

Návrh fuzzy riadenia pre systémy s integračnou činnosťou

DIPLOMOVÁ PRÁCA

FCHPT-5414-26471

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKÉJ A POTRAVINÁRSKEJ TECHNOLOGIE

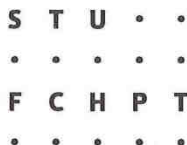
Návrh fuzzy riadenia pre systémy s integračnou činnosťou
DIPLOMOVÁ PRÁCA
FCHPT-5414-26471

Študijný program: I-AICHP Automatizácia a informatizácia v chémii a potravinárstve

Číslo a názov študijného odboru: 5.2.14 Automatizácia

Školiace pracovisko: OIRP ÚIAM FCHPT

Vedúca záverečnej práce/školiteľ: Ing. Anna Vasičkaninová



ZADANIE DIPLOMOVEJ PRÁCE

Študent: **Bc. Michal Sónak**
ID študenta: 26471
Študijný program: automatizácia a informatizácia v chémii a potravinárstve
Študijný odbor: 5.2.14 automatizácia
Vedúca práce: Ing. Anna Vasičkaninová

Názov práce: **Návrh fuzzy riadenia pre systémy s integračnou činnosťou**

Špecifikácia zadania:

Prehľad metód pre návrh regulátorov pre riadenie systémov s integračnou činnosťou.
Návrh jednoduchých fuzzy regulátorov pre riadenie systémov s integračnou činnosťou.
Simulačné overenie a porovnanie navrhnutých regulátorov.

Rozsah práce: 60

Riešenie zadania práce od: 14. 02. 2011

Dátum odovzdania práce: 21. 05. 2011

Bc. Michal Sónak
Študent



prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
Vedúci pracoviska

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

Pod'akovanie

Touto cestou by som sa chcel pod'akovať
vedúcej diplomovej práce Ing. Anne
Vasičkaninovej za všetky cenné rady,
pripomienky a odborné vedenie pri písaní
a koordinácii mojej diplomovej práce.

Prehlásenie

Čestne prehlasujem, že som diplomovú prácu vypracoval samostatne podľa pokynov vedúcej diplomovej práce, s použitím literatúry, ktorú uvádzam v osobitnom zozname. Ďalej prehlasujem, že súhlasím s využitím diplomovej práce ústavom.

.....

V Bratislave, 21. mája 2011

Michal Sónak

Abstrakt

Systémy s integračnou činnosťou sa v priemysle vyskytujú pomerne často napr. pri procesoch riadenia hladiny alebo tlaku v uzavretých nádobách, ako aj pri riadení koncentrácie alebo teploty v dobre izolovaných peciach [8].

Majme systém prvého rádu s integračnou činnosťou bez časového dopravného oneskorenia opísaný prenosovou funkciou

$$G(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)}.$$

Hodnoty parametrov K a T sú uvažované vo zvolených intervaloch. Nominálne hodnoty týchto parametrov sú stredné hodnoty z ich intervalov.

Prvú časť diplomovej práce *Návrh fuzzy riadenia pre systémy s integračnou činnosťou* tvorí výber vhodných analytických a experimentálnych metód pre nastavovanie parametrov PID regulátorov. PID regulátory sú najčastejšie používané na riadenie stabilných procesov, ale ich použitie pri systémoch s integračnou činnosťou je spojené s problémami.

V druhej časti práce sú navrhnuté jednoduché neuro-fuzzy regulátory na riadenie procesov s integračnou činnosťou a sú porovnané s výsledkami simulácie s klasickými PID regulátormi.

Výsledky simulácií sú porovnané na základe vybraných kritérií kvality, ako čas regulácie t_{REG} , absolútna regulačná (IAE) a kvadratická regulačná plocha (ISE).

Jednoduché fuzzy regulátory vykazujú lepšie časy regulácie t_{REG} a menšie hodnoty IAE a ISE ako riadenie klasickými PID regulátormi.

Z výsledkov simulácií vyplýva, že riadením navrhnutými fuzzy regulátormi sa dosahujú lepšie kritériá kvality riadenia, rýchlejšie dosiahnutie žiadanej hodnoty $w(t)$, ako aj rýchlejšie odstraňovanie porúch.

Abstract

Integrating models appear while modeling mass or energy accumulation, a rotation of machineries, etc. They contain undesirable pole which need to be shifted by suitable design of the feedback loop [39]. Let us have the first order and integrating plant without time delay described by the transfer function

$$G(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)}.$$

The values of the parameters K and T are known within selected intervals. The nominal values of these parameters are mean values of their intervals.

The first part of diploma thesis *Fuzzy controller design for integrating plants* deals with tuning of classical *PID* controllers. *PID* control is widely used to control stable processes; however, its application to integrating processes is less common.

In the second part of this work, simple neuro-fuzzy controllers are proposed for integrating process.

The comparison of the simulation results with classical *PID* controllers tuned using successful analytical and experimental methods is made. The simple fuzzy controllers show a better time domain performance and comparison of the simulation results with classical *PID* controllers using integrated squared error and integrated absolute error criteria demonstrates the superiority of the proposed approach. Designed fuzzy controllers lead to better control performance in both tasks, the set-point $w(t)$ tracking and disturbance rejection.

Obsah

Úvod.....	13
1 Teoretická časť.....	15
1.1 Systémy s integračnou činnosťou.....	15
1.2 Spätnoväzbové riadenie	16
1.3 <i>PID</i> regulátory	16
1.4 Nastavovanie parametrov regulátorov	17
1.5 Kritériá kvality riadenia	17
1.6 Fuzzy logika.....	18
1.7 Fuzzy množiny.....	18
1.8 Fuzzy pravidlá.....	19
1.9 Funkcie príslušnosti	20
1.10 Fuzzy systém.....	20
1.11 <i>Anfis</i>	21
1.12 Metóda subtraktívneho zhlukovania	21
1.13 Fuzzy riadenie	23
1.13.1 Fuzzy regulátor	23
1.14 Návrh fuzzy regulátorov na základe <i>PID</i> regulátora	25
2 Experimentálna časť	27
2.1 Metódy nastavovania parametrov <i>PID</i> regulátora	27
2.1.1 Metóda násobného dominantného pólu (<i>MNDP</i>)	27
2.1.1.1 Metóda násobného dominantného pólu (<i>MNDP</i>) v konfigurácií <i>2DoF</i>	30
2.1.2 Metóda optimálneho modulu (<i>MOM</i>).....	34
2.1.3 Naslinova metóda	37
2.1.4 Metóda požadovaného modelu (<i>MPM</i>)	39
2.1.5 Strejcova metóda.....	41
2.1.6 Lopezova IAE – ISE metóda	42
2.1.7 Chienova – Hronesova – Reswickova metóda	43
2.2 Návrh fuzzy regulátorov	46
2.3 Výsledné porovnanie kvality riadenia fuzzy regulátormi.....	52
2.4 Robustné riadenie	54
2.4.1 Neurčitosti robustného riadenia	55
2.4.2 Robustnosť <i>PID</i> FR	55

3 Záver	58
Zoznam použitej literatúry	59
Prílohy.....	61

Zoznam skratiek

$2DoF$	2 stupne voľnosti
b	váha žiadanej veličiny pri proporcionálnej zložke
c	váha žiadanej veličiny pri derivačnej zložke
$E(s)$	obraz regulačnej odchýlky
FR	fuzzy regulátor
$G_0(j\omega)$	frekvenčná prenosová funkcia
$G_0(s)$	prenosová funkcia uzavretého regulačného obvodu
$genfis1$	príkaz na inicializáciu systému metódou mriežkového rozdelenia
$genfis2$	príkaz na inicializáciu systému metódou subtraktívneho zhlukovania
$G_F(s)$	prenosová funkcia filtra
$G_R(s)$	prenosová funkcia regulátora
$G_S(s)$	prenosová funkcia regulovanej sústavy
$CH-H-R$	metóda podľa Chien-Hrones-Reswicka
IAE	integrálne kritérium kvality IAE (integral absolute value of error)
ISE	integrálne kritérium kvality ISE (integral squared value of error)
K	zosilnenie prenosovej funkcie regulovanej sústavy
$MNDP$	metóda násobného dominantného pólu
MOM	metóda optimálneho modulu
MPM	metóda požadovaného modelu
n	rád systému
$N(s)$	charakteristický mnohočlen regulačného obvodu
PCH	prechodová charakteristika
PID	proporcionálno – integračno – derivačný
q	stupeň astatizmu
r_0, r_{-1}, r_1	váhy proporcionálnej, integračnej a derivačnej zložky regulátora
T	časová konštanta prenosovej funkcie regulovanej sústavy
T_D	derivačná časová konštanta regulátora
T_d	dopravné oneskorenie
T_I	integračná časová konštanta regulátora
T_N	doba nábehu
t_{REG}	čas regulácie
TRO	trvalá regulačná odchýlka
T_U	doba prietahu
URO	uzavretý regulačný obvod
$V(s)$	obraz poruchovej veličiny
$v(t)$	porucha
$W(s)$	obraz žiadanej veličiny
$w(t)$	riadiaca, žiadaná veličina
$Y(s)$	obraz regulovanej veličiny
$y(t)$	riadená veličina
Z_R	zosilnenie regulátora
δ	okolie žiadanej hodnoty $w(t)$
σ_{MAX}	maximálne preregulovanie

Zoznam obrázkov

Obr. 1	Skoková zmena vstupnej veličiny	str. 15
Obr. 2	Výstupná veličina	str. 15
Obr. 3	Jednoduchý regulačný obvod	str. 16
Obr. 4	Závislosť výšky od funkcie príslušnosti	str. 19
Obr. 5	Typy funkcií príslušnosti v <i>Matlabe</i>	str. 20
Obr. 6	Štruktúra fuzzy systému	str. 20
Obr. 7	Architektúra siete <i>Anfis</i>	str. 21
Obr. 8	<i>Prof. Lotfi A. Zadeh a prof. Ebrahim H. Mamdani</i>	str. 23
Obr. 9	Štruktúra fuzzy regulátora	str. 24
Obr. 10	Fuzzy <i>PID</i> regulátor	str. 25
Obr. 11	Štruktúra jednoduchého fuzzy regulátora typu <i>PI</i>	str. 26
Obr. 12	Štruktúra jednoduchého fuzzy regulátora typu <i>PD</i>	str. 26
Obr. 13	Riadenie regulátormi navrhnutými <i>MNDP</i>	str. 30
Obr. 14	Regulačný obvod s <i>2DoF</i> regulátorom	str. 31
Obr. 15	Riadenie <i>2DoF PI</i> regulátorom	str. 33
Obr. 16	Riadenie <i>2DoF PID</i> regulátorom	str. 34
Obr. 17	Riadenie <i>P</i> regulátorom navrhnutým <i>MOM</i>	str. 36
Obr. 18	Riadenie regulátormi navrhnutými Naslinovou metódou	str. 39
Obr. 19	Riadenie <i>PD</i> regulátormi navrhnutými metódou požadovaného modelu	str. 41
Obr. 20	Riadenie <i>P</i> regulátorom	str. 42
Obr. 21	Riadenie <i>P</i> regulátorom	str. 43
Obr. 22	Riadenie <i>PID</i> regulátorom	str. 44
Obr. 23	<i>PID</i> regulátory odstraňujúce poruchu	str. 45
Obr. 24	<i>PID</i> regulátory neodstraňujúce poruchu	str. 46
Obr. 25	Dve Gaussove funkcie príslušnosti pre vstup <i>e</i>	str. 47
Obr. 26	Dve Gaussove funkcie príslušnosti pre vstup <i>de</i>	str. 47
Obr. 27	Dve Gaussove funkcie príslušnosti pre vstup <i>ie</i>	str. 48
Obr. 28	Pravidlá <i>PID</i> fuzzy regulátora	str. 48
Obr. 29	Výsledná štruktúra <i>Anfis</i>	str. 49
Obr. 30	Akčný zásah fuzzy regulátora	str. 49
Obr. 31	Akčný zásah fuzzy regulátora pri odstraňovaní porúch	str. 49
Obr. 32	Pravidlá <i>PD</i> fuzzy regulátora	str. 50

Obr. 33	Výsledná štruktúra <i>Anfis</i>	str. 50
Obr. 34	Pravidlá <i>PI</i> fuzzy regulátora	str. 51
Obr. 35	Výsledná štruktúra <i>Anfis</i>	str. 51
Obr. 36	Výstupný povrch <i>PD</i> fuzzy regulátora, $u=f(e,de)$	str. 51
Obr. 37	Výstupný povrch <i>PI</i> fuzzy regulátora, $u=f(e,ie)$	str. 51
Obr. 38	Akčný zásah fuzzy regulátora	str. 52
Obr. 39	Akčný zásah fuzzy regulátora pri výskyte porúch	str. 52
Obr. 40	Porovnanie kvality riadenia fuzzy regulátormi s <i>2DoF PID</i> regulátorom	str. 53
Obr. 41	Riadenie sústavy pre 3 skokové zmeny žiadanej veličiny	str. 53
Obr. 42	Riadenie sústavy pri výskyte porúch	str. 54
Obr. 43	Riadenie robustným regulátorom	str. 56
Obr. 44	Riadenie robustným regulátorom pri výskyte poruchy	str. 57

Zoznam tabuliek

Tab. 1	Tabuľka nastavenia regulátora Naslinovou metódou	str. 37
Tab. 2	Tabuľka preregulovaní a koeficientov α a β pre <i>MPM</i>	str. 40
Tab. 3	Hodnoty parametrov <i>PD</i> regulátora pre astatický systém <i>I.rádu MPM</i>	str. 40
Tab. 4	Tabuľka nastavenia regulátora Strejcovou metódou	str. 41
Tab. 5	Tabuľka nastavenia regulátora Lopezovou <i>IAE – ISE</i> metódou	str. 42
Tab. 6	Tabuľka nastavenia regulátora podľa Chiena – Hronesa – Reswicka	str. 43
Tab. 7	Porovnanie parametrov <i>PID</i> regulátora a kritérií kvality	str. 45
Tab. 8	Porovnanie kritérií kvality pri riadení fuzzy regulátormi	str. 52

Úvod

Bezpečnosť pracovníkov pri výrobe a čo najekonomickejšie dosiahnutie požadovanej kvality konečných produktov je hlavným cieľom riadenia v priemysle. Na dosiahnutie požadovaných hodnôt sa používajú rôzne metódy riadenia. V súčasnej dobe sa vývoj techniky nesie v znamení automatizácie a riadenia procesov, kedy sa stretávame s rôznymi modernými metódami riadenia, medzi ktoré patrí aj fuzzy riadenie.

Fuzzy riadenie sa snaží napodobňovať ľudský spôsob vyjadrovania, charakteristický určitými nepresnosťami v slovných formuláciách jednotlivých výpovedí, ako napr. „trochu“, „dost“, „veľa“, „menej“ [1]. Fuzzy riadenie je založené na teórii fuzzy logiky, ktorá je vhodná na popis reálnych rozhodovacích úloh, pretože umožňuje pomocou funkcií príslušnosti takéto nepresnosti matematicky vyjadriť. Funkcia príslušnosti vo fuzzy logike umožňuje priradiť príslušnosť k množinám v rozmedzí od 0 do 1, vrátane oboch hraničných hodnôt a presnejšie vyjadriť čiastočnú príslušnosť k množine [2].

Jednou z možností ako riadiť systém, je využiť heuristické znalosti a skúsenosti operátorov, ktorí daný systém poznajú. Tieto poznatky je možné ľahko previesť do riadiaceho algoritmu vo forme fuzzy pravidiel (*AK-POTOM pravidlá*) [3].

Využitie fuzzy riadenia je vhodné práve vtedy, keď použitie konvenčného riadiaceho systému zlyháva a vyžadujú sa časté korigujúce zásahy od operátora alebo tiež vtedy, keď je proces riadený výhradne ručne. Najčastejšie sú to napr. riadenie nelineárnych sústav, koordinácia podsystemov riadenia, koordinácia akčných veličín, zabezpečovacie systémy... [4]

Fuzzy riadenie sa využíva napr. pri riadení parných turbín, na riadenie chemických reaktorov a cementárenských prevádzok. Fuzzy regulátory možno nájsť aj v spotrebnej elektronike, napr. vo fotoaparátoch, mikrovlnných rúrach, práčkach, umývačkách riadu, autopilotoch, parkovacích senzoch atď. [5]. Fuzzy regulátor je veľmi vhodný ako supervízor, ktorý dohliada na všetky ostatné regulátory a zapája ich vhodným spôsobom do riadenia [6].

Systémy s integračnou činnosťou sa v priemysle vyskytujú pomerne často napr. pri procesoch riadenia hladiny alebo tlaku v uzavretých nádobách, ako aj pri riadení koncentrácie alebo teploty v dobre izolovaných peciach [8].

Cieľom predkladanej diplomovej práce je nájsť vhodné metódy na návrh klasického *PID* regulátora pre systémy s integračnou činnosťou a na základe navrhnutých *PID* regulátorov navrhnúť fuzzy regulátor na riadenie týchto systémov. Riadenie systému

navrhnutým fuzzy regulátorom je simulačne overené a porovnané s riadením systému *PID* regulátormi navrhnutými vybranými *analytickými* a *experimentálnymi* metódami. Výsledky riadenia sú porovnané na základe známych kritérií kvality.

1 Teoretická časť

V teoretickej časti sú popísané systémy s integračnou činnosťou a *PID* regulátory, zhnuté *analytické* a *experimentálne metódy* na nastavovanie parametrov *PID* regulátorov potrebných na riadenie systému s integračnou činnosťou. Ďalej je popísané fuzzy riadenie a jeho návrh a sú vysvetlené „fuzzy“ pojmy.

1.1 Systémy s integračnou činnosťou

Systémy s integračnou činnosťou sa vyznačujú tým, že v menovateľoch ich prenosov je možné vyňať komplexnú premennú s .

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} = b_0 u \quad (1)$$

Prenosové funkcie základných integračných členov majú tvar:

- integračný člen bez zotrvačnosti (*ideálny integračný člen*)

$$G(s) = \frac{K}{s} \quad (2)$$

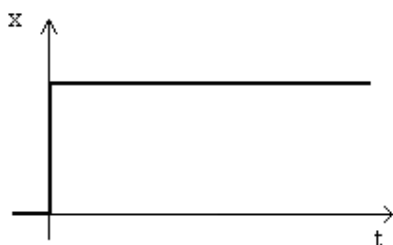
- integračný člen so zotrvačnosťou 1. rádu (*reálny integračný člen*)

$$G(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)} \quad (3)$$

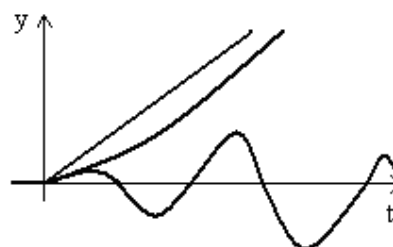
- všeobecný integračný člen q -tého rádu so zotrvačnosťou n -tého rádu

$$G(s) = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{s^q (a_n s^n + \dots + a_{n-1} s + a_1)}, \quad a_1 \neq 0, \quad b_0 \neq 0, \quad q > 0, \quad (4)$$

kde K je zosilnenie prenosu, T je časová konštanta, q je stupeň astatizmu. Astatické systémy majú nulový pól a po skokovej zmene vstupnej veličiny sa výstupná veličina neustále mení, t.j. sama sa neustáli [9,10].



Obr. 1: Skoková zmena vstupnej veličiny



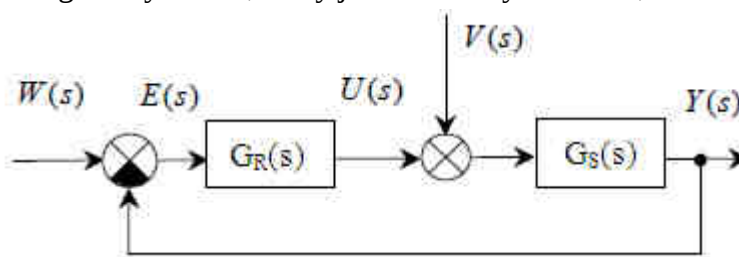
Obr. 2: Výstupná veličina

1.2 Spätnoväzbové riadenie

Parametre technologických (riadených) procesov v praxi sú málokedy známe presne a často sa v priebehu činnosti procesu menia. Ak sa pri riadených procesoch vyskytne porucha, je potrebné ju odstrániť a proces vrátiť do pôvodného stavu. Pomôcť pri tom môže aj výber vhodnej stratégie riadenia a návrh vhodných regulátorov pre daný proces.

V prípade pôsobenia porúch na vstupe do regulovanej sústavy sa používajú regulátory s integračnou zložkou typu *PI* a *PID*. Pridaním integračnej zložky sa odstraňuje trvalá regulačná odchýlka, pretože vstupný signál v integračnej vetve trvá, aj keď vstupný signál už nepôsobí.

Uvažuje sa regulačný obvod, ktorý je znázornený na obr. 3,



Obr. 3: Jednoduchý regulačný obvod

kde $E(s)$ je obraz regulačnej odchýlky, $W(s)$ obraz žiadanej veličiny, $V(s)$ obraz poruchovej veličiny a $Y(s)$ obraz regulovanej veličiny. $G_S(s)$ je prenosová funkcia regulovanej sústavy a $G_R(s)$ je prenosová funkcia regulátora. Predpokladá sa použitie štandardných regulátorov *PI* a *PID* [27].

Na nastavovanie parametrov *PID* regulátorov sú použité rôzne *analytické* a *experimentálne metódy*, podrobnejšie rozpracované na nasledovných stranách.

1.3 PID regulátory

PID regulátory patria medzi najjednoduchšie lineárne regulátory. Sú to spojité konvenčné regulátory realizované ako kombinácia troch základných zložiek: proporčionej *P*, integračnej *I* a derivačnej *D* zložky. V *PID* regulátoroch vystupujú všetky tieto tri zložky a ich vlastnosti v časovej oblasti sú popísané vzťahom

$$u(t) = r_0 e(t) + r_{-1} \int e(\tau) d\tau + r_1 \frac{de(t)}{dt} = Z_R \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (5)$$

kde r_0, r_{-1}, r_1 sú váhy proporčionej, integračnej a derivačnej zložky regulátora, Z_R je zosilnenie, T_I a T_D je integračná a derivačná časová konštanta [11].

Prenosová funkcia ideálneho *PID* regulátora má tvar

$$G_R(s) = P + \frac{I}{s} + Ds = Z_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right). \quad (6)$$

1.4 Nastavovanie parametrov regulátorov

Na nastavovanie parametrov *PID* regulátorov existuje veľa metód. Cieľom je dosiahnutie takých vlastností *URO*, aby boli splnené požiadavky na:

- stabilitu *URO*,
- minimalizáciu vplyvu porúch,
- na presné a rýchle sledovanie žiadanej veličiny riadenou veličinou,
- minimálnu citlivosť *URO* na zmeny parametrov regulovaného systému.

Pre výpočet parametrov *PID* regulátora obyčajne stačia parametre prechodovej funkcie riadeného systému a to zosilnenie K , časová konštanta T , dopravné oneskorenie T_d , prípadne rád systému n , resp. doba nábehu T_N a doba prietahu T_U .

Pri návrhu treba brať do úvahy aj iné požiadavky, napr. kompromis medzi požiadavkou na rýchlu reguláciu, kvalitou regulačného procesu a maximálnym preregulovaním. Relatívne jednoduché *PID* regulátory vo väčšine prípadov zvládajú dobre všetky tieto situácie. *PID* regulátory sú bezkonkurenčne najpoužívannejšie regulátory v priemysle [12].

1.5 Kritériá kvality riadenia

Na kvantifikáciu čo možno najrýchlejšieho a najpresnejšieho dosiahnutia žiadanej veličiny $w(t)$ regulovanou veličinou $y(t)$ sa používajú kritériá kvality riadenia.

Kritériá kvality regulácie v časovej oblasti vypovedajú o rýchlosti regulácie.

1. čas regulácie t_{REG} je čas, za ktorý dosiahne výstupná veličina $y(t)$ okolie δ žiadanej hodnoty $w(t)$ a regulačná odchýlka nebude väčšia ako stanovená hodnota [13].

$$|y(t) - y(\infty)| \leq \delta, \quad t_{REG} < t \quad (7)$$

2. maximálne preregulovanie σ_{MAX} udáva v percentách % normovanú veľkosť maximálnej odchýlky výstupnej veličiny od jej ustálenej hodnoty. Pre aperiodické deje bez prekmitu platí $\sigma_{MAX} = 0$. Vo väčšine prípadov sa však odporúča hodnota prekmitu menšia ako 25% [22].

$$\sigma_{MAX} = \frac{y_{MAX} - y_{\infty}}{y_{\infty} - y_0} \cdot 100 \quad (8)$$

Integrálne kritériá vyjadrujú kvalitu regulácie na základe priebehu regulácie počas celej doby jej trvania.

3. *ISE* (Integral square-error) - kvadratická regulačná plocha; druhá mocnina plochy medzi reálnym a ideálnym priebehom *PCH* [29].

$$I_{SE} = \int_0^T e(t)^2 dt \quad (9)$$

4. *IAE* (Integral absolute-error) - absolútna regulačná plocha; plocha medzi reálnym a ideálnym priebehom *PCH* [29].

$$I_{AE} = \int_0^T |e(t)| dt \quad (10)$$

1.6 Fuzzy logika

Svet okolo nás je plný nejasne ohraničených pojmov, vlastností, s ktorými sa denne stretávame (vysoký človek, dosť blízko, slabo zelené, mierne pootočený), a ktoré sa nedajú popísať striktnie matematicky. Fuzzy logika však tieto pojmy popísať dokáže.

V klasickej logike sa pracuje s výrokmi, ktorými sú len také tvrdenia, ktoré sú buď pravdivé alebo nepravdivé - v binárnom vyjadrení buď ako 1 alebo 0.

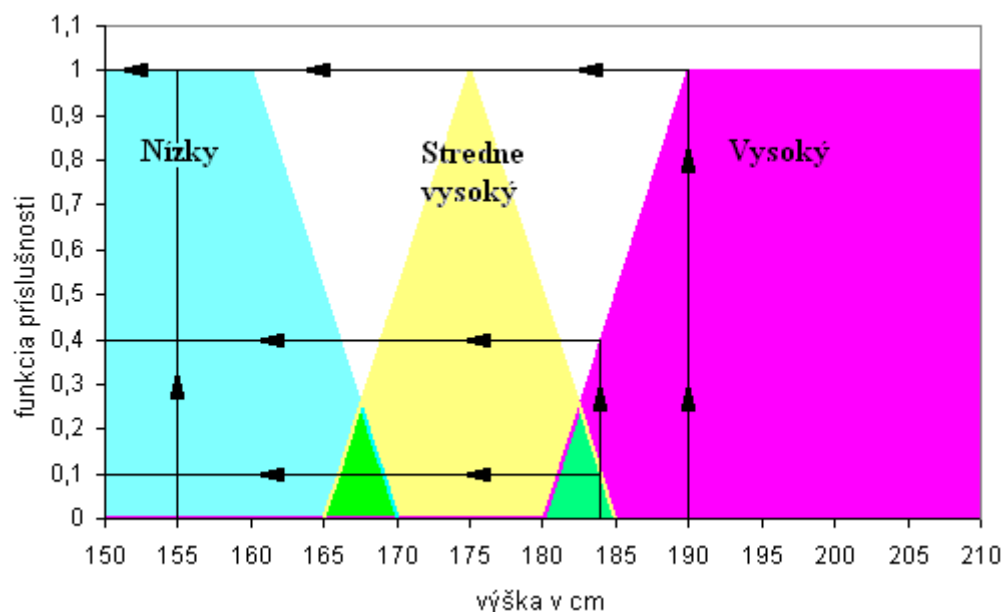
Fuzzy logika je odbor matematiky odvodený z teórie fuzzy množín FM, v ktorom sa logické výroky ohodnocujú stupňom príslušnosti (tiež index vágnosti), ktorého hodnoty sú v intervale od 0 do 1. Fuzzy logika je vhodnejšia pre množstvo reálnych rozhodovacích úloh. Funkcia príslušnosti vo fuzzy logike umožňuje 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 „veľá“. Presnejšie, umožňuje vyjadriť čiastočnú príslušnosť k množine.

Prvá práca o fuzzy množinách bola publikovaná v roku 1965 prof. Lotfím Zadehom z Kalifornskej univerzity v Berkeley.

Zavedenie fuzzy množín na charakterizáciu vágnych pojmov a ďalšie prostriedky fuzzy matematiky umožnili získať výsledky, ktoré sú v zhode s realitou [15, 30].

1.7 Fuzzy množiny

Pod pojmom fuzzy množiny sa zvyčajne rozumie matematický aparát, ktorý definuje samotný pojem fuzzy množiny a operácie, ktoré možno s fuzzy množinami robiť. Formálne sú fuzzy množiny zovšeobecnením klasických množín. Hranice medzi týmito množinami nie sú ostré. 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. Náizorne to možno vidieť na obrázku s výškami (obr. 4).



Obr. 4: Závislosť výšky od funkcie príslušnosti

Majme jeden pojem (tzv. lingvistickú premennú) výšku človeka v intervale $<150,210>cm$, ktorú chceme popísať tromi kvalitatívnymi pojmami (tzv. lingvistickými hodnotami): nízky, stredne vysoký, vysoký. Chceme teda prvok z množiny výšky zaradiť do troch množín.

Každá z týchto množín je definovaná svojou funkciou príslušnosti (mierou členstva v množine) tak, ako je znázornené na obr. 4. Pre osobu výšky $184cm$ môžeme vidieť, že jej príslušnosť do množiny stredne vysoký je 0.1 a príslušnosť do množiny vysoký je 0.4 . A pre výšky $155cm$ a $190cm$ môžeme vidieť, že ich príslušnosť do množiny nízky a vysoký je 1 .

Prvok x v klasickej teórii množín do množiny buď patrí, alebo nepatrí, pretože jeho charakteristická funkcia nadobúda hodnotu 1 alebo 0 . Hovoríme potom o ostrých množinách. Pokiaľ charakteristická funkcia charakterizuje stupeň, s akým prvok do množiny patrí, potom tieto množiny označujeme ako množiny neostré - fuzzy množiny [31, 32].

1.8 Fuzzy pravidlá

Forma fuzzy pravidiel vyjadruje spôsob ľudského uvažovania alebo formy popisu, ktorý je do veľkej miery založený na implikačnom tvare vo forme *AK-POTOM pravidiel*, na základe ktorých pri znalosti východzieho stavu popísaného fuzzy množinami dedukujeme následky z nich vyplývajúce.

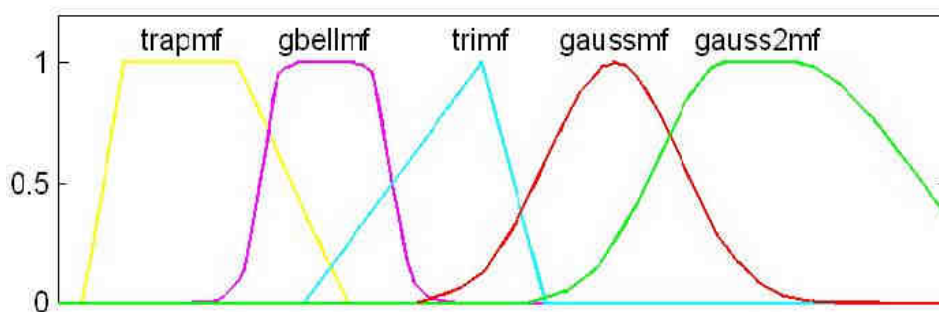
Fuzzy pravidlo možno vyjadriť nasledovne: *AK* X je A , *POTOM* Y je B , kde X a Y sú lingvistické premenné a A a B sú lingvistické hodnoty určené fuzzy množinami. Klasické pravidlo *AK-POTOM* používa binárnu (Booleovskú) logiku.

V uvedenom príklade: *AK* výška človeka je viac ako $180cm$, *POTOM* človek je vysoký. *AK* výška človeka je menej ako $180cm$, *POTOM* človek je nízky (obr. 4).

Fuzzy pravidlá sa vzťahujú na fuzzy množiny. Vo fuzzy systémoch je predpoklad pravidla pravdivý v určitej miere a následok je tiež pravdivý v rovnakej (určitej) miere [33].

1.9 Funkcie príslušnosti

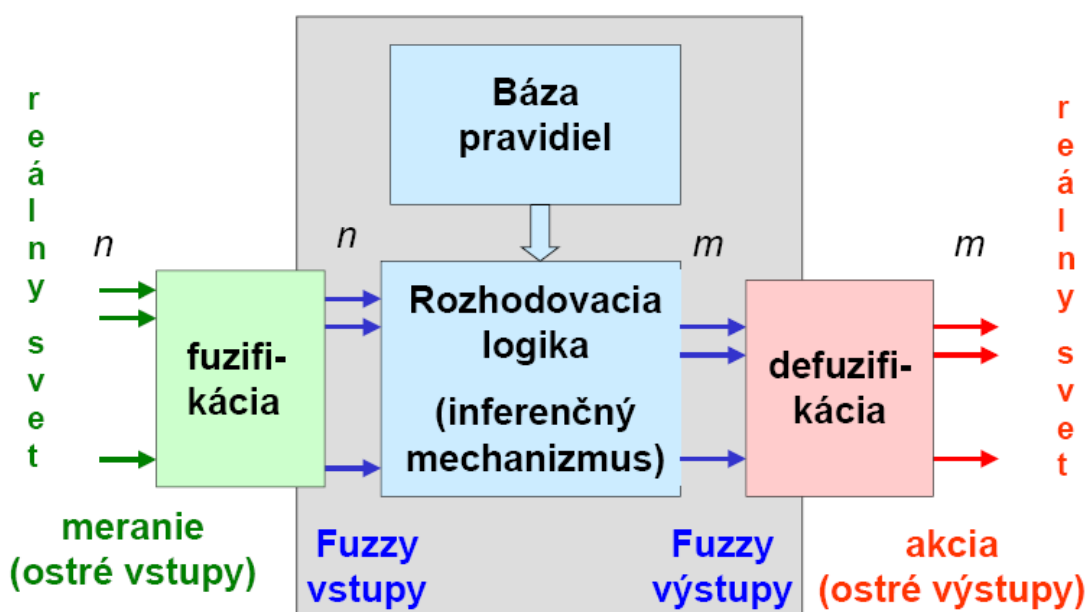
Funkcia príslušnosti je funkcia, ktorá premení hodnoty vstupného signálu na hodnoty logických premenných. Funkcia príslušnosti charakterizuje stupeň, s ktorým daný prvok do príslušnej množiny patrí. Tvar funkcie príslušnosti sa pokiaľ možno používa čo najjednoduchší [20].



Obr. 5: Typy funkcií príslušnosti v Matlabe

1.10 Fuzzy systém

Fuzzy systém slúži na interpretáciu a spracovanie lingvisticky formulovaných znalostí, ktoré sú obsiahnuté v báze pravidiel. Samotná činnosť fuzzy systému je založená na odvodzovacích pravidlách AK-POTOM, podobne ako je tomu v expertných systémoch. Výhodou takejto reprezentácie vedomostí je prehľadnosť a ľahká „čitateľnosť“ človekom [34].



Obr. 6: Štruktúra fuzzy systému

1.11 Anfis

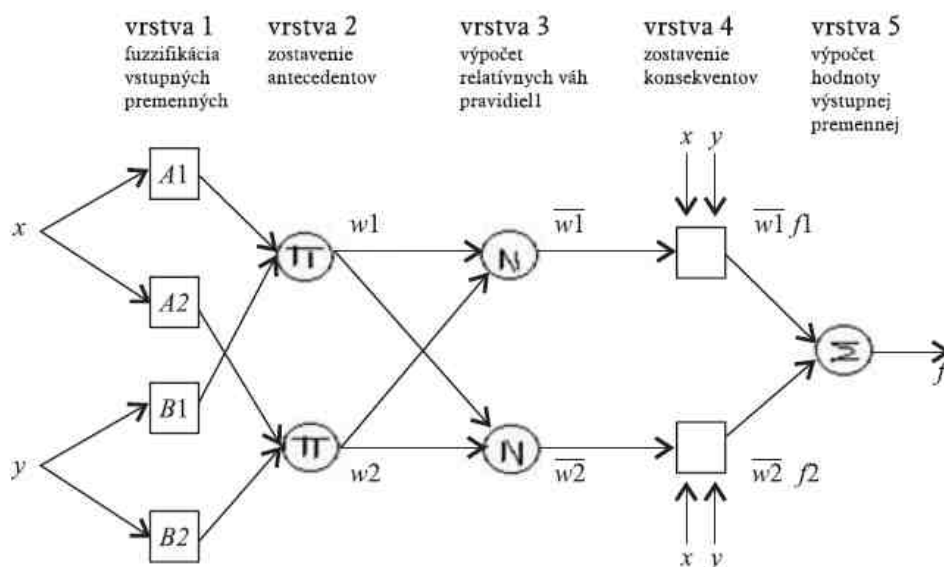
Anfis je vnútorne reprezentovaný ako päťvrstvová dopredná neurónová sieť (obr. 7), ktorej výsledkom je fuzzy inferenčný systém typu Takagi-Sugeno a ktorej učenie je založené na minimalizácii odchýlok metódou najmenších štvorcov a zodpovedá úprave tzv. premisných a konsekventných parametrov. Tieto parametre nie sú uložené vo váhach spomínanej neurónovej siete, ale v jej uzloch – preto je tu správne hovoriť o adaptívnej, nie neurónovej sieti (jednou zo základných vlastností neurónových sietí je, že informácie sa ukladajú do medzineurónových spojení, tzv. synaptických váh). Na tréning siete používa *Anfis* hybridnú učiacu metódu [35].

Podstatou metódy *Anfis* je neuro-adaptívny proces učenia, na základe ktorého možno odvodiť parametre funkcií príslušnosti a extrahovať bázu pravidiel [23].

Anfis využíva schopnosť hybridného určenia algoritmov k identifikácii parametrov funkcií príslušnosti jednoduchého výstupu, ako je Sugenov typ fuzzy systémov.

Postup výpočtu metódou *Anfis* v *Matlab*e

1. Inicializácia fuzzy systému: príkazy *genfis1* alebo *genfis2*.
2. Zadanie parametrov potrebných na učenie: počet iterácií (epochy), tolerancia (chyba).
3. Začiatok procesu učenia: príkaz *Anfis*; pri dosiahnutí zadanej tolerancie sa výpočet končí.
4. Overenie správnosti výpočtu s nezávislými údajmi.



Obr. 7: Architektúra siete *Anfis*

1.12 Metóda subtraktívneho zhlukovania

Pri inicializácii fuzzy systému príkazom *genfis2* sa používa metóda subtraktívneho zhlukovania. Analýzy pomocou zhlukovania sú metódy pre zgrupovanie dát a objavovanie štruktúr v dátach. Najpoužívanejšou aplikáciou zhlukovacích metód je del'ba dátových množín na zhluky alebo triedy, kde sú podobné dáta priradené do spoločného zhluku. Tieto

metódy teda hľadajú v nameraných vstupno-výstupných údajoch množiny navzájom blízkyh dát a zoskupujú podobné objekty do zhlukov (clustrov) [18].

Jednou z metód zhlukovania, ktorá sa v tejto práci používala na získanie vhodného fuzzy regulátora je metóda subtraktívnej zhlukovej analýzy (subtraktívny clustering).

Subtraktívne zhlukovanie poskytuje zásadnú výhodu automatického určenia počtu zhlukov, čo znamená možnosť automatického generovania fuzzy modelu pri poskytnutí iba vstupno-výstupných údajov, bez nutnosti explicitného zadávania počtu hľadaných zhlukov. Táto metóda hľadá vo vstupno-výstupných údajoch zhluky navzájom podobných údajov, pričom každý zhluk predstavuje samostatný lokálny model fuzzy systému. Výhodou subtraktívneho zhlukovania oproti mnohým iným metódam zhlučovacích analýz a samo organizujúcich sa máp je optimálny počet nájdených zhlukov a automatické určenie ich počtu. Mnohé iné zhlučovacie metódy vyžadujú vopred dané zadanie počtu zhlukov a ďalej hľadajú iba ich umiestnenie. Subtraktívne zhlukovanie ich optimálny počet určí sám.

Kľúčovým pojmom v tejto metóde je tzv. miera hustoty každého bodu vo vstupno-výstupných údajoch. Okolo každého bodu sa kvantitatívne vyjadrí hustota, s akou sú okolo neho rozložené okolité body. Bod s najväčšou hustotou predstavuje súradnicu prvého zhuku, čiže prvé nájdené fuzzy pravidlo.

$$D_k = \sum_{j=1}^N \exp\left(-\frac{\|u_k - u_j\|}{\left(\frac{r_a}{2}\right)^2}\right) \quad (11)$$

Parameter r_a je kladné číslo určujúce polomer oblasti, v ktorej sa má rátať miera hustoty okolo daného bodu. Symbol u_k predstavuje súradnice počítaného bodu a u_j súradnice okolitého bodu v počítanej oblasti. Pri hľadaní ďalších zhlukov sa miery hustôt ďalších bodov „oslabujú“ o hustotu už nájdených zhlukov:

$$D_k^* = D_k - \sum_{i=1}^K D_{ci} \exp\left(-\frac{\|u_k - u_{ci}\|}{\left(\frac{r_b}{2}\right)^2}\right), \quad (12)$$

kde K je počet dosiaľ nájdených zhlukov, D_{ci} je miera hustoty i zhuku a u_{ci} sú súradnice i zhuku. Číslo r_b je kladné číslo určujúce polomer oblasti, v ktorej má dôjsť k redukcii miery hustoty v okolí i zhuku. Obyčajne sa hodnota r_b volí väčšia ako hodnota r_a , aby sa predišlo vygenerovaniu zhlukov blízko pri sebe, platí, $r_b = k \cdot r_a$, $k \geq 1.5$.

Výsledkom je optimálny počet automaticky nájdených zhlukov a tým aj automatické vytvorenie optimálneho fuzzy modelu bez potreby ďalšieho ladenia modelu gradientovými metódami. Schopnosť automaticky určiť optimálny počet zhlukov robí zo subtraktívneho zhlukovania účinný nástroj, ako z poskytnutia iba experimentálnych údajov systému vytvoriť bez dodania ďalších údajov fuzzy model [19].

1.13 Fuzzy riadenie

Základná idea fuzzy riadenia, ktorej autormi sú *prof. Lotfi A. Zadeh* a *prof. Ebrahim H. Mamdani* (obr. 8), je nasledovná: podľa klasickej teórie možno regulovaný proces úspešne regulovať, ak poznáme jeho matematický opis.



Obr. 8: *Prof. Lotfi A. Zadeh* a *prof. Ebrahim H. Mamdani*

Pri reálnych procesoch však býva často veľmi ťažké nájsť ich matematický opis, napr. nie je možné vykonať dostatočný počet meraní, merania sú príliš drahé alebo zdĺhavé, prípadne sú nepresné alebo z iných dôvodov nedávajú uspokojivé výsledky. Tiež sa môže stať, že výsledný popis je natolko zložitý, že je takmer nemožné navrhnúť pre neho klasický regulátor. Potom sa prijímajú rôzne zjednodušenia a daná regulácia tak nemusí byť uspokojivá.

V praxi takéto procesy spravidla reguluje operátor, ktorý už zo svojich skúseností vie, ako proces regulovať bez toho, aby k tomu potreboval poznať jeho matematický opis. V takejto situácii sa ponúka použitie fuzzy regulátora. Ak je operátor schopný pri riadení procesu opísať priebeh svojej činnosti (to je schopný vždy), potom fuzzy regulácia má prostriedky, ako na základe takéhoto opisu reguláciu uskutočniť.

Ak sa po operátorovi, ktorý obsluhuje regulovaný proces požaduje, aby svoju činnosť popísal, vždy na to použije prirodzený jazyk. Avšak typickou charakteristikou prirodzeného jazyka, ktorú nemôžeme nijakým spôsobom obísť, je vágnosť jeho sémantiky. Preto nemožno operátorov popis previesť priamo do matematických formúl, lebo takto by bol výsledok pravdepodobne neuspokojivý.

Návod na riešenie tejto situácie ponúka fuzzy logika, ktorá umožňuje modelovať význam slov prirodzeného jazyka.

S počítačom sa momentálne nedá komunikovať v prirodzenom jazyku a preto sú potrebné určité zjednodušenia - použitie *pravidiel AK-POTOM*, ktorými sa popisuje výstup systému pri určitých hodnotách vstupov [14].

1.13.1 Fuzzy regulátor

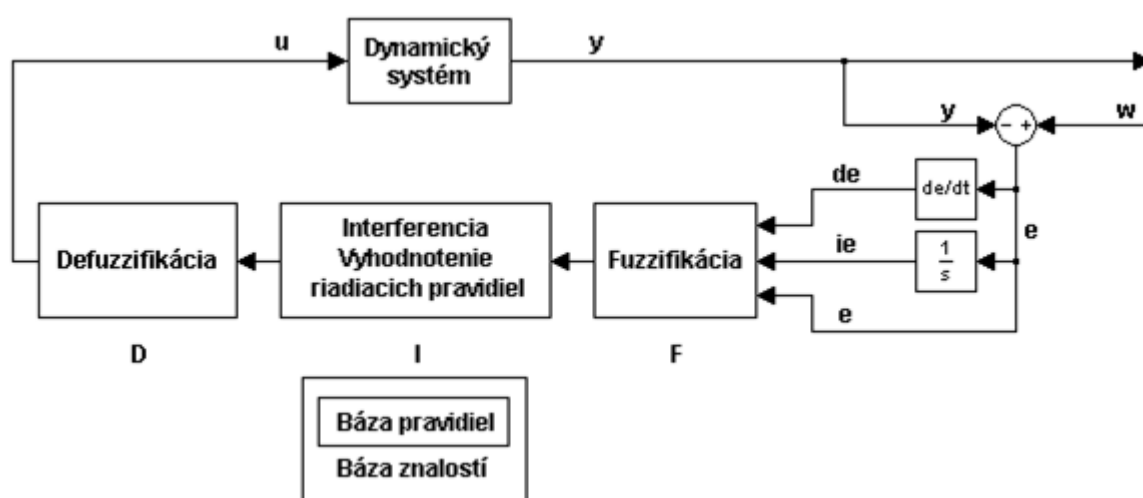
Úspešnou aplikáciou teórie fuzzy množín je koncept fuzzy regulátora (FR). Bol navrhnutý v roku 1973 *prof. E. H. Mamdanim*, podľa ktorého je aj pomenovaný jeden druh fuzzy regulátorov. Rozvoj FR bol zaznamenaný až v 80. rokoch, najmä v Japonsku [13].

FR je riadiaci algoritmus, ktorý realizuje činnosť popísanú pomocou prirodzeného jazyka a napodobňuje správanie operátora. Je to vlastne statická nelineárna funkcia definovaná množinou pravidiel a zodpovedajúcimi funkciami príslušnosti [4].

Riadením FR sa dosahujú „dobré“ výsledky a ponúkajú sa riešenia v situáciách, keď izolované klasické regulátory zlyhávajú alebo sa stávajú nestabilnými. Výhodou FR je ich relatívna jednoduchosť a rýchlosť ich návrhu a preto sú FR vhodné okrem iného aj vtedy, ak je regulovaný proces veľmi zložitý. Zložitosť pri ich navrhovaní je prakticky rovnaká bez ohľadu na zložitosť procesu, ktorý sa má regulovať.

Podobne ako v klasickej regulačnej technike aj vo fuzzy riadení môžu byť FR typu: P , PI , PD a PID [14].

Práca FR sa skladá z niekoľkých krokov, jeho štruktúra je na obr. 9 a jeho ústredný člen tvoria tri základné bloky: fuzzifikácia F , inferencia I a defuzzifikácia D .



Obr. 9: Štruktúra fuzzy regulátora

V bloku fuzzifikácia sa prevádzajú ostré dáta (vstupné veličiny), ktoré sú namerané alebo zadané, na fuzzy dáta. Báza pravidiel obsahuje všetky fuzzy pravidlá, ktoré popisujú správanie fuzzy regulátora. V bloku inferencia, ktorý tvorí ústrednú časť regulátora, sa realizuje inferenčný mechanizmus z rozhodovacích pravidiel, pomocou ktorého sa získavajú zo vstupných fuzzy množín výstupné množiny. Blok defuzzifikácia umožňuje priradiť výstupnej fuzzy množine určitú ostrú (reálnu) výstupnú veličinu. Výsledok defuzzifikácie je výstup pre fuzzy regulátor [13, 16].

Sú známe dva základné typy fuzzy regulátorov:

- fuzzy regulátor Sugenovho typu
 - fuzzy pravidlo je v tvare: $AK \ x \text{ je } A \text{ a } y \text{ je } B \text{ POTOM } z=f(x,y)$
- fuzzy regulátor typu Mamdani
 - fuzzy pravidlo je v tvare: $AK \ x \text{ je } A \text{ a } y \text{ je } B \text{ POTOM } z \text{ je } C$ [17]

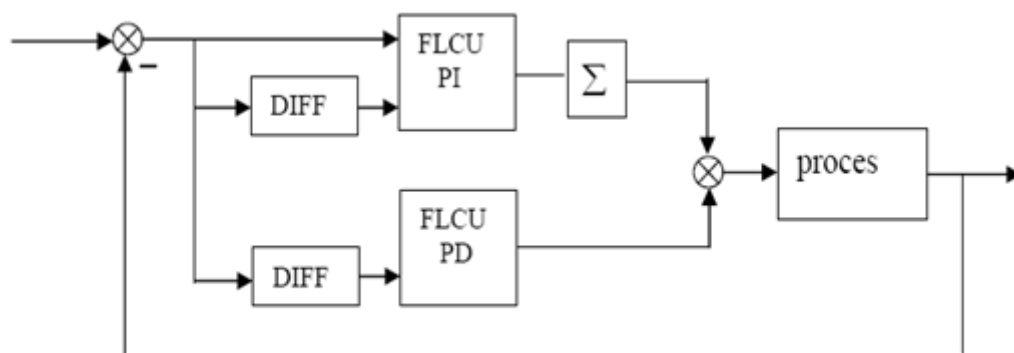
1.14 Návrh fuzzy regulátorov na základe PID regulátora

Keďže pre návrh *PID* regulátorov je vypracované veľké množstvo metód, ktoré sú dostupné a dostatočne známe, je možné aj fuzzy regulátor navrhnuť na základe *PID* regulátora:

Návrh sa dá rozdeliť do troch krokov:

- štart ako *PID* regulátor,
- vytvorenie ekvivalentného lineárneho fuzzy regulátora,
- vytvorenie nelineárneho fuzzy regulátora.

Fuzzy metódy sú vhodné pri riešení problémov riadiacich stratégií v moderných priemyselných procesoch. Fuzzy regulátory môžu byť použité v rôznom zapojení. Časté je zapojenie, keď fuzzy regulátor nahrádza klasický *PID* regulátor v uzavretom obvode riadenia. Z jednoduchého fuzzy regulátora sa dá vhodným spájaním zostaviť zložitejší. Na obr. 10 je naznačený spôsob vytvorenia fuzzy *PID* regulátora. V skutočnosti sú realizované dva paralelné regulátory *PI* a *PD*. Táto štruktúra má oproti zapojeniu s 3 vstupmi výhodu v počte pravidiel.



Obr. 10: Fuzzy *PID* regulátor

Výstup číslicového *PI* regulátora v prírastkovom tvare, ktorý odstraňuje trvalú regulačnú odchýlku možno vyjadriť takto:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k), \quad (13)$$

$$\Delta u(k) = q_0 e(k) + q_1 e(k-1). \quad (14)$$

Výstup číslicového *PD* regulátora, ktorý neodstraňuje trvalú regulačnú odchýlku, možno vyjadriť takto [16, 36]:

$$u(k) = K_p e(k) + K_D \Delta e(k) \quad (15)$$

Na porovnanie jednoduchého fuzzy regulátora s *PI* alebo *PD* regulátorom je vstupom týchto regulátorov $e(k)$ a $\Delta e(k)$. Výstup je nelineárna funkcia, ktorá závisí na fuzzyfikácii, inferencii a defuzzyfikácii. Pre fuzzy regulátor typu *PI* platí:

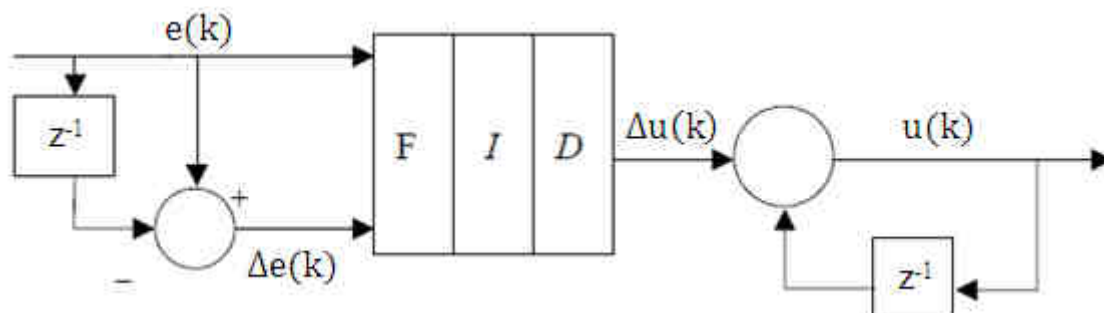
$$\Delta u(k) = F_{PI}(e(k), \Delta e(k)), \quad (16)$$

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k). \quad (17)$$

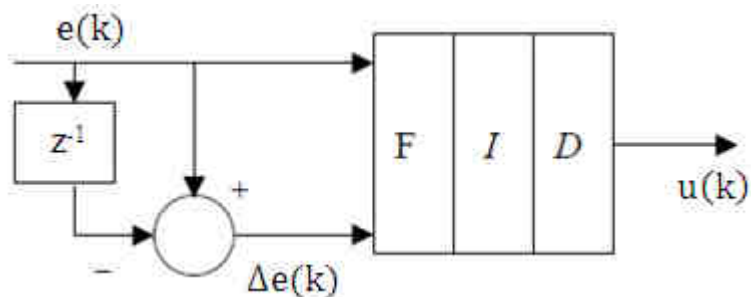
Fuzzy regulátor typu *PD* vznikne ako nelineárna funkcia v tvare

$$u(k) = F_{PD}(e(k), \Delta e(k)). \quad (18)$$

Štruktúra fuzzy regulátorov typu *PI* a *PD* je na obr. 11 a obr. 12.



Obr. 11: Štruktúra jednoduchého fuzzy regulátora typu *PI*



Obr. 12: Štruktúra jednoduchého fuzzy regulátora typu *PD*

2 Experimentálna časť

2.1 Metódy nastavovania parametrov PID regulátora

Na nastavovanie parametrov regulátorov sa používa veľké množstvo metód, ktoré pracujú buď s prenosovou funkciou riadeného procesu - *analytické metódy* alebo s nameranými charakteristikami (*PCH*, kritické zosilnenie atď.) - *experimentálne metódy* [22].

Vzhľadom na veľké množstvo metód na nastavovanie parametrov *PID* regulátorov boli v tejto práci použité iba niektoré metódy:

■ *analytické metódy syntézy PID regulátora*

- *metóda násobného dominantného pólu (MNDP)*
- *metóda násobného dominantného pólu (MNDP) v konfigurácii 2DoF*
- *metóda optimálneho modulu (MOM)*
- *Naslinova metóda*
- *metóda požadovaného modelu (MPM)*

■ *experimentálne metódy syntézy PID regulátora*

- *Strejcova metóda*
- *Lopezova IAE – ISE metóda*
- *Chienova – Hronesova – Reswickova metóda*

Porucha sa nevyskytovala v rovnakom čase, ale v závislosti od toho, ako sa ustálil systém pri použití daného *experimentálneho* alebo *analytického* regulátora.

2.1.1 Metóda násobného dominantného pólu (MNDP)

Metóda násobného dominantného pólu je jednoduchá *analytická metóda*, ktorá umožňuje nastaviť regulátory s integračnou zložkou (*PI*, *PID*) pre proporcionálne regulované sústavy s prenosom

$$G_S(s) = \frac{K}{(Ts+I)^i} \quad (19)$$

a regulátory bez integračnej zložky (*P*, *PD*) pre integračné regulované sústavy (sústavy s astatizmom) s prenosom

$$G_S(s) = \frac{K}{s(Ts+I)^i}, \quad (20)$$

na nekaitavý regulačný pochod. Zvolený regulátor sa nastaví tak, aby bol zaistený jeden dominantný reálny pól (stabilný) s maximálnou možnou násobnosťou. O ostatných póloch

sa predpokladá, že ich vplyv na výslednú dynamiku regulačného obvodu možno zanedbať [24].

V práci bola uvažovaná integračná regulovaná sústava so zotrvačnosťou prvého rádu bez dopravného oneskorenia (21)

$$G_S(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)} = \frac{1}{s(3,5s + 1)} \quad (21)$$

a štandardný *PID* regulátor (22)

$$G_R(s) = Z_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) = r_0 \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) = \frac{r_0 s + r_I + r_D s^2}{s}, \quad (22)$$

pričom

$$T_I = \frac{r_0}{r_I}, \quad T_D = \frac{r_D}{r_0}. \quad (23)$$

Metóda násobného dominantného pólu predpokladá existenciu stabilného reálneho dominantného pólu s násobnosťou o 1 väčšou ako je počet nastaviteľných parametrov zvoleného regulátora. Násobný dominantný pól a hodnoty nastaviteľných parametrov regulátora sa získajú riešením sústavy rovníc,

$$\frac{d^n N(s)}{d s^n} = 0, \quad n = 0, 1, \dots, p \quad (24)$$

kde $N(s)$ je charakteristický mnohočlen regulačného obvodu so sústavou (21) a zvoleným regulátorom (22). Pre sústavu (21) a *PID* regulátor (22) vznikne sústava rovníc (25).

$$N(s) = Ts^3 + (1 + Kr_D)s^2 + Kr_0s + Kr_I$$

$$\frac{d N(s)}{d s} = 3Ts^2 + 2(1 + Kr_D)s + Kr_0 \quad (25)$$

$$\frac{d^2 N(s)}{d s^2} = 6Ts + 2(1 + Kr_D)$$

Riešením sústavy rovníc (25) sa vypočítajú póly a váhy (26) .

$$\left. \begin{aligned} N(s) &= 0 \\ \frac{d N(s)}{d s} &= 0 \\ \frac{d^2 N(s)}{d s^2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad s_3 = -\frac{1 + Kr_D}{3T}, \quad r_0 = \frac{(1 + Kr_D)^2}{3KT}, \quad r_I = \frac{(1 + Kr_D)^3}{27KT^2} \quad (26)$$

Pretože sú k dispozícii len 3 rovnice, trojnásobný dominantný pól s_3 aj váhy r_0 a r_I závisia na váhe r_D . Preto je ďalej uvažovaný pomer (27)

$$\frac{T_D}{T_I} = \alpha = \frac{r_D r_I}{r_0^2} \geq 0, \quad (27)$$

z ktorého vyplýva vzťah (28)

$$r_D = \alpha \frac{r_0^2}{r_I}. \quad (28)$$

Výsledkom dosadenia vzťahov z (26) do (28) je vzťah (29)

$$r_D = \frac{3\alpha}{(1-3\alpha)K}, \quad 0 \leq \alpha \leq \frac{1}{3}. \quad (29)$$

Teraz je možno trojnásobný dominantný pól a váhy vyjadriť v závislosti pomeru

$$s_3^* = -\frac{3\alpha}{3T(1-3\alpha)}, \quad 0 \leq \alpha \leq \frac{1}{3}, \quad (30)$$

$$r_0^* = k_p^* = \frac{1}{3TK(1-3\alpha)^2}, \quad (31)$$

$$r_I^* = \frac{1}{27KT^2(1-3\alpha)^3} = \frac{Z_R}{T_I}, \quad (32)$$

$$r_D^* = \frac{3\alpha}{K(1-3\alpha)} = Z_R T_D, \quad (33)$$

resp. po uvažovaní vzťahov (23)

$$T_I^* = 9T(1-3\alpha), \quad (34)$$

$$T_D^* = 9\alpha T(1-3\alpha). \quad (35)$$

Pre $\alpha=0$ je výsledkom *PI* regulátor (22, ak $r_D=0$). Prenosová funkcia riadenia pre regulovanú sústavu (21), regulátor *PID* (22) a hodnoty nastaviteľných parametrov (31), (34) a (35) má tvar

$$\begin{aligned} G_{YW}(s) &= \frac{Y}{W} = \frac{G_S(s)G_R(s)}{1 + G_S(s)G_R(s)} = \\ &= \frac{\left[\frac{9}{2}T(1-3\alpha)(1+\sqrt{1-4\alpha})s + 1 \right]}{[3T(1-3\alpha)s + 1]^3} \left[\frac{9}{2}T(1-3\alpha)(1-\sqrt{1-4\alpha})s + 1 \right]. \end{aligned} \quad (36)$$

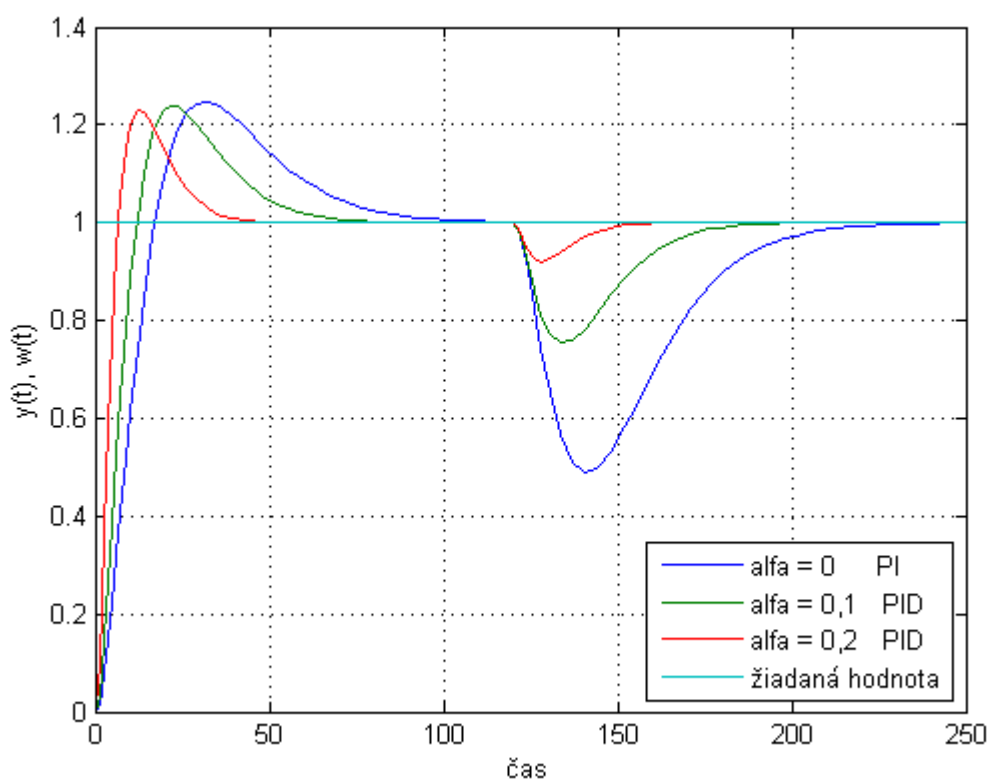
Prenosová funkcia poruchy má tvar

$$G_{VY}(s) = \frac{Y}{V} = \frac{G_S(s)}{1 + G_S(s)G_R(s)} = \frac{27KT^2(1-3\alpha)^3s}{[3T(1-3\alpha)s+1]^3} \quad (37)$$

Vzťahy (36) a (37) ako aj vzťahy (31) - (35) platia pre PI regulátor, pre $\alpha=0$.

Zo zadaného systému (21) boli na základe rovníc (31), (34), (35) vypočítané konštanty *PID* regulátora pričom sa volil parameter α [25].

Pre minimalizáciu (odstránenie) prekmitu (preregulovania) bola *MNDP* rozšírená o filter vstupných údajov.



Obr. 13: Riadenie regulátormi navrhnutými *MNDP*

TRO pri riadení *PI* aj *PID* regulátormi navrhnutými *MNDP* bola nulová. Navrhnuté regulátory odstraňovali poruchy.

2.1.1.1 Metóda násobného dominantného pólu (*MNDP*) v konfigurácii 2DoF

Nastavenie regulátorov *PI* a *PID* pre integračne regulované sústavy s prenosom (21) patrí medzi náročnejšie úlohy. Je to spôsobené existenciou dvoch integrátorov v regulačnej slučke a teda veľkou náchylnosťou k značným prekonom, príp. ku kmitavosti a strate stability. Na druhej strane použitie regulátorov s integračnou zložkou umožňuje

odstrániť trvalú regulačnú odchýlku spôsobenú skokovou zmenou poruchy pôsobiacej v regulovanej sústave.

V prípade regulovaných sústav s proporcionálnym charakterom, sa regulátory najčastejšie nastavujú z hľadiska žiadanej veličiny tak, aby kompromisne zaistovali aj dobré potlačenie porúch. Pokiaľ regulované sústavy majú integračný charakter, kompromisné nastavenie často nezaručuje požadovanú kvalitu regulačného procesu z oboch hľadísk. Ako vhodné riešenie sa javí použitie regulátorov s dvoma stupňami voľnosti.

Komerčný regulátor typu *PID* s dvoma stupňami voľnosti v oblasti komplexnej premennej je opísaný vzťahom

$$U(s) = r_0 \left\{ bW(s) - Y(s) + \frac{1}{T_I s} E(s) + T_D s [cW(s) - Y(s)] \right\}, \quad (38)$$

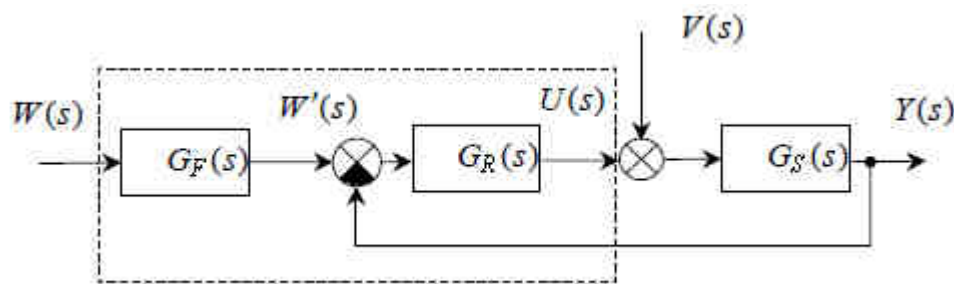
kde $U(s)$ je obraz akčnej veličiny $u(t)$, $W(s)$ je obraz žiadanej veličiny $w(t)$, $Y(s)$ je obraz regulovanej veličiny $y(t)$, r_0 je zosilnenie regulátora, T_I je integračná časová konštanta regulátora, T_D derivačná časová konštanta regulátora, b je váha žiadanej veličiny $w(t)$ pri proporcionálnej zložke, c je váha žiadanej veličiny $w(t)$ pri derivačnej zložke. Obe váhy sa môžu meniť v rozmedzí 0 až 1 [25, 27].

Regulačný obvod s dvoma stupňami voľnosti môže byť transformovaný do schémy (obr. 14) so vstupným filtrom v žiadanej veličine s prenosom

$$G_F(s) = \frac{W'(s)}{W(s)} = \frac{cT_I T_D s^2 + bT_I s + 1}{T_I T_D s^2 + T_I s + 1} \quad (39)$$

a štandardným *PID* regulátorom s prenosom

$$G_R(s) = Z_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) = r_0 \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) = \frac{r_0 s + r_I + r_D s^2}{s}. \quad (40)$$



Obr. 14: Regulačný obvod s 2DoF regulátorom

Pre $T_D=0$ zo vzťahu (38) sa získa regulátor typu *PI* s dvoma stupňami voľnosti a v blokovej schéme na obr. 14 mu zodpovedá vstupný filter

$$G_F(s) = \frac{W'(s)}{W(s)} = \frac{bT_I s + 1}{T_I s + 1} \quad (41)$$

a štandardný *PI* regulátor s prenosom

$$G_R(s) = Z_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) = r_0 \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right) = r_0 + \frac{r_I}{s} = \frac{r_0 s + r_I}{s}. \quad (42)$$

Ak $b=c=1$, z (38) sa získa štandardný *PID* regulátor (40), resp. pre $T_D=0$ štandardný *PI* regulátor (42) [28].

Pri použití regulátora *PID* môžu byť dva póly kompenzované dvoma nulami vstupného filtra vhodnou voľbou váh b a c . Tieto váhy sa dajú získať porovnávaním koeficientov pri rovnakých mocninách komplexnej premennej s , tj.

$$\left(\frac{1}{|s_3^*|} s + 1 \right)^2 = [3T(1 - 3\alpha)s + 1]^2 = cT_I^* T_D^* s^2 + bT_I^* s + 1. \quad (43)$$

Po dosadení hodnôt nastaviteľných parametrov *PID* (34) a (35) do vzťahu (43) sa ľahko určia hľadané váhy

$$b = \frac{2}{3}, \quad c = \frac{1}{9\alpha}. \quad (44)$$

Pretože $0 \leq c \leq 1$, praktické hodnoty váhy α pre *PID* regulátor s dvoma stupňami voľnosti sú:

$$\frac{1}{9} \leq \alpha \leq \frac{1}{4} \quad (45)$$

Podobne pri použití *PI* regulátora môže byť jeden pól kompenzovaný nulou vstupného filtra vhodnou voľbou váhy b , ktorá sa dá ľahko získať porovnaním koeficientov pri komplexnej premennej s , tj.

$$\frac{1}{|s_3^*|} s + 1 = 3Ts + 1 = bT_I^* s + 1. \quad (46)$$

Po dosadení hodnoty integračnej časovej konštanty (34) pre *PI* regulátor do (46) sa získa hľadaná váha

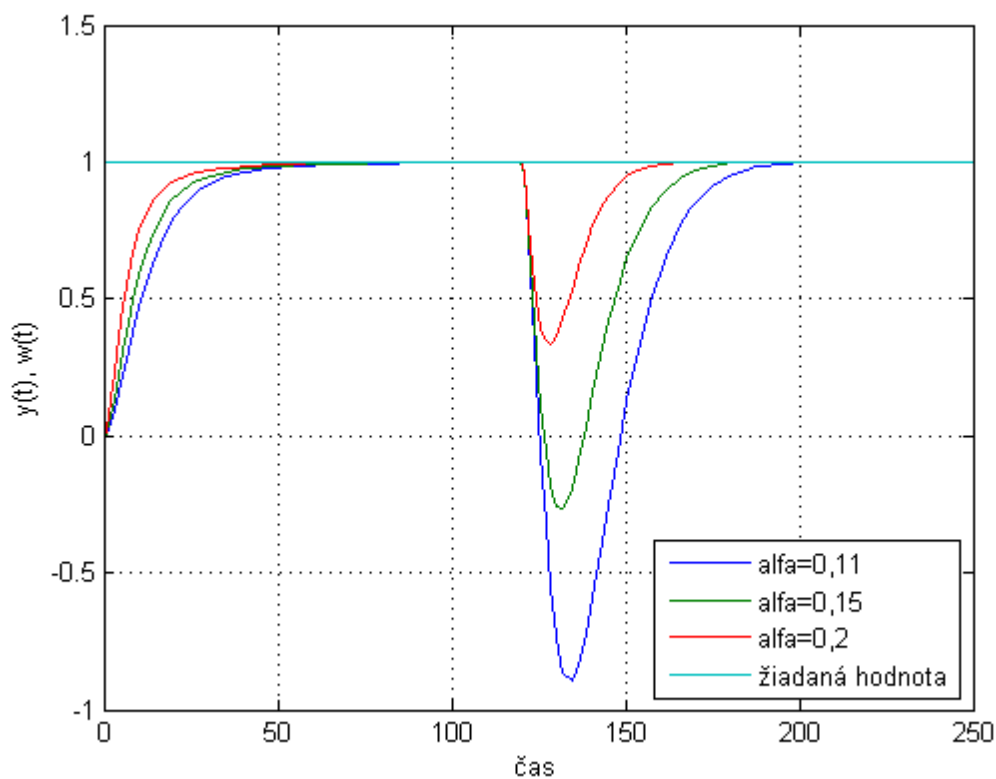
$$b = \frac{1}{3}. \quad (47)$$

Dosadením (47) do (41) sa dostáva prenosová funkcia vstupného filtra pre *PI* regulátor navrhnutý *MNDP* a dosadením (44) do (39) sa získa prenosová funkcia vstupného filtra pre *PID* regulátor navrhnutý *MNDP* [28].

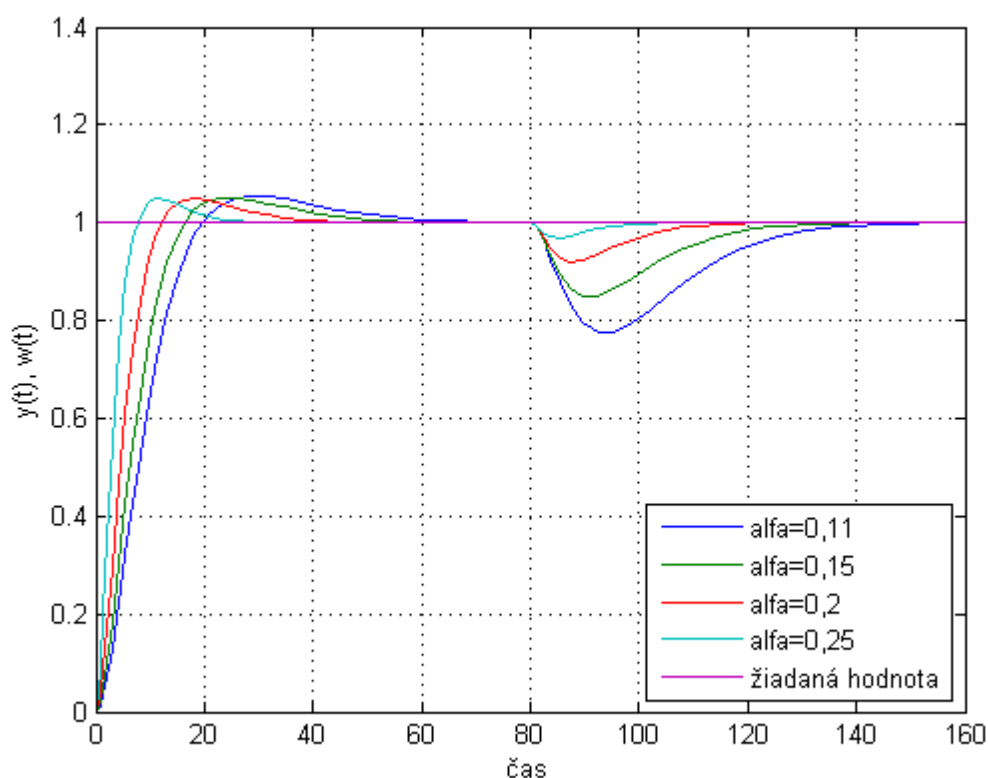
Riadenie *2DoF PI* regulátorom (obr. 15) odstránilo preregulovanie, no veľkosť poruchy sa oproti riadeniu regulátorom navrhnutým *MNDP* nezmenila. Riadením

s použitím *2DoF PID* regulátora sa preregulovanie aj porucha oproti riadeniu regulátorom navrhnutým *MNDP* zmenšili (obr. 16).

2DoF PID regulátor teda tlmí aj preregulovanie, aj poruchu, *2DoF PI* regulátor iba preregulovanie.



Obr. 15: Riadenie *2DoF PI* regulátorom



Obr. 16: Riadenie 2DoF PID regulátorom

2.1.2 Metóda optimálneho modulu (MOM)

Metóda optimálneho modulu je v súčasnosti často používaná pri výpočte koeficientov spojitého regulátora vzhľadom na svoju jednoduchosť a dobré výsledky návrhu zaručujúceho dobrú kvalitu regulácie aj pre systémy s veľkým dopravným oneskorením. Vychádza zo splnenia podmienky pre modul uzavretého regulačného obvodu

$$\text{mod} \left(G_{y/w}(s) \right) = \left| \left(\frac{G_0(j\omega)}{1 + G_0(j\omega)} \right) \right| = 1, \quad (48)$$

kde G_0 je prenosová funkcia regulačného obvodu. Z tejto podmienky vyplýva, že uvedený modul bude rovný jednej vtedy, ak reálna zložka otvoreného obvodu $\{\text{Re } G_0(j\omega) = -0,5\}$. Pre praktické úlohy je možné koeficienty spojitého regulátora vypočítať z prenosovej funkcie (49). Pre zadaný systém

$$G_s(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)} = \frac{K}{(Ts^2 + s)} = \frac{1}{s} \frac{K}{Ts + 1} = \frac{1}{s} \frac{1}{3,5s + 1} \quad (49)$$

sa hľadal vhodný regulátor (50)

$$G_R(s) = Z_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) = r_0 \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) = \frac{r_0 s + r_I + r_D s^2}{s} . \quad (50)$$

Bola vypočítaná prenosová funkcia URO

$$G_O(s) = G_R G_S = \frac{K (r_0 s + r_I + r_D s^2)}{T s^3 + s^2} \quad (51)$$

a frekvenčná prenosová funkcia,

$$\begin{aligned} G_O(j\omega) &= \frac{K (r_0 j\omega + r_I + r_D (j\omega)^2)}{T (j\omega)^3 + (j\omega)^2} = \frac{K (r_0 j\omega + r_I - r_D \omega^2)}{-T \omega^3 j - \omega^2} \\ G_O(j\omega) &= \frac{K r_I - K r_D \omega^2 + j K r_0 \omega}{-T \omega^3 j - \omega^2} \frac{T \omega^3 j - \omega^2}{T \omega^3 j - \omega^2} \rightarrow \\ &\rightarrow Re = \frac{K r_D \omega^4 - K r_I \omega^2 - K r_0 T \omega^4}{\omega^4 + T^2 \omega^6} - j I_m , \end{aligned} \quad (52)$$

v ktorej reálna časť Re bola rovná $-0,5$.

$$Re = -0,5 = \frac{K r_D \omega^4 - K r_I \omega^2 - K r_0 T \omega^4}{\omega^4 + T^2 \omega^6} \quad (53)$$

$$K r_D \omega^4 - K r_I \omega^2 - K r_0 T \omega^4 = -0,5 \omega^4 - 0,5 T^2 \omega^6 \quad (54)$$

Porovnaním koeficientov pri rovnakých mocninách boli získané rovnice pre výpočet parametrov regulátora [24, 26].

$$-K r_I = 0 \rightarrow r_I = 0 \rightarrow \frac{Z_R}{T_I} = 0 \quad (55)$$

$$K r_D - K r_0 T = -0,5$$

$$K r_D = K r_0 T - 0,5$$

$$\text{Ak } r_D = Z_R T_D \quad \text{a} \quad r_0 = Z_R , \quad (56)$$

potom $K Z_R T_D = K Z_R T - 0,5$.

$$T_D = \frac{K Z_R T}{K Z_R} - \frac{0,5}{K Z_R} \rightarrow T_D = T - \frac{0,5}{K Z_R} \quad (57)$$

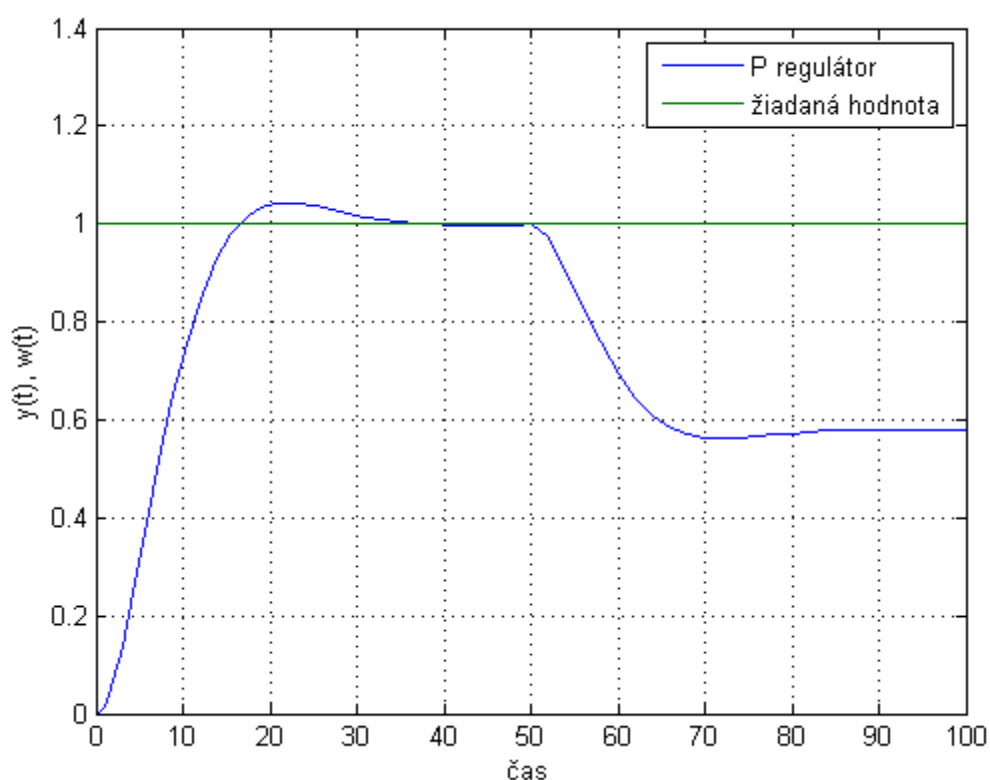
$$T_D > 0; \quad T - \frac{0,5}{K Z_R} > 0 \rightarrow T K Z_R - 0,5 > 0 \rightarrow \underline{Z_R > \frac{0,5}{K T}} \quad (58)$$

Do vypočítaných parametrov regulátora boli dosadené hodnoty zo zadanej prenosovej funkcie (49) a výsledkom bol *PD* regulátor s parametrami

$$Z_R > \frac{0,5}{KT} \rightarrow Z_R > 0.14286, \quad (59)$$

$$T_D = T - \frac{0,5}{KZ_R} = 0.00007, \quad (60)$$

teda derivačná zložka je prakticky nulová.



Obr. 17: Riadenie *P* regulátorom navrhnutým *MOM*

TRO pri riadení *P* regulátorom navrhnutým *MOM* bola nulová, bola dosiahnutá žiadaná hodnota, ale porucha nebola odstránená.

2.1.3 Naslinova metóda

Táto *analytická metóda* vychádza z charakteristickej rovnice uzavretého regulačného obvodu (*CHR URO*) a má tvar:

$$1 + G_S(s)G_R(s) = 0 \quad (61)$$

a po úprave

$$a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = 0, \quad (62)$$

kde v koeficientoch $a_n, \dots, a_1, a_0$ môžu vystupovať neznáme parametre regulátorov typu *PID*.

Regulátor sa navrhuje na základe požiadavky maximálneho preregulovania. Medzi trojicami za sebou idúcich koeficientov *CHR* platí Naslinov vzťah:

$$a_i^2 = \alpha \cdot a_{i+1} \cdot a_{i-1}, \quad (63)$$

pričom medzi parametrom α a maximálnym preregulovaním σ_{MAX} je vzťah daný tabuľkou.

Tab. 1: Tabuľka nastavenia regulátora Naslinovou metódou

$\sigma_{MAX} [\%]$	20	12	8	5	3	1
α	1,7	1,8	1,9	2	2,2	2,4

Pre *CHR* n -tého stupňa, ktorá má $n+1$ koeficientov, dostaneme podľa $a_i^2 = \alpha a_{i+1} a_{i-1}$ systém $n-1$ rovníc, lebo rovnice sa nedajú vytvoriť pre $i=n$ a $i=0$. Aby systém rovníc mal jediné riešenie, štruktúru regulátora (*P*, *PI*, *PD*, *PID*) volíme tak, aby sme dostali toľko rovníc, koľko v nich bude vystupovať neznámych parametrov regulátora [22].

Pre spätnoväzbové riadenie procesu bol do *URO* Naslinovou metódou navrhnutý regulátor, ktorý je opísaný prenosom (64).

$$G_S(s) = \frac{K}{s(Ts+1)} = \frac{I}{s(3.5s+1)} \quad (64)$$

Maximálne preregulovanie σ_{MAX} je 20%.

Prenos regulátora má tvar

$$G_R(s) = P + \frac{I}{s} + Ds = Z_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right). \quad (65)$$

CHR URO s procesom a regulátorom má tvar

$$1 + \frac{I}{s(3.5s+1)} Z_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) = 0. \quad (66)$$

Naslinovou metódou bol navrhnutý *P*, *PI* a *PD* regulátor.

P regulátor:

$$1 + \frac{I}{s(3.5s+I)} Z_R = 0 \quad (67)$$

$$3.5s^2 + s + Z_R = 0$$

CHR je druhého stupňa. Podľa (67) sa vypočíta hodnota zosilnenia.

$$1 = \alpha \cdot 3.5 \cdot Z_R \quad (68)$$

$$Z_R = \frac{1}{3.5\alpha} = 0,16807 \quad (69)$$

PI regulátor:

$$1 + \frac{I}{s(3.5s+I)} Z_R \left(1 + \frac{1}{T_I s}\right) = 0 \quad (70)$$

$$3.5T_I s^3 + T_I s^2 + Z_R T_I s + Z_R = 0 \quad (71)$$

$$T_I^2 = 3.5 \cdot Z_R T_I^2 \alpha \quad (72)$$

$$Z_R^2 T_I^2 = Z_R T_I \alpha \quad (73)$$

$$Z_R = \frac{1}{3.5\alpha} = 0,16807 \quad (74)$$

$$T_I = 3.5\alpha^2 = 10,115 \quad (75)$$

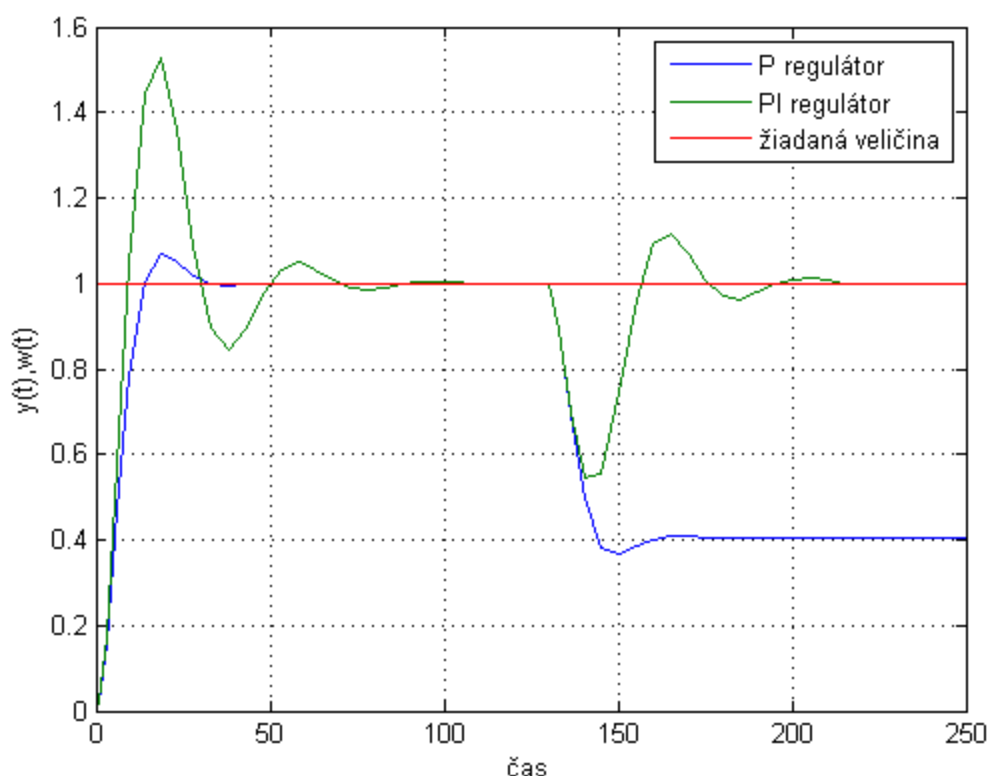
PD regulátor:

$$1 + \frac{I}{s(3.5s+I)} Z_R (1 + T_D s) = 0 \quad (76)$$

$$3.5s^2 + (1 + Z_R T_D)s + Z_R = 0 \quad (77)$$

$$(1 + Z_R T_D)^2 = 3.5 Z_R \alpha \quad (78)$$

Pre proces opísaný prenosom (64) sa nedá navrhnuť PD regulátor.



Obr. 18: Riadenie regulátormi navrhnutými Naslinovou metódou

TRO pri riadení P aj PI regulátormi navrhnutými Naslinovou metódou bola nulová. Čas regulácie pri riadení P regulátorom bol kratší, no P regulátor neodstraňoval poruchy. Pri riadení PI regulátorom bolo preregulovanie oproti riadeniu P regulátorom väčšie, PI regulátor odstraňoval poruchy.

2.1.4 Metóda požadovaného modelu (MPM)

Táto metóda je tiež nazývaná metódou inverznej dynamiky. Je veľmi jednoduchá a účinná. Umožňuje zriadenie číslicových aj analógových konvenčných regulátorov pri zaistení nulovej trvalej regulačnej odchýlky na skok žiadanej veličiny w alebo poruchovej veličiny v pôsobiacej na výstupe regulovanej sústavy. Je vhodná predovšetkým pre regulované sústavy s dopravným oneskorením. Umožňuje vytvoriť pre danú regulovanú sústavu doporučený konvenčný regulátor tak, aby bolo zaručené požadované relatívne preregulovanie (prekmit) prechodovej charakteristiky regulačného obvodu σ (%).

Postup pri výpočte koeficientov spojitého a diskrétného regulátora je nasledovný:

- vyberie sa požadovaná hodnota preregulovania σ , a zároveň sa určia odpovedajúce koeficienty α a β podľa tab. 2.
- z tab. 3 sa vypočítajú hodnoty koeficientov regulátora.

Výpočet je spoločný tak pre spojité ako aj diskrétné procesy [9, 26].

Tab. 2: Tabuľka preregulovaní a koeficientov α a β pre MPM

σ [%]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
α	1,282	0,984	0,884	0,832	0,763	0,697	0,669	0,64	0,618	0,599	0,577
β	2,718	1,944	1,72	1,561	1,437	1,337	1,248	1,172	1,104	1,045	0,992

Tab. 3: Hodnoty parametrov PD regulátora pre astatický systém I. rádu MPM

Regulovaná sústava	Regulátor		analógový	$T = 0$
			číslicový	$T > 0$
	Typ regulátora	P^*	T_I^*	T_D^*
$\frac{K}{s(T_i s + 1)} e^{-T_d s}$	PD	$\frac{1}{(\alpha T + \beta T_d) K}$	-	$T_i - \frac{T}{2}$

Boli vytvorené dva PD regulátory. Jeden s preregulovaním 50%, kedy $\sigma = 0,5$ a druhý s preregulovaním 0%, kedy sa $\sigma = 0$. Regulátor bol vždy počítaný ako analógový, $T=0$.

Prenosová funkcia systému s integračnou činnosťou:

$$G_s(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)} e^{-T_d s} = \frac{1}{s(3.5s + 1)} e^{-0.1s} \quad (79)$$

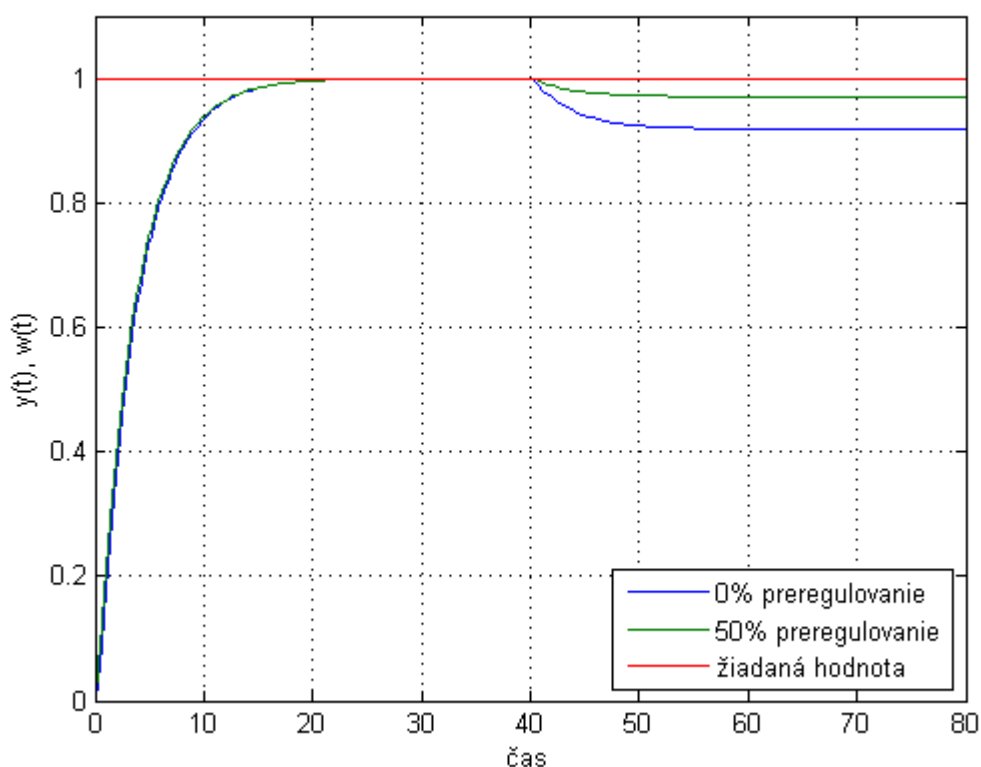
Keďže MPM pracuje s prenosovými funkciami s dopravným oneskorením T_d (79) a zadaná prenosová funkcia systému s integračnou činnosťou je bez dopravného oneskorenia, dopravné oneskorenie T_d bolo zvolené ako malá hodnota, 0.1.

Parametre spojitého PD regulátora s preregulovaním $\sigma = 0\%$

$$P^* = 3,6792 \quad T_D^* = 3,5. \quad (80)$$

Parametre spojitého PD regulátora s preregulovaním $\sigma = 50\%$

$$P^* = 10,0806 \quad T_D^* = 3,5. \quad (81)$$



Obr. 19: Riadenie PD regulátormi navrhnutými metódou požadovaného modelu

TRO pri riadení oboma PD regulátormi navrhnutými MPM bola nulová. Pri výskyte poruchy ostala TRO .

2.1.5 Strejcova metóda

Strejcova metóda je založená na metóde optimálneho modulu. Parametre regulátora sa určujú pomocou zosilnenia K , časovej konštanty T a rádu prenosu n . Parametre PID regulátora sa určujú pre prenos regulátora

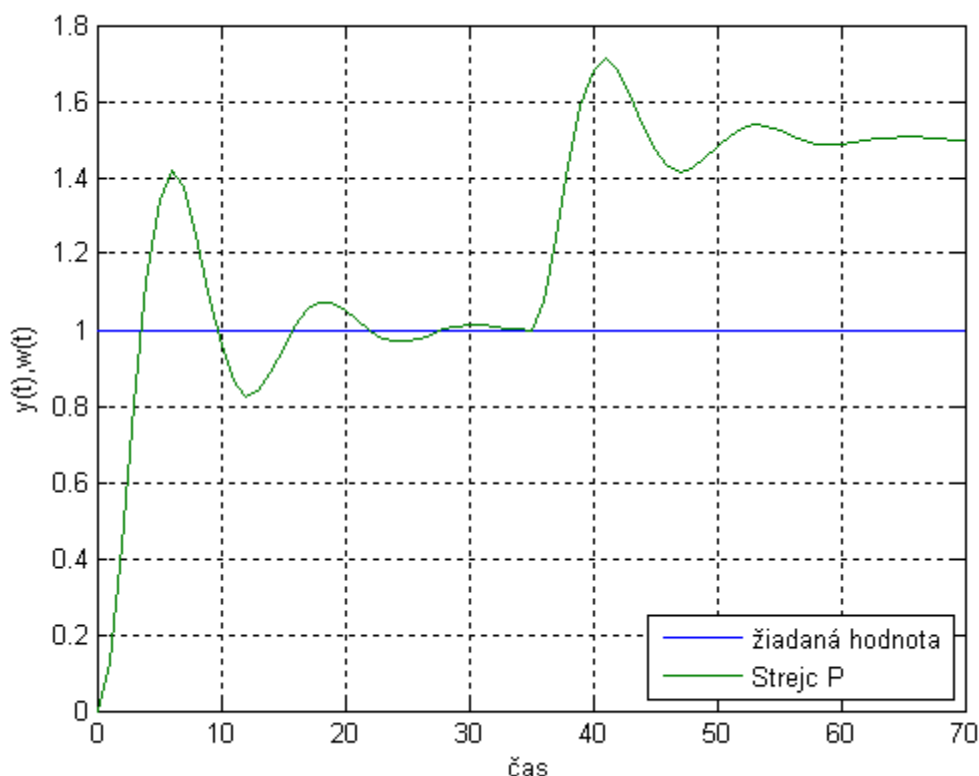
$$G_R(s) = Z_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right). \quad (82)$$

Pre vhodný typ regulátora sa počítajú parametre regulátora pomocou údajov z tab. 4 [29].

Tab. 4: Tabuľka nastavenia regulátora Strejcovou metódou

Regulátor	Z_R	T_I	T_D
P	$\frac{1}{K} \frac{1}{(n-1)}$	-	-

TRO pri riadení P regulátorom navrhnutým Strejcovou metódou bola nulová. Navrhnutý regulátor neodstraňoval poruchu.

Obr. 20: Riadenie P regulátorom

2.1.6 Lopezova IAE – ISE metóda

Lopezova IAE – ISE metóda sa snaží minimalizovať integrálne kritériá kvality IAE a ISE. Parametre regulátora sa určujú pre regulovaný proces identifikovaný ako systém 1. rádu s dopravným oneskorením

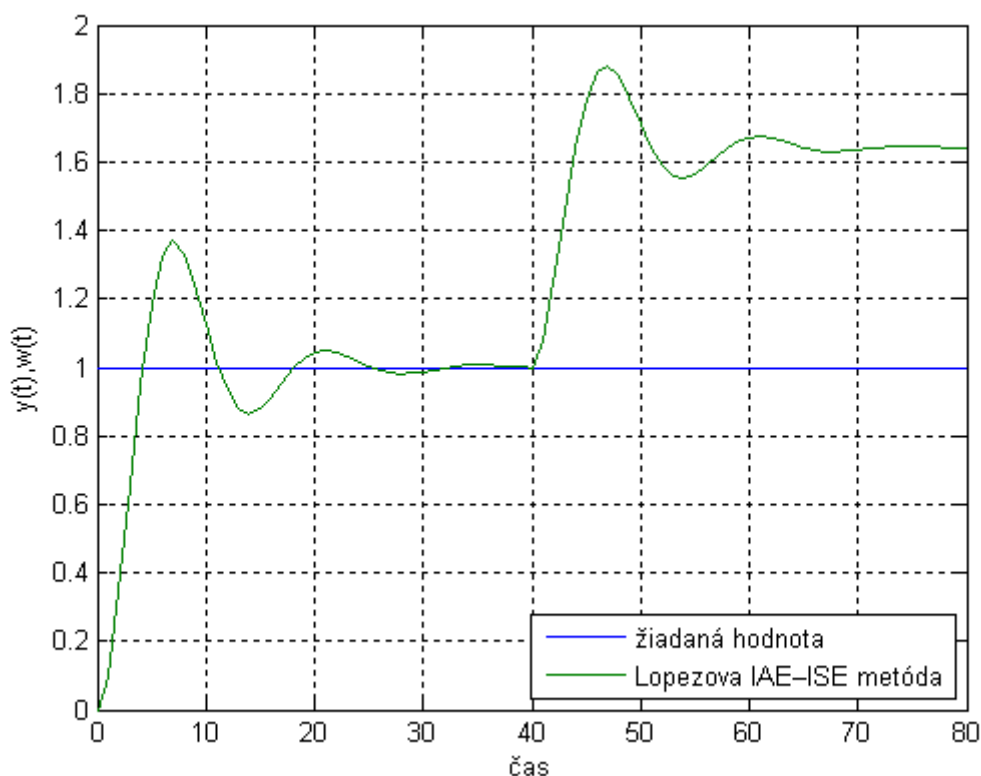
$$G_S(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)} e^{-T_d s} = \frac{1}{s(3.5s + 1)} e^{-0.1s}, \quad (83)$$

kde K je zosilnenie, T_d je dopravné oneskorenie rovné T_U času prietahu, T časová konštanta rovná T_N času nábehu. Parametre PID regulátora sa určujú pre prenos regulátora (82) a jeho parametre sa počítajú pomocou údajov z tab. 5 [29].

Tab. 5: Tabuľka nastavenia regulátora Lopezovou IAE – ISE metódou

Regulátor	Z_R	T_I	T_D
P	$1,411 \frac{T_U}{K T_N^{-0,917}}$	-	-

TRO pri riadení P regulátorom navrhnutým Lopezovou IAE – ISE metódou bola nulová. Navrhnutý regulátor neodstraňoval poruchu.



Obr. 21: Riadenie P regulátorom

2.1.7 Chienova – Hronesova – Reswickova metóda

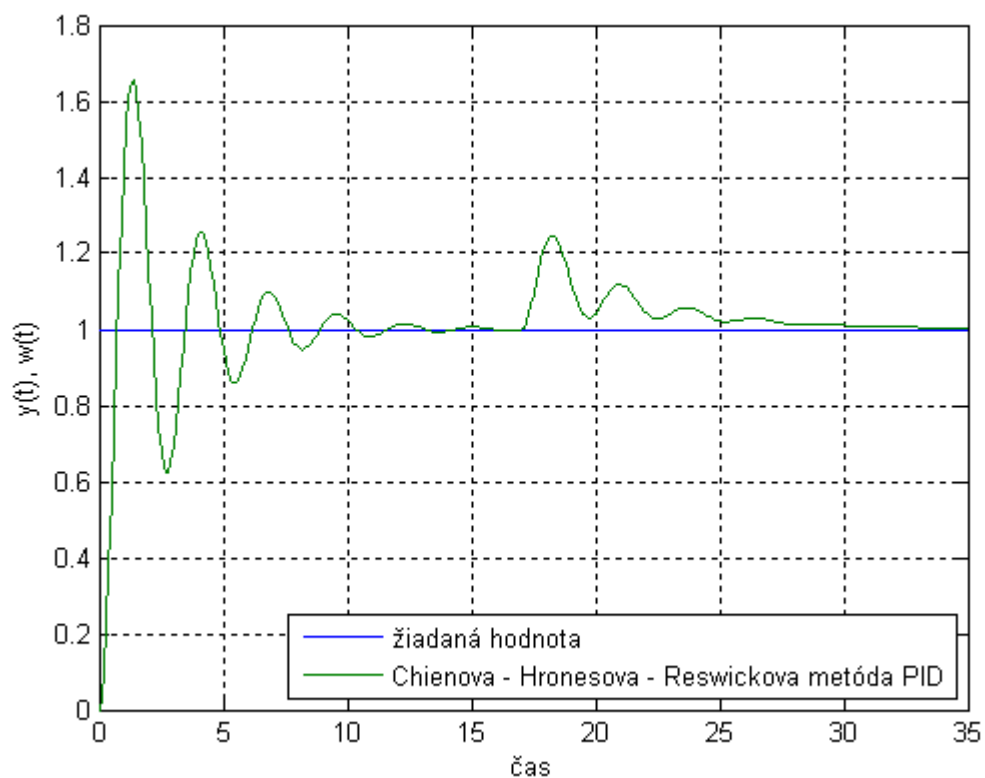
Chienova – Hronesova – Reswickova metóda nazývaná tiež *univerzálna experimentálna metóda* určuje parametre regulátora pre regulovaný proces identifikovaný ako systém 1. rádu s dopravným oneskorením

$$G_S(s) = \frac{K}{s(Ts + 1)} e^{-T_d s} = \frac{1}{s(3.5s + 1)} e^{-0.1s}, \quad (84)$$

kde K je zosilnenie, T_d je dopravné oneskorenie rovné T_U času prietahu, T časová konštanta rovná T_N času nábehu. Parametre PID regulátora sa určujú pre prenos regulátora (82) a jeho parametre sa počítajú pomocou údajov z tab. 6 [29].

Tab. 6: Tabuľka nastavenia regulátora podľa Chiena – Hronesa – Reswicka

Relatívne preregulovanie σ [%]	20%		
Regulátor	Z_R	T_I	T_D
PID	$0,95 \frac{T_N}{KT_U}$	$1,36T_N$	$0,64T_U$

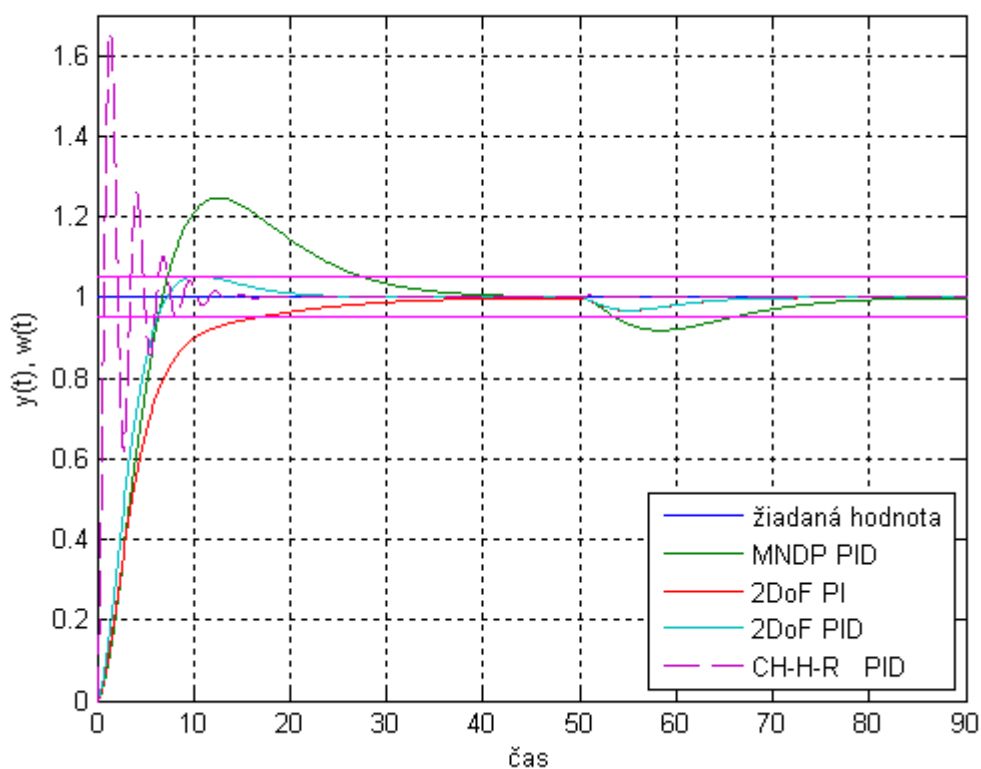
**Obr. 22: Riadenie PID regulátorom**

TRO pri riadení PID regulátorom navrhnutým podľa Chiena – Hronesa – Reswicka bola nulová. Navrhnutý regulátor neodstraňoval poruchu.

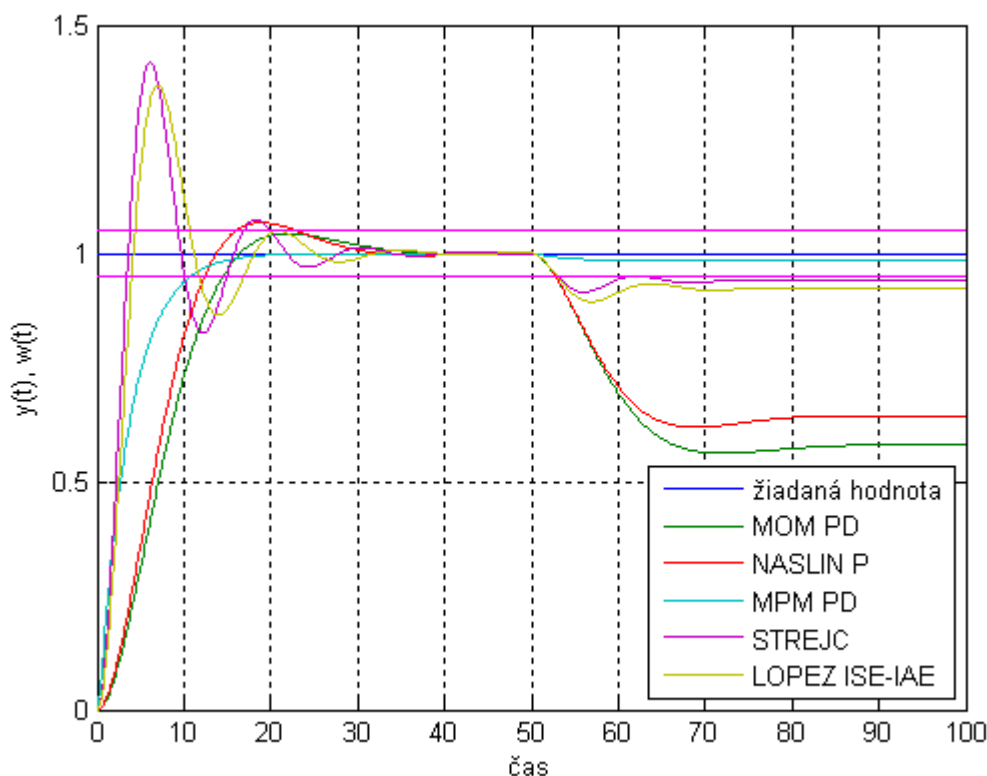
V tab. 7 sú uvedené kritériá kvality pre všetky hľadané *PID* regulátory.

Tab. 7: Porovnanie parametrov *PID* regulátora a kritérií kvality

	<i>P</i>	<i>I</i>	<i>D</i>	t_{REG}	<i>ISE</i>	<i>IAE</i>	σ_{MAX} [%]	komp. poruchy
MNDP	0,5952	0,0472	1,5	27,65	3,13	7,03	24,56	áno
MOM	0,1429	0	1 e-5	14,5	5,25	7,98	4,36	nie
NASLIN	0,1681	0	0	22,89	4,73	7,33	6,72	nie
MPM	3,6792	0	12,8771	10,83	1,99	3,77	0	nie
2DoF PI	$G_F(s) = \frac{2,5988s + 1}{7,875s + 1}$			16,51	0,30	1,85	0	áno
	1,5238	0,1935	3					
2DoF PID	$G_F(s) = \frac{6,89s^2 + 5,25s + 1}{15,5s^2 + 7,875s + 1}$			11,94	0,54	2,42	5,3514	áno
	1,5238	0,1935	3					
STREJC	1	0	0	19,96	2,25	4,85	41,88	nie
LOPEZ	0,7789	0	0	21,05	2,39	4,98	36,74	nie
CH-H-R	19	3,9916	2,1280	8,39	0,82	1,93	65,80	áno



Obr. 23: *PID* regulátory odstraňujúce poruchu



Obr. 24: PID regulátory neodstraňujúce poruchu

2.2 Návrh fuzzy regulátorov

V tejto časti je navrhnutý fuzzy regulátor a jeho porovnanie s klasickým *PID* regulátorom a sú vyhodnotené kritériá kvality riadenia.

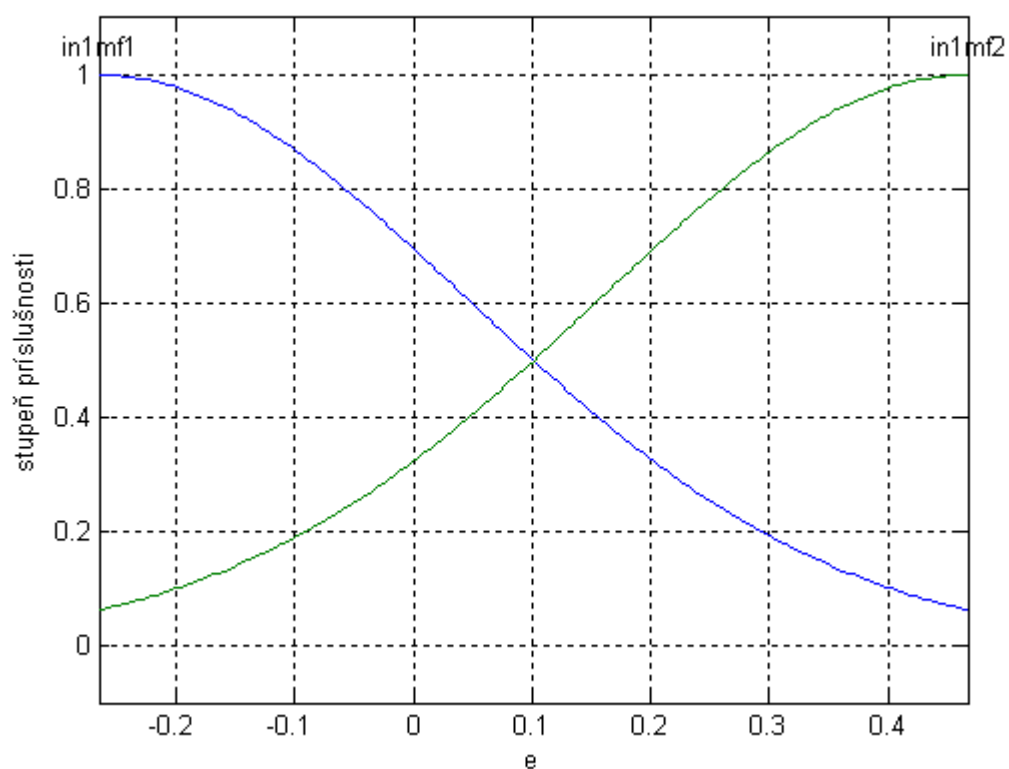
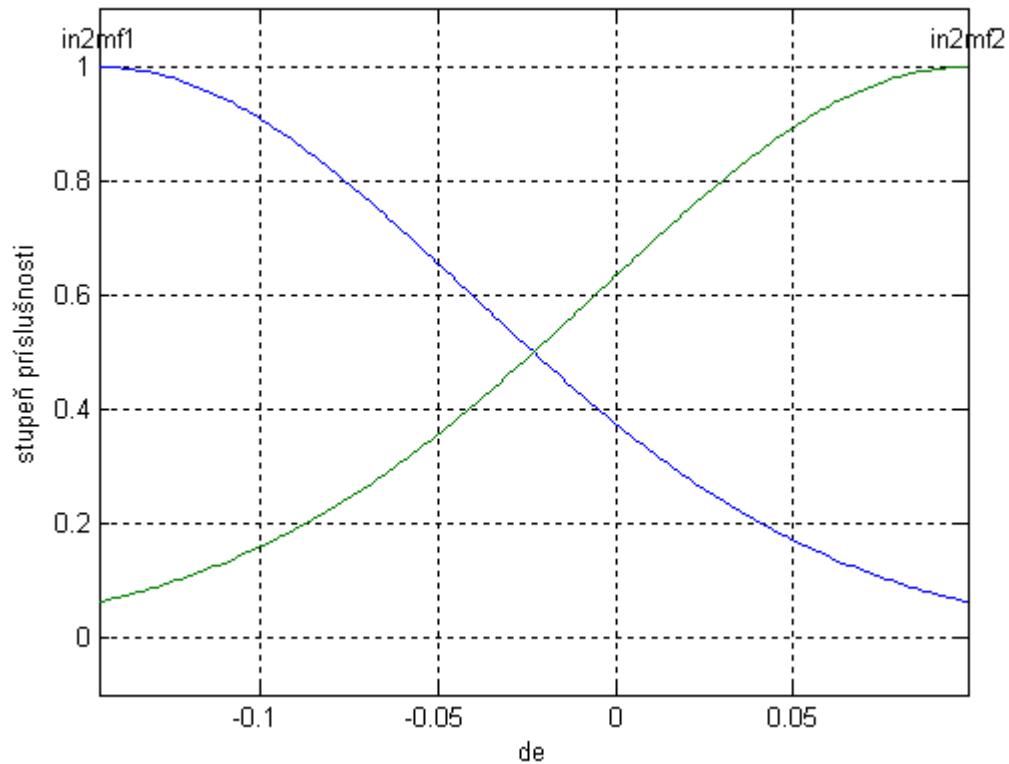
Dobrý regulátor je regulátor, ktorý kompenzuje vplyv porúch, čas regulácie t_{REG} , *ISE* a *IAE* sú čo najmenšie. Z regulátorov navrhnutých *experimentálnymi* a *analytickými metódami* boli na základe kritérií kvality (tab. 7) vybraté 2 regulátory, *2DoF PI* a *2DoF PID*. Na základe lepšieho času regulácie bol na vytvorenie fuzzy regulátora vybratý práve *2DoF PID* regulátor.

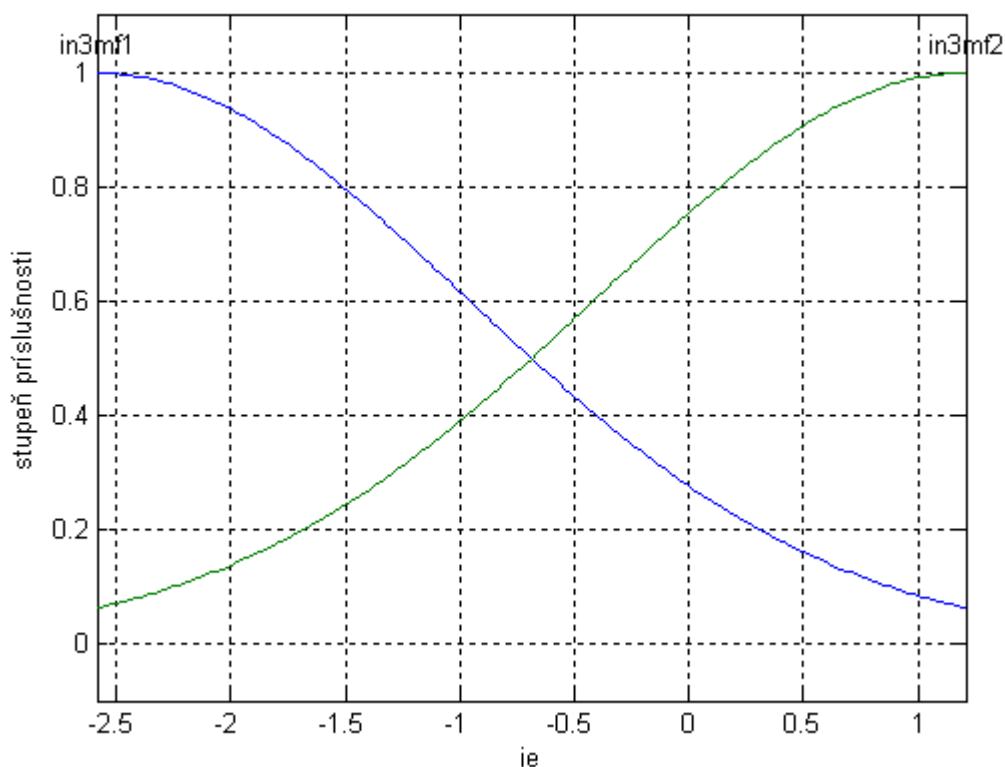
Na trénovanie fuzzy regulátorov boli použité údaje získané zo simulácie riadenia *2DoF PID* regulátorom tak, aby boli splnené vybrané ukazovatele kvality riadenia.

Na získanie parametrov FR z trénovacích údajov boli vytvorené *m-fily* s názvom *navrh_astatG1.m*, *navrh_astatG2.m*, ktoré sú uvedené v prílohách.

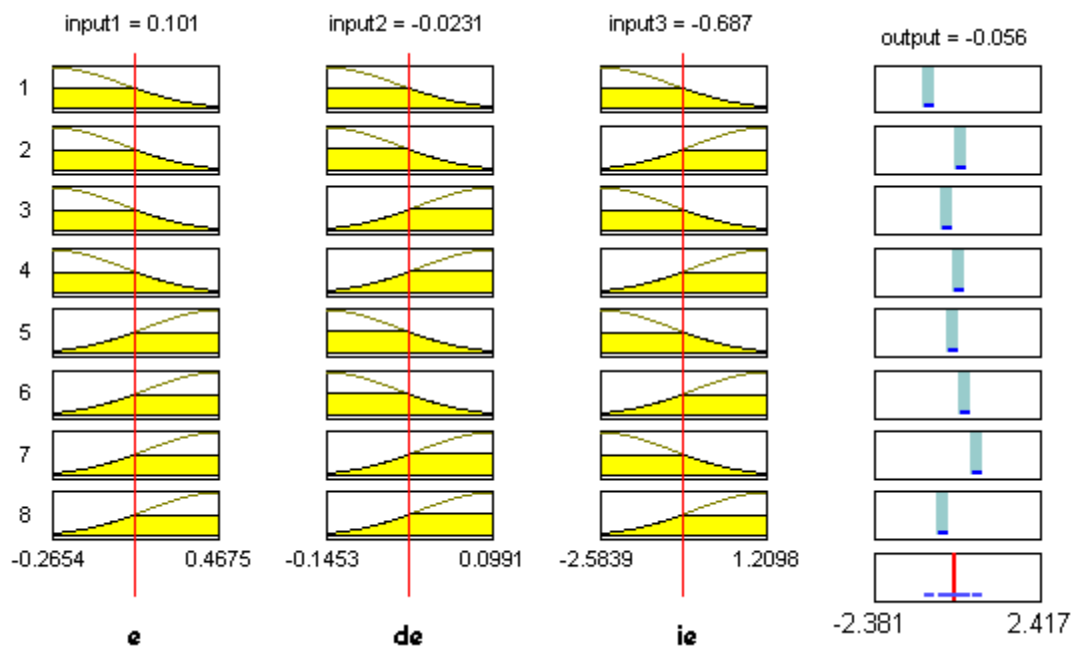
Pre riadenie systému s integračnou činnosťou boli navrhnuté 2 fuzzy regulátory. Pri návrhu prvého bola použitá funkcia *genfis1*, ktorá poskytuje počiatočné podmienky pre *Anfis* trénovanie na základe mriežkového rozdelenia údajov. Navrhnutý fuzzy regulátor je typu *PID*, má 3 vstupné veličiny s gaussovými funkciami príslušnosti a 8 pravidiel.

Na vytvorenie prvého fuzzy regulátora boli použité 2 funkcie príslušnosti typu *gaussmf* (obr. 25), (obr. 26) a (obr. 27).

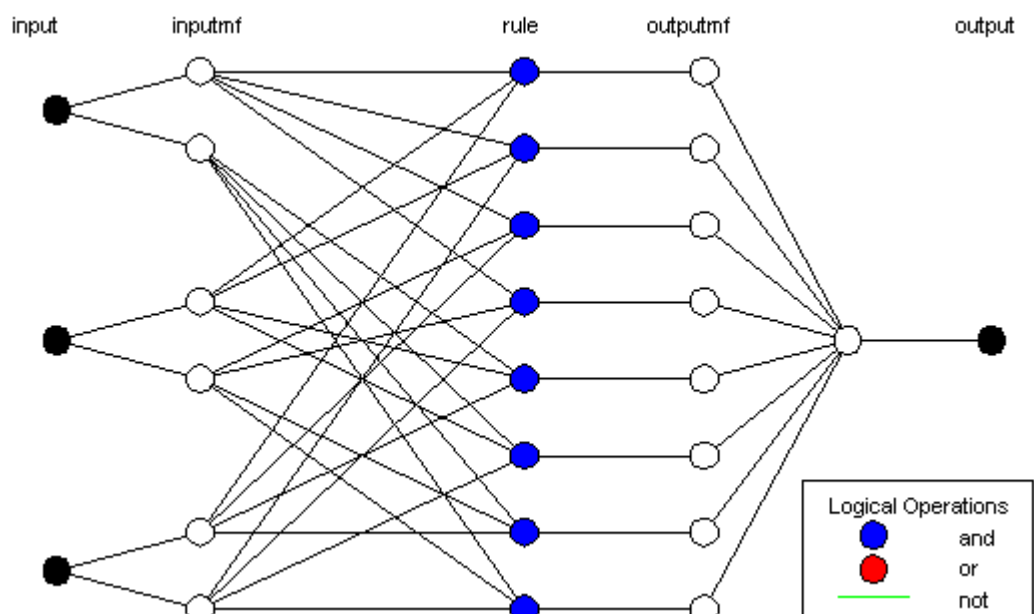
Obr. 25: Dve Gaussove funkcie príslušnosti pre vstup e Obr. 26: Dve Gaussove funkcie príslušnosti pre vstup de

Obr. 27: Dve Gaussove funkcie príslušnosti pre vstup *ie*

Pravidlá a výsledná štruktúra *PID* fuzzy regulátora je na obr. 28 a obr. 29.

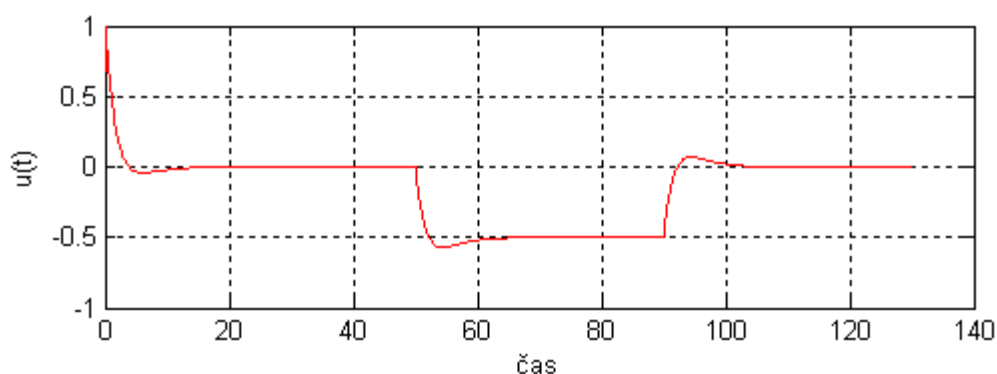
Obr. 28: Pravidlá *PID* fuzzy regulátora

Červená čiara (obr. 28) zobrazuje výslednú ostrú hodnotu a výsledná štruktúra *Anfis* (obr. 29) zobrazuje počet vstupov, funkcií príslušnosti, pravidiel a výstup.



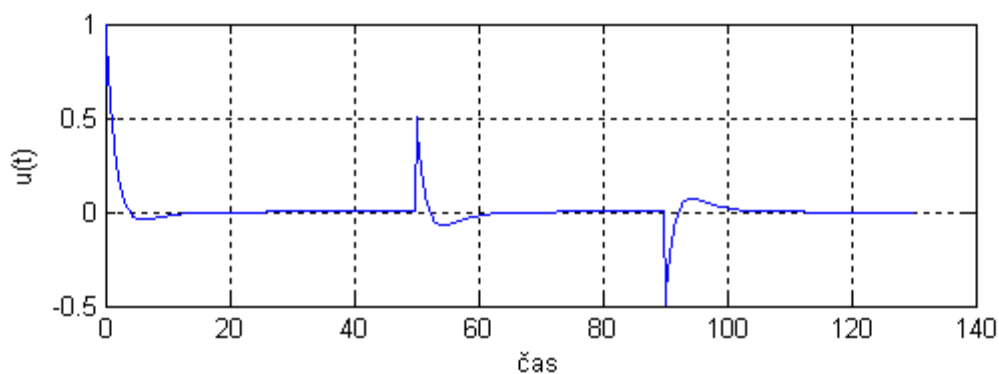
Obr. 29: Výsledná štruktúra Anfis

Akčný zásah prvého fuzzy regulátora je na obr. 30.



Obr. 30: Akčný zásah fuzzy regulátora

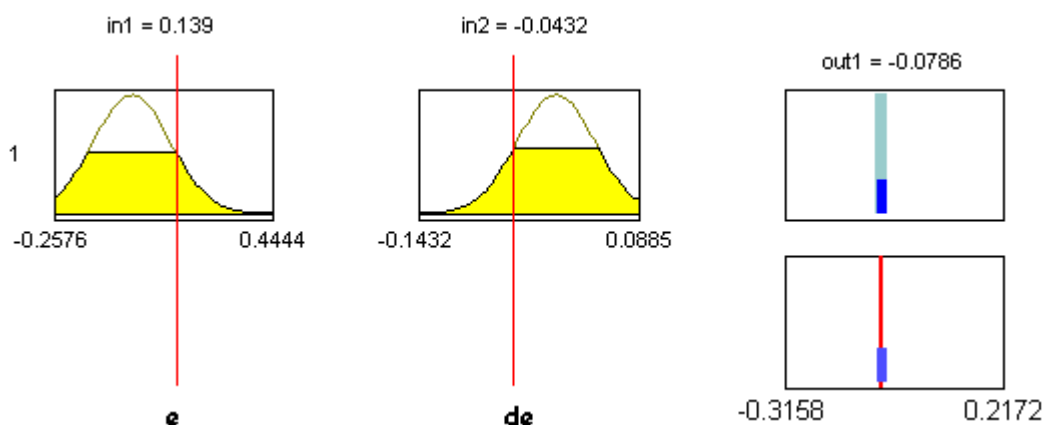
Dobrý regulátor by mal okrem stability spĺňať aj ďalšie kritériá kvality regulačného obvodu a to: regulačný obvod odstraňuje poruchu $v(t)$ na riadenú veličinu $y(t)$. Ako vidno na obr. 31, navrhnutý FR odstraňuje poruchy, ktoré sa prejavili v čase 50 a 90.



Obr. 31: Akčný zásah fuzzy regulátora pri odstraňovaní porúch

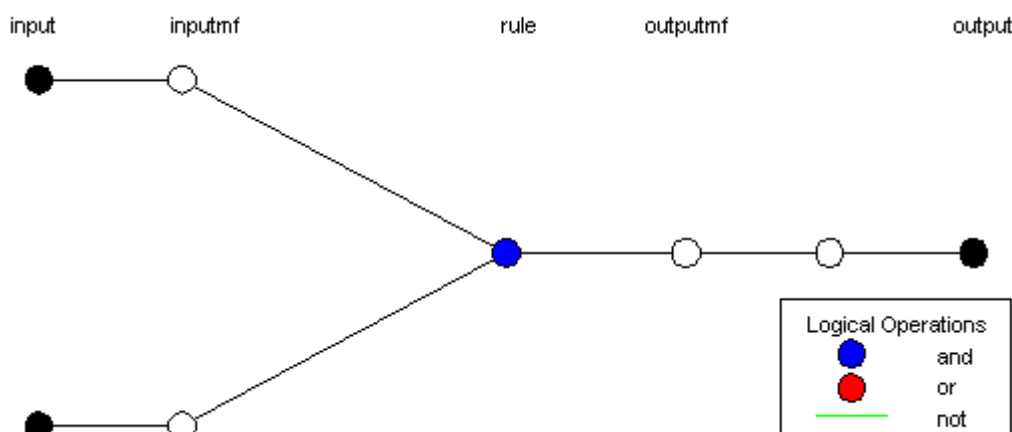
Pri návrhu druhého fuzzy regulátora bola na inicializáciu fuzzy systému použitá funkcia *genfis2*, ktorá poskytuje začiatkové podmienky pre *Anfis* tréning na základe subtraktívneho zhľukovania údajov. Tento regulátor vznikol paralelným zapojením *PI* a *PD* fuzzy regulátora (obr. 22). *PD* fuzzy regulátor mal 1 pravidlo a *PI* fuzzy regulátor mal 2 pravidlá. Výhodou *genfis2* je to, že výsledný regulátor má obyčajne menej pravidiel, ale kvalitu riadenia ako regulátor, ktorý je navrhnutý pomocou *genfis1* [23].

Výsledné pravidlá *PD FR* sú na obr. 32. Červená čiara (obr. 32) zobrazuje výslednú ostrú hodnotu.



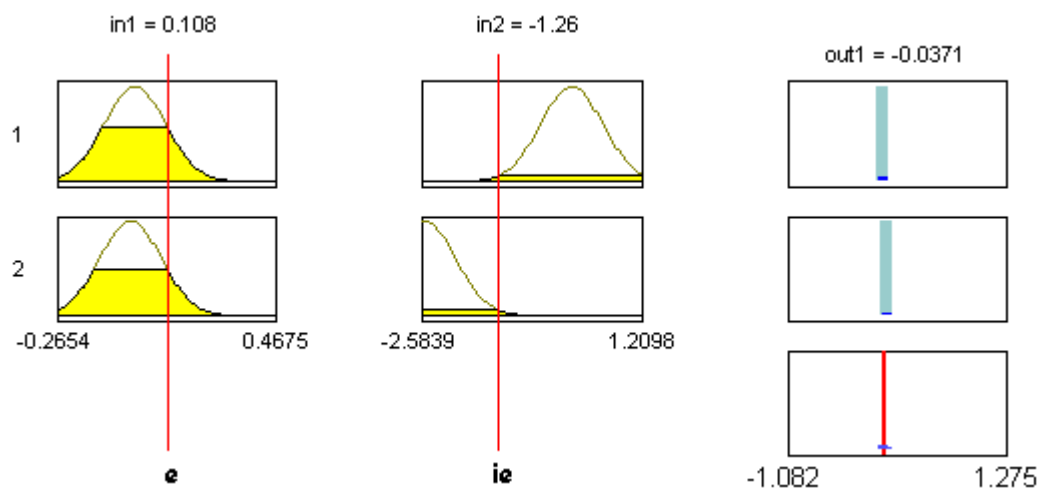
Obr. 32: Pravidlá *PD* fuzzy regulátora

Výsledná štruktúra *Anfis* (obr. 33) zobrazuje počet vstupov, funkcií príslušnosti, pravidiel a výstup.



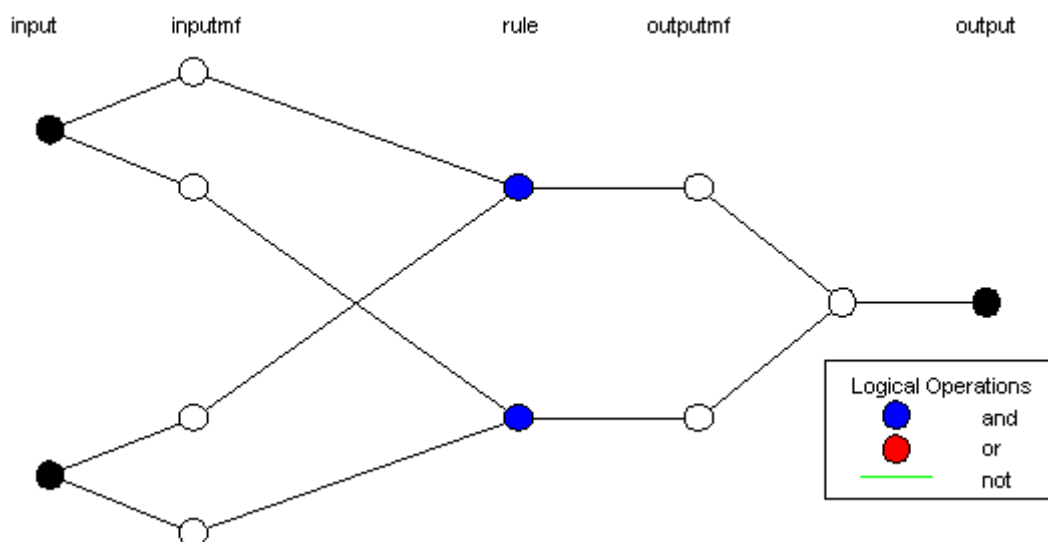
Obr. 33: Výsledná štruktúra *Anfis*

Výsledné pravidlá *PI FR* sú na obr. 34. Červená čiara (obr. 34) zobrazuje výslednú ostrú hodnotu.

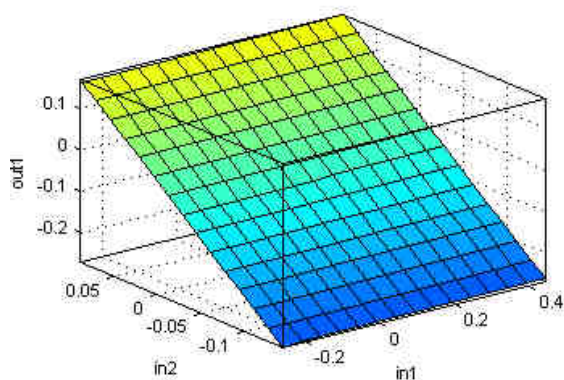
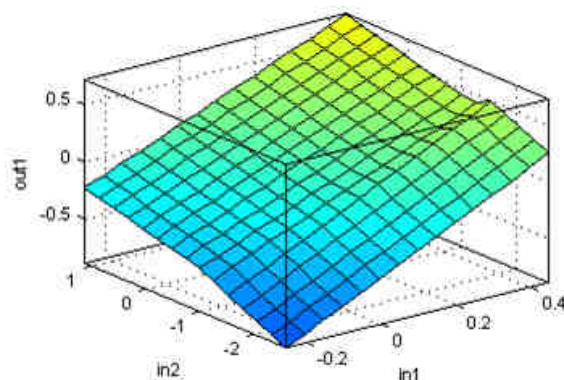


Obr. 34: Pravidlá PI fuzzy regulátora

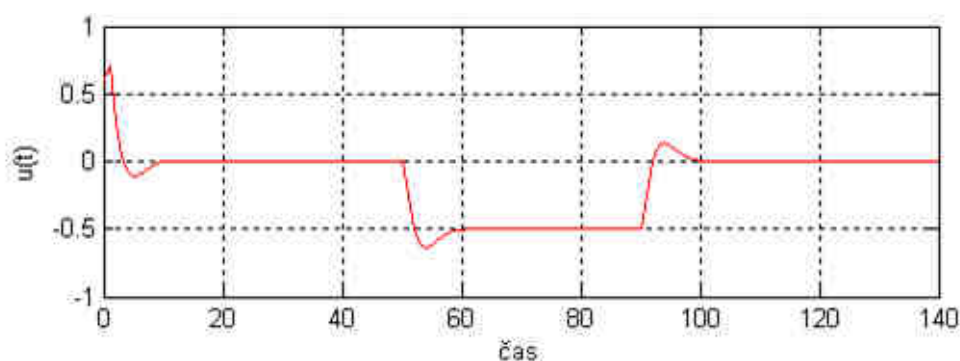
Výsledná štruktúra *Anfis* (obr. 35) zobrazuje počet vstupov, funkcií príslušnosti, pravidiel a výstup.

Obr. 35: Výsledná štruktúra *Anfis*

Výstupný povrch jednotlivých fuzzy regulátorov je na obr. 36 a obr. 37.

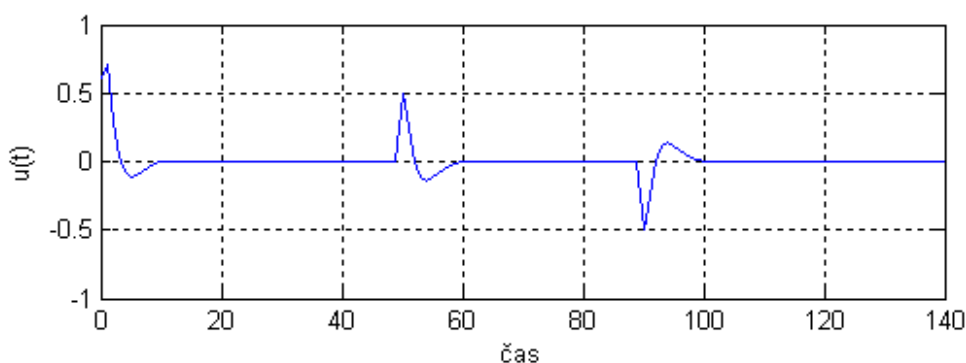
Obr. 36: Výstupný povrch PD fuzzy regulátora,
 $u=f(e,de)$ Obr. 37: Výstupný povrch PI fuzzy regulátora,
 $u=f(e,ie)$

Akčný zásah FR je na obr. 38.



Obr. 38: Akčný zásah fuzzy regulátora

Navrhnutý FR odstraňuje poruchy, ktoré sa prejavili v čase 50 a 90 (obr. 39).



Obr. 39: Akčný zásah fuzzy regulátora pri výskyte porúch

2.3 Výsledné porovnanie kvality riadenia fuzzy regulátormi

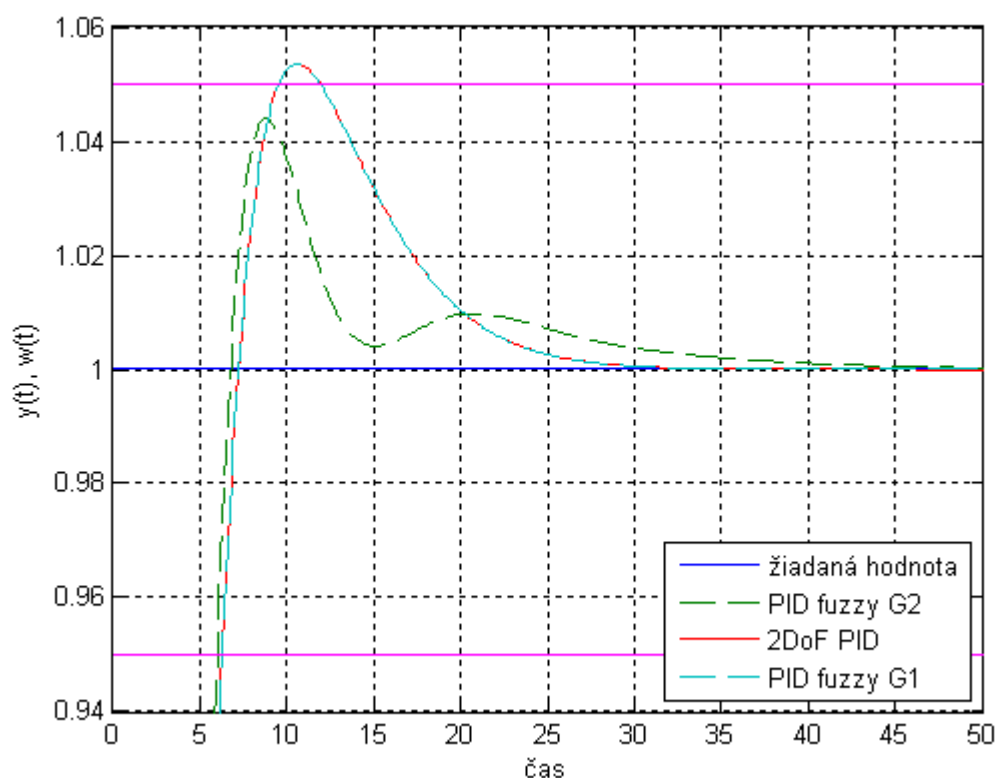
Riadenie navrhnutými fuzzy regulátormi bolo porovnané s „najlepším“ regulátorom 2DoF PID. Boli vyhodnotené kritériá kvality riadenia (tab. 8). Z porovnania kritérií kvality riadenia (tab. 8) a obr. 40 možno usúdiť, že riadenie navrhnutým PID fuzzy regulátorom (*genfis2*) je najrýchlejšie.

Tab. 8: Porovnanie kritérií kvality pri riadení fuzzy regulátormi

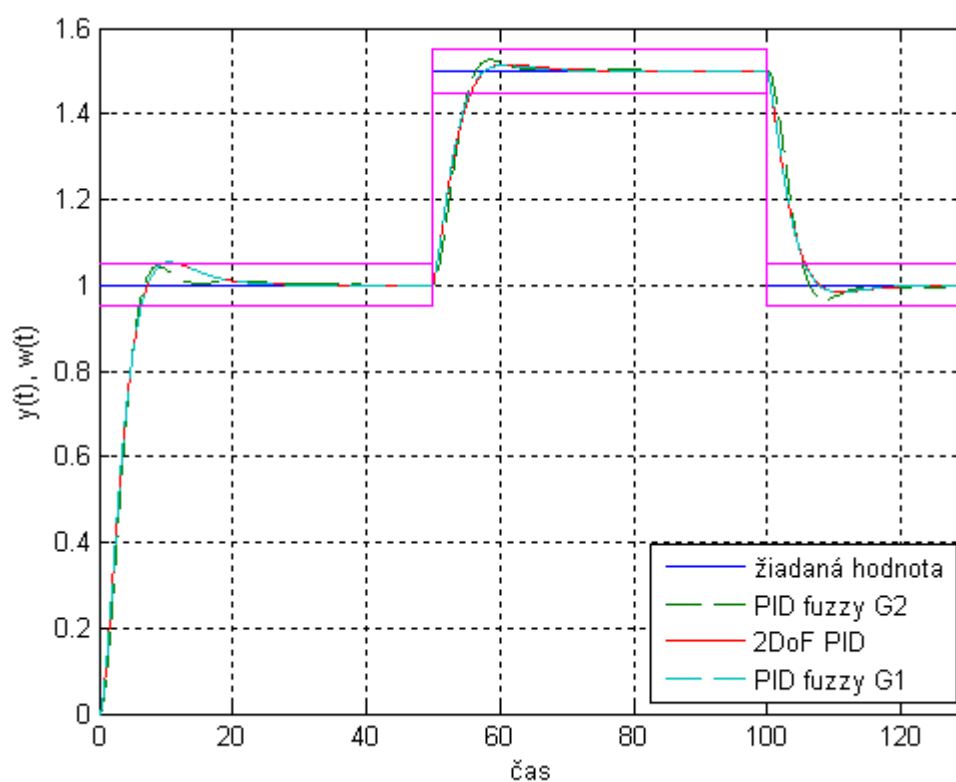
	t_{REG}	ISE	IAE	σ_{MAX} [%]
G2 fuzzy PID	5,99	0,5991	2,4386	4,3649
G1 fuzzy PID	11,93	0,5406	2,4197	5,3478
2DoF PID	11,94	0,5406	2,4196	5,3514

Na obr. 41 je znázornené riadenie pre 3 skokové zmeny žiadanej veličiny $w(t)$ a na

obr. 42 je riadenie pri výskyte poruchy v čase 50 a 90.



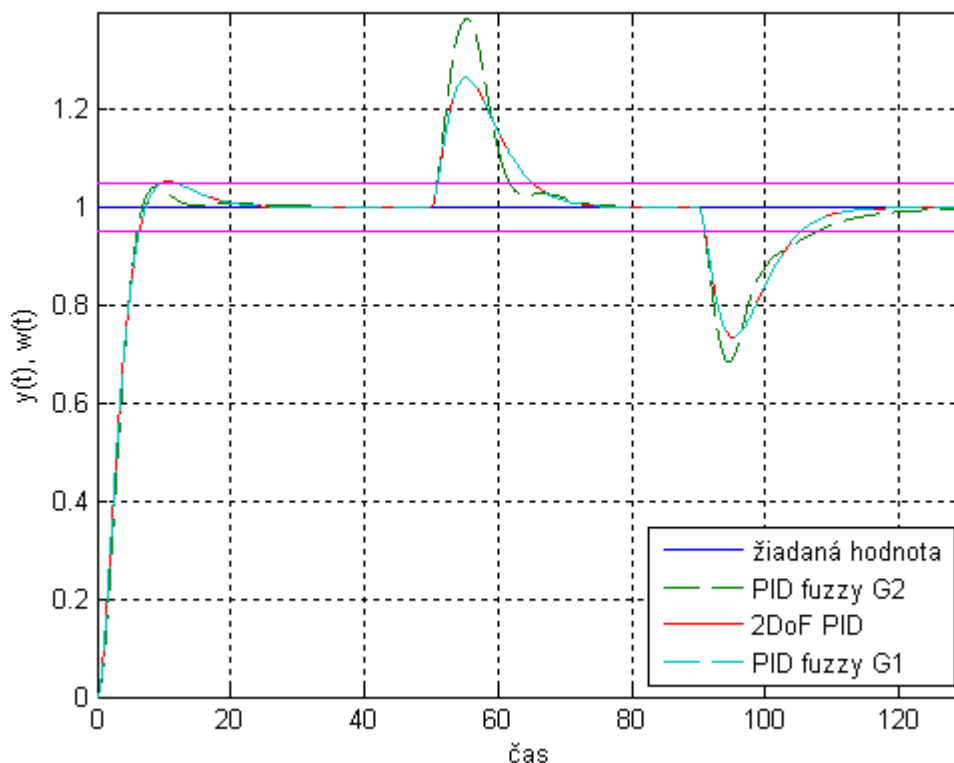
Obr. 40: Porovnanie kvality riadenia fuzzy regulátormi s 2DoF PID regulátorom



Obr. 41: Riadenie sústavy pre 3 skokové zmeny žiadanej veličiny

Fuzzy regulátor za krátky čas dosiahol žiadanú hodnotu $w(t)$ aj pri skokových zmenách (obr. 41)

Ako vidno na obr. 42, obidva navrhnuté *PID* FR odstraňujú poruchy, ktoré sa prejavili v čase 50 a 90.



Obr. 42: Riadenie sústavy pri výskyte porúch

2.4 Robustné riadenie

Robustné riadenie je oblasť teórie riadenia, ktorá sa zaoberá analýzou a riadením systémov s neurčitostami. Sú to také systémy, ktoré obsahujú neurčitosti spôsobené rôznymi poruchami procesu, napr. náhodnými zmenami vstupných a výstupných veličín, nepresnosťami matematického modelu procesu, rôznymi zjednodušeniami pri identifikácii modelov procesov, kedy model systému neodzrkadľuje reálne vlastnosti procesu s dostatočnou presnosťou [37].

Hlavným cieľom teórie robustného riadenia je rozpracovať metódy analýzy robustných vlastností reálnych objektov a navrhnúť také regulátory, ktoré zabezpečia robustnosť spätnoväzbového systému, čiže spätnoväzbový systém bude schopný zachovať si základné kvalitatívne vlastnosti riadenia ako je stabilita, kvalita regulácie, pri pôsobení rôznych porúch vrátane zmeny parametrov [7].

Návrh robustných regulátorov je vysoko aktuálny pre reálnu prax, ktorá žiada, aby teória riadenia predložila vysoko účinné metódy syntézy regulátorov, schopných pracovať v reálnych podmienkach [7].

2.4.1 Neurčitosti robustného riadenia

Neurčitosť je charakterizovaná ako stav s nedostatočnou informovanosťou, keď nemožno presne opísať existujúci stav alebo budúci výstup. Typické neurčitosti pri riadení technologických procesov sú [21]:

1. Poruchy a šumy – sú to neovplyvniteľné vstupné a výstupné signály procesu, ktoré nezávisia od vnútorných parametrov procesu.
2. Neurčitosti modelu – sú to nepresnosti matematického modelu, ktoré sú spôsobené:
 - použitím zjednodušujúcich predpokladov pri vytváraní matematického modelu,
 - linearizáciou nelineárneho modelu procesu,
 - zanedbaním dopravného oneskorenia v modeli,
 - zanedbaním časovej premennosti parametrov v modeli,
 - zanedbaním rýchlej dynamiky,
 - nepresnosťami merania.

2.4.2 Robustnosť PID FR

Na dôkaz robustnosti PID FR boli zvolené dva neurčité parametre (86) prenosovej funkcie astatického systému (85)

$$G_S(s) = \frac{K}{s(Ts+1)^i} = \frac{1}{s} \frac{1}{3,5s+1} \quad (85)$$

a to zosilnenie K a časová konštanta T .

$$K \in \langle 0.5, 1.5 \rangle \quad (86)$$

$$T \in \langle 3, 4 \rangle$$

Kombináciou horných a dolných hraníc neurčitých parametrov zosilnenia K a časovej konštanty T , vznikli štyri dvojice parametrov (87), z ktorých boli vytvorené štyri prenosové funkcie astatického systému (88). Prenosová funkcia astatického systému (85) predstavovala nominálny systém.

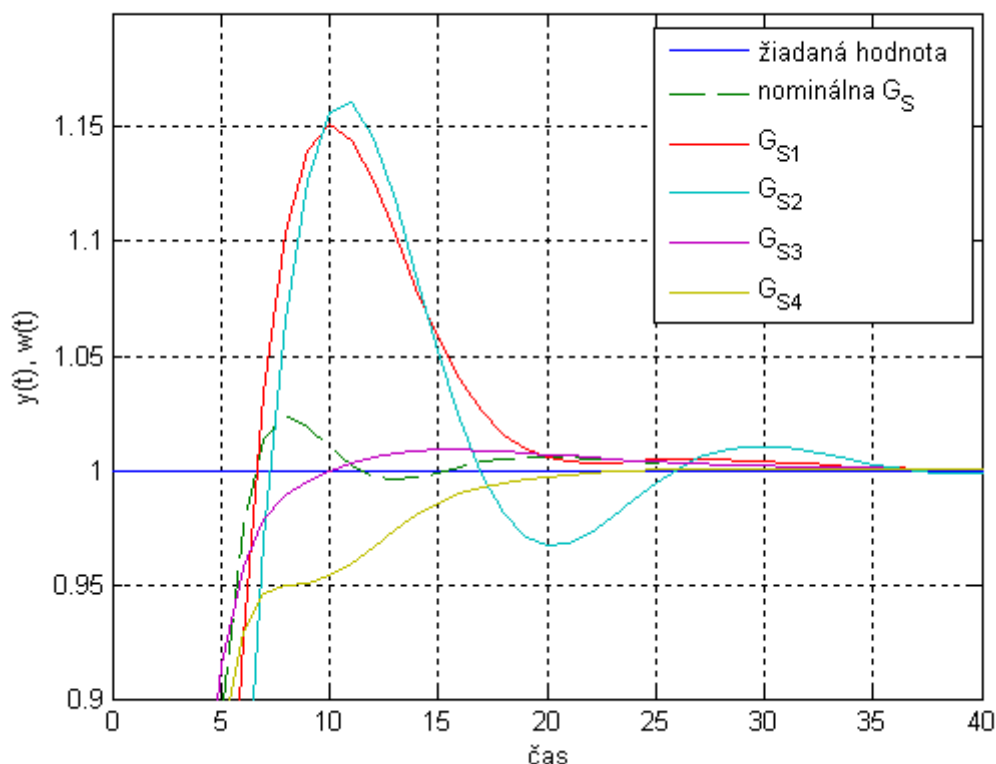
$$\begin{aligned} [K_1, T_1] &= [0.5, 3] \\ [K_1, T_2] &= [0.5, 4] \\ [K_2, T_1] &= [1.5, 3] \\ [K_2, T_2] &= [1.5, 4] \end{aligned} \quad (87)$$

$$\begin{aligned}
 G_{S1}(s) &= \frac{1}{s} \frac{0.5}{3s + 1} \\
 G_{S2}(s) &= \frac{1}{s} \frac{0.5}{4s + 1} \\
 G_{S3}(s) &= \frac{1}{s} \frac{1.5}{3s + 1} \\
 G_{S4}(s) &= \frac{1}{s} \frac{1.5}{4s + 1}
 \end{aligned}
 \tag{88}$$

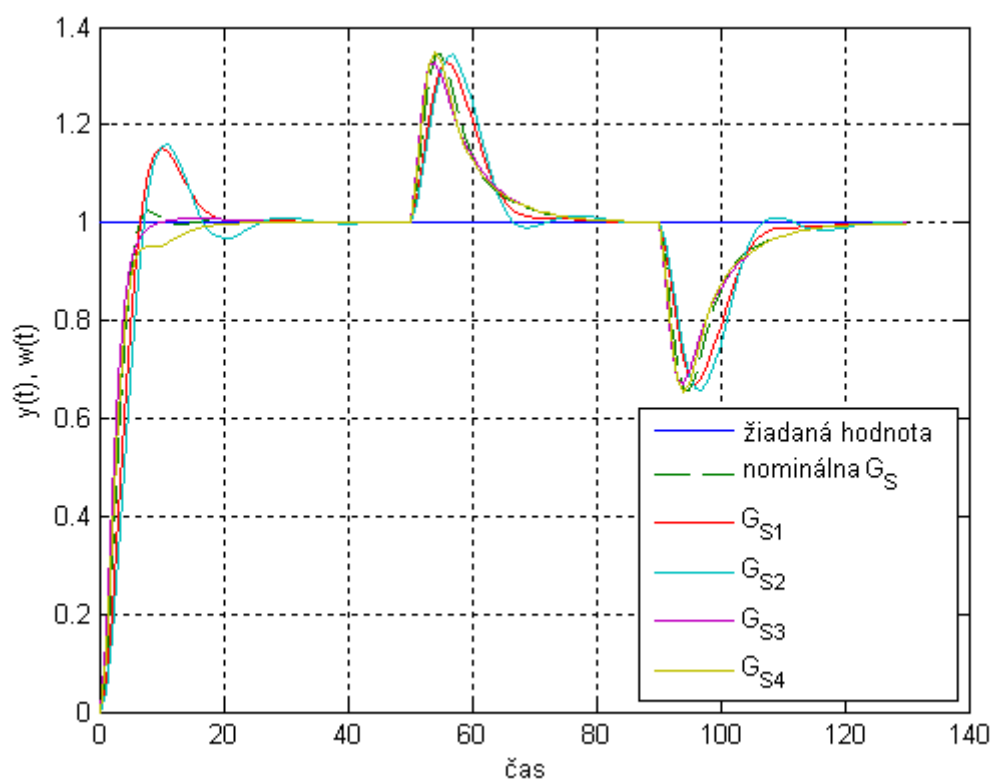
Pre každú z prenosových funkcií (85) a (88) boli vytvorené tréningové dáta, ktorých spojením vznikol jeden súbor tréningových dát. Tento súbor bol použitý na vytvorenie *PID* fuzzy regulátora. Bolo odsimulované riadenie *PID* fuzzy regulátorom pre všetky prenosové funkcie (85) a (88).

Riadenie nominálneho systému (85) a štyroch hraničných perturbovaných systémov (88) *PID* fuzzy regulátorom je na obr. 43.

Fuzzy regulátor dosiahol žiadanú hodnotu pre všetky uvažované systémy zo zvoleného intervalu (86), čiže tento nominálny aj perturbované fuzzy regulátory sú robustné.



Obr. 43: Riadenie robustným regulátorom



Obr. 44: Riadenie robustným regulátorom pri výskyte poruchy

3 Záver

Prvou časťou diplomovej práce *Návrh fuzzy riadenia pre systémy s integračnou činnosťou* bol výber vhodných metód pre výpočet parametrov PID regulátora.

V práci je porovnaných 8 metód na návrh parametrov regulátora. Vhodná metóda bola zvolená na základe schopnosti regulátora dosiahnuť žiadanú hodnotu, odstrániť poruchy bez trvalej regulačnej odchýlky v čo najkratšom čase.

Najvhodnejšie metódy na návrh parametrov regulátora boli metóda násobného dominantného pólu a jej konfigurácia *2DoF*. *PI* a *PID* regulátor navrhnutý *MNDP* dosiahol žiadanú hodnotu a odstraňoval poruchy. Pri použití tejto metódy však ostali prekmity. Použitím *MNDP* v *2DoF* konfigurácii, bolo dosiahnuté zníženie prekmitov, pričom odstraňovanie poruchy ostalo zachované. V prípade potreby odstrániť neprípustne veľký prekmit pri skokovej zmene žiadanej veličiny je teda vhodné použitie práve tejto metódy.

Dosiahnutie žiadanej hodnoty ako aj odstránenie poruchy bolo tiež zabezpečené Naslinovým *PI* regulátorom a *PID* regulátorom navrhnutým metódou podľa Chien-Hrones-Reswicka. Naopak nevhodné metódy, ktoré neodstraňovali poruchy, boli metódy *MOM* a *MPM*.

Druhou časťou diplomovej práce bol návrh fuzzy regulátora na riadenie systémov s integračnou činnosťou. Z metód na návrh parametrov regulátora bol vybratý regulátor (*2DoF PID*), ktorý najlepšie spĺňal kritériá kvality riadenia. Tento regulátor slúžil na získanie tréningových údajov pre návrh FR.

V práci boli navrhnuté 2 fuzzy regulátory, ktorými boli dosiahnuté porovnateľné výsledky. Jeden regulátor bol typu *PID*, kde na inicializáciu fuzzy systému bola použitá funkcia *genfis1*, regulátor mal 3 vstupy s gaussovskými funkciami príslušnosti a 8 pravidiel.

Druhý regulátor vznikol paralelným zapojením *PI* a *PD* fuzzy regulátora. *PD* fuzzy regulátor mal 1 pravidlo a *PI* fuzzy regulátor mal 2 pravidlá a na inicializáciu fuzzy systému bola použitá funkcia *genfis2*. Druhý regulátor mal menšie preregulovanie a kratší čas regulácie t_{REG} , výstup viac kmital a hodnoty *IAE* a *ISE* boli väčšie (tab. 8) a (obr. 40) ako pri prvom regulátore.

Z nasledovného porovnania ukazovateľov kvality regulácie (tab. 8) možno usúdiť, že je možné navrhnuť fuzzy regulátor, ktorý je schopný prekonať vo zvolených kritériách kvality klasické *PID* regulátory navrhnuté *experimentálnymi* a *analytickými metódami*.

V závere bola overená robustnosť *PID* FR pre zvolený interval neurčitých parametrov zosilnenia *K* a časovej konštanty *T*. Fuzzy regulátor dosiahol žiadanú hodnotu pre všetky prenosové funkcie zo zvoleného intervalu (86), čiže tento fuzzy regulátor je robustný (obr. 43) a (obr. 44).

Zoznam použitej literatúry

[1]	Šolek, M.: Nastavovanie parametrov fuzzy regulátora genetickými algoritmi, STU, Fakulta elektrotechniky a informatiky.
[2]	http://sk.wikipedia.org/wiki/Fuzzy_logika
[3]	Fedor, P., Perduková, D.: Fuzzy inverzné riadenie, Elektroenergetika Journal, Technical University of Košice, 2009.
[4]	Schlegel, M.: Fuzzy regulátor, Plzeň, 2002, http://www.rexcontrols.cz/downloads/clanky/flcu_tutor.pdf
[5]	Holiš, M.: Autoreferát dizertačnej práce: POUŽITIE NEURO – FUZZY SYSTÉMOV PRI RIADENÍ KONTINUÁLNYCH PROCESOV V PODMIENKACH NEURČITOSTI, STU Strojnícka fakulta BA, 10/2001.
[6]	Bihuňová, M.: SEMESTRALNY PROJEKT: Návrh fuzzy regulátorov v prostredí Matlab, FChPT KIRP BA, 2005.
[7]	Veselý, V. – Harsányi, L.: Robustné riadenie dynamických systémov, Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2007
[8]	Sónak, M.: Návrh riadenia pre systémy s integračnou činnosťou, FChPT KIRP BA, 2010.
[9]	Vítečková, M. – Víteček, A.: Základy automatické regulace, VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2008.
[10]	http://www.spslevice.sk/SOC/SOC%20-%20PRI/28-Astaticke_regulovane_sustavy.htm
[11]	Vítečková, M., Víteček, A.: Základy automatické regulace, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Ostrava 2008
[12]	Inžinierske metódy nastavovania parametrov regulátorov, http://www.kasr.elf.stuba.sk/predmety/rstp/Cvicenia/Navody%20na%20cvicenia/RSTP_clanok.pdf
[13]	Hulata, T.: Návrh neuro-fuzzy regulátorov v prostredí Matlab, bakalárska práca, FChPT KIRP BA, 2009
[14]	Moravec, T.: Fuzzy množiny, Seminární práce z předmětu ZTVH, ČVUT v Praze – fakulta Stavební, 2004
[15]	http://sk.wikipedia.org/wiki/Fuzzy_logika
[16]	Modrlák, O.: Teorie automatického řízení II., FUZZY ŘÍZENÍ A REGULACE, TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI, 19.4.2002
[17]	http://www.ai-cit.sk/source/publications/thesis/master_thesis/1996/soltys/html/node12.html
[18]	Raček, M., Kmeť, P.: ANALÝZA POMOCOU ZHLUKOVANIA, TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH FEI, KATEDRA KYBERNETIKY A UMELEJ INTELIGENCIE, Apríl 2003
[19]	Vyskočil, J.: Fuzzy-neuro a genetické prediktívne riadenie, FEI STU BA, Máj, 2007

[20]	Vlkanová, J.: Prediktívne riadenie s fuzzy modelom (dipl. práca), FChPT STU, ÚIAM, OIRP, 2007
[21]	Bakošová, M.: Robustné riadenie, Systémy s jedným neurčitým parametrom, Systémy s intervalovými neurčitostami, prednáškové prezentácie
[22]	Bakošová, M. – Fikar, M.: Riadenie procesov, STU Bratislava, 2008
[23]	Vasičkaninová, A., Bakošová, M., Dvoran, M.: Tvorba neuro – fuzzy modelov metódou Anfis, AT&P journal 11/2006
[24]	Vítečková, M. – Víteček, A.: Základy automatické regulace, VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2006.
[25]	Vítečková, M.: Journal of Cybernetics and Informatics, volume8, 2009.
[26]	Slávik, J.: RIADENIE NELINEÁRNEJ TEPELNEJ SÚSTAVY, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 5/2006
[27]	Veselý, V. – Drahoš, P.: Inžinierske metódy nastavovania parametrov regulátorov (1), AT&P journal 2/2004
[28]	Vítečková, M. , Víteček, A.: SEŘIZOVÁNÍ REGULÁTORŮ SE DVĚMA STUPNI VOLNOSTI PRO INTEGRAČNÍ REGULOVANÉ SOUSTAVY S DOPRAVNÍM ZPOŽDĚNÍM, International Conference Cybernetics and Informatics, ŽDIAR, Slovak Republic, 10-14/2/2008
[29]	Oravec, J.: Tvorba programového systému pre syntézu regulátorov, Diplomová práca, FChPT KIRP BA, 2010.
[30]	Kolesárova, A. – Kováčová, M.: FUZZY MNOŽINY a ich aplikácie, Vydavateľstvo STU, Bratislava, 2004.
[31]	http://marcelm.szm.com/
[32]	http://www.root.cz/clanky/ako-pracuju-fuzzy-systemy/
[33]	http://www2.fiit.stuba.sk/~kapustik/ZS/Clanky0607/petriscak/index.html
[34]	Borošová, Z.: Fuzzy modelovanie dynamiky chemického procesu v prostredí Matlab, Bratislava 2005
[35]	Wenchich, J.: IDENTIFIKÁCIA VYBRANÝCH PROCESOV METÓDOU ANFIS, 2009
[36]	Březina, T. – Singule, V. – Houška, P. – kol.: Řízení mechatronických soustav, MECHATRONICKÝCH SOUSTAV, VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
[37]	Kórka, T.: Robustné riadenie chemickotechnologických procesov, Semestrálny projekt, Bratislava 2009
[38]	Veselý, V. – Harsányi, L.: Robustné riadenie dynamických systémov, Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2007
[39]	Pekař, L. - Prokop, R.: Algebraic Control of Integrating Processes with Dead Time by Two Feedback Controllers in the Ring RMS, INTERNATIONAL JOURNAL OF CIRCUITS, SYSTEMS AND SIGNAL PROCESSING, Issue 4, Volume 2, 2008

Prílohy

FIS pre PD

```
[System]
Name='gfism1'
Type='sugeno'
Version=2.0
NumInputs=2
NumOutputs=1
NumRules=1
AndMethod='prod'
OrMethod='probor'
ImpMethod='prod'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='wtaver'
```

```
[Input1]
Name='in1'
Range=[-0.2654 0.4674]
NumMFs=1
MF1='in1cluster1': 'gaussmf', [0.1295 -0.0071]
```

```
[Input2]
Name='in2'
Range=[-0.1452 0.0990]
NumMFs=1
MF1='in2cluster1': 'gaussmf', [0.0431 0.0018]
```

```
[Output1]
Name='out1'
Range=[-0.6881 3.2096]
NumMFs=1
MF1='out1cluster1': 'linear', [-0.0305 1.5499 9.4377e-005]
```

```
[Rules]
1 1, 1 (1) : 1
```

FIS pre PI

```
[System]
Name='gfism2'
Type='sugeno'
Version=2.0
NumInputs=2
NumOutputs=1
NumRules=2
AndMethod='prod'
OrMethod='probor'
ImpMethod='prod'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='wtaver'
```

```
[Input1]
Name='in1'
Range=[-0.2654 0.4674]
NumMFs=2
MF1='in1cluster1': 'gaussmf', [0.1036 -0.0025]
MF2='in1cluster2': 'gaussmf', [0.1036 -0.0172]
```

```
[Input2]
Name='in2'
Range=[-2.5839 1.2097]
NumMFs=2
MF1='in2cluster1': 'gaussmf', [0.5365 0.0093]
MF2='in2cluster2': 'gaussmf', [0.5365 -2.5257]

[Output1]
Name='out1'
Range=[-0.5708 0.9982]
NumMFs=2
MF1='out1cluster1': 'linear', [1.2259 0.1269 -0.0283]
MF2='out1cluster2': 'linear', [1.5691 0.2146 0.0857]

[Rules]
1 1, 1 (1) : 1
2 2, 2 (1) : 1
```

FIS pre PID

```
[System]
Name='fism2'
Type='sugeno'
Version=2.0
NumInputs=3
NumOutputs=1
NumRules=8
AndMethod='prod'
OrMethod='max'
ImpMethod='prod'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='wtaver'

[Input1]
Name='input1'
Range=[-0.1291 0.4674]
NumMFs=2
MF1='in1mf1': 'gaussmf', [0.2308 -0.1371]
MF2='in1mf2': 'gaussmf', [0.2492 0.4702]

[Input2]
Name='input2'
Range=[-0.1452 0.0990]
NumMFs=2
MF1='in2mf1': 'gaussmf', [0.1329 -0.1534]
MF2='in2mf2': 'gaussmf', [0.1111 0.0701]

[Input3]
Name='input3'
Range=[0 1.2097]
NumMFs=2
MF1='in3mf1': 'gaussmf', [0.5157 -0.0023]
MF2='in3mf2': 'gaussmf', [0.5174 1.2050]

[Output1]
Name='output'
```

```

Range=[ -0.0405  0.9982]
NumMFs=8
MF1='out1mf1': 'linear', [-0.1443  0.0347  0.3795 -0.6111]
MF2='out1mf2': 'linear', [0.1304 -0.0637 -0.0460 -0.0574]
MF3='out1mf3': 'linear', [0.1339  0.2006 -0.1461  0.1540]
MF4='out1mf4': 'linear', [-0.0388  0.0383 -0.0365 -0.0152]
MF5='out1mf5': 'linear', [0.7562  0.4726 -0.1669  0.1525]
MF6='out1mf6': 'linear', [0.3911 -0.0964 -0.2611  0.1460]
MF7='out1mf7': 'linear', [-0.3513  2.6018  0.4686  0.9809]
MF8='out1mf8': 'linear', [0.5551  0.0073  0.3444  1.0922]

```

```

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

```

M-file *navrh_astatG1.m*

```

sim('tren')
y;
save y.dat y -ascii
load y.dat -ascii;yas=y
t=yas(:,1);e=yas(:,2);de=yas(:,3);ie=yas(:,4);u=yas(:,5);du=yas(:,6);
%=====
%=====
x=[e de ie];y=u;
trnData = [x y];
numMFs =2;
mfType = 'gaussmf';
epoch_n =3;
in_fismat = genfis1(trnData,numMFs,mfType);
writefis(in_fismat,'fism1');%type fis3.fis;
a=readfis('fism1');
plotmf(a,'input', 1),title('gaussmf FP pre vstup
e'),xlabel('e'),ylabel('stupeň príslušnosti'),grid,pause
plotmf(a,'input', 2),title('gaussmf FP pre vstup
de'),xlabel('de'),ylabel('stupeň príslušnosti'),grid,pause
plotmf(a,'input', 3),title('gaussmf FP pre vstup
ie'),xlabel('ie'),ylabel('stupeň príslušnosti'),grid,pause

out_fismat = anfis(trnData,in_fismat,10);
writefis(out_fismat,'fism2');
a=readfis('fism2');
ytz=evalfis(x,out_fismat);
plot(t,y,t,ytz),title('Akčný zásah');
xlabel('t'),ylabel('u')
grid
legend('u namerané','u navrhnuté z ANFISU'),pause
ruleview('fism2'),pause
surfview('fism2'),pause
fismat1=readfis('fism2');
type fism2.fis

```

M-file *navrh_astatG2.m*

```
close all
clear all;clc;pinit
sim('tren')
y;
save y.dat y -ascii
load y.dat -ascii;yas=y

t=yas(:,1);e=yas(:,2);de=yas(:,3);ie=yas(:,4);u=yas(:,5);du=yas(:,6);
%=====
%=====
x=[e de];y=[du]; trnData = [x y];
out_fismat =genfis2(x,y,0.5);
out_fismat =genfis2(x,y,0.5);
writefis(out_fismat,'gfism1');
[ep,irr,orr,arr]=evalfis(x,out_fismat);
save ep.dat ep -ascii
plot(t,y,t,ep)
grid
xlabel('čas'),ylabel('')
title('Akčný zásah')
legend('trénovacie údaje','výstup z genfis2 e,de');pause
ruleview('gfism1');pause
surfview('gfism1');pause
fismat1=readfis('gfism1');
type gfism1.fis
%=====
%=====

x=[e ie ];y=[u]; trnData = [x y];
out_fismat =genfis2(x,y,0.2);
out_fismat =genfis2(x,y,0.2);
writefis(out_fismat,'gfism2');
[ep,irr,orr,arr]=evalfis(x,out_fismat);
save ep.dat ep -ascii
figure(2)
plot(t,y,t,ep)
grid
xlabel('čas'),ylabel('')
title('Akčný zásah')
legend('trénovacie údaje','výstup z genfis2 e,ie');pause

ruleview('gfism2');pause
surfview('gfism2');pause
fismat3=readfis('gfism2');
type gfism2.fis
```

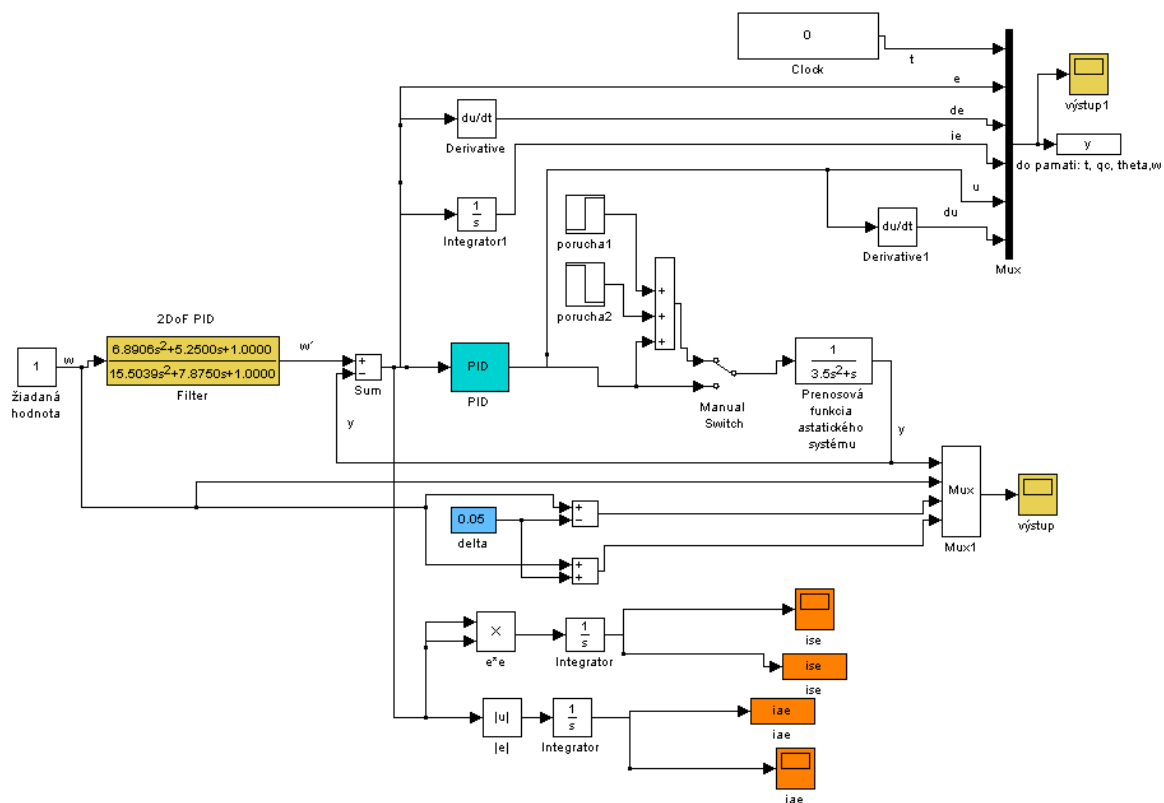
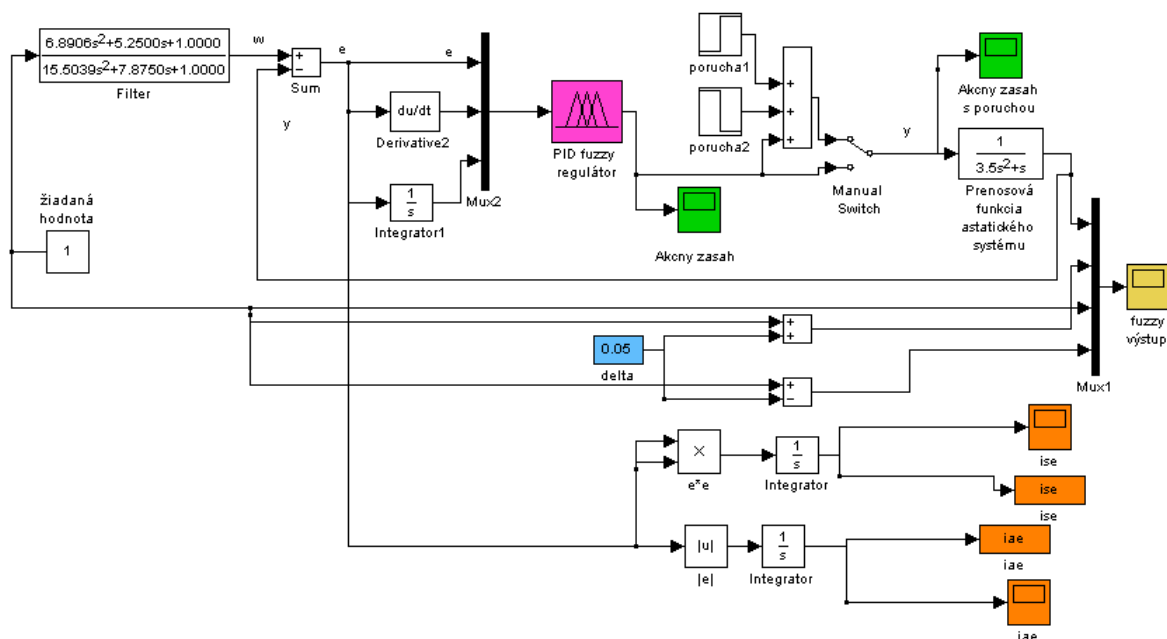
Schéma na získanie trénovacích údajovSchéma na vytvorenie fuzzy PID regulátora (genfis1)

Schéma na vytvorenie fuzzy PID regulátora (genfis2)