

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKÉJ A POTRAVINÁRSKEJ
TECHNOLÓGIE**

EVIDENČNÉ ČÍSLO: FCHPT-5415-61616

**NÁVRH FUZZY A NEURO-FUZZY REGULÁTOROV
BAKALÁRSKA PRÁCA**

2015

Martin Mišenko

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKÉJ A POTRAVINÁRSKEJ
TECHNOLÓGIE**

NÁVRH FUZZY A NEURO-FUZZY REGULÁTOROV

BAKALÁRSKA PRÁCA

FCHPT-5415-61616

Študijný program: automatizácia, informatizácia a manažment v chémii a potravinárstve

Číslo študijného odboru: 2621

Názov študijného odboru: 5.2.14 automatizácia, 5.2.52 priemyselné inžinierstvo

Školiace pracovisko: Ústav informatizácie, automatizácie a matematiky

Vedúci záverečnej práce/školiťel: Ing. Anna Vasičkaninová, PhD.

Bratislava 2015

Martin Mišenko



ZADANIE BAKALÁRSKEJ PRÁCE

Študent: **Martin Mišenko**
ID študenta: 61616
Študijný program: automatizácia, informatizácia a manažment v chémii a potravinárstve
Kombinácia študijných odborov: 5.2.14. automatizácia, 5.2.52. priemyselné inžinierstvo
Vedúca práce: Ing. Anna Vasičkaninová, PhD.

Názov práce: **Návrh fuzzy a neuro-fuzzy regulátorov**

Špecifikácia zadania:

Práca je zameraná na návrh fuzzy a neuro-fuzzy regulátorov pre vybraný technologický proces. Vhodné riešenia sa vyberú na základe literárnej rešerše.

Úlohy:

Základné pojmy fuzzy logiky.

Fuzzy Logic Toolbox Matlabu.

Návrh a simulačné overenie fuzzy regulátorov pre model vybraného technologického procesu.

Rozsah práce: 40 strán

Zoznam odbornej literatúry:

1. Kolesárová, A. – Kováčová, M. *Fuzzy množiny a ich aplikácie*. Bratislava: Vydavateľstvo STU v Bratislave, 2004. 166 s. ISBN 80-227-2036-4.
2. Vysoký, P. *Fuzzy řízení*. Praha: ČVUT, 1997. 131 s.

Riešenie zadania práce od: 16. 02. 2015

Dátum odovzdania práce: 24. 05. 2015

L. S.

Martin Mišenko
študent

prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
vedúci pracoviska

prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
garant študijného programu

Pod'akovanie

Ďakujem mojej školiteľke Ing. Anne Vasičkaninovej, PhD za jej odborné vedenie, metodickú pomoc a rady, ktoré mi poskytla pri vypracovaní bakalárskej práce.

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá návrhom fuzzy a neuro – fuzzy regulátorov a simulačným overením ich vhodnosti v riadení 2 zásobníkov kvapaliny s interakciou. V prvej časti práce sú vysvetlené základné pojmy z oblasti fuzzy množín a fuzzy riadenia. Nasleduje matematický model riadeného systému a návrh klasických PID regulátorov. Z experimentálnych údajov získaných simuláciami riadenia zásobníkov boli navrhnuté fuzzy regulátory typu Takagiho-Sugenu a Mamdaniho. Pri návrhu boli využité príkazy a funkcie, ktoré sú súčasťou Fuzzy Logic Toolboxu Matlabu.

Navrhnuté regulátory boli simulačne overené. Všetky výsledky z riadenia systému navrhnutými regulátormi sú porovnané v príslušných tabuľkách a grafoch na základe vybraných kritérií kvality riadenia.

Kľúčové slová: fuzzy logika; fuzzy regulátor; zásobníky kvapaliny.

Abstract

This thesis deals with the design of fuzzy and neuro - fuzzy controllers and simulation verification of their suitability in the control of two tanks. The basic concepts of fuzzy sets and fuzzy control are listed in the first half of this work. The mathematical model of the controlled system and classical PID controllers design is given in the next section of work. The Mamdani and Takagi-Sugeno types of the fuzzy logic controllers were designed using experimental data obtained by control simulation of the liquid level in the tanks. The designed controllers projected for two tanks are shown and the simulation results are presented. Commands and functions that are part of the Fuzzy Logic Toolbox for Matlab were used in the controllers design. All control simulation results are described and compared in the corresponding tables and figures.

Key words: fuzzy logic; fuzzy controller; fluid tanks.

Obsah

Zoznam skratiek, značiek a indexov	13
Úvod.....	14
1 Zásobníky kvapaliny.....	15
1.1 Fuzzy množiny a lingvistické premenné.....	15
1.2 Operácie s fuzzy množinami.....	16
1.3 Fuzzifikácia.....	17
1.4 Inferenčný mechanizmus a báza pravidiel	19
1.5 Defuzzifikácia	21
1.5.1 Metóda ťažiska.....	22
1.5.2 Metóda najvýznamnejšieho maxima	23
1.6 Fuzzy regulátory	23
1.6.1 Typy fuzzy regulátorov	24
1.7 Anfis štruktúra	25
2 Zásobníky kvapaliny.....	29
2.1 Matematický model	29
2.2 Návrh PID regulátora.....	31
2.2.1 Identifikácia procesu	31
2.2.2 Návrh parametrov regulátora	32
2.3 Návrh fuzzy regulátorov	35
2.3.1 Takagiho – Sugenov regulátor	35
2.3.2 Mamdaniho regulátor	43
3 Diskusia	52
4 Záver.....	54
Zoznam použitej literatúry	55
Prílohy.....	56

Zoznam skratiek, značiek a indexov

q	objemový prietok kvapaliny
k	konštanta ventilu
F	prierez zásobníka
h	výška hladiny v zásobníku
t	čas
V	objem
P	proporcionálny regulátor
PI	proporcionálno – integračný regulátor
PID	proporcionálno – integračno – derivačný regulátor
n	rád systému
Z	zosilnenie
T	časová konštanta
D	dopravné oneskorenie
t_n	čas nábehu
t_u	čas prietáhu
Anfis	Adaptive Neuro – Fuzzy Inference System
FCM	Fuzzy C-means clustering
0	index pre vstup
1	index pre prvý zásobník
2	index pre druhý zásobník

Úvod

Logika nás učí, že tvrdenie môže byť buď pravdivé alebo nepravdivé, žiadna ďalšia možnosť neexistuje. Poznáme však niektoré výnimky, pri ktorých nemožno určiť pravdivosť výroku. S takýmito paradoxmi klasickej logiky sa zaoberal Bertrand Russel, ktorý ako príklad uvádza holičov nápis nad svojou prevádzkou: „Holím všetkých občanov tohto mesta, ktorí sa neholia sami“ [1]. Ako je to s pravdivosťou tohto výroku v prípade, že berieme do úvahy samotného holiča? Tento výrok nie je pravdivý ani v prípade, že sa holí sám, ani v prípade, že sa sám neholí.

Tento výrok môžeme teda označiť za nejednoznačný alebo vágny. Prvým, kto zaviedol pojem vágnosť bol Max Black, ktorý napísal v roku 1937 prvý článok o fuzzy množinách (fuzzy ang. znamená nejasný, neostrý). Avšak za začiatok fuzzy obdobia sa považuje až článok L. Zadeha „Fuzzy sets“ z roku 1965 [1].

Pri riešení regulačných úloh v reálnom živote sa operátor stretáva s problémom, kedy nemá dostatočné informácie o systave alebo sa nemôže oprieť o presne namerané hodnoty. Operátor dokáže iba na základe skúseností s daným systémom opísať svoju činnosť v ľudskej reči. To sa však nedá preniesť do matematického opisu. Tento problém sa snaží vyriešiť fuzzy riadenie, ktoré napodobňuje operátora na základe jeho skúsenosti. S počítačom nemôžeme komunikovať voľne v ľudskej reči, preto sa zavádzajú určité zjednodušenia.

Fuzzy regulátor je systém, ktorý napodobňuje ľudské vyjadrovanie, ktoré v sebe zahŕňa aj určité nepresnosti. Znalostnú bázu tvoria expertné vedomosti interpretované vo forme AK-POTOM pravidiel. Ich použitím je možné jednoduchšie modelovať systémy, ktoré sú veľmi zložité, neurčité alebo nedokonale matematicky opísané.

V tejto práci sú navrhnuté fuzzy regulátory pre riadenie sústavy dvoch zásobníkov kvapaliny s interakciou. Boli navrhnuté fuzzy P, PI a PD regulátory typu Takagiho – Sugenu a fuzzy P a PI regulátory Mamdaniho typu. Model riadeného systému je vytvorený v tvare nelineárnych diferenciálnych rovníc.

1 Zásobníky kvapaliny

1.1 Fuzzy množiny a lingvistické premenné

Klasická teória množín opisuje množiny rozličnými spôsobmi:

- a) vymenovaním prvkov množiny $M = \{x_1, x_2, x_3\}$,
- b) podmienkou, ktorú musia prvky splniť,
- c) charakteristickou funkciou $\mu_M(x)$, pre ktorú platí:

$$\mu_M(x) \begin{cases} = 1, \text{ak } x \in M \\ = 0, \text{ak } x \notin M. \end{cases} \quad (1)$$

Pri týchto množinách hovoríme o ostrých (angl. crisp) množinách. V takom prípade môžu pravdivostné hodnoty nadobúdať iba hodnoty 1 (pravda) alebo 0 (nepravda). Pri fuzzy množinách dochádza k zovšeobecneniu ostrých množín a to tak, že výrok môže nadobúdať pravdivostné hodnoty z celého intervalu $[0,1]$. Pri hodnote 0 prvok do množiny určite nepatrí a pri hodnote 1 prvok do množiny určite patrí. Tieto pravdivostné hodnoty sa nazývajú funkcie príslušnosti. Funkcia príslušnosti vyjadruje do akej miery patrí prvok x množine M . Hranice medzi množinami nie sú ostré [1].

Fuzzy množina je teda množina prvkov, ktorých príslušnosť k tejto množine je odstupňovaná.

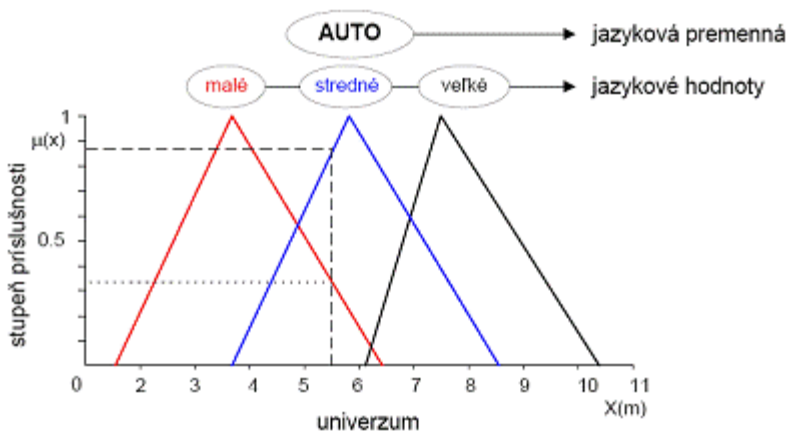
Fuzzy množiny sa často zapisujú formálne v tvare:

$$A = \{(x, \mu_A(x)); x \in X\}, \quad (2)$$

kde x je prvkom fuzzy množiny A patriacim do univerza X a reálne číslo μ_A je stupňom (mierou) príslušnosti prvku x k fuzzy množine A . Funkcia príslušnosti je teda zobrazenie $\mu_A: X \rightarrow [0,1]$.

Pri využívaní empirických poznatkov operátora alebo experta sa zavádzajú lingvistické premenné. Lingvistická (jazyková) premenná je taká premenná, ktorej hodnoty sú výrazy ľudského jazyka. Množina jazykových hodnôt sa nazýva množina termov, ktoré sú definované na univerze (univerzálnej množine) [3].

Ako príklad možno uviesť jazykovú premennú „dĺžka auta“, ktorej hodnoty sú „malá, stredná, veľká“. Hodnoty sú opísané trojuholníkovými fuzzy množinami (Obr. 1) [5].



Obr. 1 Jazyková premenná [5].

1.2 Operácie s fuzzy množinami

Vo fuzzy logike sa funkcie logických operátorov (AND, OR, NOT) rozširujú z dvojhodnotovej na viachodnotovú logiku [3].

Fuzzy komplement, doplnok množiny A:

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (3)$$

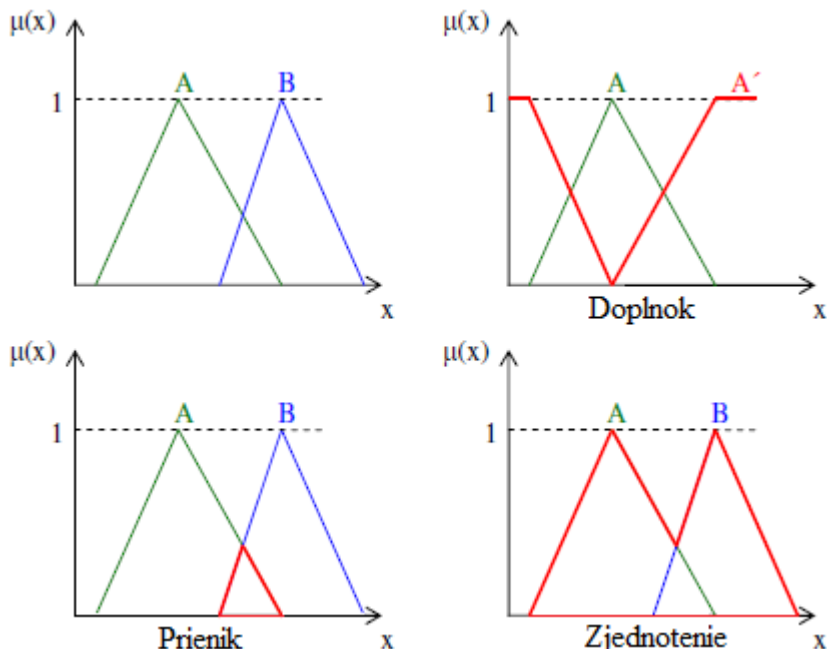
Fuzzy prienik množín (logický súčin) A a B:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (4)$$

Fuzzy zjednotenie množín (logický súčet) A a B:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (5)$$

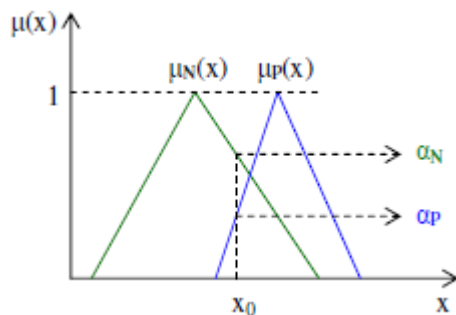
Tieto vzťahy vyjadrujú iba základné operácie s fuzzy množinami a nie vždy je možné ich použiť. Ich grafické znázornenie je na obr. 2. Existuje ešte veľa množinových operácií, ktoré v klasickej množinovej teórii nemajú veľký význam. Poriadok do operácií vnášajú triangulárna norma a konorma. Triangulárna norma je analógiou prieniku a triangulárna konorma je analógiu zjednotenia pri klasických množinách [6].



Obr. 2 Základné operácie s fuzzy množinami.

1.3 Fuzzifikácia

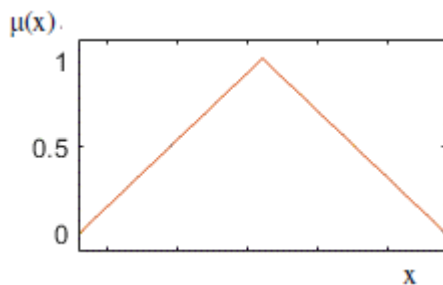
Fuzzifikácia je proces priradovania meraných hodnôt vstupných veličín z univerza do fuzzy množín pomocou funkcií príslušnosti. K tomu je potrebné mať pokryté celé univerzum príslušnými fuzzy množinami. Taktiež je potrebné zvoliť vhodný tvar funkcie príslušnosti fuzzy množín.



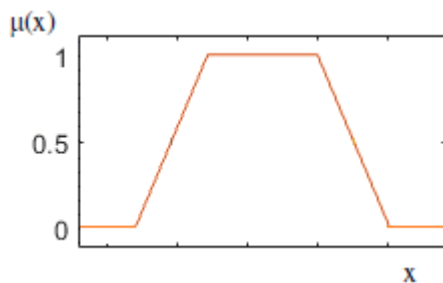
Obr. 3 Určenie stupňa príslušnosti pre hodnotu x_0 [2].

Ostrá hodnota x_0 patrí dvom funkciám príslušnosti, do prvej funkcie príslušnosti $\mu_N(x)$ patrí so stupňom príslušnosti α_N a do druhej funkcie príslušnosti $\mu_P(x)$ patrí so stupňom príslušnosti α_P [2].

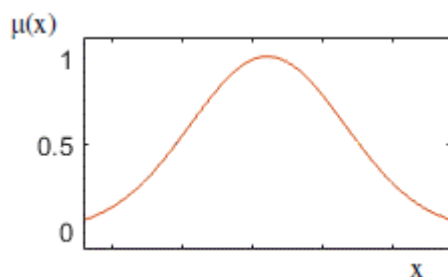
Najčastejšie používané funkcie príslušnosti:



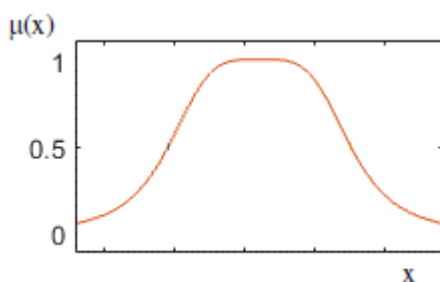
Obr. 4 Trojuholníková funkcia príslušnosti.



Obr. 5 Lichobežníková funkcia príslušnosti.



Obr. 6 Gaussovská funkcia príslušnosti.



Obr. 7 Zvonová funkcia príslušnosti.

1.4 Inferenčný mechanizmus a báza pravidiel

Pre fuzzy systémy je podmienka vyjadrená pravidlom [2]:

AK (fuzzy výrok A), **POTOM** (fuzzy výrok B)

Takéto pravidlá sú časté ako v matematike, tak aj v programovacích jazykoch. Prvá výroková množina sa nazýva antecedent, kde jednotlivé časti sú viazané logickými spojkami a druhý fuzzy výrok je konsekvent [3].

Všetky tieto pravidlá tvoria bázu pravidiel a slúžia k dostatočnej aproximácii vzťahov medzi vstupmi a výstupmi. Príklad pravidla:

AK x je malé kladné a y je stredné kladné, POTOM u je stredné záporné.

Lingvistické premenné, opisujúce stavové veličiny, predstavujú x, y, u a slovné hodnoty (termy) predstavujú skratky KM, KS, ZS [1].

V tab. 1 sú uvedené príklady označenia fuzzy hodnôt.

Tab. 1 Príklad označenia fuzzy hodnôt [1].

Význam	Slovenské označenie	Anglické označenie
Hodnota veľká záporná	ZV	NL (negative large)
Hodnota stredná záporná	ZS	NM (negative medium)
Hodnota malá záporná	ZM	NS (negative small)
Hodnota nulová	NU	Z (zero)
Hodnota malá kladná	KM	PS (positive small)
Hodnota stredná kladná	KS	PM (positive medium)
Hodnota veľká kladná	KV	PL (positive large)

Počet pravidiel je vysvetlený na príklade. Majme dve fuzzy veličiny, regulačnú odchýlku e s piatimi lingvistickými hodnotami (ZV, ZS, NU, KS, KV) a zmenu regulačnej odchýlky Δe s tromi lingvistickými hodnotami (Z, NU, K). Počet pravidiel je 15 ($5 \cdot 3$). Zmena akčnej veličiny Δu bude mať päť lingvistických hodnôt (ZV, ZS, NU, KS, KV) [3].

Tab. 2 Báza pravidiel závislosti $\Delta u = f(e, \Delta e)$ [3].

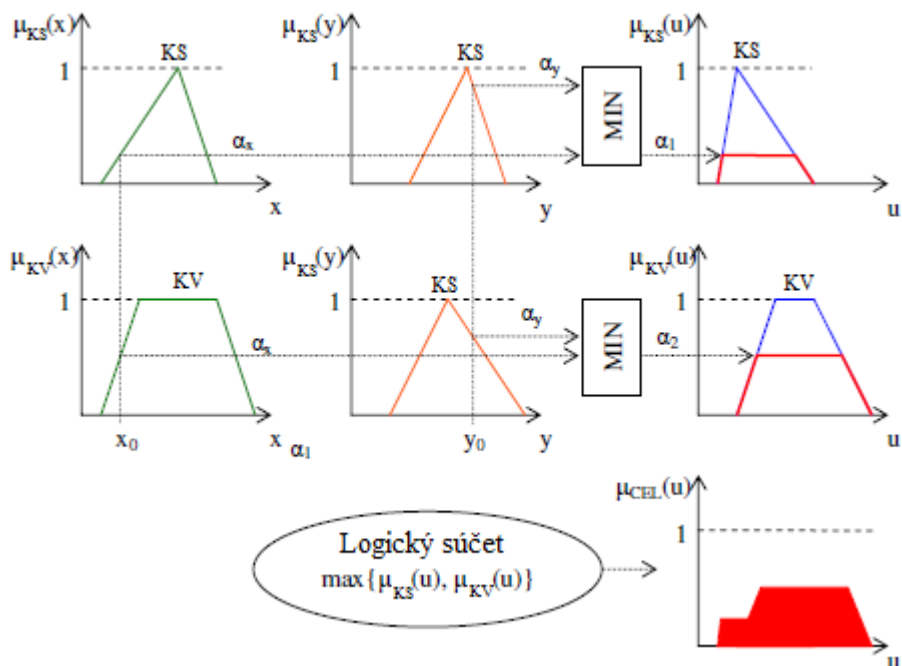
Δu		e				
		ZV	ZS	NU	KS	KV
Δe	Z	ZV	ZV	ZS	NU	KS
	NU	ZV	ZS	NU	KS	KV
	K	ZS	NU	KS	KV	KV

Na stanovenie výstupnej fuzzy množiny pre určitú vstupnú fuzzy množinu sa používajú rôzne metódy. Potrebujeme lingvisticky opísať celý systém, a to dosiahneme spojením všetkých fuzzy výrokov a vytvoríme tak jeden zložený výrok. Tieto pravidlá spájame pomocou spojky INAK [1]. Najčastejšie sa používajú implikačné metódy ako Mamdaniho implikácia, Larsenová implikácia a implikácia Takagiho – Sugenu [2].

Mamdaniho implikácia

Pre Mamdaniho implikáciu (Obr. 8) platí:

$$* \mu_{CEL}(u) = \max\{\min\{\alpha_1, \mu_{KS}(u)\}, \min\{\alpha_2, \mu_{KV}(u)\}\} \quad (6)$$



Obr. 8 Mamdaniho implikácia.

1.5 Defuzzifikácia

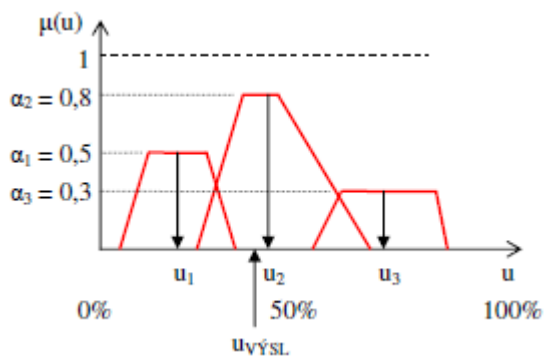
Pri používaní lingvistického modelu dostaneme výstup vždy vo forme fuzzy množiny. Aby sme tento výstup mohli použiť v praxi, je potrebné previesť ho na ostrú hodnotu [1]. Aproximujeme neostré termy ostrou hodnotou akčnej veličiny [3].

Existuje veľa defuzzifikačných metód, často používané sú [3]:

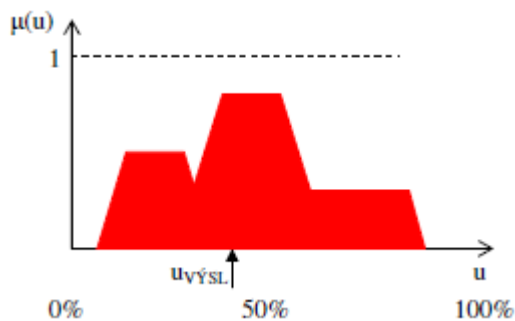
1. metóda ťažiska – hľadáme najlepší kompromis,
2. metóda najvýznamnejšieho maxima – hľadáme prijateľné riešenie.

1.5.1 Metóda ťažiska

Pri tejto metóde sa hľadá ťažisko singletonov (center of maximum) alebo ťažisko plochy (center of gravity) [3]. Na obr. 9 je znázornený výpočet ostrej hodnoty výpočtom ťažiska singletonov a na obr. 10 je znázornený výpočet ostrej hodnoty výpočtom ťažiska plochy [3].



Obr. 9 Center of Maximum - ťažisko singletonov [2].



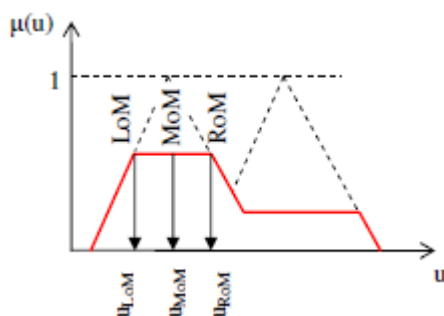
Obr. 10 Center of Gravity – ťažisko plochy [2].

1.5.2 Metóda najvýznamnejšieho maxima

Pri tejto metóde sa zo všetkých termov vyberá term s najvyššou hodnotou funkcie príslušnosti. Podľa zvoleného prístupu získame ostrú hodnotu výstupnej veličiny [3].

Prístupy:

- Left of Maximum – hodnota najviac vľavo z najväčšej hodnoty funkcie príslušnosti,
- Mean of Maximum – hodnota v strede najväčšej hodnoty funkcie príslušnosti,
- Right of Maximum – hodnota najviac vpravo z najväčšej hodnoty funkcie príslušnosti.



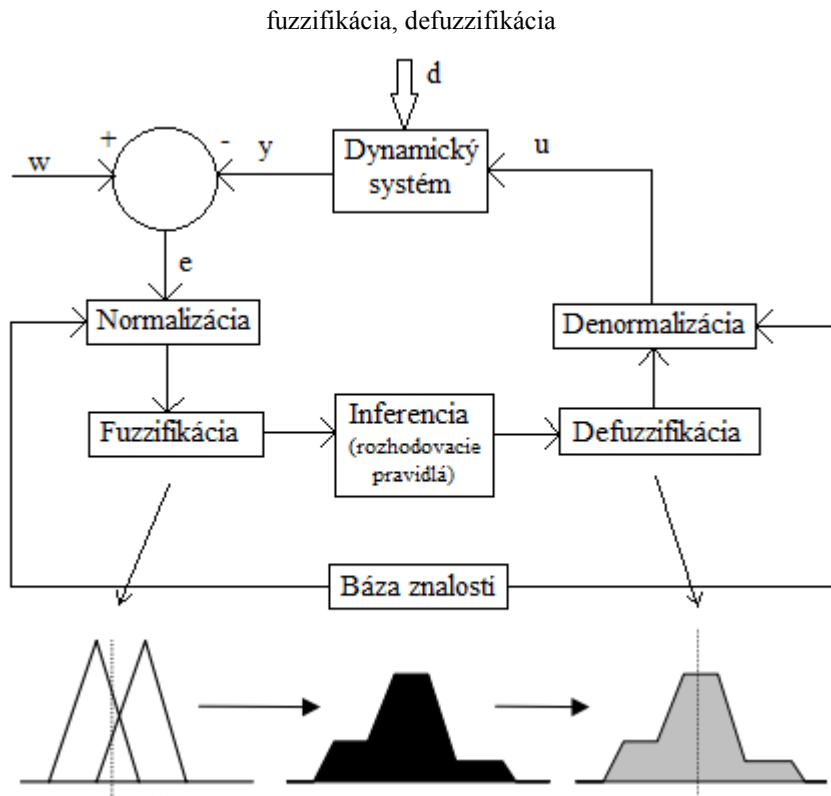
Obr. 11 Metóda najvýznamnejšieho maxima [2].

1.6 Fuzzy regulátory

Pri návrhu fuzzy regulátorov sa využívajú empirické znalosti operátora o riadenom procese. Tieto znalosti nazývame bázou znalostí, tvorí ju báza dát a báza pravidiel [3].

Báza dát obsahuje informácie o stacionárnych stavoch, intervaloch, v ktorých sa pohybujú vstupné a výstupné veličiny, funkcie príslušnosti vstupných a výstupných fuzzy množín. Báza pravidiel zahŕňa skúsenosti, slovné vyjadrené pokyny k riadeniu, podľa ktorých je možné systém riadiť, teda generovať akčnú veličinu.

Základná štruktúra fuzzy regulátora je znázornená na obr. 12:



Obr. 12 Štruktúra fuzzy regulátora.

Bloky normalizácie a denormalizácie slúžia na prevod nameraných alebo zadaných hodnôt na normalizovanú množinu – univerzum a naopak. Činnosť ostatných blokov bola opísaná vyššie.

Návrh štruktúry fuzzy regulátora je možné uskutočniť pomocou Fuzzy Logic Toolboxu, ktorý je súčasťou Matlabu – Simulinku alebo pomocou natrénovaných údajov s použitím štruktúry Anfis.

1.6.1 Typy fuzzy regulátorov

Mamdaniho regulátor

Pravidlo má tvar:

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

Pri tomto regulátore sú vstupy aj výstupy opísané fuzzy množinami.

Takagiho – Sugenov – Kangov (TSK) regulátor

Pravidlo má tvar:

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

Od Mamdaniho regulátora sa tento typ líši tým, že výstupom nie je fuzzy, ale ostrá množina.

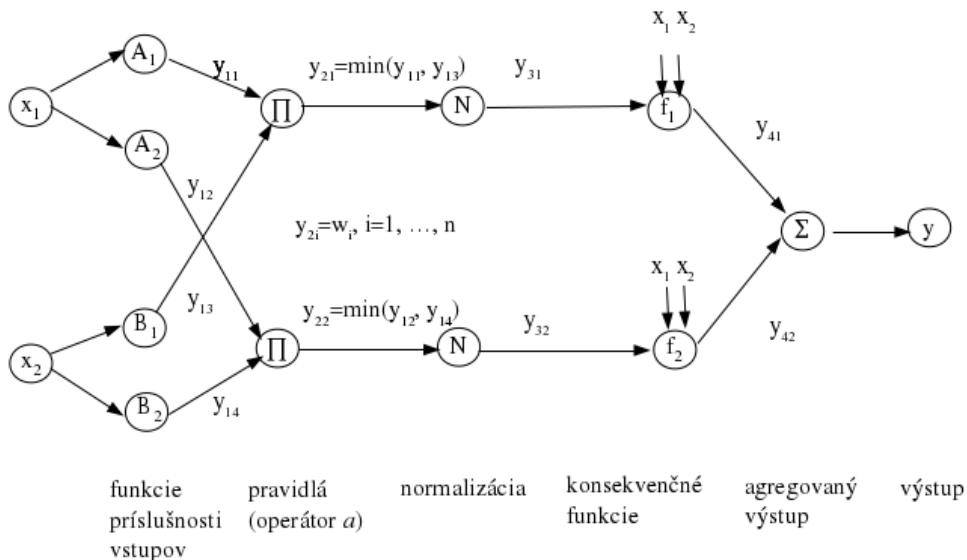
1.7 Anfis štruktúra

Anfis (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System) je adaptívna neurónová sieť. Je súčasťou Fuzzy Logic Toolboxu v programovom systéme Matlab [10]. V Matlabe sú funkcie na vytvorenie fuzzy inferenčného systému (FIS), na generovanie, tréning, testovanie a použitie systému Anfis a rôzne iné funkcie, súvisiace s tvorbou fuzzy systémov.

Pomocou nameraných vstupno-výstupných údajov systému je možné navrhnúť fuzzy štruktúru typu Takagiho-Sugenu [10]:

$$\begin{aligned} \text{Ak } x_1 \text{ je } A_j \text{ a } x_2 \text{ je } B_k, \text{ potom } y \text{ je } f_i &= p_i x_1 + q_i x_2 + r_i, \\ i &= 1, \dots, n, j \in \{1, \dots, m\}, k \in \{1, \dots, l\}, \end{aligned} \quad (7)$$

A, B sú fuzzy množiny v antecedente pravidla, $y=f(x,y)$ je ostrá funkcia v konsekvente pravidla, $f(x,y)$ je obyčajne polynóm. Ak je f konštanta, výsledkom je model Sugenovho typu nultého stupňa, ktorý je aj špeciálnym prípadom Mamdaniho fuzzy inferenčného systému, kedy každý konsekvent pravidiel je špecifikovaný ako fuzzy singleton alebo v špeciálnom prípade ako Tsukamoto fuzzy model, kde každý konsekvent je špecifikovaný monotónnou funkciou príslušnosti [1].



Obr. 13 Architektúra siete Anfis [10].

Každý uzol prvej adaptívnej vrstvy na obr. 13 predstavuje lingvistickú hodnotu vstupnej premennej (fuzzifikácia vstupných premenných).

Výstup druhej neadaptívnej vrstvy je priamo hodnotou váhového koeficienta i -tého pravidla. Uzly tejto vrstvy spracúvajú prichádzajúce signály a na výstupe poskytujú váhu w pravidiel, ktorých antecedent je daný kombináciou lingvistických hodnôt jednotlivých premenných. Táto vrstva vykonáva fuzzy logickú operáciu $\wedge$, je použitá taká t -norma, ktorá vykonáva operáciu $\wedge$ [10].

$$w_i = \mu_{A_i}(x)\mu_{B_i}(y); \quad y_{2i} = w_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (8)$$

Tretiu vrstvu tvoria neadaptívne uzly, ktoré poskytujú na výstupe normalizované váhy pravidiel (pomer váhy jednotlivých pravidiel ku súčtu váh všetkých pravidiel).

$$y_{3i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad i = 1, \dots, n \quad (9)$$

Štvrtú vrstvu tvoria adaptívne uzly, ktorých výstupom sú parametre konsekventov (konštantné alebo lineárne).

$$y_{4i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x_1 + q_i x_2 + r_i), \quad i = 1, \dots, n \quad (10)$$

Počet neurónov v piatej vrstve je rovný počtu výstupných veličín fuzzy-neurónového systému. Každý z nich realizuje výpočet výslednej hodnoty príslušnej premennej ako súčet výstupov jednotlivých pravidiel, vynásobených normalizovanými váhovými koeficientmi. Pri použití defuzzifikačnej metódy singletonov je hodnota výstupnej premennej fuzzy systému váhovým priemerom výstupných hodnôt jednotlivých pravidiel [10]

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n w_i f_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad w_i = \mu_{A_j}(x_1) \mu_{B_k}(x_2) \quad (11)$$

Funkcie Fuzzy Logic Toolboxu Matlabu, ktoré sa používajú pri návrhu fuzzy regulátora [7]:
anfis (trnData, initFis, trnOpt)

- *trnData* – predstavuje maticu vstupných a výstupných údajov,
- *initFis* – východiskový fuzzy inferenčný systém, možnosti nastavenia sú opísané nižšie,
- *trnOpt* – vektor na špecifikáciu nastavení tréningu, tréning sa zastaví napr. v momente dosiahnutia počtu iterácií .

Funkcia *genfis1* – používa sa na vytvorenie fuzzy inferenčného systému TSK typu, z ktorého sa trénuje neurónová sieť použitím mriežkového (angl. grid) rozkladu vstupných dát.
genfis1(data, numMFs, inmftype)

- *data* – tento parameter je totožný s *trnData*,
- *numMFs* – vektor, ktorým sa určuje počet funkcií príslušnosti pre každý vstup, ak chceme rovnaký počet príslušnosti pre každý vstup, zadáme iba jedno číslo,
- *inmftype* typ funkcií príslušnosti pre každý vstup, môže byť zadaný iba jeden typ, ak je rovnaký pre všetky vstupy.

Funkcia *genfis2* - používa sa na vytvorenie fuzzy inferenčného systému TSK typu, z ktorého sa trénuje neurónová sieť použitím metódy subtraktívneho zhľukovania. Táto metóda spočíva v hľadaní zhľukov tvorených navzájom podobnými údajmi. Každý bod má svoju hustotu, ktorá vyjadruje rozloženie okolitých bodov. Bod s najväčšou hustotou predstavuje fuzzy pravidlo alebo súradnice zhľuku.

genfis2(Xin, Xout, radii)

- *Xin* – vstupné údaje,
- *Xout* – výstupné údaje,
- *radii* – vektor, ktorý špecifikuje dosah vplyvu centra zhľuku, má hodnoty od 0 po 1. Pre každý vstup a výstup môže byť zadaná vlastná hodnota alebo môžeme použiť rovnakú hodnotu pre všetky vstupy a výstupy.

Funkcia *genfis3* – generuje fuzzy inferenčný systém použitím metódy FCM zhlukovania. Od metódy subtraktívneho zhlukovania sa líši daným počtom funkcií príslušností a kritériami, kedy sa má proces zastaviť alebo koľkokrát sa má proces opakovať.

genfis3(Xin, Xout, type, cluster_n, fcmoptions)

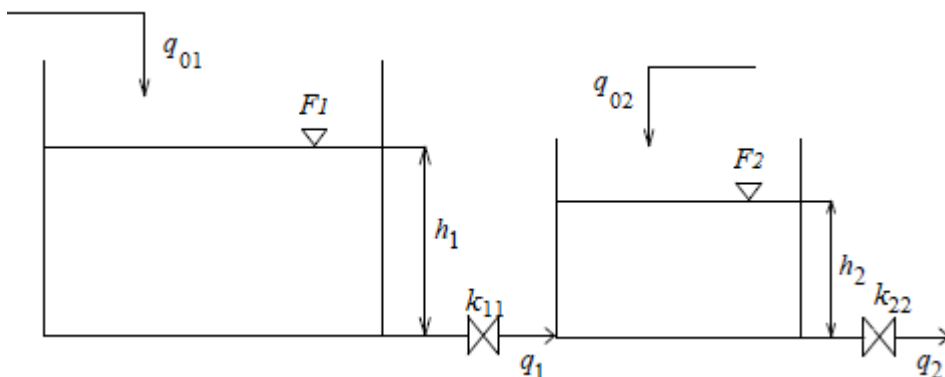
- *Xin* – vstupné údaje,
- *Xout* – výstupné údaje,
- *type* – vyberá sa buď ‘*mamdani*’ alebo ‘*sugeno*’ typ,
- *cluster_n* – počet zhlukov generovaných FCM,
- *fcmoptions* – nastavenia pre FCM algoritmus, predstavuje vektor s hodnotami jednotlivých nastavení.

Výsledkom je fuzzy inferenčný systém - výstupná FIS matica, súbor s príponou *fis*, ktorý sa ďalej volá v bloku Fuzzy Logic Controller v simulinkových schémach.

2 Zásobníky kvapaliny

2.1 Matematický model

V tejto práci uvažujeme systém dvoch zásobníkov kvapaliny s interakciou, ktoré sú zapojené podľa Obr.13.



Obr. 14 Schéma zapojenia zásobníkov.

Parametre sústavy:

- $k_{11} = 1,8 \text{ m}^{2,5} \text{ m}^{-1}$
- $k_{22} = 1,8 \text{ m}^{2,5} \text{ m}^{-1}$
- $F_1 = 1,2 \text{ m}^2$
- $F_2 = 1,2 \text{ m}^2$
- $q_{01}^s = 1 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$
- $q_{02}^s = 0,25 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$

q sú objemové prietoky, indexom nula sú označené vstupné prietoky. Hustota kvapaliny ρ je v celom systéme rovnaká. Výstupnou meranou a riadenou veličinou je výška hladiny h_2 v druhom zásobníku.

Materiálová bilancia dynamického systému:

súčet hmotnostných tokov na vstupe sa rovná súčtu hmotnostných tokov na výstupe a rýchlosti akumulácie hmotnosti v systéme.

$$q_{01}(t)\rho = q_1(t)\rho + \frac{d[V_1(t)\rho]}{dt} \quad (12)$$

$$q_1(t)\rho + q_{02}(t)\rho = q_2(t)\rho + \frac{d[V_1(t)\rho]}{dt} \quad (13)$$

Nelineárny dynamický matematický model:

$$F_1 \frac{dh_1(t)}{dt} + k_{11}\sqrt{h_1(t) - h_2(t)} = q_{01}(t) \quad h_1(0) = h_1^s \quad (14)$$

$$F_2 \frac{dh_2(t)}{dt} + k_{22}\sqrt{h_2(t)} = q_{02}(t) + k_{11}\sqrt{h_1(t) - h_2(t)} \quad h_2(0) = h_2^s \quad (15)$$

$$y_1(t) = h_1(t) \quad (16)$$

$$y_2(t) = h_2(t) \quad (17)$$

- vstupné veličiny: $q_{01}(t)$, $q_{02}(t)$,
- stavové veličiny: $h_1(t)$, $h_2(t)$,
- výstupné veličiny: $h_2(t)$, $h_1(t)$.

Matematický model v ustálenom stave:

$$q_{01}^s = k_{11}\sqrt{h_1^s - h_2^s} \quad (18)$$

$$q_{02}^s + k_{11}\sqrt{h_1^s - h_2^s} = k_{22}\sqrt{h_2^s} \quad (19)$$

Úpravou rovníc (16) a (17) dostaneme vzťahy pre výpočet výšky hladín v zásobníkoch v ustálenom stave :

$$h_1^s = \left(\frac{q_{01}^s}{k_{11}} \right)^2 + h_2^s \quad (20)$$

$$h_2^s = \left(\frac{q_{01}^s + q_{02}^s}{k_{22}} \right)^2 \quad (21)$$

Model zásobníkov je vytvorený v tvare *s-funkcie* a je uvedený v prílohe.

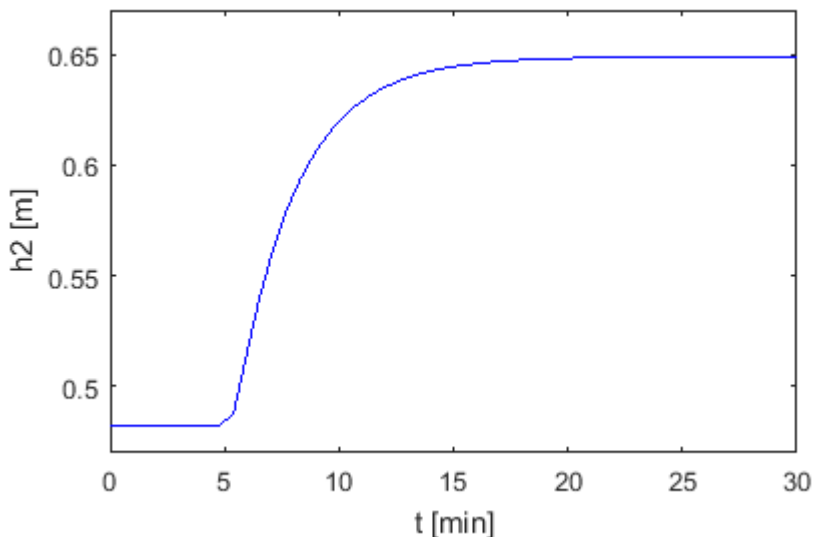
2.2 Návrh PID regulátora

PID regulátor sa skladá z troch zložiek [8]:

- proporcionálnej s prenosom: $G_R(s) = Z_R$, kde Z_R je zosilnenie regulátora,
- integračnej s prenosom: $G_R(s) = \frac{1}{T_I s}$, kde T_I je integračná konštanta a vyjadruje rýchlosť zmeny akčného zásahu v prípade jednotkovej regulačnej odchýlky,
- derivačnej s prenosom: $G_R(s) = T_D s$, kde T_D je derivačná konštanta.

2.2.1 Identifikácia procesu

Vstupná veličina sa zmenila v čase $t = 5 \text{ min}$ z hodnoty $q_{01}^s = 1 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ na hodnotu $q_{01} = 1,2 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$.



Obr. 15 Zmena výšky hladiny v druhom zásobníku ako odozva na skokovú zmenu vstupného prietoku q_{01} .

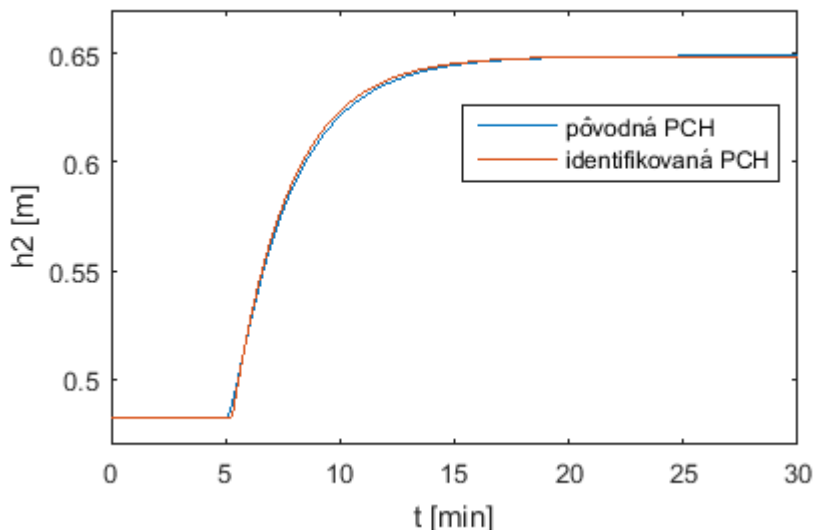
Systém bol identifikovaný Strejcovou metódou ako systém 1. rádu s dopravným oneskorením. Parametre prenosu získané z identifikácie:

- $n = 1$
- $Z = 0,8325$
- $t_n = T = 2,5$
- $t_u = D = 0,3$

Náhradný prenos je v tvare:

$$G(s) = \frac{Z}{Ts+1} e^{-Ds} = \frac{0,8325}{2,5s+1} e^{-0,3s} \quad (22)$$

Z je zosilnenie, T je časová konštanta a D je dopravné oneskorenie.



Obr. 16 Porovnanie pôvodnej odozvy zásobníkov s identifikovaným prenosom.

2.2.2 Návrh parametrov regulátora

Riadime sústavu dvoch zásobníkov kvapaliny s interakciou, pričom sledujeme výšku hladiny v druhom zásobníku a chceme dosiahnuť jej zvýšenie o 20%. Riadiaca veličina je vstupný prietok do prvého zásobníka. V systéme sa vyskytuje porucha v podobe zníženia prietoku do druhého zásobníka. Prietok sa zníži skokom v čase $t = 10 \text{ min}$ z hodnoty $0,25 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ na hodnotu $0,15 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$.

Parametre regulátora sú navrhnuté Zieglerovou – Nicholsovou metódou. Navrhnutý regulátor je simulačne overený v blokovej schéme pod názvom *PID_riad*, schéma je uvedená v prílohe. Kvalita riadenia bola posudzovaná na základe hodnôt ukazovateľov kvality [8]:

- čas regulácie (t_{reg}) – čas, od ktorého sa riadená veličina dostane natrvalo do zadaného okolia žiadanej veličiny,
- maximálne preregulovanie (δ_{MAX}), maximálne podregulovanie (δ_{MIN}) – veľkosť maximálnej odchýlky výstupnej veličiny od jej ustálenej hodnoty, udáva sa v percentách a počíta sa podľa vzorca:

$$\delta_{MAX} = \frac{y_{MAX} - y_{\infty}}{y_{\infty} - y_0} 100 \quad (23)$$

- trvalá regulačná odchýlka (TRO) – je rozdielom medzi žiadanou a výstupnou veličinou. V prípade použitia regulátora s integračnou zložkou je jej hodnota nulová,
- IAE – vyjadruje plochu absolútnej hodnoty regulačnej odchýlky:

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (24)$$

Tab. 3 Syntéza regulátora na základe prechodovej charakteristiky [8].

Regulátor	Z_R	T_I
P	$\frac{1}{Z} \frac{t_n}{t_u}$	
PI	$\frac{0,9}{Z} \frac{t_n}{t_u}$	$0,33 t_u$

Výčíslené parametre regulátorov a ich prenosy:

P regulátor:

$$Z_R = 10,01$$

$$G_R(s) = Z_R = 10,01$$

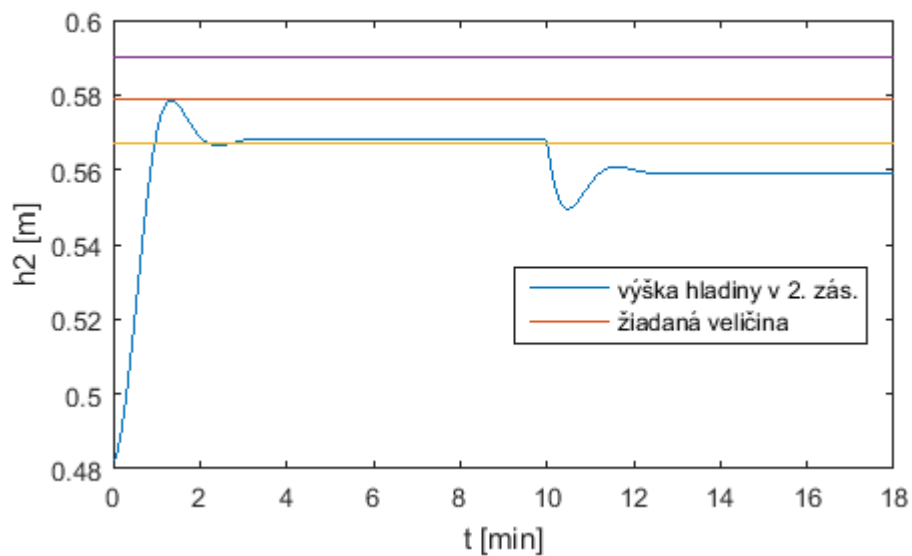
PI regulátor:

$$Z_R = 9,009$$

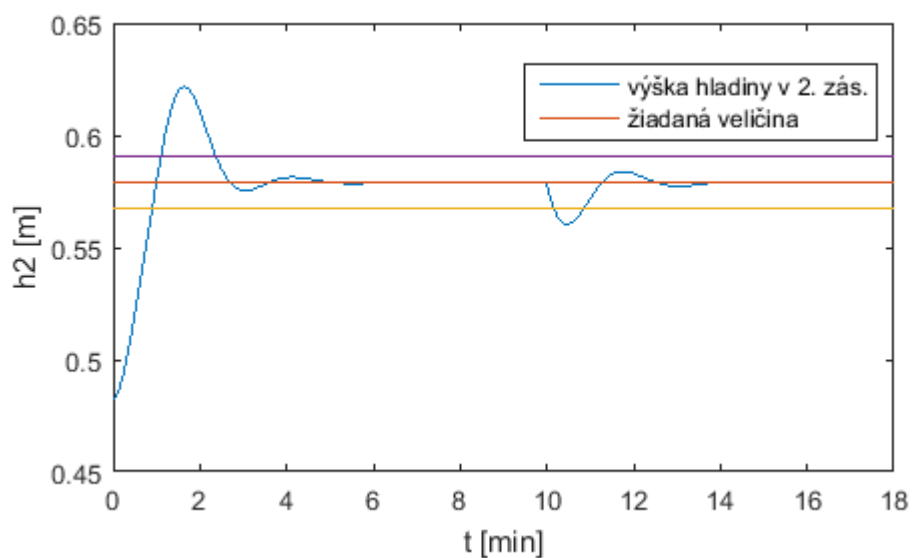
$$T_I = 0,999$$

$$G_R(s) = Z_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) = 9,009 \left(1 + \frac{1}{0,999s} \right)$$

Riadenie podľa navrhnutých regulátorov je zobrazené na obr. 17 a obr. 18.



Obr. 17 Riadenie pomocou P regulátora.



Obr. 18 Riadenie pomocou PI regulátora.

P regulátor má síce menšiu hodnotu IAE, ale neodstraňuje trvalú regulačnú odchýlku.

2.3 Návrh fuzzy regulátorov

Fuzzy regulátory môžu byť navrhnuté na základe informácií od operátora, ktorý pozná daný proces a vie určiť rozsah hodnôt, v akých sa pohybujú jednotlivé veličiny, potrebné pre návrh riadenia. V práci sú pomocou príkazov a funkcií Fuzzy Logic Toolboxu Matlabu navrhnuté regulátory typu Takagiho-Sugenu a typu Mamdaniho. Trénovacie údaje boli získané experimentálne, simuláciou riadenia zásobníkov rôznymi typmi PID regulátorov. Simuláciami bolo zisťované, aké sú riadiace a riadené veličiny, ich rozsahy a vzájomné vzťahy, ako sa môžu meniť parametre regulátorov.

2.3.1 Takagiho – Sugenov regulátor

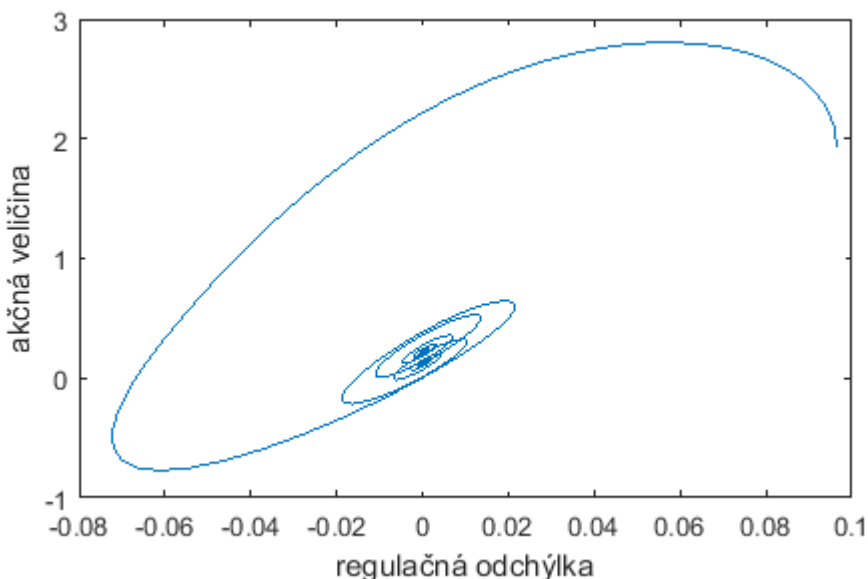
Pri návrhu Takagiho – Sugenovho regulátora boli použité funkcie *genfis1*, *genfis2*, *genfis3*.

Vplyv tvaru funkcií príslušnosti na riadenie:

Navrhnutý fuzzy P regulátor:

Boli použité 4 typy funkcií príslušnosti – trojuholníková, lichobežníková, zvonová a Gaussovská, v Matlabovskej syntaxi – *trimf*, *trapmf*, *gbellmf*, *gaussmf*. Vstupné údaje pre tréning tvorila množina obsahujúca hodnoty regulačnej odchýlky a akčnej veličiny.

Pre ilustráciu uvádzam závislosť akčnej veličiny od regulačnej odchýlky (obr. 19).



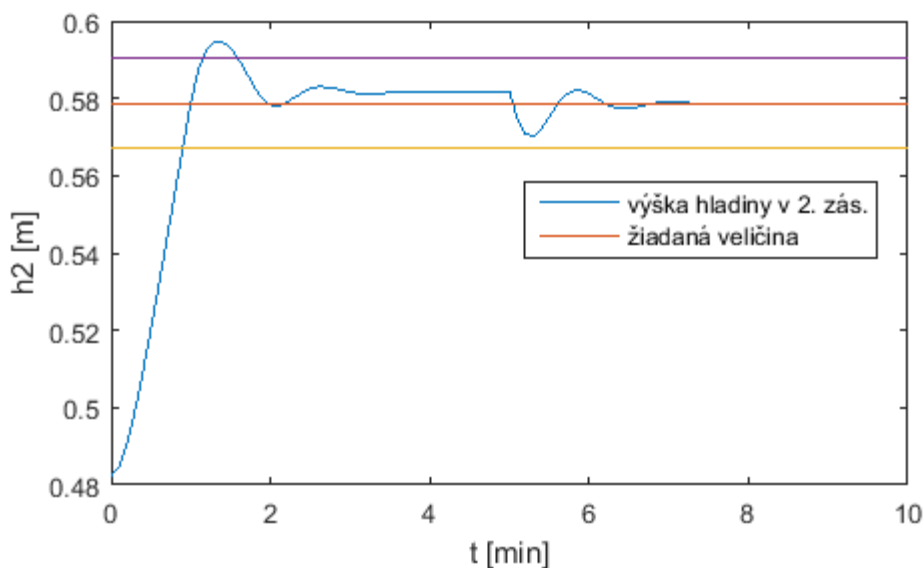
Obr. 19 Závislosť akčnej veličiny od regulačnej odchýlky.

Bol navrhnutý jednoduchý Takagiho – Sugenov fuzzy regulátor typu P s dvoma pravidlami. Výsledky riadenia navrhnutým neuro-fuzzy regulátorom sú uvedené v tab. 5.

Tab. 5 Riadenie zásobníkov fuzzy P regulátorom – rôzny tvar f. príslušnosti.

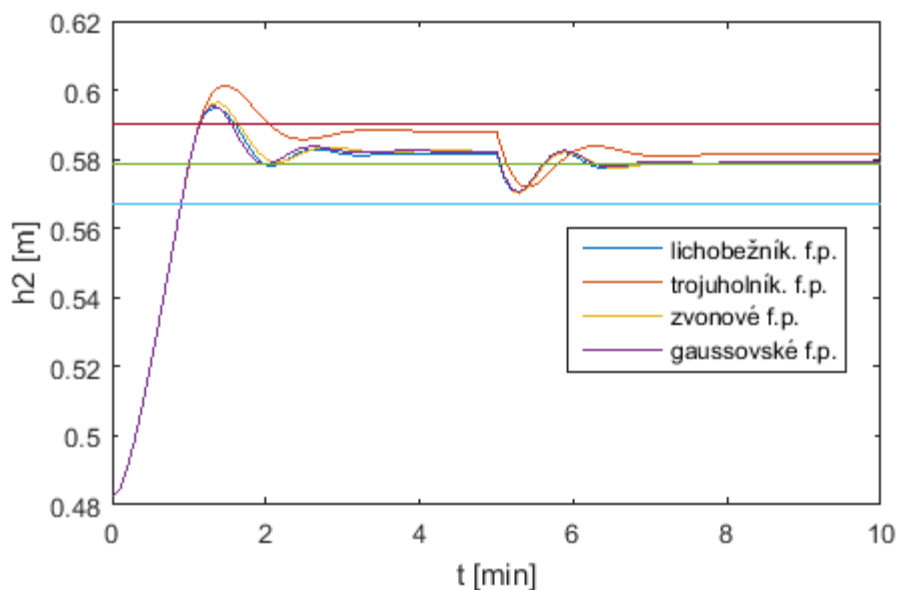
Typ funkcii prísluš.	Riadenie na žiadanú hodnotu			Odstránenie poruchy			IAE
	$\delta_{MAX}[\%]$	$t_{reg}[min]$	$TRO[m]$	$\delta_{MIN}[\%]$	$t_{reg}[min]$	$TRO[m]$	
Trojuhol.	12,19	2,041	0,0093	9,60	0	0,0025	0,1149
Lichobež.	13,09	1,593	0,0028	8,29	0	0	0,0786
Zvonový	13,99	1,643	0,0036	8,08	0	0	0,0821
Gaussov.	12,50	1,535	0,0035	7,96	0	0,0002	0,0806

Najlepší fuzzy P regulátor bol natrénovaný pomocou dvoch lichobežníkových funkcií príslušnosti, čo som usúdil podľa najnižšej hodnoty IAE. Priebeh riadenia týmto regulátorom je na obr. 20. Preregulovanie pri výskyte poruchy nebolo väčšie ako delta okolie, preto je čas regulácie rovný nule.



Obr. 20 Riadenie pomocou fuzzy P regulátora s lichobežníkovými funkciami príslušnosti.

Na obr. 21 sú uvedené priebehy riadenia výšky hladiny v druhom zásobníku navrhnutými fuzzy P regulátormi s rôznymi tvarmi funkcií príslušnosti, uvedenými v tab. 5.



Obr. 21 Porovnanie riadenia fuzzy P regulátormi.

Priebehy na obr. 21 sú podobné, málo horší výsledok je pri trojuholníkovom tvare funkcií príslušnosti, kde sú väčšie hodnoty IAE, TRO, aj času regulácie.

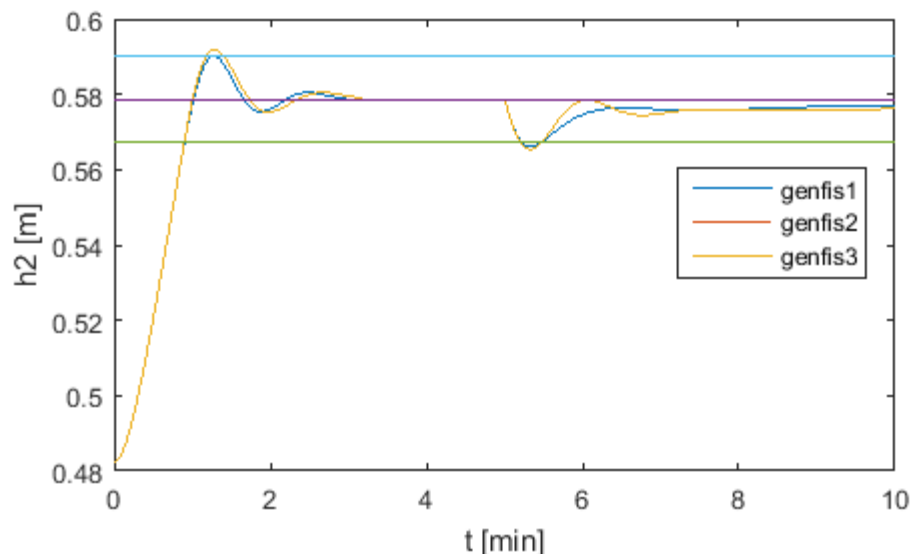
Návrh fuzzy PI regulátorov príkazmi *genfis1*, *genfis2*, *genfis3*:

Ako tréningové údaje pre návrh fuzzy PI regulátorov som použil regulačnú odchýlku, integrál regulačnej odchýlky a hodnoty riadiacej veličiny. Príkazom *genfis1* bol navrhnutý fuzzy PI regulátor s troma trojuholníkovými funkciami príslušnosti a deviatimi pravidlami. Regulátor navrhnutý príkazom *genfis2* obsahoval jedno pravidlo a gaussovske funkcie príslušnosti. V prípade príkazu *genfis3* bol navrhnutý regulátor s troma pravidlami s gaussovskými funkciami príslušnosti. V tab. 6 sú uvedené kritériá kvality riadenia sústavy zásobníkov pomocou fuzzy PI regulátorov navrhnutých príkazmi *genfis1*, *genfis2*, *genfis3*.

Tab. 6 Riadenie zásobníkov fuzzy PI regulátormi.

Príkaz	Riadenie na žiadanú hodnotu			Odstránenie poruchy			IAE
	$\delta_{MAX}[\%]$	$t_{reg}[min]$	$TRO[m]$	$\delta_{MIN}[\%]$	$t_{reg}[min]$	$TRO[m]$	
Genfis1	12,33	1,385	0	11,74	0,407	0,0011	0,0832
Genfis2	13,58	1,399	0	11,41	0,471	0,0027	0,0830
Genfis3	13,58	1,399	0	11,41	0,471	0,0027	0,0830

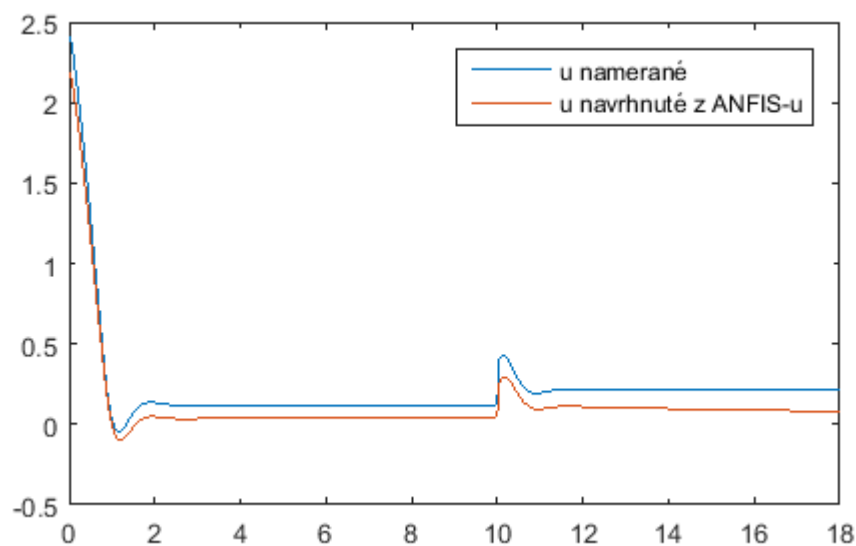
Na obr. 22 je znázornené riadenie fuzzy PI regulátormi, navrhnutými pomocou príkazov *genfis1*, *genfis2*, *genfis3*.



Obr. 22 Porovnanie regulátorov.

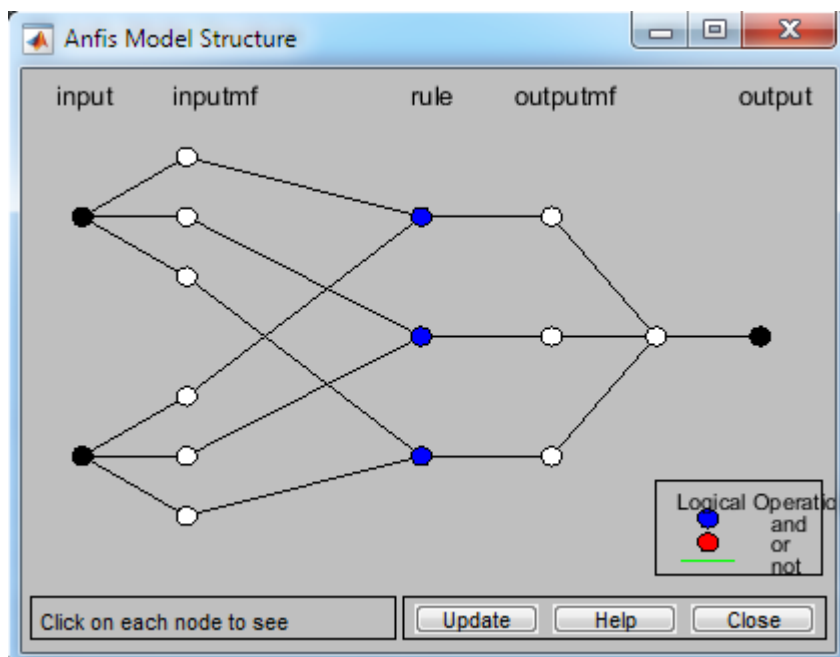
Z obr. 22 je vidieť, že riadenie pomocou fuzzy PI regulátorov navrhnutých rôznymi príkazmi je veľmi podobné, odlišuje sa len príkaz *genfis1* od príkazov *genfis2* a *genfis3*.

Trénovanie fuzzy PI regulátora pomocou príkazu *genfis3* je znázornené na nasledujúcich obrázkoch. Na obr. 23 možno vidieť natréňovanie akčného zásahu fuzzy PI regulátora.

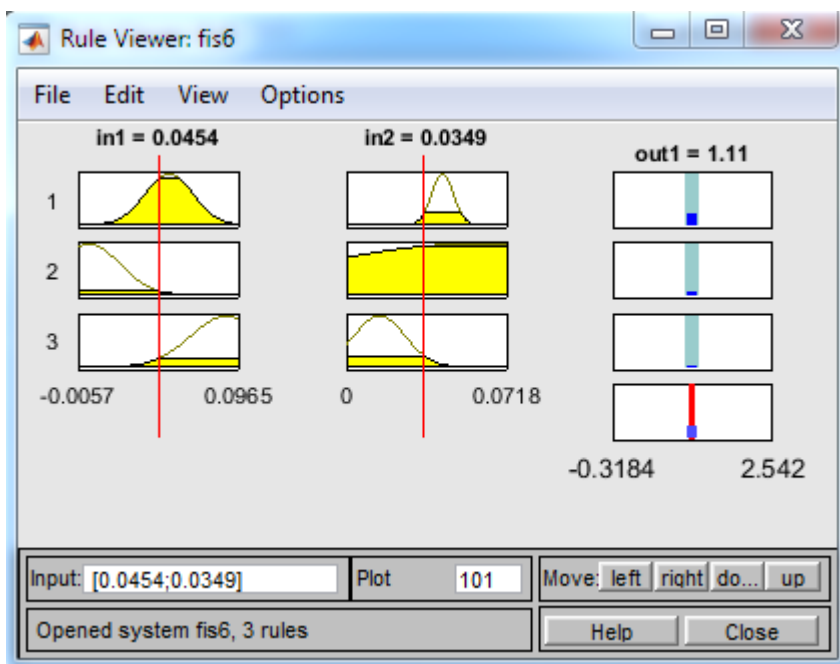


Obr. 23 Trénovanie fuzzy regulátora.

Výsledná Anfis štruktúra s tromi pravidlami je na obr. 24:



Obr. 24 Anfis štruktúra.



Obr. 25 Rozdelenie pravidiel.

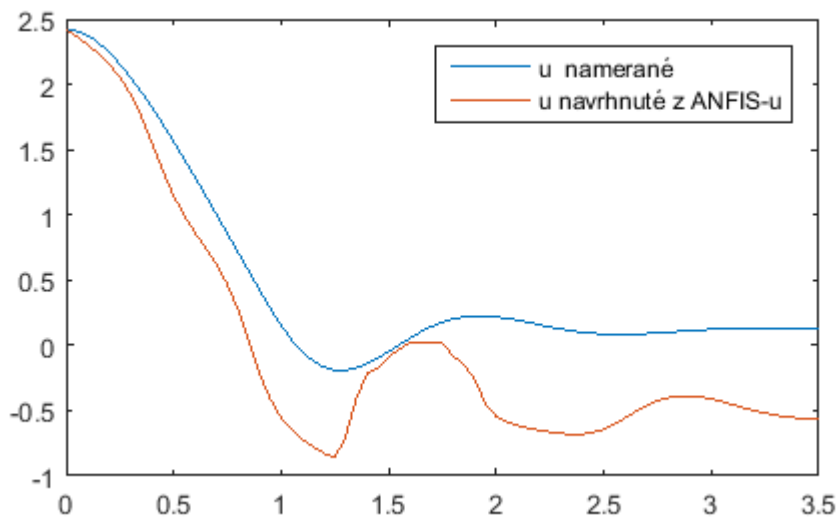
M-file pre tréovanie pomocou štruktúry Anfis príkazom *genfis* pre fuzzy PI regulátor uvádzam v prílohe pod názvom *genfis*. V prílohe sa nachádza aj výsledná FIS matica.

Vhodnosť fuzzy regulátora závisí od toho, či sú k dispozícii vhodné trénovacie údaje, keďže pri návrhu sa vychádza z možností, ktoré poskytuje Fuzzy Logic Toolbox. V tabuľke sú uvedené výsledky riadenia dvoma regulátormi. Obidva boli navrhnuté ako PI regulátory s tromi zvonovými funkciami pre obidva vstupy. Pri tréovaní prvého regulátora boli nastavené v príkaze *anfis* iba 3 iterácie, pri druhom regulátore ich bolo 3000.

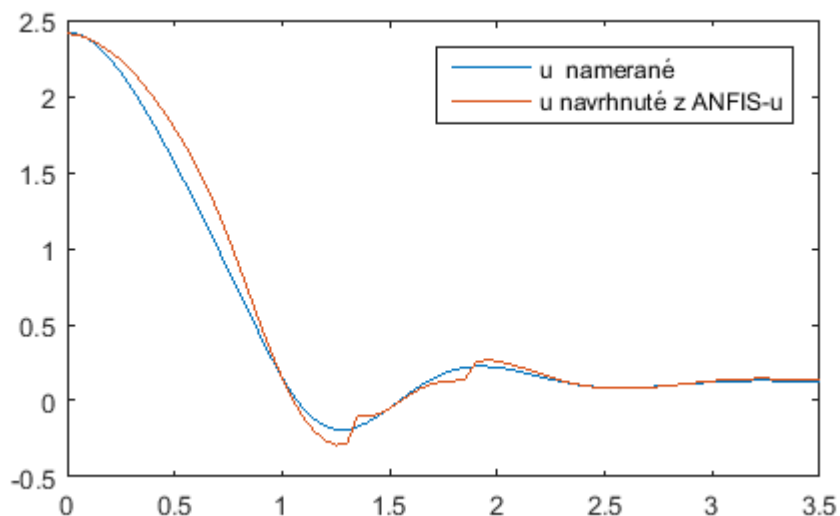
Tab. 7 Porovnanie riadenia pomocou fuzzy PI regulátorov.

Regulátor	Riadenie na žiadanú hodnotu			Odstránenie poruchy			IAE
	$\delta_{MAX}[\%]$	$t_{reg}[min]$	$TRO[m]$	$\delta_{MIN}[\%]$	$t_{reg}[min]$	$TRO[m]$	
Fuzzy PI 1	13,37	1,370	0	10,67	0,411	0,0028	0,0813
Fuzzy PI 2	13,37	1,370	0	10,87	0,417	0,0027	0,0807

Porovnanie natrénovaných akčných zásahov s trénovacími údajmi je na obr. 26 a obr. 27.

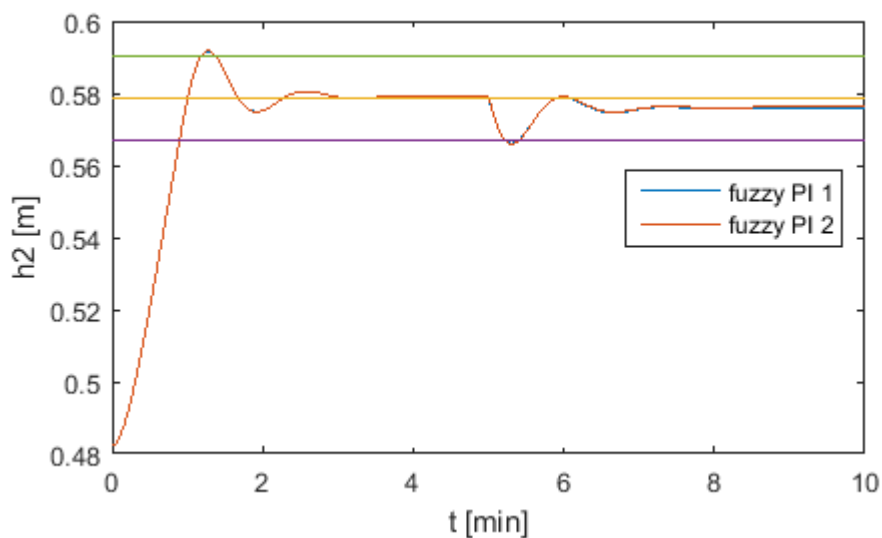


Obr. 26 Tréovanie prvého regulátora.



Obr. 27 Trénovanie druhého regulátora.

Porovnanie riadenia pomocou týchto regulátorov je na obr. 28.



Obr. 28 Porovnanie riadenia pomocou fuzzy PI regulátorov.

Riadenie pomocou týchto dvoch regulátorov sa líši málo, teda pri vhodných tréningových údajoch nemusí byť regulátor natrénovaný úplne dokonale. Regulátor však pri odstraňovaní poruchy neodstránil TRO. Počet funkcií príslušnosti nemal vplyv na kvalitu riadenia.

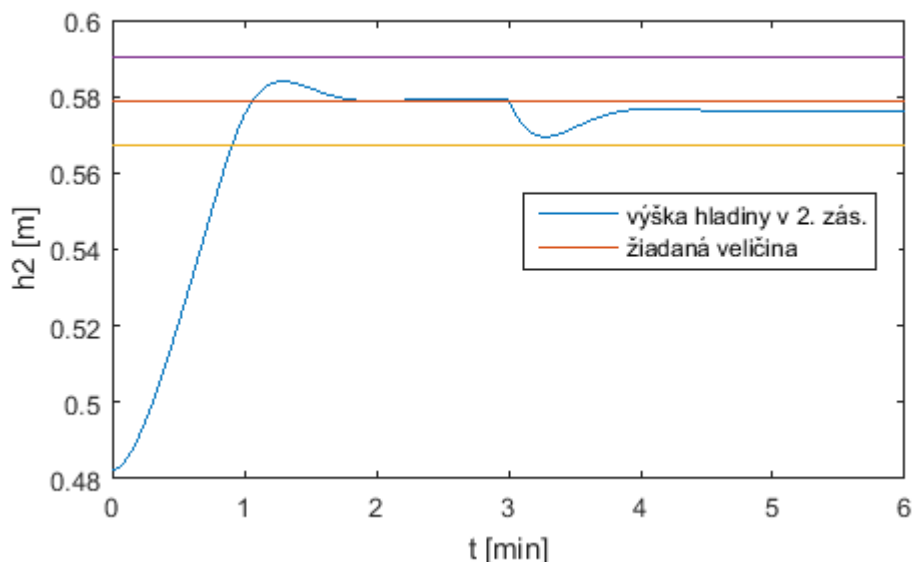
Vplyv počtu funkcií príslušnosti pri riadení systému fuzzy PD regulátorom:

Trénovacie údaje sú hodnoty regulačnej odchýlky, jej derivácie a riadiacej veličiny. Menil sa počet funkcií príslušnosti zvonového tvaru. Hodnoty kvality riadenia sú v tab. 8.

Tab. 8 Porovnanie riadenia regulátorov s rôznym počtom funkcií príslušnosti.

Počet funkcií prísluš.	Riadenie na žiadanú hodnotu			Odstránenie poruchy			IAE
	$\delta_{MAX}[\%]$	$t_{reg}[min]$	$TRO[m]$	$\delta_{MIN}[\%]$	$t_{reg}[min]$	$TRO[m]$	
2	4,73	0,907	0,0008	7,25	0,907	0,0027	0,0696
3	5,05	0,906	0,0005	7,77	0,906	0,0025	0,0692
5	4,95	0,907	0,0004	7,23	0,907	0,0025	0,0688
7	4,95	0,906	0,0004	7,87	0,906	0,0025	0,0691
9	5,36	0,907	0,0005	7,66	0,907	0,0025	0,0693

Najlepšie hodnoty kritérií kvality sa dosiahli pri použití piatich funkcií príslušnosti. Riadenie systému je znázornené na obr. 29.



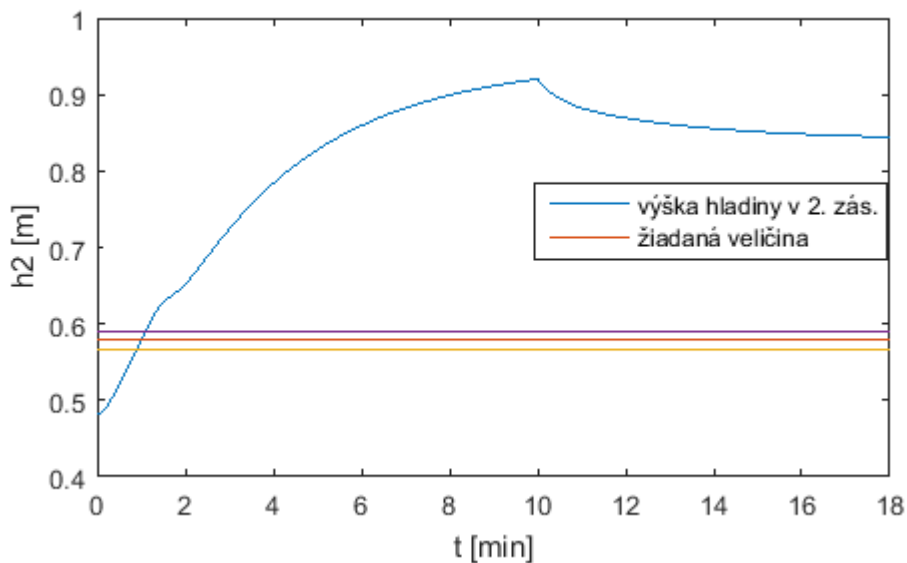
Obr. 29 Riadenie systému pomocou PD regulátora s piatimi zvonovými f. príslušnosti.

2.3.2 Mamdaniho regulátor

Mamdaniho typ regulátora sa v Matlabe dá navrhnuť pomocou príkazu *genfis3*, ak sa v ňom zvolí príslušný parameter. Je to fuzzy regulátor, ktorý má fuzzy hodnoty aj vstupné aj výstupné veličiny. Obyčajne je navrhnutý regulátor málo presný a treba ho upraviť.

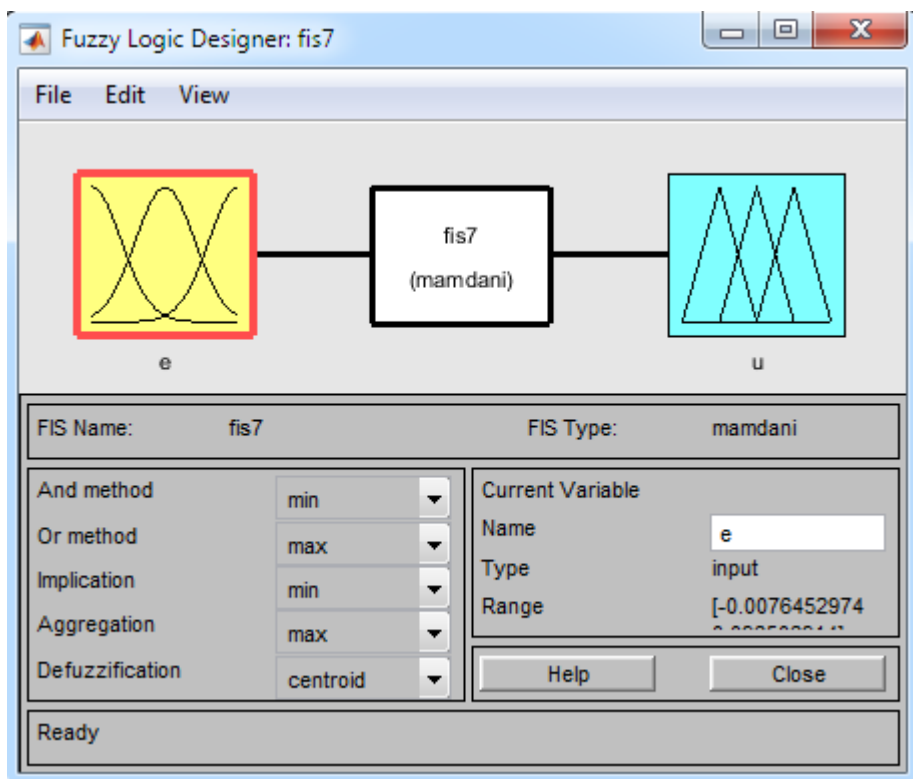
Mamdaniho fuzzy P regulátor:

Riadenie zásobníkov Mamdaniho fuzzy regulátorom je znázornené na obr. 30. Keďže tento regulátor nie je vhodný, je ďalej upravený.



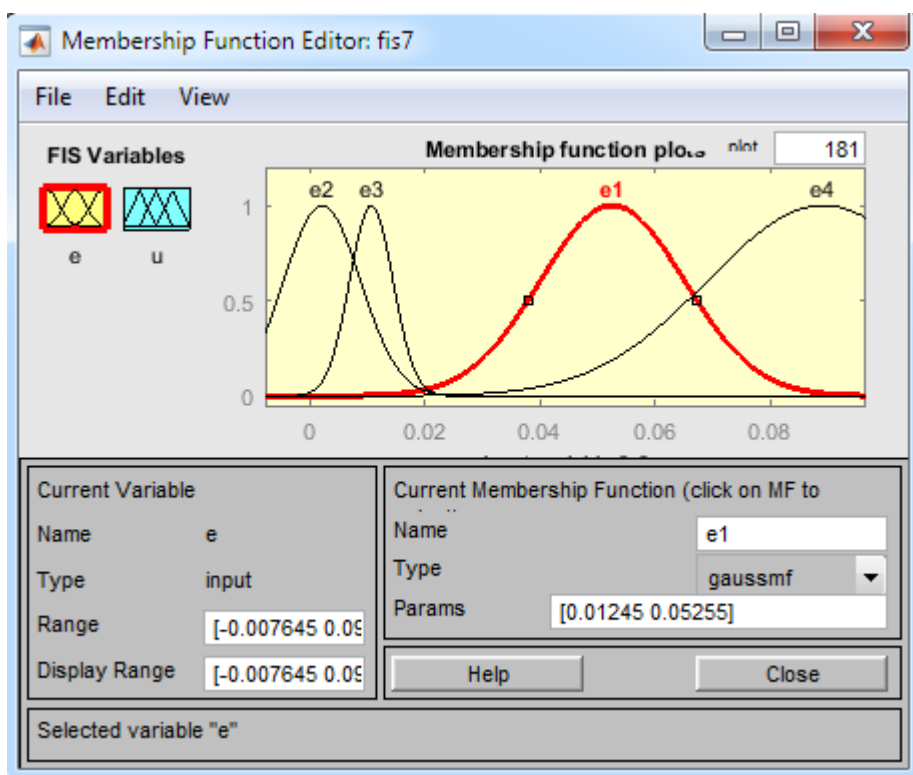
Obr. 30 Riadenie Mamdaniho P regulátorom bez úpravy.

Zadaním príkazu *fuzzy* do príkazového riadku Matlabu sa otvorí okno *Fuzzy Logic Designer*, ktoré je na obr. 31. V tomto okne môžeme voliť a meniť rôzne parametre fuzzy inferenčného systému.



Obr. 31 Fuzzy Logic Designer.

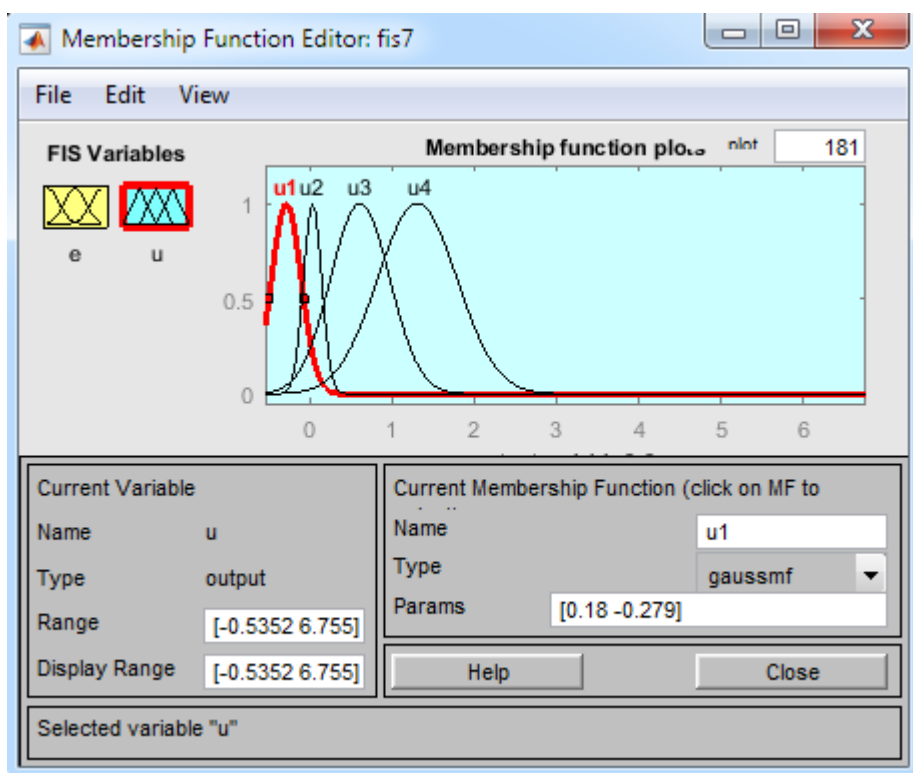
Dvojitým kliknutím na vstup *e* alebo výstup *u* sa otvorí okno *Membership Function Editor* (obr. 34), v ktorom sa upravuje tvar, počet, veľkosť a rozloženie funkcií príslušnosti. Kliknutím môžeme prepínať medzi vstupmi a výstupmi. Na obr. 32 je zobrazené rozloženie funkcií príslušnosti pre regulačnú odchýlku.



Obr. 32 Vstupné funkcie príslušnosti.

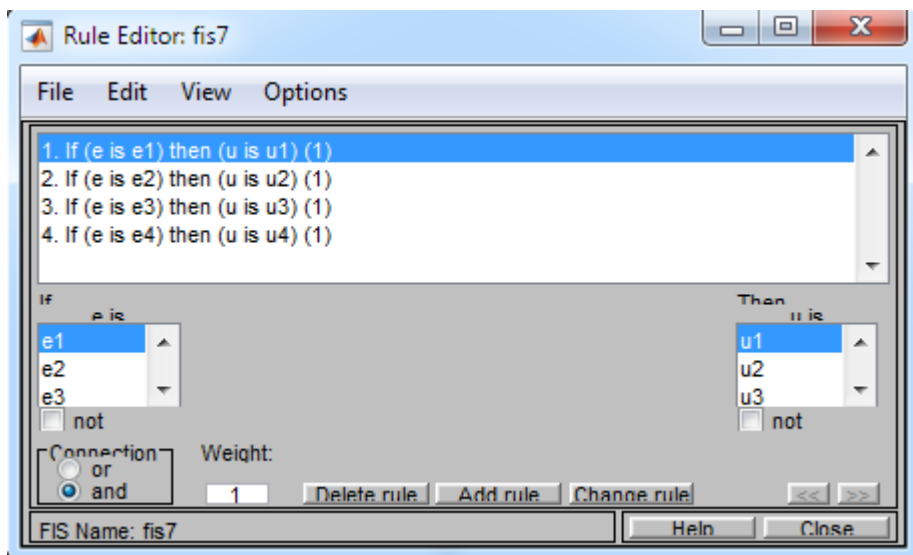
Funkcie príslušnosti výstupu boli upravované tak, aby riadenie zásobníkov spĺňalo požiadavky na kvalitu riadenia.

Rozloženie funkcií príslušnosti výstupnej veličiny možno vidieť na obr. 33.



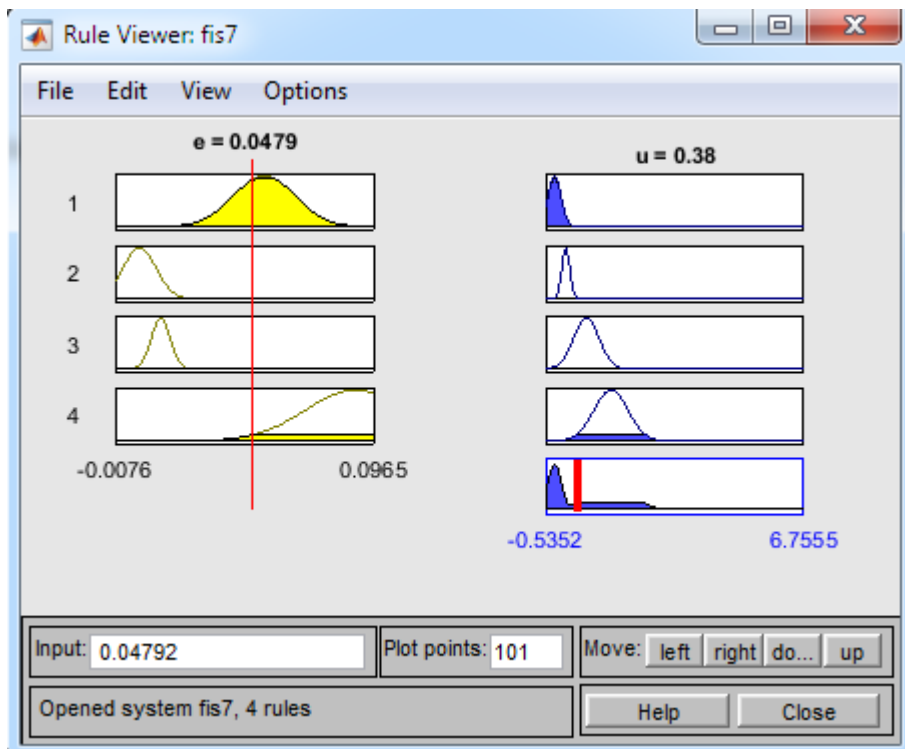
Obr. 33 Výstupné funkcie príslušnosti.

V *Rule Editor*-e, do ktorého sa dostaneme cez ponuku edit, sa nachádzajú jednotlivé pravidlá (obr. 34), ktoré môžeme zmeniť, zmazať alebo pridať.



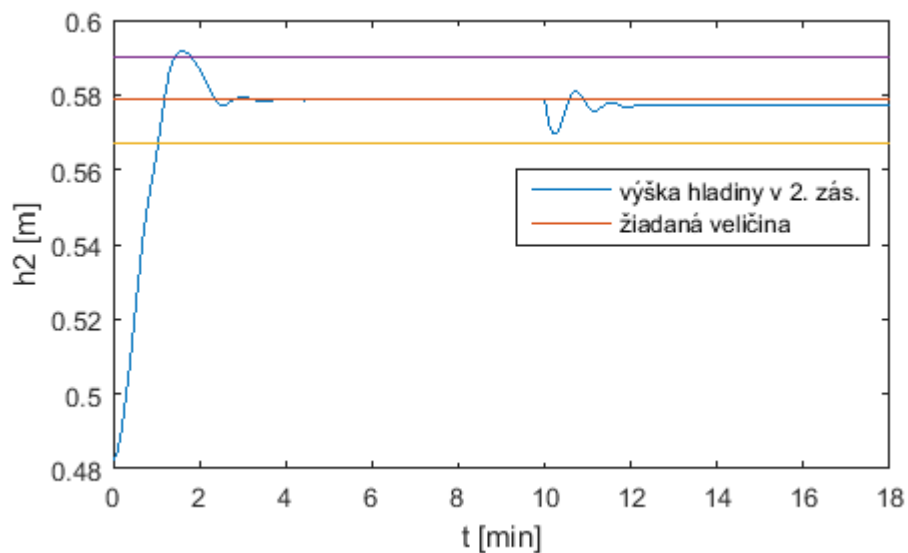
Obr. 34 Rule editor.

Rule Viewer, ktorý je tiež súčasťou Fuzzy Logic Toolboxu, zobrazuje rozloženie pravidiel (obr. 35).



Obr. 35 Rozloženie pravidiel.

Riadenie výšky hladiny v druhom zásobníku pomocou Mamdaniho P reg. je na obr.36.



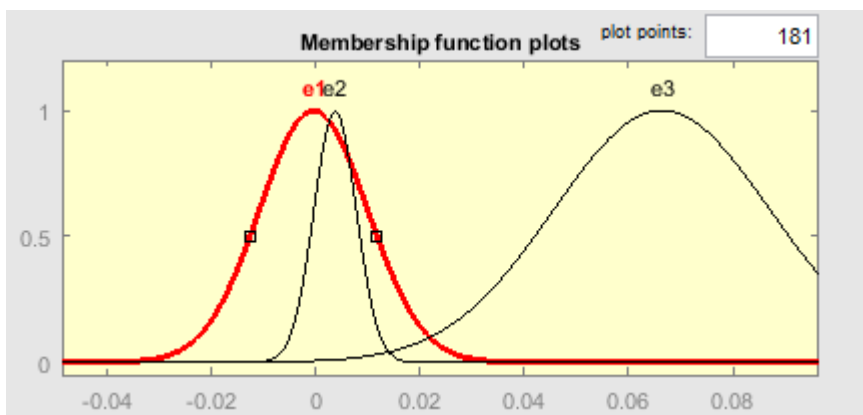
Obr. 36 Riadenie pomocou Mamdaniho P regulátora.

Tab. 9 Riadenie zásobníkov Mamdaniho P regulátorom.

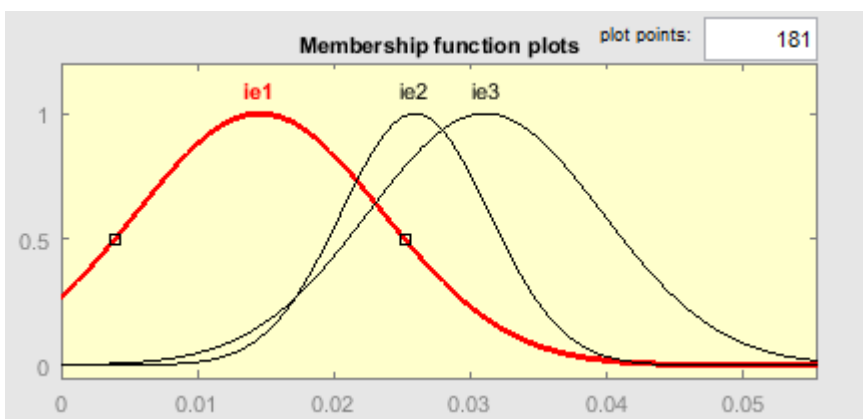
Riadenie na žiadanú hodnotu			Odstránenie poruchy			IAE
$\delta_{MAX}[\%]$	$t_{reg}[min]$	$TRO[m]$	$\delta_{MIN}[\%]$	$t_{reg}[min]$	$TRO[m]$	
13,47	1,792	0	7,91	0	0,0016	0,0864

Mamdaniho PI regulátor:

Pri návrhu Mamdaniho PI regulátora bol postup rovnaký s tým rozdielom, že boli použité 2 vstupy, regulačná odchýlka a jej integrál. Rozloženie vstupných funkcií príslušnosti možno vidieť na obr. 37 a obr. 38.

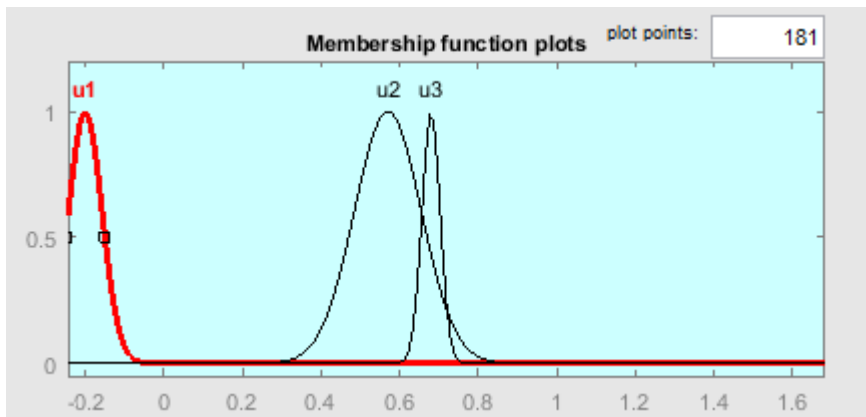


Obr. 37 Rozloženie funkcií príslušnosti pre prvý vstup.



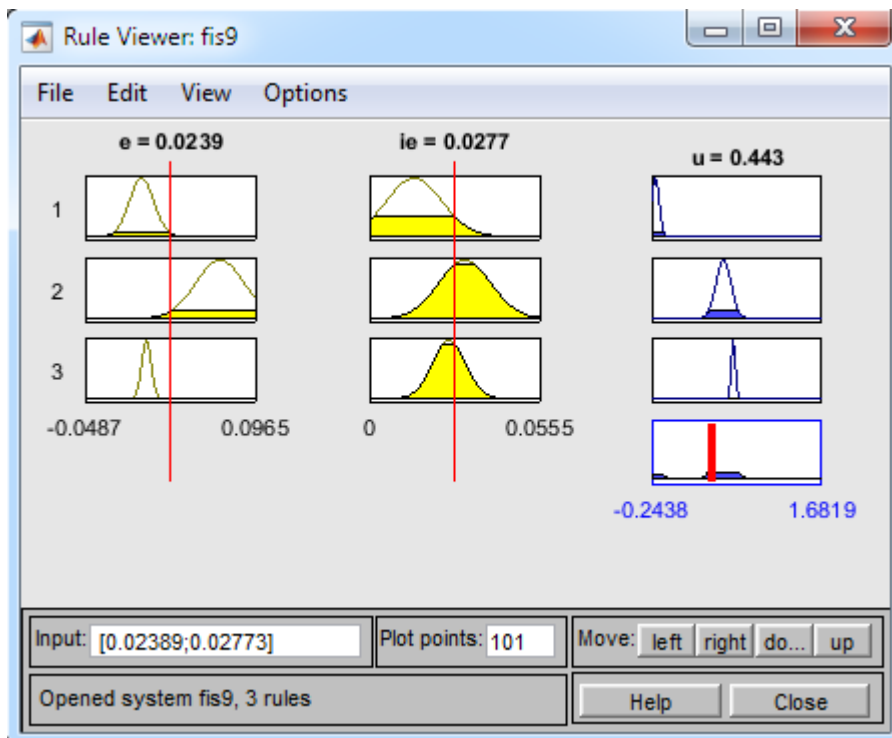
Obr. 38 Rozloženie funkcií príslušnosti pre druhý vstup.

Výstupné funkcie príslušnosti bolo potrebné upraviť rovnakým spôsobom ako pri Mamdaniho P regulátore. Výsledkom je ich rozloženie na obr. 39.



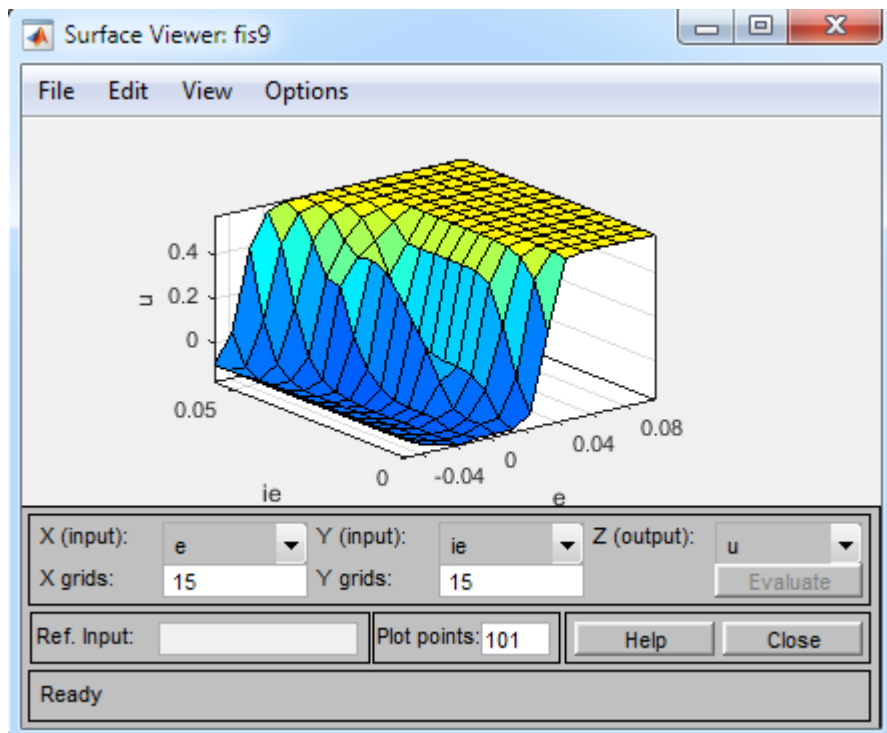
Obr. 39 Rozloženie výstupných funkcií príslušnosti.

Rozloženie pravidiel ilustruje obr. 40.



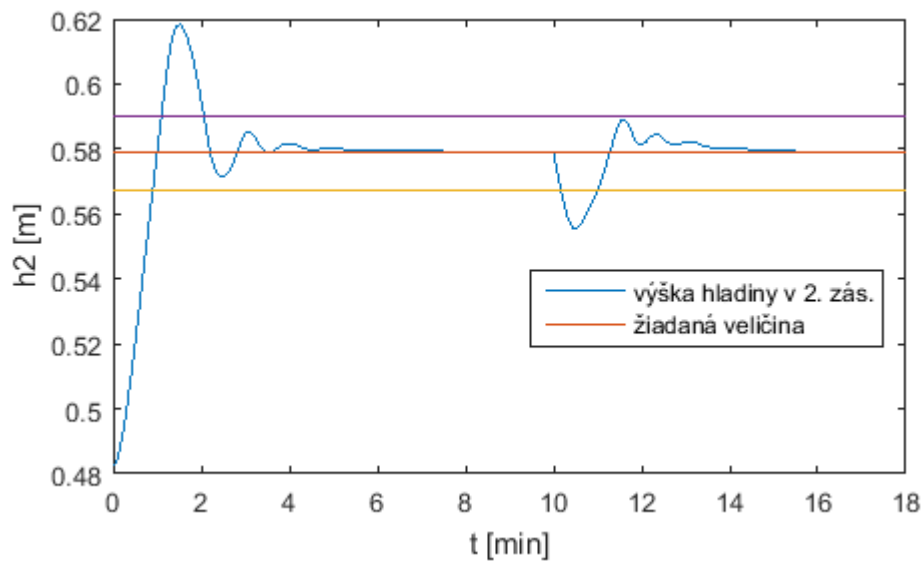
Obr. 40 Rozloženie pravidiel.

Fuzzy Logic Toolbox ponúka možnosť zobrazenia povrchu výstupnej FIS matice (Obr. 41).



Obr. 41 Povrch výstupnej FIS matice

Riadenie výšky hladiny v druhom zásobníku pomocou Mamdaniho PI regulátora:



Obr. 42 Riadenie pomocou Mamdaniho PI regulátora.

Tab. 10 Riadenie zásobníkov Mamdaniho PI regulátorom.

Riadenie na žiadanú hodnotu			Odstránenie poruchy			IAE
$\delta_{MAX}[\%]$	$t_{reg}[min]$	$TRO[m]$	$\delta_{MIN}[\%]$	$t_{reg}[min]$	$TRO[m]$	
40,93	2,06	0	24,35	0,99	0	0,1271

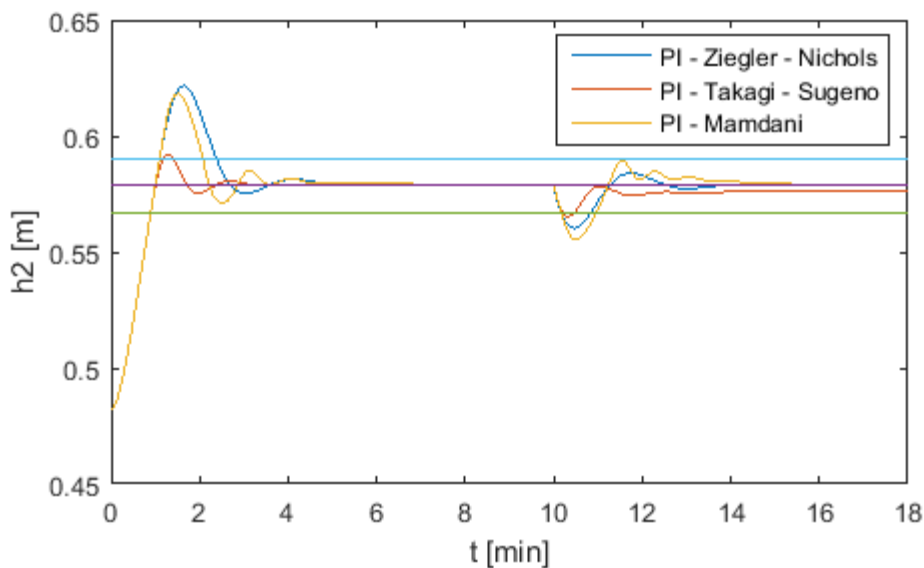
3 Diskusia

Cieľom práce bolo navrhnúť a simulačne overiť fuzzy resp. neuro-fuzzy regulátory pre riadenie výšky hladiny v druhom zásobníku v sústave dvoch zásobníkov s interakciou a využiť pri návrhu možnosti Fuzzy Logic Toolboxu Matlabu.

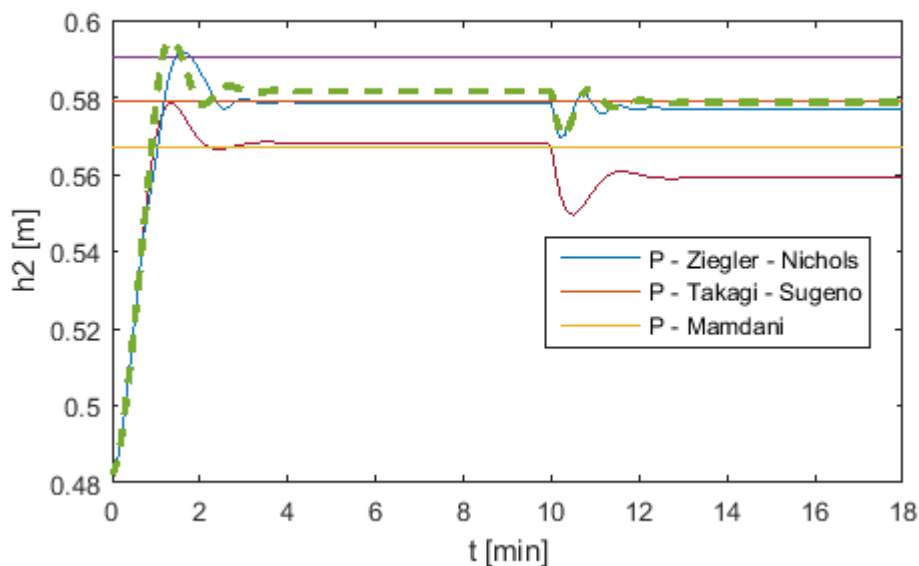
Boli navrhnuté Takagiho – Sugenové regulátory typu P, PI, PD pomocou príkazov *genfis1*, *genfis2* a *genfis3*. Pri návrhu boli použité rôzne tvary funkcií príslušnosti, trojuholníková, lichobežníková, zvonová a Gaussovská. Pri porovnaní výsledkov riadenia boli horšie výsledky iba pri funkciách príslušnosti trojuholníkového tvaru. Keďže množina tréningových údajov bola získaná po viacerých simulačných experimentoch, tréningové údaje boli vhodné a presné a navrhnuté regulátory boli jednoduché, mali málo pravidiel a poskytovali porovnateľné výsledky.

Ak sa pri návrhu regulátorov používa príkaz *genfis1*, regulátory majú viac pravidiel pri porovnateľnom výsledku, ako pri použití metód zhlukovania, teda príkazov *genfis2*, a *genfis3*.

Na syntézu Mamdaniho P a PI regulátora bol použitý príkaz *genfis3*. Výsledkom bol fuzzy inferenčný systém so 4 pravidlami, ale jedno pravidlo sa opakovalo, teda bolo vylúčené. FIS množina bola upravená vo Fuzzy Logic Toolboxe tak, aby regulátor riadil výšku hladiny na žiadanú hodnotu. Na obr. 45 a obr. 46 je porovnanie riadenia výšky hladiny v druhom zásobníku pomocou P a PI regulátorov navrhnutých Zieglerovou – Nicholsovou metódou a fuzzy P a PI regulátorov.



Obr. 43 Porovnanie riadenia klasického PI regulátora a fuzzy PI regulátorov.



Obr. 44 Porovnanie riadenia klasického P regulátora a fuzzy P regulátorov.

Ak máme vhodnú množinu tréovacích údajov, môžeme navrhnuť lepšie regulátory. Obyčajne však na návrh vhodných regulátorov stačí aj malý počet pravidiel. Návrh Mamdaniho regulátorov je časovo náročnejší. Vhodný je najmä, ak pribúdajú nové požiadavky na riadenie procesu, vtedy môžeme rozšíriť počet pravidiel. V celej práci sa používal Fuzzy Logic Toolbox.

4 Záver

Predmetom tejto bakalárskej práce bol návrh fuzzy a neuro-fuzzy regulátorov pre riadenie dvoch zásobníkov kvapaliny s interakciou a ich simulačné overenie. V úvode práce boli vysvetlené niektoré základné pojmy a operácie s fuzzy množinami, ktoré boli neskôr využité pri syntéze regulátorov.

V druhej časti tejto práce sú navrhnuté P a PI regulátory Zieglerovou – Nicholsovou metódou. Vstupné údaje pre návrh parametrov regulátorov sú z identifikácie riadeného systému Strejcovou metódou.

Fuzzy regulátory boli navrhované na základe trénovacích údajov, ktoré boli výsledkom simulačných experimentov. Boli navrhnuté neuro-fuzzy regulátory typu Takagiho – Sugenu a fuzzy regulátor typu Mamdaniho. Pri návrhu boli využité príkazy a funkcie Fuzzy Logic Toolboxu Matlabu.

Riadenie fuzzy regulátormi a klasickými regulátormi je porovnateľné a v niektorých prípadoch môže byť dokonca lepšie. Ich výhodou v priemyselných aplikáciách je nepotrebnosť presného matematického opisu, stačí im len opis skúseného operátora.

Zoznam použitej literatúry

1. VYSOKÝ, P. Fuzzy řízení. 1. vyd. Praha: ČVUT Praha, 1997. 131 s. ISBN 80-01-01429-8.
2. ŠTĚPÁNEK, R. Návrh fuzzy regulátoru: diplomová práce. [online]. Brno: VUT Brno, 2007. 67 s. Dostupné na internete: <http://autnt.fme.vutbr.cz/szz/2007/DP_Stepanek.pdf>.
3. MODRLÁK, O. Fuzzy řízení a regulace. [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2004. 26 s. Dostupné na internete: <<http://www.kirp.chtf.stuba.sk/~bakosova/wwwRTP/tar2fuz.pdf>>.
4. KOLESÁROVÁ, A. – KOVÁČOVÁ, M. Fuzzy množiny a ich aplikácie. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2004. 160 s. ISBN 80-227-2036-4.
5. BOŽEK, P. – BARBORÁK, O. – NAŠČÁK, Ľ. – ŠTOLLMAN, V. Špecializované robotické systémy. [online]. 2. vyd. Ostrava: Ámos, 2011. Dostupné na internete: <http://www.uiam.mtf.stuba.sk/predmety/srs/1-Ucebnica/#_Toc310244222> ISBN 978-80-904766-8-4.
6. PIVOŇKA, P. Vyšší formy řízení [online]. 2003. Dostupné na internete: <<http://www.kves.uniza.sk/kvesnew/dokumenty/%C5%A0EP/PID%20Control/VFR03.pdf>> .
7. Dokumentácia k programu Matlab R2015a
8. BAKOŠOVÁ, M. – FIKAR, M. Riadenie procesov. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2012. 193 s. ISBN 978-80-227-3763-0.
9. CRUZ, A. O. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems. [online]. Dostupné na internete: <<http://equipe.nce.ufrj.br/adriano/fuzzy/transparencias/anfis/anfis.pdf>>
10. JANG, J.-S. R. Neuro-fuzzy and soft computing. NJ: Prentice-Hall, Inc, 1997. 640 s. ISBN 0-13-261066-3. Dostupné na internete: <<http://www.csbdn.in/pdf/Neuro-Fuzzy%20And%20Soft%20Computing%20Jang.pdf>>

Prílohy

Príloha A: s – funkcia – script s-funkcie použitej na riadenie

Príloha B: PID_riad – bloková schéma pre riadenie PID regulátormi

Príloha C: P_genfis – zdrojový kód na vytvorenie FIS matice

Príloha D: fuzzy_P_riad – bloková schéma pre riadenie fuzzy P regulátorom

Príloha E: fuzzy_PI_riad – bloková schéma pre riadenie fuzzy PI regulátorom

Príloha F: FIS matica

Príloha A: s – funkcia – nelineárny model riadeného systému

```
function [sys,x0,str,ts] = zk3(t,x,u,flag)
switch flag,
case 0
[sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes;
case 1
sys = mdlDerivatives(t,x,u);
case 3
sys = mdlOutputs(t,x,u);
case {2, 4, 9}
sys = [];
otherwise
error(['unhandled flag = ',num2str(flag)]);
end;
function [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes % inicializacia

sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 2;           % pocet spojitych stavov
sizes.NumDiscStates = 0;          % pocet diskretnych stavov
sizes.NumOutputs = 1;             % pocet vystupov
sizes.NumInputs = 2;              % pocet vstupov
sizes.DirFeedthrough = 0;

sizes.NumSampleTimes = 1;
sys = simsizes(sizes);

k1=1.8;
k2=1.8;
F1=1.2;
F2=1.2;
qv1=1;
qv2=0.25;

h2s=((qv1+qv2)/k2)^2
h1s=((qv1)/k1)^2+h2s;
x0=[h1s h2s];
str = [];
ts = [0 0];
function sys = mdlDerivatives(t,x,u) % vypocet derivaci
k1=1.8;
k2=1.8;
F1=1.2;
F2=1.2;

if x(1)<0
x(1)=0;
end
if x(2)<0
x(2)=0;
end
```

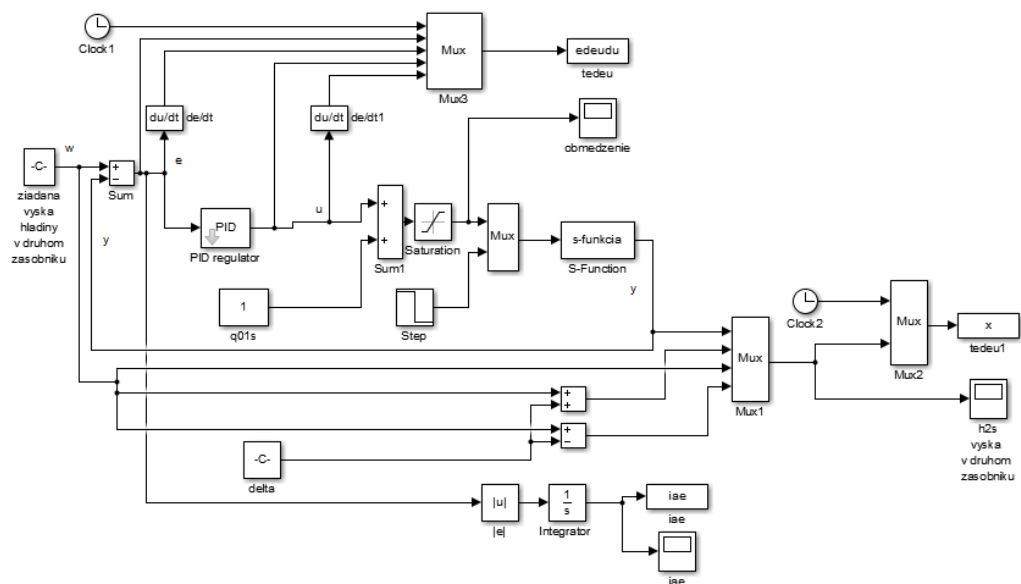
```

sys(1)=(u(1)-k1*sqrt(x(1)-x(2)))/F1;
sys(2)=(u(2)+k1*sqrt(x(1)-x(2))-k2*sqrt(x(2)))/F2;

function sys = mdlOutputs(t,x,u) % vypocet vystupov
if x(1)<0
x(1)=0;
end
if x(2)<0
x(2)=0;
end
sys(1)=[x(2)];

```

Príloha B: PID_riad – bloková schéma pre riadenie PID regulátormi



Príloha C: P_genfis – zdrojový kód na vytvorenie FIS matice

%genfis1

```
trnData = [e ie u]; epoch_n = 3;
in_fismat = genfis1(trnData,3,'trimf');
writefis(in_fismat,'fis5');
a =readfis('fis5');
    plotmf(a,'input',1),title('vstup e')
    pause
    plotmf(a,'input',2),title('vstup ie')
    pause
out_fismat = anfis(trnData,in_fismat,3);
writefis(out_fismat,'fis6');
    type fis6.fis
    a=readfis('fis6');
gensurf(a)
title('povrch vystup. fis matice, input1=e, input2=ie, outpu=u'),
pause
plot(t,u,t,evalfis([e de],out_fismat));
legend('u namerané','u navrhnuté z ANFIS-u '),
pause
fismat2=readfis('fis6');
```

%genfis2

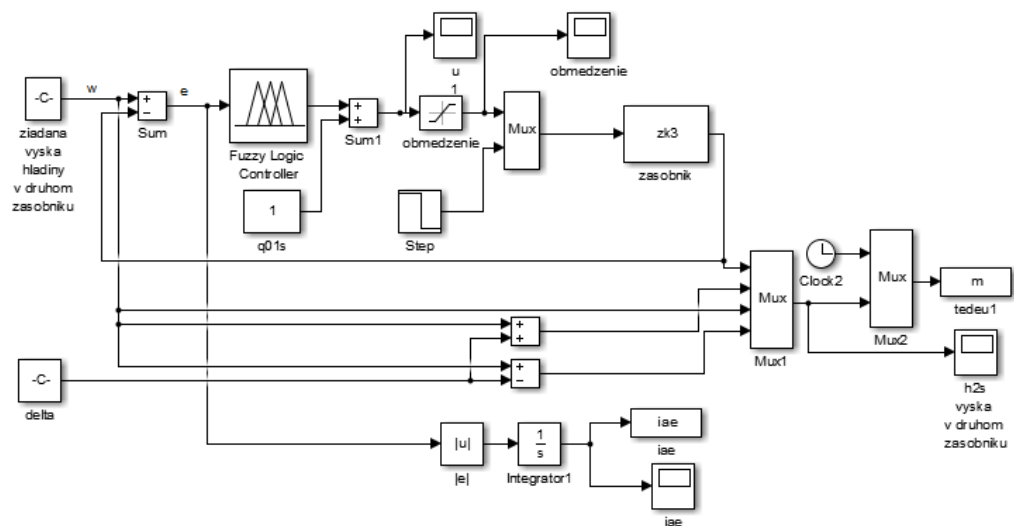
```
trnData = [e ie u];in=[e ie];ou=u;
out_fismat = genfis2(in,ou,0.5);
writefis(out_fismat,'fis4');
a=readfis('fis4');
    plotmf(a,'input',1),title('vstup e')
    pause
    plotmf(a,'input',2),title('vstup ie')
    pause
    type fis4.fis
    a=readfis('fis4');
gensurf(a)
title('povrch vystup. fis matice, input1=e, input2=ie, outpu=u')
pause
plot(t,u,t,evalfis([e ie],out_fismat));
legend('u namerane','u navrhnuté')
pause
fismat1=readfis('fis4');
```

```

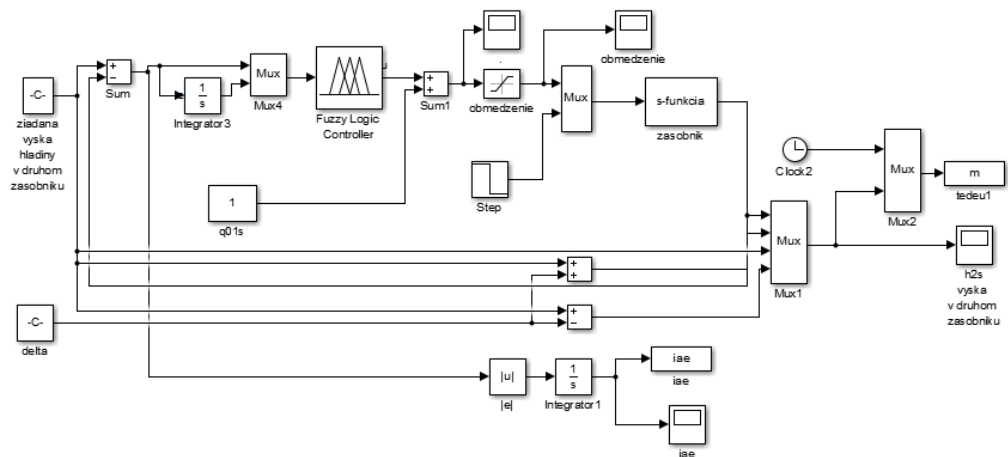
%genfis3
trnData = [e ie u];in=[e ie];ou=u;
out_fismat = genfis3(in,ou,'sugeno',3);
writefis(out_fismat,'fis6');
a=readfis('fis6');
    plotmf(a,'input',1),title('vstup e')
    pause
    plotmf(a,'input',2),title('vstup ie')
    pause
    type fis6.fis
    a=readfis('fis6');
gensurf(a)
title('povrch vystup. fis matice, input1=e, input2=ie, output=u')
pause
plot(t,u,t,evalfis([e de],out_fismat));
legend('u namerané','u navrhnuté z ANFIS-u')
pause
fismat4=readfis('fis6');

```

Príloha D: fuzzy_P_riad – bloková schéma pre riadenie fuzzy P regulátorom



Príloha E: fuzzy_PI_riad – bloková schéma pre riadenie fuzzy PI regulátorom



Príloha F: FIS matica

[System]

Name='fis6'

Type='sugeno'

Version=2.0

NumInputs=2

NumOutputs=1

NumRules=9

AndMethod='prod'

OrMethod='max'

ImpMethod='prod'

AggMethod='max'

DefuzzMethod='wtaver'

[Input1]

Name='input1'

Range=[-0.0057 0.0965]

NumMFs=3

MF1='in1mf1': 'trimf', [-0.0568 -0.0091 0.0382]

MF2='in1mf2': 'trimf', [-0.0049 0.0399 0.0967]

MF3='in1mf3': 'trimf', [0.0350 0.0951 0.1476]

[Input2]

Name='input2'

Range=[0 0.0717]

NumMFs=3

MF1='in2mf1': 'trimf', [-0.0358 0.0007 0.0345]

MF2='in2mf2': 'trimf', [-0.0004 0.0371 0.0706]

MF3='in2mf3': 'trimf', [0.0452 0.07224 0.1076]

[Output1]

Name='output'

Range=[-0.0448 2.4126]

NumMFs=9

MF1='out1mf1': 'linear', [0 0 0]

MF2='out1mf2': 'linear', [-0.0217 -1.9639 -0.1169]

MF3='out1mf3': 'linear', [28.9266 -14.2510 1.2438]

MF4='out1mf4': 'linear', [-4.9202 5.04812 -0.0632]

MF5='out1mf5': 'linear', [-16.2474 -95.4116 6.6840]

MF6='out1mf6': 'linear', [-23.7351 15.4032 -1.1191]

MF7='out1mf7': 'linear', [4.9480 -22.1098 1.9381]

MF8='out1mf8': 'linear', [60.2212 -13.8063 -2.6965]

MF9='out1mf9': 'linear', [-1.9187 0.6579 -0.9183]

[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