

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Řízení pomocí fuzzy PID regulátorů

Praha, 2008

Autor: Jan Popelka

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat všem, kteří mi pomáhali při tvorbě bakalářské práce, ať přímo nebo jen poskytovali psychickou podporu. Děkuji především vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Huškovi Ph.D. za cenné připomínky a kvalitní vedení.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady ( literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

podpis

## **Abstrakt bakalářské práce**

Cílem této bakalářské práce je seznámení se s fuzzy PID regulátory, jejich návrhem a poté jejich srovnáním s klasickými PID regulátory.

V první části se práce zabývá základní fuzzy logikou potřebnou pro fuzzy PID regulátory a vysvětlením základních pojmů. Druhá část práce popisuje fuzzy regulátory a zabývá se postupem návrhu fuzzy PID regulátorů. Třetí část se zabývá srovnáním výsledků regulace mnou navržených regulátorů s klasickými PID regulátory. Návrh a simulace regulátorů budu provádět v prostředí Matlab R2007b.

## **Abstract of this bachelor thesis**

The objective of this bachelor thesis is learning about fuzzy PID regulators, their design and then their comparison with classic regulators.

In the first part this thesis describes basic fuzzy logic, which is necessary for fuzzy PID regulators and explains basic terms. In the second part this thesis describes fuzzy regulators and describes procedure of designing fuzzy PID regulators. In the third part this thesis compares results of regulation my designed fuzzy PID regulators and classic PID regulators. I will create design and simulation in Matlab R2007b.

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická  
Katedra řídicí techniky

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Jan Popelka**

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (bakalářský), strukturovaný  
Obor: Kybernetika a měření

Název tématu: **Řízení pomocí fuzzy PID regulátorů**


Pokyny pro vypracování:

1. V programovém prostředí Matlab/Simulink vytvořte regulační schéma využívající fuzzy PID regulátoru.
2. Na příkladech systémů s různým chování porovnejte výsledky regulace klasických a fuzzy PID regulátorů.

Seznam odborné literatury:  
Dodá vedoucí práce

Vedoucí: Ing. Petr Hušek, Ph.D.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2008/2009

  
prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.  
vedoucí katedry



  
doc. Ing. Boris Šimák, CSc.  
děkan

V Praze dne 25. 2. 2008

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Fuzzy logika</b>	<b>3</b>
2.1	Fuzzy množiny . . . . .	3
2.2	Fuzzy logické operace . . . . .	6
2.3	Lingvistické proměnné . . . . .	7
2.4	Slovní pravidla . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Fuzzy regulátory</b>	<b>9</b>
3.1	Popis fuzzy PID regulátorů . . . . .	9
3.2	Rozdělení fuzzy PID regulátorů . . . . .	10
3.3	Struktura fuzzy regulátoru . . . . .	11
3.4	Způsoby zapojení fuzzy PID regulátoru v regulačním obvodu . . . . .	13
3.5	Postup návrhu fuzzy PID regulátoru . . . . .	14
3.5.1	Návrh klasického PID regulátoru . . . . .	15
3.5.2	Návrh bloku fuzzy regulátoru . . . . .	15
3.5.3	Nahrazení sčítacího členu v regulátoru fuzzy regulátorem . . . . .	17
3.5.4	Transformace konstant . . . . .	19
3.5.5	Doladění konstant . . . . .	20
<b>4</b>	<b>Srovnání klasických a fuzzy PID regulátorů</b>	<b>21</b>
4.1	Porovnání výsledků regulace na systému č. 1 . . . . .	22
4.2	Porovnání výsledků regulace na systému č. 2 . . . . .	26
4.3	Porovnání výsledků regulace na systému č. 3 . . . . .	30
4.4	Porovnání výsledků regulace na systému č. 4 . . . . .	33
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>36</b>

Literatura	37
A Obsah přiloženého CD	I

# Kapitola 1

## Úvod

Fuzzy regulátory jsou založené na fuzzy logice a teorii fuzzy množin, která zobecňuje teorii množin. Na ni potom navázala fuzzy logika, která nabízela aplikace zejména v řízení. V osmdesátých letech ji začali používat a rozvíjet zejména v Japonsku.

V posledním desetiletí se fuzzy technologie velmi rozšířily do různých oborů ve vědě a průmyslu, hlavně řízení a modelování. Protože skutečné systémy jsou hlavně nelineární a jejich modelování je velmi obtížné a drahé, fuzzy modelování je levnější, neboť dokáže úspěšně řídit nebo modelovat nelineární systém i bez přesné znalosti jeho matematického popisu.

V současnosti se fuzzy logika a fuzzy řízení používají v mnoha vědních a průmyslových oborech, například databázových systémech, automobilovém průmyslu, digitálním zpracování obrazu, umělé inteligenci a v řadě dalších.

Cílem této práce je seznámení se s fuzzy regulátory, a to jak s jejich strukturou tak se způsobem jejich návrhu. Dále pak vytvořit v prostředí Matlab/simulink regulační schéma využívající fuzzy regulátory a na příkladech systémů s různým chováním porovnat výsledky regulace klasických a fuzzy PID regulátorů.

Tato práce je zaměřena na fuzzy PID regulátory, což je pouze malá podskupina fuzzy regulátorů. Fuzzy PID regulátory jsou v podstatě zobecněním klasických PID regulátorů, protože pomocí báze pravidel jim lze nastavit různou velikost směrnice výstupní funkce. Klasické regulátory mají výstupní funkci lineárně závislou na vstupních hodnotách, zatímco fuzzy regulátory ji mohou mít závislou nelineárně. Kvůli tomu mohou fuzzy regulátory podávat lepší výsledky při regulaci nelineárních systémů.

Tato práce se skládá ze tří částí. První část práce je věnována fuzzy logice nutné pro porozumění fuzzy regulátorům. Ve druhé části se práce zabývá popisem fuzzy regulátorů z hlediska jejich částí a postupu návrhu reálného fuzzy regulátoru. Ve třetí části práce



srovnává fuzzy regulátory s klasickými regulátory.

Pro realizaci regulačního schématu je používáno prostředí Simulink v programu Matlab R2007b. Pro realizaci a návrh jednotlivých fuzzy regulátorů je používán Fuzzy toolbox, taktéž v programu Matlab. Pro návrh klasických regulátorů jsou používány frekvenční metody a metody použití geometrického místa kořenů, pro které jsem používal toolbox Sisotool v programu Matlab.

Na přiloženém CD jsou k dispozici všechny regulátory a regulační schémata, která jsem v rámci této bakalářské práce vytvořil.

Od této práce se očekává, že její výsledky pomohou pro pochopení fuzzy logiky a při navrhování fuzzy regulátorů.

# Kapitola 2

## Fuzzy logika

Fuzzy logika vychází z teorie fuzzy množin, která se poprvé objevila v článku, jehož autorem byl profesor L. A. Zadeh [8].

### 2.1 Fuzzy množiny

V klasických množinách prvek do množiny buď patří nebo nepatří. To se sice hodí, když máme rozdělit do množin prvky, které jsou jasně dané, například kolo, čtverec, trojúhelník, atd. Pokud ale máme rozdělit do množin jednotlivé osoby, např. podle hmotnosti a řekneme si, že pod 65 kg je člověk lehký a nad 65 kg už je těžký, narazíme na problém. Když bude mít někdo např. 64,9 kg je lehký a někdo s 65,1 kg už bude těžký.

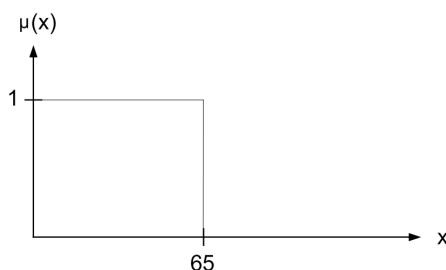
Ve fuzzy množinách, na rozdíl od klasických množin, se logické výroky ohodnocují pomocí funkce příslušnosti, která může nabývat hodnot v intervalu  $< 0, 1 >$ . Pro klasické množiny může funkce příslušnosti nabývat pouze hodnot 0 nebo 1, obr. 2.1. Proto když tento problém převedeme do fuzzy množiny, dostaneme lepší řešení: pro hmotnost 30 kg bude funkce příslušnosti nabývat hodnoty 1, pro 65 kg bude nabývat 0.75 a pro 90 kg bude nabývat 0.2. Když potom jednotlivé body spojíme, dostaneme funkci příslušnosti, která přiřazuje jednotlivým prvkům stupeň příslušnosti, obr. 2.2.

Potom tedy fuzzy množina je množinou uspořádaných dvojic prvků  $x$  a jejich stupněm příslušnosti. Množinu můžeme zapsat jako:

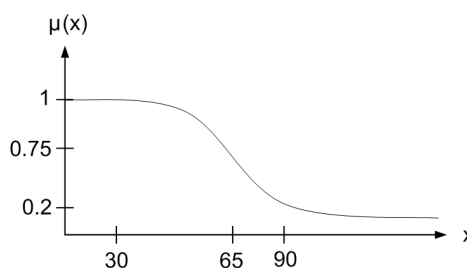
$$A = \{(x, \mu_A(x)) ; x \in X\} \quad (2.1)$$

kde  $\mu_A(x)$  je stupeň příslušnosti prvku  $x$  do množiny  $A$ .

Příklad funkce příslušnosti u klasické a fuzzy množiny pro příklad s hmotností je na obr. 2.1 a obr. 2.2



Obrázek 2.1: Příklad funkce příslušnosti klasické množiny



Obrázek 2.2: Příklad funkce příslušnosti fuzzy množiny

Nejdříve je potřeba nadefinovat univerzum. Libovolný prvek fuzzy množiny je vybírán z univerza. Je to tedy množina všech prvků, které můžeme přiřadit fuzzy množině.

Teď je potřeba nadefinovat některé vlastnosti fuzzy množin:

- **Spojité fuzzy množina** - taková fuzzy množina, jejíž funkce příslušnosti je spojitá
- **Singletonová fuzzy množina** - taková fuzzy množina, která má funkci příslušnosti nenulovou pouze pro jeden prvek z univerza
- **Nosič fuzzy množiny** - takové prvky množiny, které mají nenulový stupeň příslušnosti

$$Supp(A) = \{x \in X : \mu_A(x) > 0\} \quad (2.2)$$

- **Výška fuzzy množiny** - největší hodnota z funkce příslušnosti se nazývá výška množiny

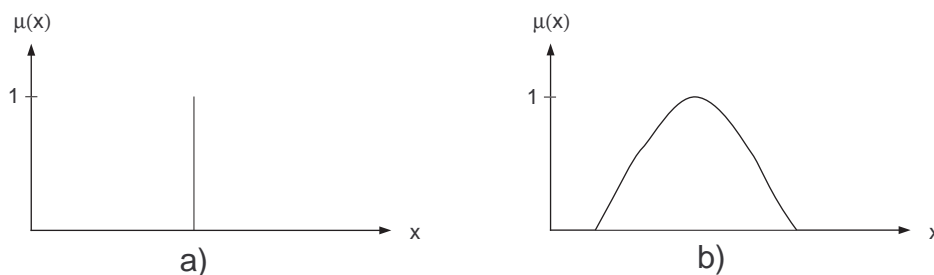
$$h(A) = \sup Range(A) \quad (2.3)$$

kde  $Range(A)$  je obor hodnot množiny  $A$ . Je potřeba rozlišovat mezi sup jako supremum funkce a mezi Supp (support), což je nosič fuzzy množiny.

- **Normální fuzzy množina** - její výška je rovna 1
- **Subnormální fuzzy množina** - její výška se nerovná 1
- **Střed fuzzy množiny** - střed fuzzy množiny je potřeba definovat pro čtyři různé případy:
  - Pokud funkce příslušnosti nabývá maxima právě v jednom bodě, je tento bod střed fuzzy množiny.
  - Pokud funkce příslušnosti nabývá maxima ve více bodech a tyto body jsou spojitě, prostřední z nich se nazývá střed fuzzy množiny.
  - Pokud funkce příslušnosti nabývá maximum ve více bodech a ne všechny prvky jsou spojitě, největší nebo nejmenší spojitý prvek se nazývá střed fuzzy množiny.
- **Konvexní fuzzy množina** - fuzzy množina, jejíž univerzum je  $[a, b]$  je konvexní jenom tehdy, když:

$$\begin{aligned} \mu_A(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) &\geq \min(\mu_A(x_1), \mu_A(x_2)), \\ \forall x_1, x_2 \in [a, b] \quad \text{and} \quad \forall \lambda \in [0, 1] \end{aligned} \quad (2.4)$$

Příklad singletonu a spojitě normální konvexní množiny pro příklad s hmotností je na obr. 2.3, kde a) je singleton a b) je spojitá množina

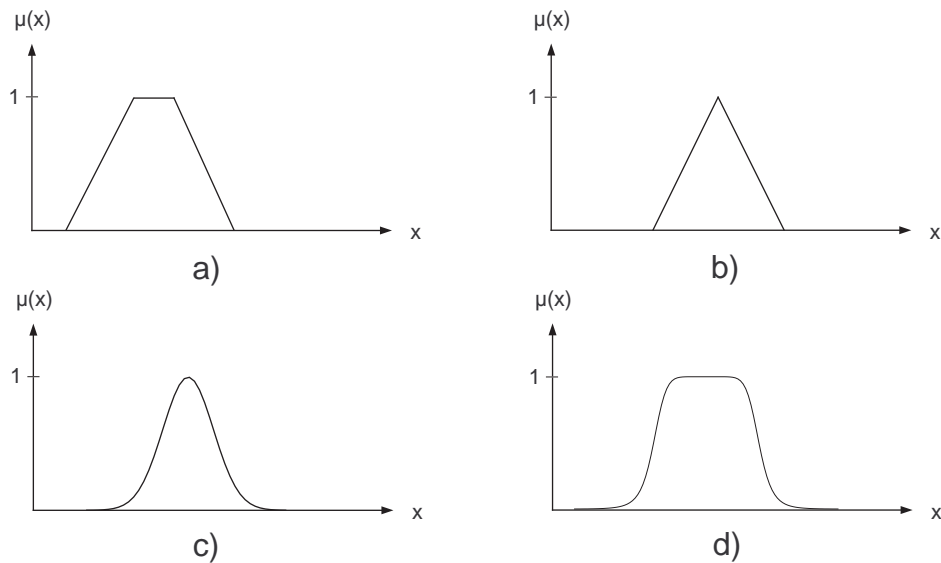


Obrázek 2.3: Příklad fuzzy množin

Ve fuzzy aplikacích se nejvíce používají lichoběžníkové, trojúhelníkové, gaussovské a zvonové fuzzy množiny. V této práci jsou nejvíce používány trojúhelníkové a lichoběžníkové

fuzzy množiny. Tyto množiny všechny jsou spojité, normální a konvexní. Potom jsou ještě používány singletonové fuzzy množiny, které jsou normální a konvexní.

Příklad nejpoužívanějších fuzzy množin v regulátorech je na obr. 2.4, kde a) je lichoběžníková množina, b) je trojúhelníková množina, c) je gaussovská množina a d) je zvonová množina.



Obrázek 2.4: Příklad nejpoužívanějších fuzzy množin

## 2.2 Fuzzy logické operace

Pro potřeby fuzzy řízení a modelování byly nadefinované logické operace, které ale na rozdíl od binárních operací nejsou jasně definované, tzn. že pro jednu operaci lze nalézt různé definice.

Pro potřeby fuzzy řízení jsou definované logické funkce AND, OR. Nejvíce se používají operace AND a OR, které nadefinoval profesor L.A. Zadeh:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (2.5)$$

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (2.6)$$

Také se používá součinnový fuzzy AND operátor:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \times \mu_B(x) \quad (2.7)$$

a Lukasiewicz OR operátor:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \min(\mu_A(x) + \mu_B(x), 1) \quad (2.8)$$

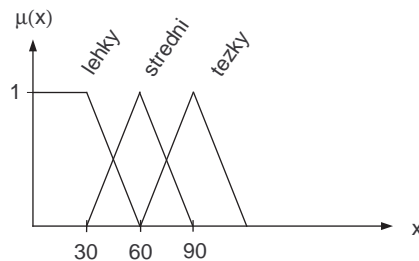
Hodně používanou operací je doplněk fuzzy množiny:

$$\bar{\mu}_A(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (2.9)$$

## 2.3 Lingvistické proměnné

Na rozdíl od klasické algebry, kde proměnné nabývají číselných hodnot, se ve fuzzy logice používají lingvistické proměnné, které nabývají slovních hodnot.

Třeba na příkladu ze začátku kapitoly může proměnná hmotnost nabývat hodnot jako lehký, těžší, středně těžký, těžký, nejtěžší, atd. Tyto hodnoty jsou fuzzy množiny, které jsou definované na univerzu.



Obrázek 2.5: Příklad pro lingvistickou proměnnou

Příklad lingvistické proměnné je na obr. 2.5. Proměnná může tedy nabývat pouze hodnot: malá, střední a velká, které jsou definované na oboru hodnot od 0 do nekonečna kg.

V klasické logice může logická proměnná nabývat pouze dvou hodnot - *true* nebo *false*. Ve fuzzy logice je na obrázku vidět, že proměnná ve fuzzy logice může nabývat více hodnot. Při použití v regulátorech se nejčastěji používá 3, 5 nebo 7 možných hodnot. V lineárních fuzzy regulátorech se používají nejčastěji pouze 2 hodnoty. Proto o fuzzy logice hovoříme jako o *multi-valued* logice.

## 2.4 Slovní pravidla

Používají se ve fuzzy regulátorech pro určení výstupní proměnné. Nejpoužívanější jsou dva typy: Mamdaniho a Takagi-Sugeno (pro zkrácení je budeme nazývat TS) pravidla.

Mamdaniho pravidla používají jako výstupní proměnnou fuzzy množinu, ale ve většině fuzzy regulátorů využívajících Mamdaniho slovní pravidla se používají jako výstupní množiny singletony. Nejčastější formát slovních pravidel je ve tvaru IF - THEN. Obecný formát pro Mamdaniho slovní pravidla:

$$\begin{array}{l} \text{IF } v_1 \text{ is } S_1 \text{ AND } \dots \text{ AND } v_M \text{ is } S_M \\ \text{THEN } z_1 \text{ is } W_1, \dots, z_N \text{ is } W_N \end{array} \quad (2.10)$$

kde  $v_1 \dots v_M$  jsou vstupní proměnné,  $S_1 \dots S_M$  jsou vstupní fuzzy množiny,  $z_1 \dots z_N$  jsou výstupní proměnné a  $W_1 \dots W_N$  jsou výstupní fuzzy množiny.

TS slovní pravidla používají pro určování výstupní proměnné funkční závislost na vstupních proměnných. Obecný formát pro TS slovní pravidla:

$$\begin{array}{l} \text{IF } v_1 \text{ is } S_1 \text{ AND } \dots \text{ AND } v_M \text{ is } S_M \\ \text{THEN } z_1 = f_1(v_1 \dots v_M), \dots, z_N = f_N(v_1 \dots v_M) \end{array} \quad (2.11)$$

kde  $v_1 \dots v_M$  jsou vstupní proměnné,  $S_1 \dots S_M$  jsou vstupní fuzzy množiny,  $z_1 \dots z_N$  jsou výstupní proměnné a  $f_1 \dots f_N$  jsou funkce určující výstupní hodnoty.

Tato pravidla lze interpretovat uvnitř fuzzy regulátoru pomocí základních fuzzy operací, jako např. AND, OR, NOT, atd., ale pro koncového uživatele jsou nejčastěji ve formě (2.10) nebo (2.11).

# Kapitola 3

## Fuzzy regulátory

Fuzzy regulátory jsou s fuzzy modelováním nejrozšířenějšími aplikacemi fuzzy logiky. Teoretické podklady a koncept fuzzy regulátorů vytvořil profesor L. A. Zadeh. První fuzzy regulátor vytvořil profesor E. H. Mamdani na Londýnské univerzitě.

Fuzzy regulátory jsou používány hlavně u těch procesů, kde je buď velmi složité identifikovat systém a zabralo by to mnoho času a peněz, nebo pokud je systém vysokého řádu a je nelineární.

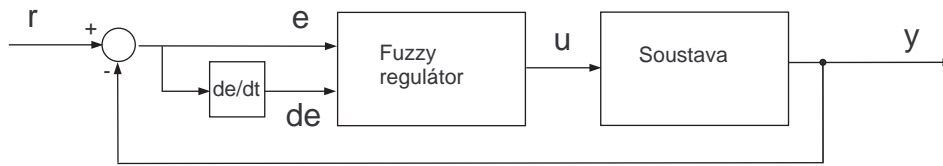
Protože tato práce měla za úkol se hlavně seznámit s fuzzy PID regulátory a způsobem jejich návrhu, fuzzy PID regulátory v této práci jsou navrhované pro systémy nižšího řádu a to jak pro lineární, tak pro nelineární systémy.

### 3.1 Popis fuzzy PID regulátorů

Fuzzy PID regulátory jsou podskupinou fuzzy regulátorů. Od ostatních fuzzy regulátorů se liší v tom, že jejich pravidla v bázi pravidel popisují chování klasických regulátorů.

Do fuzzy PID regulátorů vstupují většinou dva signály. Jsou to odchylka a derivace odchylky. Z fuzzy PID regulátoru vystupuje jeden signál, což je akční zásah fuzzy PID regulátoru. Popis vstupů a výstupů fuzzy PID regulátoru je na obr. 3.1, kde  $r$  je referenční hodnota,  $e$  je odchylka od referenční hodnoty,  $de$  je derivace odchylky,  $u$  je akční zásah fuzzy PID regulátoru a  $y$  je výstupní hodnota regulované soustavy.



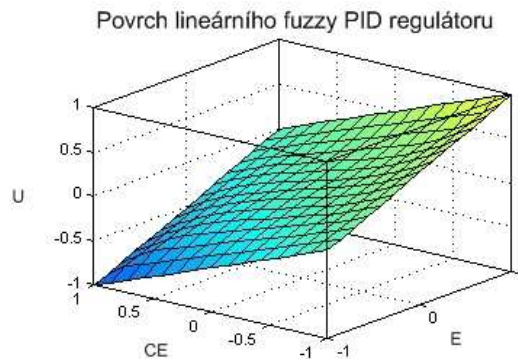


Obrázek 3.1: Vstupy a výstupy fuzzy PID regulátoru

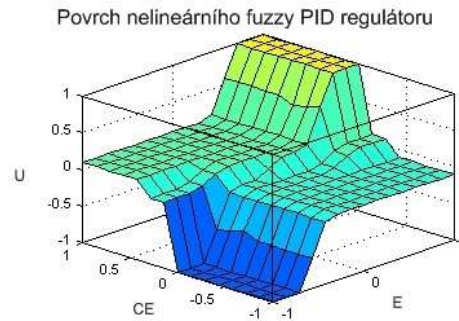
## 3.2 Rozdělení fuzzy PID regulátorů

Můžeme je rozdělit z několika hledisek.

Z hlediska linearity je můžeme rozdělit na lineární a nelineární. Lineární fuzzy regulátory jsou takové regulátory, jejichž výstup je lineární kombinací vstupů. U nelineárních fuzzy regulátorů je výstup nelineární kombinace vstupů. Závislost výstupu na kombinaci vstupů lze zobrazit graficky, kde na osu  $x$  a  $y$  zobrazíme vstupy regulátoru a na osu  $z$  výstup regulátoru. Toto zobrazení nazýváme povrch fuzzy regulátoru. Nelineární fuzzy regulátory jsou nejrozšířenější, lineární se uplatňují jen velmi málo, protože jsou svými vlastnostmi velmi podobné klasickým regulátorům. V [7] je dokázáno, že mají dokonce stejné vlastnosti jako klasické regulátory. Tato práce se zabývá jak lineárními, tak nelineárními fuzzy regulátory. Příklad povrchu lineárního fuzzy PID regulátoru je na obr. 3.2 a povrchu nelineárního fuzzy PID regulátoru je na obr. 3.3, kde derivace odchylky a odchylka jsou vstupy fuzzy PID regulátoru a výstup je výstup z fuzzy PID regulátoru.



Obrázek 3.2: Ukázka povrchu lineárního fuzzy PID regulátoru

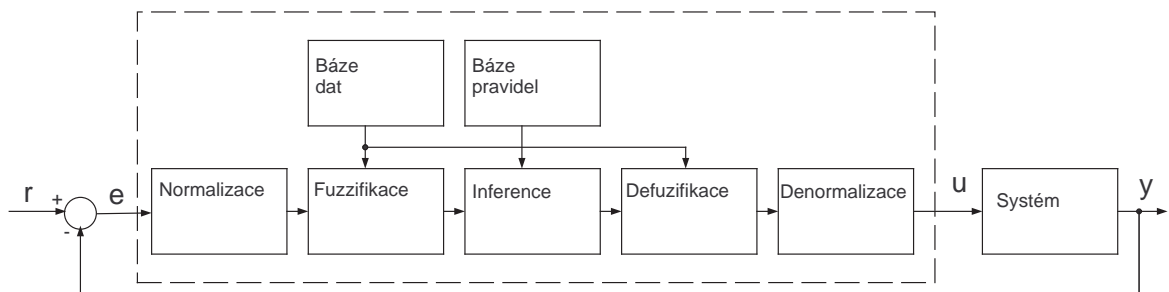


Obrázek 3.3: Ukázka povrchu nelineárního fuzzy PID regulátoru

Nebo můžeme fuzzy regulátory rozdělit podle použité báze pravidel. Nejrozšířenější jsou Mamdani a TS báze pravidel. Mamdani regulátory používají jako bázi pravidel Mamdani slovní pravidla. TS regulátory používají jako bázi pravidla typu TS. Oba tyto typy mohou být jak lineární, tak nelineární fuzzy regulátory. V této práci jsou používány a navrhovány fuzzy regulátory typu Mamdani a to jak lineární, tak nelineární.

### 3.3 Struktura fuzzy regulátoru

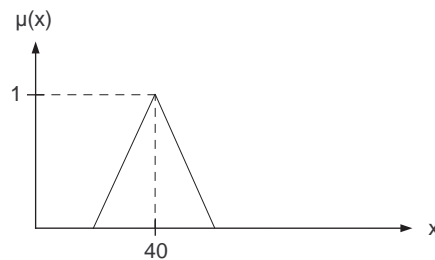
Každý fuzzy regulátor obsahuje tři základní funkční bloky. Jsou to fuzzifikace, inference a defuzzifikace. Potom ještě může obsahovat blok normalizace, který předchází blok fuzzifikace, a blok denormalizace, který následuje za defuzzifikačním blokem. Schéma fuzzy regulátoru je na obr. 3.4.



Obrázek 3.4: Blokové schéma fuzzy regulátoru

Popis jednotlivých bloků fuzzy regulátoru:

- **Normalizace:** Tento blok převádí hodnoty vstupních veličin tak, aby odpovídaly rozsahu vstupních proměnných. Většinou jsou vstupní proměnné v rozsahu  $\langle -1, 1 \rangle$ . Před tímto blokem probíhá filtrování signálu za účelem odstranění šumu, kvantizace, může mu předbíhat průměrkování kvůli statistickým údajům o signálu, derivace, nebo integrace signálu.  
Pomocí změny zesílení tohoto bloku je možné změnit chování celého fuzzy regulátoru bez toho, že by se měnila báze dat a báze pravidel.
- **Fuzzifikace:** Tento blok převádí vstupní data regulátoru na fuzzy množinu. Příklad je na obr. 3.5, kde se vstupní veličina o hodnotě 40 přiřadí do spojitě, normální a konvexní fuzzy množiny se středem ve 40. Šířka této fuzzy množiny závisí na vnitřním nastavení fuzzy regulátoru, které většinou uživatel neovlivňuje.

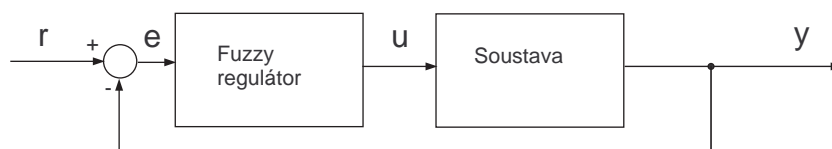


Obrázek 3.5: Příklad fuzzifikace

- **Inference:** Tento blok pomocí báze pravidel, což je soubor slovních pravidel popisující chování fuzzy regulátoru, zpracuje vstupní fuzzy množiny a z nich vytvoří výstupní fuzzy množinu. Ve fuzzy PID regulátorech jsou slovní pravidla navrhovaná tak, aby popisovala funkci klasických regulátorů.
- **Defuzzifikace:** Tento blok přiřazuje výstupní fuzzy množině výstupní hodnotu. Výstupní hodnotu přiřazuje pomocí určitých metod, např. metoda těžiště, metoda těžiště při aproximaci singletony, metoda maximální hodnoty a další metody.
- **Denormalizace:** Tento blok převádí výstupní hodnoty na skutečné jednotky systému. Například převádí z rozsahu  $\langle -1, 1 \rangle [-]$  na skutečné jednotky  $\langle -10, 10 \rangle [V]$ . Za blokem denormalizace může být umístěn integrátor.

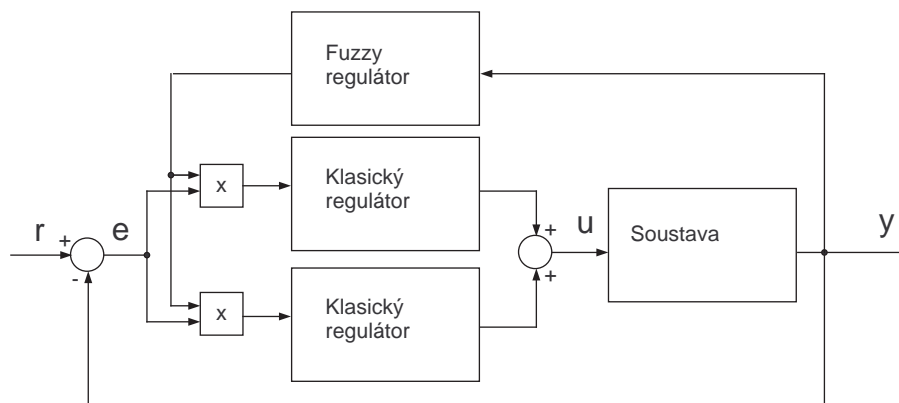
### 3.4 Způsoby zapojení fuzzy PID regulátoru v regulačním obvodu

Způsobů zapojení fuzzy regulátoru do regulačního obvodu existuje mnoho, v této práci je využíván tzv. přímé zapojení. Schéma regulačního obvodu s přímým zapojením fuzzy regulátoru je na obr. 3.6.



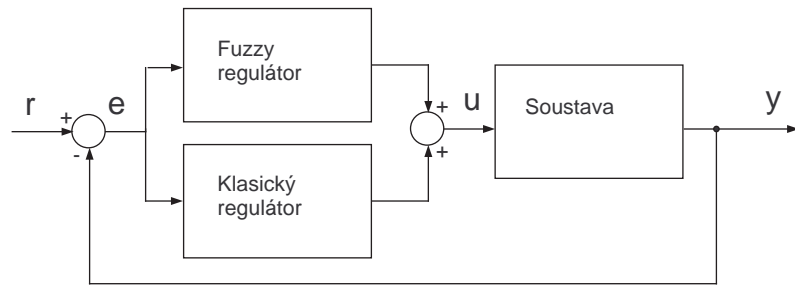
Obrázek 3.6: Přímé zapojení fuzzy regulátoru

V této práci je použito pouze toto zapojení. Existují další druhy zapojení, například takové zapojení, kdy fuzzy logika jenom přepíná mezi jednotlivými klasickými regulátory podle toho v jakém pracovním bodě se nachází regulovaná soustava. obr. 3.7.



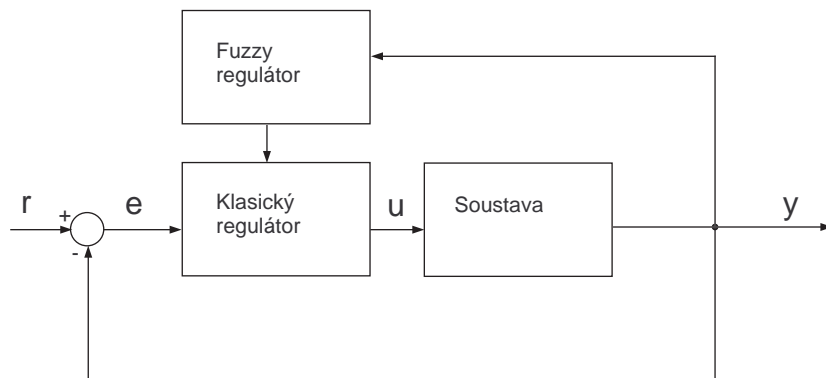
Obrázek 3.7: Zapojení fuzzy regulátoru s rozhodováním mezi klasickými regulátory

Další možnost zapojení je ta, že se fuzzy regulátor dá do paralelní větve ke klasickému regulátoru a jejich akční zásahy se sčítají. Schéma zapojení tohoto regulačního obvodu je na obr. 3.8.



Obrázek 3.8: Paralelní zapojení fuzzy regulátoru

Další způsob zapojení je ten, že fuzzy regulátor kontroluje pracovní bod a stav regulovaného systému a jenom mění parametry klasického regulátoru, který je zapojený jako zpětnovazební regulátor. Schéma regulačního obvodu s tímto zapojením je na obr. 3.9.



Obrázek 3.9: Zapojení fuzzy regulátoru, který kontroluje pracovní bod systému

### 3.5 Postup návrhu fuzzy PID regulátoru

Metod návrhu fuzzy PID regulátorů existuje víc, v této práci bude popsána jen metoda, která využívá znalosti o návrhu klasických PID regulátorů a potom je transformuje na fuzzy PID regulátory.

V této práci jsou navrhovány jak lineární, tak nelineární fuzzy PID regulátory. Protože se pro lineární a nelineární fuzzy PID regulátory návrh liší jenom v odlišné bázi pravidel

a bázi dat, bude zde vysvětlen jen jeden postup, kde bude v případě odlišnosti uvedeno jak se liší návrh lineárního od nelineárního fuzzy PID regulátoru.

Tuto metodu je možné shrnout do několika bodů, které budou rozepsány dále:

- Návrh klasického PID regulátoru
- Návrh bloku fuzzy regulátoru
- Nahrazení sčítacího členu v regulátoru fuzzy regulátorem
- Transformace konstant
- Doladění konstant

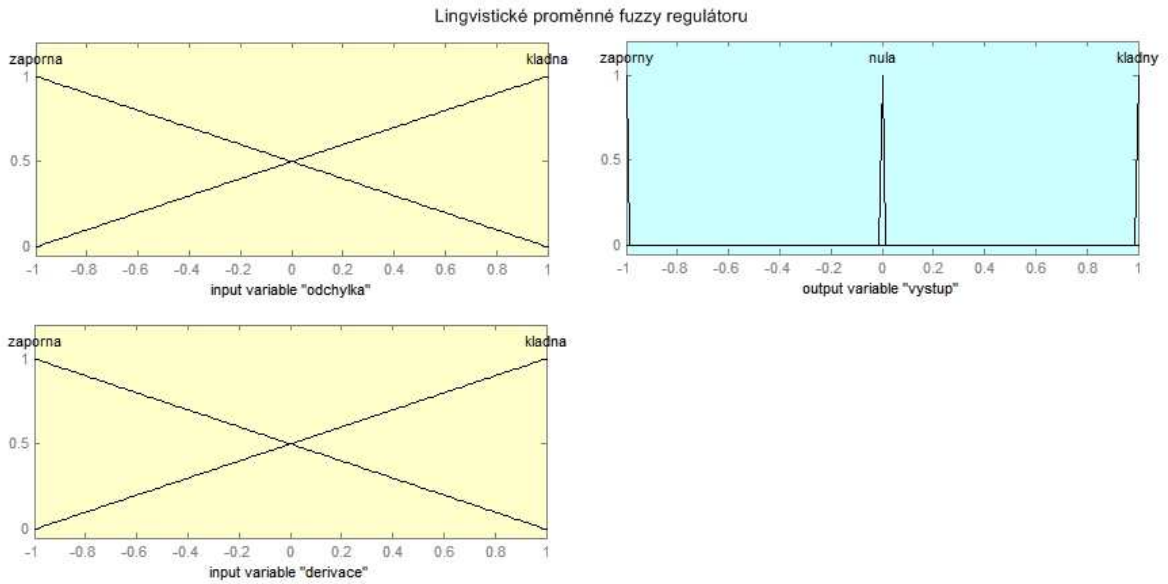
### 3.5.1 Návrh klasického PID regulátoru

Existuje mnoho metod návrhu klasického PID regulátoru. Například Ziegler-Nichols, frekvenční metody, metody využívající geometrického místa kořenů, stavové metody, Loop shapign, atd. Tato práce využívá frekvenční metody návrhu a metody využívající geometrického místa kořenů.

### 3.5.2 Návrh bloku fuzzy regulátoru

Návrh tohoto bloku se provádí ve fuzzy toolboxu v programu Matlab R2007b. Nyní popíšeme postup návrhu jednoduššího lineárního fuzzy PD regulátoru. Návrh jiných typů fuzzy regulátorů je podobný a liší se jenom různými lingvistickými proměnnými až na fuzzy P regulátor, který má pouze jeden vstup.

Nejdříve si zvolíme počet lingvistických proměnných pro vstupní proměnné odchylku a derivaci odchylky. Zde uvedu nejjednodušší případ, což jsou pouze dvě proměnné pro vstupní hodnoty. Rozsah vstupních a výstupních proměnných si zvolíme  $\langle -1, 1 \rangle$ . Vstupní hodnotu odchylku nazveme proměnné záporná a kladná, pro vstupní hodnotu derivace odchylky nazveme proměnné také kladná a záporná, pro výstupní hodnotu nazveme proměnné záporný, kladný a nula. Proměnné jsou na obr. 3.10.



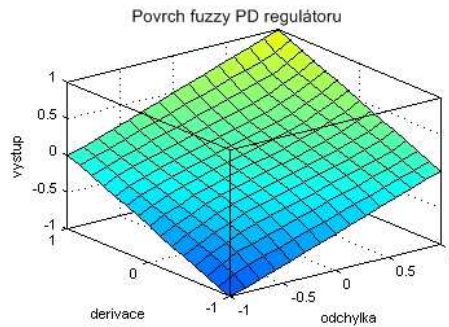
Obrázek 3.10: Příklad lingvistických proměnných fuzzy regulátoru

Když máme nadefinovány jednotlivé proměnné, můžeme nadefinovat bázi pravidel. Nadefinujeme si 4 pravidla, která popisují chování klasického PD regulátoru. Jsou to:

$$\begin{aligned}
 & \textit{if odchylka is kladna and derivace is kladna then vystup is kladny} \\
 & \textit{if odchylka is kladna and derivace is zaporna then vystup is nula} \\
 & \textit{if odchylka is zaporna and derivace is zaporna then vystup is zaporny} \\
 & \textit{if odchylka is zaporna and derivace is kladna then vystup is nula}
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Při použití standardních inferenčních metod nám vznikne výstup téměř lineárně závislý na vstupu a tuto závislost si můžeme vyjádřit graficky jako povrch fuzzy regulátoru. Protože povrch fuzzy regulátoru stačí na vyjádření jeho vlastností, budou v další kapitole používány pouze povrchy k zobrazení vlastností jednotlivých regulátorů. Povrch tohoto regulátoru je na obr. 3.11.

V této části návrhu lze lineární fuzzy regulátor nahradit nelineárním. Nelineární fuzzy regulátor lze vytvořit více způsoby. Buď toho lze dosáhnout vytvořením nelineární báze pravidel a báze dat, kdy sami navrhne takové lingvistické proměnné, aby se výstupní funkce stala nelineární, nebo vytvořením takových lingvistických pravidel které výstupní funkci deformují a udělají z ní nelineární funkci. Další způsob je použitím nelineárních inferenčních a defuzzifikačních metod. Tato práce používá pro vytvoření nelineárního fuzzy PID regulátoru nelineární bázi dat a pravidel.



Obrázek 3.11: Povrch fuzzy regulátoru

### 3.5.3 Nahrazení sčítacího členu v regulátoru fuzzy regulátorem

Podle konfigurace klasického regulátoru, který už máme navržený, nahradíme sčítací člen fuzzy regulátorem.

Na následujících schématech bude použito značení signálů, které si bude v jednotlivých schématech odpovídat. Odchylka výstupu systému od referenční hodnoty, která je vstupem do fuzzy PID regulátoru, je značena  $e$ , její normovaná hodnota je značena  $E$ . Derivace odchylky je značena  $ce$  a její normovaná hodnota  $CE$ . Integrace odchylky je značena  $ie$  a její normovaná hodnota, která vstupuje do regulátoru je  $IE$ . Výstupní hodnota z regulátoru je značena  $U$ , její denormovaná hodnota, tzn. akční zásah, je značena  $u$ . Pro fuzzy PI regulátor v odchylkovém tvaru je výstupní hodnota derivace akčního zásahu a je značena  $CU$ , její denormovaná hodnota je značena  $cu$ . Dále všechny bloky značené  $GU$  provádí normalizaci odchylky, bloky označené  $GCE$  provádí normalizaci derivace odchylky, bloky označené  $GIE$  provádí normalizaci integrálu odchylky, bloky označené  $GU$  provádí denormalizaci výstupní hodnoty a bloky označené  $GCU$  provádí denormalizaci derivace výstupní hodnoty.

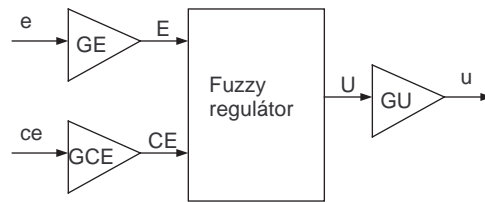
Klasický P regulátor nahradíme fuzzy regulátorem podle obr. 3.12.



Obrázek 3.12: Schéma fuzzy P regulátoru

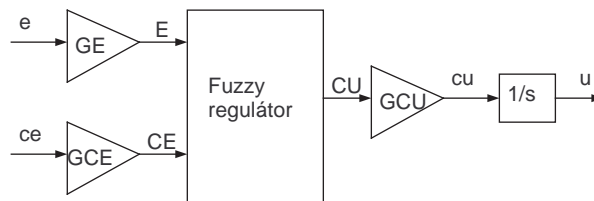
Klasický PD regulátor nahradíme fuzzy regulátorem podle obr. 3.13.





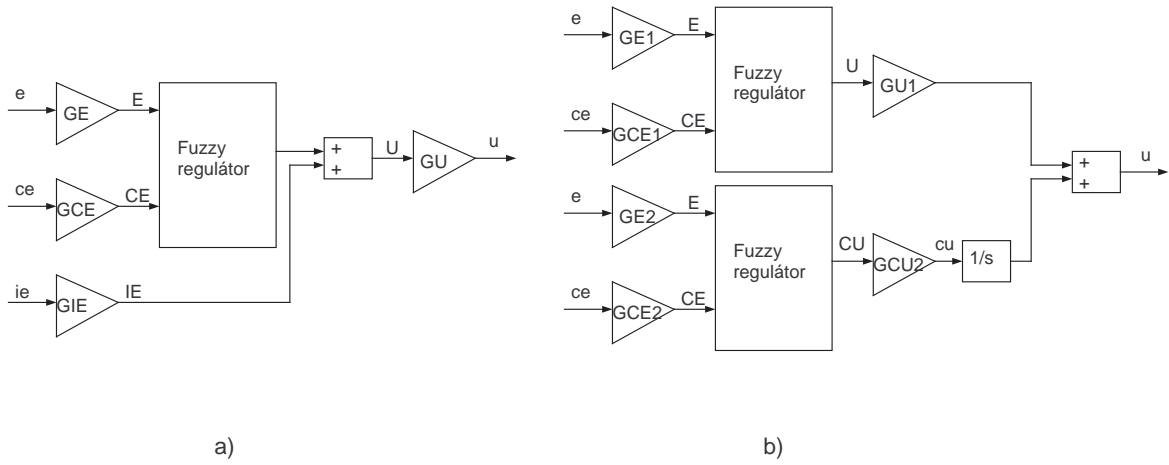
Obrázek 3.13: Schéma fuzzy PD regulátoru

Klasický regulátor typu PI převedeme na regulátor typu PD v přírůstkovém tvaru podle obr. 3.14.



Obrázek 3.14: Schéma fuzzy PI regulátoru v přírůstkovém tvaru

Pro nahrazení regulátoru typu PID máme dvě možnosti. Buď ho nahradíme regulátorem PD s I složkou, která jde mimo fuzzy blok, tzv. PD+I regulátor, nebo regulátor rozdělíme na dvě paralelní větve, kde jedna bude regulátor typu PD a druhá PI. Tato práce používá první typ PID regulátoru, tzn. typ PD+I. Příklad PID regulátorů je na obr. 3.15, kde a) je fuzzy regulátor typu PD+I a b) je fuzzy regulátor PID složený ze dvou paralelních větví.



Obrázek 3.15: Schéma fuzzy PD+I a PID regulátoru

### 3.5.4 Transformace konstant

Jak je vidět na schématech fuzzy PID regulátorů obr. 3.12, obr. 3.13, obr. 3.14 a obr. 3.15, konstanty používané ve fuzzy PID regulátorech se liší od konstant klasických regulátorů. Rovnice obecného spojitého fuzzy regulátoru v časové oblasti:

$$u(t) = k_P \cdot e(t) + k_I \cdot \int_{t_0}^t e(\tau) \cdot d\tau + k_D \cdot \dot{e}(t) \quad (3.2)$$

Přenos obecného spojitého regulátoru ve frekvenční oblasti:

$$D(s) = k_P \cdot \left[ 1 + \frac{1}{T_I \cdot s} + T_D \cdot s \right] \quad (3.3)$$

Odvození, jak se musí přepočítat konstanty z klasického regulátoru na konstanty použité ve fuzzy PID regulátorech, je v [2].

Já zde pouze uvedu vzorce pro přepočet konstant:

- Pro přepočet z klasického P regulátoru na fuzzy P regulátor se používá rovnice:

$$GE \cdot GU = k_P \quad (3.4)$$

- Pro přepočet z klasického PD regulátoru na fuzzy PD regulátor se používají rovnice:

$$\begin{aligned} GE \cdot GU &= k_P \\ \frac{GCE}{GE} &= T_D \end{aligned} \quad (3.5)$$

- Pro přepočítání z klasického PI regulátoru na fuzzy PD regulátor v přírůstkovém tvaru se používají rovnice:

$$\begin{aligned} G_{CE} \cdot G_{CU} &= k_P \\ \frac{G_E}{G_{CE}} &= \frac{1}{T_I} \end{aligned} \quad (3.6)$$

- Pro přepočítání z klasického PID regulátoru na fuzzy PD+I regulátor se používají rovnice:

$$\begin{aligned} G_E \cdot G_U &= k_P \\ \frac{G_{CE}}{G_E} &= T_D \\ \frac{G_{IE}}{G_E} &= \frac{1}{T_I} \end{aligned} \quad (3.7)$$

### 3.5.5 Doladění konstant

Provádí se až nakonec, aby se zlepšily vlastnosti fuzzy PID regulátoru. V této práci jsem ho nepoužíval, protože laděním konstant by se regulátor změnil na jiný a už by nešlo porovnávat odpovídající klasický a fuzzy PID regulátor.

## Kapitola 4

# Srovnání klasických a fuzzy PID regulátorů

Tato část popisuje fuzzy PID regulátory, které jsem navrhl, a porovnává je s odpovídajícími klasickými regulátory. Všechny regulátory zde popisované byly navrženy v prostředí Matlab/simulink. Fuzzy PID regulátory byly vytvořeny pomocí fuzzy toolboxu v programu Matlab a klasické PID regulátory byly navrženy pomocí frekvenčních metod.

Srovnávat lineární fuzzy regulátoru s klasickými nemá smysl, protože mají stejné vlastnosti jako klasické regulátory, tato část práce bude porovnávat nelineární fuzzy regulátory s klasickými regulátory a fuzzy regulátory mezi sebou. Z toho důvodu, že v této části se budou vyskytovat pouze nelineární fuzzy regulátory, budou tyto regulátory popisovány pouze jako fuzzy regulátory. Tyto fuzzy regulátory budou rozděleny podle počtu lingvistických proměnných pro vstupní hodnoty na fuzzy regulátory se třemi proměnnými na každou vstupní hodnotu, které budou označovány jako fuzzy 3 regulátory, a regulátory s pěti proměnnými, které budou označovány jako fuzzy 5 regulátory.

Regulátory budou srovnávány na těchto systémech:

- systém č. 1: systém 2. řádu s přenosem:

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 3 \cdot s + 2} \quad (4.1)$$

- systém č. 2: systém 3. řádu s přenosem:

$$G(s) = \frac{1}{s^3 + 5 \cdot s^2 + 6 \cdot s} \quad (4.2)$$

- systém č. 3: systém s přenosem (4.2) a dopravním zpožděním o velikosti 0,15 s a 0,2 s.

- systém č. 4: nelineární systém 3. řádu se stavovými rovnicemi:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -x_1 + 4 \cdot x_1^2 + u \\ \dot{x}_2 &= 8 \cdot x_1 - 4 \cdot x_2 \\ \dot{x}_3 &= 10 \cdot x_2 - 5 \cdot x_3 \\ y &= x_3\end{aligned}\tag{4.3}$$

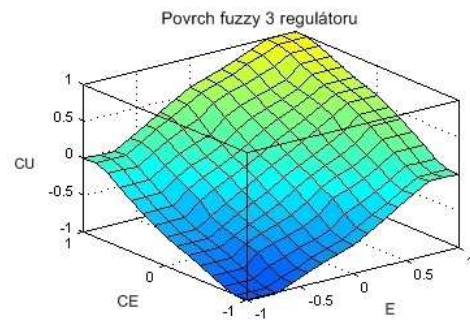
## 4.1 Porovnání výsledků regulace na systému č. 1

K tomuto systému jsem navrhl klasické regulátory pomocí frekvenčních metod typu PI na fázovou bezpečnost  $60^\circ$  a typu PID na fázovou bezpečnost  $75^\circ$ . K nim jsem navrhl fuzzy 3 a fuzzy 5 regulátory. Regulátory typu PI a PID jsou porovnávány zvlášť.

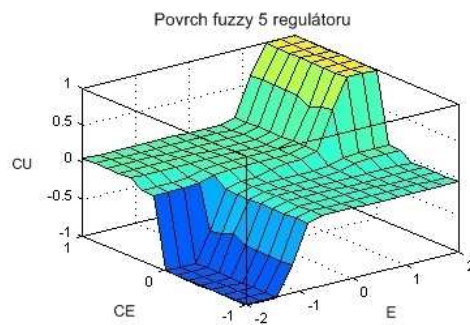
Nejdříve jsou srovnávány regulátory typu PI. Povrch fuzzy 3 regulátoru je na obr. 4.1 a povrch fuzzy 5 regulátoru je na obr. 4.2. Srovnání přechodových charakteristik PD regulátorů je na obr. 4.5 a srovnání akčních zásahů těchto regulátorů je na obr. 4.6. Z přechodové charakteristiky je vidět, že fuzzy 3 regulátor má o trochu delší dobu náběhu, ale má mnohem menší překmit než klasický regulátor. Fuzzy 5 regulátor má ještě delší dobu náběhu a menší překmit než fuzzy 3 regulátor. Z akčních zásahů je vidět, že fuzzy regulátory mají menší hodnoty akčních zásahů a začínají od nuly kvůli tomu, že jsou v přírůstkovém tvaru.

Pro regulátory typu PID je povrch fuzzy regulátorů na obr. 4.3 a obr. 4.4. Přechodové charakteristiky PID regulátorů jsou na obr. 4.7 a srovnání akčních zásahů na obr. 4.8. Když srovnáme přechodové charakteristiky PID regulátorů, je vidět, že fuzzy 3 regulátor má stejnou dobu náběhu jako klasický regulátor a má větší překmit. Fuzzy 5 regulátor má nejdélší dobu náběhu a největší překmit. Fuzzy 3 regulátor má nejmenší akční zásah, fuzzy 5 regulátor ho má naopak největší.

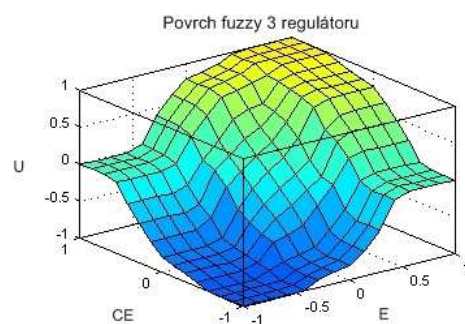
Porovnáním všech výsledků regulace pro tento systém vychází nejlépe fuzzy regulátor se třemi lingvistickými proměnnými pro každou vstupní hodnotu. Fuzzy regulátor s pěti proměnnými vychází nejhůře, ale v zapojení typu PI má nejmenší překmit, což může být pro některé aplikace regulátorů výhodou.



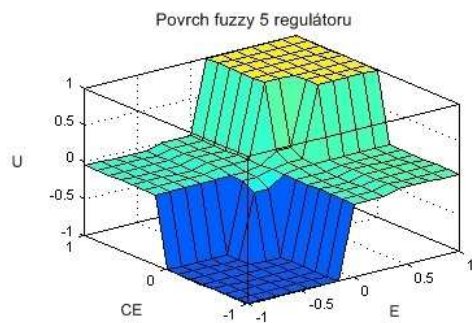
Obrázek 4.1: Povrch fuzzy regulátoru se třemi proměnnými pro vstupní hodnoty



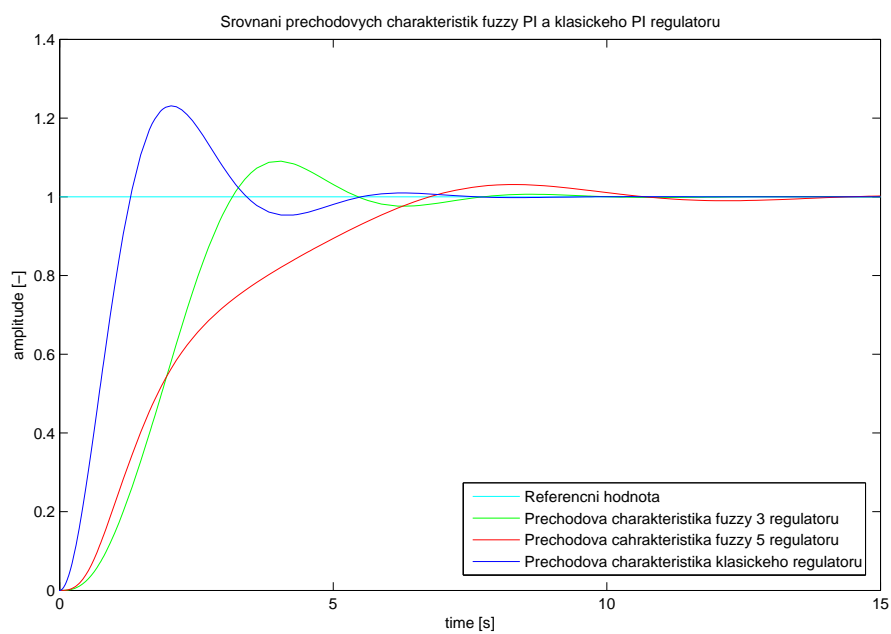
Obrázek 4.2: Povrch fuzzy regulátoru s pěti proměnnými pro vstupní hodnoty



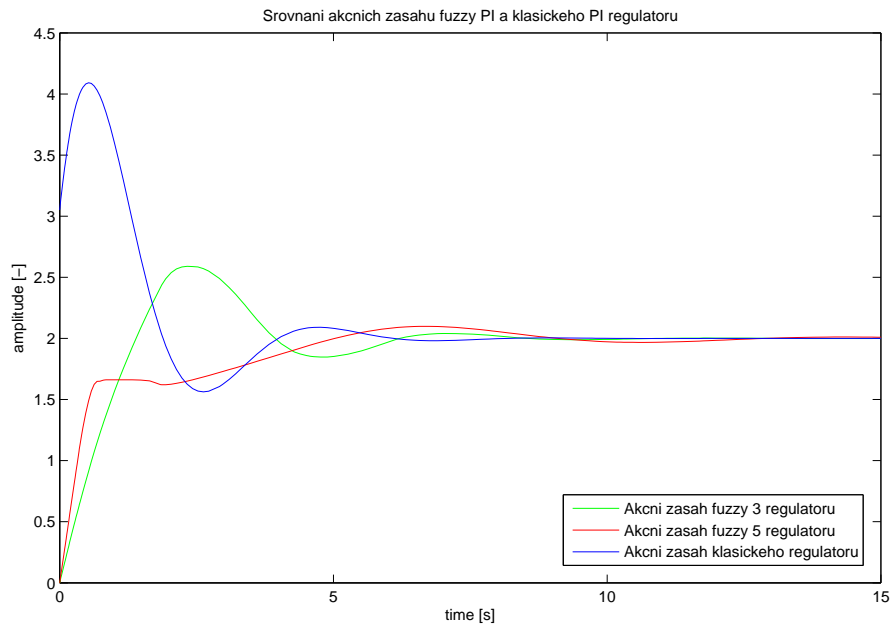
Obrázek 4.3: Povrch fuzzy regulátoru se třemi proměnnými pro vstupní hodnoty



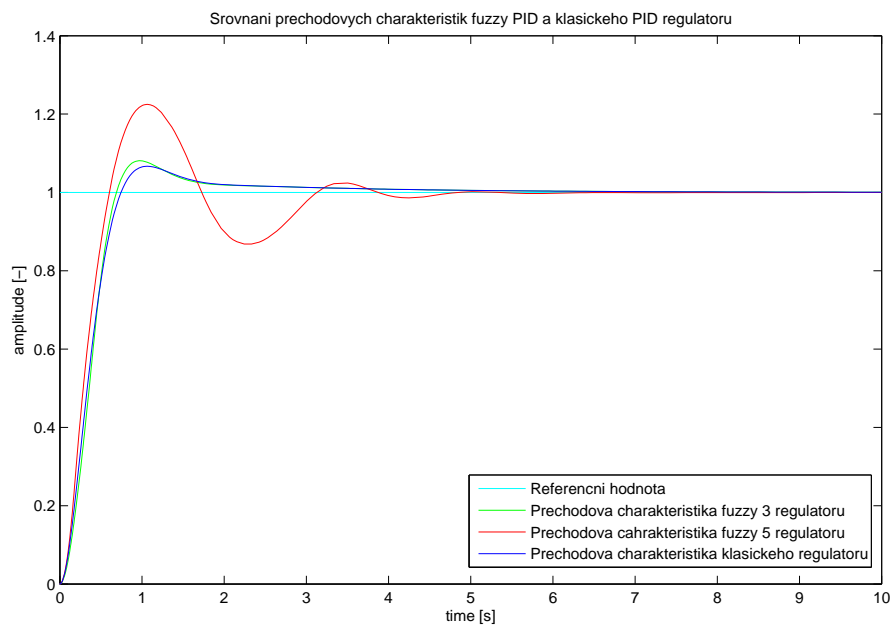
Obrázek 4.4: Povrch fuzzy regulátoru s pěti proměnnými pro vstupní hodnoty



Obrázek 4.5: Srovnání prechodových charakteristik PI regulátorů pro systém č. 1

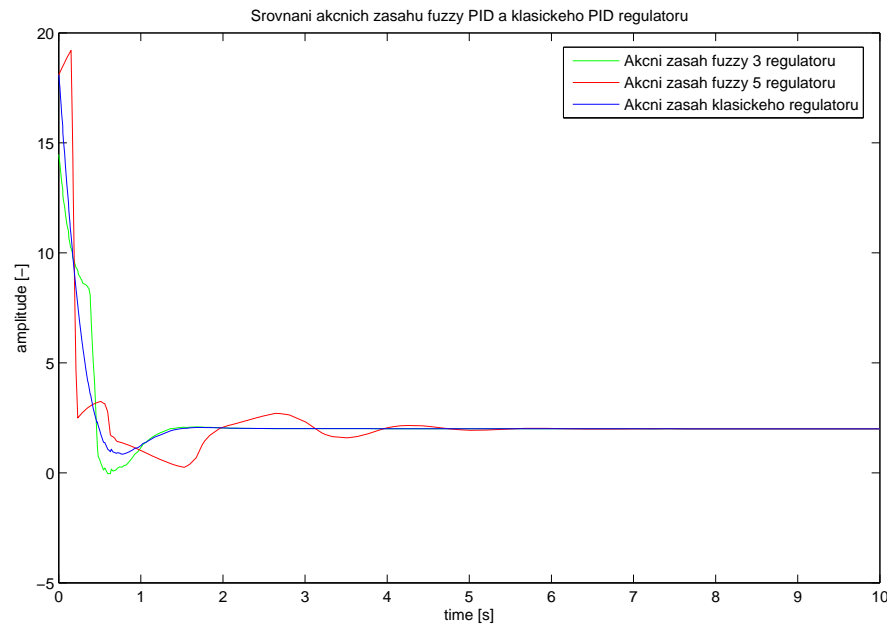


Obrázek 4.6: Srovnání akčních zásahů PI regulátorů pro systém č. 1



Obrázek 4.7: Srovnání přechodových charakteristik PID regulátorů pro systém č. 1





Obrázek 4.8: Srovnání akčních zásahů PID regulátorů pro systém č. 1

## 4.2 Porovnání výsledků regulace na systému č. 2

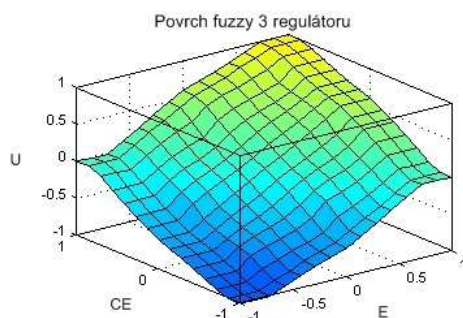
Pro tento systém jsem navrhl klasické regulátory typu PD a PID pomocí frekvenčních metod, oba typy jsou navrženy pro fázovou bezpečnost  $60^\circ$ . Opět jsou regulátory typu PD a PID porovnávány zvlášť.

Nejdříve budeme porovnávat regulátory typu PD. Povrch fuzzy PD regulátoru je na obr. 4.9. Fuzzy 5 regulátor je stejný jako regulátor typu PDI pro předešlou soustavu a jeho povrch je na obr. 4.4. Porovnání přechodových charakteristik PD regulátorů je na obr. 4.11, akční zásahy jsou na obr. 4.12. Regulátory typu PD vychází všechny téměř stejně, ale klasický regulátor má nejmenší dobu náběhu a nejmenší překmit. Když srovnáme fuzzy regulátory mezi sebou, tak fuzzy 3 regulátor má menší dobu náběhu a menší překmit než fuzzy 5 regulátor. Fuzzy 3 regulátor má nejmenší akční zásah, klasický a fuzzy 5 regulátor mají stejně velký akční zásah.

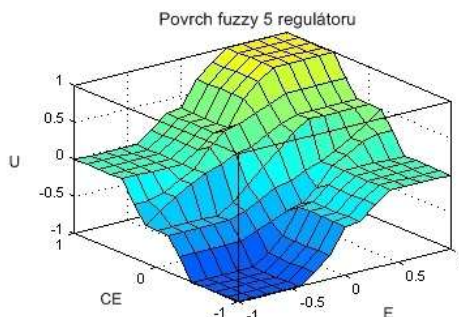
Pro regulátor typu PDI je fuzzy 3 regulátor stejný jako regulátor typu PDI pro předešlou soustavu a jeho povrch je na obr. 4.3. Povrch fuzzy 5 regulátoru je na obr. 4.10. Přechodové charakteristiky PID regulátorů jsou na obr. 4.13 a porovnání akčních zásahů

je na obr. 4.14. Pro regulátory typu PID opět vychází nejlépe klasický regulátor, ale fuzzy 3 regulátor má jen trochu větší překmit, ale stejně velikou dobu náběhu. Nejhorší opět vychází fuzzy 5 regulátor, který je hodně kmitavý, má největší překmit i dobu náběhu.

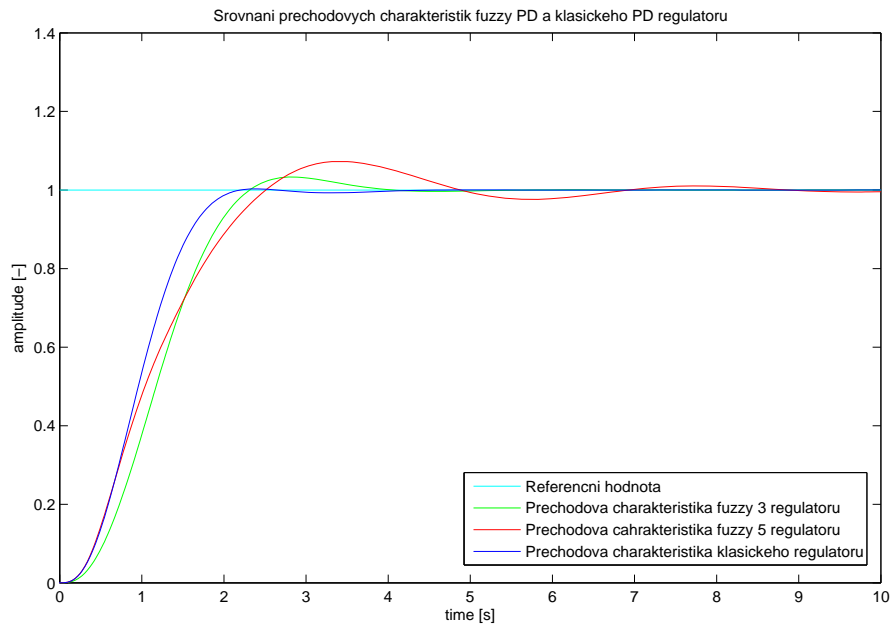
Porovnáním výsledků regulace pro tento systém vychází klasický a fuzzy 3 regulátor téměř stejně, i když fuzzy 3 regulátor má trochu větší překmit.



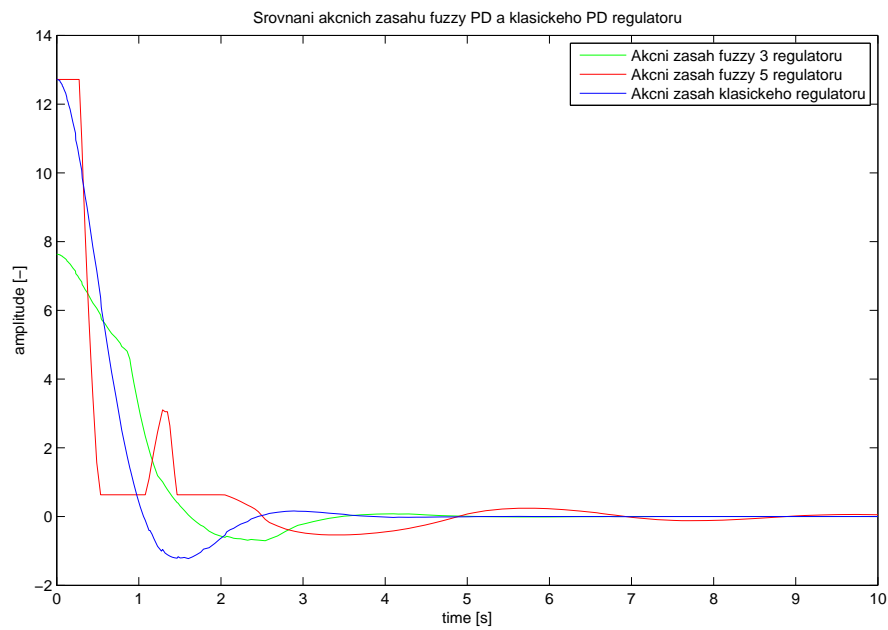
Obrázek 4.9: Povrch fuzzy regulátoru se třemi proměnnými pro vstupní hodnoty



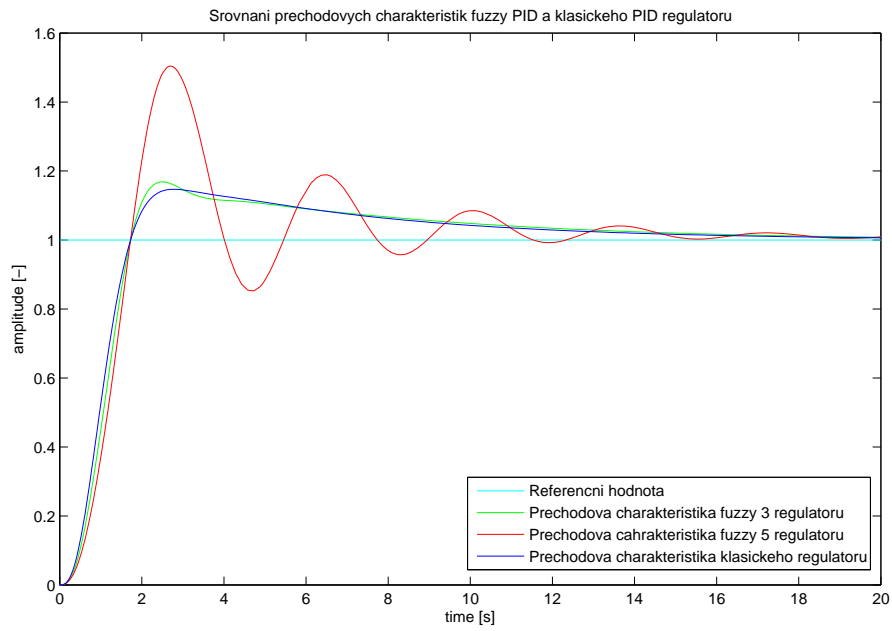
Obrázek 4.10: Povrch fuzzy regulátoru s pěti proměnnými pro vstupní hodnoty



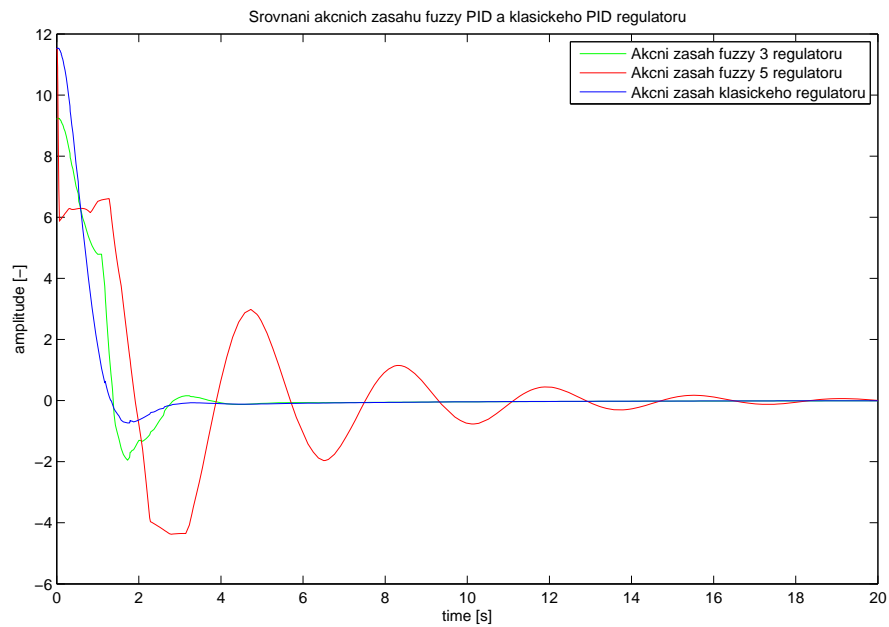
Obrázek 4.11: Srovnání přechodových charakteristik PD regulátorů pro systém č. 2



Obrázek 4.12: Srovnání akčních zásahů PD regulátorů pro systém č. 2



Obrázek 4.13: Srovnání přechodových charakteristik PID regulátorů pro systém č. 2



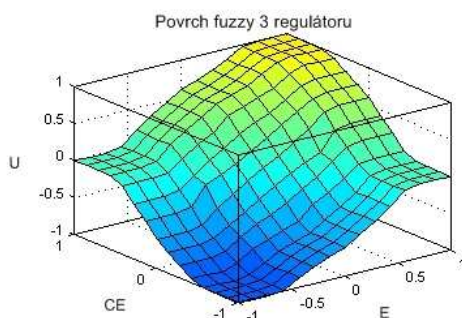
Obrázek 4.14: Srovnání akčních zásahů PID regulátorů pro systém č. 2

### 4.3 Porovnání výsledků regulace na systému č. 3

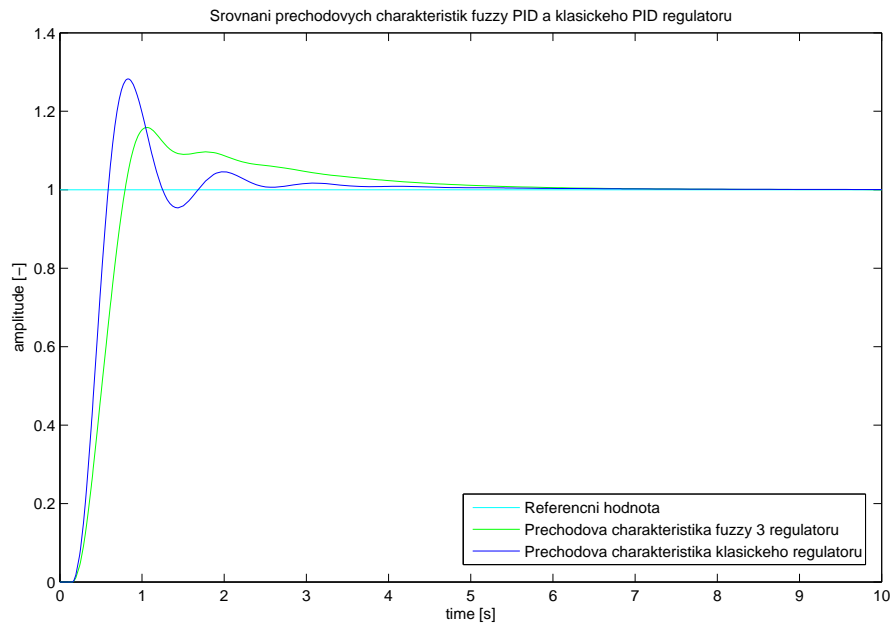
Vzhledem k výsledkům regulace obou předchozích systémů jsem pro tento systém navrhl pouze klasický regulátor typu PID navržený frekvenčními metodami pro fázovou bezpečnost  $75^\circ$  a fuzzy 3 regulátor. Povrch fuzzy 3 regulátoru je na obr. 4.15.

Přechodová charakteristika pro systém se zpožděním 0,15 s je na obr. 4.16 a pro systém se zpožděním 0,2 s je na obr. 4.18. Akční zásahy jsou na obr. 4.17 a obr. 4.19. Na soustavě s dopravním zpožděním o velikosti 0,15 s má fuzzy 3 regulátor menší překmit, ale delší dobu náběhu. Na soustavě se zpožděním o velikosti 0,2 s má fuzzy 3 regulátor menší překmit i dobu náběhu. Akční zásah má fuzzy 3 regulátor v obou případech menší.

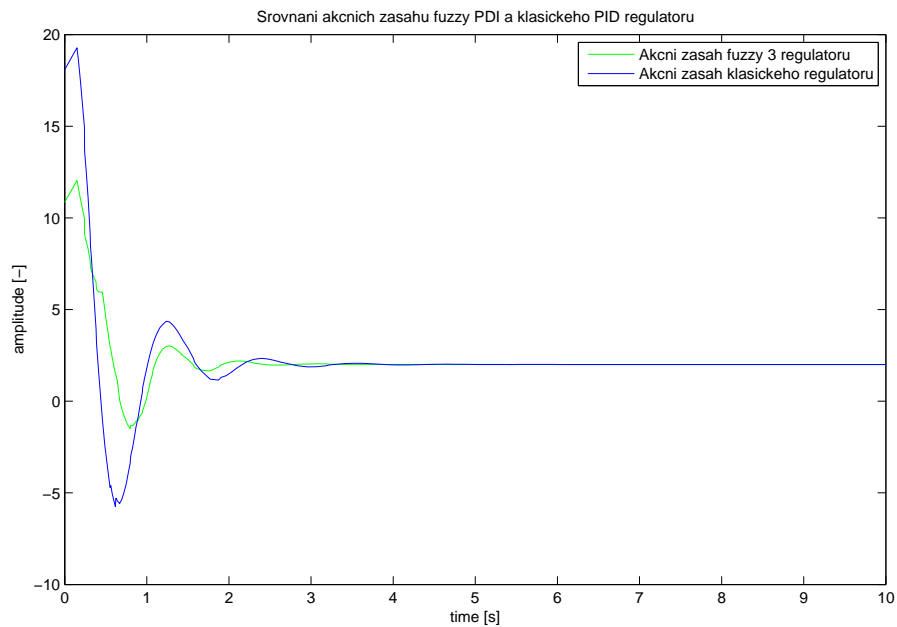
Pro systémy s dopravním zpožděním má lepší výsledky fuzzy regulátor, protože je méně ovlivněn dopravním zpožděním než klasický regulátor, což se projeví především při delším dopravním zpoždění.



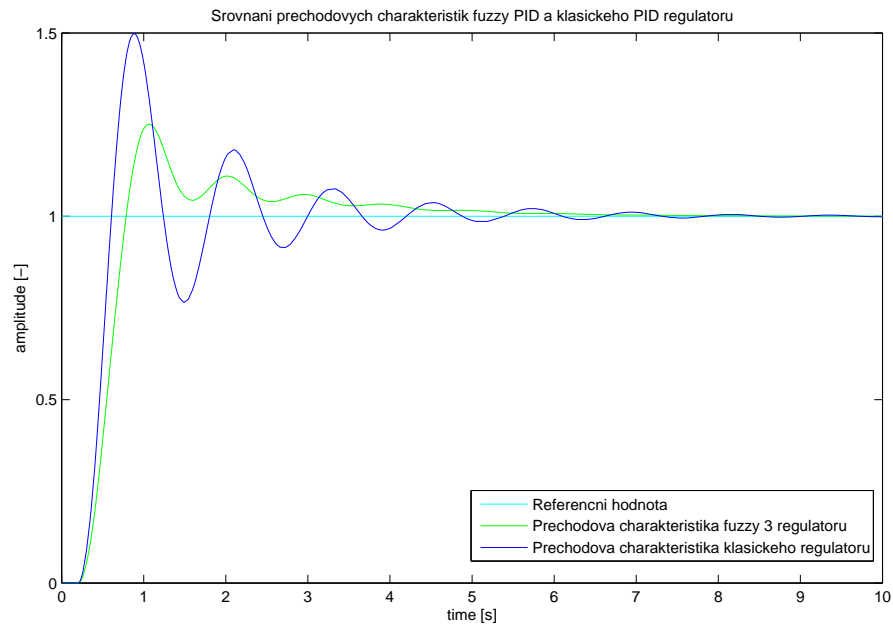
Obrázek 4.15: Povrch fuzzy regulátoru se třemi proměnnými pro vstupní hodnoty



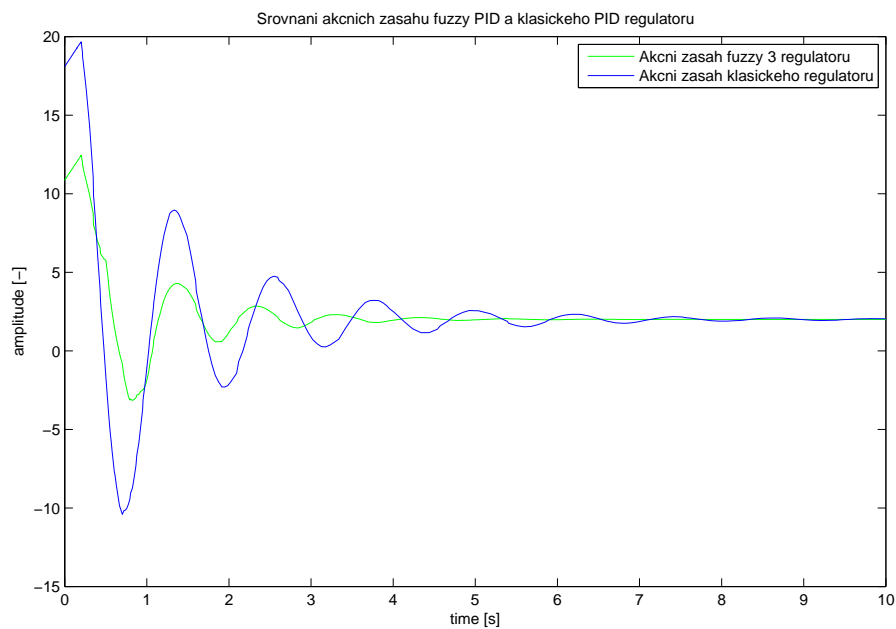
Obrázek 4.16: Srovnání přechodových charakteristik PID regulátorů pro systém č. 3 se zpožděním 0,15 s



Obrázek 4.17: Srovnání akčních zásahů PID regulátorů pro systém č. 3 se zpožděním 0,15 s



Obrázek 4.18: Srovnání přechodových charakteristik PID regulátorů pro systém č. 3 se zpožděním 0,2 s



Obrázek 4.19: Srovnání akčních zásahů PID regulátorů pro systém č. 3 se zpožděním 0,2 s

## 4.4 Porovnání výsledků regulace na systému č. 4

Pro tento nelineární systém jsem navrhl klasický regulátor typu PID pomocí frekvenčních metod na fázovou bezpečnost  $60^\circ$ . Klasický regulátor je potřeba navrhovat pro systém linearizovaný v určitém pracovním bodě. V blízkém okolí tohoto pracovního bodu by měl klasický regulátor fungovat normálně, ale pro vzdálenější pracovní body by měl mít horší vlastnosti. Proto jsem tento systém linearizoval v pracovním bodě:

$$\begin{aligned}x_1 &= -0,25 \\x_2 &= -0,5 \\x_3 &= -1 \\u &= -0,5\end{aligned}\tag{4.4}$$

pro který jsem navrhl klasický regulátor. Dále budu výsledky regulace porovnávat ve vzdálenějším pracovním bodě:

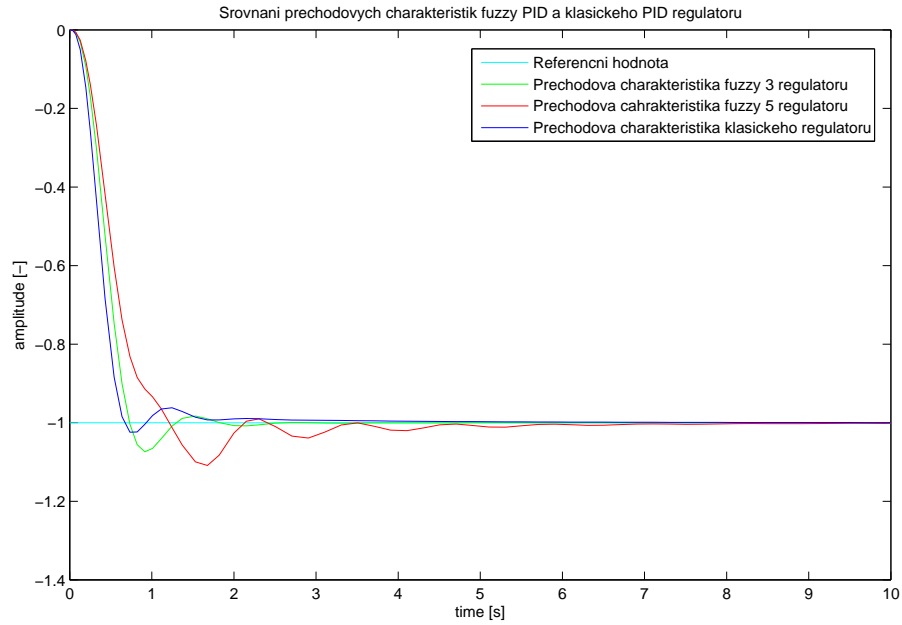
$$\begin{aligned}x_1 &= -1,25 \\x_2 &= -2,5 \\x_3 &= -5 \\u &= -7,5\end{aligned}\tag{4.5}$$

K němu jsem navrhl fuzzy 3 a fuzzy 5 regulátor. Povrch fuzzy 3 regulátoru je na obr. 4.9, povrch fuzzy 5 regulátoru je na obr. 4.10.

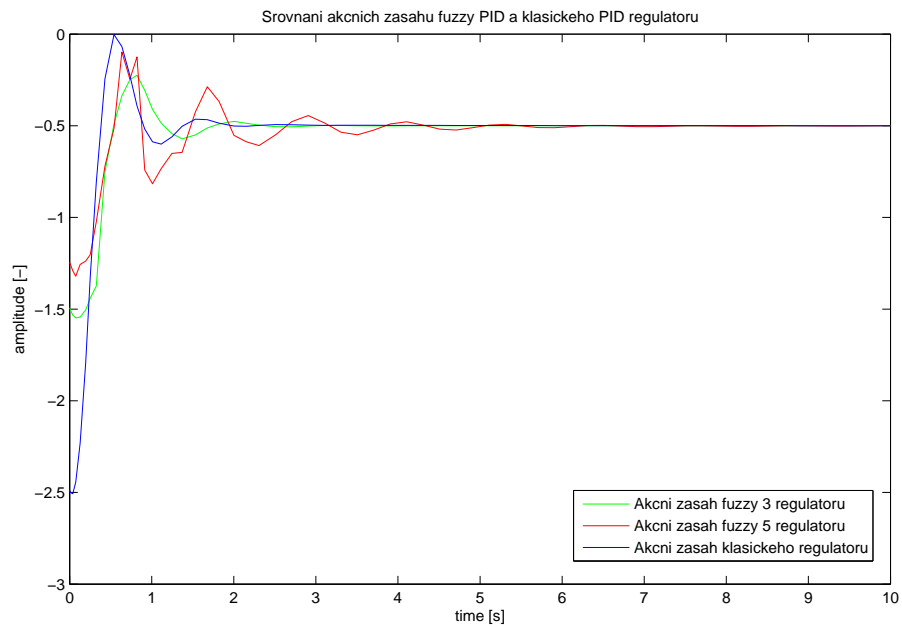
Přechodová charakteristika pro pracovní bod (4.4) je na obr. 4.20 a pro bod (4.5) obr. 4.22. Srovnání akčních zásahů pro pracovní bod (4.4) je na obr. 4.21 a pro bod (4.5) je na obr. 4.23. V okolí pracovního bodu (4.4) má nejlepší výsledky regulace klasický regulátor, který má nejmenší překmit a dobu ustálení srovnatelnou s fuzzy 3 regulátorem. Nejhorší regulátor vychází fuzzy 5 regulátor, který má největší překmit a nejdélší dobu ustálení. V okolí pracovního bodu (4.5) má nejlepší výsledky fuzzy 5 regulátor, který má nejkratší dobu náběhu. Nejhorší výsledky má klasický regulátor, který má dobu náběhu nejdélší. Všechny regulátory jsou v pracovním bodě (4.5) bez překmitu. V obou případech má fuzzy 5 regulátor nejmenší akční zásah a klasický regulátor má akční zásah největší.

Porovnáním výsledků regulace klasického s fuzzy regulátory vychází pro okolí pracovního bodu (4.4) jako nejlepší klasický regulátor. Pro vzdálenější pracovní bod (4.5) je podle předpokladů lepší fuzzy 5 regulátor, který nelinearita systému ovlivnila nejméně.

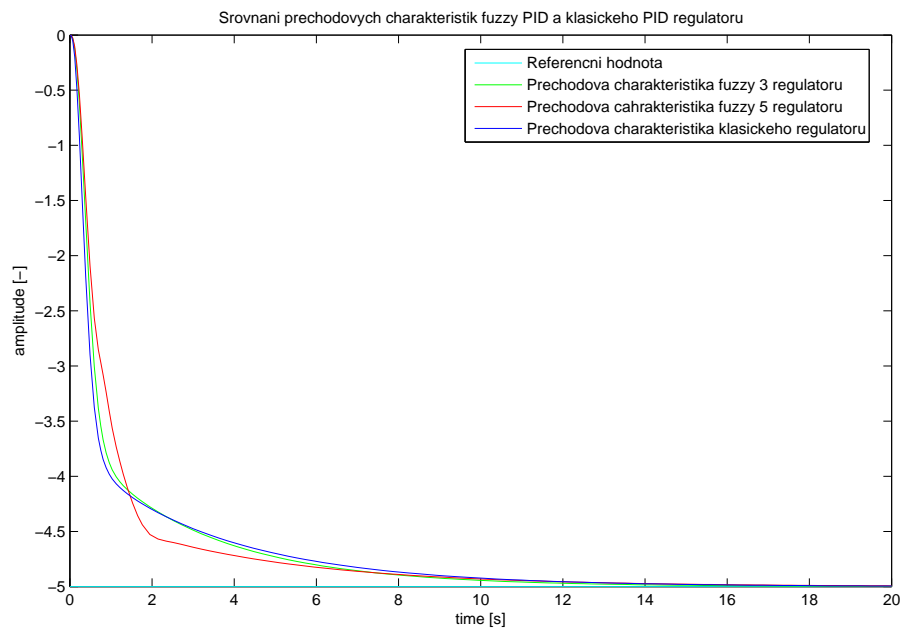




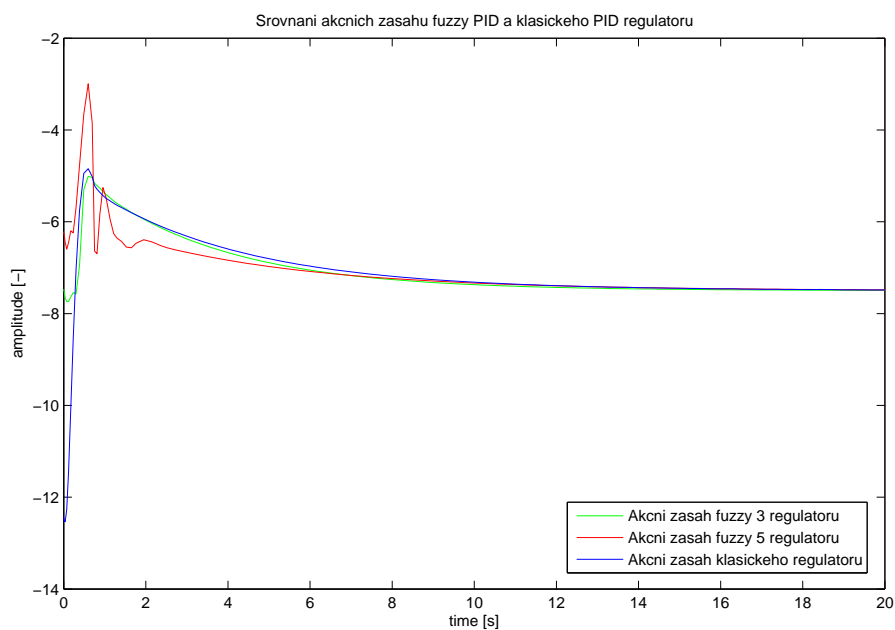
Obrázek 4.20: Srovnání přechodových charakteristik PID regulátorů pro systém č. 4 v pracovním bodě (4.4)



Obrázek 4.21: Srovnání akčních zásahů PID regulátorů pro systém č. 4 v pracovním bodě (4.4)



Obrázek 4.22: Srovnání přechodových charakteristik PID regulátorů pro systém č. 4 v pracovním bodě (4.5)



Obrázek 4.23: Srovnání akčních zásahů PID regulátorů pro systém č. 4 v pracovním bodě (4.5)

# Kapitola 5

## Závěr

Cílem této práce bylo vytvořit regulační schéma využívající fuzzy PID regulátory a na systémech s různým chováním porovnat výsledky regulace klasických a fuzzy PID regulátorů.

Ve většině případů jsou fuzzy regulátory lepší než klasické regulátory, hlavně na systémech s různým druhem nelinearity. Zejména nelineární fuzzy regulátory podávají lepší výsledky, protože jsou tyto regulátory schopny dávat rovnoměrný a větší akční zásah ze začátku regulace a menší akční zásah kolem nulové odchylky od referenční hodnoty než klasické regulátory, díky čemuž dříve zabrzdí. Lineární fuzzy regulátory mají stejné výsledky regulace jako klasické regulátory.

Když porovnáme v této práci navržené nelineární fuzzy regulátory mezi sebou podle počtu lingvistických proměnných, vycházejí nejlépe fuzzy regulátory se třemi lingvistickými proměnnými pro každou vstupní proměnnou. Je to nejspíše dáno tím, že tyto regulátory jsou jednodušší pro návrh než regulátory s více proměnnými, které se mi nepovedlo navrhnout přesně podle potřeby. Jinak by mělo platit, že fuzzy regulátory s více proměnnými dovedou lépe vytvarovat svůj povrch.

Pro potřeby této práce postačují nelineární fuzzy regulátory se třemi proměnnými, které mají lepší výsledky regulace než klasické regulátory.

# Literatura

- [1] J. Jantzen, "Design of Fuzzy Controllers" [online]. *Technical University of Denmark: Dept. of Automation*, Lyngby, 1998 [cit. 2.7.2008].  
Dostupné z WWW: <http://fuzzy.iaa.dtu.dk/download/design.pdf> .
- [2] J. Jantzen, "Tunning of Fuzzy PID Controllers" [online]. *Technical University of Denmark: Dept. of Automation*, Lyngby, 1998 [cit. 2.7.2008].  
Dostupné z WWW: <http://fuzzy.iaa.dtu.dk/download/fpid.pdf> .
- [3] J. Jantzen, "Tutorial on Fuzzy Logic" [online]. *Technical University of Denmark: Dept. of Automation*, Lyngby, 1998 [cit. 2.7.2008].  
Dostupné z WWW: <http://fuzzy.iaa.dtu.dk/download/logic.pdf> .
- [4] O. Modrlák, "Fuzzy řízení a regulace", *Studijní materiály*, Liberec, 2004.
- [5] M. Navara, P. Olšák, "Základy fuzzy množin", *Vydavatelství ČVUT*, Praha, 2002.
- [6] V. Novák, "Základy fuzzy modelování", *BEN - technická literatura*, Praha, 2000.
- [7] H. Ying, "Fuzzy Control and Modeling", *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, New York, 2000.
- [8] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets", *Information and Control*, 8, 338-353, 1965.

# Příloha A

## Obsah přiloženého CD

K této práci je přiloženo CD, na kterém jsou přiloženy všechny navržené fuzzy regulátory i s regulovanými systémy. Tyto regulátory jsou rozděleny do složek podle počtu lingvistických proměnných pro vstupní hodnoty.

- Regulátory - v tomto adresáři jsou uloženy všechny regulátory.
  - 2 - zde jsou uloženy fuzzy regulátory se dvěma proměnnými pro vstupní hodnoty.
    - soubory s příponou .fis - jednotlivé regulátory, které lze načíst pomocí fuzzy toolboxu v programu Matlab.
    - soubory s příponou .mdl - regulované soustavy rozdělené podle typů fuzzy regulátorů.
  - 3 - zde jsou uloženy fuzzy regulátory se třemi proměnnými pro vstupní hodnoty.
    - soubory s příponou .fis - jednotlivé regulátory, které lze načíst pomocí fuzzy toolboxu v programu Matlab.
    - fuzzy3.mdl - všechny soustavy regulované pomocí regulátorů tohoto typu.
  - 5 - zde jsou uloženy fuzzy regulátory s pěti proměnnými pro vstupní hodnoty.
    - soubory s příponou .fis - jednotlivé regulátory, které lze načíst pomocí fuzzy toolboxu v programu Matlab.
    - fuzzy5.mdl - všechny soustavy regulované pomocí regulátorů tohoto typu.
  - regulatory.mat - soubor s regulátory přímo pro workspace programu Matlab.