

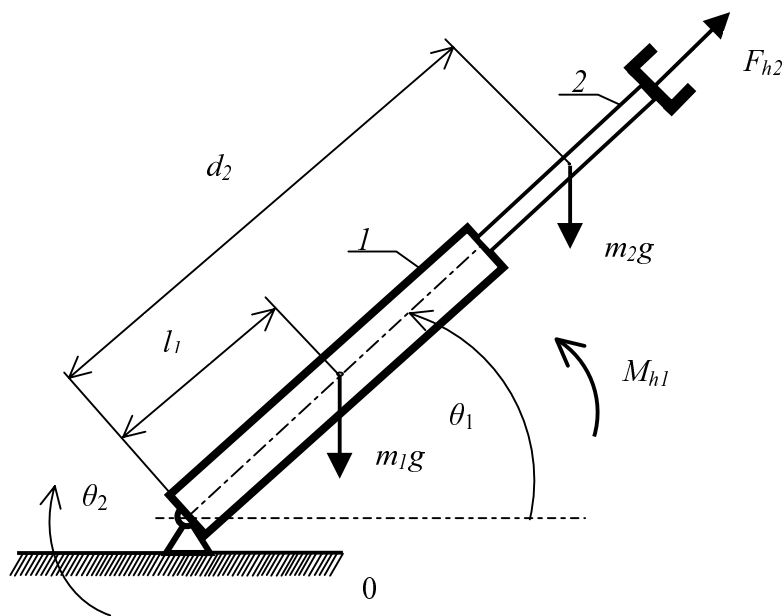
# ŘÍZENÍ POHYBU RAMENE MANIPULÁTORU

Jiří Vondřich, Filip Šibrava

Katedra mechaniky a materiálů, Fakulta elektrotechnická, ČVUT

## ÚVOD

V článku je numericky řešeno fuzzy řízení pohybu ramene manipulátoru pomocí Matlabu. Rameno manipulátoru poháněné elektromotory se otáčí úhlovou rychlostí  $\dot{\theta}_1$  a vysouvá rychlostí  $\dot{d}_2$  (Obr.1). Rám ramene manipulátoru se otáčí úhlovou rychlostí  $\dot{\theta}_2$ . Pohybové rovnice této soustavy jsou dvě nelineární diferenciální rovnice 2. řádu (5). Pohon elektromotory je modelován pomocí matematických vztahů v Matlabu (Obr.2). Fuzzy řízení pohybu ramene manipulátoru je modelováno rovněž pomocí Matlabu (Obr.13).



Obr.1 Model ramene manipulátoru

Pohybové rovnice soustavy byly sestaveny pomocí Lagrangeových rovnic druhého druhu:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i, \quad q_1 = \theta_1, \quad q_2 = d_2, \quad L = E_k - E_p, \quad (1)$$

kde  $E_k$ ,  $E_p$  ... kinetická a potenciální energie,

$q_1 = \theta_1$ ,  $q_2 = d_2$  ... zobecnělé souřadnice,

$Q_i$  ... zobecnělé síly.

Kinetická a potenciální energie soustavy je

$$E_k = \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_1 (l_1 \dot{\theta}_1)^2 + \frac{1}{2} m_2 (d_2 \dot{\theta}_1)^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{d}_2^2, \quad (2)$$

$$E_p = m_1 g l_1 \sin \theta_1 + m_2 g d_2 \sin \theta_1,$$

kde  $I_1$ ,  $I_2$  jsou momenty setrvačnosti části 1 a 2 ramene manipulátoru ( obr.1).

Zobecnělé síly  $Q_1, Q_2$  jsou dány vztahy simulující pohon stejnosměrnými motory pro otáčení ramene manipulátoru a vysunutí části 2 manipulátoru:

$$Q_1 = \tau_1 = M_{h1} = M_{01} - B_1(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2),$$

$$Q_2 = \tau_2 = F_{h2} = \frac{1}{r}(M_{02} - B_2 \frac{d_2}{r}). \quad (3)$$

kde  $M_{01} = 250\text{Nm}$ ,  $B_1 = 0,1$ ,  $M_{02} = 250\text{Nm}$ ,  $B_2 = 0,1$ ,  $r = 1\text{m}$ .

Úhlová rychlost rámu ramene manipulátoru  $\dot{\theta}_2$  je dána vztahem

$$\dot{\theta}_2 = \tau_3 = a \sin \frac{t}{T}. \quad (4)$$

Po předepsaných úpravách vztahů (2), (3), (4) daných rovnicí (1) obdržíme soustavu rovnic popisující pohyb ramene manipulátoru: (5)

$$\tau_1 = (m_1 l_1^2 + I_1 + I_2 + m_2 d_2^2) \theta_1'' + 2m_2 d_2 \theta_1' d_2' + (m_1 l_1 + m_2 d_2) g \cos \theta_1$$

$$\tau_2 = m_2 d_2'' - m_2 d_2 \theta_1'^2 + m_2 g \sin \theta_1$$

$$\tau_3 = \theta_2'$$

Parametry ramene manipulátoru jsou:

$$m_1 = 4\text{kg}$$

$$m_2 = 2\text{kg}$$

$$I_1 = 0.2\text{kg.m}^2$$

$$I_2 = 0.1\text{kg.m}^2$$

$$l_1 = 30\text{cm}$$

$$g = 9.81\text{m.s}^{-2}$$

Vstupy do systému jsou pohonné jednotky ovládající systém:

$$\vec{u} = (\tau_1, \tau_2, \tau_3)$$

Výstupní proměnné systému jsou úhly natočení manipulátoru a délka jeho vysunutí:

$$\vec{y} = (\theta_1, \theta_2, d_2)$$

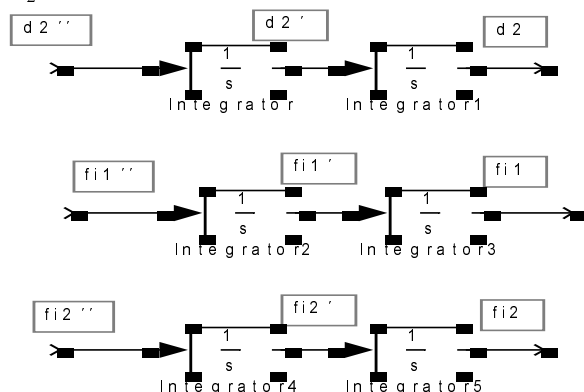
Bylo zavedeno pět vnitřních stavů (úhel natočení  $\theta_1$ , druhý úhel natočení  $\theta_2$ , úhlovou rychlost otáčení ramene  $\omega_1$ , míru vysunutí ramene  $d_2$ , rychlost vysunování ramene  $v_2$ ):

$$\vec{x} = (\theta_2, \theta_1, \omega_1, d_2, v_2) = (\theta_2, \theta_1, \theta_1', d_2, d_2')$$

Počáteční podmínky jsou dány:

$$\theta_1 = \theta_1' = \theta_1'' = d_2' = d_2'' = 0$$

$$d_2 = 0.8$$

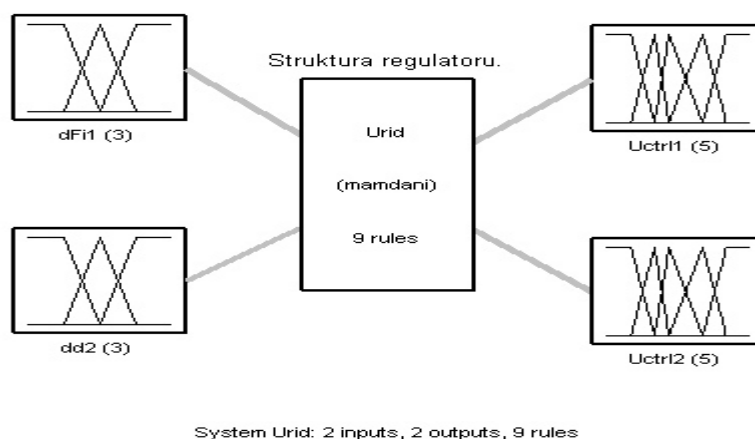


Obr.2 Simulinkové schéma ramene manipulátoru

## NÁVRH FUZZY REGULÁTORU

Úkolem regulace bylo dosáhnout co nejkratší odezvy na skok s co nejmenší ustálenou odchylkou. Regulovaný systém je nelineární, se dvěma výstupy (úhel natočení manipulátoru a vysunutí části 2 manipulátoru, třetí výstup byl nezapojen) a se dvěma vstupy (řídící napětí na stejnosměrném motoru pro natočení ramene manipulátoru a řídící napětí na stejnosměrném motoru pro vysunutí části 2 manipulátoru), třetí vstup byl nezapojen. Regulace byla prováděna v rozsahu kladných jednotek metrů pro vysunutí části 2 a v rozsahu záporných jednotek radiánů pro otočení ramene manipulátoru.

Byl navrhnout regulátor se dvěma vstupy a dvěma výstupy, jedním pro regulaci náklonu a druhým pro regulaci vysunutí ruky (Obr.3). Jak oba vstupy mají stejný počet fuzzy množin, tak i oba výstupy mají stejný počet fuzzy množin.



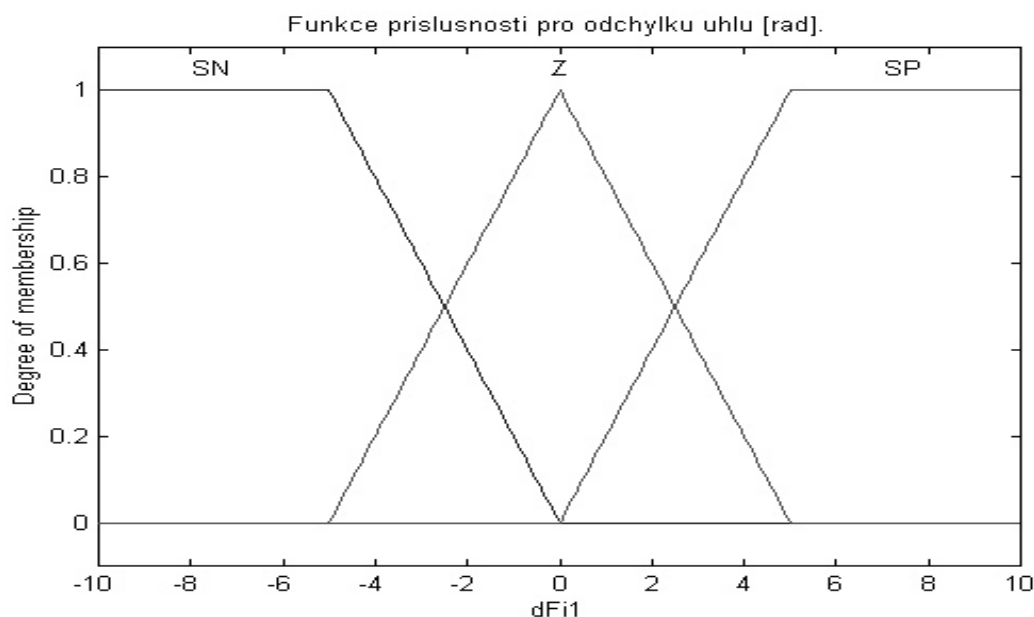
Obr. 3 Struktura regulátoru s dvěma vstupy  $dFi1$ ,  $dd2$  a dvěma výstupy  $Uctr11$ ,  $Uctr12$

Pro první vstup  $dFi1$  (aktuální minus požadovaný náklon ruky, rozsah  $\langle -10\text{rad}, +10\text{rad} \rangle$ ) jsou zavedeny tři množiny (Obr.4):

SN - small negative - trapezoidální, s body zlomu (-15, -10, -5, 0),

Z - zero - triangulární, s body zlomu (-5, 0, 5),

SP - small positive - trapezoidální, s body zlomu (0, 5, 10, 15).



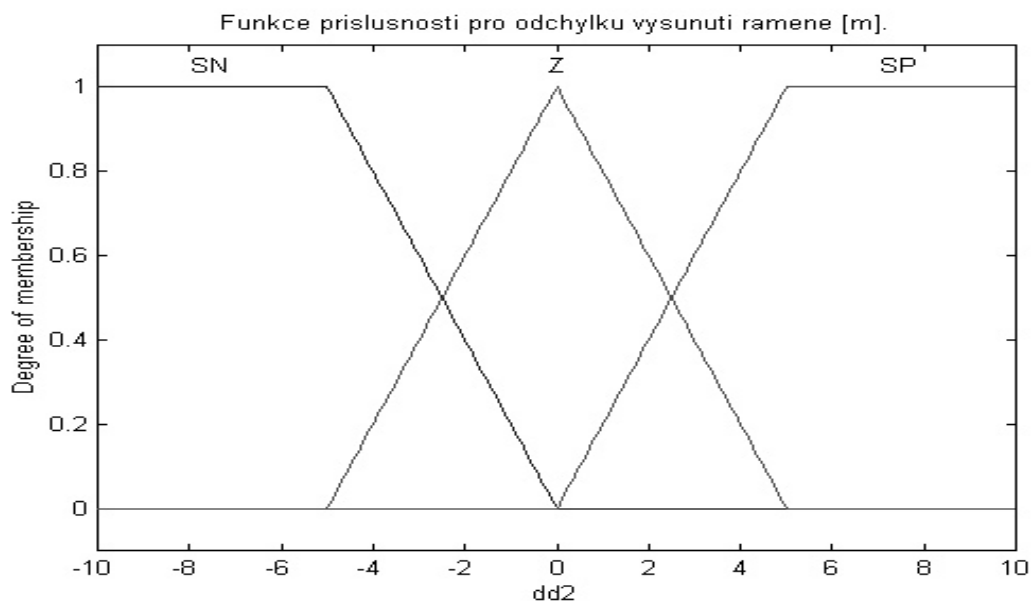
Obr.4 Vstup  $dFi1$

Pro druhý vstup  $dd2$  (aktuální minus požadovaný pro otočení ramene, rozsah  $\langle -10\text{m}, +10\text{m} \rangle$ ) jsou zavedeny tři množiny (Obr.5):

SN - small negative - trapezoidální, s body zlomu  $(-15, -10, -5, 0)$ ,

Z - zero - trojúhelníková, s body zlomu  $(-5, 0, 5)$ ,

SP - small positive - trapezoidální, s body zlomu  $(0, 5, 10, 15)$ .



Obr.5 Vstup  $dd2$

Výstupem regulátoru otáčení ramene manipulátoru je řídicí napětí, které se pohybuje v rozsahu  $\langle -1.5\text{V}, +1.5\text{V} \rangle$ . Pro tento výstup bylo zavedeno pět výstupních fuzzy množin (Obr. 6):

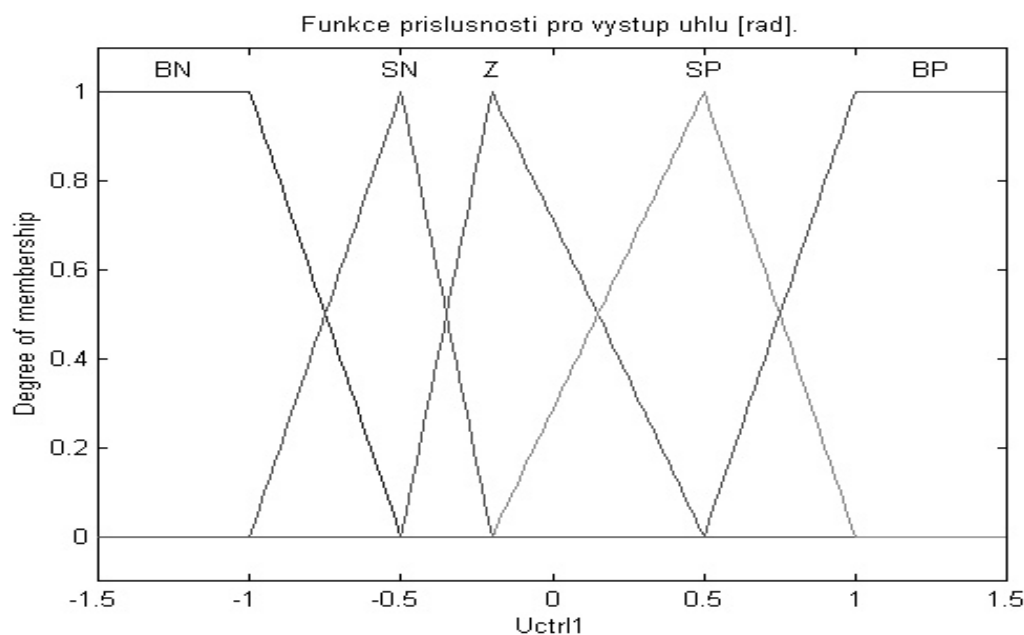
BN - big negative - trapezoidální s body zlomu  $(-2.0, -1.5, -1.0, -0.5)$ ,

SN - small negative - trojúhelníková s body zlomu  $(-1.0, -0.5, -0.2)$ ,

Z - zero - trojúhelníková s body zlomu  $(-0.5, -0.2, 0.5)$ ,

SP - small positive - trojúhelníková s body zlomu  $(-0.2, 0.5, 1.0)$ ,

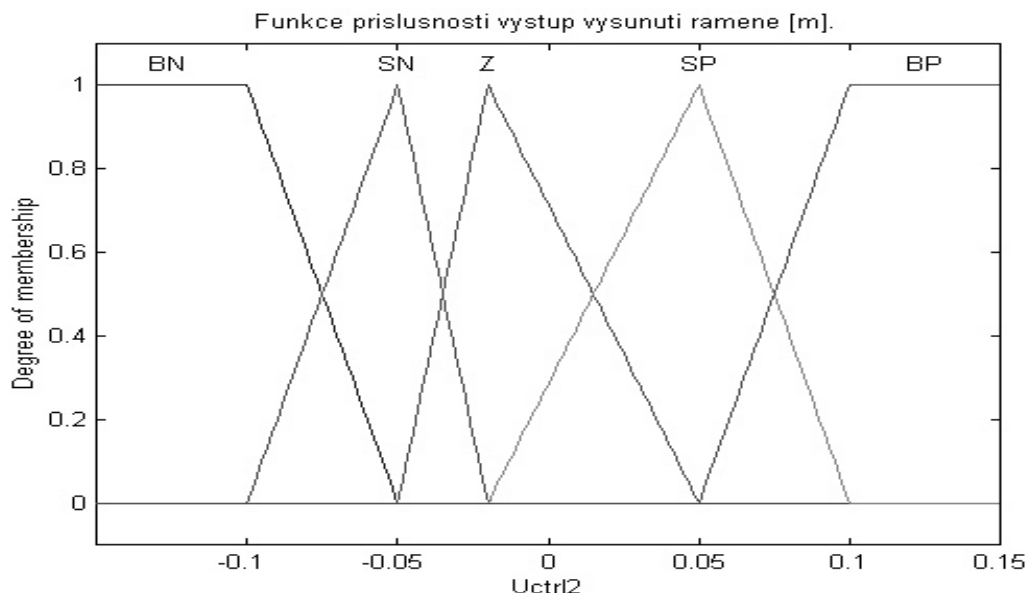
BP - big positive - trapezoidální s body zlomu  $(0.5, 1.0, 1.5, 2.0)$ .



Obr. 6 Výstup  $U_{ctrl1}$

Výstupem regulátoru otáčení ramene manipulátoru je řídicí napětí, které se pohybuje v rozsahu  $\langle -0.15V, +0.15V \rangle$ . Pro tento výstup bylo zavedeno pět výstupních fuzzy množin (Obr.7):

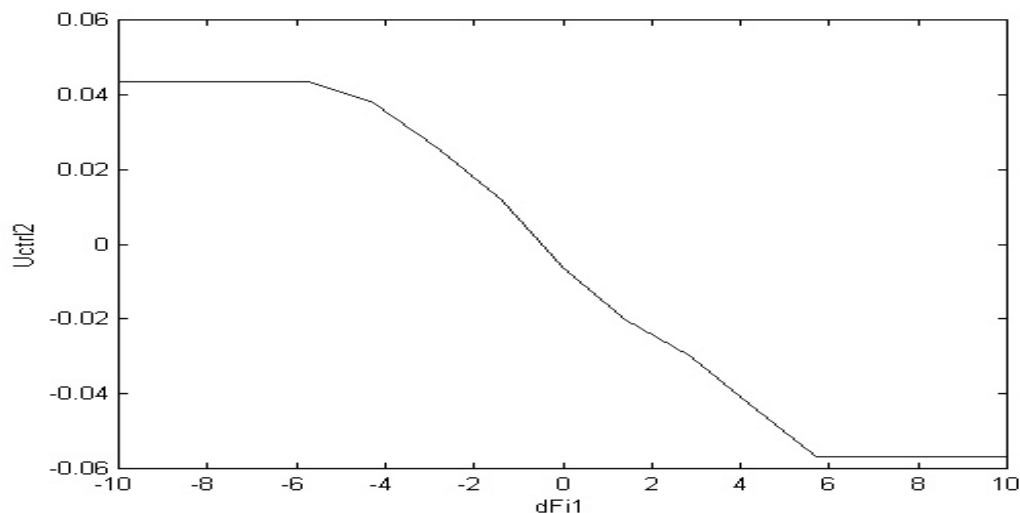
- BN - big negative --trapezoidální s body zlomu (-0.20, -0.15, -0.10, -0.05),
- SN - small negative - triangulární s body zlomu (-0.10, -0.05, -0.02),
- Z - zero - triangulární s body zlomu (-0.05, -0.02, 0.05),
- SP - small positive - triangulární s body zlomu (-0.02, 0.05, 0.10),
- BP - big positive - trapezoidální s body zlomu (0.05, 0.10, 0.15, 0.20).



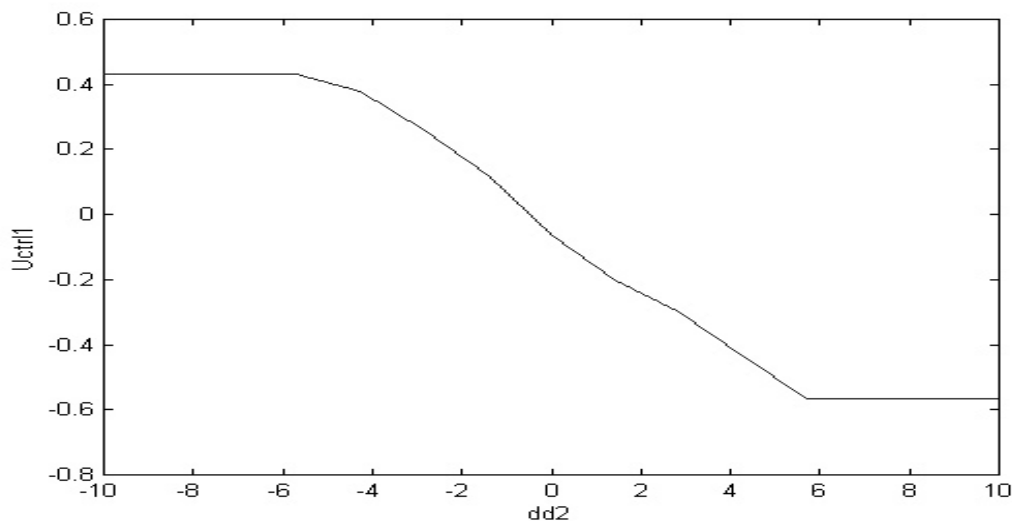
Obr. 7 Výstup  $U_{ctrl2}$

Báze pravidel je následující:

1. If (dFi1 is SN) and (dd2 is SN) then (Uctrl1 is SP)(Uctrl2 is SP)
2. If (dFi1 is SN) and (dd2 is Z) then (Uctrl1 is SP)(Uctrl2 is SP)
3. If (dFi1 is SN) and (dd2 is SP) then (Uctrl1 is Z)(Uctrl2 is Z)
4. If (dFi1 is Z) and (dd2 is SN) then (Uctrl1 is SP)(Uctrl2 is SP)
5. If (dFi1 is Z) and (dd2 is Z) then (Uctrl1 is Z)(Uctrl2 is Z)
6. If (dFi1 is Z) and (dd2 is SP) then (Uctrl1 is SN)(Uctrl2 is SN)
7. If (dFi1 is SP) and (dd2 is SN) then (Uctrl1 is Z)(Uctrl2 is Z)
8. If (dFi1 is SP) and (dd2 is Z) then (Uctrl1 is SN)(Uctrl2 is SN)
9. If (dFi1 is SP) and (dd2 is SP) then (Uctrl1 is SN)(Uctrl2 is SN)



Obr. 8 Regulace napětí  $U_{ctrl1}$  [V] na výstupu v závislosti na úhlu otočení ramene  $\theta_1$  [rad].



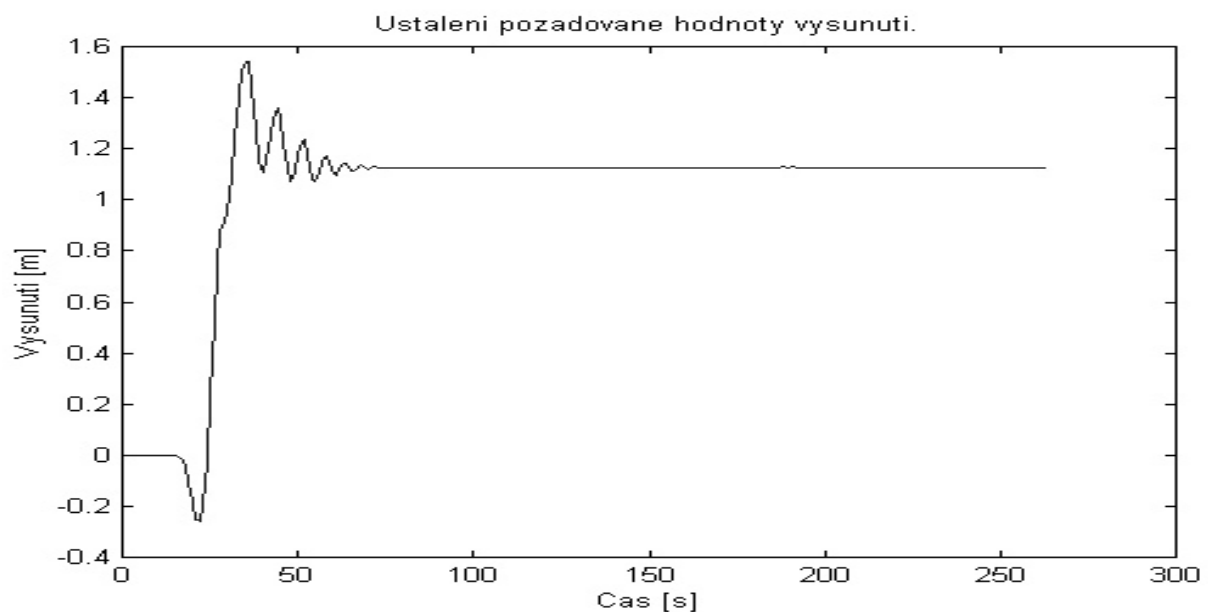
Obr.9 Regulace napětí  $U_{ctrl1}$  [V] na výstupu v závislosti na vysunutí ramene  $d_2$  [m]

## ZÁVĚR

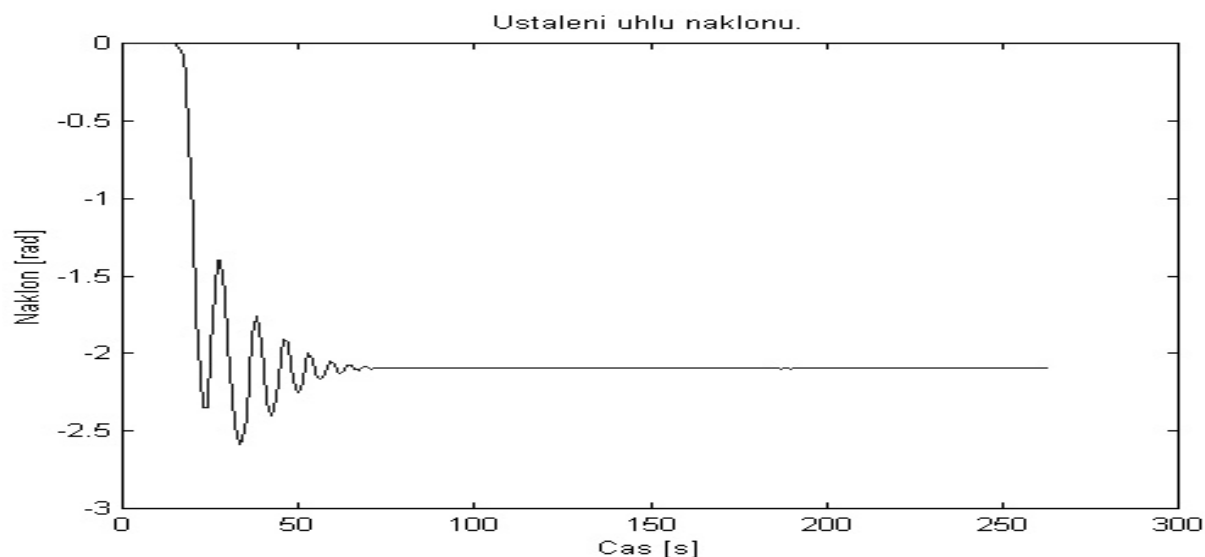
Výše popsaný regulátor byl navržen manuálně. Regulátor byl odzkoušen na soustavě a byly pozorovány výstupy a dle nich byla provedena korekce tvaru fuzzy množin. Následovala nová simulace soustavy s regulátorem s další korekcí tvaru fuzzy množin. Pravidla byla měněna jen jednou, po rozhodnutí, že se nebude při defuzzyfikaci výstupu používat množiny BN a BP u obou výstupů.

Uvedený regulátor funguje optimálně pro požadované vysunutí  $d_2$  velikosti kladných jednotek metrů (Obr.10), a pro požadovaný úhel  $\theta_1$  velikosti záporných jednotek radiánů (Obr.11). Pro zvýšení přesnosti či rychlosti regulace pro větší množinu požadovaných hodnot by bylo nutné vícekrát opakovat postup simulace a korekce fuzzy množin, či v případě složitějšího systému by bylo nutné použít trénování regulátoru pomocí neuronové sítě.

Regulovaná soustava s regulátorem je zřejmá z m-file na obr.12. Simulinkový model řízeného fuzzy regulátoru je znázorněn na obr.13. Pro simulaci regulace je nutné spustit m-file, který vytvoří bázi znalostí FIS. Ta je pak použita v modelu regulované soustavy, která se následovně odsimuluje v Simulinku. Pokud by nebyla k dispozici báze znalostí FIS, tak simulink generuje chybové hlášení. M-file používá knihovnu fuzzy, která je součástí Matlabu v 5.3. Jednotlivé funkce jsou zde podrobně popsány v nápovědě samotného Matlabu.



Obr.10 Průběh vysunutí  $d_2$  části 2 ramena manipulátoru



Obr.11 Průběh úhlu natočení  $\theta_1$  ramene manipulátoru

```

close all;
fismat=newfis('Urid');
%Divergence_of_Fil=Actual_Fil - Desired_Fil
fismat=addvar(fismat,'input','dFil',[-10 10]);
fismat=addmf(fismat,'input',1,'SN','trapmf',[-15 -10 -5 0]);
fismat=addmf(fismat,'input',1,'Z','trimf',[-5 0 5]);
fismat=addmf(fismat,'input',1,'SP','trapmf',[0 5 10 15]);
%Divergence_of_d2=Actual_d2 - Desired_d2
fismat=addvar(fismat,'input','dd2',[-10 10]);
fismat=addmf(fismat,'input',2,'SN','trapmf',[-15 -10 -5 0]);
fismat=addmf(fismat,'input',2,'Z','trimf',[-5 0 5]);
fismat=addmf(fismat,'input',2,'SP','trapmf',[0 5 10 15]);
%vystupni napeti Uctrl1, ridi pres 1. stejnosmerny motor uhel Fil
fismat=addvar(fismat,'output','Uctrl1',[-1.5 1.5]);
fismat=addmf(fismat,'output',1,'BN','trapmf',[-2.0 -1.5 -1.0 -0.5]);
fismat=addmf(fismat,'output',1,'SN','trimf',[-1.0 -0.5 -0.2]);
fismat=addmf(fismat,'output',1,'Z','trimf',[-0.5 -0.2 0.5]);
fismat=addmf(fismat,'output',1,'SP','trimf',[-0.2 0.5 1.0]);
fismat=addmf(fismat,'output',1,'BP','trapmf',[0.5 1.0 1.5 2.0]);
%vystupni napeti Uctrl2, ridi pres 2. stejnosmerny motor vysunuti d2
fismat=addvar(fismat,'output','Uctrl2',[-0.15 0.15]);
fismat=addmf(fismat,'output',2,'BN','trapmf',[-0.2 -0.15 -0.1 -0.05]);
fismat=addmf(fismat,'output',2,'SN','trimf',[-0.1 -0.05 -0.02]);
fismat=addmf(fismat,'output',2,'Z','trimf',[-0.05 -0.02 0.05]);
fismat=addmf(fismat,'output',2,'SP','trimf',[-0.02 0.05 0.1]);
fismat=addmf(fismat,'output',2,'BP','trapmf',[0.05 0.1 0.15 0.2]);
%pravidla pro Uctrl1 & Uctrl2
%fismat = addrule(fismat,[1 1 5 5 1 1]);
%fismat = addrule(fismat,[1 2 4 4 1 1]);
%fismat = addrule(fismat,[1 3 3 3 1 1]);
%fismat = addrule(fismat,[2 1 4 4 1 1]);
%fismat = addrule(fismat,[2 2 3 3 1 1]);
%fismat = addrule(fismat,[2 3 2 2 1 1]);
%fismat = addrule(fismat,[3 1 3 3 1 1]);
%fismat = addrule(fismat,[3 2 2 2 1 1]);
%fismat = addrule(fismat,[3 3 1 1 1 1]);

fismat = addrule(fismat,[1 1 4 4 1 1]);
fismat = addrule(fismat,[1 2 4 4 1 1]);
fismat = addrule(fismat,[1 3 3 3 1 1]);
fismat = addrule(fismat,[2 1 4 4 1 1]);
fismat = addrule(fismat,[2 2 3 3 1 1]);
fismat = addrule(fismat,[2 3 2 2 1 1]);

```

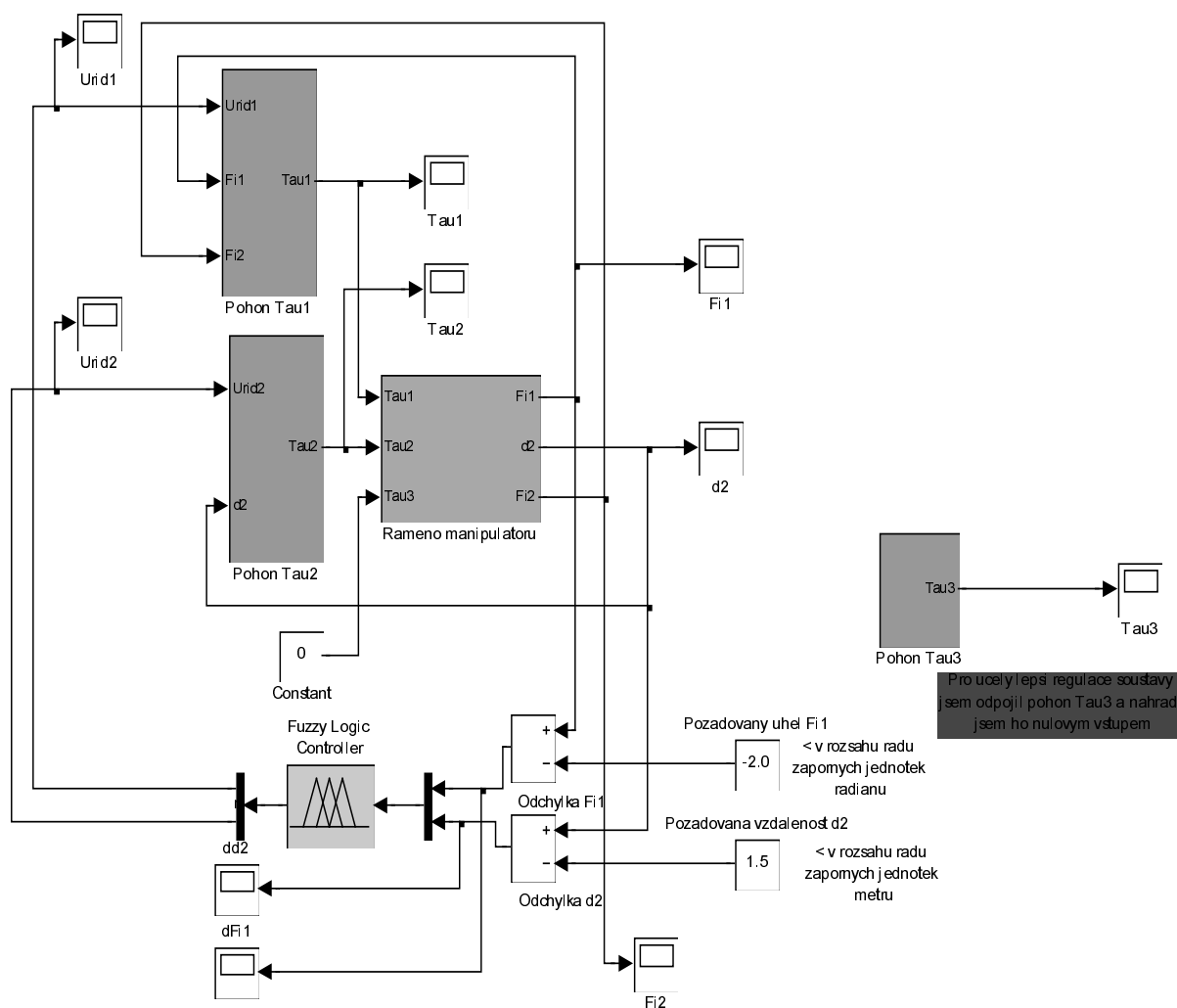
```

fismat = addrule(fismat,[3 1 3 3 1 1]);
fismat = addrule(fismat,[3 2 2 2 1 1]);
fismat = addrule(fismat,[3 3 2 2 1 1]);

getfis(fismat);
showrule(fismat)
figure;
plotmf(fismat,'input',1);
figure;
plotmf(fismat,'input',2);
figure;
plotmf(fismat,'output',1);
figure;
plotmf(fismat,'output',2);
figure;
plotfis(fismat);
figure;
gensurf(fismat);
writefis(fismat,'Manipulator.fis');
b=readfis('Pravidla.fis');

```

Obr.12 m-file regulované soustavy s regulátorem



Obr.13 Simulinkový model řízeného fuzzy regulátoru