnuť presne podľa požiadaviek pre konkrétny riadiaci systém. Pôvodne fuzzy regulátory boli však odvodzované podľa klasických lineárnych PID regulátorov a aj dnes môžu mať fuzzy regulátory pravidlá odvodené podľa P, PD, PI, resp. PID regulátorov. V práci sú uvedeným spôsobom navrhnuté dva fuzzy regulátory. Pre prvý regulátor snímame

jednu veličinu na vstupe e , pre druhý snímame dve veličiny na vstupe e a de . Na výstupe sa sníma pre obidva regulátory akčný zásah u .

1 VZNIK FUZZY LOGIKY

Fuzzy logika je nadmnožinou konvenčnej Booleovskej logiky, ktorá bola rozšírená na zvládnutie čiastočných pravdivostných hodnôt, teda medzi "absolútne pravdivými" a "absolútne nepravdivými". Teória fuzzy množín bola predstavená v roku 1960 profesorom Lotfi A. Zadehom, ako prostriedok pre modelovanie neurčitosti v prirodzenom jazyku. Je to logika predstavujúca základ myslenia, ktoré je skôr približné ako presné. Dôležitosť fuzzy logiky vyplýva z faktu, že väčšina spôsobov ľudského myslenia je prirodzene približná.

Booleovská logika uvádza, že pohár môže byť buď naplnený vodou, alebo prázdny (prvok buď patrí do množiny alebo nepatrí). Ak máme pohár naplnený vodou do polovice, môžeme pohár považovať z polovice plný, alebo aj z polovice prázdny. Tento koncept určitého stupňa alebo viachodnotovosti (multivalencie) je základný koncept, ktorý využil profesor Zadeh pri predstavení fuzzy logiky. Základné charakteristiky fuzzy logiky podľa neho sú:

- Presné myslenie sa chápe ako špeciálny prípad približného myslenia
- Všetko je otázkou stupňa
- Každý logický systém môže byť fuzzifikovaný
- Znalosť je reprezentovaná ako súbor elastických, alebo ekvivalentných fuzzy ohraničení na súbore premenných
- Inferencia je chápaná ako proces množenia elastických ohraničení

Ďalšia charakteristika definuje Booleovskú logiku ako podmnožinu fuzzy logiky.

1.1 Aplikácia Fuzzy logiky

Fuzzy logika sa priamo používa len v niekoľkých aplikáciách. Väčšina aplikácií fuzzy logiky sa v súčasnosti spája s vytváraním fuzzy expertných systémov, ktoré majú široké uplatnenie v mnohých oblastiach:

- ✓ Riadenie lineárnych a nelineárnych systémov
- ✓ Spracovanie obrazov
- ✓ Finančné systémy
- ✓ Analýza dát
- ✓ Prognostika

2 FUZZY MNOŽINY

Prvým a úplne základným konceptom je samotná fuzzy množina, označíme ju symbolom A , ktorá je definovaná ako množina prvkov $a \in U$ (U je tzv. univerzum), kde každému z nich je priradený stupeň príslušnosti $\mu_A(a)$, ktorého hodnoty sa pohybujú v rozmedzí intervalu $(0; 1)$ a matematicky sa dá zapísať v podobe :

$$A = \{(a, \mu(a)), a \in U\}$$

V klasickej teórii množín je možné množinu popísať niekoľkými spôsobmi:

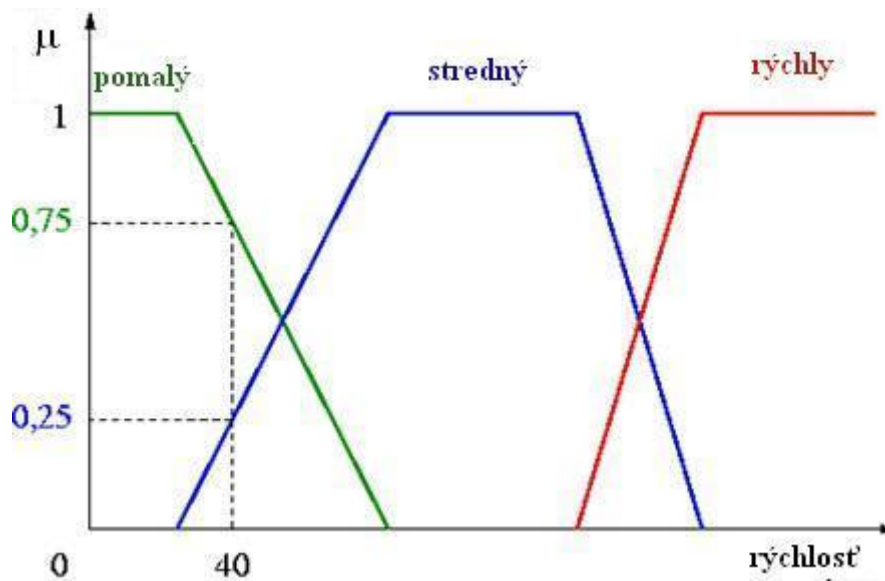
- výpočtom prvkov množiny $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$
- pravidlom, ktorému musia prvky vyhovovať $\mu_A(a)$
- charakteristickou funkciou $\mu_A(a)$, pre ktorú platí.

$$\mu_A(a) \begin{cases} 1, \text{ ak } a \in A \\ 0, \text{ ak } a \notin A \end{cases}$$

Charakteristická funkcia μ_A sa u neostrých fuzzy množín nazýva funkcia príslušnosti. Charakterizuje stupeň, s akým daný prvok patrí do príslušnej množiny, je potrebné rozlíšiť, že nejde o pravdepodobnosť, s ktorou prvok patrí do fuzzy množiny, ale skôr o silu, s ktorou do nej patrí.

Ďalším dôležitým pojmom fuzzy množín je lingvistická premenná, ktorej hodnoty sú výrazmi nejakého jazyka. Hodnotu lingvistickej premennej môžeme interpretovať ako fuzzy – neostré množiny.

Majme jeden pojem (lingvistickú premennú) *rýchlosť*, ktorú chceme popísať tromi kvalitatívnymi pojmami (lingvistickými hodnotami): *pomalý*, *stredný* a *rýchly*. Zaradíme prvok z množiny rýchlostí do troch množín, pričom hranice medzi týmito množinami nie sú ostré. Každá z týchto množín je definovaná svojou funkciou príslušnosti (μ), ako je znázornené na obr.1.



Obr.1 Príklad funkcií príslušnosti

Pre rýchlosť 40km/hod môžeme vidieť, že jej príslušnosť do FM *pomalý* je 0,75, príslušnosť do FM *stredný* je 0,25 a príslušnosť do FM *rýchly* je 0.

Premenná *rýchlosť* má definované tri hodnoty, ktoré predstavujú tri rôzne fuzzy množiny, definované tromi rôznymi lichobežníkovými funkciami príslušnosti, ktorých hodnoty sú na zvislej osi. Funkcie príslušnosti pre jednotlivé fuzzy premenné sú navzájom farebne odlíšené. Súčet hodnôt funkcií príslušností v každom bode je rovný jednej. Tvar funkciou príslušnosti (μ) sa pokiaľ je to možné, sa používa čo najjednoduchší, kvôli zníženiu výpočtovej náročnosti pri ich vyhodnocovaní, zvyčajne sú to trojuholníkové alebo lichobežníkové.

2.1 Operácie s fuzzy množinami

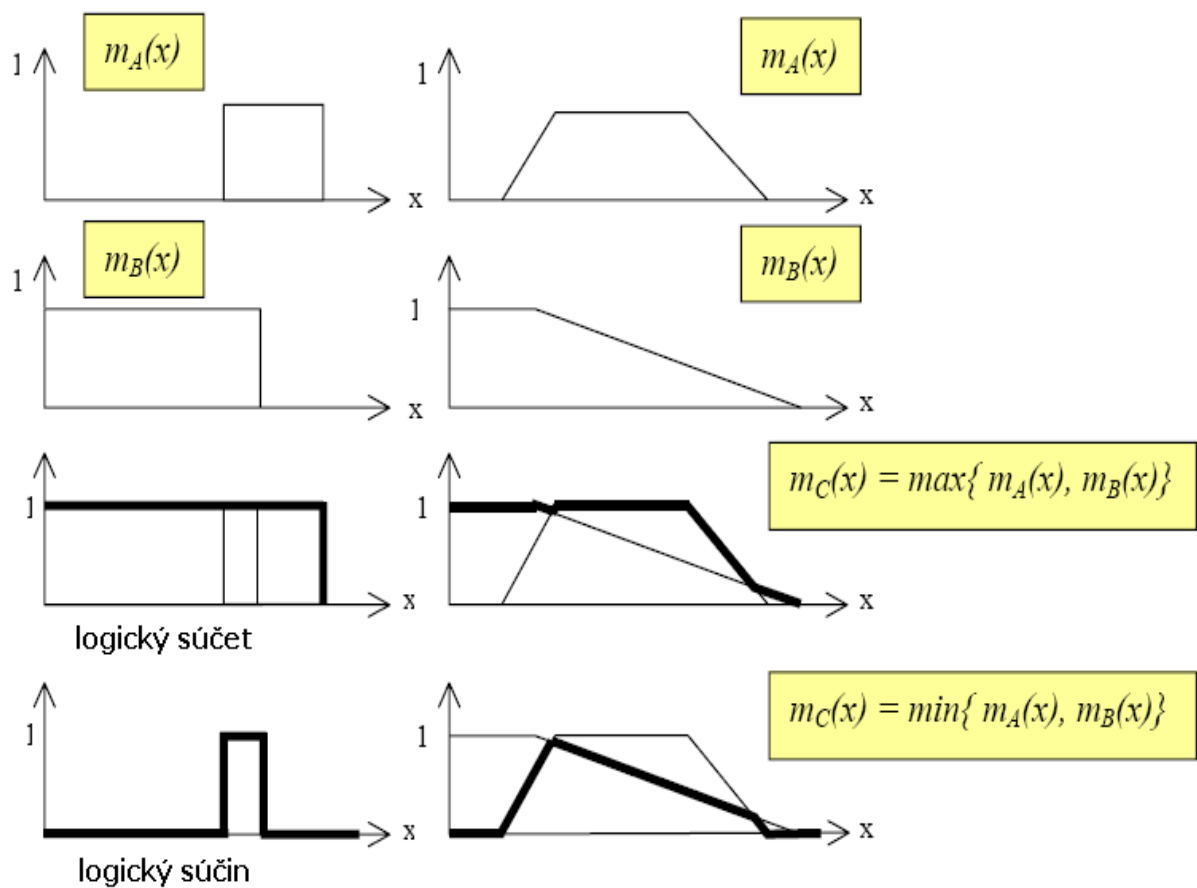
Fuzzy logika spočíva v rozšírení funkcie logických operátorov (AND, OR, NOT, NOR...) z dvojhodnotovej logiky pre viachodnotovú (fuzzy) logiku.

- fuzzy prienik množín (logický súčin) $C = A \text{ AND } B$

$$m_C = m_{A \wedge B}(x) = \min\{ m_A(x), m_B(x) \}$$

- fuzzy zjednotenie množín (logický súčet) $C = A \text{ OR } B$

$$m_C = m_{A \vee B}(x) = \max\{ m_A(x), m_B(x) \}$$



Obr.2 Grafické porovnanie operácií s množinami

Obr 2. predstavuje grafické prevedenie operácií s množinami - na ľavej strane operácie booleovskou logikou, na pravej fuzzy logikou.

3 FUZZY REGULÁTOR

Úspešnou aplikáciou teórie FM je koncept fuzzy regulátora. Bol navrhnutý v roku 1973 profesorom Mamdanim, podľa ktorého je aj pomenovaný jeden druh fuzzy regulátorov. Rozvoj FR bol zaznamenaný až v 80. rokoch, najmä v Japonsku. Napriek tomu, že sa začal používať aj v aplikáciách, kde sa s úspechom používali klasické regulátory, existujú prípady, kedy je použitie FR žiadané a opodstatnené :

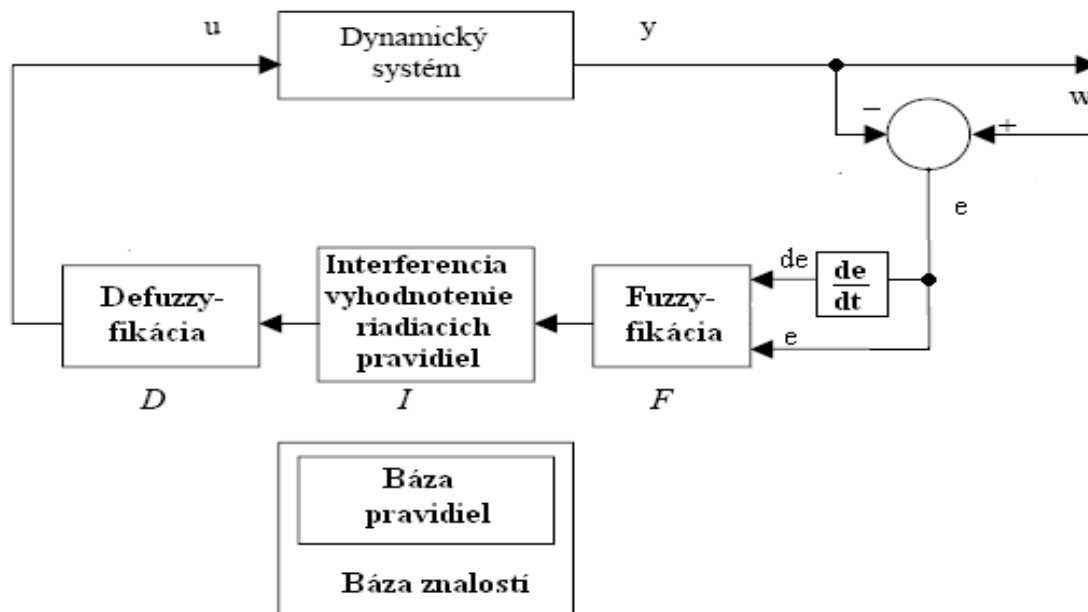
- riadená sústava je komplikovaná alebo matematicky ťažko opísateľná, klasické riadiace algoritmy totiž vyžadujú presný matematický opis sústavy, ktorý je často krát obtiažne získať
- riadená sústava je silne nelineárna, regulácia nelineárnych sústav je často založená na linearizácii v okolí pracovného bodu, Ashby odvodil, že výkonnosť (zložitosť) regulátora musí byť primeraná výkonnosti (zložitosti) regulovanej sústavy, teda nelineárnu sústavu nemožno dostatočne dobre regulovať lineárnym regulátorom, fuzzy regulátor je prirodzene nelineárny a je vhodným a dostatočne silným nástrojom na reguláciu nelineárnych sústav

O fuzzy regulátoroch je možné tvrdiť, že sú univerzálnymi aproximátormi ľubovoľnej spojitkej funkcie. Jazykové fuzzy regulátory sú fuzzy systémy s bázou znalostí, ktoré pomocou fuzzifikácie, vhodného spôsobu odvodzovanie záverov a defuzzifikácie priradujú hodnotám veličín sledovaných na vstupe hodnoty veličín sledovaných na výstupe. Z matematického hľadiska vytvárajú funkcie aproximujúce neznáme závislosti medzi sledovanými výstupnými a vstupnými veličinami. Charakteristickým znakom fuzzy riadenia je možnosť bezprostredného použitia empirických znalostí človeka – operátora o procese, ktoré sú označené ako báza znalostí. Bázu znalostí tvoria:

- informácie o stacionárnych stavoch, intervaloch, v ktorých sa pohybujú hodnoty vstupných a výstupných veličín, atď. Všetky tieto informácie o procese na báze znalostí sa označujú ako báza dát.
- kvantitatívne formulované skúsenosti a slovne definované stratégie riadenia, pomocou ktorých je možné realizovať riadenie. Z týchto skúseností získané stratégie riadenia sa označujú ako báza pravidiel.

Ak je riadená sústava citlivá na zmeny akčného zásahu, FR dokáže poskytovať plynulo sa meniace výstupy, najmä pri použití "hladkých" FP a fuzzy partícií. Vhodnou definíciou FP možno FR nastaviť tak, aby regulácia bola odolná k malým zmenám parametrov riadeného systému a vstupov, ako aj k "neobvyklým" alebo "kritickým" hodnotám vstupných veličín

3.1 Architektúra fuzzy regulátora



Obr.3 Architektúra fuzzy regulátora

Fuzzifikácia: mení ostré (crisp) vstupy na ich úrovně príslušnosti k jednotlivým lingvistickým premenným.

Báza pravidiel: obsahuje všetky fuzzy pravidlá, ktoré popisujú správanie fuzzy regulátora.

Inferencia: určenie výsledného stupňa príslušnosti celej predpokladovej časti pre každé pravidlo. Sú známe rôzne inferenčné metódy, často sa používa metóda *min*, pri ktorej je výsledný stupeň príslušnosti zhora orezaný najmenším stupňom príslušnosti vstupov (prienik fuzzy množín).

Kompozícia: určenie jednej výslednej funkcie príslušnosti výstupov pomocou stupňov príslušnosti (pravdivosti) predpokladov jednotlivých pravidiel a samotných záverov pravidiel. Často sa používa metóda *max*, pri ktorej je výsledná funkcia príslušnosti

vytváraná pridávaním maximálnych hodnôt funkcií príslušnosti záverov bod po bode (zjednotenie fuzzy množín).

Defuzzifikácia: prevod výslednej funkcie príslušnosti výstupov na reálnu hodnotu (ostrú). Často sa používa metóda ťažiska, kde sa vypočíta výsledná ostrá hodnota ako súradnica polohy ťažiska plochy výslednej funkcie príslušnosti záverov podľa vzťahu:

$$u_{out} = \frac{\int u \mu(u) du}{\int \mu(u) du}$$

3.2 Typy fuzzy regulátorov

regulátor Mamdaniho typu: fuzzy pravidlo je v tvare:

AK x je A a y je B POTOM z je C

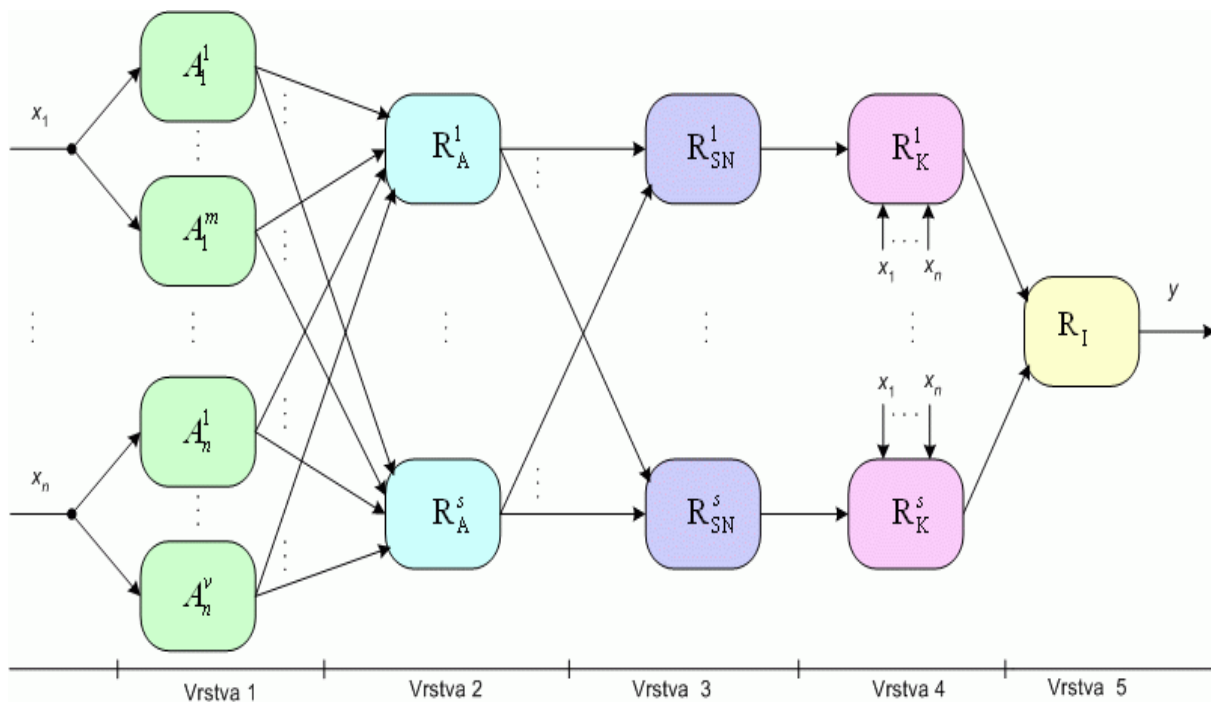
regulátor Sugenovho typu: fuzzy pravidlo je v tvare:

AK x je A a y je B POTOM $z=f(x,y)$

Výstupom Sugenovho typu sú reálne hodnoty (pre každé pravidlo), z nich sa váženým priemerom určí výsledná hodnota. Tento model je vhodný v prípade identifikácie z nameraných údajov.

3.3 Anfis (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System)

Anfis je päťvrstvová dopredná neurónová sieť, ktorej výsledkom je fuzzy inferenčný systém typu Takagi-Sugeno. 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.



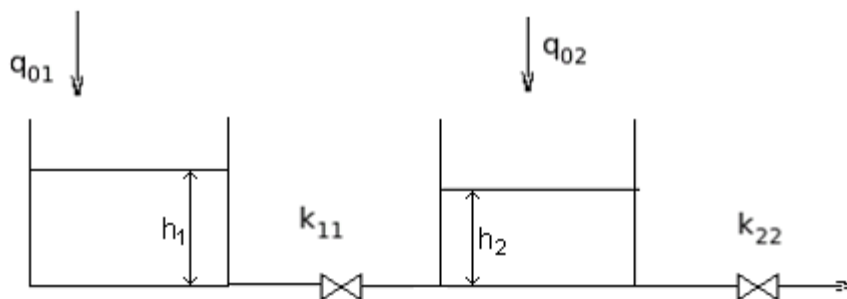
Obr.4 Neurónová sieť ANFIS

1. V prvej vrstve je vykonaná fuzzifikácia (prevod ostrých čísel na fuzzy čísla) a určí sa stupeň príslušnosti. Každý uzol predstavuje jednu funkciu príslušnosti.
2. Druhú vrstvu tvoria neadaptívne uzly, sú tu zostavené antecedenty systému, každý antecedent je daný kombináciou lingvistických hodnôt jednotlivých premenných. Výstup tejto vrstvy predstavuje váhu príslušného pravidla.
3. Tretia vrstva je normalizačná vrstva, tvoria ju tiež neadaptívne uzly. Tie poskytujú na výstupe pomer váhy jednotlivých pravidiel a súčtu váh všetkých pravidiel.
4. Štvrtú vrstvu tvoria adaptívne uzly, vypočítava sa tu konsekvent pravidla ako súčin výstupu štvrtej vrstvy a funkcie konsekventu. Môžu byť konštantné alebo lineárne.
5. Piatu vrstvu tvorí jeden neadaptívny uzol, ktorý počíta celkový výstup ako súčet všetkých vstupných signálov.

4 RIADENIE POMOCOU PID REGULÁTORA

4.1 Matematický model zásobníkov kvapalín

Zásobníky kvapaliny sú procesy s jednoduchou akumuláciou hmoty. Patria medzi najrozšírenejšie zariadenia chemickej technológie. Matematický model procesu opisuje vzťahy medzi vstupnými, stavovými a výstupnými veličinami procesu. Poskytuje možnosť určiť správanie sa procesu ak sú známe vstupy.



Obr.5 Schéma zapojenia zásobníkov

Parametre systému:

prietoky v pôvodnom rovnovážnom stave: $q_{01}^s = 1 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$, $q_{02}^s = 0,5 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$,

konštanty ventilov: $k_{11} = 0,5 \text{ m}^{2,5} \text{ min}^{-1}$, $k_{22} = 0,45 \text{ m}^{2,5} \text{ min}^{-1}$

plocha podstavy zásobníkov: $F_1 = 0,85 \text{ m}^2$, $F_2 = 0,75 \text{ m}^2$

Matematický model zásobníkov tvoria diferenciálne rovnice:

$$\begin{aligned} \frac{dh_1(t)}{dt} &= \frac{1}{F_1} q_{01}(t) - \frac{k_{11}}{F_1} \sqrt{h_1(t) - h_2(t)} & h_1(0) &= h_1^s \\ \frac{dh_2(t)}{dt} &= \frac{q_{02}}{F_2} + \frac{k_{11}}{F_2} \sqrt{h_1(t) - h_2(t)} - \frac{k_{22}}{F_2} \sqrt{h_2(t)} & h_2(0) &= h_2^s \end{aligned}$$

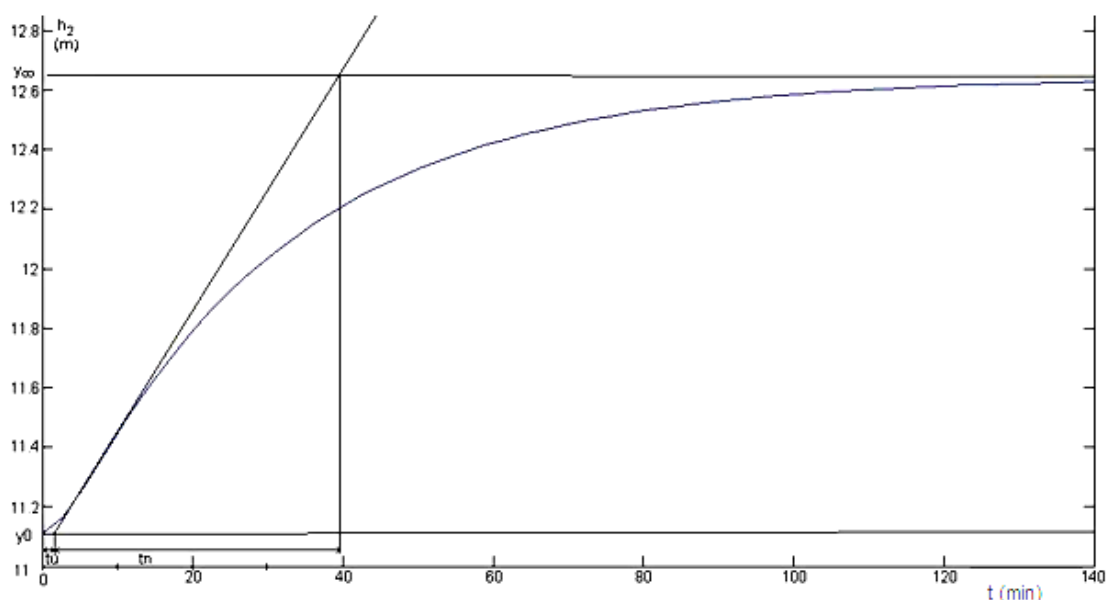
Začiatkové podmienky rovníc sú výšky hladín v ustálenom stave:

$$\begin{aligned} h_2^s &= \left(\frac{q_{01} + q_{02}}{k_{22}} \right)^2 = 11,111 \text{ m} \\ h_1^s &= h_2^s + \left(\frac{q_{01}}{k_{11}} \right)^2 = 15,111 \text{ m} \end{aligned}$$

4.2 Návrh PID regulátora

Pri riadení sústavy zásobníkov kvapaliny sa sleduje, ako vplýva vstupný prietok kvapaliny na výšky hladín v jednotlivých zásobníkoch. Práca sa zaoberá reguláciou hladiny v druhom zásobníku h_2 prítokom q_{01} . Základom schémy zostavenej v simulinku je s-funkcia obsahujúca nelineárne diferenciálne rovnice popisujúce správanie systému.

Simuláciou 20% skokovej zmeny prítoku q_{01} v čase $t=0$ sa získala PCH systému. PCH predstavuje priebeh výšky hladiny pri skokovej zmene, tj. reakcia výšky hladiny v druhom zásobníku na skokovú zmenu prítoku q_{01} . Pomocou jej analýzy sa získajú údaje potrebné k návrhu PID regulátora.



Obr.6 Prechodová charakteristika

Z PCH sa nameralo zosilnenie $Z=15,3$, čas náběhu $t_n=38,2$ a čas prietahu $t_u=1,75$. Tieto údaje sú využívané viacerými metódami syntézy PID regulátorov. V práci sa použila Ziegler-Nicholsova, Cohen-Coonova a Smith-Murrilova metóda. Hodnoty navrhnutých parametrov Z_R , T_I , T_D pre PID regulátory sú uvedené v tabuľke 1. Výsledky riadenia výšky kvapaliny v druhom zásobníku boli porovnávané na základe troch ukazovateľov kvality riadenia. Podľa PCH sa dynamické vlastnosti systému aproximujú pomocou nahradného prenosu:

$$G(s) = \frac{15,3}{38,2s + 1} e^{-1,75s}$$

Tab.1 Hodnoty parametrov PID regulátorov

metóda	Ziegler- Nicholsova	Cohen- Coonova	Smith- Murrilova
ZR	1,7023	1,9024	1,6442
TI	3,52	4,2493	4,6618
TD	0,88	0,6347	0,6771

4.3 Kritéria kvality riadenia

1. čas regulácie (t_{reg}) - je to čas, za ktorý dosiahne výstupná veličina po skokovej zmene w , žiadajú veličinu s určitou presnosťou.

- integrálne kritériá kvality:

2. IAE - predstavuje plochu absolútnej hodnoty odchýlky riadenia, e (rozdiel žiadanej výšky v zásobníku w a aktuálnej hodnoty hladiny h_2).

$$I_{IAE} = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$

3. ISE plocha kvadratickej odchýlky riadenia:

$$I_{ISE} = \int_0^{\infty} e^2(t) dt$$

4.4 Riadenie systému

Regulátor sa používa na dosiahnutie požadovanej výšky hladiny v zásobníku. Žiadaná hodnota výšky sa zvolila o 15% väčšia, ako je výška hladiny v pôvodnom ustálenom stave, čo predstavuje hodnota $w=12,778m$.

Tab.2 Porovnanie kvality PID regulátorov

regulátor	Smith - Murril	Ziegler - Nichols	Cohen- Coon
iae	9,85	9,33	10,68
ise	8,10	11,59	8,68
treg [min]	16,40	22,20	16,10

Tab.2 porovnáva simuláciou získané údaje o kvalite riadenia. Z týchto hodnôt sa dá považovať regulátor navrhnutý metódou Smith-Murril za najkvalitnejší. Pri simulácii riadenia sa zaznamenávali údaje potrebné pre tréning fuzzy regulátora. Súbor týchto údajov obsahoval hodnoty regulačnej odchýlky e , jej zmeny de a hodnoty akčnej veličiny u .

5 RIADENIE POMOCOU FUZZY REGULÁTORA

5.1 Syntéza fuzzy regulátora

Fuzzy logika vychádza z ľudského pozorovania procesu, teda nemá zmysel použiť veľké množstvo funkcií príslušností (jazykových hodnôt) pre jednu jazykovú premennú. Počet funkcií sa volí obvykle z intervalu 3-7. Tvar funkcií príslušností je závislý od predpokladaného využitia fuzzy regulátora. V praxi sa najčastejšie používa zvonová a lichobežníková funkcia príslušnosti. Ak sú k dispozícii tréningové údaje, v Matlab-e je možné pomocou funkcie `anfis` navrhnúť fuzzy regulátor typu Takagi – Sugeno. V tomto type regulátora sú konsekventy pravidiel lineárnou funkciou vstupov alebo konštantou, koeficienty sa určujú metódou najmenších štvorcov pomocou tréningových údajov. Funkcie príslušnosti sa môžu vybrať z trojuholníkových, lichobežníkových, zvonových, pí, gaussových.

5.2 Fuzzy regulátor s jedným vstupom e

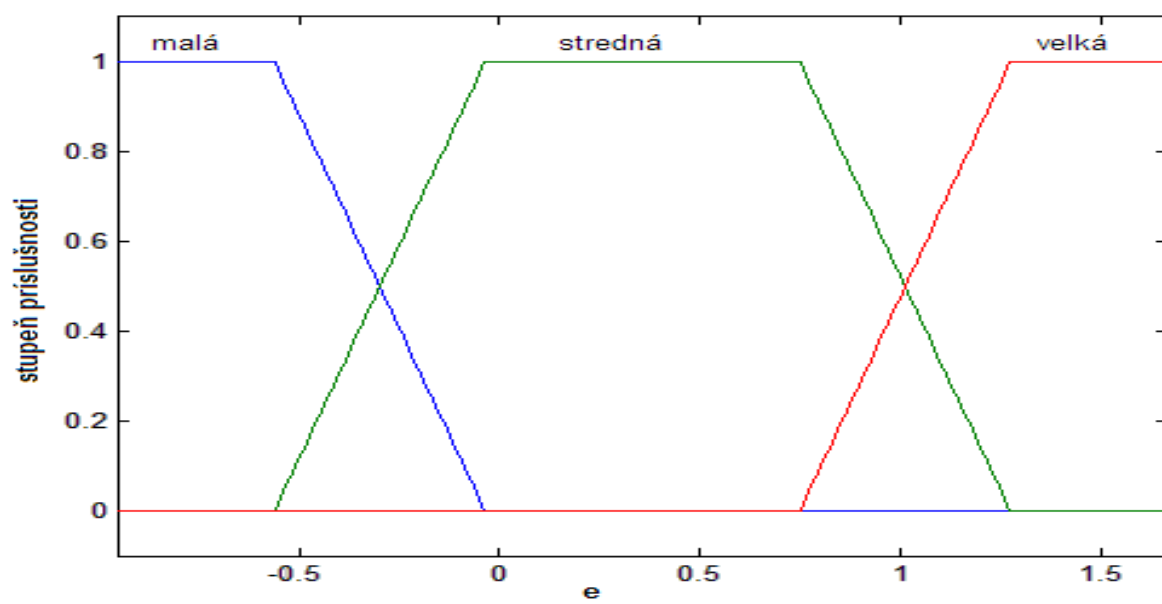
Pre získanie parametrov regulátora bol vytvorený skript s názvom `navrhfur.m` uvedený v prílohách. Obsahuje funkciu `genfis1`, ktorá generuje východiskový fuzzy inferenčný systém (FIS) Sugenovského typu na tréningovanie neurónovej siete `anfis`, ďalšou funkciou je `anfis` a príkazy `plotmf`, `plot` na vykresľovanie grafov.

Keďže regulátor PID, navrhnutý Smith-Murrilovou metódou bol na základe ukazovateľov kvality vyhodnotený ako najlepší, boli pre natréningovanie fuzzy regulátora použité údaje získané simulácie riadenia týmto regulátorom. Pre fuzzy regulátor je vstup e lingvistická premenná s hodnotami *malá*, *stredná*, *veľká*. Bola zvolená lichobežníková funkcia príslušnosti.

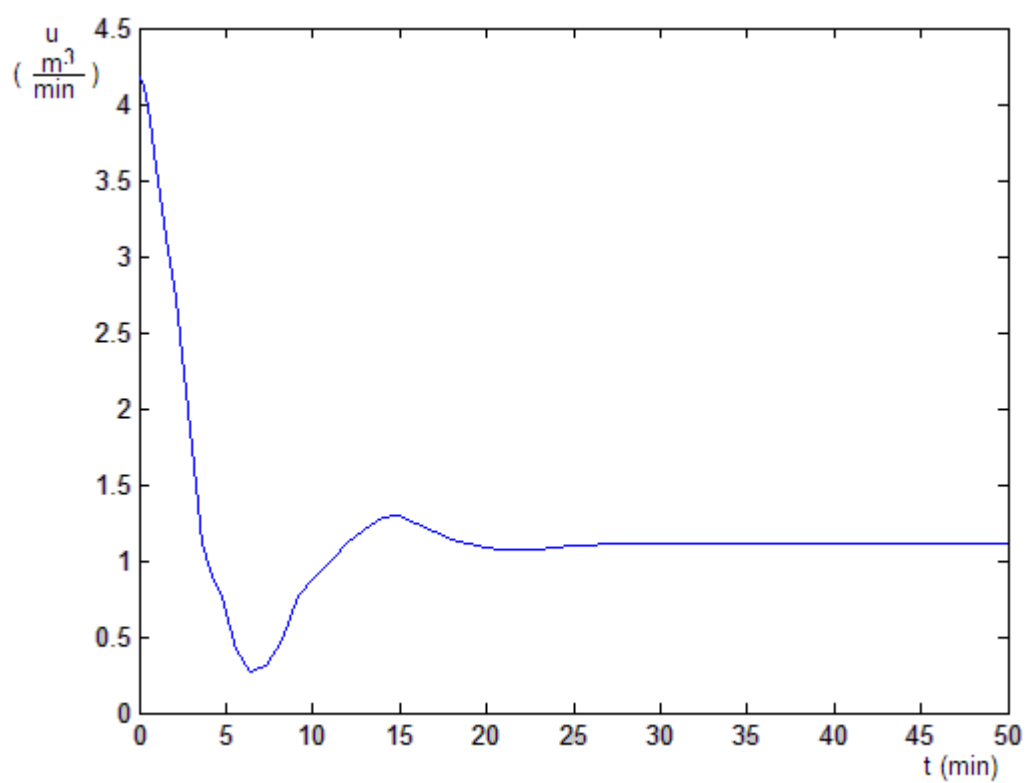
Táto funkcia príslušnosti má 4 parametre $[A \ B \ C \ D]$, $A \leq B$ a $C \leq D$

$[A \ B \ C \ D]$ pre e , pre všetky 3 lingvistické hodnoty:

$[-1.87 \ -1.35 \ -0.56 \ -0.04] \ [-0.54 \ -0.03 \ 0.75 \ 1.27] \ [0.74 \ 1.27 \ 2.06 \ 2.58]$

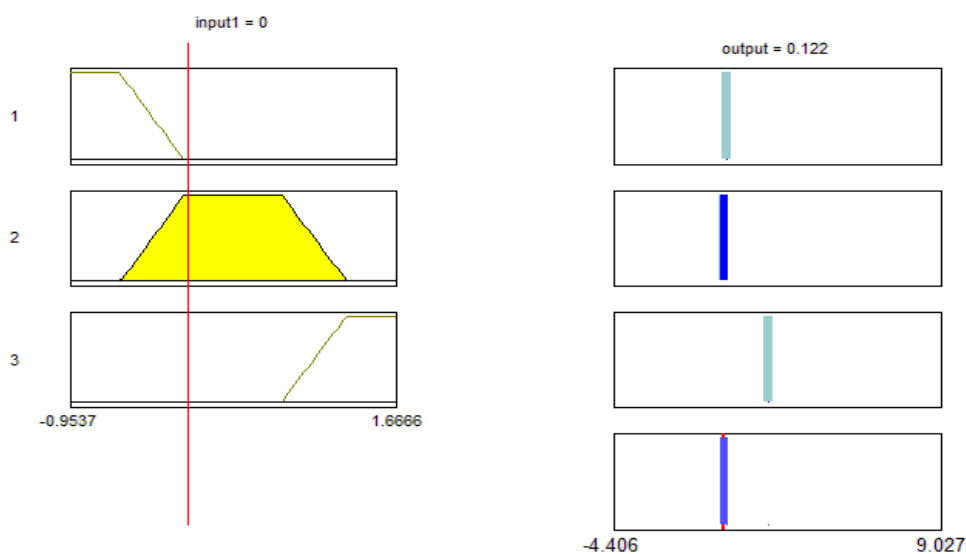


Obr.7 Lichobežníkové funkcie príslušnosti pre vstup e



Obr.8 Akčný zásah fuzzy regulátora

Nasledujúci obrázok graficky prezentuje pravidlá pre vstup a vypočítaný výstup.



Obr.9 Pravidlá fuzzy regulátora

5.2.1 Porovnanie kvality riadenia

Údaje získané simuláciou za použitia fuzzy a PID regulátora sú zhrnuté v nasledujúcej tabuľke.

Tab.3 Porovnanie kvality fuzzy a PID regulátora

regulátor	fuzzy e,u 4,trapmf	Smith - Murril
iae	7,82	9,85
ise	6,35	8,10
treg [min]	14,55	16,40

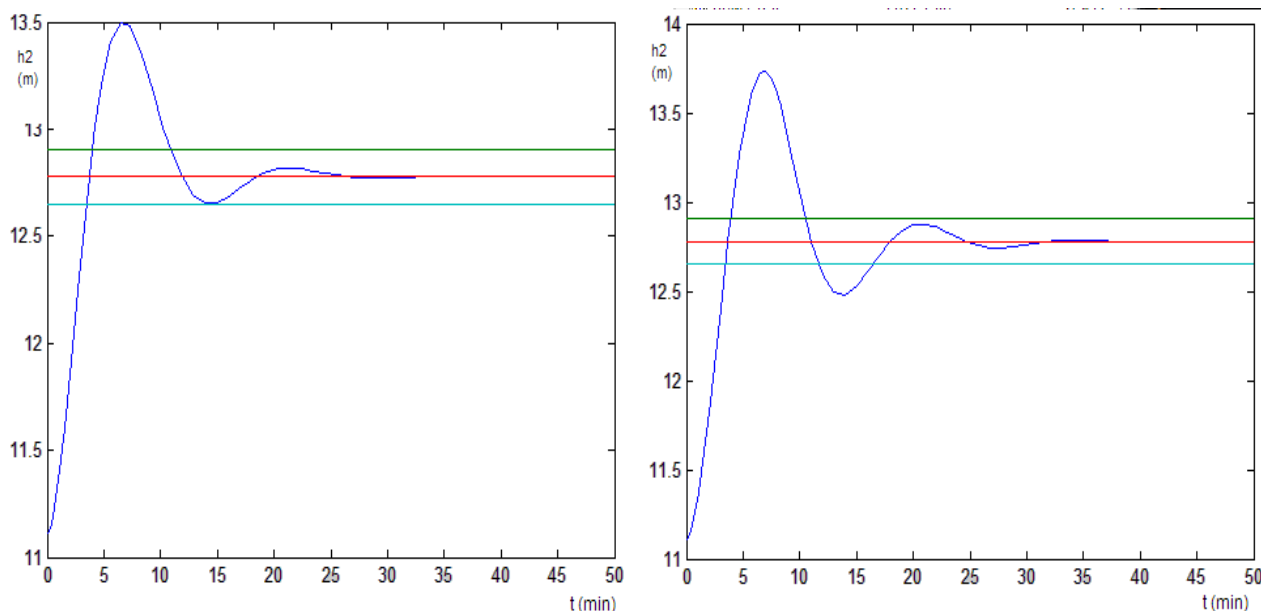
Fuzzy regulátor s tromi lichobežníkovými funkciami príslušnosti pre obidva vstupy dosiahol kratší čas regulácie a nižšie hodnoty *ise*, *iae* ako PID regulátor.

Použitím tréningového PID regulátora s konštantami $Z_R=1,902$, $T_I= 4,249$, $T_D=0,761$ a zmenou funkcií príslušnosti na zvonové sa dosiahol kratší čas regulácie FR ako v predošlom prípade, čo dokumentuje tabuľka 4 a obr. 10.

Tab.4 Porovnanie kvality fuzzy a PID regulátorov

regulátor	fuzzy e,u 4,trapmf	Smith - Murril	fuzzy e,u 4,gbell
iae	7,82	9,85	7,78
ise	6,35	8,10	6,40
treg [min]	14,55	16,40	10,92

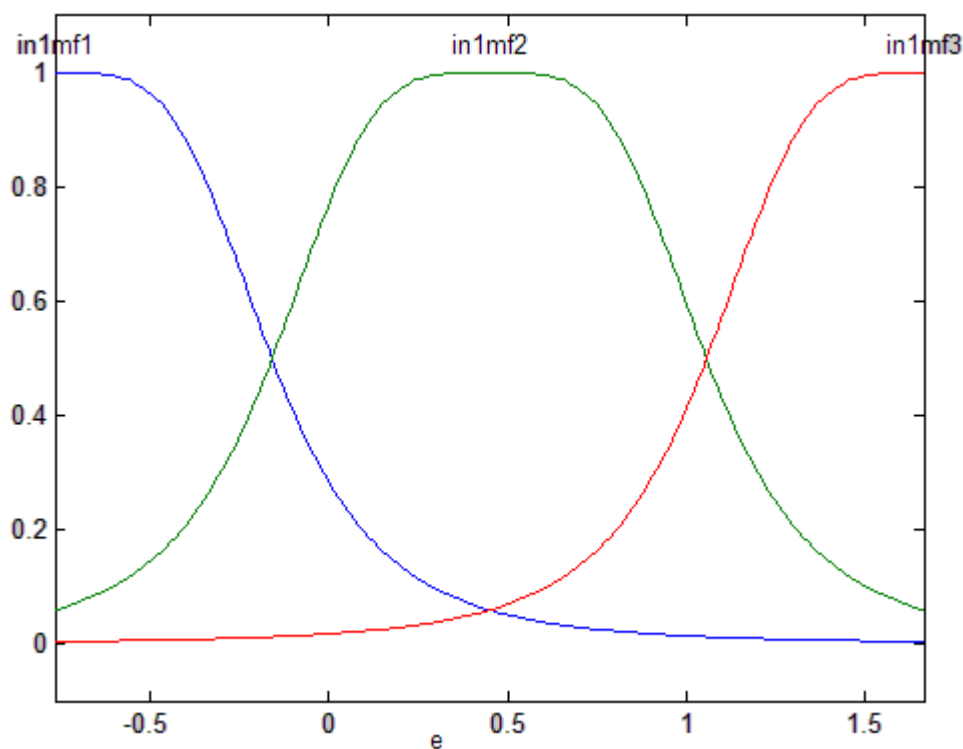
Z porovnania hodnôt sa dá usúdiť, že je možné navrhnuť fuzzy regulátor schopný prekonať vo zvolených kritériách kvality klasický PID regulátor. Nasledujúce grafy zobrazuje priebeh výšky hladiny v druhom zásobníku, vľavo riadenie pomocou FR, vpravo pomocou PID regulátora.



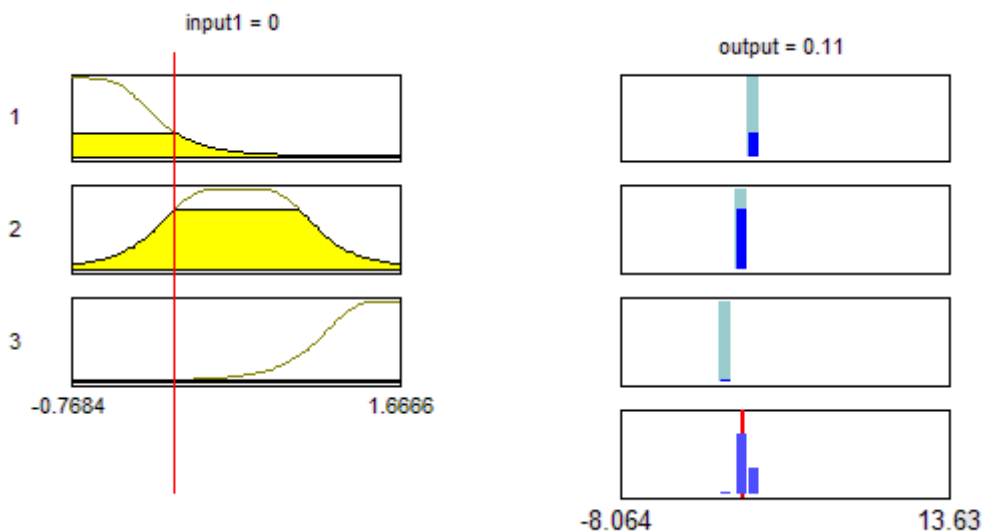
Obr.10 Priebeh výšky hladín

Na priebehu možno vidieť menšie kmitanie hladiny pri FR a kratší čas regulácie. Použité zvonové funkcie príslušnosti pre vstup e majú 3 parametre $[A \ B \ C]$ udávajúce tvar a polohu FP.

$[A \ B \ C]$ pre e : $[0.62 \ 2.00 \ -0.76]$ $[0.60 \ 1.99 \ 0.46]$ $[0.61 \ 2 \ 1.66]$



Obr.11 Zvonové funkcie príslušnosti pre vstup e



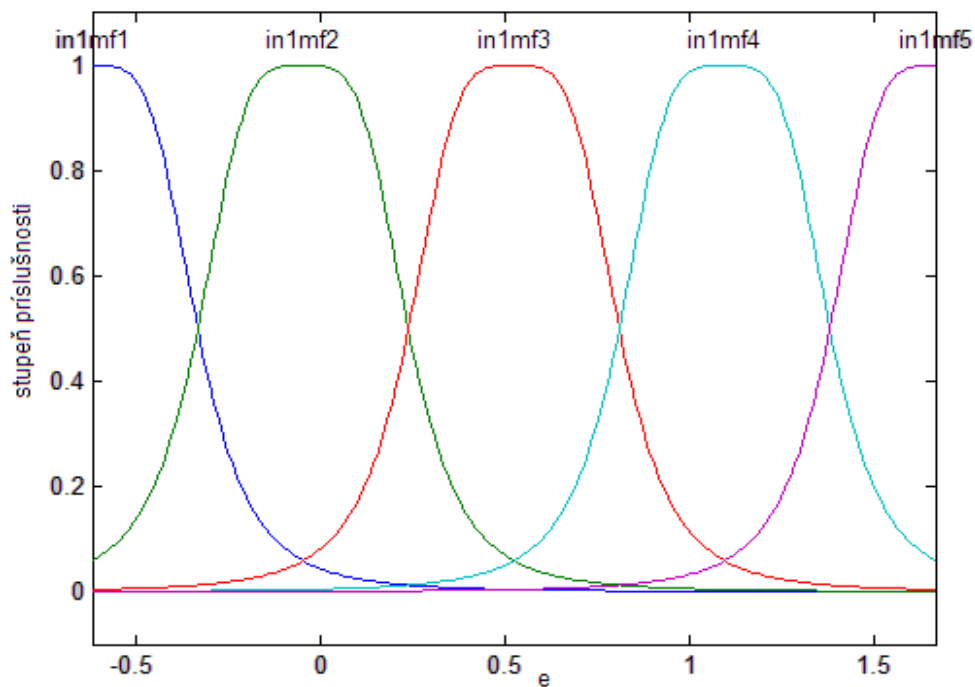
Obr.12 Pravidlá fuzzy regulátora

5.3 Fuzzy regulátor s dvomi vstupmi e a de

Pri návrhu regulátora Anfis používal dva vstupné údaje e , de a jeden výstupný údaj u . Sumulinkovú schému fuzzy regulátora bolo treba upraviť pridaním druhého vstupu de do regulátora. Pre trénovanie sa použili hodnoty, získané pomocou PID regulátora s konštantami $Z_R=5$, $T_I=19,23$, $T_D=0,4$. Najlepšie hodnoty ukazovateľov

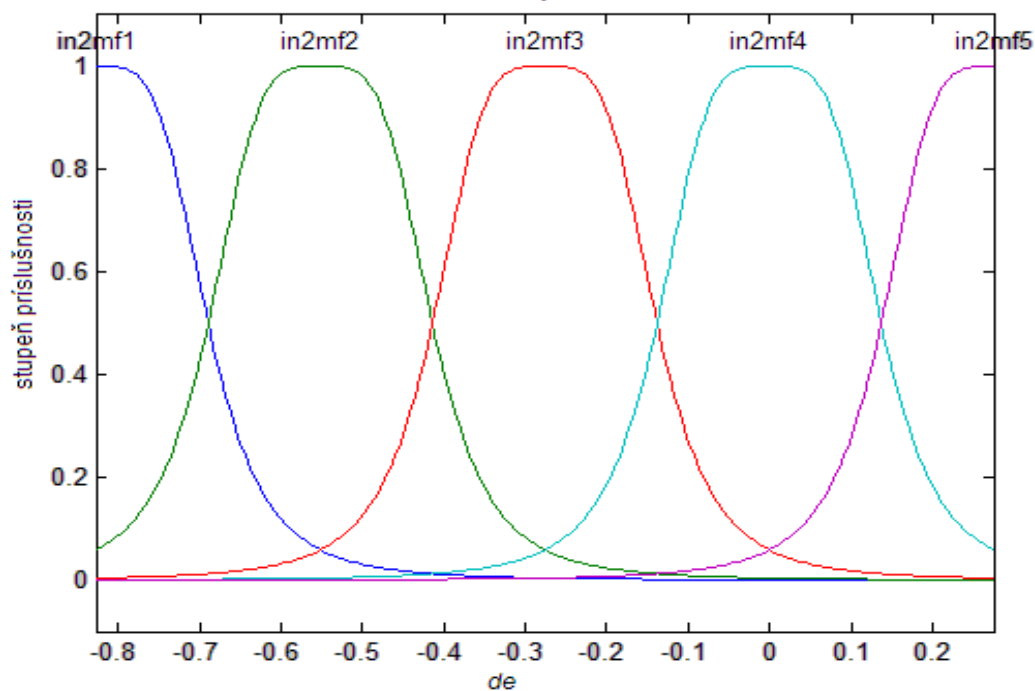
kvality boli dosiahnuté pri zvonových funkciách príslušnosti, počet týchto funkcií bol 5. Funkcie príslušnosti sú zobrazené na obr.13 a 14.

[A B C] pre e : [0.29 2 -0.61] [0.28 2 -0.04] [0.28 2 -0.04] [0.28 2 1.10] [0.29 2 1.67]

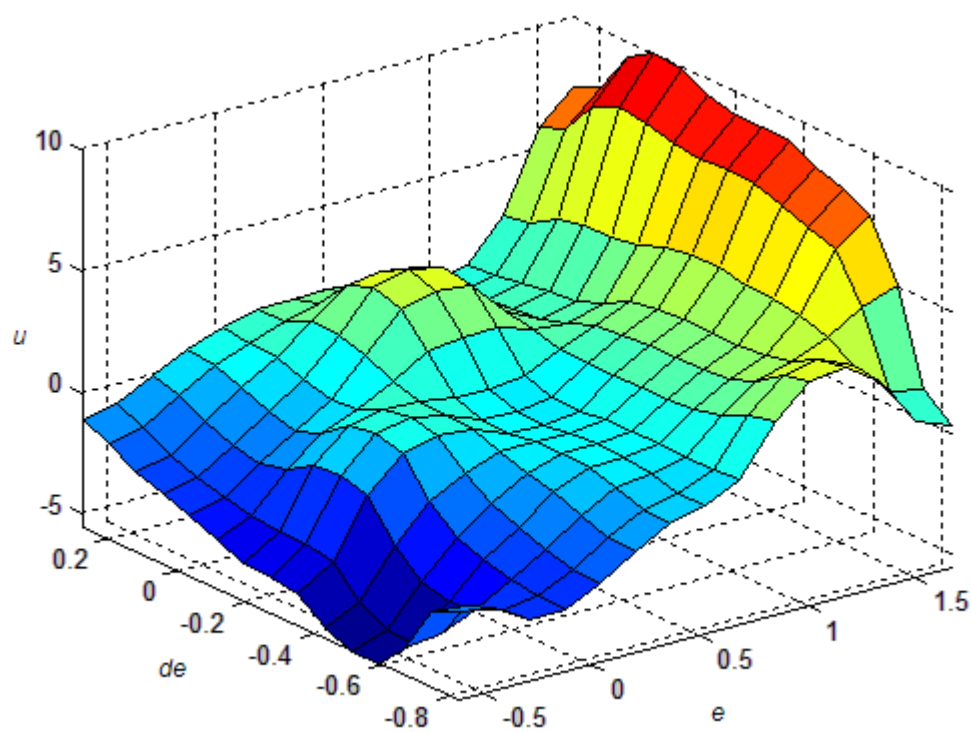


Obr.13 Zvonové funkcie pre vstup e

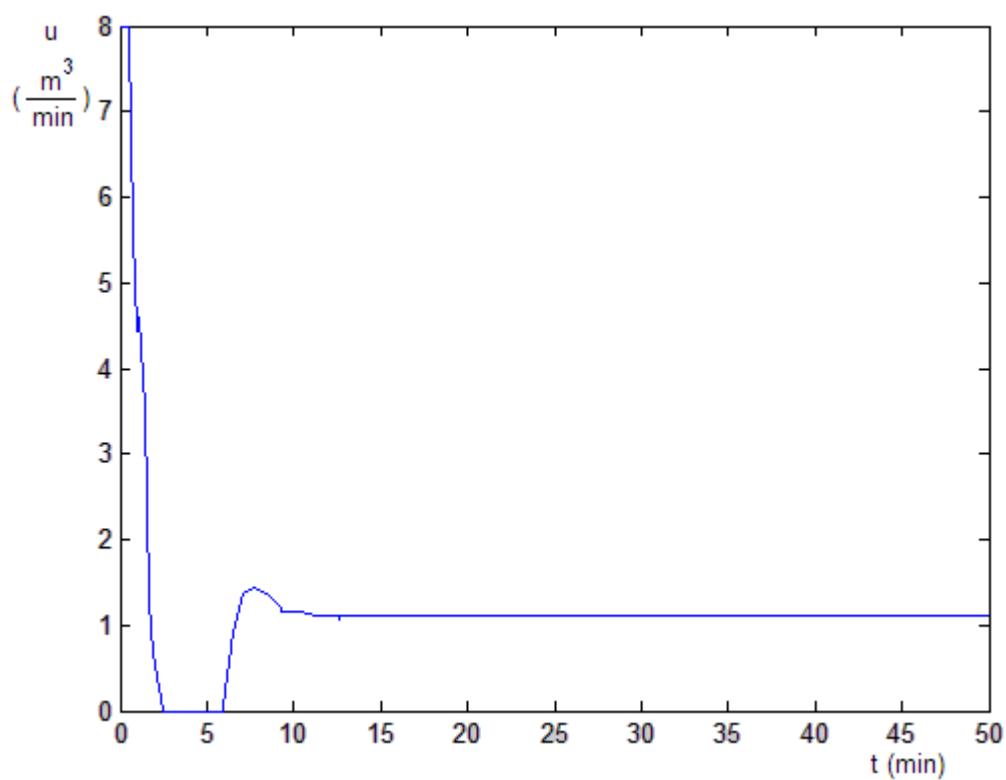
[A B C] pre de : [0.29 2 1.67] [0.14 2 -0.55] [0.14 2 -0.26] [0.14 2 0] [0.13 2 0.28]



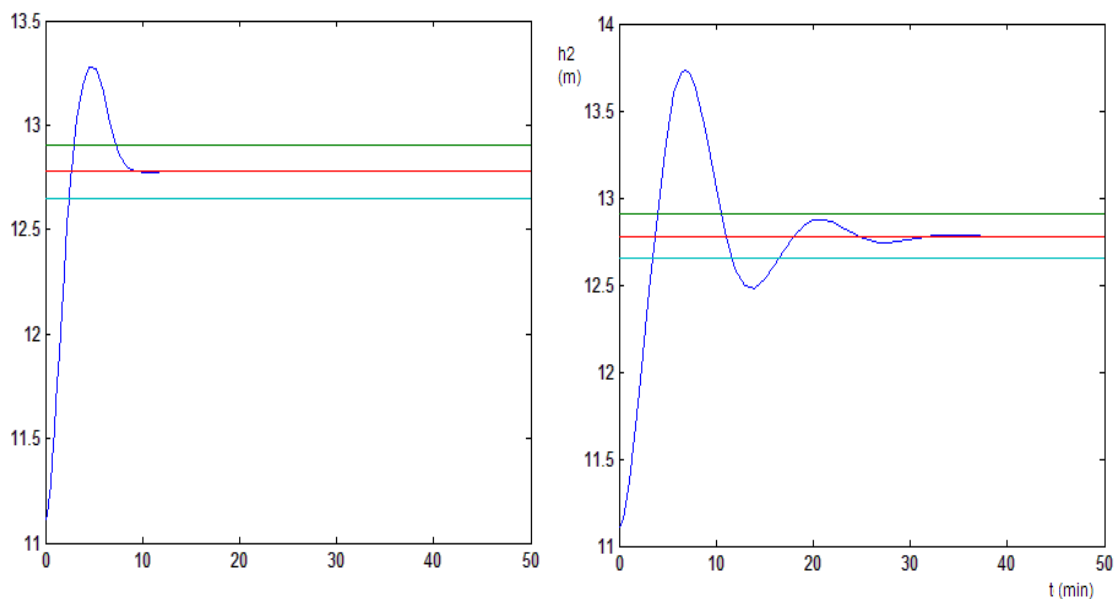
Obr.14 Zvonové funkcie pre vstup de



Obr.15 Výstupný povrch regulátora, $u=f(e, de)$



Obr.16 Akčný zásah



Obr.17 Priebehy regulácie

Na obr.17 je znázornený priebeh výšky hladiny v druhom zásobníku, riadenej FR vľavo a PID regulátorom vpravo. V porovnaní s PID regulátorom dosiahol lepšie ukazovatele kvality regulácie, ich hodnoty sú uvedené v tabuľke 7.

Tab.5 Porovnanie kvality fuzzy a PID regulátora

regulátor	fuzzy e,de,u 5,gbell	Smith - Murril
iae	4,121	9,85
ise	3,638	8,10
treg [min]	7,25	16,40

Tabuľka 6 porovnáva tri PID regulátory navrhnuté experimentálnymi metódami pomocou PCH a dva navrhnuté fuzzy regulátory.

Tab.6 Porovnanie kvality fuzzy a PID regulátorov

regulátor	Smith - Murril	Ziegler - Nichols	Cohen- Coon	fuzzy e,u 4,gbell	fuzzy e,de,u 5,gbell
iae	9,85	9,33	10,68	7,78	4,121
ise	8,10	11,59	8,68	6,40	3,638
treg [min]	16,40	22,20	16,10	10,92	7,25

6 ZÁVER

Predmetom tejto práce bolo navrhnúť fuzzy regulátor pre riadenie výšky hladiny dvoch zásobníkov kvapalín zapojených s interakciou. Prítokom q_{01} sa regulovala hladina v druhom zásobníku (h_2). Práca bola robená v prostredí Matlab a Simulink s pomocou Fuzzy Logic Toolboxu. Model zásobníkov kvapaliny bol použitý nelineárny v tvare s-funkcie.

Návrh fuzzy regulátora pozostával z vybratia funkcie príslušnosti, počtu funkcií príslušnosti, simulácie riadenia a porovnania kvality riadenia. Pravidlá fuzzy regulátora boli vytvorené pomocou metódy Anfis z údajov získaných simuláciou riadenia systému PID regulátormi. Kritériami kvality boli čas regulácie, plocha absolútnej a kvadratickej odchýlky riadenia.

Prvým krokom bola syntéza PID regulátorov experimentálnymi metódami, ktoré pri návrhu konštant využívajú PCH systému. PID regulátory boli použité ako referenčné pre porovnávanie kvality riadenia a pri tréningu fuzzy regulátorov. Simuláciou a porovnaním výsledkov (ukazovateľov kvality) PID regulátorov bol vyhodnotený za najkvalitnejší regulátor nastavený podľa metódy Smith-Murril ($Z_R = 1,644$ $T_I = 4,662$, $T_D = 0,677$). Ďalšie používané PID regulátory boli s konštantami $Z_R=6$, $T_I=10,909$, $T_D=0,841$ a $Z_R=1,902$, $T_I=4,249$, $T_D=0,761$ získané zmenou hodnôt Z_R , T_I , T_D tak, aby pri simulácii riadenia dosiahli čo najlepšie výsledky a bolo z nich možné natrénovať použiteľné FR.

Navrhnuté boli dva fuzzy regulátory. Prvým bol regulátor s jedným vstupom e a výstupom u . Najlepšie hodnoty dosiahol pri štyroch zvonových funkciách príslušnosti. Hodnoty ukazovateľov kvality boli lepšie ako pri klasických PID regulátoroch vo všetkých zvolených kritériách.

Druhý bol FR s dvomi vstupmi e a de . Tento regulátor dosiahol najlepšie výsledky pri piatich funkciách príslušnosti zvonového tvaru pre obidva vstupy. Dosiahol najlepšie výsledky z navrhnutých fuzzy aj PID regulátorov.

Výsledky práce ukazujú, že je možné navrhnúť fuzzy regulátory riadiace zásobníky kvapaliny s lepšími ukazovateľmi kvality ako pri regulácii s PID regulátormi.

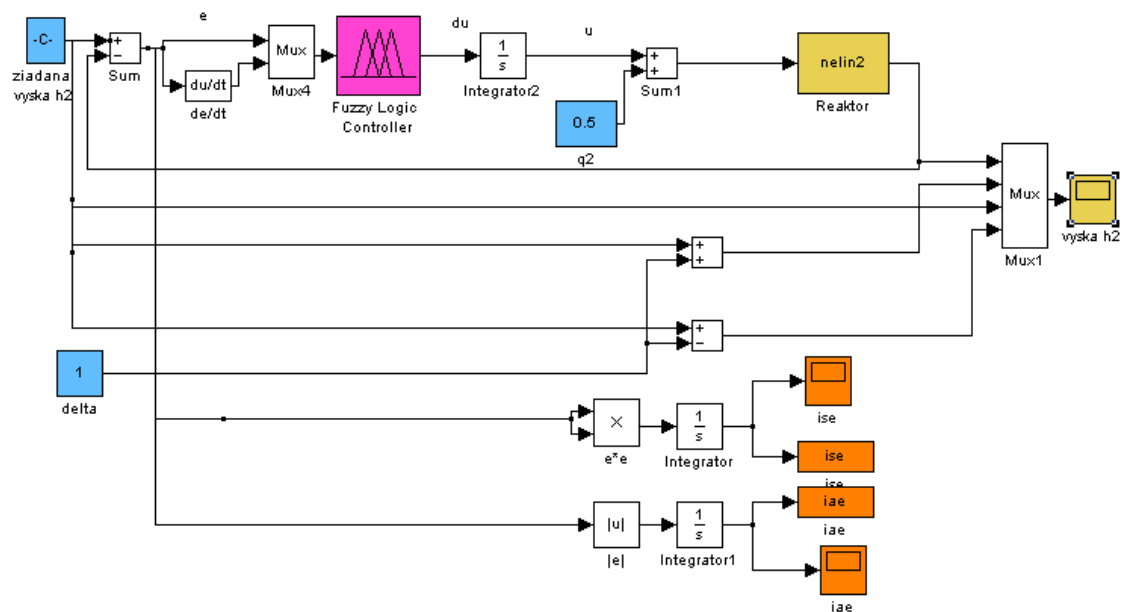
Zoznam použitej literatury

- [1] Modrlák, O. : Fuzzy řízení a regulace.2002
- [2] Vasičkaninová, A.; Bakošová, M.; Dvoran, J. : Tvorba neuro-fuzzy modelov
metódou Anfis.
- [3] Bakošová.M.; Fikar,M.; Čirka,L.: Základy automatizácie.2003
- [4]<http://www.root.cz/clanky/ako-pracuju-fuzzy-systemy/>

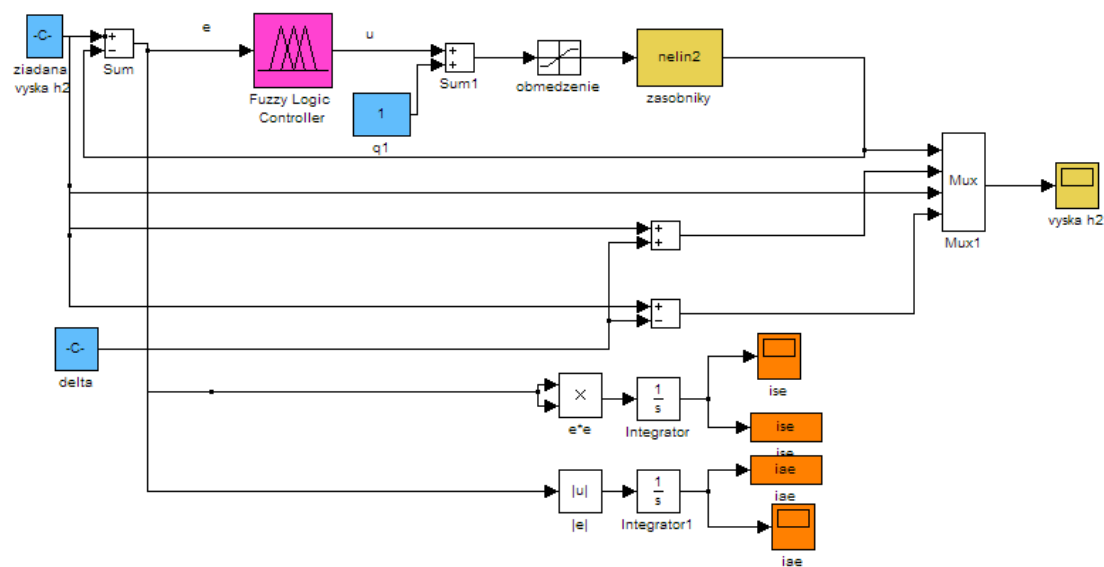
Prílohy

Príloha A : CD médium s prácou a prílohami v elektronickej podobe

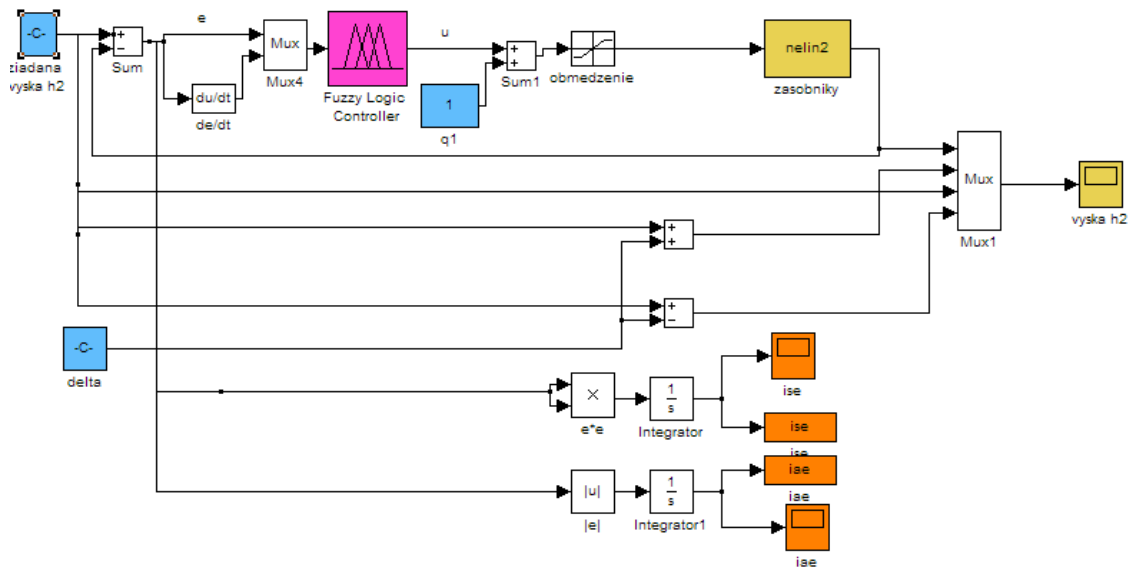
Príloha B: Schéma zapojenia PID regulátora



Príloha C: Schéma zapojenia fuzzy regulátora s jedným vstupom e



Príloha D: Schéma zapojenia fuzzy regulátora s dvomi vstupmi e, de



Príloha E: Výstupná fis matica: fuzzy regulátor s jedným vstupom e

[System]

Name='fis1'

Type='sugeno'

Version=2.0

NumInputs=1

NumOutputs=1

NumRules=4

AndMethod='prod'

OrMethod='max'

ImpMethod='prod'

AggMethod='max'

DefuzzMethod='wtaver'

[Input1]

Name='input1'

Range=[-0.76 1.66]

NumMFs=4

MF1='in1mf1': 'gbellmf', [0.41 2.00 -0.75]

MF2='in1mf2': 'gbellmf', [0.40 1.99 0.05]

MF3='in1mf3': 'gbellmf', [0.40 2.00 0.84]

MF4='in1mf4':'gbellmf',[0.40 2.00 1.66]

[Output1]

Name='output'

Range=[-0.76 3.17]

NumMFs=4

MF1='out1mf1':'linear',[1.17 0.105]

MF2='out1mf2':'linear',[0.27 -0.03]

MF3='out1mf3':'linear',[-1.09 2.83]

MF4='out1mf4':'linear',[1.54 0.72]

[Rules]

1, 1 (1) : 1

2, 2 (1) : 1

3, 3 (1) : 1

4, 4 (1) : 1

Príloha F: Výstupná fis matica: fuzzy regulátor s dvomi vstupmi *e,de*

[System]

Name='fis1'

Type='sugeno'

Version=2.0

NumInputs=2

NumOutputs=1

NumRules=25

AndMethod='prod'

OrMethod='max'

ImpMethod='prod'

AggMethod='max'

DefuzzMethod='wtaver'

[Input1]

Name='input1'

Range=[-0.61 1.66]

NumMFs=5

```
MF1='in1mf1': 'gbellmf', [0.28 2.00 -0.61]
MF2='in1mf2': 'gbellmf', [0.28 1.99 -0.04]
MF3='in1mf3': 'gbellmf', [0.28 2.00 0.52]
MF4='in1mf4': 'gbellmf', [0.28 2.00 1.09]
MF5='in1mf5': 'gbellmf', [0.28 2.00 1.66]
```

[Input2]

```
Name='input2'
```

```
Range=[-0.82 0.27]
```

```
NumMFs=5
```

```
MF1='in2mf1': 'gbellmf', [0.13 2.00 -0.82]
MF2='in2mf2': 'gbellmf', [0.13 2.00 -0.54]
MF3='in2mf3': 'gbellmf', [0.14 1.99 -0.26]
MF4='in2mf4': 'gbellmf', [0.13 1.99 0.00]
MF5='in2mf5': 'gbellmf', [0.131 2.00 0.27]
```

[Output1]

```
Name='output'
```

```
Range=[-3.51 9.99]
```

```
NumMFs=25
```

```
MF1='out1mf1': 'linear', [0.08 0.56 -0.91]
MF2='out1mf2': 'linear', [1.35 1.97 -4.18]
MF3='out1mf3': 'linear', [2.67 -1.17 -3.00]
MF4='out1mf4': 'linear', [1.08 2.36 -2.07]
MF5='out1mf5': 'linear', [0.19 5.20 -2.36]
MF6='out1mf6': 'linear', [4.03 0.55 -2.24]
MF7='out1mf7': 'linear', [4.60 3.69 0.41]
MF8='out1mf8': 'linear', [-0.38 0.01 1.52]
MF9='out1mf9': 'linear', [4.13 6.35 -0.27]
MF10='out1mf10': 'linear', [2.07 1.94 0.49]
MF11='out1mf11': 'linear', [0.91 -1.00 -1.76]
MF12='out1mf12': 'linear', [-1.01 0.18 0.81]
MF13='out1mf13': 'linear', [-0.05 0.03 -0.39]
MF14='out1mf14': 'linear', [0.78 1.54 4.20]
```

MF15='out1mf15': 'linear', [0.19 0.11 1.17]
 MF16='out1mf16': 'linear', [1.57 -1.28 1.66]
 MF17='out1mf17': 'linear', [1.06 -0.44 0.88]
 MF18='out1mf18': 'linear', [1.25 -0.35 0.83]
 MF19='out1mf19': 'linear', [0.19 0.24 0.18]
 MF20='out1mf20': 'linear', [0.19 0.01 0.13]
 MF21='out1mf21': 'linear', [-0.22 0.07 -0.12]
 MF22='out1mf22': 'linear', [3.51 -0.67 2.32]
 MF23='out1mf23': 'linear', [3.65 -2.20 2.79]
 MF24='out1mf24': 'linear', [4.85 3.46 2.79]
 MF25='out1mf25': 'linear', [3.19 0.09 1.91]

[Rules]

1 1, 1 (1) : 1
 1 2, 2 (1) : 1
 1 3, 3 (1) : 1
 1 4, 4 (1) : 1
 1 5, 5 (1) : 1
 2 1, 6 (1) : 1
 2 2, 7 (1) : 1
 2 3, 8 (1) : 1
 2 4, 9 (1) : 1
 2 5, 10 (1) : 1
 3 1, 11 (1) : 1
 3 2, 12 (1) : 1
 3 3, 13 (1) : 1
 3 4, 14 (1) : 1
 3 5, 15 (1) : 1
 4 1, 16 (1) : 1
 4 2, 17 (1) : 1
 4 3, 18 (1) : 1
 4 4, 19 (1) : 1
 4 5, 20 (1) : 1
 5 1, 21 (1) : 1

5 2, 22 (1) : 1

5 3, 23 (1) : 1

5 4, 24 (1) : 1

5 5, 25 (1) : 1