

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

EVIDENČNÉ ČÍSLO: FCHPT-5415-43114

FUZZY RIADENIE DESTILAČNEJ KOLÓNY

BAKALÁRSKA PRÁCA

2016

Milan Horňák

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKEJ A POTRAVINÁRSKEJ
TECHNOLÓGIE

Evidenčné číslo: FCHPT-5415-43114

FUZZY RIADENIE DESTILAČNEJ KOLÓNY
BAKALÁRSKA PRÁCA

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

Študijný odbor: 5.2.14. automatizácia, 5.2.52. priemyselné inžinierstvo

Školiace pracovisko: Ústav informatizácie, automatizácie a matematiky

Vedúci záverečnej práce: RNDr. Zdenko Takáč, PhD.

Konzultant: Ing. Ján Drgoňa

Bratislava 2016

Milan Horňák



ZADANIE BAKALÁRSKEJ PRÁCE

Študent: **Milan Horňák**
ID študenta: 43114
Študijný program: automatizácia, informatizácia a manažment v chémii a potravinárstve
Kombinácia študijných odborov: 5.2.14. automatizácia, 5.2.52. priemyselné inžinierstvo
Vedúci práce: RNDr. Zdenko Takáč, PhD.
Konzultant: Ing. Ján Drgoňa

Názov práce: **Fuzzy riadenie destilačnej kolóny**

Špecifikácia zadania:

Cieľom práce je navrhnúť a implementovať fuzzy riadenie na v praxi používanej priemyselnej technológii, konkrétne riadenie teploty v destilačnej kolóne. Na implementáciu bude použitý Fuzzy Logic Toolbox v Matlabe. Pre zvolenú aplikáciu bude vytvorená vizualizácia.

Požadované znalosti:

1. Základné teoretické znalosti fuzzy množín a fuzzy logiky.
2. Všeobecné znalosti riadenia procesov.

Študent získa:

1. Praktické skúsenosti s návrhom fuzzy riadenia.
2. Zvládne SW aj HW časť v priemysle používaných technológií (SIEMENS, VIPA, B&R, SAIA, MicroSys, EWON).
3. Praktické skúsenosti s implementáciou a vyladením riadenia procesu.

Riešenie zadania práce od: 25. 02. 2016

Dátum odovzdania práce: 08. 05. 2016

L. S.

Milan Horňák
študent

prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
vedúci pracoviska

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

Pod'akovanie

Týmto by som chcel poďakovať vedúcemu práce RNDr. Zdenkovi Takáčovi, PhD. a pánovi Ing. Jánovi Drgoňovi za cenné rady a pripomienky, ktoré mi pomohli k spracovaniu bakalárskej práce.

Abstrakt

Táto práca sa zaoberá problematikou riadenia systému destilačnej kolóny, a popisuje spôsob riadenia teploty na hlave destilačnej kolóny fuzzy regulátorom. V práci je uvedená charakterizácia procesu destilácie, ako aj opis použitého zariadenia destilačnej kolóny. Práca popisuje základy fuzzy teórie a možnosti riadenia systémov použitím fuzzy regulátora. Sú v nej porovnané priebehy modelového riadenia procesu destilácie bežnými PID aj fuzzy regulátormi. Je prevedené ladenie parametrov regulátora a následne sú skúmané priebehy riadenia reálneho zariadenia. Súčasťou práce sú grafické závislosti popisujúce priebehy riadenia laboratórnej destilačnej kolóny.

Kľúčové slová: destilačná kolóna; riadenie teploty; fuzzy riadenie; Mamdaniho regulátor

Abstract

This thesis is dealing with the distillation column controlling and it is also describing a way of the temperature control on the top of the distillation column using the fuzzy controller. There is also a characterization of distillation process and description of applied device mentioned in the thesis. It is covering the basics of fuzzy theory as well as the ways of fuzzy control system. There is a comparison between behaviour of models controlled by common PID and fuzzy regulator. Finally we present a tuning of regulator parameters and subsequently the dynamics of real device controlling. Process control charts representing the device control behaviour are also included in the thesis.

Key words: distillation column; temperature control; fuzzy control; Mamdani controller

Obsah

Zoznam skratiek a značiek	13
Zoznam tabuliek.....	14
Zoznam obrázkov.....	15
Úvod	17
1 Destilačná kolóna	19
1.1 Proces destilácie.....	19
1.2 Opis laboratórneho zariadeniach	21
1.2.1 Poruchy a ich eliminácia	24
1.3 Manuálny nábeh kolóny.....	24
1.3.1 Ohrev varáka	25
1.3.2 Nástreky	26
1.3.3 PID predhrev nástreku.....	26
1.3.4 Zníženie ohrevu varáka	26
1.3.5 Ustálený stav kolóny	26
1.3.6 Nízka hladina vo varáku.....	27
1.4 Automatizovaný nábeh kolóny.....	27
1.4.1 Vstupy do Matlab Stateflow.....	27
1.4.2 Výstupy z Matlab Stateflow	29
1.4.3 Chart Matlab Stateflow	30
2 Fuzzy logika	35
2.1 Klasické a fuzzy množiny	35
2.2 Funkcia príslušnosti fuzzy množiny	37
2.3 Vlastnosti fuzzy množín a operácie s nimi.....	38
2.3.1 Trojuholníkové normy a ich vlastnosti.....	40
2.3.2 Trojuholníkové konormy a ich vlastnosti.....	41

3 Fuzzy riadenie	43
3.1 Klasický PID regulátor.....	43
3.2 Fuzzy regulácia	44
3.3 Fuzzy regulátor podľa Mamdaniho	45
3.3.1 Časti fuzzy regulátora.....	47
3.3.2 Fuzzy implementácia do systémov.....	48
3.4 Návrh fuzzy regulátora.....	48
3.4.1 Jazykové premenné	48
3.4.2 Bába pravidiel.....	52
3.4.3 Funkcie príslušnosti	54
3.4.4 Mechanizmy fuzzifikácie, inferenčného jadra a defuzzifikácie.....	56
4 Fuzzy riadenie teploty na hlave destilačnej kolóny	58
4.1. Simulačné výsledky	58
4.1.1 Porovnanie riadenia rôznymi regulátormi	59
4.1.2 Ladenie fuzzy regulátora	62
4.2. Experimentálne výsledky	66
4.2.1. Riadenie fuzzy PD regulátorom	66
4.2.2. Riadenie fuzzy PI regulátorom.....	69
4.2.3. Výsledky meraní	71
5 Záver	73
Zoznam použitej literatúry.....	74
Prílohy	77

Zoznam skratiek a značiek

PID	proporcionálne-integračne-derivačný regulátor
°C	teplota v stupňoch Celzia, teplota v kelvinoch $K = C + 273,15$
V	volt, základná jednotka napätia v sústave SI
W	Watt, odvodená jednotka výkonu v sústave SI
T1-T8	teplota na 1. až 8. etáži
T9	teplota vo varáku
T10	teplota na hlave kolóny
T11	teplota vstupujúcej chladiacej vody
T12	teplota vystupujúcej chladiacej vody
T13	teplota kondenzátu
T14	teplota nástreku pred predhrevom
T15	teplota nástreku po predhreve
T15ss	teplota nástreku po predhreve v ustálenom stave

Zoznam tabuliek

Tabuľka 1 Vstupy do Matlab Stateflow	28
Tabuľka 2 Výstupy z Matlab Stateflow	30
Tabuľka 3 Význam skratiek hodnôt jazykových premenných	49
Tabuľka 4 Bába pravidiel	54
Tabuľka 5 Konštanty použitých regulátorov	60
Tabuľka 6 Ukazovatele kvality riadenia použitých regulátorov	62
Tabuľka 7 Optimálne parametre regulátorov	65
Tabuľka 8 Hodnoty konštánt Fuzzy PD regulátorov	68
Tabuľka 9 Ukazovatele kvality riadenia s použitím Fuzzy PD regulátorov	68
Tabuľka 10 Parametre konštánt použitých Fuzzy PI regulátorov	71
Tabuľka 11 Ukazovatele kvality riadenia s použitím Fuzzy PI regulátorov	71

Zoznam obrázkov

Obrázok 1 Schéma procesu destilácie [4]	19
Obrázok 2 Krížový tok kvapaliny kolónou [4]	20
Obrázok 3 Sitová etáž [4].....	22
Obrázok 4 Laboratórna destilačná kolóna [6]	23
Obrázok 5 Blok pre ohrev varáka v schéme Matlab Simulink	25
Obrázok 6 Blok PID predhrev nástreku v Matlab Simulink	25
Obrázok 7 Vstupy a výstupy do Matlab Stateflow.....	29
Obrázok 8 Stavby Matlab Stateflow	34
Obrázok 9 Riadiaci panel operátora	34
Obrázok 10 Fuzzy funkcie pre rozdelenie teplôt [15]	37
Obrázok 11 Fuzzy funkcia príslušnosti [9]	37
Obrázok 12 Doplnok fuzzy množiny [15].....	39
Obrázok 13 Prienik fuzzy množín [15]	40
Obrázok 14 Zjednotenie fuzzy množín [15].....	40
Obrázok 15 Minimová T-norma [25].....	41
Obrázok 16 Súčinová T-norma [25].....	41
Obrázok 17 Schéma fuzzy regulátora [24].....	47
Obrázok 18 Veľmi záporná odchýlka [24].....	49
Obrázok 19 Trochu záporná odchýlka, trochu kladná zmena odchýlky [24]	50
Obrázok 20 Nulová odchýlka, trochu záporná zmena odchýlky [24]	50
Obrázok 21 Nulová odchýlka, trochu kladná zmena odchýlky [24]	51
Obrázok 22 Trochu kladná odchýlka, trochu kladná zmena odchýlky [24]	51
Obrázok 23 Veľmi kladná odchýlka, veľmi záporná zmena odchýlky [24]	51
Obrázok 24 Aktivácia pravidla 1	52
Obrázok 25 Aktivácia pravidla 2	52
Obrázok 26 Aktivácia pravidla 3	53
Obrázok 27 Funkcie príslušnosti vstupných premenných.....	55
Obrázok 28 Funkcie príslušnosti výstupnej premennej.....	55
Obrázok 29 Singleton.....	56
Obrázok 30 Graf závislosti výstupnej funkcie od vstupných	57
Obrázok 31 Schéma PD fuzzy regulátora v Matlab Simulink.....	58

Obrázok 32 Schéma PI fuzzy regulátora v Matlab Simulink	59
Obrázok 33 Simulácia použitia PID regulátora.....	60
Obrázok 34 Simulácia použitia PI regulátora.....	61
Obrázok 35 Simulácia použitia Fuzzy PD regulátora	61
Obrázok 36 Simulácia použitia Fuzzy PI regulátora	62
Obrázok 37 Ladenie konštanty k_1 pre Fuzzy PD regulátor	63
Obrázok 38 Ladenie konštanty k_2 pre Fuzzy PD regulátor	64
Obrázok 39 Ladenie konštanty d_{max} pre Fuzzy PD regulátor.....	64
Obrázok 40 Ladenie konštanty d_{max} pre Fuzzy PI regulátor	65
Obrázok 41 Riadenie Fuzzy PD regulátorom s konštantami $k_1=12$, $k_2=12$, $d_{max}=40$	66
Obrázok 42 Riadenie Fuzzy PD regulátorom s konštantami $k_1=50$, $k_2=0.6$, $d_{max}=12$	67
Obrázok 43 Riadenie Fuzzy PD regulátorom s konštantami $k_1=35$, $k_2=1$, $d_{max}=20$	67
Obrázok 44 Riadenie Fuzzy PI regulátorom s konštantami $k_1=12$, $k_2=12$, $d_{max}=40$	69
Obrázok 45 Riadenie Fuzzy PI regulátorom s konštantami $k_1=1$, $k_2=1$, $d_{max}=0.7$	70
Obrázok 46 Riadenie Fuzzy PI regulátorom s konštantami $k_1=40$, $k_2=50$, $d_{max}=20$	70

Úvod

Programy, obsahujúce aspoň základné prvky umelej inteligencie, predstavujú v súčasnosti zaujímavú výzvu pre oblasť automatizácie, zaoberajúcu sa riadením systémov. Vlastnosť systému rozhodnúť sa v určitej situácii na základe definovaných pravidiel správania sa, okrem minimalizácie zásahov človeka do jeho činnosti, uľahčenia a zjednodušenia práce človeka, má prínos aj pri hospodárení s materiálmi, surovinami a energiami.

Činnosť riadenia operátorom môžeme charakterizovať ako stereotypnú činnosť, činnosť založenú na určitých pravidlách a na podrobnom poznaní fungovania systému. Stereotypná činnosť prebieha u operátora úplne automaticky, neuvažuje nad zásahmi do systému, lebo presne pozná jeho správanie. Nižší stupeň automatizácie je riadenie na základe pravidiel. Prediktívne riadenie a modelový prístup je vyšším stupňom, lebo vyžaduje rozhodovanie na základe aktuálne vzniknutej situácie a výber čo najpriaznivejšej možnosti. Čím je vyšší stupeň realizovaného riadenia, tým je používaná vyššia úroveň inteligencie v systéme.

Možnosť presne popísať zásahy operátora v systéme do univerzálnej formy, pochopiteľnej pre všetky riadiace prvky, znižuje potrebu presných informácií na základe ktorých systém pracuje. V niektorých situáciách sú dokonca zadané informácie pre systém zbytočne presné. Ľudský mozog zvláda rôzne formy neurčitosti. Či už rozmýšľanie alebo vyjadrovanie sa človeka bežne zaobíde bez presných údajov.

Nahradením klasických ostrých množín s presne definovanými pevnými hranicami, množinami s nepresnými, neostrými hranicami, získame užitočný nástroj pre opis konania a rozhodovania sa ľudského mozgu - fuzzy logiku. Dôvod pre použitie fuzzy logiky v riadení procesov vychádza z ich vlastnosti vysporiadať sa s neurčitosťami v úplnom poznaní a správaní sa systému. Definovaním premenných systému ako jazykových premenných a stanovením pravidiel na základe týchto premenných, možno získať spôsob riadenia systému [1].

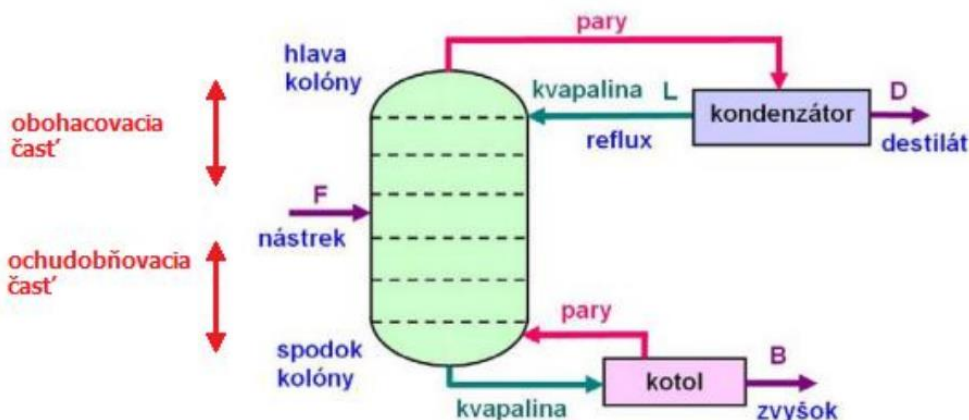
V našej práci využívame princípy a metódy fuzzy logiky s cieľom riadiť teplotu na hlave laboratórnej destilačnej kolóny zmenou množstva refluxného toku, čím budeme schopní dosiahnuť želané zloženie východiskového produktu procesu - destilátu. Uvedieme porovnanie klasických množín s fuzzy množinami, opis požadovaných vlastností želaného regulátora, rôzne metódy návrhu fuzzy regulátorov, ktorých funkčnosť a presnosť riadenia následne overíme v simulačnom softvéri s modelom destilačnej kolóny, ako aj na reálnom zariadení. V závere práce zhrnieme výsledky a porovnáme navrhnuté fuzzy regulátory. Táto práca by mala obsahovať základné poznatky z oblasti syntézy fuzzy regulátorov. Hlavným motívom práce je

automatizácia riadenia teploty na hlave destilačnej kolóny s použitím regulátora, využívajúceho fuzzy logiku.

1 Destilačná kolóna

1.1 Proces destilácie

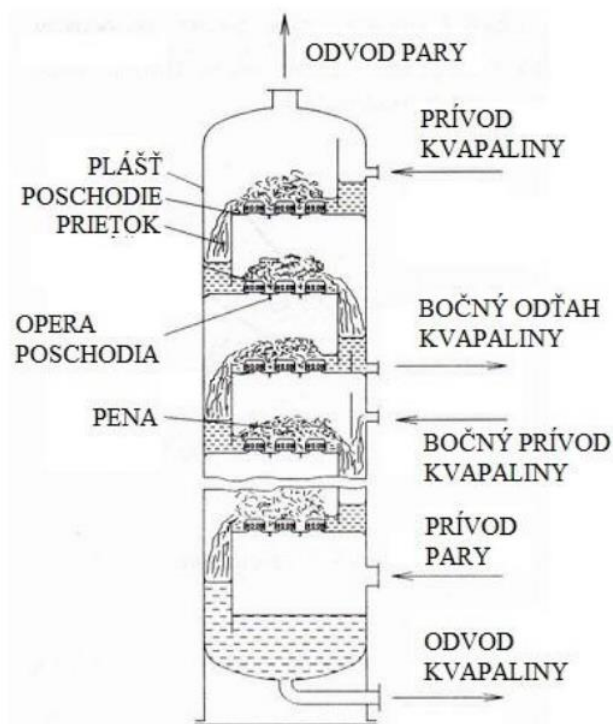
Destilácia je jedným z najpoužívanějších a najrozšírenejších difúzných separačných procesov. Využíva sa priemyselne, ako aj laboratórne. Destiláciou oddeľujeme na zložky kvapalné zmesi, ktoré majú pri rôznej teplote rôzne tlaky pár. To znamená, že majú rozdielnu teplotu varu. Oddelením a kondenzáciou pár z kvapaliny získavame kvapalinu, v ktorej je množstvo jednej zložky väčšie. Vlastnosť látky mať v kvapalnej forme koncentráciu nižšiu ako v parnej fáze, nazývame prchavosť. Prchavá látka v zmesi je tá, ktorá má zo zastúpených najnižší bod varu. Princíp viacnásobného čiastočného vyparovania a kondenzácie sa využíva v destilačných kolónach. V týchto zariadeniach sú nároky na ostrosť delenia zmesi väčšie, než aké možno dosiahnuť jednorázovo jednoduchou destiláciou [2][3].



Obrázok 1 Schéma procesu destilácie [4]

Surovina sa vo forme nástreku privádza na určitú etáž (Obrázok 1), zvyčajne už predhriata. Etáže sú vodorovné dosky s malými otvormi. Nachádzajú sa v kolóne uložené nad sebou v pevne danej vzdialenosti. Slúžia na zadržanie kvapalnej fázy v určitej výške a ich úlohou je zabezpečiť prúdenie pary cez kvapalinu. Čím sa zabezpečí kontakt kvapalina – para, na rozhraní ktorého dochádza k prestupu látky. V bezprepadovej konštrukcii etáži kvapalná fáza prúdi cez rovnaké otvory ako parná fáza. Pri krížovom toku (Obrázok 2) kvapalina prúdi cez etáže, na

konci ktorých sa zadržiže hrádzou a cez prepad steká na ďalšiu etáž. Para opäť prúdi smerom od dna kolóny a na každej etáži prechádza vrstvou kvapaliny [2][4].



Obrázok 2 Krížový tok kvapaliny kolónou [4]

Nástrek tečie z etáže na etáž smerom ku dnu kolóny, kde sa udržiava konštantná výška hladiny kvapaliny. Odtiaľ tečie do výparníka, kde sa časť kvapalnej zmesi vyparí. Vznikajúca para sa privádza na poslednú etáž kolóny a postupne prechádza nahor jednotlivými etážami. Z varáka sa odvádza zvyšok ako jeden z produktov destilácie. Zvyšok obsahuje menšie množstvo prchavejšej látky, ako pôvodne obsahoval nástrek [2][3].

Para po prechode cez kolónu kondenzuje v kondenzátore. Kondenzát sa zhromažďuje v zbernej nádobe, odkiaľ sa určitá jeho časť odoberá a privádza späť na hlavu kolóny. Tento prúd kvapaliny sa nazýva vonkajší spätný tok, reflux. Zabezpečuje prúdenie kvapaliny z etáže na etáž, čím sa vytvárajú podmienky pre lepší styk pary s kvapalinou na každej etáži. Nakoľko vonkajší spätný tok má najvyššiu koncentráciu prchavejšej zložky, dochádza k prestupu látky medzi kvapalinou a parou. To sa na každej etáži prejaví obohatením pary o prchavejšiu zložku.

Druhá časť kondenzátu, ktorá sa nedopravuje na hlavu kolóny sa označuje destilát, predstavuje hlavný produkt procesu destilácie [2][3].

Teória procesu sa zakladá na predstave rovnovážneho stupňa, je to pracujúca etáž, kde para a kvapalina z nej odchádzajúce sú v rovnováhe. To umožňuje vyjadriť zloženie prúdov pomocou rovnovážnych koncentrácií. V laboratórnom experimente sme použili zmes metanol-voda. Na základe teploty získanej z etáží kolóny a rovnováhy vo forme t - x - y údajov dokážeme určiť zloženie kvapalnej a parnej fázy [2][3].

Existuje niekoľko požiadaviek, ktoré musia byť v praxi splnené pre riadenie destilačných procesov, ako sú bezpečnosť prevádzky, zabezpečenie špecifickosti produkcie, predpisy o životnom prostredí, prevádzkové obmedzenia a ekonomické požiadavky. Jednotlivé destilačné jednotky sa líšia v mnohých parametroch, napr. v použitých nástrekových zmesiach, relatívnej prchavosti, kvalite produktov a nákladoch na energiu. V dôsledku toho neexistuje žiadny komplexný regulátor, ktorý by bol vhodný na riadenie všetkých typov kolón. Je potrebný individuálny prístup, ktorý zohľadní špecifiká konkrétnej kolóny [5].

Viac informácií o procese destilácie, špecifikách konkrétnych prípadov a destilačných zariadeniach nájde čitateľ napríklad v [2], [3], [4].

1.2 Opis laboratórneho zariadeniach

Zariadenie UOP3CC laboratórna destilačná kolóna sa skladá z niekoľkých hlavných častí. Procesná jednotka sa skladá z deviatich sitových etáží s priemerom 50 mm (Obrázok 3), je rozdelená na dve časti, z ktorých každá obsahuje štyri etáže a jeden dávkovač v strede. Etáže sú naskladané nad sebou a uzavreté do valcového plášťa pre vytvorenie stĺpca kolóny [5].



Obrázok 3 Sítová etáž [4]

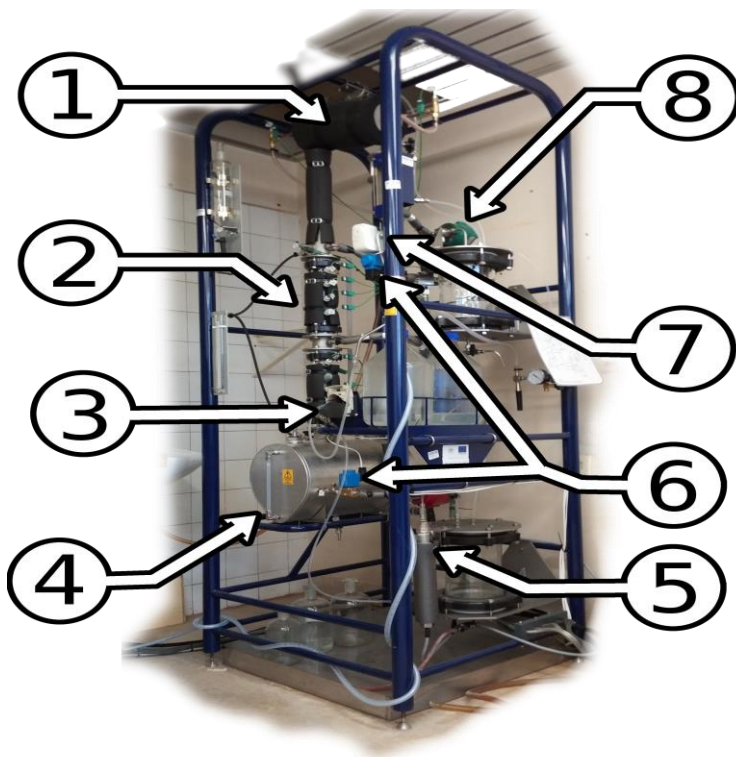
Nástrek sa kontinuálne privádza na strednú, nástrekovú etáž. Nástreková zmes sa pred vstupom do kolóny predhrieva elektrickým ohrevom s maximálnym výkonom 2 kW. Zmes metanol-voda sa zohrieva vo varáku, reboileri s objemom 20 l, ktorý je vybavený ponorným vyhrievacím telesom s maximálnym výkonom 2,5 kW [5].

Zvyšok po opakovanej destilácii je možné odčerpať z varáka výpustným ventilom. Ventil sa používa na zabezpečenie konštantnej hladiny vo varáku a jeho poloha je pevná. Parná zmes, obohatená o metanol výparmi z varáka, sa vedie cez vodou chladený špirálový kondenzátor do zbernej nádoby destilátu. Z nádoby prechádza kvapalina cez refluxný ventil. Je to elektromagnetický, trojcestný ventil riadený prepínačom. Destilát sa buď vracia späť do kolóny ako spätný tok, alebo sa odvádza ako východiskový produkt. Hodnota pomeru spätného toku je teda obmedzená na $R \in [0, 100]$, kde $R = 0$ predstavuje úplne uzavretý spätný ventil, 100% návratnosť destilátu do kolóny a $R = 100$ pre plne otvorený ventil s 0% návratnosťou destilátu do kolóny [5].

Meranie teplôt v systéme zabezpečujú termočlánkové senzory. Každá etáž kolóny je vybavená termoelektrickým článkom. Celá kolóna je izolovaná, aby sa minimalizovali energetické straty. Procesná jednotka je pripojená k riadiacej konzole viacjadrovým káblom. Riadiaca konzola prevádza signál z termočlánkov na unifikovaný signál 0-5 V, čo predstavuje teplotné rozpätie 0 až 150 °C. Konzola tiež obsahuje frekvenčný menič (*variable frequency drives*) pre presné riadenie rýchlosti čerpadla v rozsahu 0-300 otáčok za minútu. Ohrev varáka je priamo ovládaný cez UOP3CC konzolu zo vstupného signálu 0-5 V, ktorý zodpovedá ohrievaciemu výkonu 0-2,5 kW [5].

Predhrievač nástreku je riadený signálom s modulovanou šírkou impulzu (*pulse width modulated*) prostredníctvom relé v pevnej fáze. Poloha regulačného ventilu kondenzátora je úmerná vstupnému signálu v rozsahu 0-10 V, kde 0 V znamená úplne uzavretý a 10 V plne

otvorený [5].



Obrázok 4 Laboratórna destilačná kolóna [6]

Popis schémy (Obrázok 4):

1. Kondenzátor
2. Stĺpec kolóny
3. Čerpadlo nástreku
4. Varák
5. Predhrev nástreku
6. Automatizované ventily na vypúšťanie zvyšku a prietok chladiacej vody
7. Manuálny ventil na nastavenie prietoku chladiacej vody
8. Reflux

Všetky signály z a do riadiaceho počítača sú pripojené na dve I / O PC karty (MF 624), ovládané priamo z Matlab Simulink. Je to prostredie, ktoré je schopné v reálnom čase snímať a generovať analógové napätie a snímať a zapisovať digitálne signály [5].

1.2.1 Poruchy a ich eliminácia

Je známe, že proces destilácie je veľmi citlivý na poruchy, preto použitý regulátor by mal zabezpečiť jej dostatočnú kompenzáciu. Výkon navrhnutého regulátora však môže byť ovplyvnený výskytom významných porúch. Preto analýza pôvodu a charakteru porúch a ich následné, úplné alebo čiastočné odstránenie môže poskytnúť významné zlepšenie kvality riadenia [5].

V prípade riadenia kolóny boli identifikované nasledovné významné zdroje rušenia:

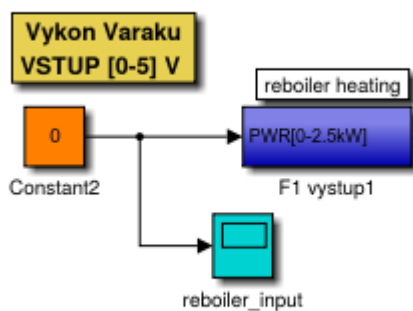
1. Pomalá dynamika zmeny teploty spätného toku počas prevádzky. To je spôsobené neschopnosťou riadiť teplotu v kondenzátore na konštantnú hodnotu, v dôsledku veľkosti rúrok, ktorými prúdi chladiaca voda kondenzátorom.
2. Porucha, spôsobená implementáciou riadenia, prevádzanie kontinuálneho signálu z regulátora, predstavujúceho želanú veľkosť refluxného pomeru, na signál s modulovanou šírkou impulzu pre elektromagnetický ventil refluxu.
3. Oscilácia v teplotách na etážach, čo sa najviac prejavuje na etáži v okolí nástrekovej etáži, vzniká ako rozdiel medzi teplotou nástreku a teplotou na 6. etáži T6.
4. Oscilácia veľkosti prietoku nástreku spôsobená peristaltickým čerpadlom.

Šum, ktorý vzniká pri meraní teploty je možné odstrániť dvoma spôsobmi:

1. Eliminácia nízkofrekvenčného šumu spôsobeného kolísaním teploty nástreku.
2. Odstránenie vysokofrekvenčného šumu, filtráciou získaných dát pomocou filtra prvého rádu, Butterworthov filter s frekvenciou 0,005 rad/s, čím vzniká vyhladený signál so zanedbateľným fázovým posunom [5].

1.3 Manuálny nábeh kolóny

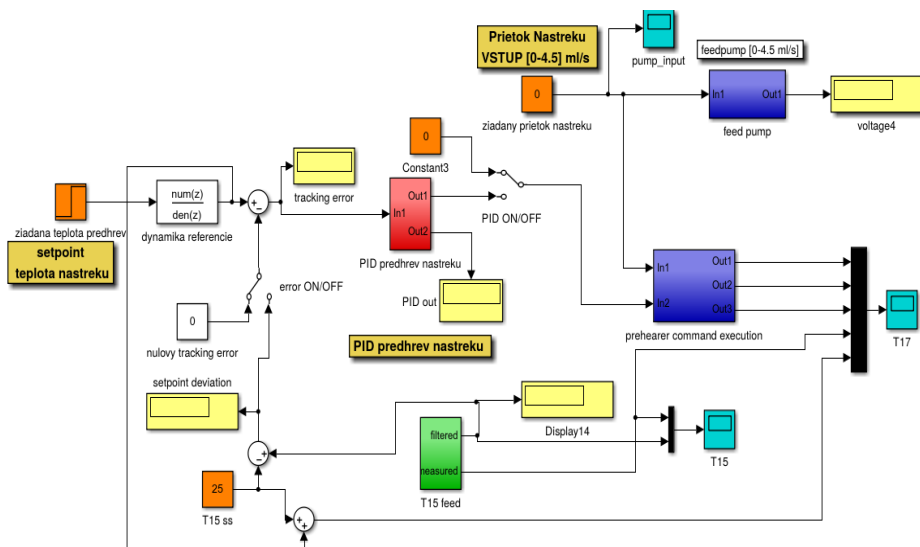
Ak chceme riadiť teplotu na hlave destilačnej kolóny, je potrebné mať kolónu v ustálenom stave. Je to stav, v ktorom sa veličiny, v našom prípade teplota, menia spojitě, nie skokom. Na zabezpečenie ustáleného stavu zariadenia je potrebné uskutočniť činnosť nábehu. Teraz popíšeme nábeh destilačnej kolóny, pričom činnosti operátora, ako je nastavovanie číselných hodnôt, sledovanie teplôt a spúšťanie jednotlivých procesných blokov je potrebné zadávať manuálne do schémy kolóny v programe Matlab Simulink.



Obrázok 5 Blok pre ohrev varáka v schéme Matlab Simulink

1.3.1 Ohrev varáka

Na začiatku je potrebné zapnúť zariadenie, spustiť chladenie, pripraviť zmes používanú ako nástrek a spustiť schému v Matlab Simulink. Ohrev varáka najprv nastavíme na maximálny možný, napíšeme hodnotu vo Voltoch 5 do konštantného vstupu v bloku pre ohrev varáka (Obrázok 5) a potvrdíme.



Obrázok 6 Blok PID predhrev nástreku v Matlab Simulink

1.3.2 Nástrekk

Kvapalina vo varáku sa postupne zohrieva, jej teplota sa zvyšuje a pary začínajú prechádzať kolónou. Počkáme na prvé kvapky z kondenzátora, zároveň sledujeme hodnotu teploty v 8. etáži, ktorá je najbližšie reboileru, ak T8 stúpne nad 80°C spustíme nástrekk. Zadáme hodnotu v ml/s 1,2 do konštantného vstupu v bloku pre prietok nástreku a potvrdíme.

Z displeja 14 v bloku PID predhrev nástreku (Obrázok 6) odčítame hodnotu teploty T15 priemernú teplotu predohrevu nástreku. Túto teplotu následne zapíšeme do konštantného vstupu T15ss v bloku PID predhrev nástreku a potvrdíme.

1.3.3 PID predhrev nástreku

Súčasťou schémy je PID regulátor, ktorý zabezpečuje zohriatie nástreku pred vstupom do zariadenia na žiadanú teplotu. PID regulátor predhrevu pracuje v odchýlkovom tvare, preto je potrebné ho v správnom čase spustiť zadaním určeného rozdielu teplôt nástreku a aktivovaním výpočtu odchýlky, rozdielu skutočnej a žiadanej hodnoty.

Zadáme odchýlku pre teplotu nástreku, napíšeme hodnotu v °C 40 do konštantného vstupu žiadaná teplota predhrevu v bloku set point teplota nástreku a potvrdíme. Prepne manuálny prepínač error ON/OFF, tak aby prepúšťal signál - hodnotu, ktorú zobrazuje displej tracking error v bloku PID predohrev nástreku. Tým sme zabezpečili výpočet hodnoty pre regulátor. Zapneme manuálny prepínač PID ON/OFF, tak aby púšťal hodnotu, ktorá vychádza z výstupu Out 1 v bloku PID predhrev nástreku, čím spustíme predhrev nástreku cez regulátor.

1.3.4 Zníženie ohrevu varáka

Do kolóny vstupuje zohriaty nástrekk a súčasne je varák spustený na plný výkon. Sledujeme hodnotu teploty na hlave kolóny, ak T10 stúpne nad 60°C znížime ohrev. Zadáme hodnotu vo Voltoch 1,5 do konštantného vstupu v bloku pre ohrev varáka a potvrdíme.

1.3.5 Ustálený stav kolóny

Pri manuálnom nábehu kolóny je potrebné určiť ustálený stav z pozorovania grafických závislostí. Po celú dobu experimentu máme k dispozícii časové priebehy teplôt v závislosti od času, na ktorých možno sledovať ustálenie. Najviac nám vyhovuje grafická závislosť y-profiles, kde máme k dispozícii závislosti T10, T1, T2, T3 a T3 a súčasne graf T15 v bloku PID predhrev nástreku. V prípade, že sa už teploty nemenia s časom, sú konštantné,

dostali sme sa do ustáleného stavu. Ak je kolóna v ustálenom stave, zariadenie je pripravené na činnosť riadenia.

1.3.6 Nízka hladina vo varáku

Ak počas fázy nábehu nie je spustený nástrek, môže klesnúť hladina pod minimálnu povolenú hodnotu, zapne sa kontrolka, červené svetlo s označením *low level* na riadiacej skrinke. Vtedy je potrebné spustiť nástrek. Napíšeme hodnotu v ml/s 1,2 do konštantného vstupu v bloku pre prietok nástreku a potvrdíme.

V prípade, že hladina po čase stúpne kontrolka zhasne. Vypneme prietok nástreku. Napíšeme hodnotu v ml/s 0 do konštantného vstupu v bloku pre prietok nástreku a potvrdíme.

1.4 Automatizovaný nábeh kolóny

Jednou z hlavných úloh automatizácie je zjednodušovanie, uľahčovanie činností človeka. Nakoľko pri nábehu destilačnej kolóny sa vyskytujú časti, ktoré by bolo možné vykonávať po splnení určitých podmienok automaticky, bez nutnosti zásahu operátora, vytvorili sme algoritmus na automatizovaný nábeh. Riadenie na báze stavov bolo vytvorené v programe Matlab Stateflow.

1.4.1 Vstupy do Matlab Stateflow

Program Matlab Stateflow potrebuje na výpočty určité hodnoty. Niektoré získame priamo už z existujúcej schémy v programe Matlab Simulink, iné je potrebné vytvoriť v Matlab Stateflow. Tieto vstupy delíme na konštantné vstupy a vstupy vo forme hodnôt teplôt, ktoré sa s časom menia a iné:

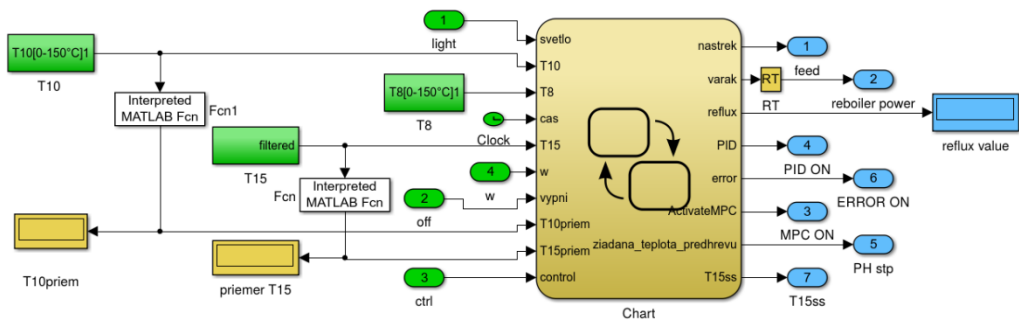
1. Hodnoty teplôt, ktoré budeme do Matlab Stateflow potrebovať sú teplota na poslednej, 8.etáži - T8, teplota vo varáku - T10 a teplota nástreku po ohreve - T15. Hodnoty týchto teplôt získavame priamo zo senzorov, ktoré ich snímajú na jednotlivých teplotných snímačoch, na každej etáži a na miestach v kolóne.
2. Hodnoty konštánt zavádzame na zabezpečenie komplexnosti vytvoreného algoritmu, preto vytvoríme pohotovostný mód, v ktorom bude pripravené zariadenie čakať na aktiváciu operátorom. Ďalšia konštanta bude zabezpečovať pokles hladiny plaváka pod výšku minimálnej hladiny vo varáku. Zároveň je pre PID regulátor potrebné zadať žiadanú hodnotu, od ktorej sa bude odpočítavať skutočná hodnota teploty nástreku po

ohreve. Posledná nami pridaná konštanta dá užívateľovi možnosť po nábehu kolóny spustiť riadenie teploty na hlave kolóny.

3. Čas používame v niektorých stavoch chartu Matlab Stateflow na aktiváciu podmienok. Preto je potrebný na vstupe časovač, ktorý tento čas určí.
4. Priemerné hodnoty teplôt sú potrebné na určenie ustáleného stavu destilačnej kolóny. Ide o priemerné hodnoty teploty vo varáku - T10 a nástreku po ohreve - T15. Tie získame na základe separátneho programu na výpočet priemerných teplôt.

Tabuľka 1 Vstupy do Matlab Stateflow

Názov	Popis
svetlo	Hodnota 0/1, zmena v prípade nízkej hladiny vo varáku
T10	Aktuálna hodnota teploty na hlave kolóny
T8	Aktuálna hodnota teploty na 8. etáži
čas	Poskytuje aktuálny čas priebehu simulácie
T15	Aktuálna hodnota teploty nástreku po predhreve
w	Žiadaná hodnota predhrevu nástreku pre PID regulátor
vypni	Hodnota 0/1, zmena v prípade zapnutia/ vypnutia systému
T10priem	Vypočítaná hodnota z funkcie podľa T10
T15priem	Vypočítaná hodnota z funkcie podľa T15
control	Hodnota 0/1, zmena v prípade riadenia teploty po dosiahnutí ustáleného stavu



Obrázok 7 Vstupy a výstupy do Matlab Stateflow

Funkcia na výpočet hodnôt priemerných teplôt:

```
function y=priemer(w)
%v vektor poslednych 3000 vzoriek teploty (pocas 5min pri
periode vzorkovania 0.1s)
persistent n v i
if(length(v)<3000)
v=[v w];
else
    if(i<3000)
        i=i+1;
    else i=1;
    end
    v(i)=w;
end
n=length(v);
y=sum(v)/n;
end
```

1.4.2 Výstupy z Matlab Stateflow

Vypočítané hodnoty parametrov a signály získané v Chart Matlab Stateflow ďalej prevedieme z Matlab Stateflow do schémy v prostredí Matlab Simulink. Výstupy môžeme rozdeliť na výstupy s číselnou hodnotou a výstupy vo forme manuálneho prepínača.

1. Číselné hodnoty prietoku nástreku, výkonu varáka, hodnoty refluxu, hodnoty teploty nástreku po predhre v ustálenom stave - T15ss a žiadanej teploty predhre v sme

zapojili priamo do schémy. Tým sme nahradili pôvodné konštantné vstupy, ktoré musel operátor manuálne vyplňať.

2. Manuálne prepínače na aktiváciu PID regulátora nástreku PID ON, odchýlky PID regulátora ERROR ON, a aktivácie riadenia teploty MPC ON sú nastavené na začiatku neaktívne, aby sa aktivovali v žiadaný moment a nahrádzajú prepínanie, ktoré musel operátor realizovať manuálne.

Tabuľka 2 Výstupy z Matlab Stateflow

Názov	Popis
Nástrek	Hodnota prietoku nástreku pre čerpadlo
Varák	Hodnota výkonu varáka na ohrev kolóny
Reflux	Hodnota akčného zásahu ventilu refluxu
PID	Hodnota 0/1, zmena v prípade aktivácie PID regulátora predhrevu
error	Hodnota 0/1, zmena v prípade aktivácie odchýlky pre PID regulátor
ActivateMPC	Hodnota 0/1, zmena v prípade požiadavky riadenia
Ziadana_teplota_predhrevu	Aktuálna hodnota požadovanej teploty nástreku po predhreve
T15ss	Ustálený stav teploty nástreku po predhreve

1.4.3 Chart Matlab Stateflow

V tejto časti opíšeme jednotlivé stavy Matlab Stateflow (Obrázok 8), ich funkcie a podmienky prechodu medzi nimi:

1. Vypnuté je počiatočný stav, v ktorom proces začína. Je to stav, v ktorom zariadenie čaká na aktiváciu, pokiaľ ho operátor uvedie do činnosti nastavením konštanty Device OFF na hodnotu 0. Avšak, v ktoromkoľvek stave je možné systém opäť vrátiť do tohto stavu.

Zdrojový kód bloku:

```
vypnute
exit:
nastrek=0;
```

2. Zohriatie, v tomto stave sa nastaví hodnota refluxu na hodnotu 0 a zapne sa varák na hodnotu 5V. Odchodové podmienky zo stavu sú teplota poslednej 8. etáži - T8 väčšia ako 60°C alebo ak v prípade nízkej hladiny vo varáku sa zapne červené svetlo, operátor zadá konštantu do vstupu Red Light ON (Obrázok 9).

Zdrojový kód bloku:

```
zohriatie  
reflux=0;  
varak=5;
```

3. Svieti, tento stav nastane, keď operátor zadal konštantu do vstupu Red Light ON. Zapne sa nástrek, po určitom čase stúpne hladine vo varáku a červené svetlo zhasne. Operátor zadá konštantu na hodnotu 0. Proces sa vráti do stavu zohriatie.

Zdrojový kód bloku:

```
svieti  
nastrek=1.2;
```

4. Stav nástrek nastane ak je teplota na poslednej etáži - T8 väčšia ako 60°C. Zapne sa nástrek, nastaví sa hodnota tolerancie, potrebná pre výpočet ustáleného stavu a nastaví sa absolútna hodnota pre počítanie času. Odchodovou podmienkou je čas, ktorý má algoritmus ustálenú teplotu počítať a dosiahnutie ustáleného stavu systému. V tomto prípade počítame ustálený stav cez pohyblivý priemer, ktorý počítal M súbor a zvolenú toleranciu. V prípade, že aktuálna hodnota teploty je taká ako priemerná s toleranciou, nachádzame sa v ustálenom stave.

Zdrojový kód bloku:

```
nastrek  
entry:  
nastrek=1.2;  
eps=0.5;  
vstupny=cas
```

5. V stave príprava predhrevu sa určí teplota nástreku po predhreve v ustálenom stave -T15ss ako priemerná hodnota T15, ďalej sa vypočíta rozdiel aktuálnej a žiadanej teploty predhrevu, ktoré budeme potrebovať na výstupe.

Zdrojový kód bloku:

```

priprava_predhrevu
entry:
T15ss = T15priem;
ziadana_tepnota_predhrevu=(w-T15priem);

```

6. Predhrev do tohto stavu sa algoritmus dostane po prípravnom stave. Tu sa aktivuje PID ohrev nástreku ako aj jeho odchýlka - error na hodnotu 1, cez manuálne prepínače. Odchodovou podmienkou je teplota na hlave kolóny - T10 väčšia ako 60°C.

Zdrojový kód bloku:

```

predhrev
entry:
PID=1;
error=1

```

7. Výhrev konštrukcie nastane ak teplota T10 je väčšia ako 60°C. V tomto stave sa aktivuje varák na hodnotu 5V a znova sa spustí meranie času. Odchodovou podmienkou je čas, počas ktorého sa bude konštrukcia kolóny vyhrievať.

Zdrojový kód bloku:

```

vyhrev_konstrukcie
entry:
varak=5;
vstupny=cas;

```

8. Varák Tento stav nastane po ohreve kolóny zadaný čas. V tomto stave sa zníži výkon varáka na hodnotu 1,5V. Odchodovou podmienkou je ustálený stav pre teploty T10 a T15 a zadaná konštanta Control na prechod na riadenie kolóny operátorom.

Zdrojový kód bloku:

```

varak
entry:
varak=1.5;
ActivateMPC=0;

```

9. Stav riadenie nastane po ustálení teplôt T10, T15 a zadání konštanty operátorom. V tomto stave je kolóna pripravená na riadenie. Zmenou hodnoty konštanty Control (Obrázok 9) sa systém vráti do predošlého stavu.

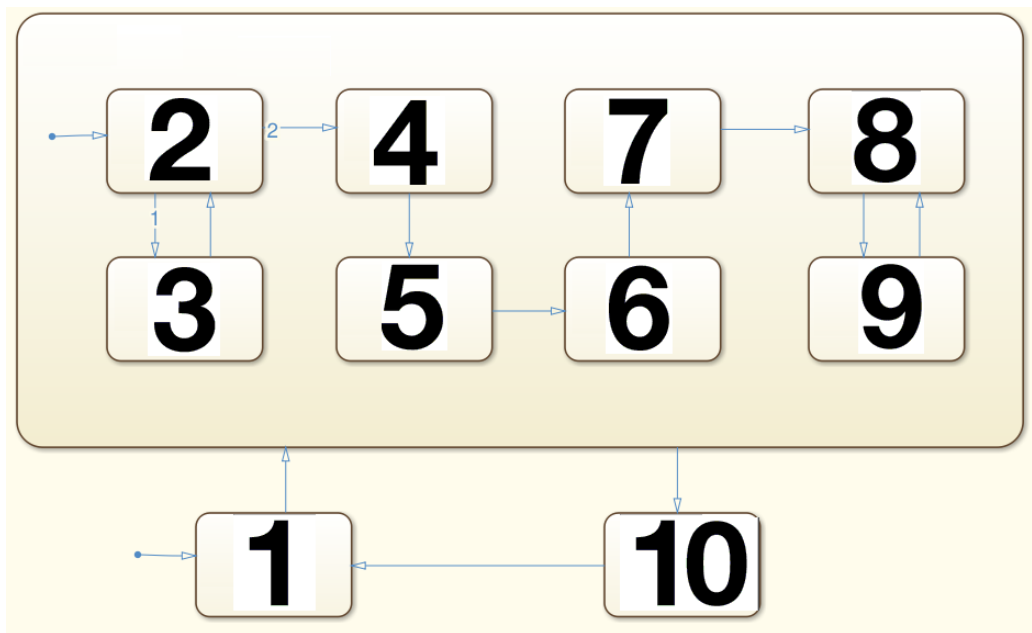
Zdrojový kód bloku:

```
riadenie  
ActivateMPC=1
```

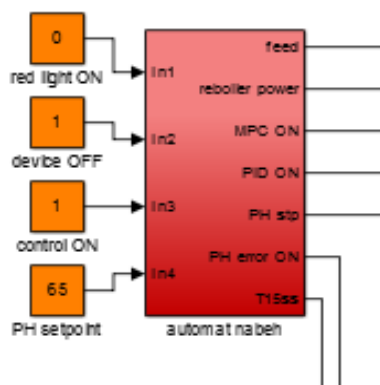
10. Nástrek bez ohrevu nastane, ak operátor v ktoromkoľvek stave zadá konštantu Device OFF 1 (Obrázok 9). Všetko okrem nástreku je vypnuté, kolóna sa ním ochladzuje a pripravuje na vypnutie, ak teplota teplota nástreku po predhreve - T15 dosiahne 40°C, zariadenie sa vypne.

Zdrojový kód bloku:

```
nastrek_bez_ohrevu  
entry:  
nastrek=1.2  
PID=0;  
error=0;  
reflux=0;  
varak=0;  
ActivateMPC=0;
```



Obrázok 8 Stavý Matlab Stateflow



Obrázok 9 Riadiaci panel operátora

2 Fuzzy logika

Ľudská reč, ako aj myslenie, je založené na pochybnosti, nepresnosti. Náš mozog si dokáže poradiť s neurčitosťou. Dokážeme riešiť prípady, ak vznikne problém rozhodnúť sa, nakoľko je situácia pravdepodobná, alebo či nejaký prvok je súčasťou množiny, alebo nie [7].

V prípade použitia výpočtovej techniky, je možné určením hraníc presne určiť príslušnosť prvku. Komplikácie vznikajú, keď sa prvok blíži k hranici členstva v množine. Rozdiel medzi členstvom a nečlenstvom prvku v množine sa zmenšuje. Vzniká nutnosť uvažovať o čiastočnej príslušnosti prvku do množiny, čo je možné s použitím fuzzy logiky [7].

Pri počiatkoch fuzzy logiky stáli tri vedecké kapacity. Lukasewicz prispel vytvorením základov viachodnotovej logiky, Zadeh položil základ fuzzy množín a Ymakawa vytvoril prvý fuzzy obvod, čím dokázal možnosť realizácie dovtedy teoretických znalostí [7].

2.1 Klasické a fuzzy množiny

Množina je súhrn predmetov, vecí, dobre rozlíšiteľných našou myslou alebo intuíciou. Množina je celok, charakterizovaný spoločnými vlastnosťami [8].

Ostré množiny obsahujú prvky, ktoré zodpovedajú vlastnostiam množiny. Na rozdiel od toho fuzzy množiny obsahujú prvky, ktoré vyhovujú nepresným vlastnostiam množín. Množina „hmotnosť od 45 do 55 kg“ je presne určená v porovnaní s množinou „hmotnosť okolo 50 kg“, ktorá je neurčitá, konkrétna hranica rozlišujúca člena od nečlena presne určená nie je [9].

Prvky ostrých množín vytvárajú priestor - univerzum informácií. Teda, rôzne kombinácie týchto prvkov vytvárajú množinu v priestore. Pri klasických množinách vždy platí, že prvok je buď členom danej množiny, alebo nie. Tvrdenie, že prvok je členom množiny je vždy matematicky pravda alebo nepravda, *true* alebo *false*, pravdivostná hodnota 1 alebo 0 [9].

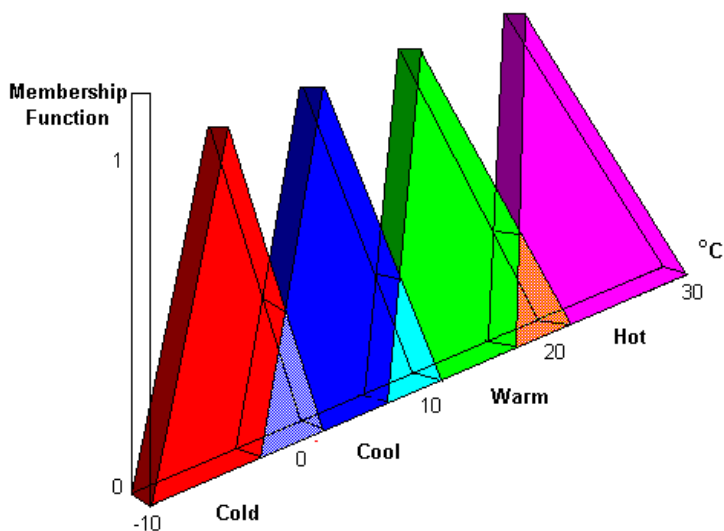
Klasické množiny odrážajú svet do istej miery, ale nutnosť sa rozhodnúť vždy len medzi dvoma možnosťami, môže viesť k neriešiteľným problémom. Typickým príkladom je Eubulidov paradox. Predstavme si kopu piesku. Ak z tejto kopy zoberieme len 1 zrnko, zvyšok bude stále považovaný za kopy piesku, pretože kvôli jednému zrnku kopa nezanikne ani nevznikne. Ak ale budeme z tejto kopy uberať po jednom zrnku dostatočne dlho, nakoniec nám nezostane nič, ale podľa predošlej úvahy to stále bude kopa piesku. Pojem kopy je nejasný, neexistuje ostrý prechod medzi kopou, kôpkou alebo nekopou [10][11].

Zadeh v práci [12] rozpracoval predstavu, že neurčité množstvo prvkov medzi koncovými bodmi 0 a 1 môže reprezentovať rôzne stupne príslušnosti prvkov x určitej množiny v univerze. Teda rozdiel medzi ostrou množinou a fuzzy množinou je vo funkcii príslušnosti. V prípade ostrých množín máme len jednu funkciu príslušnosti, fuzzy množina môže mať teoreticky aj nekonečne veľa funkcií príslušnosti.

V prípade fuzzy množín sa svojím spôsobom stráca jedinečnosť, ale získava sa flexibilita, pretože funkcia príslušnosti môže byť nastavená na maximum pre konkrétny prípad [13].

V prípade klasických množín je prechod prvkov v univerze medzi členmi a nečlenmi nesúvislý, nie sú prispôsobené k vyjadreniu neurčitosti, ale zároveň dobre definovaný, ostrý (Obrázok 10). Pre prvok x z univerza, ktorý je členom fuzzy množiny, je prechod voľný. Fuzzy množina obsahuje prvky s rozdielnymi stupňami príslušnosti k množine. Pre porovnanie s ostrými množinami, prvky vo fuzzy množinách nemôžu byť prvkami množiny, pokiaľ ich členstvo nie je úplné, hodnota 1. Prvky vo fuzzy množine môžu byť prvky zároveň iných fuzzy množín v rovnakom univerze [9].

Vývoj fuzzy množín bol založený na skutočnosti, že tradičné metódy systémovej analýzy, reprezentované diferenciálnymi alebo diferenčnými rovnicami, nie sú vhodné na opísanie vzťahov medzi premennými niektorých systémov. Takéto systémy možno nájsť v biológii, ekonomike, sociológii a všeobecnejšie v oblastiach, kde ide o systémy viac s ľudskou než mechanickou povahou. Tradičné metódy systémovej analýzy sú zamerané na používanie numerických techník. Na rozdiel od toho rozhodovanie na princípe ľudského myslenia využíva premenné, ktorých hodnota je lepšie opísaná fuzzy množinami. Táto skutočnosť tvorí základ pre zavedenie lingvistickej premennej, ktorej hodnoty majú viac slovnú ako číselnú podobu. Fuzzy množina odráža nepresnosť hodnôt premenných, ktoré bežne používa človek v každodenných situáciách [14].



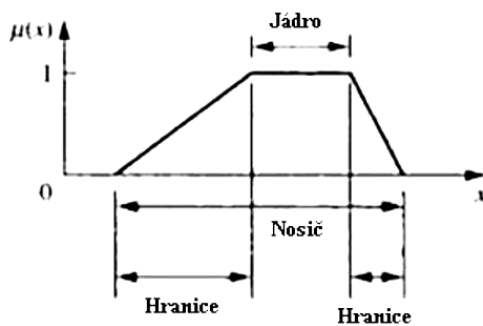
Obrázok 10 Fuzzy funkcie pre rozdelenie teplôt [15]

2.2 Funkcia príslušnosti fuzzy množiny

Vo fuzzy teórii sa každému prvku priraduje miera jeho príslušnosti v množine. Ide o číslo z uzavretého intervalu $[0;1]$ nazývané stupeň príslušnosti (Obrázok 11). Označuje sa gréckym písmenom μ , kde v indexe sa nachádza názov fuzzy množiny do ktorej patrí:

$\mu_A(x) = z$ čo čítame ako: stupeň príslušnosti prvku x k množine A je z [16].

Jadrom funkcie príslušnosti pre fuzzy množinu je oblasť univerza, v ktorej sú prvky význačné úplným členstvom k množine. Nosič funkcie príslušnosti pre fuzzy množinu je oblasť z univerza, v ktorej je členstvo vo fuzzy množine nenulové. Hranica funkcie príslušnosti pre fuzzy množinu je oblasť z univerza, obsahujúca prvky, ktoré majú nenulové členstvo, ale súčasne nie sú úplne členmi množiny [9].



Obrázok 11 Fuzzy funkcia príslušnosti [9]

Prvok fuzzy množiny je jej členom a súčasne nie je jej členom. Na rozdiel od klasických množín členstvo prvku vo fuzzy množine je určené neostro. Funkcia príslušnosti určuje nakoľko je prvok členom množiny. Možno povedať, že funkcia príslušnosti je mierou príslušnosti prvku do danej množiny [16].

Funkcia príslušnosti vyjadruje neurčitost' vo fuzzy množine v grafickej podobe, čo sa využíva pri matematickom vyjadrení teórie fuzzy množín. Je viacero spôsobov, ktorými je možné priradiť funkciu príslušnosti danému neurčitému pojmu. Je to proces buď intuitívny alebo založený na algoritmoch a logických operáciách. Metódy, ktoré priradujú hodnoty príslušnosti alebo funkcie k fuzzy premenným sú dedukcia, neurónové siete, genetické algoritmy alebo induktívne uvažovanie [13].

Aby sme dokázali z klasických čísel, informácií alebo prvkov získať fuzzy prvky, spracovať ich a vyhodnotiť, je potrebné uviesť niektoré vlastnosti a operácie s fuzzy množinami ktoré budeme používať.

2.3 Vlastnosti fuzzy množín a operácie s nimi

Existuje množstvo spôsobov na zovšeobecnenie operácií prienik, zjednotenie a negácia z klasickej binárnej na viachodnotovú fuzzy logiku. Jedinou podmienkou je, že musia vyhovovať pre všetky hodnoty, čiže aj pre binárne premenné 0 a 1 [17].

Existuje niekoľko pojmov súvisiacich s fuzzy množinami, ktoré budeme neskôr využívať, väčšinu z nich definoval sám Zadeh :

1. Rovnosť:

Dve fuzzy množiny A a B v priestore X sa rovnajú, píšeme $A = B$, vtedy a len vtedy, ak pre všetky $x \in X$ platí, že: $\mu_A(x) = \mu_B(x)$.

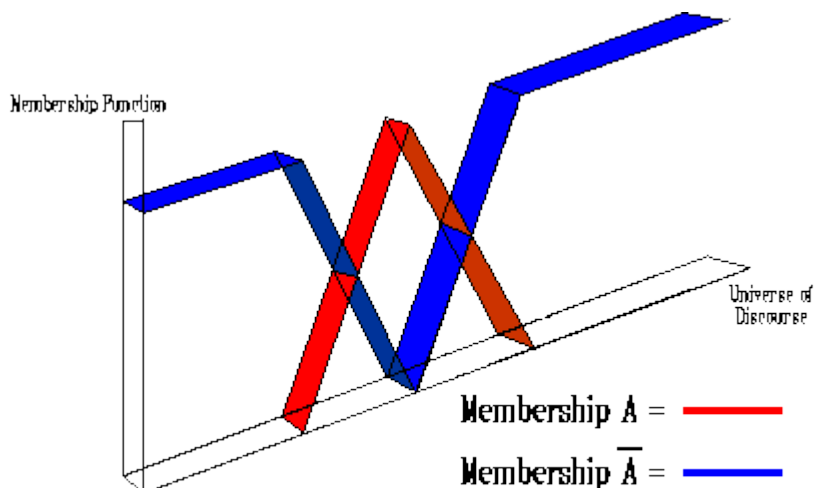
2. Podmnožina:

Fuzzy množina A je podmnožinou v fuzzy množiny B , píšeme ako $A \subset B$, vtedy a len vtedy, ak pre všetky $x \in X$ platí, že: $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$.

V tomto zmysle je množina "veľmi vysokých mužov" podmnožinou fuzzy množiny "vysokých mužov". Rovnako ako je fuzzy množina čísel, ktoré sú "oveľa väčšie ako 10" je podmnožinou ostrej množiny reálnych čísel, ktoré sú "väčšie ako 10".

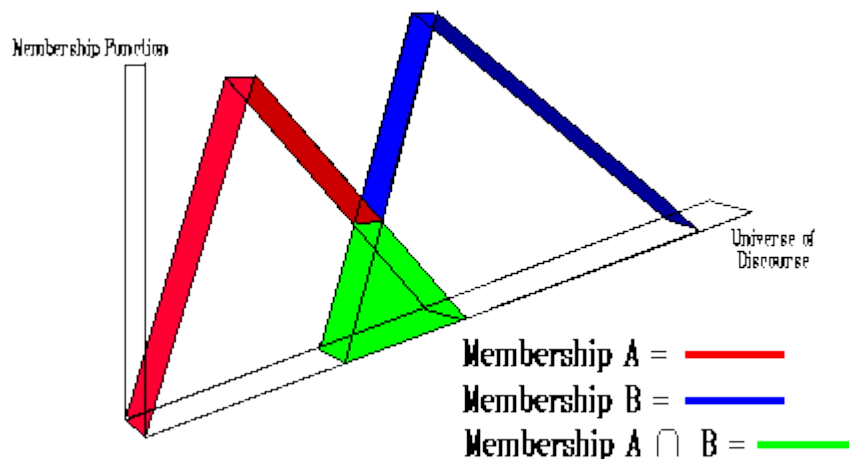
3. Doplnok:

Fuzzy množina $\bar{A}$ je doplnkom fuzzy množiny A vtedy, keď $\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A$.



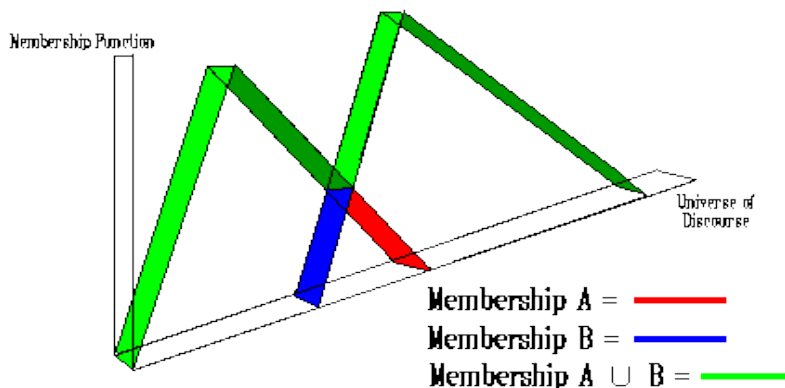
Obrázok 12 Doplnok fuzzy množiny [15]

4. Prienik dvoch fuzzy množín A a B je označený $A \cap B$ a je definovaný ako najmenšia fuzzy množina obsahujúca A ako a B . Okamžitým dôsledkom tejto definícia je, že funkcia príslušnosti $A \cap B$ je daná vzťahom: $\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$. Ak teda v bode x , $\mu_A(x) = 0,8$ a $\mu_B(x) = 0,5$ potom sa v tomto okamihu, $\mu_{A \cap B}(x) = 0,5$.



Obrázok 13 Prienik fuzzy množín [15]

5. Zjednotenie dvoch fuzzy množín A a B je označované $\mu_{A \cup B}(x)$ a je definované ako najväčšia fuzzy množina obsiahnutá v A i B. Funkcia príslušnosti $\mu_{A \cup B}(x)$ je daná vzťahom: $\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$ [16][17].



Obrázok 14 Zjednotenie fuzzy množín [15]

2.3.1 Trojuholníkové normy a ich vlastnosti

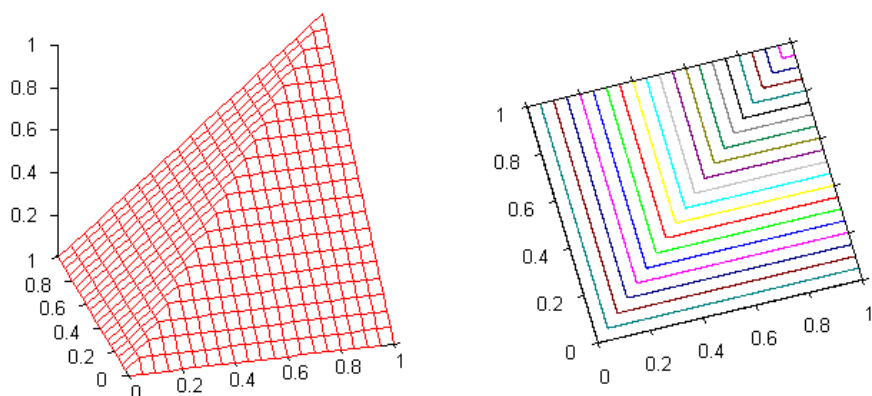
Trojuholníkové normy sú funkcie, skrátené t-normy, používané na modelovanie konjunkcie vo fuzzy logikách. Konjunkcia je logická výroková spojka $\wedge$, kde sú dva výroky spojené spojkou „a“, tvoria výrok, ktorý je pravdivý vtedy, ak sú oba výroky pravdivé [11].

Funkcia $T: \langle 0,1 \rangle^2 \rightarrow \langle 0,1 \rangle$ je trojuholníková norma, kde platí:

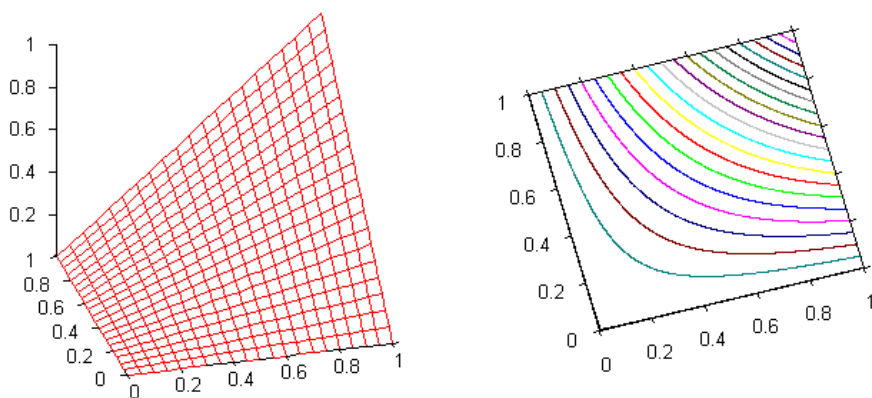
- | | |
|------------------------|---|
| ➤ komutatívnosť | $T(u, v) = T(v, u)$ |
| ➤ asociatívnosť | $T(u, T(v, w)) = T(T(u, v), w)$ |
| ➤ hraničná podmienka | $T(u, 1) = u$ |
| ➤ T je rastúca funkcia | $u_1 \leq u_2 \Rightarrow T(u_1, v) \leq T(u_2, v)$ |

Základné t-normy:

- | | |
|-------------------------|---------------------------------------|
| • minimová (Obrázok 15) | $T_M(u, v) = \min(u, v)$ |
| • súčinová (Obrázok 16) | $T_P(u, v) = u \cdot v$ |
| • Lukasiewiczova | $T_L(u, v) = \max(u + v - 1, 0)$ [11] |



Obrázok 15 Minimová T-norma [25]



Obrázok 16 Súčinná T-norma [25]

2.3.2 Trojuholníkové konormy a ich vlastnosti

Trojuholníkové konormy, skrátene t-konormy, sú funkcie používané na modelovanie disjunkcie vo fuzzy logikách. Sú duálnymi funkciami k t-normám, používame axiomatický prístup. Disjunkcia je logická výroková spojka $\vee$, kde sú dva výroky spojené spojkou „alebo“ a tvoria výrok, ktorý je pravdivý vtedy, ak je pravdivý aspoň jeden z nich [11].

Funkcia $S: \langle 0,1 \rangle^2 \rightarrow \langle 0,1 \rangle$ je trojuholníková konorma, kde platí:

- komutatívnosť $S(u, v) = S(v, u)$
- asociatívnosť $S(u, S(v, w)) = S(S(u, v), w)$
- hraničná podmienka $S(u, 0) = u$
- S je rastúca funkcia $u_1 \leq u_2 \Rightarrow S(u_1, v) \leq S(u_2, v)$

Základné t-konormy:

- maximová $S_M(u, v) = \max(u, v)$
- pravdepodobnostný súčin $T_P(u, v) = u + v - u \cdot v$
- Lukasiewiczova $S_L(u, v) = \min(u + v, 1)$ [11]

Viac informatizácií o vlastnostiach fuzzy množín a operácií s nimi môže čitateľ nájsť v [11], [18].

3 Fuzzy riadenie

V tejto kapitole porovnáme reguláciu systému fuzzy regulátorom s reguláciou klasickým spôsobom. Na základe predchádzajúcich vzťahov zavedieme jazykové premenné, pravidlá a podmienky tvorby funkcií príslušnosti potrebné na tvorbu fuzzy regulátora.

3.1 Klasický PID regulátor

Jednou zo základných úloh automatizácie je regulácia v priemyselných systémoch. Ide o ovplyvňovanie jedného alebo viacerých vstupov alebo výstupov s cieľom zabezpečiť želané výsledky procesu, či už parametre niektorého z prúdov, alebo vlastnosti látok v zariadení. V priebehu riadenia určujeme regulačnú odchýlku e ako rozdiel žiadanej hodnoty veličiny w a jej aktuálnou hodnotou v danom čase y . Princíp činnosti PID regulátora je založený na tom, že na základe aktuálnej regulačnej odchýlky e určuje veľkosť akčného zásahu (napr. otváranie ventilu) podľa vzťahu:

$$u(t) = Z_R \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (1)$$

Prenos PID regulátora v programe Matlab:

$$G_R = P + \frac{I}{s} + Ds \quad (2)$$

$$\text{kde } P = Z_R; I = \frac{Z_R}{T_I}; D = Z_R T_D \quad (3)$$

V súčasnosti je viac ako 90% priemyselných regulátorov PID. Jeho tri zložky proporcionálna, integrálna a derivačná dokážu zabezpečiť určitú kvalitu riadenia a stabilitu systému súčasne. Tým ponúka najjednoduchšie a zároveň najefektívnejšie riešenie pre mnohé systémy v laboratórnej praxi aj procesnom priemysle [19].

Je známe, že konvenčné PID regulátory zvyčajne nedosahujú uspokojivé výsledky pri riadení nelineárnych systémov, systémov vyššieho rádu a lineárne systémy s časovým oneskorením. Preto sa vyvíjajú rôzne typy modifikovaných konvenčných PID regulátorov, ako automaticky ladené a adaptívne PID regulátory [19].

Najvyššiu kvalitu regulácie sa dosahuje spojením základných typov regulátorov, čím sa získavajú kombinácie ako:

1. Samostatný P-regulátor je možnosťou realizácie najjednoduchší. V spojení so sústavou 1. rádu má často veľké zosilnenie. Pri sústavách vyšších rádov dochádza k preregulovaniu, preto sa volí menšie zosilnenie regulátora.
2. I-regulátor v spojitosti s inými typmi regulátorov úplne odstraňuje regulačnú odchýlku. Nevýhodou je pokles zosilnenia v prípade zvyšovania frekvencie, len pomaly odstraňuje poruchy. Je obzvlášť vhodný pre systémy bez zotrvačnosti. Zo všetkých typov je najvhodnejší pre reguláciu systémov s dopravným oneskorením.
3. PI-regulátor je najrozšírenejší kombinovaný regulátor, nakoľko má univerzálne použitie. Najvhodnejší je pre kmitavé sústavy 2. a 3. rádu. V prípadoch použitia pre systémy vyšších rádov, je potrebné znižovať zosilnenie regulátora, respektíve zvyšovať integračnú konštantu.
4. PD-regulátor je vhodný tam, kde aj samotný P-regulátor, ale navyše má väčšiu rýchlosť regulácie, čím potláča prekmity regulovanej veličiny.
5. PID-regulátor sa používa tam, kde PI-regulátor. Reaguje rýchlejšie, dobre tlmí rýchle prekmity regulovanej veličiny aj poruchy.

Viac informácií o regulátoroch a ich použití môže čitateľ nájsť v [20],[22].

3.2 Fuzzy regulácia

Mnoho procesov ovládaných operátormi nemožno automatizovať použitím bežných regulátorov, pretože nimi produkované riadenie by bolo horšie ako riadenie operátorom. Jedným z dôvodov je to, že lineárne regulátory, ktoré sú bežne používané, nie sú vhodné pre nelineárne systémy. Ďalej ľudia sú schopní reagovať na rôzne druhy informácií, a vytvárajú riadiace stratégie, ktoré nemôžu byť integrované do jediného analytického zákona riadenia.

Princípom ovládania expertom je zachytiť a realizovať skúsenosti a poznatky, ktoré sú k dispozícii. Špecifický typ riadenia, fuzzy riadenie, je založený na nejasných pravidlách regulácie. Opatrenia, zodpovedajúce špecifickým podmienkam systému sú popísané v zmysle fuzzy pravidiel ak - potom.

Fuzzy množiny slúžia na definovanie významu kvalitatívnych hodnôt vstupov a výstupov regulátora ako malá odchýlka, veľké otvorenie ventilu. Fuzzy logika môže zachytiť povahu ľudských rozhodovacích procesov a prináša zlepšenie oproti používaným metódam založených na binárnej logike.

Fuzzy logika dáva ľudskému mysleniu matematický aparát na vysporiadanie sa s neurčitosťami. Prípady, kedy je výhodné po tejto možnosti siahnuť sú:

- ak sa v systéme vyskytujú nemetrické alebo neurčito zadané veličiny(studený, približne 20).
- ak nie je dostupný alebo známy matematický model procesu.
- ak má vplyv na riadenie nelinearita procesu.
- ak sú dostupné informácie o procese v jazykovej podobe(biológia, chémia, optimalizácia)[18].

3.3 Fuzzy regulátor podľa Mamdaniho

Je to zariadenie, ktoré sa používa ako regulátor uzavretej slučky. Jeho báza pravidiel predstavuje statické zobrazenie medzi predchádzajúcimi a súčasnými hodnotami premenných. Preto použité filtre majú za úlohu zabezpečiť správne dynamické správanie regulátora.

Riadiaci protokol je uložený formou ak - potom pravidiel, ktoré sú súčasťou bázy pravidiel. Zatiaľ čo pravidlá sú založené na kvalitatívnom poznaní, funkcia príslušnosti definujúca jazykové výrazy vytvára rozhranie pre numerické spracovanie procesných premenných a nastavených hodnôt. Fuzzifikáciu určuje členstvo vstupných hodnôt pôvodných fuzzy množín. Mechanizmus logického jadra kombinuje tieto informácie s tými, uloženými v pravidlách a určuje, aký by výstup zo systému mal byť. Všeobecne platí, že tento výstup je opäť fuzzy množina. Na účely kontroly sa vyžaduje aby bol riadiaci signál ostrý. V procese defuzzifikácie sa vypočíta hodnota tohto ostrého signálu z fuzzy výstupov regulátora.

Fuzzy zobrazenie je len jedna časť fuzzy regulátora. Spracovanie signálu je nutné pred, ako aj po fuzzy zobrazení. Je potrebné vykonať škálovanie signálu a dynamické operácie, ako počítanie derivácie alebo integrálu odchýlky kontrolného alebo riadiaceho signálu.

Uvažujme PID regulátor, zo zákonom riadenia v tvare uvedenom v rovnici (1) je to lineárna funkcia, ktorú môžeme uviesť aj v tvare:

$$u = \sum_{i=1}^3 a_i x_i \quad (4)$$

$$\text{kde } x_1 = e(t), x_2 = \int_0^t e(t)dt, x_3 = \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

$$\text{a } a_i = P, I, D \quad (6)$$

lineárnu funkciu môžeme zovšeobecniť do nelineárnej:

$$u = f(x) \quad (7)$$

V prípade fuzzy regulátora, nelineárna funkcia f je reprezentovaná fuzzy zobrazením. Je zrejmé, že fuzzy lineárne P, PI, PD alebo PID regulátory môžu byť analogicky navrhnuté pomocou vhodných operácií, ako sú derivácia a integrál.

Mamdaniho fuzzy systémy sú pomerne blízko manuálnemu ovládaniu. Regulátor je definovaný určením toho, aké hodnoty by mal nadobúdať výstup pre rôzne kombinácie vstupného signálu. Každá kombinácia vstupného signálu je reprezentovaná pravidlami v nasledujúcom formáte:

P1: Ak x_1 je A11, x_2 je A21, ..., x_n je An1, potom y je B1.

P2: Ak x_1 je A12, x_2 je A22, ..., x_n je An2, potom y je B2.

kde $x_1 - x_n$ sú vstupné veličiny,

y je výstupná veličina,

A11 – An1 sú hodnoty vstupných veličín v prvom pravidle,

A12 – An2 sú hodnoty vstupných veličín v druhom pravidle,

B1, B2 sú hodnoty výstupnej veličiny

Tiež môžu byť použité iné logické spojky a operátory ako logický súčet, alebo negácia. V Mamdaniho fuzzy systémoch sú fuzzy množiny najčastejšie volené ako trojuholníkové alebo Gaussove funkcie. Hodnota z výstupnej množiny sa získa výpočtom hodnoty ťažiska, respektíve stredov výstupných fuzzy množín. Následne výstupná hodnota je centrom výstupnej fuzzy množiny. Výsledkom fuzzy rozhodovania je interpolácia medzi bodmi vo vstupnom priestore. Mamdaniho regulátor možno považovať za konštantné funkcie, ktorých časti sú určené interpoláciou [18].

Keď budeme v ďalšom texte hovoriť o fuzzy regulátore, pôjde vždy o regulátor podľa Mamdaniho. Samozrejme tento typ regulátora, nie je jedinou možnosťou realizácie fuzzy regulátora. V tejto práci sme volili aparát podľa Mamdaniho hneď z niekoľkých dôvodov:

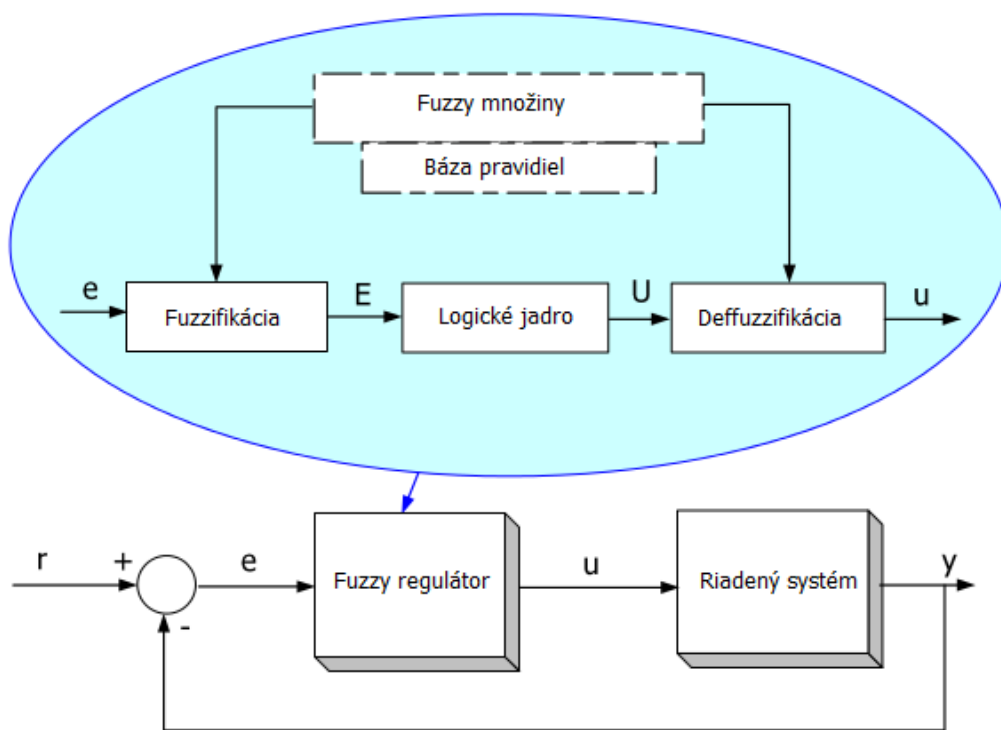
1. jednoduchá realizovateľnosť
2. použité signály sme získavali priamo z priebehu procesu
3. možnosť pri tvorby regulátora v Fuzzy toolbox-e programu MATLAB

Viac informácií o iných možnostiach realizovateľnosti rôznych fuzzy regulátorov ako aj vlastnostiach konkrétnych typov získa čitateľ v prácach [11], [18], [23].

3.3.1 Časti fuzzy regulátora

Fuzzy regulátor (Obrázok 17) sa skladá z týchto zložiek:

1. Bába pravidiel - je to sada fuzzy pravidiel typu ak - potom, ktoré pomocou fuzzy logiky kvantifikujú lingvistický opis fungovania procesu.
2. Logické (inferenčné) jadro - v ktorom rozhodovací proces interpretáciou a uplatňovaním zadaných pravidiel určuje najlepšiu kombináciu pre konkrétnu situáciu.
3. Fuzzifikácia - prevádzanie vstupov regulátora na fuzzy informáciu, ktorú možno použiť na aktiváciu a spustenie zodpovedajúcich pravidiel.
4. Defuzzifikácia - prevod výstupov z logického jadra na presné vstupy do riadeného systému.



Obrázok 17 Schéma fuzzy regulátora [24]

3.3.2 Fuzzy implementácia do systémov

Proces implementácie fuzzy prístupu do riadiacich systémov sa skladá z:

1. Časť, ktorá prebehne ešte predtým ako sa ovládací algoritmus vykoná, skladá sa z:
 - a) Stanovenie vstupných a výstupných premenných regulátora (lingvistické premenné).
 - b) Definovanie hodnôt každej premennej logického jadra.
 - c) Určenie funkcie príslušnosti každej premennej.
 - d) Stanovenie bázy pravidiel.
 - e) Definovanie mechanizmov fuzzifikácie, vyčíslenia pravdivosti v logickom jadre a defuzzifikácie.
2. Etapa, ktorá prebehne pri každom kroku algoritmu riadenia, pozostáva z:
 - a) Získanie vstupných hodnôt.
 - b) Fuzzifikácia: Priradenie hodnôt vstupným údajom a výpočet ich funkcií príslušnosti.
 - c) Logické jadro: Použitie bázy pravidiel a výpočet výstupnej fuzzy množiny vychádzajúc zo vstupných údajov.
 - d) Defuzzifikácia: Výpočet výstupných hodnôt zo získanej fuzzy množiny. Tieto presné hodnoty budú výstupy, príkazy a budú použité v riadiacom systéme.

Získame typický spätnoväzbový regulátor. Klasický regulátor je len nahradený fuzzy regulátorom, ktorý vykonáva rovnakú funkciu.

3.4 Návrh fuzzy regulátora

3.4.1 Jazykové premenné

Na základe signálov, ktoré sme na zariadení destilačnej kolóny schopní získať, volíme nasledovné jazykové premenné:

1. odchýlka $e(t)$
2. zmena odchýlky $de(t)/dt$
3. zmena refluxu $du(t)/dt$

Existuje veľa možných spôsobov, ako opísať premenné slovne, výber spôsobu nemá vplyv na to ako fuzzy regulátor funguje, len zjednodušuje jeho konštrukciu pomocou fuzzy logiky. Pri voľbe sme vychádzali z práce Aguilara [24] Hodnoty jazykových premenných sa môžu v čase

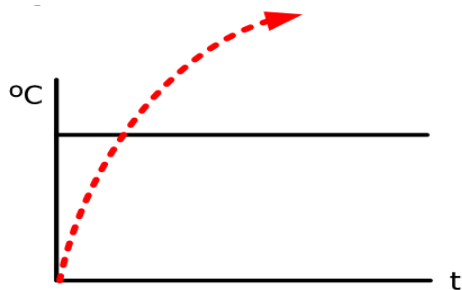
meniť. V prípade riadenia teploty, môžu odchýlka, zmena odchýlky a zmena refluxu nadobúdať hodnoty uvedené v Tabuľke 3.

LN	veľmi	záporná
MN	stredne	záporná
SN	málo	záporná
ZE	nulová	
SP	málo	kladná
MP	stredne	kladná
LP	veľmi	kladná

Tabuľka 3 Význam skratiek hodnôt jazykových premenných

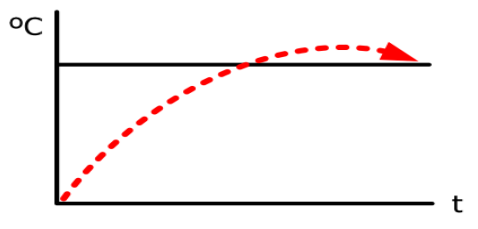
Dynamiku systému môžeme popísať na základe získaných jazykových premenných a ich hodnôt. V prípade riadenia teploty na hlave destilačnej kolóny, pre rôzne stavy systému môžu nastať napríklad nasledujúce prípady:

1. Odchýlka je veľmi záporná, čo znamená, že teplota na hlave kolóny je oveľa vyššia, než je žiaduce (Obrázok 18).



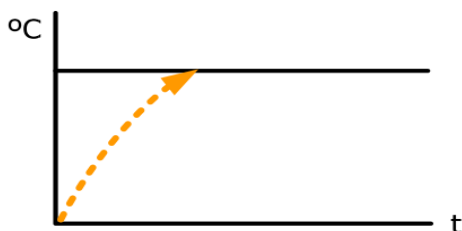
Obrázok 18 Veľmi záporná odchýlka [24]

2. Odchýlka je trochu záporná a zmena odchýlky je trochu kladná, čo ukazuje, že teplota na hlave kolóny je trochu vyššia ako žiadaná a klesá na požadovanú hodnotu (Obrázok 19).



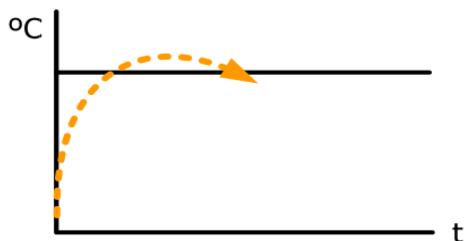
Obrázok 19 Trochu záporná odchýlka, trochu kladná zmena odchýlky [24]

3. Odchýlka je nulová a zmena odchýlky je trochu záporná, čo znamená, že teplota na hlave kolóny je viac či menej na žiadanej hodnote, ale stúpa (Obrázok 20).



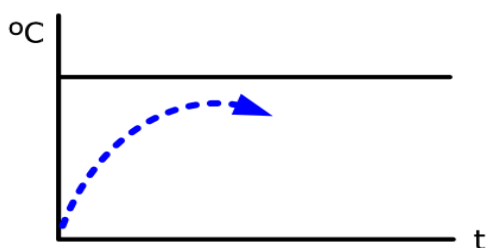
Obrázok 20 Nulová odchýlka, trochu záporná zmena odchýlky [24]

4. Odchýlka je nulová a zmena odchýlky je trochu kladná, čo naznačuje, že teplota na hlave kolóny je viac či menej na žiadanej hodnote, ale klesá (Obrázok 21).



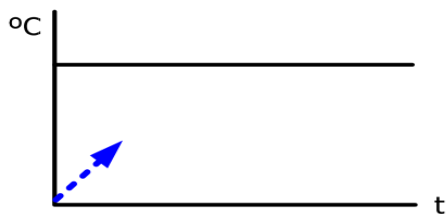
Obrázok 21 Nulová odchýlka, trochu kladná zmena odchýlky [24]

5. Odchýlka je trochu kladná a zmena odchýlky je trochu kladná, čo ukazuje, že teplota na hlave kolóny je nižšia ako žiadaná hodnota a ďalej klesá (Obrázok 22).



Obrázok 22 Trochu kladná odchýlka, trochu kladná zmena odchýlky [24]

6. Odchýlka je veľmi kladná a zmena odchýlky je veľmi záporná, čo znamená, že teplota na hlave kolóny je hlboko pod požadovanou hodnotou, ale rastie (Obrázok 23).

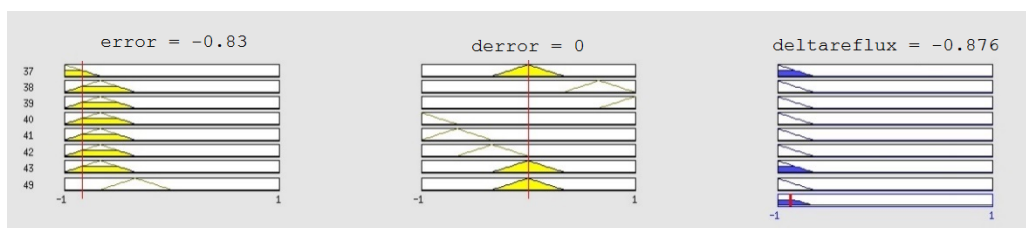


Obrázok 23 Veľmi kladná odchýlka, veľmi záporná zmena odchýlky [24]

3.4.2 Bába pravidiel

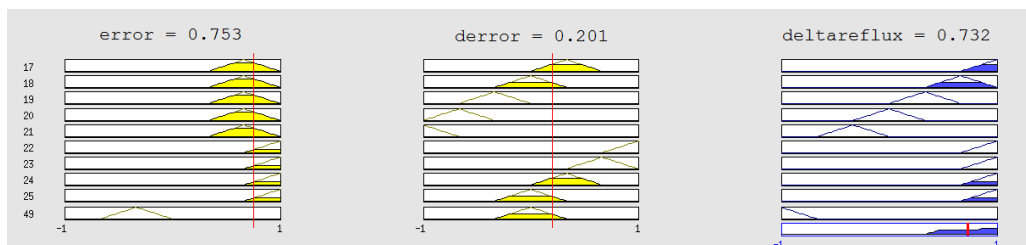
Na základe jazykových premenných si teraz odvodíme pravidlá pre niektoré konkrétne prípady regulácie teploty a ukážeme si spôsob vyhodnocovania aktivácie – „zapálenia“ pravidla v Matlab fuzzy toolbox-e:

1. Ak odchýlka je LN, MN alebo SN, potom zmenu refluxu je LN. Toto pravidlo opisuje situáciu, pri ktorej teplota na hlave kolóny je vyššia ako žiadaná, čo znamená, že prítok reflux musí byť znížený (Obrázok 24).



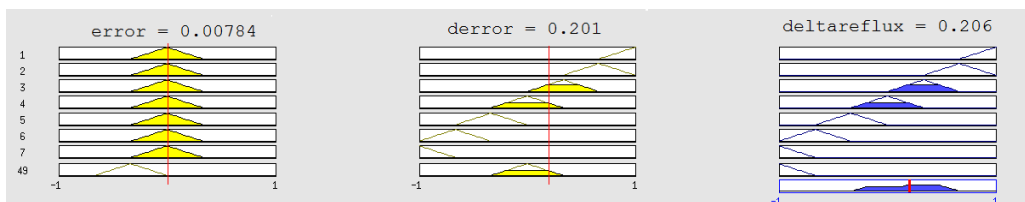
Obrázok 24 Aktivácia pravidla 1

2. V prípade, že odchýlka je LP a zmena odchýlky je SP, potom sa zmení hodnota refluxu LP. Toto pravidlo zodpovedá situácii, keď teplota na hlave kolóny je hlboko pod žiadanou hodnotu a klesá, čo vyžaduje značný nárast množstva refluxu (Obrázok 25, riadok 17).



Obrázok 25 Aktivácia pravidla 2

3. V prípade, že odchýlka je ZE a zmena odchýlky je SP, potom sa zmení množstvo refluxu SP. Toto pravidlo kvantifikuje situáciu, v ktorej sa teplota na hlave kolóny blíži ku žiadanej hodnote. Teplota ale mierne klesá, čo znamená, že množstvo refluxu sa musí mierne zvýšiť na úpravu vzniknutého rozdielu (Obrázok 26, riadok 3).



Obrázok 26 Aktivácia pravidla 3

Každé z týchto troch uvedených pravidiel je jazykové, lingvistické, pretože využíva definované jazykové premenné a ich hodnoty. Pretože tieto jazykové hodnoty nie sú presnou reprezentáciou veličín, ani jazykové pravidlá neposkytujú striktne presné podmienky. Sú to len nejaké abstraktné predstavy o tom, ako zabezpečiť požadované riadenie a môžu byť rôzne podľa predstavy ich realizátora. Použitím týchto pravidiel môžeme definovať všetky možné prípady, ktoré nastanú pri riadení teploty. Pravidlá by mali nahradiť znalosti a skúsenosti operátora.

Keďže sme použili určitý konečný počet jazykových premenných a ich hodnôt, získali sme konečný počet možných pravidiel. Čiže máme 2 vstupy – odchýlka a jej zmena a pre každý vstup 7 lingvistických hodnôt vyjadrených fuzzy množinami LN, MN, SN, ZE, SP, MP, LP. Zo všetkých možných kombinácií pravidiel s počtom vstupov získavame 49 pravidiel (Tabuľka 4).

odchýlka							
<i>Zmena odchýlky</i>	LN	MN	SN	ZE	SP	MP	LP
<i>LP</i>	LN	LN	LN	LP	LP	LP	LP
<i>MP</i>	LN	LN	LN	MP	LP	LP	LP
<i>SP</i>	LN	LN	LN	SP	MP	LP	LP
<i>ZE</i>	LN	LN	LN	ZE	SP	MP	LP
<i>SN</i>	LN	LN	LN	SN	ZE	SP	MP
<i>MN</i>	LN	LN	LN	MN	SN	ZE	SP
<i>LN</i>	LN	LN	LN	LN	MN	SN	ZE

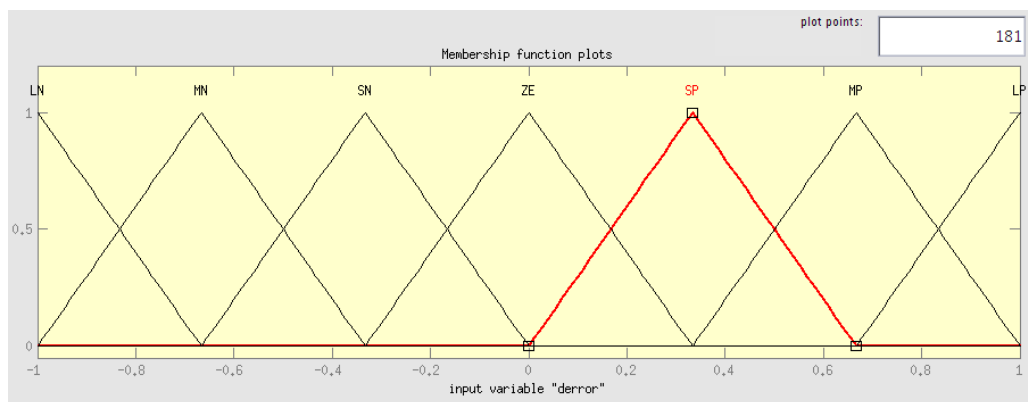
Tabuľka 4 Bába pravidiel

3.4.3 Funkcie príslušnosti

Doteraz sme len kvantifikovali znalosti o riadení systému, na určenie pravidiel pre každú situáciu, ktorá môže nastať. Teraz použitím jazykových opisov fuzzy logiky vytvoríme systém schopný používať stanovené pravidlá.

V závislosti od konkrétnej aplikácie a návrhu jej prevedenia si môžeme vybrať z rôznych funkcií príslušnosti, budeme pracovať s fuzzy funkciami príslušnosti v trojuholníkovom tvare.

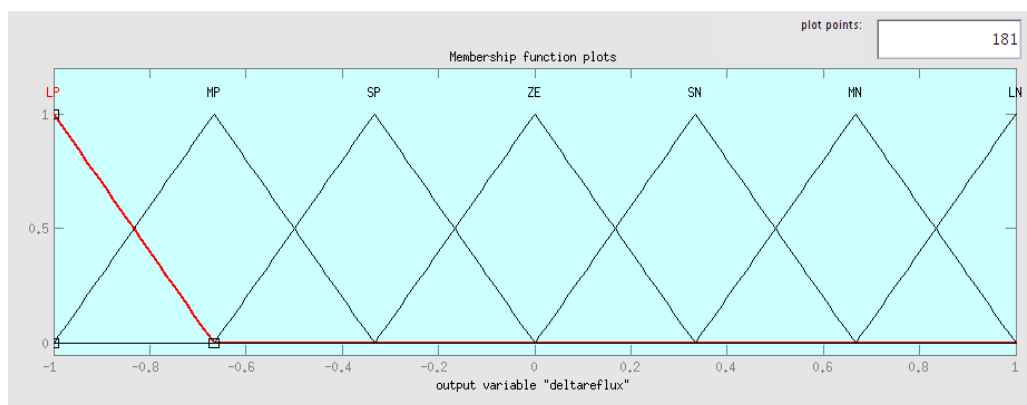
Fuzzy funkcia príslušnosti u oboch vstupných veličín - odchýlka a zmena odchýlky, aj u výstupnej - zmena refluxu, sa bude skladať zo siedmich fuzzy množín rozdistibuoovaných v univerze a normalizovaných na rozsah <-1:1>.



Obrázok 27 Funkcie príslušnosti vstupných premenných

Funkcie vstupných premenných (Obrázok 27) na okraji univerza sú nasýtené. To znamená, že aj po prípadnom prekročení hraníc, bude bod stále v rámci rovnakého lingvistického opisu v oblasti LP - veľmi kladné alebo LN - veľmi záporné. Funkcie príslušnosti pre výstup regulátora (Obrázok 28) sú premenné, ale nemôžu byť nasýtené v blízkosti hraníc, aby regulátor mohol fungovať správne.

Základným dôvodom je to, že regulátor nie je a nebude schopný určiť, že či je akákoľvek hodnota refluxu nad aktuálnou platná. Vždy uvádza konkrétnu zmenu hodnoty refluxu.



Obrázok 28 Funkcie príslušnosti výstupnej premennej

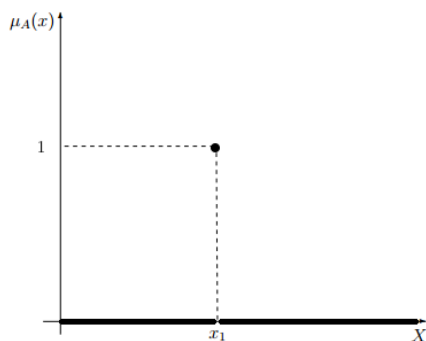
3.4.4 Mechanizmy fuzzifikácie, inferenčného jadra a defuzzifikácie

Aby bolo možné dokončiť konštrukciu regulátora, musíme definovať postupy fuzzifikácie, defuzzifikácie a logického jadra.

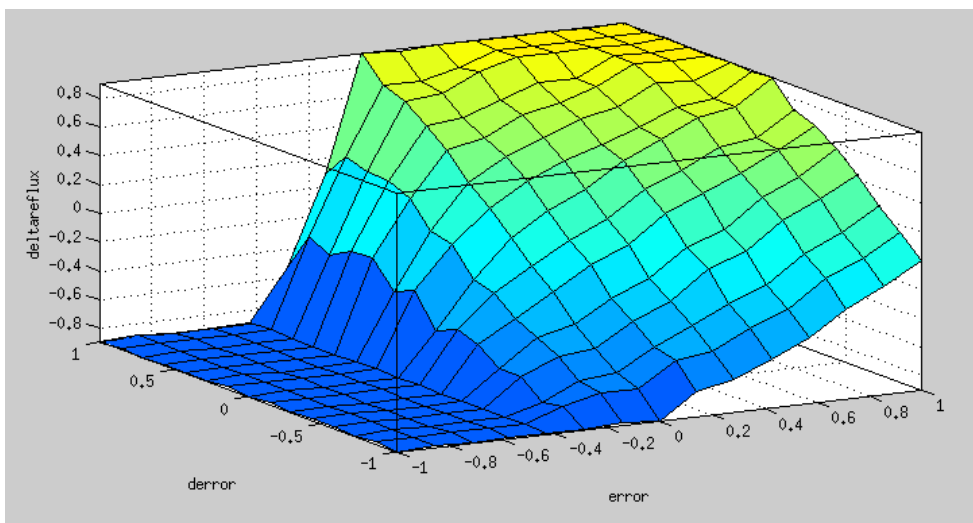
Niekedy sa fuzzifikácia vo fuzzy riadení realizuje cez Singleton, znamená to, že funkcia príslušnosti má stupeň 1 pre jednu hodnotu z univerza a 0 pre ostatné (Obrázok 29).

Aby bolo možné definovať mechanizmus inferenčného jadra, musíme určiť, ako sa budú vykonávať základné operácie. Keďže používame Mamdaniho model, rozhodli sme sa implementovať T-normy ako minimum a T-konormy ako maximum.

Posledným krokom je definovať proces defuzzifikácie. Na riadenie teploty na hlave destilačnej kolóny sme použili metódu ťažiska. Závislosť výstupnej funkcie od vstupných zobrazuje Obrázok 30.



Obrázok 29 Singleton



Obrázok 30 Graf závislosti výstupnej funkcie od vstupných

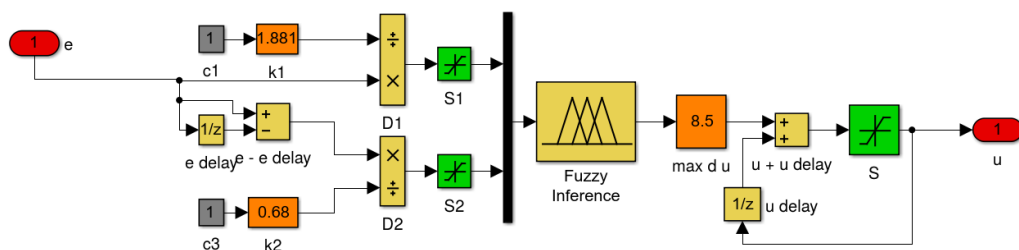
4 Fuzzy riadenie teploty na hlave destilačnej kolóny

V tejto kapitole opíšeme vykonanú verifikáciu riadenia teploty na hlave kolóny pre náš systém vykonanú na jeho modeli. K tomu sme použili simulačný nástroj Matlab Simulink, ktorý nám umožňuje zaviesť regulačnú uzavretú slučku medzi bloky, vykonávajúce operácie so signálmi medzi nimi. Zároveň ako všetky súčasti programu Matlab, aj Matlab Simulink je možné prepájať s ostatnými súčasťami programu. V našom prípade vložíme do simulačného nástroja MATLAB Simulink fuzzy systém vytvorený v MATLAB Fuzzy toolbox-e. Ďalej uvedieme priebeh riadenia na reálnom zariadení destilačnej kolóny.

4.1. Simulačné výsledky

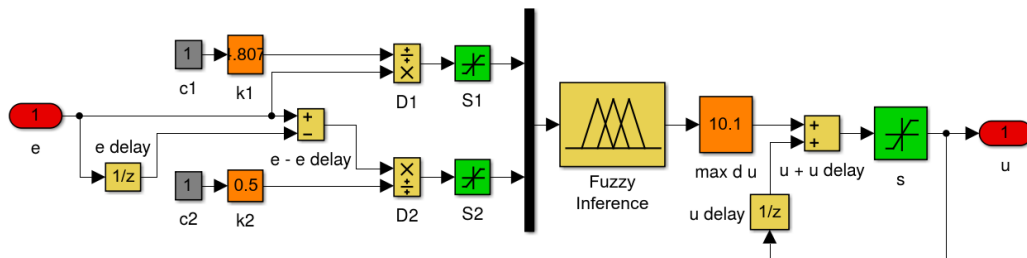
Jedným z dôvodov podrobného štúdia výsledkov simulácie fuzzy regulátora je úprava jeho parametrov – ladenie regulátora. Inými slovami, použité neostré funkcie príslušnosti boli normalizované medzi -1 a 1, ale napriek tomu odchýlka a zmena odchýlky majú rôzny rozsah. Využívame konštanty k_1 a k_2 , ktorými násobíme signály pred vstupom do regulátora.

Vytvorili sme fuzzy PD a fuzzy PI regulátor, ktoré sme simulačne overovali na modeli systému. Poruchu sme vniesli do systému vo forme šumu signálu a poruchu so sínusovou amplitúdou. D - zložku regulátora sme realizovali ako rozdiel aktuálnej a minulej hodnoty regulačnej odchýlky (Obrázok 31).



Obrázok 31 Schéma PD fuzzy regulátora v Matlab Simulink

I – zložku regulátora sme realizovali s využitím definície integrálu, sčítaním hodnôt regulačných odchýlok a zvyšovaním sumy vždy o aktuálnu (Obrázok 32).



Obrázok 32 Schéma PI fuzzy regulátora v Matlab Simulink

4.1.1 Porovnanie riadenia rôznymi regulátormi

Na testovanie, porovnávanie a určenie funkčnosti regulátorov sa používajú rôzne ukazovatele. Zo všetkých vyberáme:

1. Čas zdvihu (*Rise Time*) t_r

čas, v ktorom výstupná veličina prvý raz dosiahne hodnotu žiadanej.

2. Čas dosiahnutia vrcholu (*Peak Time*) t_{max}

čas, v ktorom výstupná hodnota dosiahne svoje globálne maximum y_{max} .

3. Maximálne preregulovanie (*Overshoot*)

pomer veľkosti maximálnej odchýlky vstupnej veličiny a jej ustálenej hodnoty

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

4. Čas regulácie (*Settling Time*) t_s

čas, po ktorom regulačná odchýlka nie je väčšia ako určená hodnota. Výstupná veličina dosiahne delta okolie a od žiadanej sa nevzdiali viac ako na úroveň tolerovaného okolia

5. IAE - integrál absolútnej chyby (*The Integral of Absolute Error*)

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (9)$$

6. ISE - integrál kvadratickej chyby (*The Integral of Squared Error*)

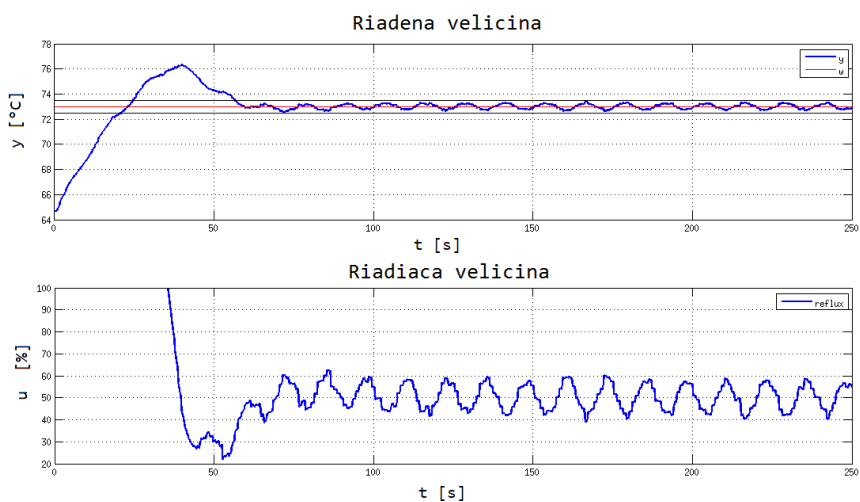
$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (10)$$

Viac informácií o týchto, ale aj iných ukazovateľoch čitateľ získa v [19],[20],[21].

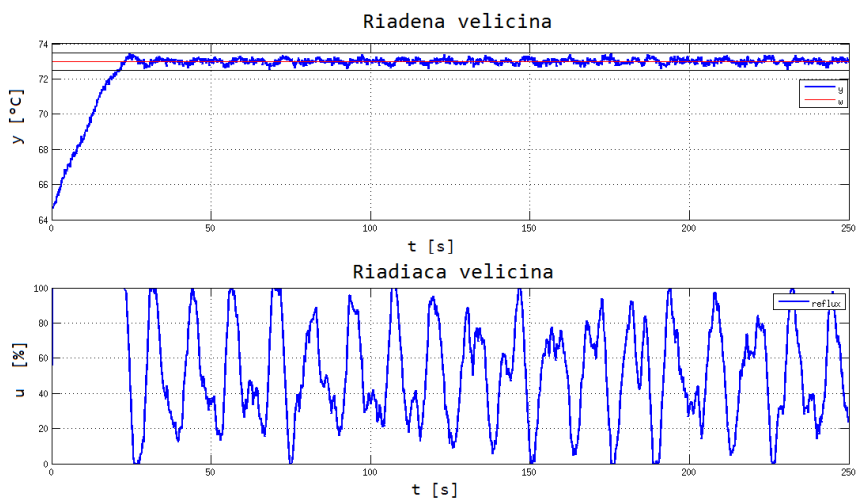
Teraz uvidíme riadenia systému s regulátormi používanými pri riadení kolóny, PD fuzzy regulátorom a PI fuzzy regulátorom. Konštanty regulátorov sú uvedené v Tabuľke 5, simulácie riadenia ilustrujú Obrázky 33 – 36, získané výsledky sú uvedené v Tabuľke 6.

regulátor	konštanta		
	P	I	D
PID	29.6	3.18	0.148
PI	100	100	0
Fuzzy PD	k1	-	k2
Fuzzy PI	k1	k2	0

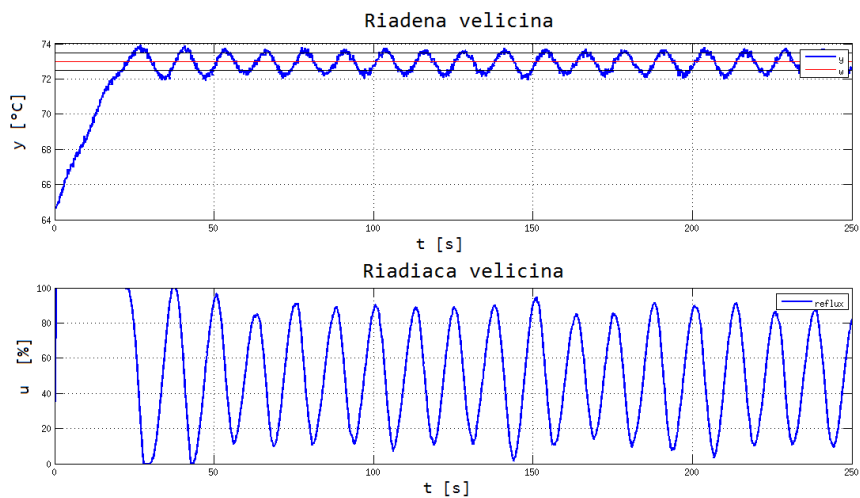
Tabuľka 5 Konštanty použitých regulátorov



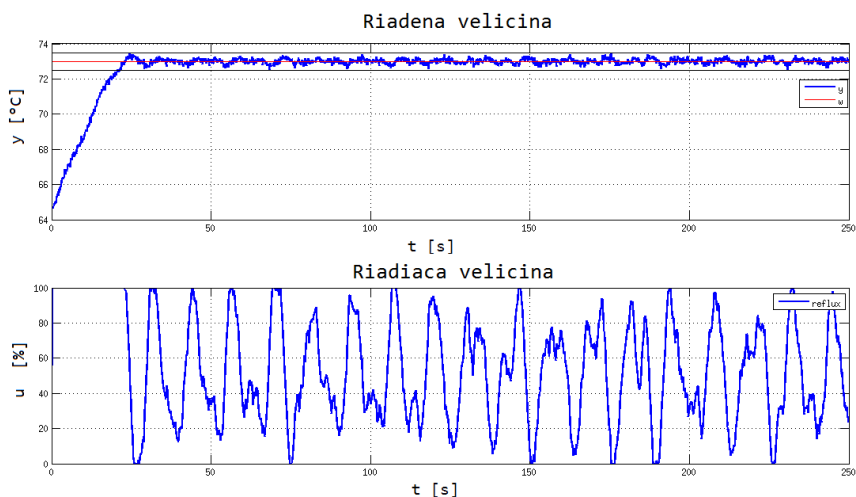
Obrázok 33 Simulácia použitia PID regulátora



Obrázok 34 Simulácia použitia PI regulátora



Obrázok 35 Simulácia použitia Fuzzy PD regulátora



Obrázok 36 Simulácia použitia Fuzzy PI regulátora

Tabuľka 6 Ukazovatele kvality riadenia použitých regulátorov

regulátor	t_r	t_{max}	y_{max}	σ_{max}	t_s	IAE	ISE
PID	16.5297	39.6889	76.3363	4.5702	249.7653	178	582
PI	16.3536	48.3425	77.6614	6.3855	248.9592	273	905
Fuzzy PD	17.4662	28.8193	73.8237	1.1283	249.3170	97	428
Fuzzy PI	17.0525	28.8193	74.5438	2.1148	249.7328	98	433

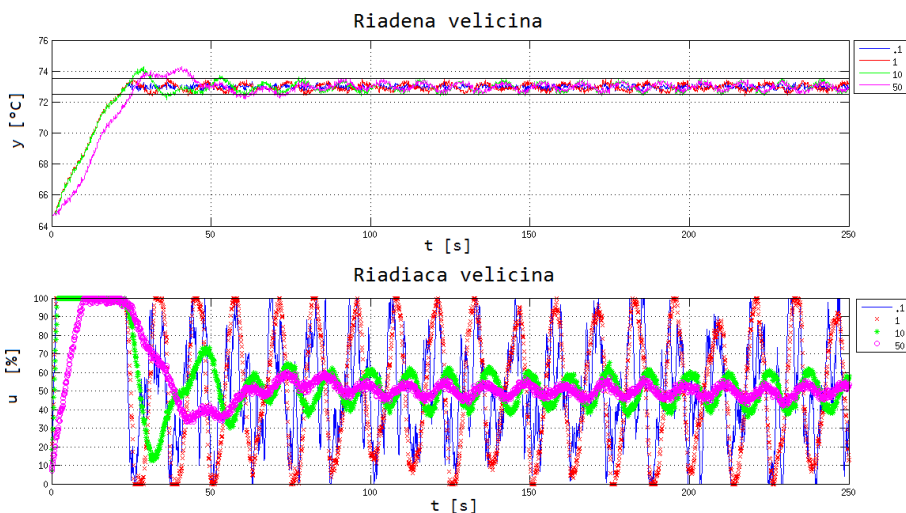
4.1.2 Ladenie fuzzy regulátora

Ako si môžeme všimnúť, na základe priebehov nami navrhnuté fuzzy regulátory poskytujú požadovanú kvalitu riadenia, ale majú v porovnaní s klasickými PID regulátormi pomerne agresívny akčný zásah. V našom prípade to problém nie je, ale v niektorých systémoch môže byť tento efekt nežiadúci. Preto teraz nájdeme vhodné konštanty, ktorými budeme násobiť alebo deliť signály vchádzajúce a vychádzajúce z fuzzy regulátora.

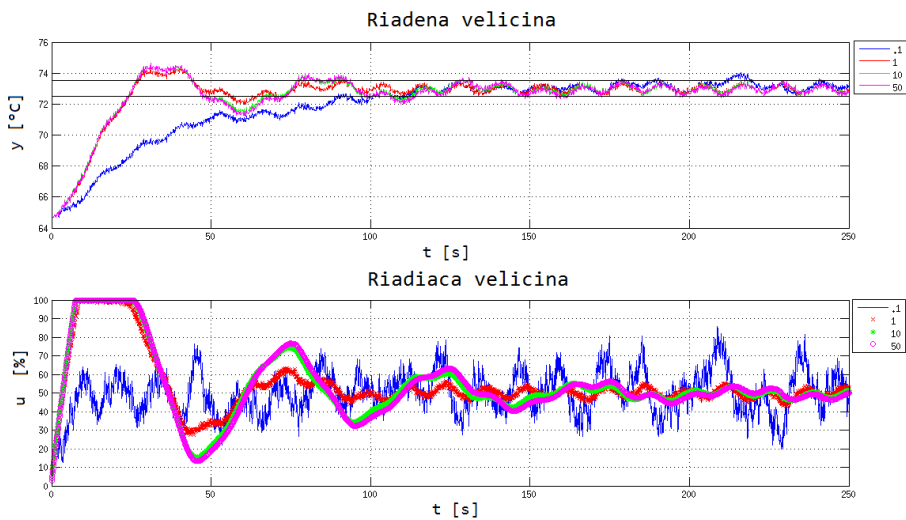
Hľadáme 3 konštanty:

1. konštantou k_1 delíme signál regulačnej odchýlky
2. konštantou k_2 delíme signál zmeny regulačnej odchýlky
3. konštantou d_{max} násobíme výstup, požadovanú zmenu refluxu.

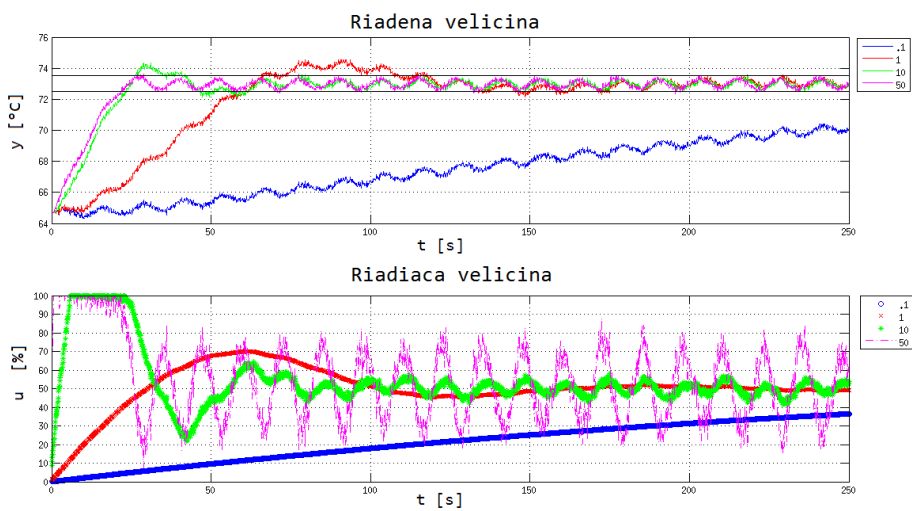
Ladenie bolo vykonané simulačne tak, že jednu z konštánt sme menili, kým ostatné boli konštantné pri viacerých priebehoch, kým sme získame najvhodnejší pomer medzi kvalitou riadenia a akčným zásahom. Optimálne hodnoty sme získali porovnávaním množstva priebehov s odlišnými parametrami. Pre ilustráciu vplyvu konkrétneho parametra na kvalitu riadenia a kmitavosť akčného zásahu uvádzame grafické závislosti. V jednom grafe sú umiestnené 4 priebehy a 4 akčné zásahy pre hodnoty hľadaného parametra. Graficky sú odlišené nasledovne pre hodnotu 0.1 je farba čiary modrá , pre 1 červená, pre 10 zelená a pre 50 purpurová (magenta) (Obrázok 37 - 40)



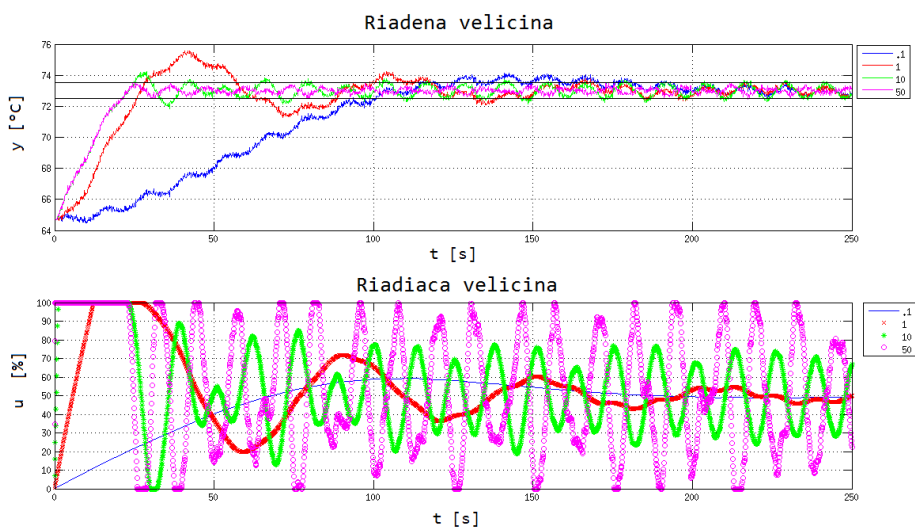
Obrázok 37 Ladenie konštanty k_1 pre Fuzzy PD regulátor



Obrázok 38 Ladenie konštanty k_2 pre Fuzzy PD regulátor



Obrázok 39 Ladenie konštanty $dumax$ pre Fuzzy PD regulátor



Obrázok 40 Ladenie konštanty dmax pre Fuzzy PI regulátor

Na základe uvedených simulácií sme získali optimálne parametre konštánt pre navrhované regulátory, uvedené v tabuľke 7.

Tabuľka 7 Optimálne parametre regulátorov

Regulátor	Konštantá	Hodnota
PD fuzzy regulátor	k1	50
	k2	0.6
	dumax	12
PI fuzzy regulátor	k1	Nemá vplyv na riadenie
	k2	Nemá vplyv na riadenie
	dumax	0.7

4.2. Experimentálne výsledky

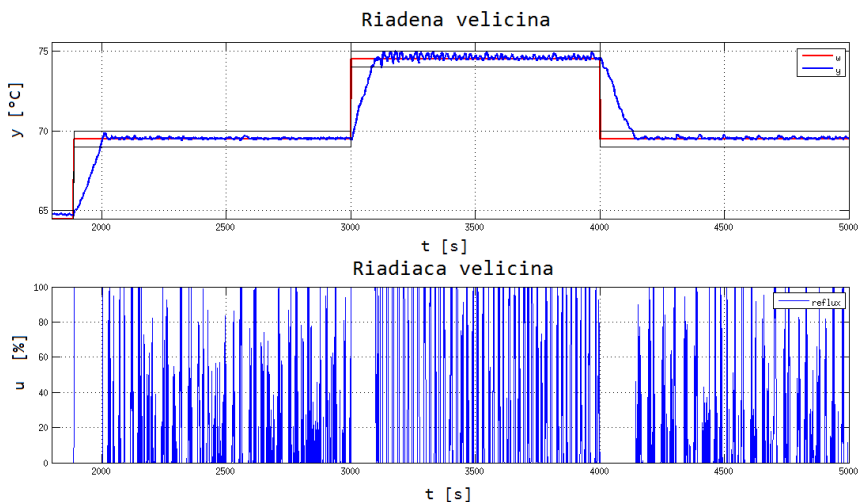
Po simuláciách riadenia vykonaných pomocou modelu v softvéri sme prešli k pokusnému riadeniu reálneho zariadenia destilačnej kolóny. Na riadenie teploty sme použili aj regulátor bez výrazných úprav konštánt, vyladený fuzzy regulátor a fuzzy regulátor s hodnotami parametrov medzi prvými dvomi.

4.2.1. Riadenie fuzzy PD regulátorom

PD regulátorom sme riadili kolónu už v ustálenom stave. Nechali sme prebehnúť vyššie spomenutý algoritmus na automatický nábeh zariadenia. Po nábehu sme nastavili hodnotu žiadanej teploty a vykonali sme 2 skokové zmeny nahor a 1 nadol. Použité hodnoty parametrov k_1 , k_2 dumax sú uvedené v Tabuľke 8.

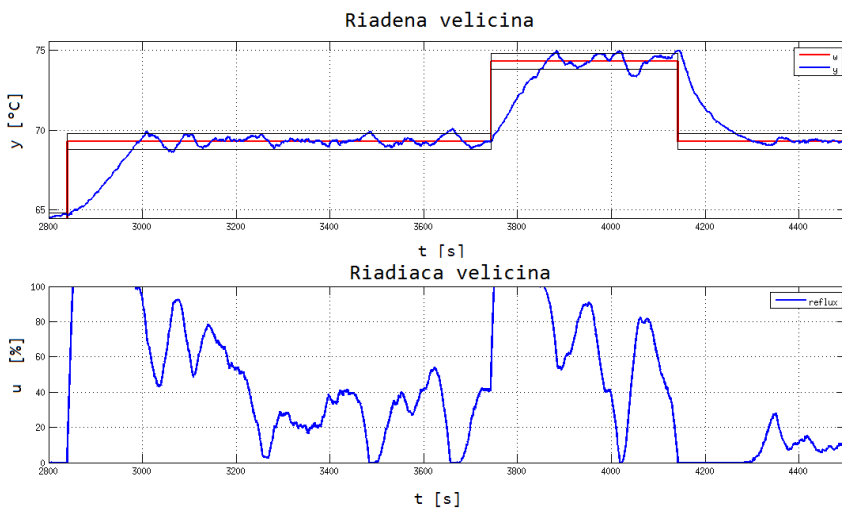
Vykonali sme 3 merania:

1. Fuzzy PD regulátor č. 1 – riadenie bolo realizované s cieľom dosiahnuť a udržať žiadanú veličinu bez ohľadu na kmitanie akčného zásahu (Obrázok 41)



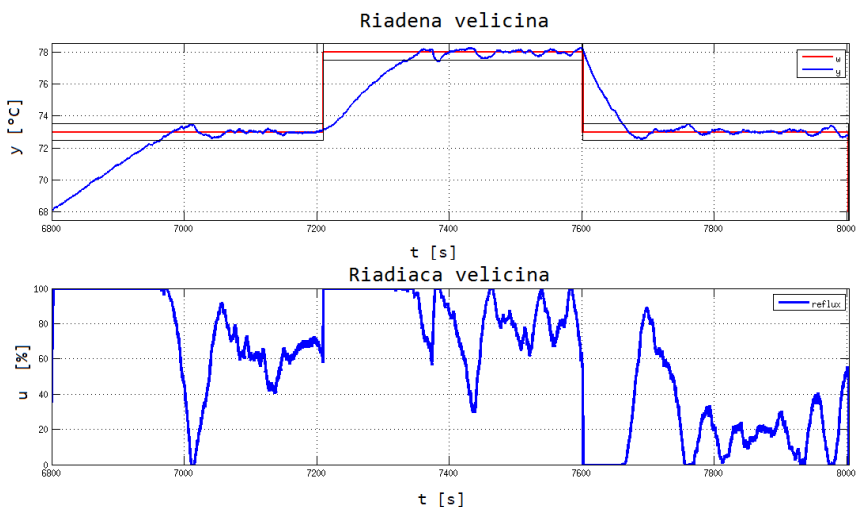
Obrázok 41 Riadenie Fuzzy PD regulátorom s konštantami $k_1=12$, $k_2=12$, dumax=40

2. Fuzzy PD regulátor č. 2 – parametre regulátora boli nastavené na hodnoty získané z ladenia modelom, cieľom bolo dosiahnuť optimálne riadenie vzhľadom na plynulosť, agresivitu akčného zásahu (Obrázok 42)



Obrázok 42 Riadenie Fuzzy PD regulátorom s konštantami $k_1=50$, $k_2=0.6$, $dumax=12$

3. Fuzzy PD regulátor č. 3 – cieľom riadenia bolo zefektívniť fuzzy PD regulátor č. 1, zachovať v čo najväčšej možnej miere akčný zásah plynulý, ale zvýšiť sledovanie žiadanej hodnoty veličiny oproti fuzzy PD regulátoru č.2 (Obrázok 43)



Obrázok 43 Riadenie Fuzzy PD regulátorom s konštantami $k_1=35$, $k_2=1$, $dumax=20$

Tabuľka 8 Hodnoty konštánt Fuzzy PD regulátorov

regulátor	k1	k2	dumax
Fuzzy PD č. 1	12	12	40
Fuzzy PD č. 2	50	0.6	12
Fuzzy PD č. 3	35	1	20

Z priebehov riadení fuzzy PD regulátormi možno skonštatovať, že so zvyšujúcim sa parametrom k_1 sa znižuje kvalita riadenia zameraného na sledovanie žiadanej hodnoty, ale zároveň rastie schopnosť udržať plynulý nekmitavý akčný zásah. Parametre k_2 a $dumax$ majú opačný účinok, so znižujúcim sa parametrom klesá schopnosť udržať žiadanú hodnotu, a zároveň klesá agresivita akčného zásahu.

Z ukazovateľov kvality riadenia s použitím fuzzy PD regulátorov, ktoré sú zobrazené v tabuľke 9 vyplýva, že najnižší čas regulácie dosiahol regulátor, ktorý mal vyváženú kmitavosť akčného zásahu a sledovanie žiadanej veličiny.

Tabuľka 9 Ukazovatele kvality riadenia s použitím Fuzzy PD regulátorov

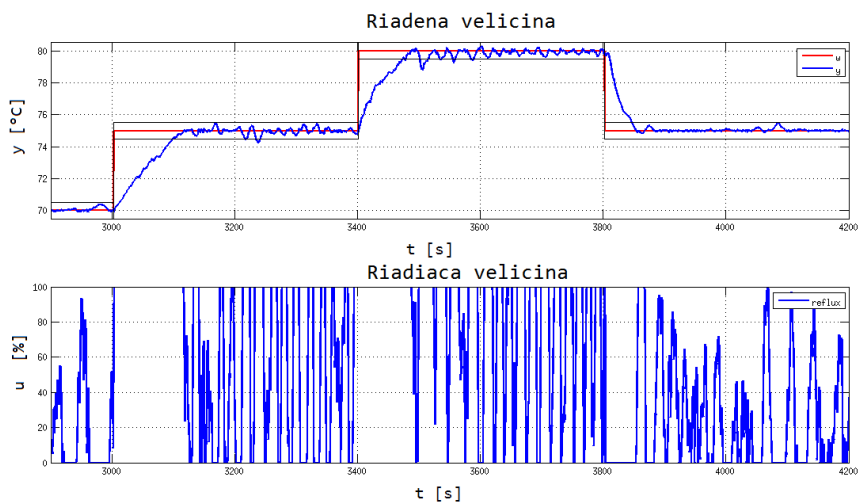
regulátor	t_r	t_{max}	y_{max}	σ_{max}	t_s	IAE	ISE
Fuzzy PD č.1	90.2096	3181.2	75.0013	7.8687	4988.7	11112	30808
Fuzzy PD č.2	118.4492	4144.2	74.9642	8.1416	4486.2	12611	33747
Fuzzy PD č.3	140.6633	7598.7	78.2958	7.6510	7988.5	10374	30397

4.2.2. Riadenie fuzzy PI regulátorom

Fuzzy PI regulátorom sme riadili kolónu obdobne ako s PD fuzzy regulátorom až po dosiahnutí ustáleného stavu. Po nábehu sme menili hodnotu žiadanej teploty a vykonali sme 2 skokové zmeny nahor a 1 nadol. Použité hodnoty parametrov k_1 , k_2 dumax sú uvedené v Tabuľke 10.

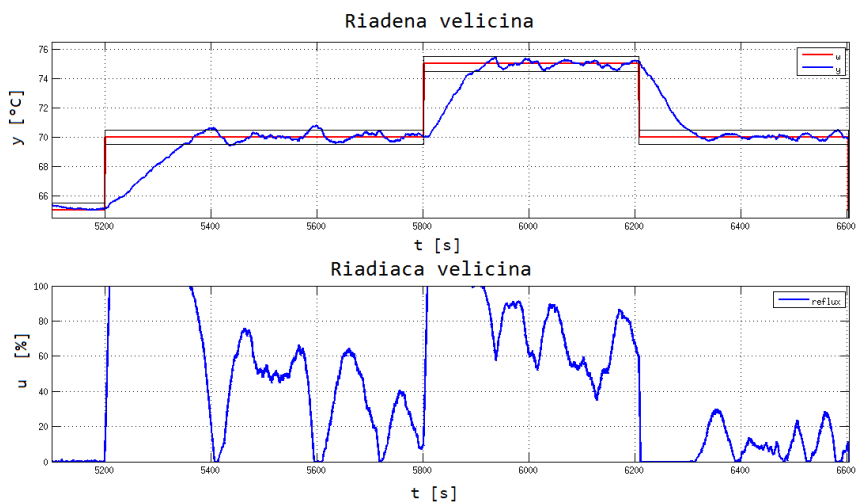
Vykonali sme 3 merania:

1. Fuzzy PI regulátor č. 1 – riadenie bolo realizované s cieľom dosiahnuť a udržať žiadanú veličinu bez ohľadu na kmitanie akčného zásahu (Obrázok 44)



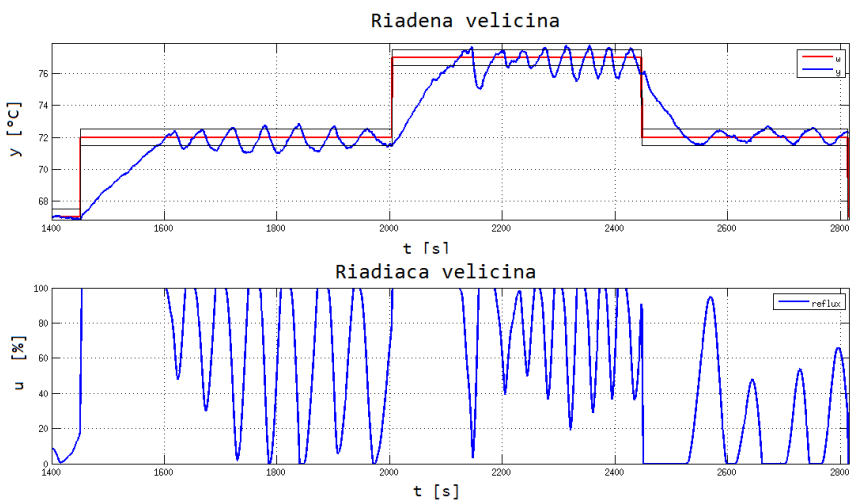
Obrázok 44 Riadenie Fuzzy PI regulátorom s konštantami $k_1=12$, $k_2=12$, dumax=40

2. Fuzzy PI regulátor č. 2 – parametre regulátora boli nastavené na hodnoty získané z ladenia modelom, cieľom bolo dosiahnuť optimálne riadenie vzhľadom na plynulosť, agresivitu akčného zásahu (Obrázok 45)



Obrázok 45 Riadenie Fuzzy PI regulátorom s konštantami $k_1=1$, $k_2=1$, $dumax=0.7$

3. Fuzzy PI regulátor č. 3 – cieľom riadenia bolo zefektívniť fuzzy PI regulátor č. 1, zachovať v čo najvyššej možnej miere akčný zásah plynulý, ale zvýšiť sledovanie žiadanej hodnoty veličiny oproti fuzzy PI regulátoru č.2 (Obrázok 46)



Obrázok 46 Riadenie Fuzzy PI regulátorom s konštantami $k_1=40$, $k_2=50$, $dumax=20$

Tabuľka 10 Parametre konštánt použitých Fuzzy PI regulátorov

regulátor	k1	k2	dumax
Fuzzy PI č. 1	12	12	40
Fuzzy PI č. 2	1	1	0.7
Fuzzy PI č. 3	40	50	20

Z priebehov riadení fuzzy PI regulátormi možno skonštatovať, že so znižujúcim sa parametrom dumax sa znižuje kvalita riadenia zameraného na sledovanie žiadanej hodnoty, ale zároveň rastie schopnosť udržať plynulý nekmitavý akčný zásah. Parametre k1 a k2 síce priebeh riadenia neovplyvňujú, ale vo vhodnom pomere môžu mať vplyv na kmitanie akčného zásahu.

Z ukazovateľov kvality riadenia s použitím fuzzy PI regulátorov, ktoré sú zobrazené v tabuľke 11 vyplýva, že najnižší čas regulácie dosiahol regulátor, ktorý mal vyváženú kmitavosť akčného zásahu a sledovanie žiadanej veličiny.

Tabuľka 11 Ukazovatele kvality riadenia s použitím Fuzzy PI regulátorov

regulátor	t_r	t_{max}	y_{max}	σ_{max}	t_s	IAE	ISE
Fuzzy PI č. 1	85.7773	3602.1	80.2617	7.0679	4189.7	6645	16732
Fuzzy PI č. 2	122.6591	5936.7	75.4620	7.9916	6595.5	11373	32216
Fuzzy PI č. 3	131.5921	2354.8	77.7637	7.6047	2804.4	12686	29934

4.2.3. Výsledky meraní

Na základe nami prevedených riadení systému laboratórnej destilačnej kolóny s použitím Fuzzy PD a Fuzzy PI regulátorov s rôznym nastavením parametrov, možno konštatovať, že fuzzy regulátory sú schopné riadiť teplotu na hlave destilačnej kolóny s presnosťou najmenej 0.5°C

Ukazovateľ kvality čas zdvihu mal najlepšie Fuzzy PI regulátor č.1, najhorší Fuzzy PD regulátor č.3. Maximálne preregulovanie bolo najlepšie pri riadení Fuzzy PI regulátorom č. 1, najhoršie pri Fuzzy PD č. 2. Čas regulácie mal najnižší Fuzzy PI regulátor č. 3, najvyšší Fuzzy PD regulátor č. 3. Hodnoty parametrov IAE a ISE mal najnižšie Fuzzy PI regulátor č.1.

Porovnanie ukazovateľov kvality riadenia s použitím Fuzzy PD regulátorov je uvedené v Tabuľke 8 a Fuzzy PI regulátorov v Tabuľke 9.

V prípade, že by bol systém kolóny zameraný na presné riadenie teploty bez ohľadu na kmitavosť akčného zásahu, na riadenie by sme použili Fuzzy PI regulátor č.1 .

Ak by sme sa zamerali na zníženie frekvencie kmitania akčného zásahu, bolo by vhodné použiť na riadenie Fuzzy PD regulátor č. 3 a Fuzzy PI regulátor č. 3, ktoré nie len poskytujú uspokojivé riadenie teploty ale nimi produkovaný akčný zásah je menej agresívny.

5 Záver

V úvode práce opisujeme princípy procesu destilácie a teóriu fuzzy množín. Ďalej je uvedený opis nami používanej destilačnej kolóny, ako aj popis fázy uvedenia zariadenia do činnosti, nábeh, manuálne i automaticky.

Fuzzy logika je založená na spôsobe myslenia, ktorý možno použiť na riadenie rôznych druhov systémov, od tých najjednoduchších až po veľmi zložité. Metóda sa vyznačuje používaním a formulovaním pravidiel typu ak-potom, aplikovaných na opisy neurčitých veličín, ako je "trochu", "príliš", "chladný". Vykonávanie tohto spôsobu uvažovania vyžaduje prítomnosť vágnych veličín.

Účelom práce bolo predstaviť kroky potrebné na implementáciu fuzzy regulátorov, ich začlenenie do systémov, ktoré spracovávajú presné hodnoty, a požadovaný preklad do fuzzy vstupov a z fuzzy výstupov pre riadenie teploty na hlave destilačnej kolóny. Potrebná pre návrh takéhoto regulátora je trojstupňová štruktúra: fuzzifikácia, nástroje logického jadra a defuzzifikácia.

Vytvorili sme fuzzy regulátor podľa Mamdaniho a porovnali sme jeho funkcionality, vlastnosti a spôsob riadenia s bežne používaným proporcionálne-integračne-derivačným regulátorom.

Experimentálna časť obsahuje simulácie priebehov riadenia systému destilačnej kolóny nami vytvorenými regulátormi a porovnanie ukazovateľov kvality riadenia. Na modeli sme parametre regulátorov zoptimalizovali a vykonali sme riadenie reálneho zariadenia destilačnej kolóny. Simulácie i samotné riadenie boli prevádzané v programe Matlab simulink s využitím fuzzy toolbox-u na implementáciu fuzzy logiky.

Pre každú realizovanú simuláciu i riadenie práca obsahuje aj grafické závislosti priebehov riadiacej i riadenej veličiny.

Jedným z hlavných cieľov práce bolo nielen vytvoriť funkčný riadiaci systém s použitím fuzzy rozhodovania, ale zároveň proces jeho tvorby čo najpresnejšie a najzrozumiteľnejšie popísať.

Zoznam použitej literatúry

1. CHEN, G. – JOO, Y. H.: Introduction to Fuzzy Control Systems, In: Encyclopedia of Artificial Intelligence[online], Edited by: Rabul, J. R. – Dorado, J. – Pazos, A. , Hersch, ISBN 9781599048499, La Coruña, España, 2009. Dostupné na: <https://www.researchgate.net/publication/228902237_Introduction_to_fuzzy_control_systems>
2. KOSSACZKÝ, E. – SUROVÝ, J.: Chemické inžinierstvo II. [online], Alfa, Bratislava, 1968. Dostupné na: <<http://kchbi.chof.stuba.sk/pedagog/novinkyD.aspx?ID=52>>
3. DOJČANSKÝ, J. – LONGAUER, J.: Chemické inžinierstvo II., Vydavateľstvo Malé Centrum, 2000.
4. MARKO, L. Konštrukčný návrh destilačnej kolóny[online], Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 78 s. Vedúci diplomovej práce Ing. Filip Nováček. Dostupné na: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=84683>
5. DRGOŇA, J. et al.: Model Identification and Predictive Control of a Laboratory Binary Distillation Column[online], In International Conference on Process Control (PC), Štrbské Pleso, Slovakia, 2015. Dostupné na: <https://www.kirp.chof.stuba.sk/publication_access.php?id=1605&type=1>
6. Obrázok destilačnej kolóny, Ústav informatizácie, automatizácie a matematiky[online], Dostupné na: <http://www.kirp.chof.stuba.sk/index.phpmenu=2&submenu=1&part=4&page_id=22>
7. BENEŠ, P. et al.: Automatizace a automatizační technika 3: Prostředky automatizační techniky., Computer Press, Brno, 2014.
8. TKAČIK, Š. Fuzzy teória, materiály [online] Dostupné na: <<http://math.ku.sk/tkacik/>>
9. FLÉGL, M.: Application of fuzzy approaches in decision-making[online], In: Think Together 2011, Doktorská vědecká konference, 2011. Dostupné na: <http://www.thinktogether.cz/index.php?content=view_conference&web=1>

10. VAŠČÁK, J.: Fuzzy systémy a ich aplikácie[online]., In:Fuzzy Rozhodovanie, 2010, Dostupné na: <<http://web.tuke.sk/kkui/clenovia-katedry?people=23>>
11. KOLESÁROVÁ, A. – KOVÁČOVÁ M.: Fuzzy množiny a ich aplikácie., Vydavateľstvo STU, Bratislava, 2004.
12. ZADEH, L. A. Fuzzy sets[online]., In: Information and Control 8, 1965, Dostupné na: <<http://www.cs.berkeley.edu/~zadeh/papers/>>
13. ROSS, T.J.: Fuzzy logic with engineering applications. 2nd edition[online], Chichester, Wiley, 2004. Dostupné na: <<http://iauctb.ac.ir/Files/%D9%88%D8%A8%20%D8%B3%D8%A7%DB%8C%D8%AA%20%D8%A7%D8%B3%D8%A7%D8%AA%DB%8C%D8%AF/fuzzy%20logic%20with%20engineering%20application-3rdEdition.pdf>>
14. ŠTEVEK, J. – KOZÁK, Š.: Využitie fuzzy logiky v riadení procesov systémami Xenta od firmy Schneider Electric[online], In: IDB Journal 2/2011, 2011. <www.atpjournals.sk/buxus/docs/str%2024%20Fuzzy_riadenie.pdf>
15. SHAHARIZ, A. A. – PARTHIBAN, J.: Fuzzy Logic[online], Dostupné na: <http://www.doc.ic.ac.uk/~nd/surprise_96/journal/vol4/sbaa/report.fuzzysets.html>
16. MAIXNER, L. et aliteri: Automatizace a automatizační technika 2: Systémové pojetí automatizace., Computer Press, Brno, 2014.
17. ZADEH, L. A.: Fuzzy sets and systems[online],In: International Journal of General Systems, 17:2, 129 — 138, 1990, Dostupné na: <<http://dx.doi.org/10.1080/03081079008935104>>
18. BABUSKA, R. – MAMDANI, E.: Fuzzy control[online], In: Scholarpedia, 3(2):2103., 2008. Dostupné na: <http://www.scholarpedia.org/article/Fuzzy_control>
19. ALBAKRI, A.K.A.: Tuning proportional – integral – derivate controller using Mamdani fuzzy logic controler for practical plants[online], Almusyeib, Technical Collage, 2010. Dostupné na: <<http://www.iasj.net/iasj?func=fulltext&aId=29517>>
20. BAKOŠOVÁ, M. – FIKAR, M.: Radenie procesov, Nakladateľstvo STU, Bratislava, 2012.

21. Dokumentácia k programu Matlab 8.1.0, Matlab and Statistics Toolbox Release 2013a [online], The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States, Dostupné na: <<http://www.mathworks.com/help/control/ref/stepinfo.html>>
22. Učebné materiály k predmetu Priemyselná informatika [online], Stredná priemyselná škola, Levice, Dostupné na: <<http://www.spslevice.sk/ucebnice/SOC/SOC%20-%20PRI/index.htm>>
23. VASIČKANINOVÁ, A. – BAKOŠOVÁ, M. – KMEŤOVÁ, J.: Fuzzy control of a heat exchanger using fuzzy c-means clustering algorithm. [online], In Proceedings of the 41st International Conference of Slovak Society of Chemical Engineering, Edited by: Markoš, J., Tatranské Matliare, Slovakia, 917–926, 2014. Dostupné na: <https://www.kirp.chtf.stuba.sk/publication_access.php?id=1487&type=1>
24. AGUILAR, R.M. – MUÑOZ, V. – CALLERO, Y.: Control Application Using Fuzzy Logic: Design of a Fuzzy Temperature Controller [online], Fuzzy Inference System - Theory and Applications, Edited by: Azeem, M. F., In: Tech, 2012, Dostupné na: <<http://www.intechopen.com/books/fuzzy-inference-system-theory-and-applications/control-application-using-fuzzy-logic-design-of-a-fuzzy-temperature-controller>>
25. Minimálna a súčinová T-norma, wikipedia.org [online] Dostupné na: <<https://en.wikipedia.org/wiki/T-norm>>

Prílohy

Príloha A: CD médium – práca v elektronickej podobe, prílohy v elektronickej podobe.