

Technická univerzita v Košiciach
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektrotechniky a mechatroniky

Fuzzy regulácia jednosmerného cudzo-budeného motora

Obsah

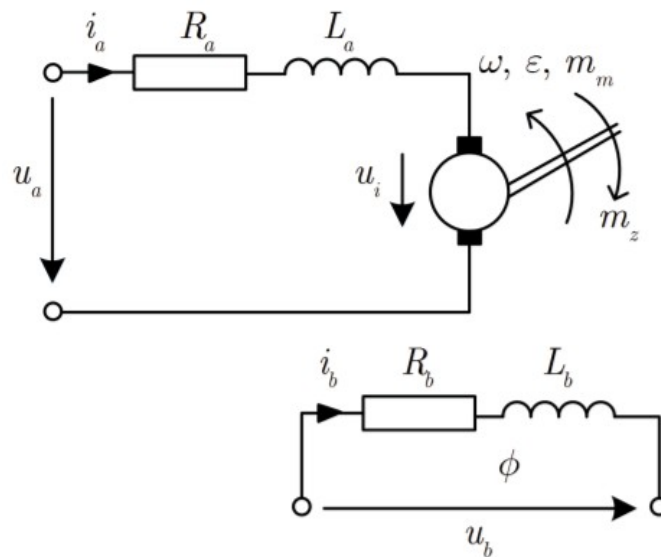
- Zadanie
- 1. Diferenciálne rovnice jednosmerného cudzo-budeného motora
 - 1.1 Parametre motora a fyzikálne jednotky
 - 1.2 Výpočty v programe MATLAB:
 - 1.3 Matematický model jednosmerného cudzo-budeného motora
 - 1.4 Priebehy fyzikálnych veličín
- 2. Návrh PI regulátora prúdu kotvy JCBM
- 3. Návrh PI regulátora rýchlosti JCBM
- 4. Relatívna chyba
- 5. Návrh FUZZY regulátora jednosmerného cudzo-budeného motora
 - 5.1 Základná štruktúra fuzzy regulátora typu PI
 - 5.2 Tvorba bázy pravidiel
 - 5.3 Ladenie pomocou mierok jednotlivých premenných
- 6. Zmena bázy pravidiel na 5x5
 - 6.1 Úzka nulová funkcia príslušnosti
 - 6.2 Široká nulová funkcia príslušnosti
- 7. ZÁVER
- Zdroje

Zadanie:

Navrhните fuzzy regulátor rýchlosti pre zadaný jednosmerný cudzo-budený motor. Parametre motora vyberte z katalógu firmy ABB. V zadaní opíšte návrh fuzzy regulátora i návrh PI regulátora zadaného motora. V závere porovnajte reguláciu dosiahnutú oboma druhmi regulátorov.

1. Diferenciálne rovnice jednosmerného cudzo-budeného motora

Schéma vnútorného zapojenia statora a rotora, je na obrázku (1). Pri písaní diferenciálnych rovníc vychádzame z daných schém. Rovnice si najprv napíšeme v diferenciálnom tvare a potom prevedieme pomocou Laplaceovej transformácie na požadovaný tvar.



Obr. 1 Schéma vnútorného zapojenia statora a rotora JCBM

Pred zostrojením modelu jednosmerného cudzo-budeného motora (JCBM) potrebujeme vypočítať magnetický tok.

Poznáme rovnice pre stator:

[1]

[2]

[3]

[4]

Taktiež poznáme rovnice pre rotor:

[5] , kde

[6]

Z toho platí, že magneticky tok je

[7]

Na zostrojenie nášho modelu JCBM potrebujeme štyri diferenciálne rovnice, ktoré sú zobrazené v Laplaceovej forme nasledovne:

1.

[8]

2.

[9]

3.

[10]

4.

[11]

1.1 Parametre motora a fyzikálne jednotky:

, , , ,
, , , ,
, , .

1.2 Výpočty v programe MATLAB:

Nominálna uhlová rýchlosť jednosmerného cudzo-budeného motora:

[1.12]

Magnetický tok:

[1.13]

Uhlová rýchlosť naprázdno:

Konštanty kotvy motora:

[12]

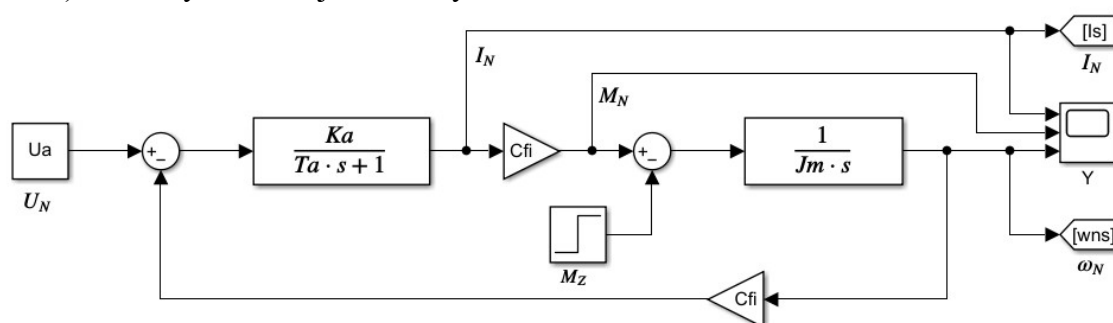
[13]

Zaťažný moment:

[16]

1.3 Matematický model jednosmerného cudzo-budeného motora

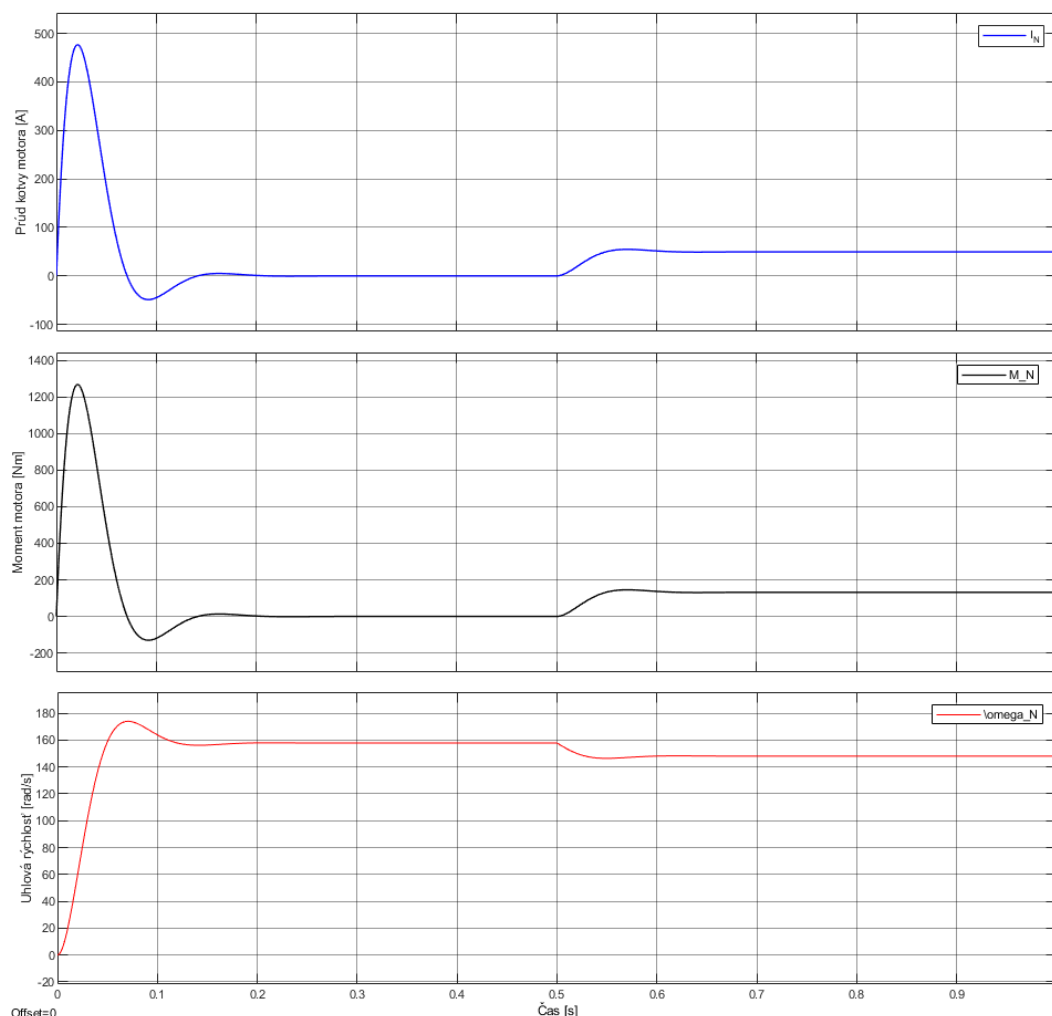
Na nasledujúcom obrázku je znázornená bloková schéma JCBM v programe Simulink s vyznačeným vstupom (nominálne napätie), výstupom (uhlová rýchlosť) a poruchy (zaťažný moment). Zaťažný moment je zaťažený v čase 0,5 s.



Obr. 2 Matematický model JCBM

1.4 Priebehy fyzikálnych veličín

Po pripojení nominálneho napätia na kotvu motora, prúd skokovo narastie na hodnotu viac ako 10 násobok prúdu nominálneho, preto potrebujeme navrhnuť regulátor prúdu.

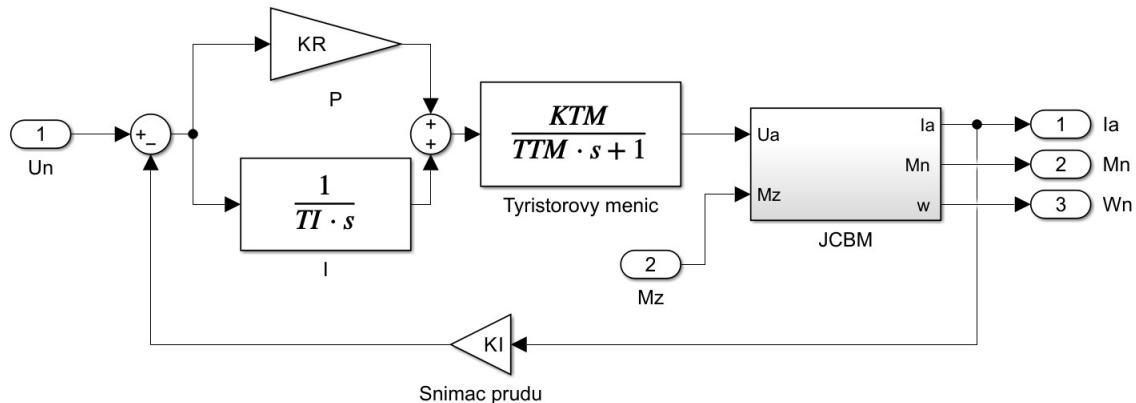


Obr. 3 Priebehy: nominálny prúd, moment a uhlová rýchlosť

Zotrvačné vlastnosti členov regulačného obvodu majú nepriaznivý vplyv na jeho rýchlosť a stabilitu. Riadenie elektrického pohonu vyžaduje použitie viacerých regulátorov, ktoré sú väčšinou radené do série v kaskádnom zapojení. Dôvodom je potreba urýchliť prechodný dej kompenzovaním väčších časových konštánt regulačného obvodu a tiež ohraničenie podradených veličín. Nadradený regulátor obsahuje ohraničenie.

2. Návrh PI regulátora prúdu kotvy JCBM

Regulácia prúdu jednosmerného motora zásadne ovplyvňuje dynamiku pohonu a v kotve zabezpečuje spoľahlivú činnosť komutátora. Návrh regulátora prúdu pozostáva z tyristorového meniča a snímača prúdu. Ako snímač prúdu môže byť použitý bočník alebo integrovaný obvod pracujúci na princípe Hallovho javu. je zosilnenie snímača prúdu, ktorý prevedie skutočnú hodnotu prúdu na hodnotu napätia, ktoré zodpovedá skutočnému prúdu. Na nasledujúcom obrázku je zobrazená bloková schéma PI regulátora rýchlosti.



Obr. 4 Bloková schéma PI regulátora prúdu

Podľa analýzy prúdového obvodu vieme, že celkové zosilnenie je , a v obvode je časová konštanta tyristorového meniča a časová konštanta kotvy motora .

Predpokladom je, že zmena indukovaného napätia je oveľa pomalšia ako zmena prúdu, preto indukované napätie pri návrhu regulátora zanedbáme.

Regulátor prúdu kotvy bude typu PI, kde P je proporcionálna zložka, ktorá obsahuje zosilnenie a I je integračná zložka, ktorá obsahuje časovú konštantu . Regulátor prúdu navrhujeme pomocou metódy kritéria optimálneho modulu (KOM). Pravidlá tohto kritéria sa odvodia z podmienky, že amplitúdová frekvenčná charakteristika má klesajúcu charakteristiku s rastúcou frekvenciou. Pre systém 2. radu so zosilnením K a dvoma rozdielnymi časovými konštantami T_1 a T_2 , kde platí:

1. Kompenzujeme väčšiu časovú konštantu: [17]

2. Zosilnenie regulátora vypočítame podľa vzťahu [18]

3. Integračná časová konštanta je: [19]

Určíme, ktorá z dvoch časových konštánt je väčšia a tú kompenzujeme. V pohonoch zvyčajne platí, že časová konštanta tyristorového meniča je menšia ako časová konštanta kotvy motora . Návrh vyzerá nasledovne:

$$[20] \quad , \text{ kde } .$$

Zosilnenie snímača prúdu navrhujeme ako:

Nech rozsah riadiaceho napätia je ± 10 V a max. prúd je 1,5 násobok nominálneho prúdu.

Zosilnenie snímača prúdu vypočítame ako: [21]

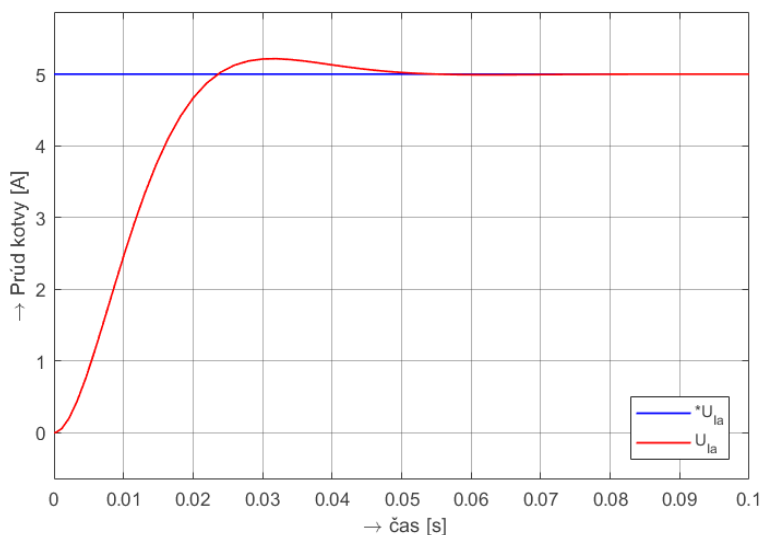
Zosilnenie regulátora vypočítame podľa vzťahu:

[22]

[23]

[24]

Návrh PI regulátora podľa KOM nám zabezpečí to, že prekmit výstupnej hodnoty prúdu bude menší ako 5% a doba ustálenia bude rovná cca 9-násobku menšej časovej konštanty. Na obrázku nižšie vidno odozvu prúdu kotvy na skokovú zmenu riadiaceho napätia prúdového regulátora, kde želaná hodnota i^* V. Doba ustálenia je približne 45 ms a prekmit menší ako 5%.



Obr. 5 Odozva prúdu kotvy

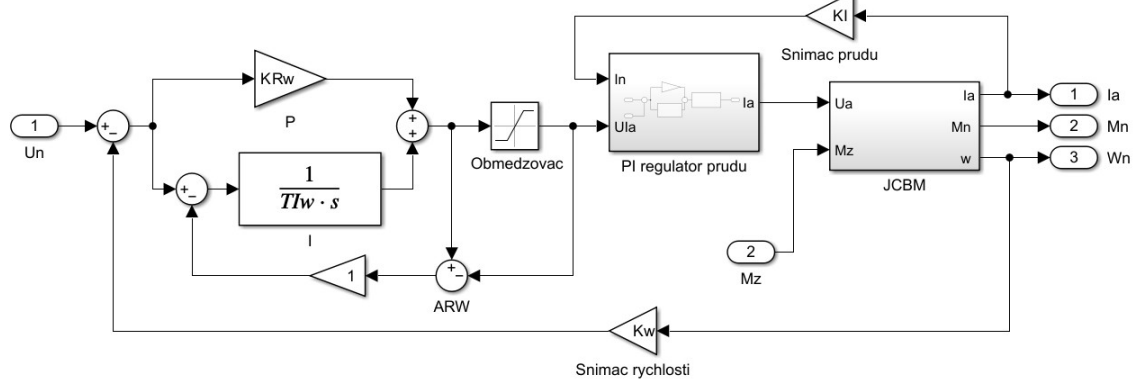
Pri tomto návrhu sme zanedbali pôsobenie indukovaného napätia na prúdový obvod. Pri otáčajúcom sa motore bude vždy pôsobiť indukované napätie a regulačný obvod prúdu vykáže regulačnú odchýlku. Preto je tento návrh korektný len pre neotáčajúci sa, resp. zabrzdený motor.

3. Návrh PI regulátora rýchlosti JCBM

V kaskádnej, dnes najrozšírenejšej štruktúrálnej schéme, je prúdový obvod podradený regulátoru rýchlosti. Maximálna hodnota ustáleného prúdu sa nastaví pomocou člena ohraničenia (obmedzovača) na výstupe regulátora rýchlosti. Obmedzovač je nelineárny člen čiže po zarazení obmedzovača sa sústava stala nelineárnou. Náš obmedzovač je nastavený od -10 V do +10 V.

Ako snímač otáčok môže byť použité napr. tachodynamo alebo inkrementálny snímač. je zosilnenie snímača uhlovej rýchlosti, ktorý skutočnú hodnotu rýchlosti ω prevedie na hodnotu napätia, ktoré zodpovedá skutočnej rýchlosti .

Na nasledujúcom obrázku je zobrazená bloková schéma PI regulátora rýchlosti.



Obr. 6 Bloková schéma PI regulátora rýchlosti

Pri modelovaní snímača rýchlosti zanedbávame oneskorenie spôsobené vzorkovaním aj kvantovaním. Do PI regulátora vchádza regulačná odchýlka a výstupom regulátora rýchlosti je želaná hodnota prúdu. Nakoľko rýchlosť sme previedli na napätie, aj želaná hodnota rýchlosti je prevedená na napätie $\dot{\omega}$. Na obvod pôsobí porucha, ktorou je záťažný moment M_z . Cieľom je určiť koeficienty PI regulátora rýchlosti K_{Rw} a $\frac{1}{T_{tw} \cdot s}$. Analýzou obvodu podľa blokovej schémy uvedenej vyššie zistíme, že celkové zosilnenie je:

$$[29]$$

V obvode je časová konštanta meniča τ a konštanta zotrvačnosti J , ktorú môžeme uvažovať buď ako zosilnenie, alebo ako časovú konstantu. Regulátor rýchlosti bude teda typu PI a navrhne ho podľa kritéria symetrického optima (KSO). Pre astatický systém 2. radu so zosilnením K a dvomi rozdielnymi časovými konštantami τ a T , kde $\tau \ll T$ platí:

$$1. \text{ Kompenzujeme 4-násobok menšej časovej konštanty:} \quad [30]$$

$$2. \text{ Zosilnenie regulátora vypočítame podľa vzťahu} \quad [31]$$

$$3. \text{ Integrovaná časová konštanta je:} \quad [32]$$

Určíme, ktorá z dvoch časových konštánt je väčšia a tú kompenzujeme.

Zvyčajne platí, že časová konštanta zotrvačnosti je väčšia ako meniča τ , ale vždy je potrebné to overiť. Návrh vyzerá nasledovne:

$$[33] \quad \text{, kde } \dots$$

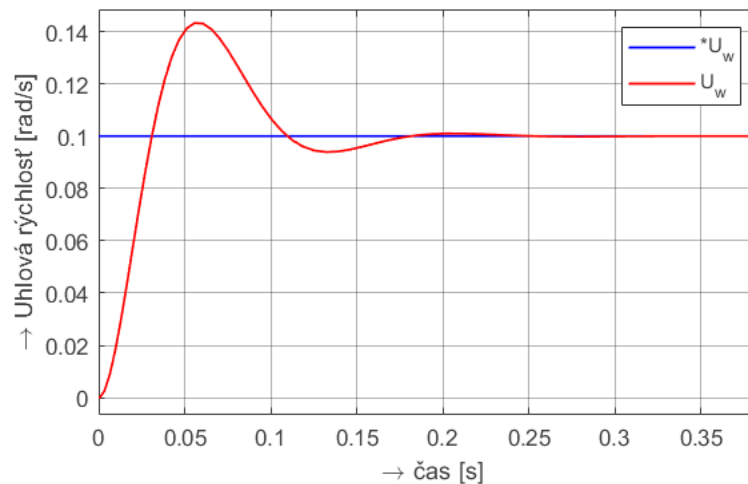
Zosilnenie snímača otáčok navrhne ako:

Nech rozsah riadiaceho napätia je ± 10 V a max. rýchlosť je 1,2 násobok nominálnej rýchlosti. Čo znamená, že plánujeme aj prevádzku pohonu v odbudení. Ak by pohon nepracoval v odbudení, potom postačuje \dots .

$$\text{Zosilnenie snímača otáčok vypočítame ako:} \quad [34]$$

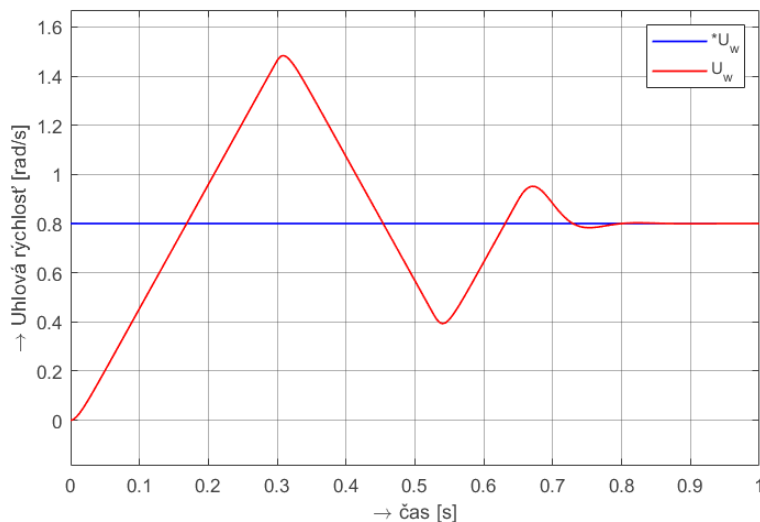
$$\text{Zosilnenie regulátora vypočítame podľa vzťahu:} \quad [35]$$

Návrh PI regulátora podľa KSO nám zabezpečí to, že prekmit výstupnej hodnoty prúdu bude menší ako 43% a doba ustálenia bude rovná cca 16,5-násobku menšej časovej konštanty. V našom prípade je doba ustálenia . Na obrázku nižšie vidíme odozvu rýchlosti na skokovú zmenu vstupu, kde i , pretože je približne 100, čiže je v lineárnej oblasti, kde obmedzovač neúčinkuje t.j. podľa blokovej schémy na obr. 3.1.



Obr. 7 Odozva uhlovej rýchlosti v lineárnej oblasti

Nevýhodnou vlastnosťou kaskádnej štruktúry je ovplyvnenie prechodného deja nelineárnym členom ohraničenia, preto treba zaviesť buď ohraničenie hodnoty integrálu nadradeného regulátora, alebo ARW zapojenie. Na obrázku nižšie vidno odozvu rýchlosti na skokovú zmenu vstupu i v nelineárnej oblasti, kde účinkuje obmedzovač bez ARW zapojenia.



Obr. 8 Odozva uhlovej rýchlosti v nelineárnej oblasti

Takýto priebeh rýchlostí je spôsobený obmedzením maximálneho prúdu regulátora. Pri skokovej zmene i na vysokú hodnotu by sa motor rozbíhal vysokým prúdom. Tento jav potrebujeme odstrániť a do obvodu doplníme tzv. ARW (Anti Reset Windup) zapojenie, ktoré zabráni pretečeniu integrátora pri nasýtení.

4. Relatívna chyba

Pre výpočet a overenie relatívnej chyby použijeme nasledujúce vzorce:

-pre uhlovú rýchlosť naprázdno

$\dot{\varphi}$

-pre nominálny prúd na kotve motora

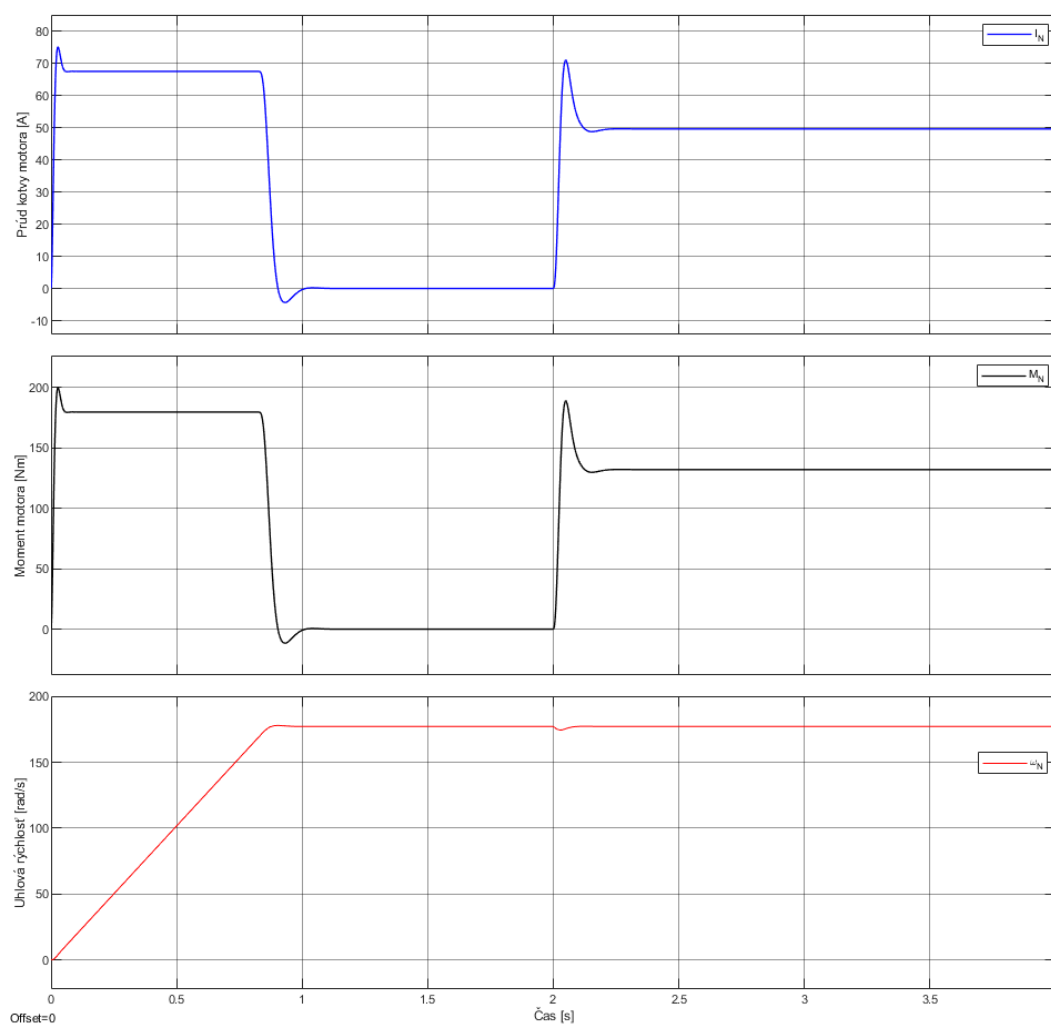
-pre nominálnu uhlovú rýchlosť

$\dot{\varphi}_N$

Tab. 1 Relatívna chyba

	Nominálna	Odsimulovaná	Relatívna chyba
	159,2	157,9	0,8
	52	49,61	4,6
	157,9	147,65	6,6

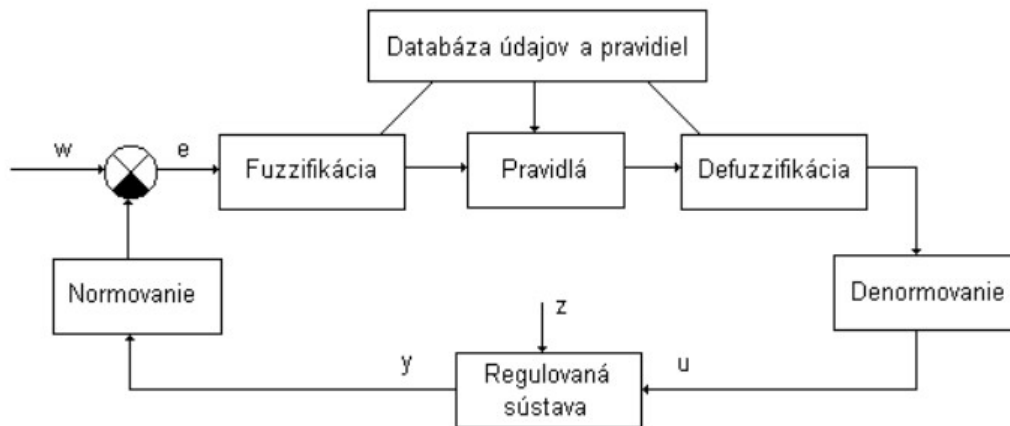
Na nasledujúcom obrázku sú zobrazené priebehy nominálneho prúdu, záťaži a uhlovej rýchlosti po vyregulovaní PI regulátormi s ARW zapojením a obmedzovača prúdu.



Obr. 9 Regulácia rýchlosti a prúdu pomocou PI regulátorov

5. Návrh FUZZY regulátora jednosmerného cudzo-budeného motora

Fuzzy (z pojmu vágny, nejasný) sa používa na riešenie nelineárnych systémov, zložitých systémov, kde je riešenie nekonečne veľa. Hoci fuzzy logika bola pôvodne určená skôr pre riadiace aplikácie v humanistických disciplínach, kde nevieme z princípu popísať objekty iným spôsobom ako pomocou ľudskej reči, jej najznámejšie aplikácie sú dodnes v oblasti priemyselného riadenia. Základná štruktúra fuzzy regulátora je uvedená nižšie na obrázku. Jeho vstupom je regulačná odchýlka e , výstupom akčná veličina u a jeho jadro, ako u každého fuzzy systému, pozostáva z troch základných blokov fuzzyfikácie, pravidiel a defuzzyfikácie.



Obr. 10 Základná štruktúra fuzzy regulátora

Ku týmto blokom sa obvykle dopĺňajú bloky pre normovanie a denormovanie meraných a akčných veličín, ktoré sa nimi transformujú obvykle do rozsahu $\langle -1, 1 \rangle$. Jadrom fuzzy regulátora je databáza údajov a pravidiel, ktorá definuje zároveň použitý odvodzovací mechanizmus. Táto databáza obsahuje ďalej funkcie príslušnosti všetkých vstupných a výstupných veličín, tvar použitých pravidiel (u Mamdaniho typu je to tvar AK stav procesu POTOM akčný zásah, pričom jednotlivé pravidlá sú zviazané reláciou ALEBO) a spôsob, akým sa stanovuje výstupná fuzzy množina a z nej ostrý akčný zásah.

Predpokladajme, že pre regulátor sú definované nasledujúce premenné:

- regulačná odchýlka $e = w - y$
- derivácia regulačnej odchýlky de/dt alebo $\Delta e_k = e_k - e_{k-1}$
- derivácia akčnej veličiny du/dt , alebo $\Delta u_k = u_k - u_{k-1}$

Všeobecne je regulátor popísaný rovnicou:

$$u_k = F \{ e_k, e_{k-1}, \dots, u_{k-1}, u_{k-2}, \dots \}$$

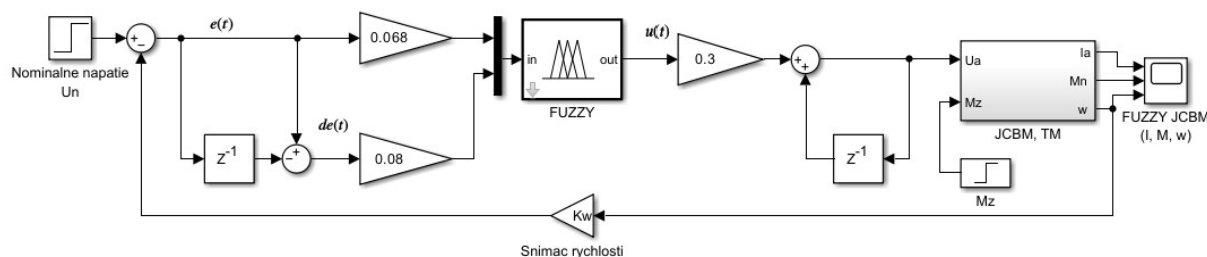
Použijeme regulátor typu PI pre fuzzy systém, kde aproximujeme vzťah:

$$\Delta u_k = K_p \Delta e_k + K_i e_k$$

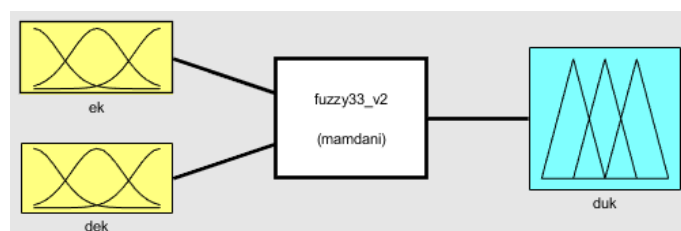
a používame pravidlá typu **AK** e_k je ... **A** Δe_k je ... **POTOM** Δu_k je ...

5.1 Základná štruktúra fuzzy regulátora typu PI

Pri návrhu budeme vychádzať zo základnej štruktúry pre fuzzy regulátor. Bloková schéma PI fuzzy regulátora bude potom vyzeráť nasledovne:



Obr. 11 Bloková schéma PI regulácie pomocou FUZZY



Obr. 12 Štruktúra FUZZY systému

5.2 Tvorba bázy pravidiel

Prax ukazuje, že žiadané chovanie sa regulátora môžeme popísať vo všeobecnosti tromi meta pravidlami:

- **MP1** Ak regulačná odchýlka $e(k)$ a jej zmena $\Delta e(k)$ sú nulové alebo blízke nule, netreba meniť akčný zásah, t.j. $\Delta u(k)$ má byť nulové alebo blízke nule.
- **MP2** Ak regulačná odchýlka $e(k)$ klesá k nule alebo sa k nej blíži s dostatočnou rýchlosťou, netreba meniť akčný zásah, t.j. $\Delta u(k)$ má byť nulové alebo blízke nule.
- **MP3** Ak sa regulačná odchýlka $e(k)$ nekoriguje sama, je treba zmeniť akčný zásah, t.j. $\Delta u(k)$ má byť nenulové. Jeho veľkosť a znamienko závisí na veľkosti a znamienku $e(k)$ a $\Delta e(k)$.

Často sa pravidlá zapisujú vo forme tabuľky:

		Δe	Z	N	K
e	$\{Z, N, K\}$	Z	Z	Z	N
Δe	$\{Z, N, K\}$	N	Z	N	K
Δu	$\{Z, N, K\}$	K	N	K	K

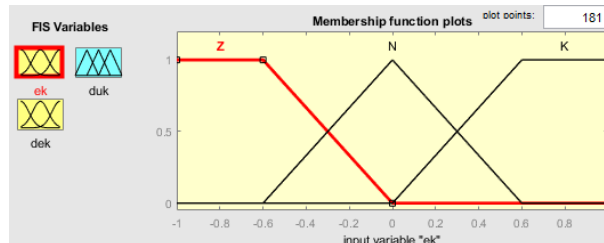
Tab. 2 Pravidlá fuzzy systému 3x3

Počet pravidiel sa rovná druhej mocnine počtu funkcií príslušností. Zvykne platiť, že čím viac funkcií príslušností, tak tým regulátor lepšie funguje. Zvolíme fuzzy s tromi funkciami príslušností, čo znamená, že budeme mať 9 pravidiel (). Chovanie regulátora popíšme 9 pravidlami v tvare:

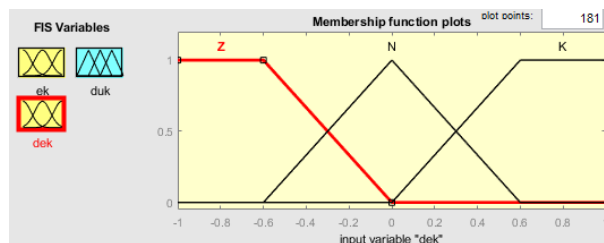
- | | | | | | | |
|----|-----------|--------|---|-----------------|--------------|-----------------|
| 1. | AK | e je K | A | Δ e je Z | POTOM | Δ u je K |
| 2. | AK | e je N | A | Δ e je N | POTOM | Δ u je N |
| 3. | AK | e je Z | A | Δ e je K | POTOM | Δ u je Z |
| 4. | AK | e je Z | A | Δ e je Z | POTOM | Δ u je N |
| 5. | AK | e je N | A | Δ e je Z | POTOM | Δ u je K |
| 6. | AK | e je Z | A | Δ e je N | POTOM | Δ u je Z |

7. **AK** e je K **A** Δe je N **POTOM** Δu je K
8. **AK** e je K **A** Δe je K **POTOM** Δu je N
9. **AK** e je N **A** Δe je K **POTOM** Δu je Z

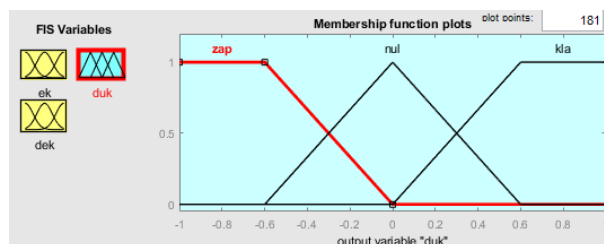
Funkcie musia mať vhodný tvar. Funkcie na kraji sú lichobežníkového tvaru a stredne sú trojuholníkového tvaru. Na nasledujúcich obrázkoch si môžeme všimnúť tvary funkcií príslušnosti pre vstup fuzzy systému $e(k)$, $\Delta e(k)$ a pre výstup fuzzy systému $\Delta u(k)$:



Obr. 13 Tvar funkcie príslušností $e(k)$

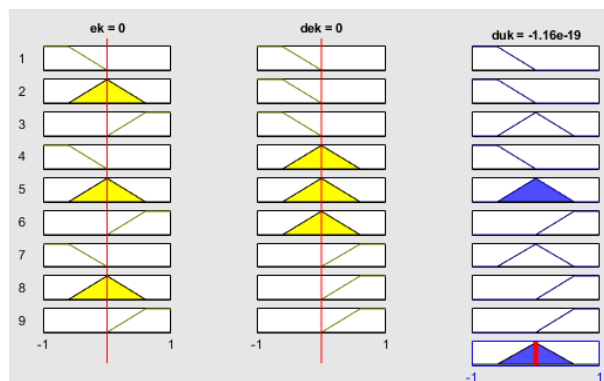


Obr. 14 Tvar funkcie príslušností $\Delta e(k)$



Obr. 15 Tvar funkcie príslušností $\Delta u(k)$

Intervaly jednotlivých funkcií sú volené, tak aby bolo pokryté celé univerzum a zároveň aby sa prekrývali. Táto štruktúra fuzzy regulátora jednosmerného pohonu je zobrazená nižšie na obrázku

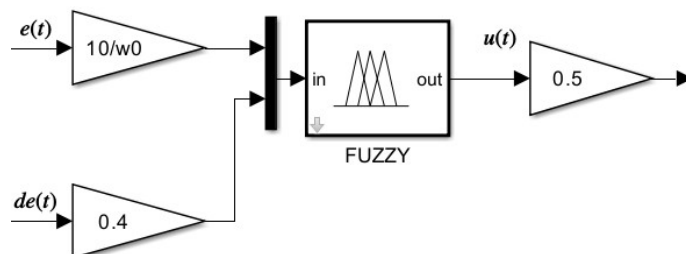


Obr. 16 Štruktúra fuzzy regulátora jednosmerného pohonu

Pomocou funkcií príslušností a logických operácií medzi nimi vieme teda formalizovať informáciu, ktorá je vyjadrená nepresnými (fuzzy) pojmami.

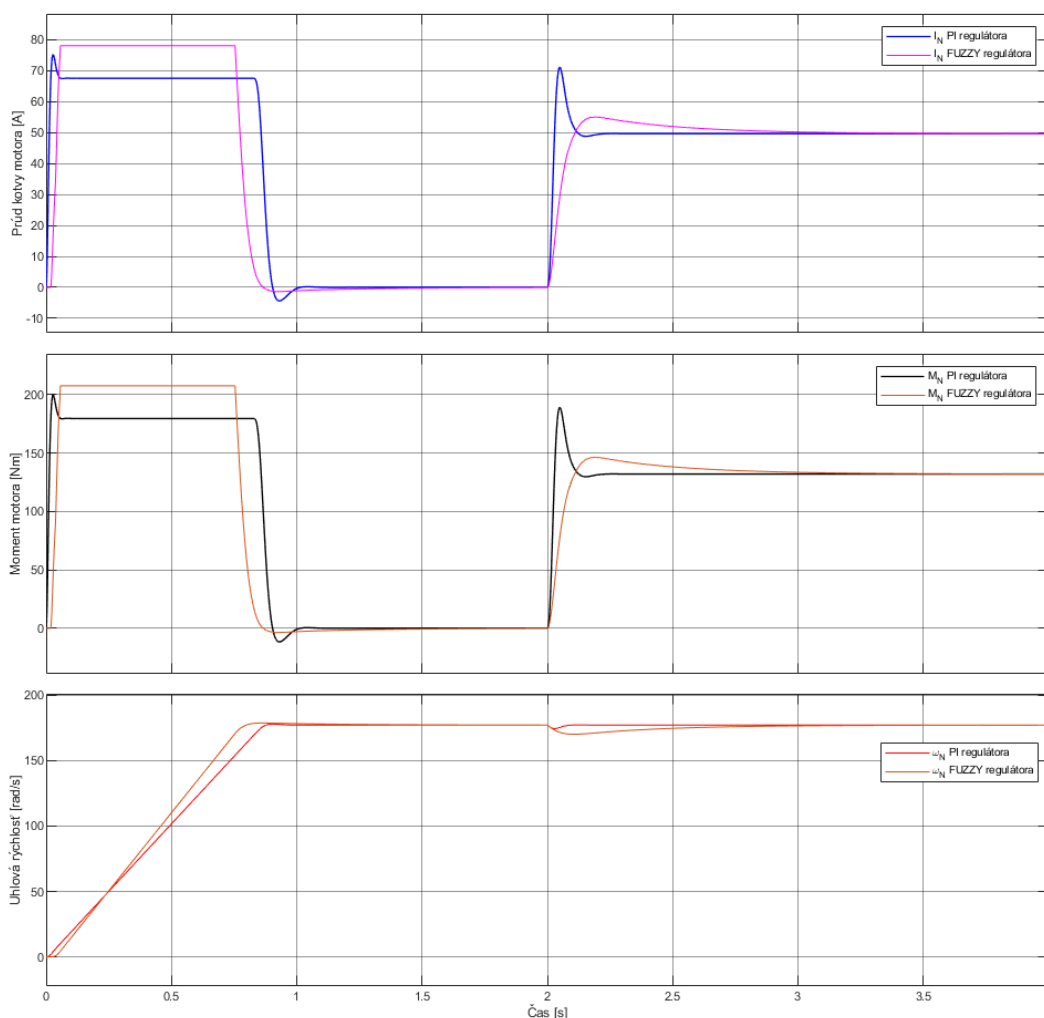
5.3 Ladenie pomocou mierok jednotlivých premenných

Na dynamiku regulácie má vplyv veľmi veľa faktorov (tvar funkcií príslušnosti, spôsob defuzzyfikácie a pod.), preto je nastavovanie fuzzy regulátora často obtiažne. Veľmi účinná je metóda ladenia pomocou mierok jednotlivých premenných (Tuning via scaling universes), pri ktorej hľadáme iba mierky (zosilnenia) jednotlivých vstupov a výstupov.



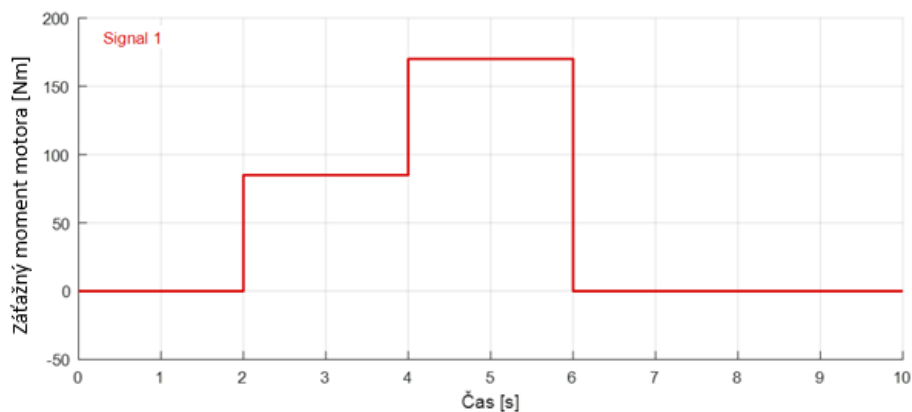
Obr. 17 Detail kde je zobrazené ladenie fuzzy regulátora 3x3

Porovnanie fuzzy regulátora s referenčným PI regulátorom jednosmerného motora s cudzím budením, ktorý je zaťažný v čase 2s si môžeme všimnúť na nasledujúcom priebehu.



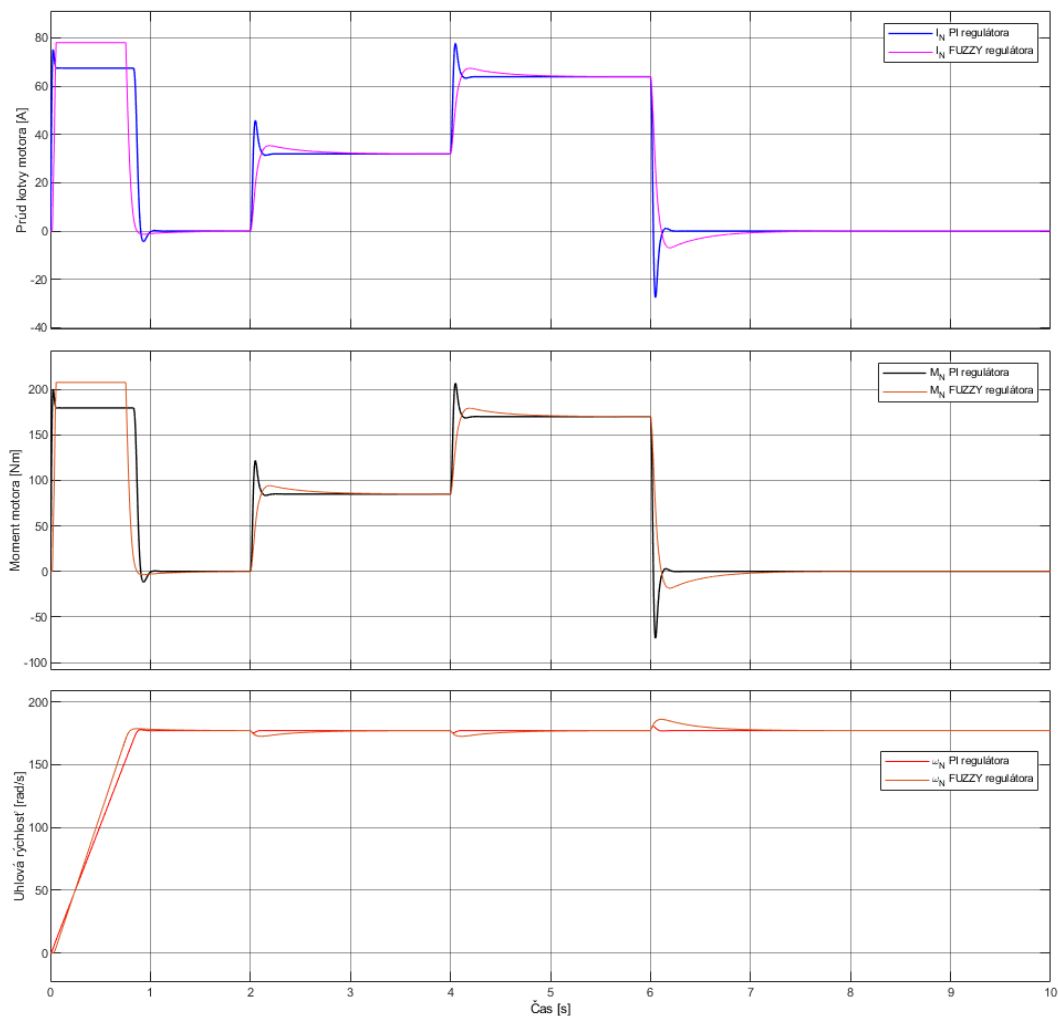
Obr. 18 Porovnanie fuzzy regulátora s referenčným PI regulátorom

Na ďalšom obrázku je zobrazená charakteristika postupného zaťažovania jednosmerného cudzo-budeného motora. Vidíme, že motor je zaťažovaný v čase 2s približne polovicou momentu nominálneho a v čase 4s zaťažovaný momentom, ktorý je rovný hodnote nominálneho momentu $M_z = M_n$. V čase 6s je motor úplne odľahčený na hodnotu $M_z = 0$ Nm.



Obr. 19 Postupne zaťažovanie a odľahčenie JCBM

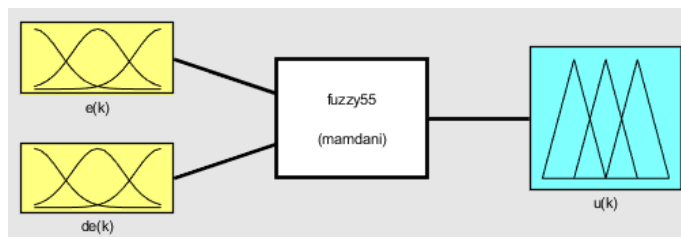
Na ďalšom obrázku sú zobrazené výstupné priebehy referenčného PI regulátora v porovnaní s fuzzy regulátorom.



Obr. 20 Porovnanie fuzzy regulátora s referenčným PI regulátorom pri postupnom zaťažovaní a odľahčení

6. Zmena bázy pravidiel na 5x5

Ďalšie overovacie simulácie majú zmenený fuzzy regulátor, ktorý má bázu pravidiel až 5x5 čo predstavuje 25 pravidiel.



Obr. 21 Štruktúra FUZZY systému

V nasledujúcej tabuľke sú zobrazené pravidla fuzzy systému.

$e(k) / \Delta e(k)$	VZ	MZ	N	MK	VK
VZ	VZ	VZ	VZ	MZ	N
MZ	VZ	VZ	MZ	N	MK
N	VZ	MZ	N	MK	VK
MK	MZ	N	MK	VK	VK
VK	N	MK	VK	VK	VK

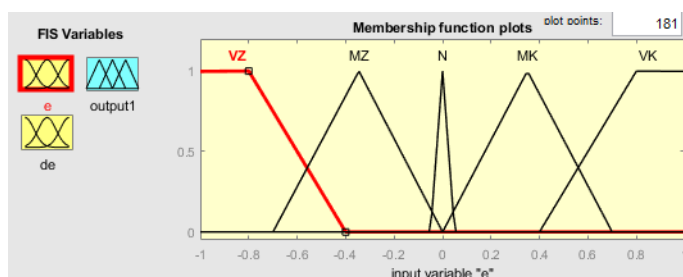
Tab. 3 Pravidlá fuzzy systému 5x5

Ďalej si odsimulujeme dve verzie, ktoré budú mať iný tvar nulovej funkcie príslušnosti. Predpokladom je rozdielna regulácia fuzzy systému.

6.1 Úzka nulová funkcia príslušnosti

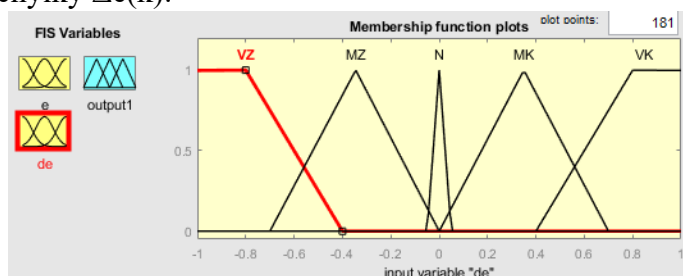
V nasledujúcich obrázkoch sú zobrazené vstupné priebehy odchýlky $e(k)$ a $\Delta e(k)$ fuzzy systému, ktoré majú úzky tvar nulovej funkcie príslušnosti od -0,05 do 0,05 čo predstavuje celkovú hodnotu rovnú 0,1 v univerze.

Vstupný priebeh odchýlky $e(k)$:



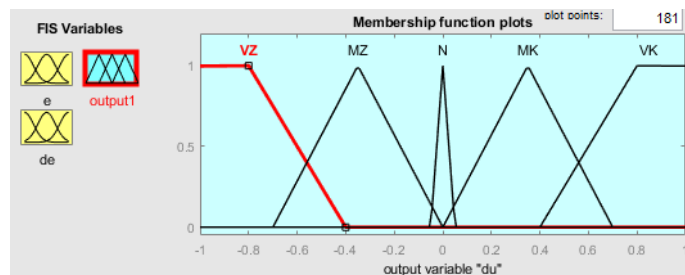
Obr. 22 Tvar funkcie príslušnosti $e(k)$ 5x5

Vstupný priebeh odchýlky $\Delta e(k)$:



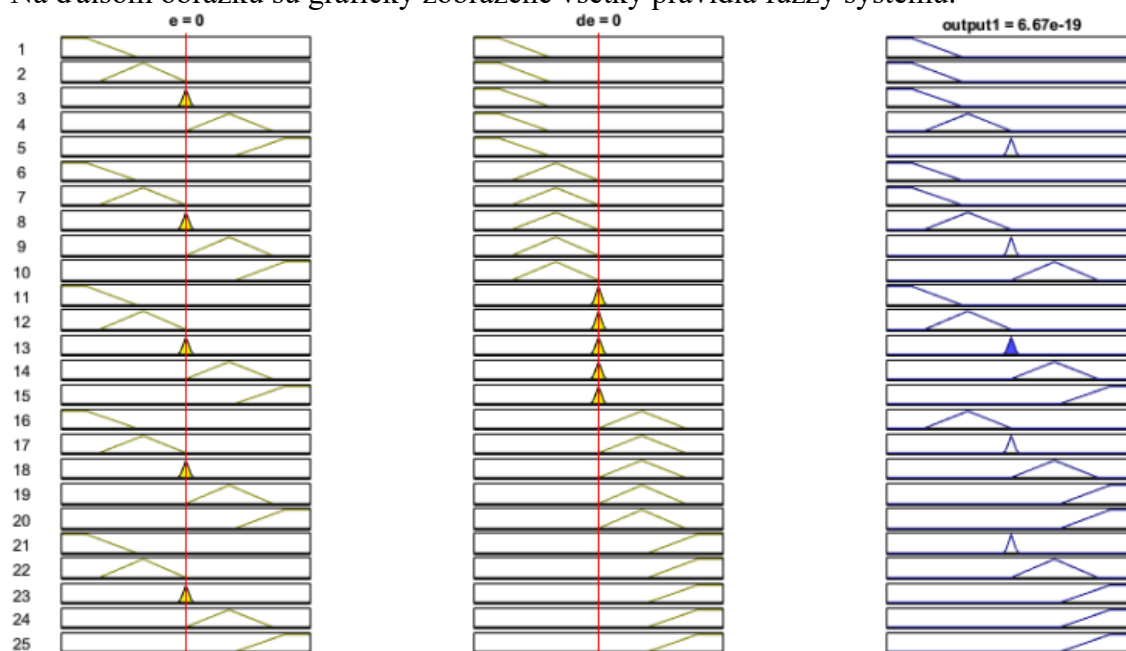
Obr. 23 Tvar funkcie príslušnosti $\Delta e(k)$ 5x5

Ďalej v nasledujúcom obrázku je zobrazený výstupný priebeh odchýlky $\Delta u(k)$ fuzzy systému, ktorý má tiež úzky tvar nulovej funkcie príslušnosti od -0,05 do 0,05.



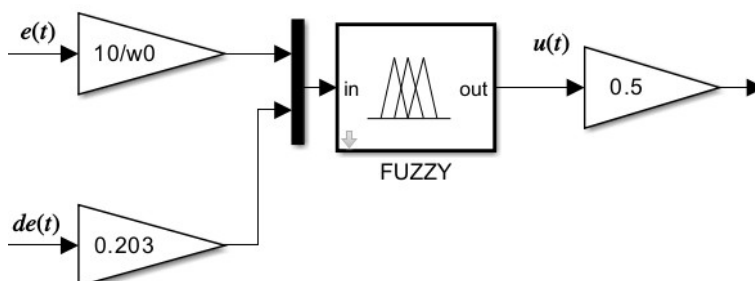
Obr. 24 Tvar funkcie príslušností $\Delta u(k)$ 5x5

Na ďalšom obrázku sú graficky zobrazené všetky pravidlá fuzzy systému.



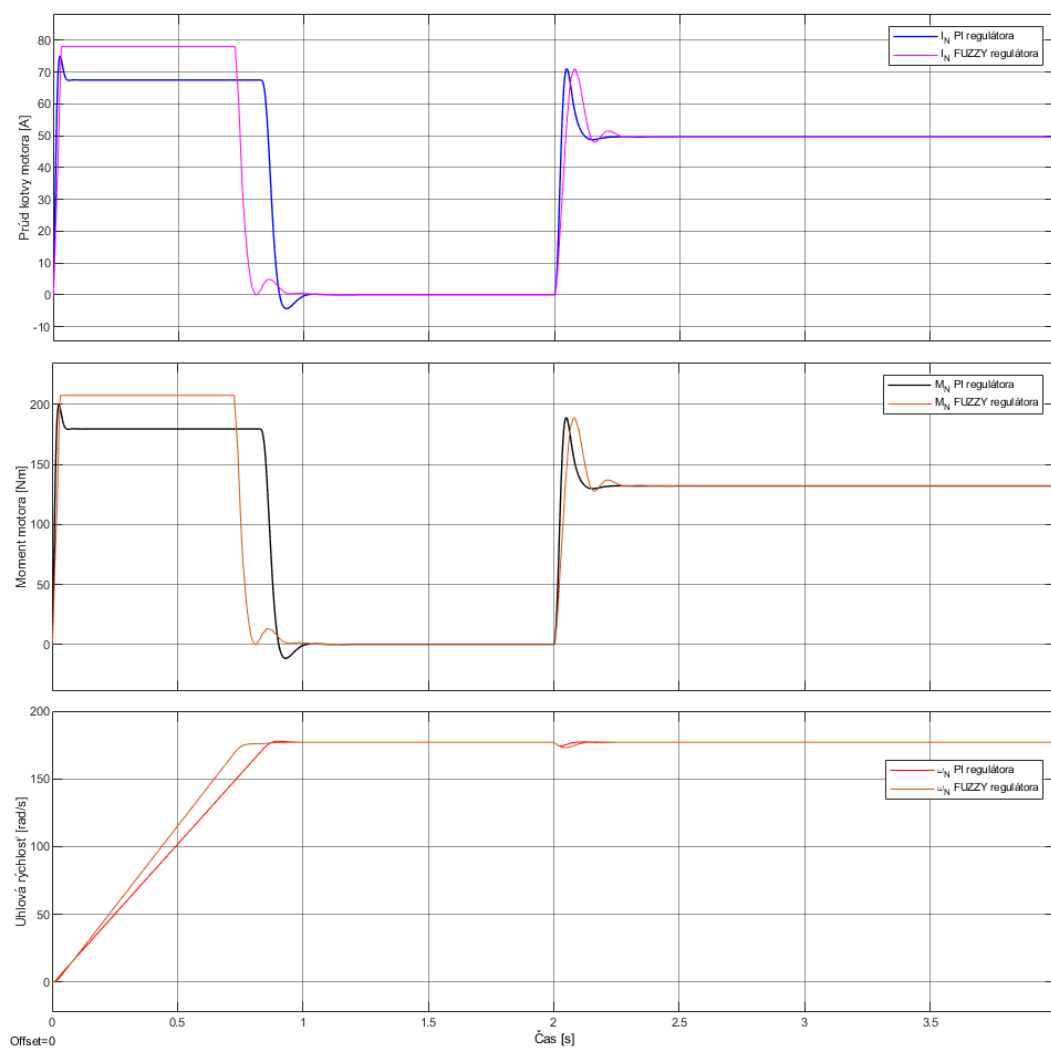
Obr. 25 Štruktúra fuzzy regulátora jednosmerného pohonu 5x5.

Jednotlivé zosilnenia fuzzy regulátora sú zobrazené na nasledujúcom obrázku.



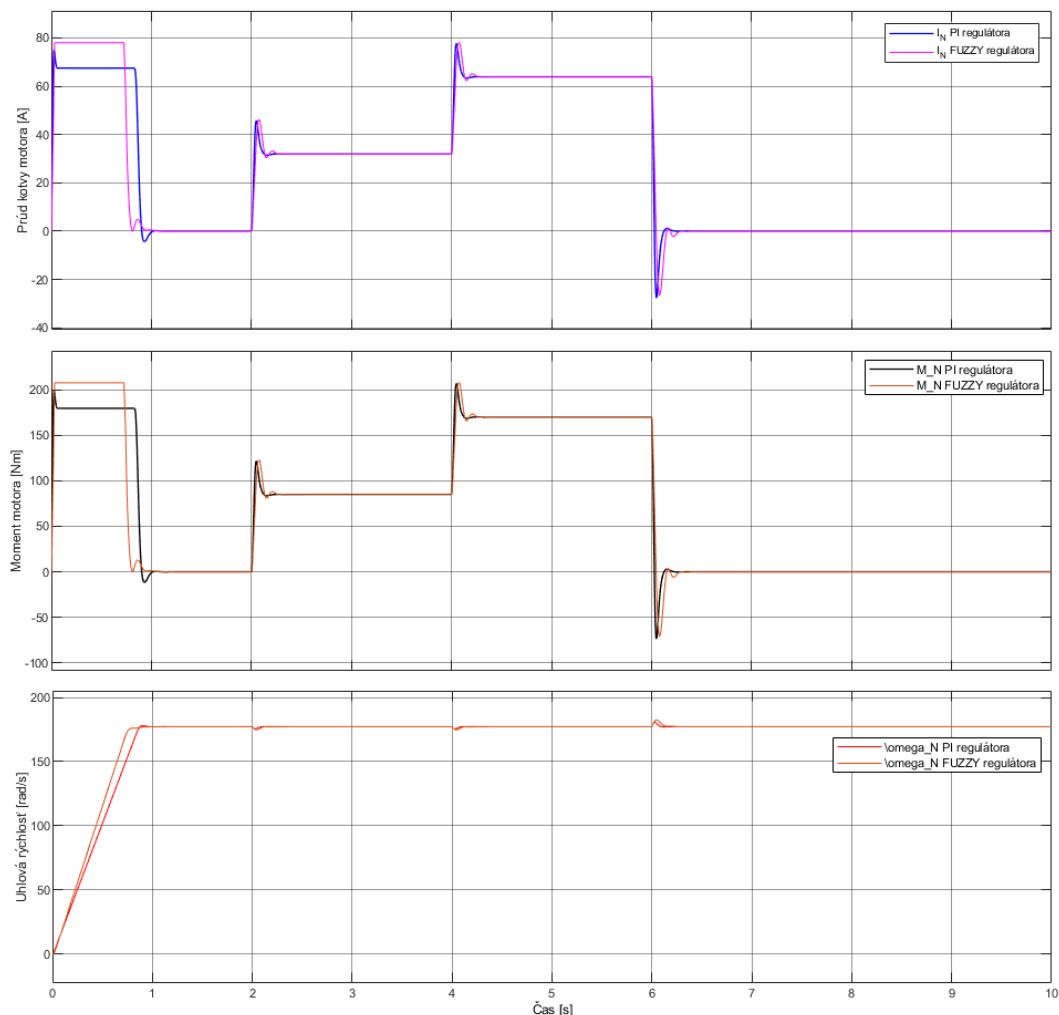
Obr. 26 Detail kde je zobrazené ladenie fuzzy regulátora 5x5 pre verziu 1.

Porovnanie fuzzy regulátora s referenčným PI regulátorom jednosmerného motora s cudzím budením, ktorý je zaťažný v čase 2s si môžeme všimnúť na nasledujúcom priebehu.



Obr. 27 Porovnanie fuzzy regulátora s referenčným PI regulátorom 5x5

Ďalej sú zobrazené výstupné priebehy referenčného PI regulátora v porovnaní s fuzzy regulátorom, ktorý je postupne zaťažovaný podľa (obr. 19). Motor je zaťažovaný v čase 2s približne polovicou nominálneho momentu a v čase 4s zaťažený momentom, ktorý je rovný hodnote nominálneho momentu $M_z = M_n$. V čase 6s je motor odľahčený, kde $M_z = 0$ Nm.

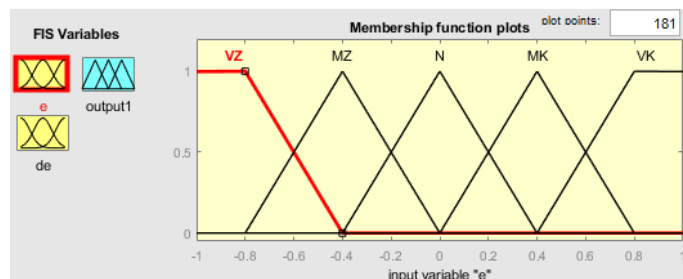


Obr. 28 Porovnanie fuzzy regulátora s referenčným PI regulátorom pri postupnom zaťažovaní a odľahčení 5x5

6.2 Široká nulová funkcia príslušnosti

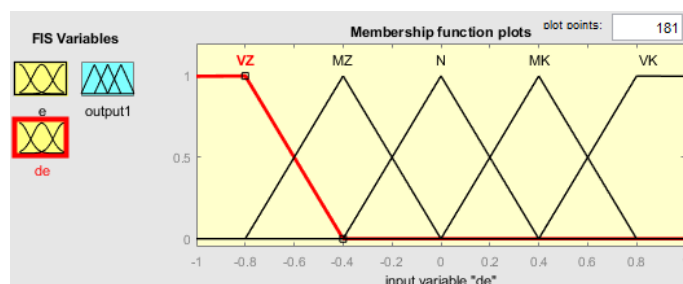
V nasledujúcich obrázkoch sú zobrazené vstupné priebehy odchýlky $e(k)$ a $\Delta e(k)$ fuzzy systému, ktoré majú široké tvary funkcií príslušnosti celkovej hodnoty rovnej až 0,8 v univerze.

Vstupný priebeh odchýlky $e(k)$:



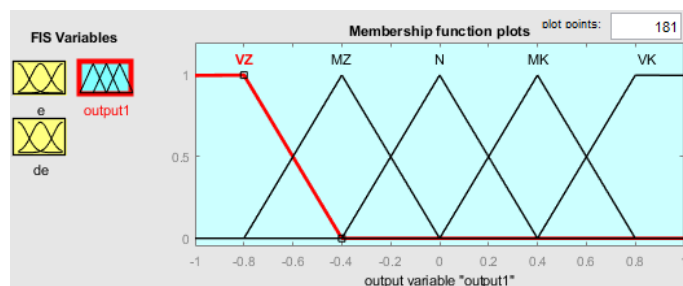
Obr. 29 Tvar funkcie príslušností $e(k)$ 5x5 verzia 2

Vstupný priebeh odchýlky $\Delta e(k)$:



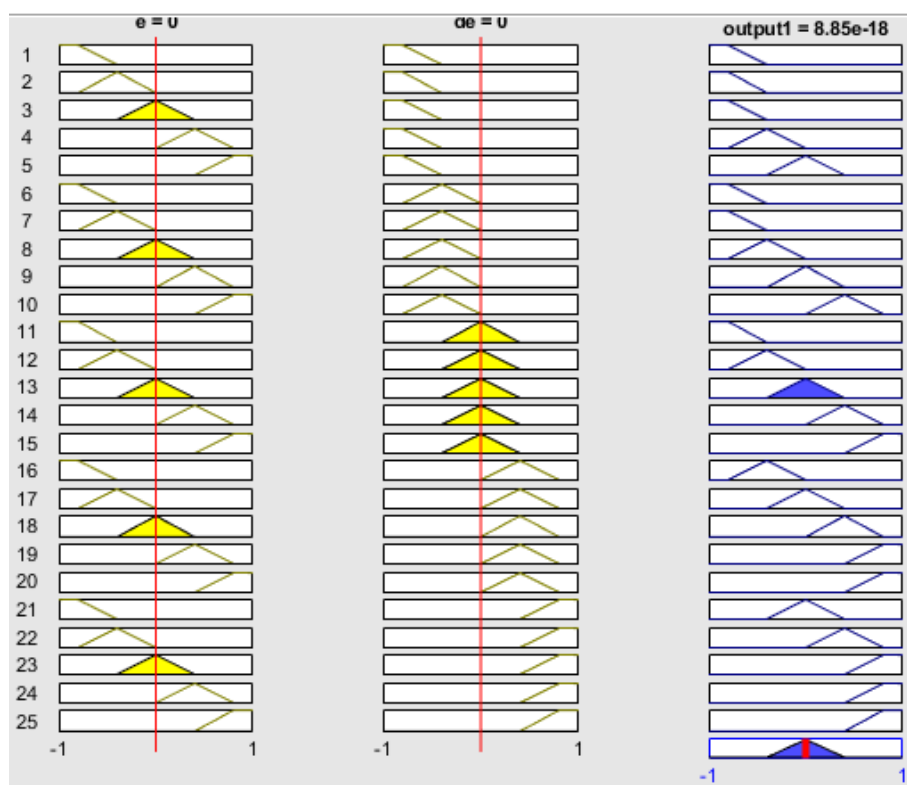
Obr. 30 Tvar funkcie príslušností $\Delta e(k)$ 5x5 verzia 2

Ďalej v nasledujúcom obrázku je zobrazený výstupný priebeh odchýlky $\Delta u(k)$ fuzzy systému, ktorý má tiež široké tvary funkcií príslušnosti.



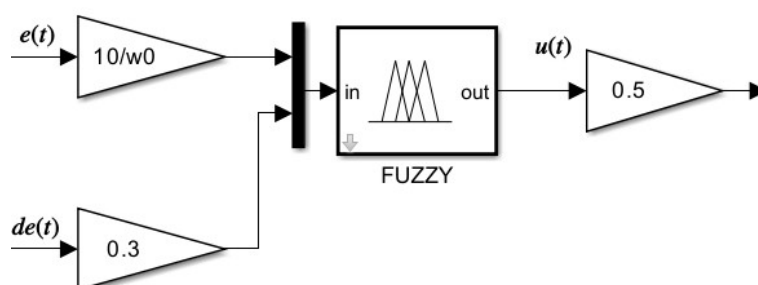
Obr. 31 Tvar funkcie príslušností $\Delta u(k)$ 5x5 verzia 2

Na ďalšom obrázku sú graficky zobrazené všetky pravidlá fuzzy systému.



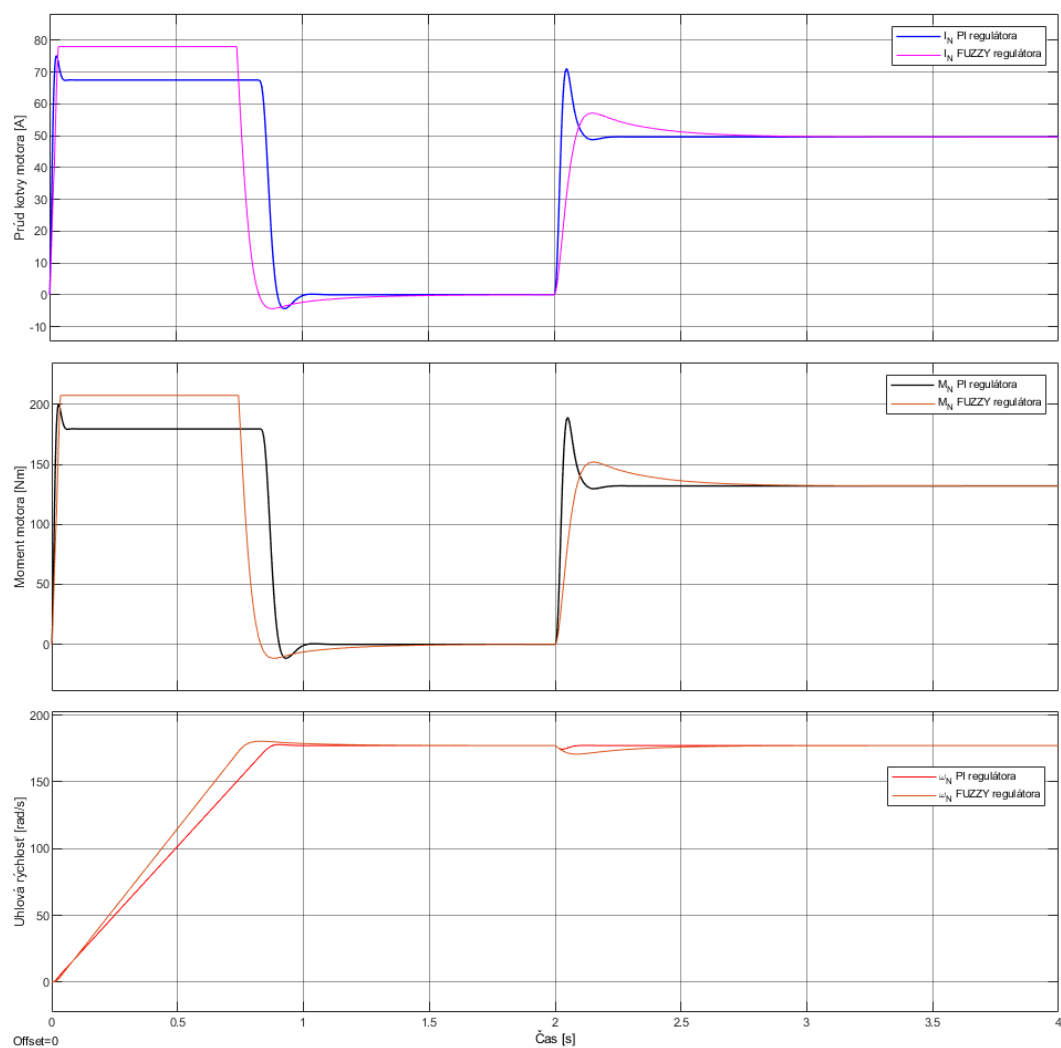
Obr. 32 Štruktúra fuzzy regulátora jednosmerného pohonu 5x5 verzia 2

Jednotlivé zosilnenia fuzzy regulátora sú zobrazené na nasledujúcom obrázku.



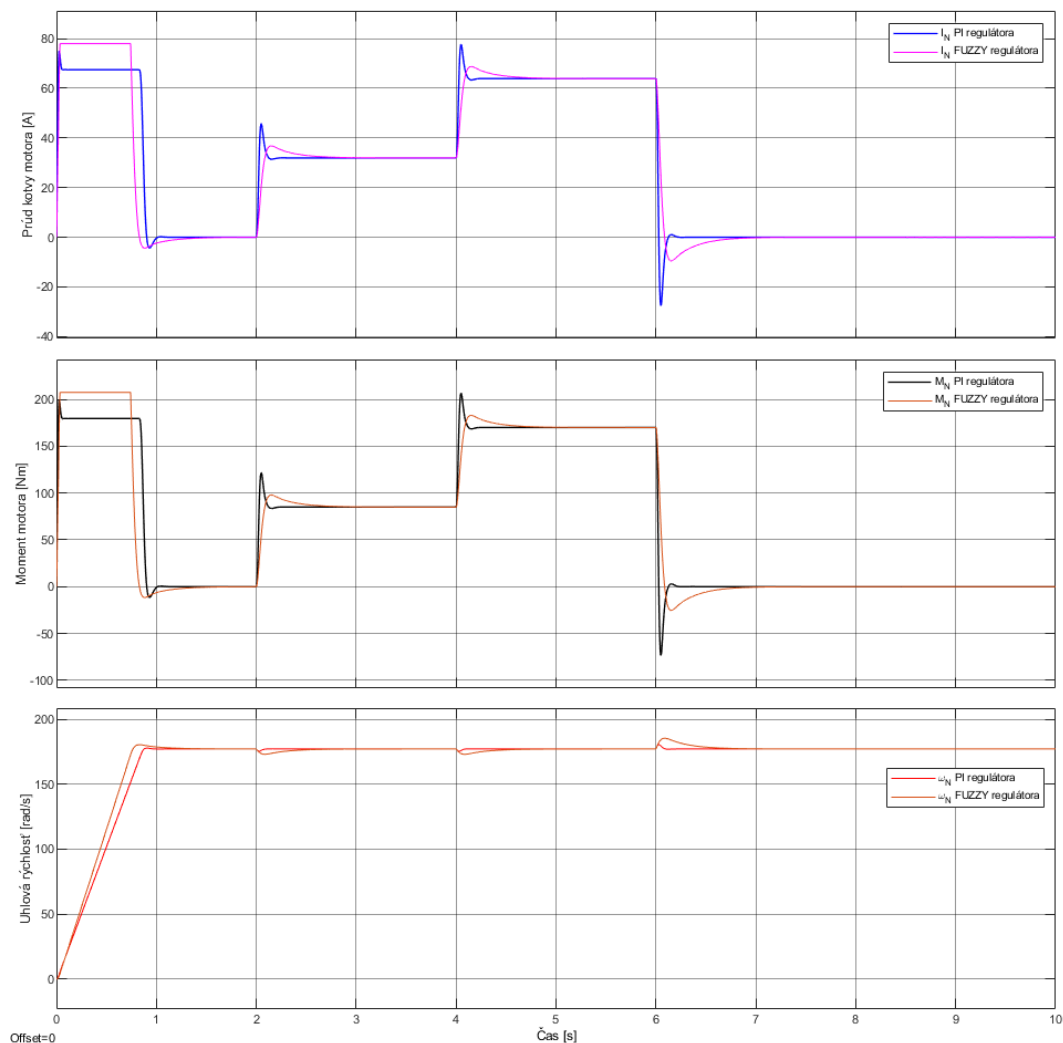
Obr. 33 Detail kde je zobrazené ladenie fuzzy regulátora 5x5 verzia 2

Porovnanie fuzzy regulátora s referenčným PI regulátorom jednosmerného motora s cudzím budením, ktorý je zaťažný v čase 2s si môžeme všimnúť na nasledujúcom priebehu.



Obr. 34 Porovnanie fuzzy regulátora s referenčným PI regulátorom 5x5 verzia 2

Na ďalšom obrázku sú zobrazené výstupné priebehy referenčného PI regulátora v porovnaní s fuzzy regulátorom, ktorý je postupne zaťažovaný podľa (obr. 19). Motor je zaťažovaný v čase 2s približne polovicou momentu nominálneho a v čase 4s zaťažovaný momentom, ktorý je rovný hodnote nominálneho momentu $M_z = M_n$. V čase 6s je motor úplne odľahčený na hodnotu $M_z = 0$ Nm.



Obr. 35 Porovnanie fuzzy regulátora s referenčným PI regulátorom pri postupnom zaťažovaní a odľahčení 5x5 verzia 2

7. ZÁVER

Podľa zadania sme navrhli reguláciu prúdu a rýchlosti jednosmerného motora s cudzím budením. V zapojení JCBM sme zohľadnili obmedzenie prúdu a ARW zapojenie. Ďalej sme navrhli PI fuzzy regulátor, ktorý na začiatku simulácií obsahoval 9 základných pravidiel. Nastavili sme miery príslušností a odladili celý systém, tak aby vykazoval najlepšiu regulačnú odchýlku. Následne sme túto reguláciu JCBM porovnali so základným referenčným PI regulátorom. Neskôr sme navrhli PI fuzzy regulátor, ktorý obsahoval už 25 pravidiel. Vytvorili sme dve verzie simulácií pre tento 5x5 fuzzy regulátor, kde sme menili vstupné tvary funkcií príslušností. Na konci sme porovnali fuzzy reguláciu s referenčnou PI reguláciou, podľa momentu zaťaženia. Vo výsledných grafických znázorneniach môžeme vidieť, že fuzzy regulátor je porovnateľný a v niektorých aspektoch lepší ako referenčný PI regulátor.

Zdroje:

- Kniha, FEI elektrické pohony, prof. Ing. Jaroslav Timko, CSc., doc. Ing. Jaroslava Žilková, PhD., 2015, ISBN: 978-80-553-2069-4
- Katalóg DC motors ABB,
https://library.e.abb.com/public/2fab834b53a447caa026c37bf000106c/DC_motors_DMI_catalog_low%20res.pdf
- Regulované pohony, Návod na cvičenia – Karol Kyslan, František Ďurovský
- Nelineárne elektromechanické systémy, cvičenia – prof. Ing. Pavol Fedor, PhD.