

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKÉJ A POTRAVINÁRSKEJ TECHNOLOGIE

**Návrh robustného fuzzy regulátora pre systém
s neurčitostami**

DIPLOMOVÁ PRÁCA

FCHPT-5414-26854

BRATISLAVA 2011

Bc. Vladimír Timuľák

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKÉJ A POTRAVINÁRSKEJ TECHNOLOGIE

**Návrh robustného fuzzy regulátora pre systém
s neurčitostami**

DIPLOMOVÁ PRÁCA

FCHPT-5414-26854

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

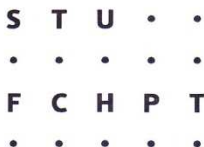
Číslo a názov študijného odboru: 5.2.14 Automatizácia

Školiace pracovisko: OIRP ÚIAM FCHPT

Vedúca záverečnej práce/školiťel': Ing. Anna Vasičkaninová

BRATISLAVA 2011

Bc. Vladimír Timuľák



ZADANIE DIPLOMOVEJ PRÁCE

Študent: **Bc. Vladimír Timulák**
ID študenta: 26854
Študijný program: automatizácia a informatizácia v chémii a potravinárstve
Študijný odbor: 5.2.14 automatizácia
Vedúca práce: Ing. Anna Vasičkaninová

Názov práce: **Návrh robustného fuzzy regulátora pre systém s neurčitostami**

Špecifikácia zadania:

Princípy návrhu fuzzy regulátorov.
Návrh regulátora pre vybraný chemickotechnologický proces s intervalovou parametrickou neurčitostou.
Simulačné overenie navrhnutého regulátora pre vybraný chemickotechnologický proces.

Riešenie zadania práce od: 14. 02. 2011

Dátum odovzdania práce: 21. 05. 2011



Bc. Vladimír Timulák
Študent

prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
Vedúci pracoviska

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

Pod'akovanie

Touto cestou by som sa chcel poďakovať 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.

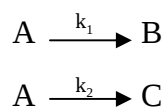
V Bratislave, 21. mája 2011

.....
Vladimír Timulák

Abstrakt

Práca sa zaoberá návrhom robustného neuro- fuzzy regulátora pre systém s neurčitostami. Pri návrhu sa používa systém *Anfis* (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System). Tento systém navrhuje regulátor typu Takagiho- Sugenu na základe experimentálnych údajov. Vhodnosť navrhnutého robustného neuro- fuzzy regulátora bola overená pri riadení chemicko- technologického procesu, a tým bol prietokový chemický reaktor.

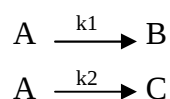
V chemickom reaktore prebiehajú dve paralelné chemické reakcie prvého poriadku, podľa nasledujúcej reakčnej schémy:



Nelineárny model chemického reaktora je odvodený v tvare diferenciálnych rovníc, ktoré tvoria s- funkciu. Pri návrhu robustného neuro- fuzzy regulátora boli využité prostriedky fuzzy logiky, ktoré sú súčasťou Fuzzy Logic Toolboxu v MATLAB-e. Simulačné výsledky riadenia tohto systému ukazujú, že je možné pre daný chemickotechnologický proces navrhnúť robustný neuro- fuzzy regulátor.

Abstract

The work deals with the design of robust neuro- fuzzy controller for system with uncertainties. The system *Anfis* (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System) is used when designing a controller. This system designs Takagi- Sugeno type of regulator, based on experimental data. Appropriateness of the designed robust neuro- fuzzy controller has been verified in the control of chemical process and it was the continuous stirred chemical reactor. Two parallel chemical reactions of first order run over in this chemical reactor. These chemical reactions run over according to the following reaction scheme:



The model is derived in the form of s-function and serves as a source of input data for the design of neuro-fuzzy controllers. Means of fuzzy logic were used when designing a robust neuro- fuzzy controller. These means are part of the Fuzzy Logic Toolbox in MATLAB. Simulation results of the control of this system show that it is possible to design a robust neuro- fuzzy controller for the chemical- technological process.

OBSAH

Zoznam obrázkov	10
Zoznam tabuliek	11
Zoznam skratiek	12
ÚVOD	12
1 TEORETICKÁ ČASŤ	15
1.1. Fuzzy logika	15
1.2. Fuzzy množiny	15
1.3. Fuzzy pravidlá	15
1.4. Fuzzifikácia	16
1.5. Defuzzifikácia.....	16
1.6. Funkcie príslušnosti.....	16
1.7. Fuzzy model	17
1.8. Anfis	17
1.9. Fuzzy regulátor	18
1.10. Architektúra fuzzy regulátora	20
1.11. Jednoduchý fuzzy regulátor typu PID	21
1.12. Robustnosť	22
1.13. Neurčitost' modelu	22
2 PRAKTICKÁ ČASŤ	24
2.1. Prietokový chemický reaktor	24
2.2. Matematické modelovanie.....	26
2.3. Dynamický matematický model.....	26
2.4. Ustálené stavy reaktora a ich analýza.....	28
2.5. Kritéria kvality.....	32
2.6. Identifikácia	32
2.7. Syntéza PID regulátora	34
2.7.1. Smithova - Murrillova metóda	34
2.7.2. Syntéza regulátora metódou Riveru - Morariho	35
2.8. Návrh robustného neuro- fuzzy regulátora	36
2.9. Výsledky simulácie	38
3 ZÁVER	42

POUŽITÁ LITERATÚRA	43
PRÍLOHY	44

Zoznam obrázkov

Obrázok 1: Typy funkcií príslušnosti v MATLAB-e	16
Obrázok 2: Architektúra siete ANFIS	17
Obrázok 3: Architektúra fuzzy regulátora	20
Obrázok 4: Štruktúra jednoduchých PI a PD fuzzy regulátorov	21
Obrázok 5: Schéma chemického reaktora	24
Obrázok 6: Závislosť odvádzaného tepla a generovaného tepla od teploty reakčnej zmesi.....	30
Obrázok 7: Závislosť výťažku hlavného produktu od teploty reakčnej zmesi.....	31
Obrázok 8: Správanie sa systému v nestabilnom stave	31
Obrázok 9: Prechodová charakteristika systému.....	32
Obrázok 10: Porovnanie PCH získanej identifikáciou a pôvodnej prechodovej charakteristiky	34
Obrázok 11: Riadenie systému pomocou PID regulátorov	36
Obrázok 12: Výsledná ANFIS štruktúra	37
Obrázok 13: Inferenčný systém fuzzy	37
Obrázok 14: Pravidlá	38
Obrázok 15: Riadenie pomocou robustného neuro- fuzzy regulátora pre všetky hodnoty reakčných entalpií pri použití 8 gausovských FP	38
Obrázok 16: Riadenie pomocou robustného neuro- fuzzy regulátora pre všetky hodnoty reakčných entalpií pri použití 8 trojuholníkových FP	39
Obrázok 17: Porovnanie robustného neuro- fuzzy regulátora a PID regulátorov	39
Obrázok 18: Porovnanie robustného neuro- fuzzy regulátora a PID regulátora pri riadení systému s poruchou	40

Zoznam tabuliek

Tabuľka 1: Parametre chemického reaktora a hodnoty veličín v ustálenom stave	25
Tabuľka 2: Tabuľka na určenie $f(n)$ a $g(n)$	33
Tabuľka 3: Vzorce pre výpočet parametrov PID regulátora Smithovou- Murrillovou metódou	35
Tabuľka 4: Vzorce pre výpočet parametrov PID regulátora Riveru- Morariho metódou....	35
Tabuľka 5: Porovnanie robustného neuro- fuzzy regulátora a PID regulátorov na základe kritérií kvality... ..	40
Tabuľka 6: Porovnanie robustného neuro- fuzzy regulátora a PID regulátora na základe kritérií kvality... ..	41

Zoznam skratiek

<i>Anfis</i>	- Adaptive Neuro - Fuzzy Inference System
<i>FIS</i>	- Fuzzy Inference System
<i>gaussmf</i>	- gaussovská funkcia príslušnosti
<i>gbellmf</i>	- zvonová funkcia príslušnosti
<i>trapmf</i>	- lichobežníková funkcia príslušnosti
<i>trimf</i>	- trojuholníková funkcia príslušnosti
<i>FP</i>	- funkcia príslušnosti
<i>iae</i>	- integrálne kritérium kvality <i>iae</i> (<i>integral absolute value of error</i>)
<i>ise</i>	- integrálne kritérium kvality <i>ise</i> (<i>integral squared value of error</i>)

ÚVOD

Fuzzy riadenie môžeme definovať ako riadenie, ktoré napodobňuje operátora tým, že sa snaží využívať jeho znalosti získané pri riadení daného procesu. Operátor vie na základe skúseností opísať svoju činnosť. Opis činnosti je v prirodzenom (ľudskom) jazyku, ten však nevieme priamo použiť na prepis do matematických formúl. Riešenie poskytuje fuzzy logika, ktorá umožňuje modelovať činnosť opísanú v prirodzenom jazyku. Opis regulácie sa zjednodušuje na použitie pravidiel typu “AK predpoklad, *POTOM* záver”.

Okrem nesporných výhod, ktoré priniesla implementácia teórie fuzzy množín, majú čisté fuzzy systémy aj nedostatky. Najväčším nedostatkom je neschopnosť “učiť sa”, teda vytvoriť tabuľku pravidiel alebo definovať funkcie príslušnosti iba na základe spracovávaných údajov, napríklad neurónové siete. Tento nedostatok je však možné odstrániť použitím hybridných systémov, rôznymi spôsobmi používajúcimi neurónové siete a fuzzy systémy.

Fuzzy regulátory sú nelineárne regulátory, ktoré sa dajú navrhnuť presne podľa požiadaviek pre konkrétny riadiaci systém. Fuzzy regulátory sa snažia napodobňovať ľudský spôsob vyjadrovania, ktorý je charakterizovaný určitými nepresnosťami v slovných formuláciách jednotlivých logických výpovedí. Znalostná báza fuzzy systémov je tvorená expertnými znalosťami, vyjadrenými vo forme *AK-POTOM* rozhodovacích pravidiel, ktoré sú blízke ľudskému spôsobu vyjadrovania závislostí. Pomocou nich je možné relatívne jednoducho modelovať systémy, ktorých matematický model je príliš komplikovaný alebo nie úplne známy, obsahuje veľké neurčitosti.

Chemické reaktory predstavujú jedny z najdôležitejších zariadení v chemickom priemysle. Ich prevádzku a následne aj riadenie však ovplyvňujú rôzne neurčitosti. Tie sú dôsledkom meniacich sa alebo nie presne známych fyzikálnych parametrov, ako sú napr. rýchlosti chemických reakcií, reakčné entalpie a pod. Inokedy sa menia počas prevádzky reaktorov ich pracovné body. Na chemické reaktory vplývajú aj rôzne poruchy. Všetky tieto skutočnosti môžu nepriaznivo ovplyvniť riadenie alebo dokonca spôsobiť nestabilitu uzavretého regulačného obvodu. Aplikácia robustného riadenia je jedna z ciest, ako prekonať spomenuté problémy, ktoré môžu vážne ovplyvniť riadenie nielen chemických reaktorov, ale aj iných chemickotechnologických procesov.

Prvá kapitola mojej diplomovej práce je venovaná teórii, sú v nej vysvetlené pojmy ako fuzzy logika, fuzzy regulátor a samozrejme základná logika robustnosti. Druhá kapitola je venovaná návrhu robustného neuro- fuzzy regulátora, ktorý riadi teplotu v prietokovom chemickom reaktore.

1 TEORETICKÁ ČASŤ

1.1. Fuzzy logika

Fuzzy logika bola formulovaná roku 1965 Lotfím Zadehom z Kalifornskej univerzity v Berkeley. Fuzzy logika je založená na teórii fuzzy množín, v ktorej sa logické výroky ohodnocujú stupňom príslušnosti, ktorého hodnoty sú v intervale od 0 do 1. V klasickej výrokovej a predikátovej logike, sa výroky ohodnocujú buď ako pravdivé, alebo nepravdivé- v binárnom vyjadrení ako 1 alebo 0. 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“, „dost“ alebo „veľa“. Presnejšie, umožňuje vyjadriť čiastočnú príslušnosť k množine. Základnou výhodou fuzzy logiky je schopnosť matematicky zapísať informácie vyjadrené slovne, čiže umožňuje pracovať s nejednoznačnými pojmami, často používanými v ľudskej reči.

1.2. 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.

1.3. 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 počiatočného stavu popísaného fuzzy množinami dedukujeme následky z nich vyplývajúce. Celý proces uvažovania je možné vyjadriť sústavou *AK-POTOM* pravidiel v tvare: *AK odchýlka je veľká, POTOM nech akčný zásah je veľmi veľký*. V tom prípade je *odchýlka* vstupná premenná, *veľká* je fuzzy množina popisujúca tie veľkosti premennej *odchýlka*, ktoré sa dajú označiť za veľké. *Akčný zásah* je výstupná premenná a *veľmi veľký* je fuzzy množina popisujúca tie veľkosti premennej

akčný zásah, ktoré sa dajú označiť za veľmi veľké. Takýmto spôsobom je možné pokryť rôzne prípady, ktoré môžu nastať a vyjadriť ich následky tak, že pre každý prípad použijeme samostatné AK - *POTOM* pravidlo. Výsledný popis tak vznikne zjednotením jednotlivých pravidiel.

1.4. Fuzzifikácia

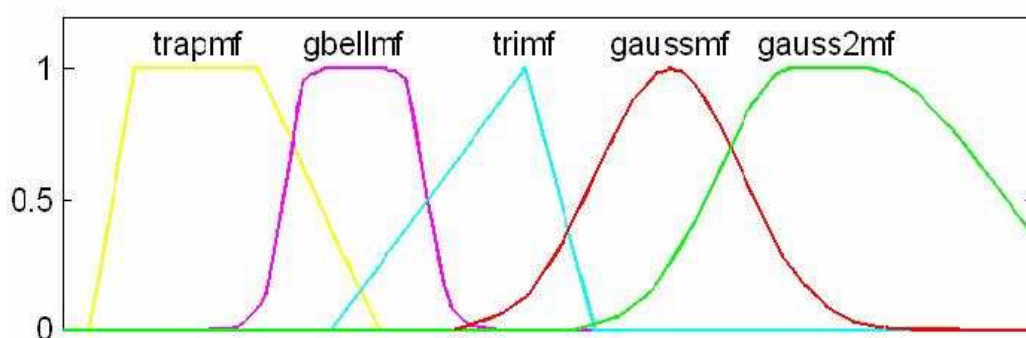
Proces priradovania meraných hodnôt vstupujúcich veličín do fuzzy množín pomocou funkcií príslušnosti sa označuje ako *fuzzifikácia*. Hlavné aplikačné použitie fuzzy množín spočíva v tom, že pomocou nich môžeme interpretovať význam vágných jazykových výpovedí, tieto výpovede kvantifikovať a ich vzťahy formalizovať.

1.5. Defuzzifikácia

Výsledkom činnosti bloku rozhodujúcich pravidiel je súbor funkcií príslušnosti pre jednotlivé termy lingvistických premenných. Pre praktické použitie fuzzy aproximácii je treba priradiť výstupným lingvistickým premenným ostrú hodnotu v prípustnom rozsahu. Tento proces „aproximácie neostrých termov“ ostrou hodnotu sa nazýva *defuzzifikácia*.

1.6. 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.



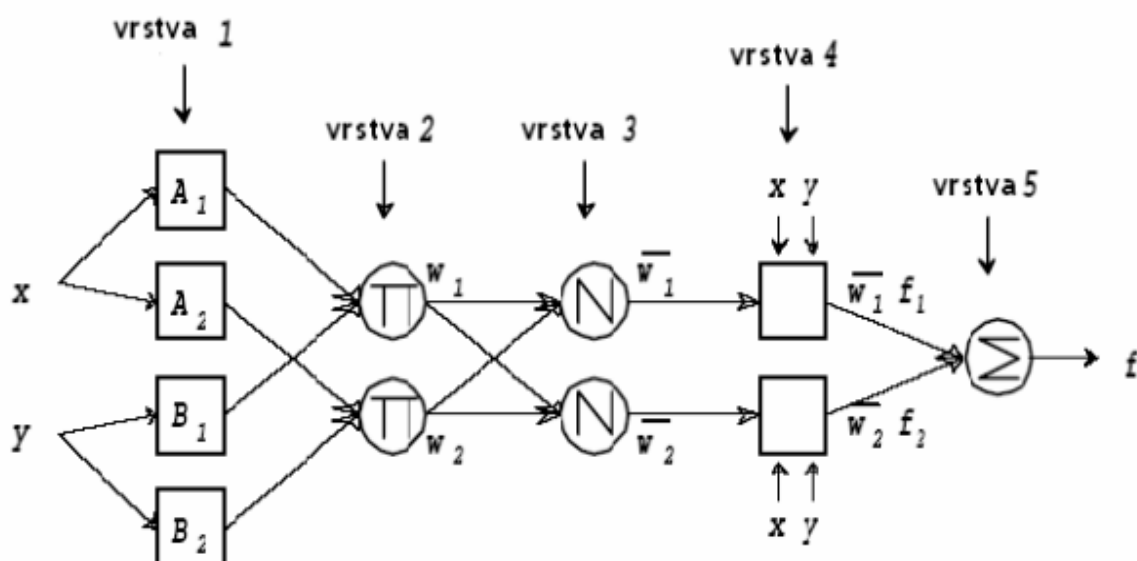
Obrázok 1: Typy funkcií príslušnosti v MATLAB-e

1.7. Fuzzy model

Väčšina procesov chemickej technológie sú procesy nelineárne a hlavne veľmi zložité. V tejto oblasti je známe veľké množstvo rôznych nelineárnych identifikačných metód, no v posledných desaťročiach sa v tejto oblasti stále viac uplatňujú prístupy, ktoré vedú k tvorbe fuzzy modelov.

1.8. ANFIS

Anfis je adaptívna dopredná neurónová sieť, pre jej tréning sa používa hybridná učiaca metóda. Anfis svojou činnosťou zodpovedá TSK (Takagi- Sugeno- Kang) fuzzy regulátoru. Vnútorne je ale reprezentovaný ako päťvrstvová dopredná neurónová sieť, ktorej učenie je založené na minimalizácii odchýlok metódou najmenších štvorcov a zodpovedá úprave premisných a konzekventných parametrov. Tieto parametre nie sú uložené vo váhach spomínanej neurónovej siete, ale v jej uzloch- preto je správne hovoriť o adaptívnej, nie neurónovej sieti (jednou zo základných vlastností neurónových sietí je, že informácie sa ukladajú do medzi neurónových spojení, tzv. synaptických váh).



Obrázok 2: Architektúra siete Anfis

Popis jednotlivých vrstiev :

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

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

1.9. Fuzzy regulátor

Správna voľba vstupných a výstupných premenných fuzzy systému je základným predpokladom jeho správnej činnosti. Ak sa napr. navrhujú fuzzy P, PI, PD, PID alebo stavové regulátory, je dopredu dané, aké vstupné, resp. výstupné veličiny budú vo fuzzy riadiacich pravidlách vystupovať. Veľmi často sa však fuzzy regulátory navrhujú na riadenie systémov, ktoré boli doteraz riadené len ľudskými operátormi, na základe nimi sformulovaných pravidiel. Podobne sa modelujú systémy, ktorých správanie sa je možné opísať len vo forme výpovedí expertov. V takýchto prípadoch je najprv potrebné vykonať analýzu týchto lingvistických pravidiel a určiť, ktoré z vystupujúcich premenných v nich nesú relevantné informácie.

Fuzzy regulátor je vo svojej podstate jednoduchý výpočtový člen, ktorý potrebuje relatívne malé množstvo aritmetických operácií.

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

- riadená sústava je komplikovaná alebo matematicky ťažko opísateľná, klasické riadiace algoritmy totiž vyžadujú presný matematický opis sústavy, ktorý je často krát obtiažne získať.
- riadená sústava je silne nelineárna, regulácia nelineárnych sústav je často založená

na linearizácii v okolí pracovného bodu. Ashby odvodil, že výkonnosť (zložitosť) regulátora musí byť primeraná výkonnosti (zložitosti) regulovanej sústavy, teda nelineárnu sústavu nemožno dostatočne dobre regulovať lineárnym regulátorom. Fuzzy regulátor je prirodzene nelineárny a je vhodným a dostatočne silným nástrojom na reguláciu nelineárnych sústav.

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

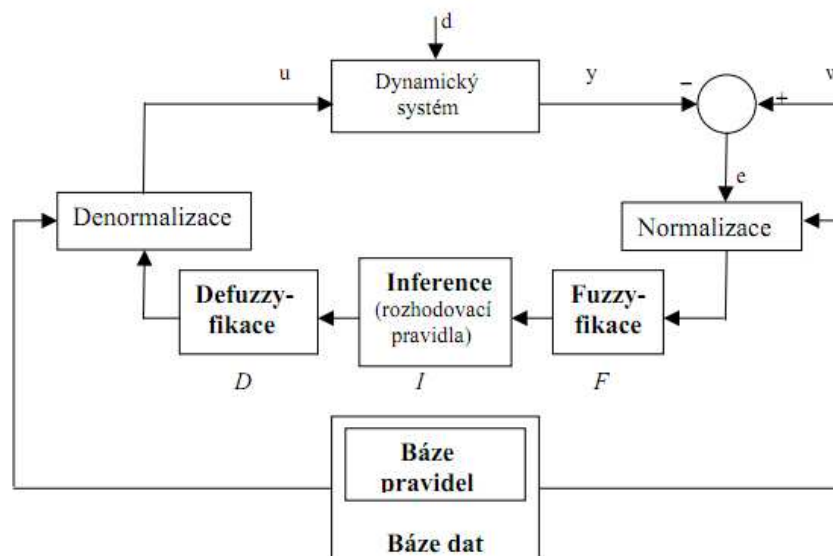
- informácie o stacionárnych stavoch, intervaloch, v ktorých sa pohybujú hodnoty vstupných a výstupných veličín, atď. Všetky tieto informácie o procese na báze znalostí sa označujú ako báza dát.
- kvantitatívne formulované skúsenosti a slovne definované stratégie riadenia, pomocou ktorých je možné realizovať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

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

Sú známe dva základné typy fuzzy regulátorov:

- Fuzzy regulátor Mamdaniho typu
fuzzy pravidlo je v tvare: $AK\ x\ je\ A\ a\ y\ je\ B\ POTOM\ z\ je\ C$
- Fuzzy regulátor Sugenovho typu
fuzzy pravidlo je v tvare: $AK\ x\ je\ A\ a\ y\ je\ B\ POTOM\ z=f(x,y)$

1.10. Architektúra fuzzy regulátora



Obrázok 3: Architektúra fuzzy regulátora

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

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

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

Kompozícia: určenie jednej výslednej funkcie príslušnosti výstupov pomocou stupňov príslušnosti (pravdivosti) predpokladov jednotlivých pravidiel a samotných záverov pravidiel. Často sa používa metóda *max*, pri ktorej je výsledná funkcia príslušnosti vytváraná pridávaním maximálnych hodnôt funkcií príslušnosti záverov bod po bode (zjednotenie fuzzy množín).

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

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

Denormalizácia: za blokom defuzzifikácie môže nasledovať blok denormalizácie, kde sa uskutoční denormalizácia výstupnej veličiny- prepočet na fyzikálne výstupné veličiny.

1.11. Jednoduchý fuzzy regulátor typu PID

Výstup číslicového PI regulátora v prírastkovom tvare, ktorý odstraňuje trvalú regulačnú odchýlku, je

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$$

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

Výstup číslicového PD regulátora, ktorý nezaist'uje nulovú trvalú regulačnú odchýlku, je v tvare:

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

Ak hovoríme o jednoduchom fuzzy regulátore a chceme ho porovnať s PI regulátorom alebo s PD regulátorom, tak vstupom týchto regulátorov je $e(k)$ a $\Delta e(k)$. Výstup je potom nelineárnou funkciou, ktorá závisí na fuzzifikácii, inferencii a defuzzifikácii. Takže pre fuzzy regulátor typu PI bude platiť:

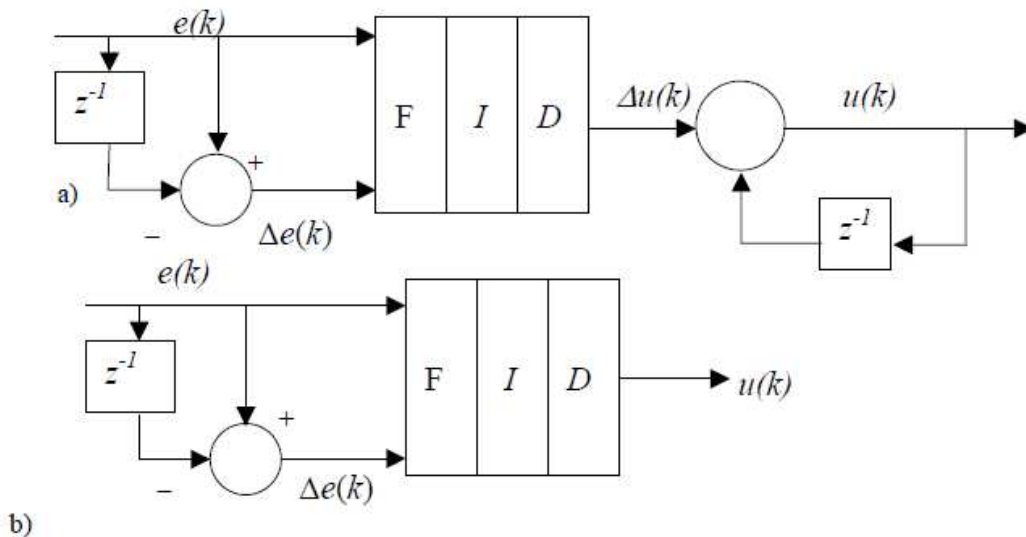
$$\Delta u(k) = F_{PI}(e(k), \Delta e(k)) ;$$

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$$

Fuzzy regulátor typu PD dostávame ako nelineárnou funkciou v tvare:

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

Štruktúra fuzzy regulátorov typu PI a PD je na obr. 4a a 4b



Obrázok 4: Štruktúra jednoduchých PI a PD fuzzy regulátorov

1.12. Robustnosť

Matematický model nie je nikdy dokonalým popisom reality, je len našim porozumením fyzikálnej reality zapísanej na papier, či naprogramovanej v Simulink-u. Vieme, že zostavený matematický model môže byť pomerne presný v okamihu jeho vzniku, ale samotný systém môže meniť svoju konfiguráciu (napríklad pri poruche niektorého subsystemu), hodnoty svojich parametrov (napríklad v dôsledku starnutia elektronických súčiastok), či nachádzať sa v rôznych pracovných režimoch (napríklad zmena lietadlovej hladiny či uhlu nábehu lietadla). Čo s tým môže inžinier navrhujúci regulátor robiť?

Jednou cestou je navrhnuť taký regulátor, ktorý sa bude neustále prispôsobovať detekovaným zmenám v správaní systému, teda upravovať koeficienty či priamo celú štruktúru. Toto je doména adaptívneho riadenia.

Druhou cestou je vziať nesúlad medzi matematickým modelom a fyzikálnou realitou do úvahy už pri samotnom návrhu regulátora, teda pokúsiť sa opísať túto neurčitost' matematického modelu systému kvalitatívne i kvantitatívne a navrhnuť regulátor, ktorý bude uspokojivo pracovať pre celú rodinu systémov. Toto je robustné riadenie. Výsledkom je potom jediný regulátor, ktorý sa už v priebehu riadenia nemusí nijako preladovať, teda je omnoho jednoduchší na implementáciu a tiež spoľahlivejší ako adaptívny regulátor. Je to vlastne úplne bežný regulátor, ktorý však bol navrhovaný s vedomím, že v modeli je nejaká odhadnuteľná nepresnosť.

Hlavným cieľom teórie robustného riadenia dynamických systémov je rozpracovať metódy analýzy robustných vlastností reálnych objektov a navrhnuť vhodné regulátory. Pod pojmom syntéza alebo návrh robustného regulátora budeme rozumieť taký postup a taký výsledok návrhu regulátora, ktorý zabezpečí robustné vlastnosti uzavretého regulačného obvodu pri predpísanej veľkosti neurčitosti.

1.13. Neurčitost' modelu

Predstavou neurčitého dynamického systému sa zaoberá hlavne teória robustného riadenia. Príčiny neurčitosti systémov sú rôzne. Pre návrh riadení musí byť komplexné správanie dynamických systémov aproximované modelmi s relatívne malou zložitou. Rozdiel medzi takými modelmi a skutočným fyzikálnym systémom sa nazýva neurčitost' modelu. Ďalšia príčina neurčitosti je neúplná znalosť niektorých zložiek systému alebo prispôsobenie ich správania zmenám pracovných podmienok. Nakoniec, neurčitost'

pramení z fyzikálnych parametrov, ktorých hodnota je len približne známa alebo sa mení v čase.

Sú dve hlavné triedy neurčitostí:

- **Dynamická neurčitosť**, ktorá vzniká z dynamických zložiek zanedbaných v lineárnom modeli alebo z odchýlok v dynamickej správaní počas riadenia, napríklad, vysokofrekvenčné flexibilné módy, nelinearity pre veľké vstupy, pomalé časové premeny.
- **Parametrická neurčitosť**, ktorá pochádza z neúplnej znalosti hodnôt fyzikálnych parametrov alebo zo zmien týchto parametrov počas riadenia.

Príklady fyzikálnych parametrov spôsobujúcich neurčitosť: koeficienty tlmenia v mechanických systémoch, aerodynamické koeficienty v leteckých zariadeniach, koeficienty v kondenzátoroch a cievkach v elektrických okruhoch, rýchlostné konštanty chemických reakcií, reakčné entalpie chemických reakcií a pod.

Ďalšie dôležité charakteristiky neurčitosti vyjadrujú, či sú neurčitosť lineárne alebo nelineárne, a či sú časovo invariantné alebo časovo premenné. Neurčitosť modelu je celkovo kombinácia dynamickej a parametrickej neurčitosti a môže nastať v niekoľkých rôznych miestach v riadiacej slučke.

2 PRAKTICKÁ ČASŤ

Diplomová práca popisuje návrh robustného neuro- fuzzy regulátora pre nelineárny systém. Návrh regulátora vychádza zo známej štruktúry klasického PID regulátora. Výhodou fuzzy logického regulátora oproti klasickému PID je jednoduchá možnosť zahrnutia znalosti do procesu riadenia v podobe ďalších pravidiel, prípadne nahradenia už hotových pravidiel pravidlami novými. Parametre navrhnutých regulátorom sú získané pomocou toolboxu Fuzzy Logic Toolbox.

2.1. Prietokový chemický reaktor

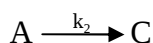
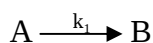
Chemický reaktor je súčasťou mnohých technológií v chemickom a spotrebnom priemysle. Je známe, že riadenie procesu v chemických reaktoroch je pomerne náročné vzhľadom k ich vlastnostiam. Dôsledkom toho sú pomerne veľké nelinearity.

Predpokladajme prietokový chemický reaktor s dokonalým miešaním reakčnej zmesi. Z toho vyplýva, že:

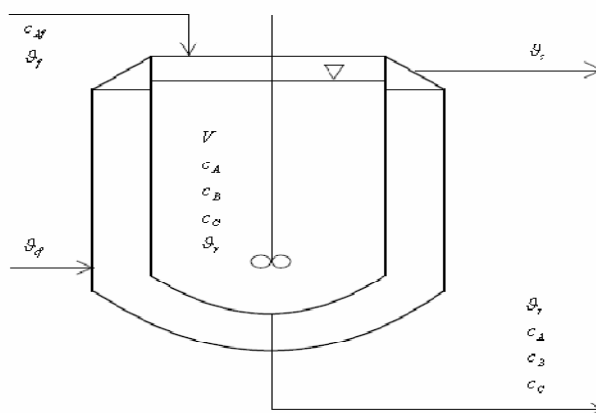
- zloženie a teplota zmesi v celom objeme reaktora sú rovnaké
- zloženie a teplota zmesi na výstupe z reaktora sú také isté ako v reaktore.

Z vyššie uvedených predpokladov vyplýva, že rýchlosť reakcie je v celom objeme reakčnej zmesi rovnaká a teda možno bilanciu vziať na celý reaktor.

V chemickom reaktore prebiehajú dve paralelné chemické reakcie prvého poriadku, podľa nasledujúcej reakčnej schémy:



kde A je reaktant, B je hlavný produkt a C vedľajší produkt.



Obrázok 5: Schéma chemického reaktora

V nasledujúcej tabuľke sú uvedené parametre chemického reaktora a hodnoty veličín v ustálenom stave:

Zn. a hodnota/jednotka	Popis
$c_{Af} = 4.22 \text{ kmol m}^{-3}$	molárna koncentrácia látky A vo vstupnom prúde reakčnej zmesi
$c_{Bf} = 0 \text{ kmol m}^{-3}$	molárna koncentrácia látky B vo vstupnom prúde reakčnej zmesi
$c_{pr} = 4,02 \text{ kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$	špecifická tepelná kapacita reakčnej zmesi
$c_{pc} = 4,182 \text{ kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$	špecifická tepelná kapacita chladiacej zmesi
$g_1 = E_1/R = 9850 \text{ K}$	podiel aktivačnej energie a univerzálnej plynovej konštanty
$g_2 = E_2/R = 22019 \text{ K}$	podiel aktivačnej energie a univerzálnej plynovej konštanty
$k_{01} = 1.55e11 \text{ min}^{-1}$	predexponenciálny faktor
$k_{02} = 4.55e25 \text{ min}^{-1}$	predexponenciálny faktor
$q_r = 0,015 \text{ m}^3\text{min}^{-1}$	objemový prietok reakčnej zmesi
$q_c = 0,004 \text{ m}^3\text{min}^{-1}$	objemový prietok chladiaceho média
$V_r = 0.22 \text{ m}^3$	objem reakčnej zmesi
$V_c = 0.21 \text{ m}^3$	objem chladiaceho média
$\alpha = 42.8 \text{ kJ min}^{-1}\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$	úhrnný koeficient prechodu tepla (koeficient prestupu tepla)
$A_k = 1.5 \text{ m}^2$	teplo-výmenná plocha
$\rho_r = 1020 \text{ kg.m}^{-3}$	stredná hodnota hustoty reakčnej zmesi
$\rho_c = 998 \text{ kg.m}^{-3}$	stredná hodnota hustoty chladiaceho média
$v_f = 326 \text{ K}$	teplota reakčnej zmesi na vstupe
$v_{cf} = 298 \text{ K}$	teplota chladiaceho média na vstupe

Tabuľka 1: Parametre chemického reaktora a hodnoty veličín v ustálenom stave

Neurčitosť modelu reaktora vyplýva zo skutočnosti, že hodnoty dvoch fyzikálnych parametrov, reakčných entalpií, sú známe len približne a pohybujú sa v intervaloch:

$$-\Delta_r H_1 = [4.6 \times 10^4; 5.4 \times 10^4]$$

$$-\Delta_r H_2 = [6.4 \times 10^4; 7.2 \times 10^4]$$

Nominálne hodnoty reakčných entalpií sú stredné hodnoty vo vyššie uvedených intervaloch.

2.2. Matematické modelovanie

Matematický model procesu je matematickou abstrakciou reálneho procesu. Matematický model procesu poskytuje možnosť určiť správanie sa procesu, ak sú známe vstupy. Rozsah platnosti matematického modelu určuje situácie, v ktorých môže byť použitý. Môže to byť napríklad pri riadení spojitých technologických celkov, pri skúmaní dynamických vlastností procesov, pri optimálnom návrhu procesov a pri určení optimálnych prevádzkových podmienok procesu. Skúmanie ľubovoľného typického procesu nás vedie k zostrojeniu jeho matematického modelu, ktorý v sebe zahŕňa základné rovnice a veličiny a opis statiky a dynamiky.

MATERIÁLOVÁ BILANCIA

Súčet hmotností všetkých látkových tokov do systému m_i je rovný súčtu hmotností všetkých vystupujúcich látkových tokov m_o a hmotností akumulovaných častí tokov prúdov v systéme Δm_k .

$$\sum_i m_i = \sum_o m_o + \sum_k \Delta m_k$$

ENTALPIKÁ BILANCIA

Súčet množstiev tepiel, ktorých nosičmi sú všetky látkové toky do systému Q_i , je rovný súčtu množstiev tepiel, ktorých nosičmi sú všetky vystupujúce látkové toky Q_o , tepiel vzniknutých reakciou Q_r a akumulovaných častí tepiel v systéme ΔQ_k .

$$\sum_i Q_i = \sum_o Q_o + \sum_r Q_r + \sum_k \Delta Q_k$$

2.3. Dynamický matematický model

Zjednodušujúce predpoklady na uľahčenie výpočtu a návrhu matematického modelu chemického reaktora:

- tepelná kapacita steny reaktora a jej tepelný odpor sú zanedbateľné
- úhrnný koeficient prechodu tepla je konštantný
- prietok, hustota, špecifická tepelná kapacita, objem reakčnej zmesi sú konštantné

- objemový prietok reakčnej zmesi na vstupe do reaktora a výstupe z reaktora sú rovnaké a predpokladáme ich konštantné
- teplota chladiacej kvapaliny v celom objeme plášťa je rovnaká.

Pre riadenie je dôležitý dynamický model procesu. Pri vytváraní matematického modelu procesu sa vychádza z problému skúmania, pričom je dôležité dokonalé pochopenie skúmaných javov.

Dynamický matematický model reaktora bude odvodený pomocou materiálových bilancií zložiek A a B, entalpickej bilancie reakčnej zmesi a entalpickej bilancie chladiacej zmesi.

Materiálová bilancia reagujúcich zložiek :

$$\frac{dc_A(t)}{dt} = \frac{q_r}{V_r} c_{Af} - c_A(t) \left(k_1(t) + k_2(t) + \frac{q_r}{V_r} \right)$$

$$c_A(0) = c_{A0} = c_A^s$$

$$\frac{dc_B(t)}{dt} = \frac{q_r}{V_r} c_{Bf} - \frac{q_r}{V_r} c_B(t) + c_A(t) k_1(t)$$

$$c_B(0) = c_{B0} = c_B^s$$

kde

$$k_1(t) = k_{01} e^{-\frac{E_1}{R\vartheta_r(t)}}$$

$$k_2(t) = k_{02} e^{-\frac{E_2}{R\vartheta_r(t)}}$$

Entalpická bilancia reakčnej zmesi :

$$\frac{d\vartheta_r(t)}{dt} = \frac{q_r}{V_r} [\vartheta_f - \vartheta_r(t)] + \frac{(-\Delta_r H_1) k_1(t) + (-\Delta_r H_2) k_2(t)}{\rho_r c_{pr}} c_A(t) - \frac{\alpha A_k}{V_r \rho_r c_{pr}} [\vartheta_r(t) - \vartheta_c(t)]$$

$$\vartheta_r(0) = \vartheta_{r0} = \vartheta_r^s$$

Entalpická bilancia chladiacej zmesi :

$$\frac{d\vartheta_c(t)}{dt} = \frac{q_c(t)}{V_r} [\vartheta_{cf} - \vartheta_c(t)] + \frac{\alpha A_k}{V_c \rho_c c_{pc}} [\vartheta_r(t) - \vartheta_c(t)]$$

$$\vartheta_c(0) = \vartheta_{c0} = \vartheta_c^s$$

2.4. Ustálené stavy reaktora a ich analýza

Ustálené stavy sa počítajú pomocou príkazu *fsolve* v MATLAB-e, ktorý vypočíta aj Jacobiho matice pre každý ustálený stav a na základe vlastných čísel týchto Jacobiho matíc sa určí, či je systém stabilný.

ϑ_r^s - teplota reakčnej zmesi v ustálenom stave

ϑ_c^s - teplota chladiaceho média v ustálenom stave

c_A^s - molárna koncentrácia látky A v ustálenom stave

c_B^s - molárna koncentrácia látky B v ustálenom stave

Jacobiho matica pre 1. ustálený stav:

$$\begin{pmatrix} -0.0843 & 0 & 0 & -0.0052 & 0 \\ 0.0157 & -0.0682 & 0 & 0.0049 & 0 \\ 0.0004 & 0 & -0.0682 & 0.0003 & 0 \\ 0.1982 & 0 & 0 & -0.0753 & 0.0712 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0732 & -0.0923 \end{pmatrix}$$

Vlastné čísla matice vypočítané pomocou príkazu *eig*:

$$\lambda_1 = -0.0682$$

$$\lambda_2 = -0.0682$$

$$\lambda_3 = -0.0194$$

$$\lambda_4 = -0.0824$$

$$\lambda_5 = -0.1500$$

Tento ustálený stav je stabilný, pretože všetky hodnoty vlastných čísel sú záporné reálne.

1. ustálený stav: $c_A^s = 3.4136 \text{ kmol.m}^{-3}$

$$c_B^s = 0.7860 \text{ kmol.m}^{-3}$$

$$\vartheta_r^s = 329.2024 \text{ K}$$

$$\vartheta_c^s = 322.7630 \text{ K}$$

Jacobiho matica pre 2. ustálený stav:

$$\begin{pmatrix} -0.2235 & 0 & 0 & -0.0205 & 0 \\ 0.1182 & -0.0682 & 0 & 0.0120 & 0 \\ 0.0371 & 0 & -0.0682 & 0.0084 & 0 \\ 2.0591 & 0 & 0 & 0.1478 & 0.0712 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0732 & -0.0923 \end{pmatrix}$$

Vlastné čísla matice vypočítané pomocou príkazu *eig*:

$$\lambda_1 = -0.0682$$

$$\lambda_2 = -0.0682$$

$$\lambda_3 = 0.0216$$

$$\lambda_4 = -0.0948 + 0.0775i$$

$$\lambda_5 = -0.0948 - 0.0775i$$

Tento stav je nestabilný, pretože hodnoty nemajú zápornú reálnu časť.

2. ustálený stav: $c_A^s = 1.2872 \text{ kmol.m}^{-3}$

$$c_B^s = 2.2317 \text{ kmol.m}^{-3}$$

$$\vartheta_r^s = 353.0216 \text{ K}$$

$$\vartheta_c^s = 341.6665 \text{ K}$$

Jacobiho matica pre 3. ustálený stav:

$$\begin{pmatrix} -0.9833 & 0 & 0 & -0.0332 & 0 \\ 0.3875 & -0.0682 & 0 & 0.0082 & 0 \\ 0.5276 & 0 & -0.0682 & 0.0250 & 0 \\ 13.5007 & 0 & 0 & 0.3768 & 0.0712 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0732 & -0.0923 \end{pmatrix}$$

Vlastné čísla matice:

$$\lambda_1 = -0.0682$$

$$\lambda_2 = -0.0682$$

$$\lambda_3 = -0.3405 + 0.0274i$$

$$\lambda_4 = -0.3405 - 0.0274i$$

$$\lambda_5 = -0.0178$$

Tento ustálený stav je stabilný, pretože všetky hodnoty vlastných čísel Jacobiho matice majú zápornú reálnu časť.

3. ustálený stav: $c_A^s = 0.2926 \text{ kmol.m}^{-3}$
 $c_B^s = 1.6629 \text{ kmol.m}^{-3}$
 $\vartheta_r^s = 368.7095 \text{ K}$
 $\vartheta_c^s = 354.1169 \text{ K}$

Pre analýzu stability je rozhodujúca entalpická bilancia reakčnej zmesi v ustálenom stave. Chemický reaktor je v ustálenom stave, ak platí:

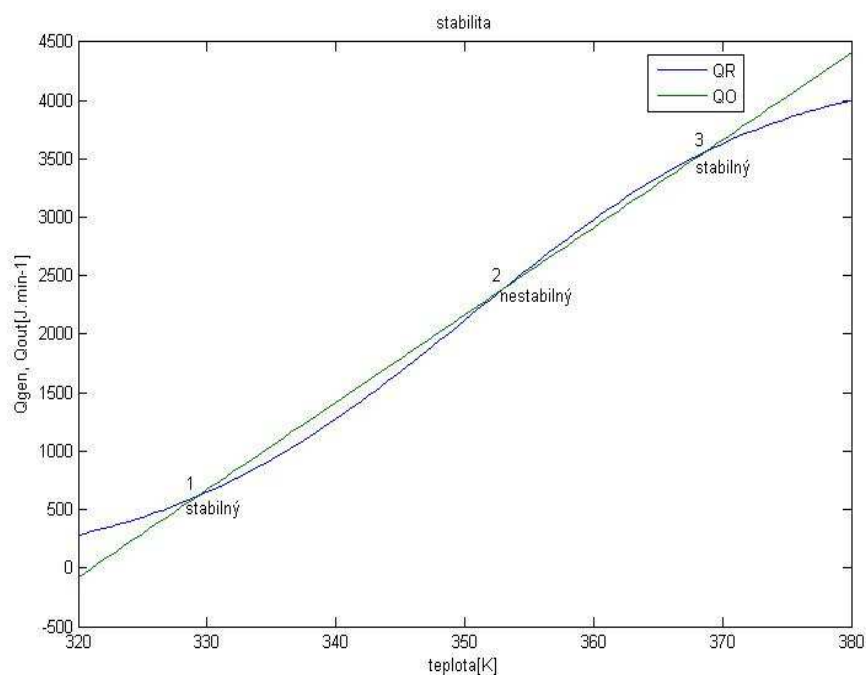
$$\dot{Q}_{GEN}^s = \dot{Q}_{OUT}^s$$

$$\dot{Q}_{GEN}^s = V_r c_A^s ((-\Delta_r H_1) k_1^s + (-\Delta_r H_2) k_2^s)$$

$$\dot{Q}_{OUT}^s = \vartheta_r^s (q_r \rho_r c_{pr} + \alpha A_k) - \alpha A_k \vartheta_c^s - q_r \rho_r c_{pr} \vartheta_f^s$$

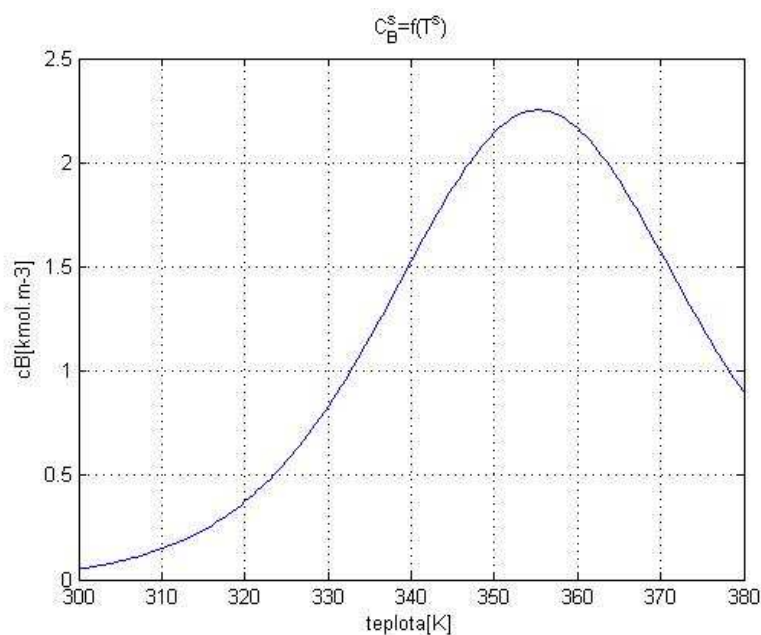
Q_{gen} - teplo generované chemickými reakciami

Q_{out} - teplo odvedené z reaktora cez stenu plášťa a výstupným prúdom reakčnej zmesi



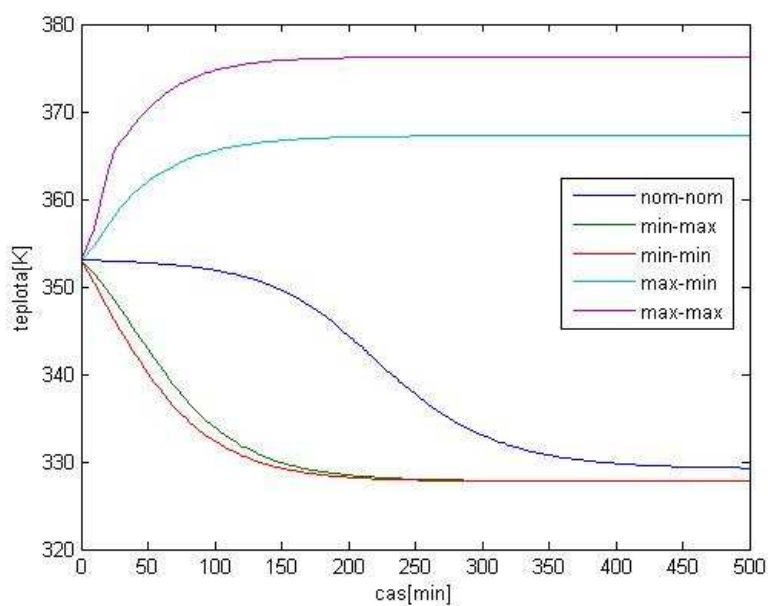
Obrázok 6: Závislosť odvádzaného tepla a generovaného tepla od teploty reakčnej zmesi

Ak má chemický reaktor viac ustálených stavov, stabilné sú tie ustálené stavy, v ktorých smernica priamky rýchlosti odvádzania tepla zo systému je väčšia než smernica dotýčnice ku krivke rýchlosti tvorby tepla chemickými reakciami.



Obrázok 7: Závislosť výťažku hlavného produktu od teploty reakčnej zmesi

Na obrázku 7 je znázornené, že najvyšší výťažok produktu je pri teplote 355.5K a hodnota výťažku je 2.2515 kmol.m⁻³. Na obrázku 8 môžeme vidieť správanie sa systému v nestabilnom stave pri nominálnych hodnotách reakčných entalpií a pri krajných hodnotách reakčných entalpií. Vstupná veličina je konštantná, to znamená, že objemový prietok chladiaceho média sa nemení. Z obrázku vyplýva, že ak je systém v nestabilnom stave, tak sa snaží pri rôznych hodnotách reakčných entalpií dostať do stabilného stavu.



Obrázok 8: Správanie sa systému v nestabilnom stave

2.5. Kritéria kvality

1. *čas regulácie* (t_{reg}) - čas, od ktorého sa riadená veličina dostane natrvalo do okolia žiadanej veličiny

- *integrálne kritériá kvality*:

2. *ise* - plocha kvadratickej odchýlky riadenia:

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

3. *iae* - predstavuje plochu absolútnej hodnoty odchýlky riadenia:

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

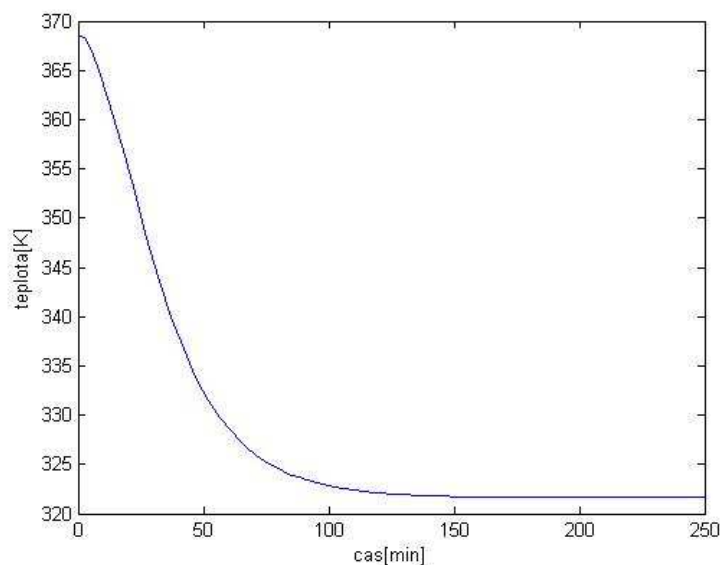
2.6. Identifikácia

Najčastejšie používaným vstupným signálom pre identifikáciu je skoková zmena jednej zo vstupných veličín pri zachovaní ostatných vstupných veličín konštantných. Pred uskutočnením skokovej zmeny je nutné, aby bol skúmaný systém v ustálenom stave.

Prechodová charakteristika bola identifikovaná pomocou Strejcovej metódy. Metóda identifikácie podľa *Strejcovej metódy* sa používa na identifikovanie systémov prvého, ale aj vyšších rádo. Pri tejto metóde sa uvažuje model procesu opísaný pomocou prenosovej funkcie v tvare:

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

kde Z je zosilnenie, T časová konštanta, D dopravné oneskorenie a n je rád systému. Konštanty sa získavajú z prechodovej charakteristiky procesu.



Obrázok 9: Prechodová charakteristika systému

Na základe odozvy chemického reaktora na skokovú zmenu vstupnej veličiny z hodnoty $0.004 \text{ m}^3\text{min}^{-1}$ na $0.01 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ bola získaná prechodová charakteristika. Vstupnou veličinou bol objemový prietok chladiaceho média.

Zosilnenie Z sa vypočítalo ako :

$$Z = \frac{y_{\infty} - y_0}{u_{\infty} - u_0}$$

Na základe preloženia dotyčnice v inflexnom bode prechodovej charakteristiky sa odčítal čas priet'ahu t_u a čas nábehu t_n .

Vypočítala sa hodnota f_s :

$$f_s = \frac{t_u}{t_n}$$

V tabuľke sa vyberie rád systému n tak, aby platilo:

$$f(n) \leq f_s \leq f(n+1)$$

Dopravné oneskorenie D sa určilo ako rozdiel medzi skutočným a fiktívnym časom nábehu t_u

$$D = [f_s - f(n)]t_n$$

pretože platí:

$$t_u = t_n f(n)$$

Časová konštanta T sa určila pomocou hodnôt z riadku funkcie $g(n)$ pre príslušné n . Odčítala sa hodnota $g(n)$ a T sa určila ako

$$T = t_n g(n)$$

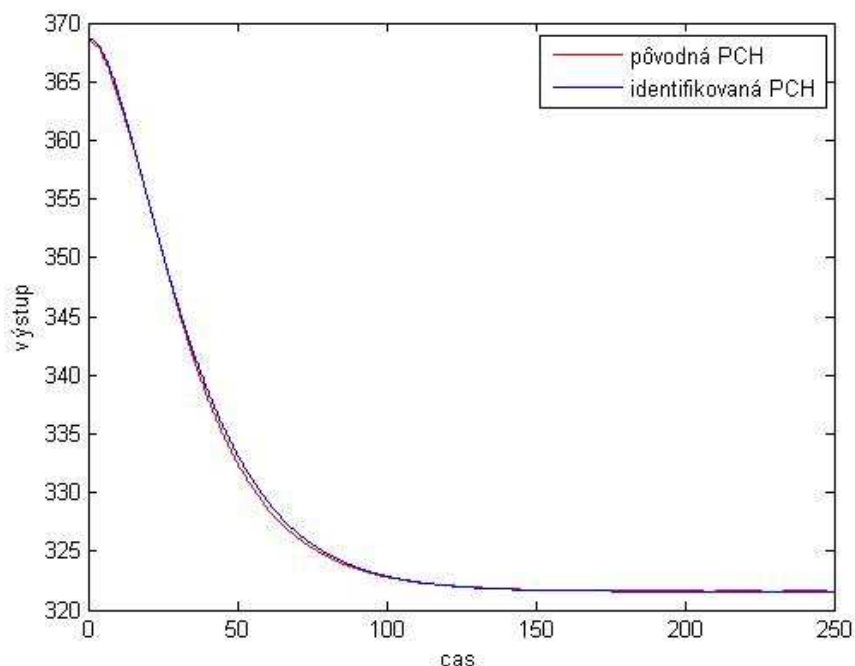
n	1	2	3	4	5	6
f(n)	0.000	0.104	0.218	0.319	0.410	0.493
g(n)	1.000	0.368	0.271	0.224	0.195	0.161

Tabuľka 2: Tabuľka na určenie $f(n)$ a $g(n)$

Výsledný systém je 2. rádu s dopravným oneskorením a je v tvare:

$$G(s) = \frac{-7852.71}{(18.3297s + 1)^2} e^{-0.437s}$$

Na obrázku 10 je grafické zobrazenie porovnania PCH získanej identifikáciou a pôvodnej PCH.



Obrázok 10: Porovnanie PCH získanej identifikáciou a pôvodnej prechodovej charakteristiky

2.7. Syntéza PID regulátora

Na syntézu PID regulátora boli použité nasledovné experimentálne metódy:

- Smithova- Murrillova metóda
- Metóda Riveru- Morariho

2.7.1. Smithova- Murrillova metóda

Smith, Murrill a spol. navrhli parametre regulátora tak, aby minimalizovali integrálne kritéria *iae* a *ise*. Vzťahy vychádzajú zo zmeny žiadanej hodnoty alebo poruchy podmienka pre kritéria:

$$0.1 < \frac{D}{T} < 1$$

Konštanty regulátora vypočítame podľa tabuľky 3.

Regulátor	Z_R	T_I	T_D
PI	$\frac{0.586}{K} \left(\frac{T}{D}\right)^{0.916}$	$\frac{T}{\left[1.03 - 0.165 \frac{D}{T}\right]}$	
PID	$\frac{0.965}{K} \left(\frac{T}{D}\right)^{0.855}$	$\frac{T}{\left[0.796 - 0.147 \frac{D}{T}\right]}$	$0.308T \left(\frac{D}{T}\right)^{0.929}$

Tabuľka 3: Vzorce pre výpočet parametrov PID regulátora Smithovou- Murrillovou metódou

Parametre PID regulátora:

$$Z_r = -0.00079404$$

$$T_i = 63.9051$$

$$T_d = 2.0202$$

Prenos regulátora:

$$\begin{aligned}
 G_R(s) &= Z_R \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s \right) = \\
 &= -0.00079404 \left(1 + \frac{1}{63.9051s} + 2.0202s \right)
 \end{aligned}$$

2.7.2. Syntéza regulátora metódou Riveru- Morariho

Z výslednej prechodovej charakteristiky sú určené konštanty Z , t_u a t_n . Zvolí sa časová konštanta uzavretého regulačného obvodu, podľa vzorca: $t_{URO} > 0,2 \cdot t_n$. Pomocou nich sú potom určené konštanty regulátorov.

Regulátor	Z_r	T_i	T_d	$t_{URO} > 0.2 t_n$
PI	$\frac{2t_n + t_u}{2Zt_{URO}}$	$t_n + \frac{t_u}{2}$		$\frac{t_{URO}}{t_u} > 1.7$
PID	$\frac{2t_n + t_u}{2Z(t_{URO} + t_u)}$	$t_n + \frac{t_u}{2}$	$\frac{t_u t_n}{2t_n + t_u}$	$\frac{t_{URO}}{t_u} > 0.25$

Tabuľka 4: Vzorce pre výpočet parametrov PID regulátora Riveru- Morariho metódou

Parametre PID regulátora:

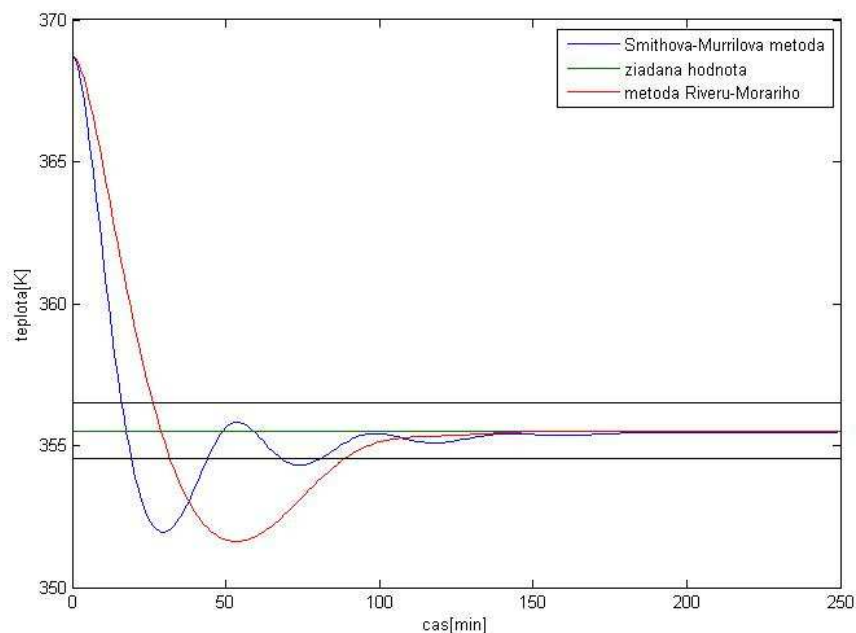
$$Z_r = -0.00036984$$

$$T_i = 52.6178$$

$$T_d = 2.6588$$

Prenos regulátora:

$$G_R(s) = -0.00036984 \left(1 + \frac{1}{52.6178s} + 2.6588s \right)$$



Obrázok 11: Riadenie systému pomocou PID regulátorov

2.8. Návrh robustného neuro- fuzzy regulátora

Fuzzy regulátor je navrhnutý tréňovaním v štruktúre *Anfis*. Pre „tréning“ FIS členov na určenie parametrov funkcií príslušnosti sa používa kombinácia metódy najmenších štvorcov a metódy spätného šírenia. Trénovacie údaje boli získané pomocou riadenia teploty rekčnej zmesi PID regulátormi. PID regulátory (5 regulátorov pre rôzne hodnoty reakčných entalpií) boli navrhnuté na základe nameranej prechodovej charakteristiky reaktora pre nominálne hodnoty reakčných entalpií a pre krajné hodnoty intervalov, v ktorých boli reakčné entalpie uvažované.

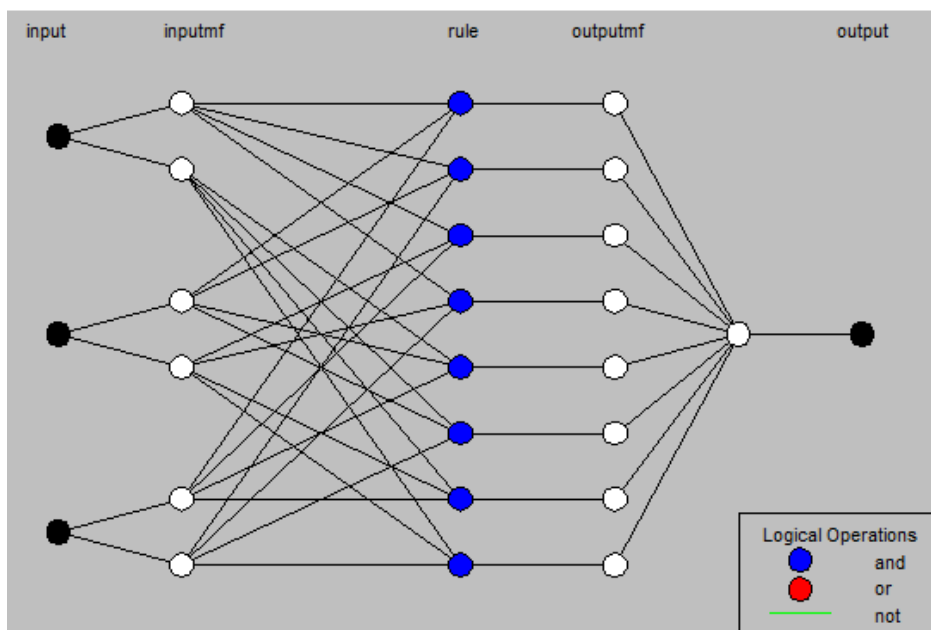
Ak sú k dispozícii trénovacie údaje, v MATLAB-e je možné pomocou funkcie *Anfis* navrhnuť fuzzy regulátor typu Takagiho– Sugenu. V tomto type regulátora sú konsekventy pravidiel lineárnou funkciou vstupov alebo konštantou. Koeficienty regulátora sa určujú metódou najmenších štvorcov pomocou trénovacích údajov. Funkcie príslušnosti sa môžu vybrať z trojuholníkových, lichobežníkových, zvonových, pí, gaussových funkcií príslušnosti, atď. Počet funkcií sa volí obvykle z intervalu 3-7.

Pri návrhu regulátora *Anfis* editor pracoval s tromi vstupnými údajmi e , de , ie a jedným výstupným údajom u . Cieľom zároveň bolo nájsť fuzzy regulátor, ktorý by nemal príliš veľa pravidiel.

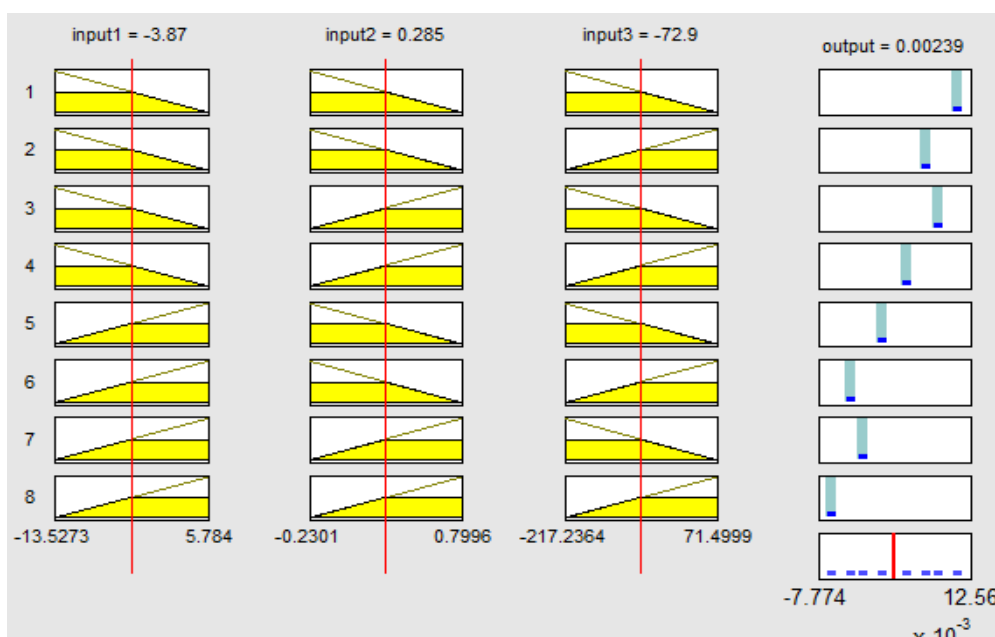
Výstupné hodnoty z *Anfis* editora (fismatice) som vkladal do bloku Fuzzy Logic Controller a sledoval som, či daný regulátor môj systém ureguluje na žiadanú hodnotu.

Vhodnosť navrhnutého robustného neuro- fuzzy regulátora bola overená riadením teploty reakčnej zmesi prietokom chladiaceho média pre 5 uvažovaných hodnôt reakčných entalpií. Najlepšie hodnoty kritérií kvality a zároveň dosiahnutie žiadanej hodnoty boli pri použití 8 trojuholníkových funkcií príslušnosti. To znamená, že pre každý vstup boli nastavené 2 trojuholníkové funkcie príslušnosti.

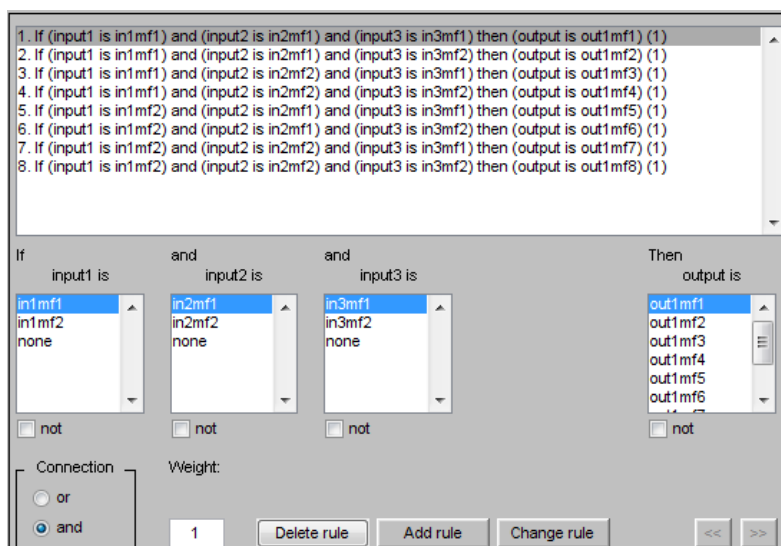
Trojuholníková funkcia príslušnosti má 3 parametre $[A \ B \ C]$, kde $A \leq B \leq C$. Tieto parametre určujú zlomové body tejto FP.



Obrázok 12: Výsledná *Anfis* štruktúra



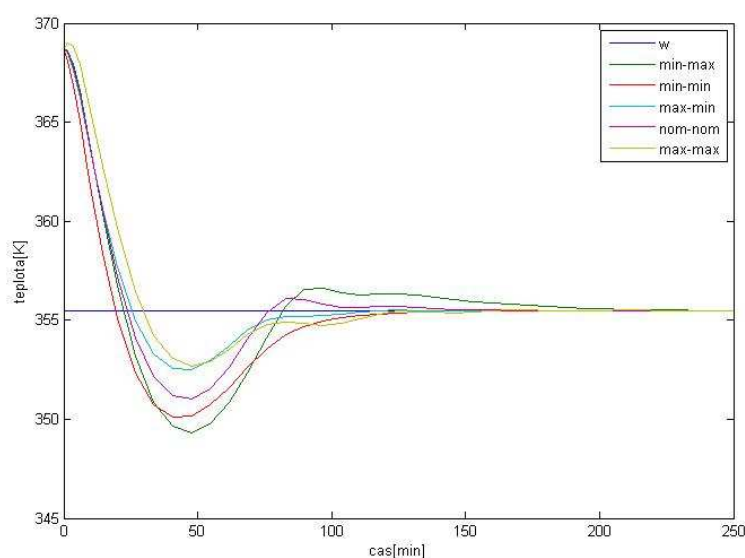
Obrázok 13: Fuzzy inferenčný systém



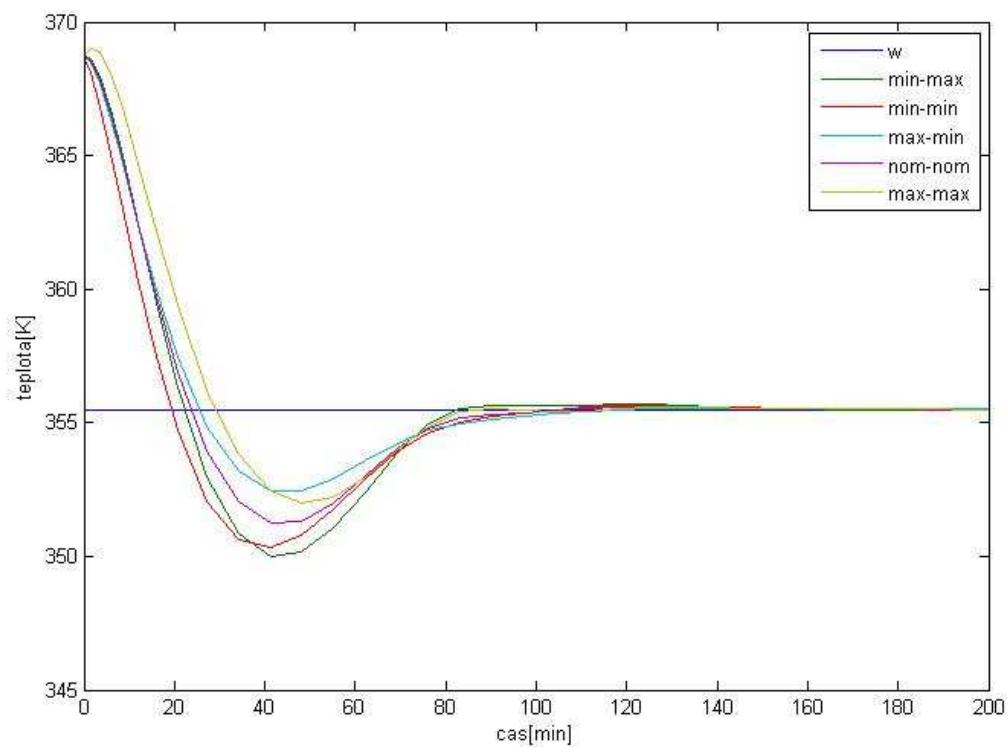
Obrázok 14: Pravidlá

2.9. Výsledky simulácie

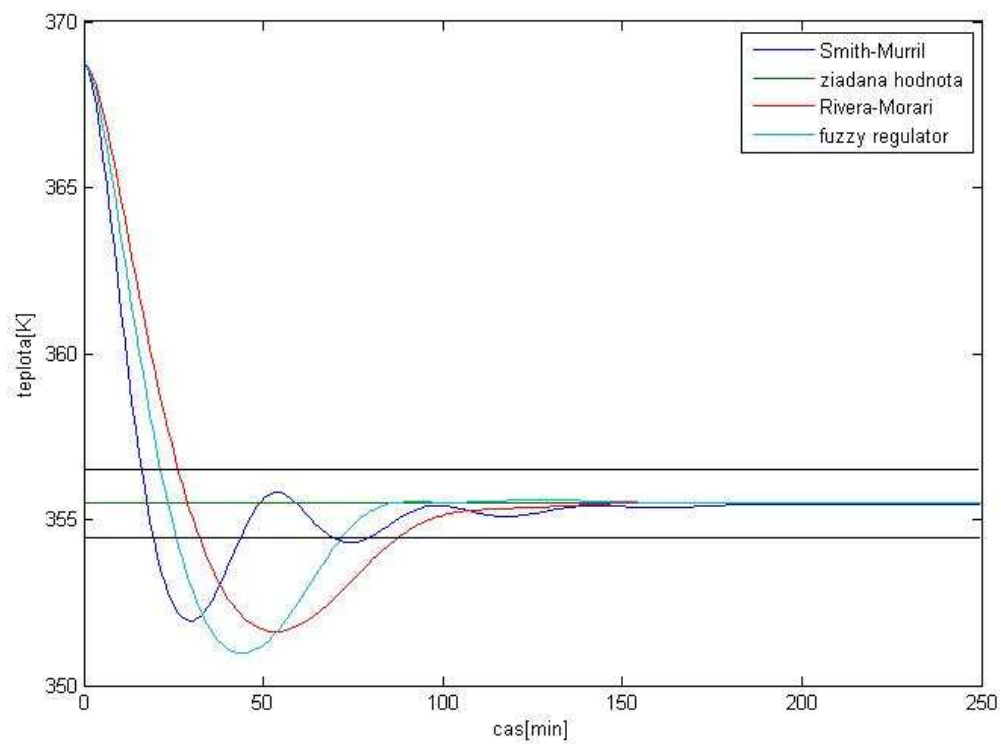
Nasledujúce obrázky zobrazujú výsledky regulácií. Na obrázku 15 je znázornené riadenie chemického reaktora pomocou robustného neuro- fuzzy regulátora, pre nominálne hodnoty reakčných entalpií a pre krajné hodnoty reakčných entalpií pri použití 8 gausovských FP a na obrázku 16 riadenie pomocou 8 trojuholníkových FP. Obrázok 17 zobrazuje porovnanie robustného neuro- fuzzy regulátora navrhnutého pri nominálnych hodnotách reakčných entalpií pri použití 8 trojuholníkových funkcií príslušnosti a PID regulátorov, ktoré boli navrhnuté podľa experimentálnych metód pri nominálnych hodnotách reakčných entalpií.



Obrázok 15: Riadenie pomocou robustného neuro- fuzzy regulátora pre všetky hodnoty reak. entalpií pri použití 8 gausovských FP



Obrázok 16: Riadenie pomocou robustného neuro- fuzzy regulátora pre všetky hodnoty reak. entalpií pri použití 8 trojuholníkových FP



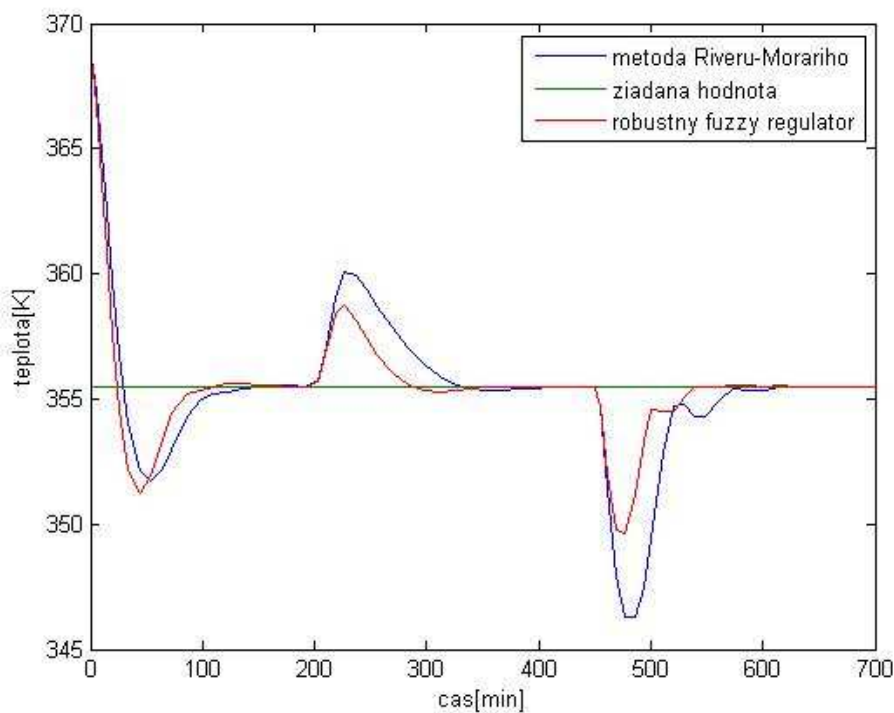
Obrázok 17: Porovnanie robustného neuro- fuzzy regulátora a PID regulátorov

Tabuľka 5 porovnáva kvalitu navrhnutých regulátorov pomocou integrálnych kritérií kvality a času regulácie.

Metóda	Kritériá kvality		
	<i>ise</i>	<i>iae</i>	t_{reg}
PID podľa Smitha-Murrilla	1.4455	240.2944	80.08
PID podľa Riveru-Morariho	2.3824	372.3006	87.86
robustný neuro- fuzzy regulátor	2.1256	324.5404	72.08

Tabuľka 5: Porovnanie robustného neuro- fuzzy regulátora a PID regulátorov na základe kritérií kvality

Na obrázku 18 je znázornené porovnanie, ako systém reaguje na poruchy pri nominálnych hodnotách reakčných entalpií pri použití PID regulátora navrhnutého podľa metódy Riveru- Morariho a robustného neuro- fuzzy regulátora. Prvá porucha, zmena teploty chladiaceho média z hodnoty 298K na 312K, vstupovala do systému v čase $t=200$ a druhá porucha, taktiež zmena teploty chladiaceho média, ale z hodnoty 298K na 280K vstupovala do systému v čase $t=450$.



Obrázok 18: Porovnanie robustného neuro- fuzzy regulátora a PID regulátora pri riadení systému s poruchou

Z obrázka 18 ako aj z tabuľky 6 vyplýva, že robustný neuro- fuzzy regulátor rýchlejšie odstráni poruchu a systém skôr dosiahne požadovanú hodnotu $w(t)$.

Metóda		
	<i>ise</i>	<i>iae</i>
PID podľa Riveru-Morariho	6.0924	1095.6
robustný neuro- fuzzy regulátor	3.2475	679.7534

Tabuľka 6: Porovnanie robustného neuro- fuzzy regulátora a PID regulátora na základe kritérií kvality

3 ZÁVER

Predmetom tejto diplomovej práce bolo navrhnúť robustný neuro- fuzzy regulátor pre riadenie teploty reakčnej zmesi v prietokovom chemickom reaktore. Akčnou veličinou bol prietok chladiacej zmesi v plášti reaktora. Nelineárny model chemického reaktora je odvodený v tvare diferenciálnych rovníc, ktoré boli použité v s- funkcii. Práca bola uskutočnená v prostredí MATLAB-u a Simulink-u pomocou Fuzzy Logic Toolboxu.

Na základe identifikácie riadeného systému ako systému 2. rádu s dopravným oneskorením boli pomocou experimentálnych metód navrhnuté PID regulátory. Simuláciou a porovnaním ukazovateľov kvality PID regulátorov boli vyhodnotené za najkvalitnejšie regulátory nastavené podľa Smithovej- Murrillovej metódy a metódy Riveru- Morariho. PID regulátory boli použité pre porovnávanie kvality riadenia s robustným neuro- fuzzy regulátorom.

Návrh robustného neuro- fuzzy regulátora s neurčitostami pozostával z vybratia počtu a typu funkcií príslušnosti, simulácie riadenia a porovnania kvality riadenia. Pravidlá robustného neuro- fuzzy regulátora boli vygenerované pomocou štruktúry *Anfis* z údajov získaných simuláciou riadenia systému PID regulátormi. Kritériami kvality boli plocha absolútnej hodnoty odchýlky riadenia, plocha kvadratickej odchýlky riadenia a čas regulácie. Navrhnutý bol robustný neuro- fuzzy regulátor s tromi vstupmi e , de a ie a výstupom u . Hľadal som taký neuro- fuzzy regulátor, ktorý môj proces ureguluje na žiadanú hodnotu pri akejkoľvek hodnote reakčných entalpií v intervaloch $-\Delta_r H_1 = [4.6 \times 10^4; 5.4 \times 10^4]$, $-\Delta_r H_2 = [6.4 \times 10^4; 7.2 \times 10^4]$.

V úlohe sledovania dosiahol robustný neuro- fuzzy regulátor v porovnaní s PID regulátormi navrhnutými podľa experimentálnych metód najlepší čas regulácie. Najlepšie hodnoty integrálnych kritérií kvality (plocha kvadratickej odchýlky riadenia *ISE*, plocha absolútnej hodnoty odchýlky riadenia *IAE*) boli dosiahnuté pri riadení pomocou PID regulátora navrhnutého podľa metódy Smitha- Murrilla. V porovnaní s PID regulátorom navrhnutom podľa metódy Riveru- Morariho bol robustný neuro- fuzzy regulátor lepší vo všetkých kritériách kvality.

V úlohe regulácie výsledky riadenia dokazujú, že navrhnutý robustný neuro- fuzzy regulátor je schopný poruchy v systéme odstrániť rýchlejšie, dokonca s lepšími hodnotami kritérií kvality ako klasický PID regulátor navrhnutý podľa metódy Riveru- Morariho.

Simulačné výsledky riadenia tohto systému ukazujú, že je možné pre daný chemickotechnologický proces navrhnúť robustný neuro- fuzzy regulátor.

POUŽITÁ LITERATÚRA :

- [1] Bakošová, M., Fikar, M., Čírka, L.: *Základy automatizácie. Laboratórne cvičenia zo základov automatizácie*. Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2003.
- [2] Mikleš, J., Dostál, P., Mészáros, A.: *Riadenie technologických procesov*. Bratislava, Vydavateľstvo STU, 1994.
- [3] Modrlák, O.: *Fuzzy řízení a regulace*, 2002
- [4] Vasičkaninová A., Bakošová M., Karšaiová M.: *Fuzzy internal model control of the chemical reactor*, 9th International Scientific - Technical Conference Process Control 2010, University of Pardubice, Kouty nad Desnou, Czech Republic, str. C118a-1–C118a-13, 2010
- [5] Fikar, M., Mikleš, J.: *Identifikácia systémov*. Bratislava, STU Press, 1999.
- [6] Vasičkaninová, A., Bakošová, M., Dvoran, J.: *Tvorba neuro-fuzzy modelov metódou Anfis*.
- [7] <http://www.root.cz/clanky/ako-pracuju-fuzzy-systemy/>
- [8] Blahová, L., Dvoran, J.: *Riadenie chemického reaktora v prítomnosti porúch pomocou neuro-fuzzy systému riadenia*. V Medzinárodná konferencia Kybernetika a Informatika, Vydavateľstvo STU, Vazovova 5, 812 43 Bratislava, 2010.
- [9] Hurák, Z., Hromčík: *Robustní řízení- cvičení*. Dostupné na:
http://www.polyx.com/_robust/
- [10] Veselý, V., Harsányi, L.: *Robustné riadenie dynamických systémov*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2007
- [11] Babulíková, M. : Semestrálna práca: *Robustné riadenie chemickotechnologických procesov*. Bratislava, 2010.

PRÍLOHY:

CD médium : [1] práca v elektronickej podobe

[2] prílohy v elektronickej podobe