

Modelovanie a riadenie dynamických systémov s hybridnou dynamikou pomocou modelovacieho jazyka HYSDEL

Tutoriál k bakalárskej práci Modelovanie a analýza nelineárnych systémov s hybridnou dynamikou

Úlohy:

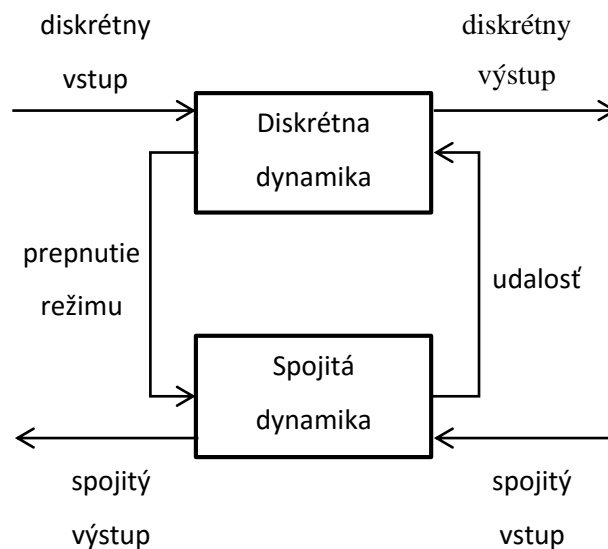
1. Zostaviť matematicko-fyzikálny model hydraulického systému dvoch nádob s hybridnou dynamikou.
 - 1.a Získanie pracovného bodu pre obe dynamiku hydraulického systému dvoch nádob
2. Vykonať lineárnu aproximáciu nelineárneho modelu hydraulického systému dvoch nádob s hybridnou dynamikou.
3. Vytvoriť diskretný popis lineárnej aproximácie hydraulického systému dvoch nádob s hybridnou dynamikou.
4. Implementovať lineárny model hydraulického systému dvoch nádob s hybridnou dynamikou do modelovacieho nástroja HYSDEL
5. Návrh optimálneho stavového riadenia hydraulického systému dvoch nádob s hybridnou dynamikou s využitím princípu minimalizácie kvadratického funkcionálu
6. Implementácia lineárneho a nelineárneho modelu hydraulického systému dvoch nádob s hybridnou dynamikou do programového prostredia MATLAB/Simulink
 - 6.a Riadenie do rovnovážneho stavu
 - 6.b Riadenie na ustálený stav

Hybridný systém

- jeden z typov dynamických systémov, ktorého štruktúra je zobrazená na Obr. 1
- obsahuje spojité aj diskrétné správanie dynamického systému pri vzájomnej interakcii
- má viacero prevádzkových režimov na základe platnosti rôznych fyzikálnych zákonov,
- režimy sa prepínajú za pomoci prepínačov, ktoré môžu byť aktivované dosiahnutím konkrétneho stavu, zmenou udalosti v čase alebo pôsobením externých udalostí vstupujúcich do systému

Modelovacie nástroje hybridných systémov : HyTech, PowerDEVS ,HYSDEL, HyVisual ...

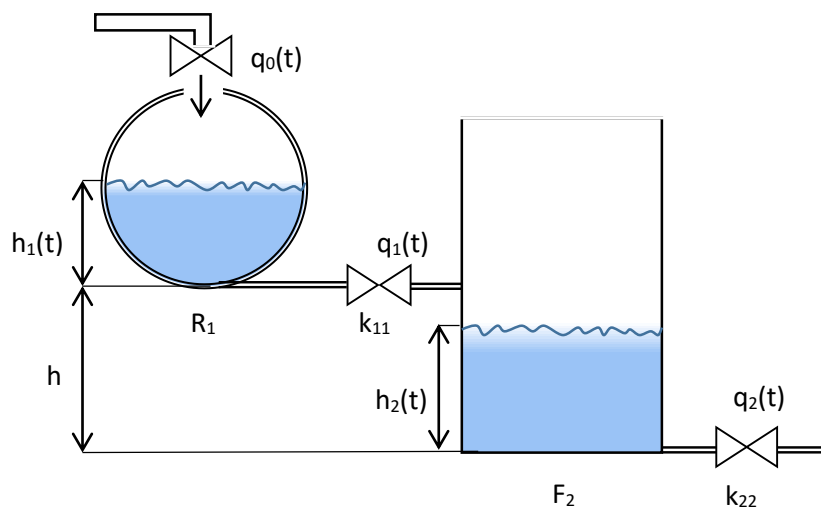
V tomto tutoriáli budeme modelovať hydraulický systém dvoch nádob s hybridnou dynamikou, ktorý predstavuje typ SAS hybridného systému v programovacom prostredí MATLAB/Simulink a v prostredí HYSDEL, ktorý je súčasťou MPT Toolbox. Bližší popis modelovacím nástrojov je uvedený v bakalárskej práci v podkapitole 4.1 a systém SAS je bližšie vysvetlený podkapitole 2.7.3.



Obr. 1 Základná štruktúra hybridného systému

Úloha č.1 : Zostaviť matematicko-fyzikálny model hydraulického systému dvoch nádob s hybridnou dynamikou.

- dynamický systém s 2 dynamikami:
 - podmienka zmeny dynamiky $h_2 > h$
 - ak sa systém nachádza v stave bez interakcie t.j $h_2 \leq h \rightarrow$ dynamika A
 - ak sa systém nachádza v stave s interakciou t.j $h_2 > h \rightarrow$ dynamika B



Obr. 2 Hydraulický systém dvoch nádob s hybridnou dynamikou

Tab. 1 Parametre hybridného hydraulického systému dvoch nádob

Parametre systému		
označenie	hodnota	popis
h	1,35 m	výška dna guľovej nádoby
h_{1max}	2,4 m	výška guľovej nádoby
h_{2max}	2 m	výška valcovej nádoby
F_2	3,72 m ²	plocha hladiny druhej nádoby
$F_1(h_1(t))$		plocha hladiny v prvej nádobe
R_1	1,2 m	polomer guľovej nádoby
g	9,81 m/s ²	gravitačné zrýchlenie
ρ	998 kg.m ⁻³	hustota kvapaliny
k_{11}	4 lit ^{2,5} s ⁻¹	prietokový ventil z prvej do druhej nádoby
k_{22}	3,56 lit ^{2,5} s ⁻¹	výtokový ventil z druhej nádoby

Tab. 2 Fyzikálne veličiny hybridného hydraulického systému dvoch nádob

Fyzikálne veličiny systému	
$h_1(t)$	výška hladiny prvej nádoby
$h_2(t)$	výška hladiny druhej nádoby
$q_0(t)$	prítok do guľovej nádoby
$q_1(t)$	prítok do guľovej nádoby
$q_2(t)$	výtok z druhej nádoby

Na základe platnosti matematicko-fyzikálnych zákonov, pre hydraulické systémy získame matematický model hydraulického systému dvoch nádob v tvare nelineárnych diferenciálnych rovníc pre oba typy dynamík, kde prvá rovnica pri danom type dynamiky reprezentuje *prvú* a teda guľovú nádobu a druhá rovnica reprezentuje *druhú* a teda valcovú nádobu:

Rovnice reprezentujúce **dynamiku A** :

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = \frac{q_0(t)}{\pi(2R_1h_1(t) - h_1^2(t))} - \frac{k_{11}\sqrt{h_1(t)}}{\pi(2R_1h_1(t) - h_1^2(t))},$$

$$\frac{dh_2(t)}{dt} = \frac{k_{11}\sqrt{h_1(t)}}{F_2} - \frac{k_{22}\sqrt{h_2(t)}}{F_2}$$

Rovnice reprezentujúce **dynamiku B** :

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = \frac{q_0(t)}{\pi(2R_1h_1(t) - h_1^2(t))} - \frac{\text{sign}(h_1(t) - (h_2(t) - h)) k_{11}\sqrt{|h_1(t) - (h_2(t) - h)|}}{\pi(2R_1h_1(t) - h_1^2(t))},$$

$$\frac{dh_2(t)}{dt} = \frac{\text{sign}(h_1(t) - (h_2(t) - h)) k_{11}\sqrt{|h_1(t) - (h_2(t) - h)|}}{F_2} - \frac{k_{22}\sqrt{h_2(t)}}{F_2}$$

kde funkcia *sign* predstavuje smer toku kvapaliny medzi nádobami.

Postup odvodenia rovníc pre prípad s *interakciou* môžeme vidieť na stránke predmetu *Optimálne a nelineárne systémy* v časti *Simulačné modely*:

http://matlab.fei.tuke.sk/ons/pdfModely/M4_gula_valec.pdf

Úloha 1.a Získanie pracovného bodu pre obe dynamiky hydraulického systému dvoch nádob

Následne môžeme určiť rovnovážny stav hladín v nádobách, do ktorého sa dostane systém po istom časovom úseku, bez vplyvov vonkajšieho okolia.

Keďže ide o systém s dvoma odlišnými nádobami, je potrebné zvoliť si pracovný bod - rovnovážny stav v prvej aj druhej nádobe.

Môžeme použiť dve varianty :

- zvolenie konštantného prítoku q_{0s} a následne vypočítať ustálené hladiny h_{1s} a h_{2s}
- zvolenie hladín a následne vypočítame ustálený prítok do prvej nádoby.

V tomto prípade použijeme druhú možnosť a teda zvolíme ustálenú hladinu v **druhej nádobe** pre obe dynamiky (h_{2s1} , h_{2s2}) a následne vypočítame rovnovážny stav v prvej nádobe a konštantný prítok taktiež pre obe dynamiky uvedené v Tab. 3.

Ustálené hladiny v prvej nádobe pre obe dynamiky získame z rovníc:

$$h_{1s1} = h_{2s1} \left(\frac{k_{22}}{k_{11}} \right)^2, \quad h_{1s2} = h_{2s2} \left(\frac{k_{22}}{k_{11}} \right)^2 + h_{2s2} - h,$$

a konštantný prítok následne vypočítame na základe:

$$h_{1s1} = h_{2s1} \left(\frac{k_{22}}{k_{11}} \right)^2, \quad h_{1s2} = h_{2s2} \left(\frac{k_{22}}{k_{11}} \right)^2 + h_{2s2} - h,$$

Tab. 3 Ustálené hodnoty

Ustálené hodnoty	
dynamika A	dynamika B
$h_{1s1} = 0,7921 \text{ m}$	$h_{1s2} = 1,5174 \text{ m}$
$h_{2s1} = 1 \text{ m}$	$h_{2s2} = 1,6 \text{ m}$
$q_{0s1} = 3,5600 \text{ m}^3/\text{s}$	$q_{0s2} = 4,5031 \text{ m}^3/\text{s}$

Úloha č.2 : Vykonať lineárnu aproximáciu nelineárneho modelu hydraulického systému dvoch nádob s hybridnou dynamikou.

S nelineárnymi systémami sa pracuje veľmi ťažko a preto ich nahrádzame pomocou lineárnej aproximácie v okolí vhodne zvoleného pracovného bodu. Vykonáme ju pomocou Taylorovho rozvoja:

$$f_i(x(t), u(t)) \approx f_i(x_s, u_s) + \sum_{k=1}^{n_x} \frac{\partial f_i}{\partial x_k} \Big|_{x_s, u_s} (x(t) - x_{ks}) + \sum_{k=1}^{n_u} \frac{\partial f_i}{\partial u_k} \Big|_{x_s, u_s} (u(t) - u_{ks})$$

Po vykonaní lineárnej aproximácie získame lineárne diferenciálne rovnice taktiež pre obe dynamiky. Pre jednoduchšie zápisy zavedieme konštanty:

$$k_1 = \frac{k_{11}}{2\sqrt{h_{1s1}}}, \quad k_2 = \frac{k_{22}}{2\sqrt{h_{2s1}}}$$

dynamika A:

$$\Delta \frac{dh_1(t)}{dt} = \frac{\Delta q_0(t)}{F_{1s1}} - \frac{k_1 \Delta h_1(t)}{F_{1s1}},$$

$$\Delta \frac{dh_2(t)}{dt} = \frac{k_1 \Delta h_1(t)}{F_2} - \frac{k_2 \Delta h_2(t)}{F_2},$$

kde odchýlka $\Delta q_0(t) = q_0(t) - q_{0s1}$, $\Delta h_1 = (h_1(t) - h_{1s1})$ a odchýlka $\Delta h_2 = (h_2(t) - h_{2s1})$

dynamika B :

$$\Delta \frac{dh_1(t)}{dt} = \frac{q_0(t)}{F_{1s2}} - \frac{k_{11} \Delta h_1(t)}{2F_{1s2} \sqrt{h_{1s2} - h_{2s2} + h}} + \frac{k_{11} \Delta h_2(t)}{2F_{1s2} \sqrt{h_{1s2} - h_{2s2} + h}},$$

$$\Delta \frac{dh_2(t)}{dt} = \frac{k_{11} \Delta h_1(t)}{2F_2 \sqrt{h_{1s2} - h_{2s2} + h}} - \frac{k_{11} \Delta h_2(t)}{2F_2 \sqrt{h_{1s2} - h_{2s2} + h}} - \frac{k_{22} \Delta h_2(t)}{2F_2 \sqrt{h_{2s2}}},$$

kde v tomto prípade odchýlka $\Delta q_0(t) = q_0(t) - q_{0s2}$, $\Delta h_1(t) = h_1(t) - h_{1s2}$ a odchýlka $\Delta h_2(t) = h_2(t) - h_{2s2}$.

Úloha č.3 : Vytvoriť diskretný popis lineárnej aproximácie hydraulického systému dvoch nádob s hybridnou dynamikou.

Vzhľadom na to, že chceme daný systém modelovať v prostredí HYSDEL, ktorý je špecializovaný na modelovanie diskretných hybridných systémov, potrebujeme získané lineárne diferenciálne rovnice spojité v čase previesť do rovníc diskretných v čase.

Pre jednoduchšie zápisy zavedieme konštanty:

pre **dynamiku A**

$$k_{1b} = \frac{k_{11}}{2\sqrt{h_{1s1}}}, \quad k_{2b} = \frac{k_{22}}{2\sqrt{h_{2s1}}},$$

a pre **dynamiku B**

$$k_{1s} = \frac{k_{11}}{2\sqrt{h_{1s2} - h_{2s2} + h}}, \quad k_{2s} = \frac{k_{22}}{2\sqrt{h_{2s2}}}$$

Výsledné rovnice budú mať formu:

dynamika A:

$$h1(k + T) = 1 - \frac{k_{1b} T}{F_{1s1}} (h_1 - h_{1s1}) + \frac{(q_0 - q_{0s1})T}{F_{1s1}} + h_{1s1}$$

$$h2(k + T) = \frac{k_{1b} T}{F_2} (h_1 - h_{1s1}) + 1 - \frac{k_{2b} T}{F_2} (h_2 - h_{2s1}) + h_{2s1}$$

dynamika B :

$$h1(k + T) = 1 - \frac{k_{1s} T}{F_{1s2}} (h_1 - h_{1s2}) + \frac{k_{1s} T}{F_{1s2}} (h_2 - h_{2s2}) + \frac{(q_0 - q_{0s2})T}{F_{1s2}} + h_{1s2}$$

$$h2(k + T) = \frac{k_{1s} T}{F_{1s2}} (h_1 - h_{1s2}) - \left(\frac{k_{1s} T}{F_2} + \frac{k_{2s} T}{F_2} - 1 \right) (h_2 - h_{2s2}) + h_{2s2}$$

Periódka vzorkovania T musí byť zvolená tak, aby diskretná aproximácia primerane odrážala dynamiku v čase spojitého linearizovaného modelu. Na základe vzťahu:

$$T_{vz} = \frac{1}{\max|s_1, \dots, s_n|} 0.1,$$

kde s_1, \dots, s_n predstavujú vlastné čísla matice F daného systému.

Úloha č.4 : Implementovať lineárny model hydraulického systému dvoch nádob s hybridnou dynamikou do modelovacieho nástroja HYSDEL

HYSDEL predstavuje modelovací jazyk na vysokej úrovni špecifikovaný pre hybridné systémy, reprezentované diskretnými hybridnými automatmi.

Deklarácia premenných:

- môžu byť typu REAL, BOOL
- môžu mať priradenú jednu hodnotu alebo interval hodnôt
- jedna premenná môže byť definovaná ako vektor možných nadobudnutých hodnôt

Vytvorenie popisu hybridného systému pomocou modelovacieho nástroja HYSDEL :

1. KROK

- vytvorenie súboru v MATLABE, ktorý uložíme s príponou .hys

2. KROK

- zápis do štruktúry jazyka

ŠTRUKTÚRA:

vytvárame model systému:

SYSTEM *názov_systému* {

deklarujeme premenné (vstupy, výstupy, stavy, parametre):

INTERFACE {

STATE {interval stavových veličín}

INPUT {interval vstupných veličín}

PARAMETER {hodnoty parametrov systému}

OUTPUT {výstupné premenné}

}

vyjadrujeme vzťahy medzi premennými

IMPLEMENTATION {

AUX {premenné, ktoré vyjadrujú vzťahy, dynamiky, linearizáciu nelinearít}

AD {podmienky, na základe ktorých sa má prepnúť dynamika systému}

DA {stanovenie, ktoré lineárne rovnice – diskretné v čase treba použiť pri danej dynamike}

CONTINUOUS {definované stavové veličiny}

OUTPUT {definovanie výstupných premenných}

}

}

Implementácia lineárneho diskrétného modelu hydraulického systému dvoch nádob s hybridnou dynamikou do modelovacieho nástroja HYSDEL

uložené ako súbor *Hybrid_new.hys*

```
SYSTEM Hybridny {
INTERFACE {
STATE {
REAL h1 [0, 2.4];          /*min a max výška hladiny prvej nádoby*/
REAL h2 [0, 2];          /* min a max výška hladiny druhej nádoby*/
INPUT { REAL q0 [0, 6]; } /* min a max prítok do prvej nádoby*/
OUTPUT { REAL y; }       /*výstupná veličina y - výšku hladiny v druhej nádobe*/
PARAMETER {
REAL T = 1;              /*perióda vzorkovania*/
REAL R1 = 1.2;           /*
REAL F2 = 3.72;          /*
REAL k11 = 4;            /*      zadané
REAL k22 = 3.56;         /*      v Tab.1 a Tab.3
REAL h = 1.35;          /*
REAL h2s1 = 1;          /*
:
}
}
IMPLEMENTATION {
AUX {
REAL z11, z12;          /*premenné rovníc pre prvú nádobu pre obe dynamiku*/
REAL z21, z22;          /* premenné rovníc pre prvú nádobu pre obe dynamiku */
BOOL above;             /*logická premenná - v ktorej dynamike je systém po splnení podmienky*/
}
AD { above = h2<=h; }
DA {
z11 = { IF (above) THEN (1-k1b/(F1s1/T))*(h1-h1s1)+(q0-q0s1)/(F1s1/T)+h1s1
ELSE 0 };
z21 = { IF (above) THEN (k1b/(F2/T))*(h1-h1s1)+(1-(k2b*T/F2))*(h2-h2s1)+h2s1
ELSE 0 };

z12 = { IF (~above) THEN
(1-k1s/(F1s2/T))*(h1-h1s2)+(k1s/(F1s2/T))*(h2h2s2)+(q0q0s2)/(F1s2/T)+h1s2
ELSE 0 };
z22 = { IF (~above) THEN (k1s/(F1s2/T))*(h1-h1s2)-(k1s/(F2/T)+k2s/(F2/T)-1)*(h2-h2s2)+h2s2
ELSE 0 };
}
CONTINUOUS {
h1 = z11+z12;
h2 = z21+z22;
}
OUTPUT {
y = h2;
}
}
}
```

Úloha č.5 : Návrh optimálneho stavového riadenia hydraulického systému dvoch nádob s hybridnou dynamikou s využitím princípu minimalizácie kvadratického funkcionálu

Pre systém zadaný v diskretnom stavovom opise

$$\begin{aligned}x((k + 1)T) &= \mathbf{F}x(kT) + \mathbf{G}u(kT) \\ y(kT) &= \mathbf{C}x(kT),\end{aligned}$$

pri návrhu optimálneho stavového riadenia minimalizujeme funkcionál v tvare:

$$J_M = x^T(M)Qx(M) + \sum_{k=0}^{M-1} (x^T(k)Qx(k) + u^T(k)Ru(k)),$$

v rámci neho možno meniť matice $Q \in R^{m \times m}$ a $R \in R^{r \times r}$, ktorými vieme zabezpečiť zmeny správania sa uzavretej slučky.

Optimálne stavové riadenia navrhujeme na základe stanovených cieľov riadenia a to do rovnovážneho a ustáleného stavu, z ktorých získame zákon riadenia:

rovnovážny stav: $u(k) = -\mathbf{k}_x x(k)$

ustálený stav: $u(k) = u_R(k) + u_f(k) = -\mathbf{k}_x x(k) + Nw(k),$

- vektor spätiväzobného zosilnenia regulátora \mathbf{k}_x možno určiť z rovnice:

$$\mathbf{k}_x(k) = (R + G^T P(k)G)^{-1} G^T P(k)F,$$

kde P predstavuje výsledok získaný riešením Riccatiho rovnice v diskretnom tvare:

$$P(k - 1) = Q + F^T P(k)F - F^T P(k)G(R + G^T P(k)G)^{-1} G^T P(k)F$$

- výpočet dopredného zosilnenia:

$$N = \frac{1}{C(I - (F - G\mathbf{k}_x^T))^{-1}G}$$

Optimálne riadenie pre hydraulický systém dvoch nádob s hybridnou dynamikou bolo zvolená váhová matica Q a matica R nasledovne:

$$Q = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, R = 1$$

Výsledné hodnoty zosilnení pre **dynamiku A**:

- vektor spätnoväzobného zosilnenia:

$$k_A = [-0.3578; 0,502]$$

- dopredné zosilnenie

$$N_A = 12,7795$$

Výsledné hodnoty zosilnení pre **dynamiku B**:

- vektor spätnoväzobného zosilnenia:

$$k_B = [-0,9636; 1,3030]$$

- dopredné zosilnenie

$$N_B = 17,4316$$

Z nich vieme zostaviť nasledujúce zákony riadenia do ustáleného stavu :

pre **dynamiku A**:

$$\Delta u_A(k) = -k_A \Delta x(k) + N_A \Delta w(k),$$

pre **dynamiku B**:

$$\Delta u_B(k) = -k_B \Delta x(k) + N_B \Delta w(k)$$

Následne hodnoty matíc F a G zo stavového popisu systému pre hybridný hydraulický systém dvoch nádob pri zvolených maticiach Q a R :

pre systém v **dynamike A** :

$$F_A = \begin{bmatrix} -\frac{k_{1b}}{F_{1s1}} & 0 \\ \frac{k_{1b}}{F_2} & -\frac{k_{2b}}{F_2} \end{bmatrix}, \quad G_A = \begin{bmatrix} 1 \\ F_{1s1} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$F_A = \begin{bmatrix} -0,5616 & 0 \\ 0,6041 & -0,4785 \end{bmatrix}, \quad G_A = \begin{bmatrix} 0,2499 \\ 0 \end{bmatrix},$$

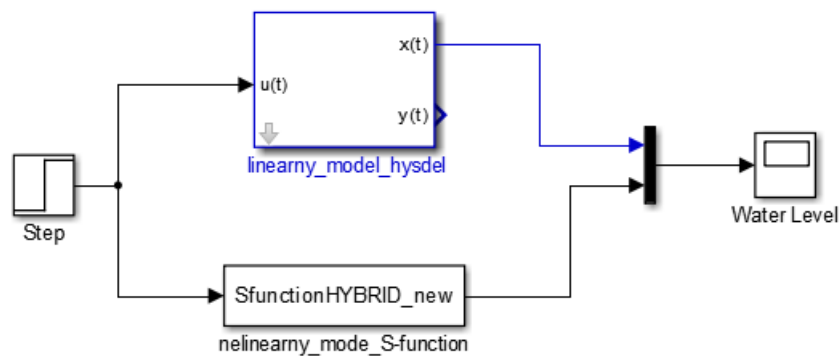
pre systém v **dynamike B** :

$$F_B = \begin{bmatrix} -\frac{k_{11}}{2F_{1s2}\sqrt{h_{1s2} - h_{2s2} + h}} & \frac{k_{11}}{2F_{1s2}\sqrt{h_{1s2} - h_{2s2} + h}} \\ \frac{k_{11}}{2F_{1s2}\sqrt{h_{1s2} - h_{2s2} + h}} & -\frac{k_{11}}{2F_{1s2}\sqrt{h_{1s2} - h_{2s2} + h}} - \frac{k_{22}}{2F_2 h_{2s2}} \end{bmatrix}, \quad G_B = \begin{bmatrix} 1 \\ F_{1s2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

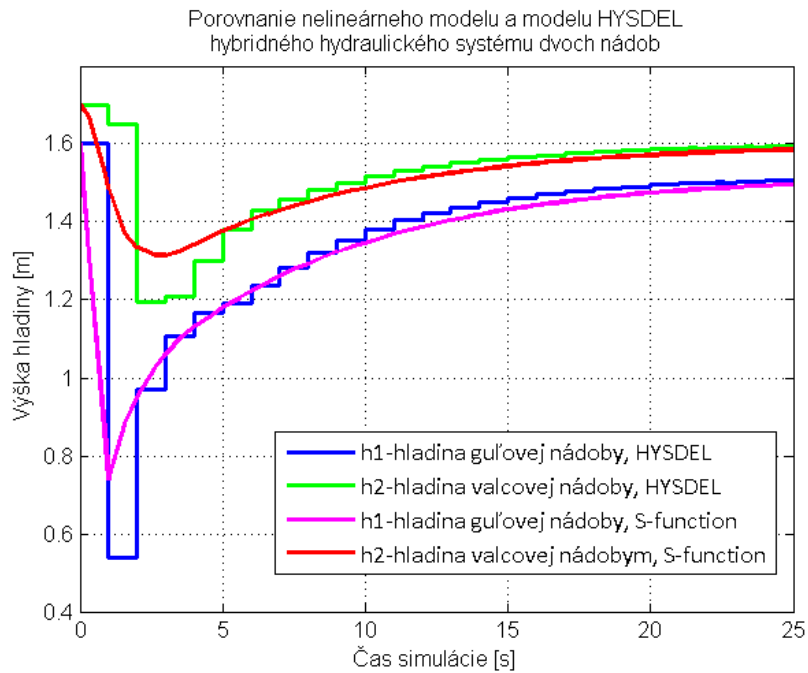
$$F_B = \begin{bmatrix} -0,4222 & 0,4222 \\ 0,4776 & -0,7766 \end{bmatrix}, \quad G_B = \begin{bmatrix} 0,2377 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Úloha č.6 : Implementácia lineárneho a nelineárneho modelu hydraulického systému dvoch nádob s hybridnou dynamikou do programového prostredia MATLAB/Simulink

Odchýlkový lineárny model hydraulického systému dvoch nádob s hybridnou dynamikou je namodelovaný v prostredí HYSDEL a nelineárny model daného systému je implementovaný prostredníctvom S-funkcií (bližší popis v bakalárskej práci v podkapitole 4.2). Tieto dva modely sú porovnávané pustením rovnakého vstupného signálu a pri rovnakých počiatkových podmienkach (ďalej PP) v simulačnej schéme na Obr. 3.



Obr. 3 Schéma nelineárneho modelu v S-funkcii a modelu HYSDEL hydraulického systému dvoch nádob s hybridnou dynamikou

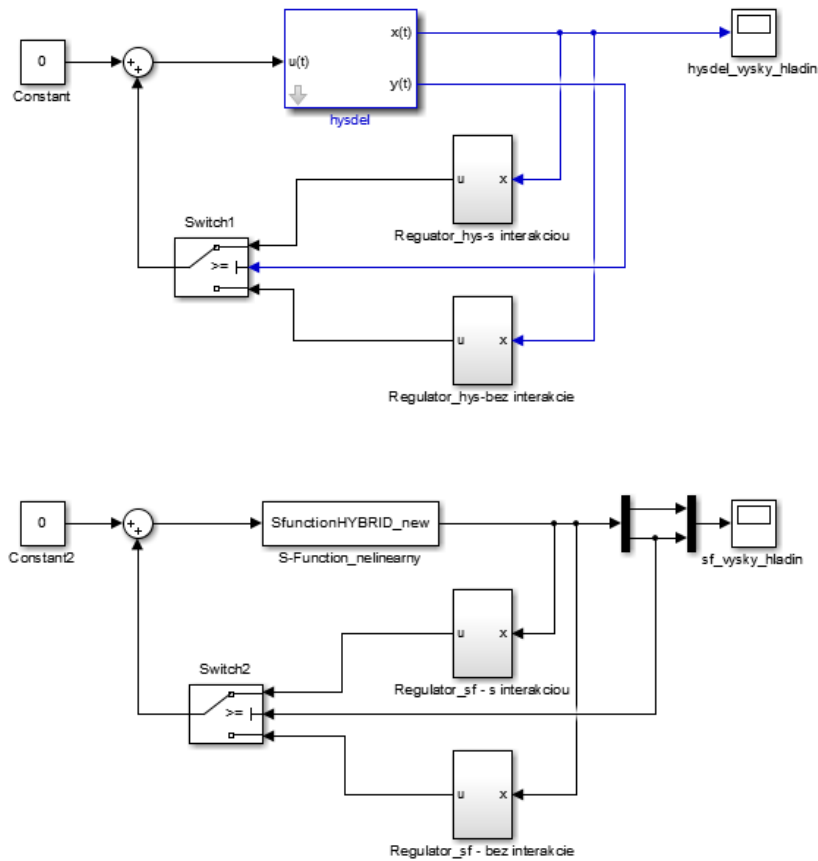


Obr. 4 Časové priebehy výšok hladín hybridného hydraulického systému v blízkosti pracovného bodu pre systém v *dynamike B*

Z časových priebehov výšky hladiny v oboch nádobách na Obr. 4 môžeme vidieť, že odchýlkový lineárny model namodelovaný v prostredí HYSDEL opisuje správanie dynamického systému správne, keďže jeho priebehy výšok hladín od istého simulačného času splývajú a dosahujú rovnakú hodnotu ako nelineárny model v S-funkcii.

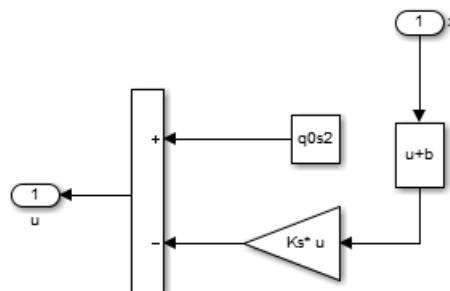
Úloha 6.a : Riadenie do rovnovážneho stavu

Modely hybridného hydraulického systému dvoch nádob s hybridnou dynamikou riadime do rovnovážneho stavu na základe navrhnutého optimálneho stavového riadenia v simulačnom prostredí MATLAB/Simulink v regulačnej schéme ne Obr. 5 :

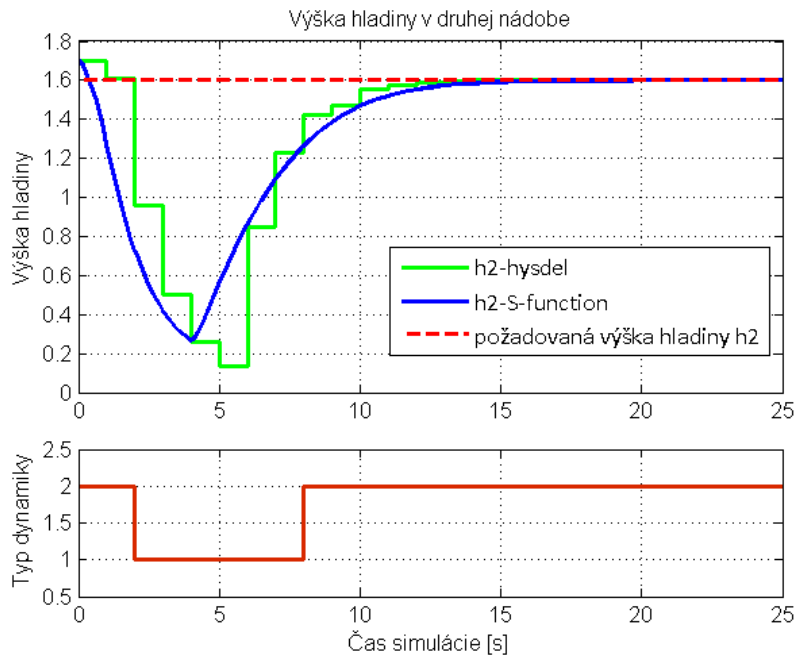


Obr. 5 Regulačná schéma optimálneho stavového riadenia nelineárneho modelu a modelu HYSDEL hybridného hydraulického systému dvoch nádob do rovnovážneho stavu

Kde pod maskou regulátora v prípade oboch modelov a pre **dynamiku A** a obdobne pre **dynamiku B** s príslušnými hodnotami je schéma:



Obr. 6 Schéma regulátora optimálneho stavového riadenia do rovnovážneho stavu

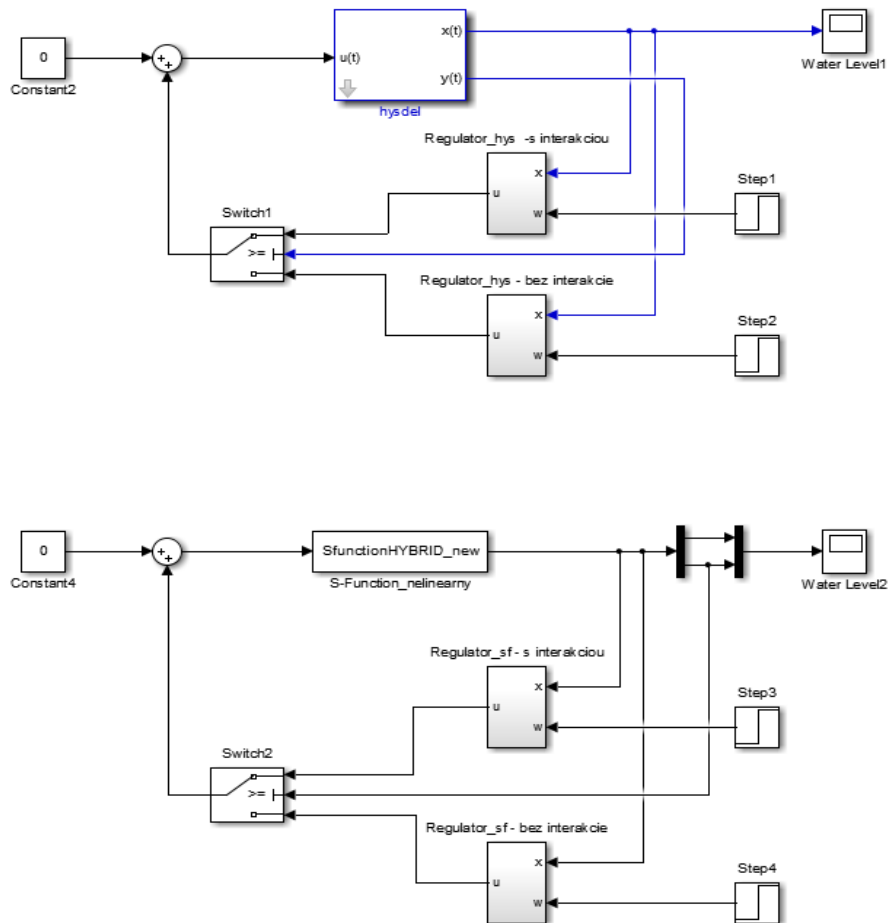


Obr. 7 Riadenie do rovnovážneho stavu v *dynamike B* na výšku hladiny $h_{2s2} = 1,6 \text{ m}$,
s $PP=[1.5;1.7]$

V tomto prípade sme riadili výšku hladiny v *druhej nádobe* z počiatočnej podmienky $h_2 = 1,7 \text{ m}$, do *rovnovážneho stavu* $h_{2s2} = 1,6 \text{ m}$. Na začiatku simulácie sa model nachádza v *dynamike B*, v ktorej je aj rovnovážny stav výšky hladiny. Nastal jav, že kvapalina najprv z nádoby vyteká aj keď jej výška hladiny je nad výškou našej požadovanej hladiny a teda sa dostane systém v čase simulácie $t = 2 \text{ s}$ do *dynamiky A*. Po krátkom čase, t.j. v čase simulácie $t = 8 \text{ s}$, sa pôsobením regulátora dostane hladina kvapaliny do jej rovnovážneho stavu.

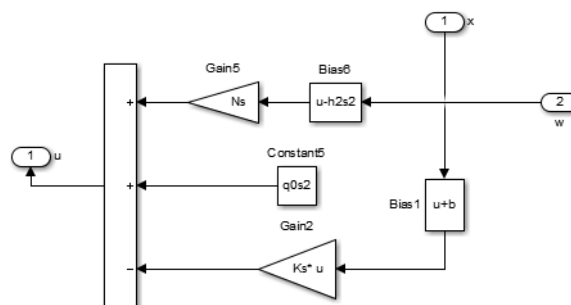
Úloha 6.b : Riadenie na ustálený stav

Modely hybridného hydraulického systému dvoch nádob s hybridnou dynamikou riadime na ustálený stav na základe navrhnutého optimálneho riadenia v simulačnom prostredí MATLAB/Simulink v regulačnej schéme ne Obr. 6 :



Obr. 8 Regulačná schéma optimálneho stavového riadenia nelineárneho modelu a modelu HYSDEL hybridného hydraulického systému dvoch nádob na ustálený stav

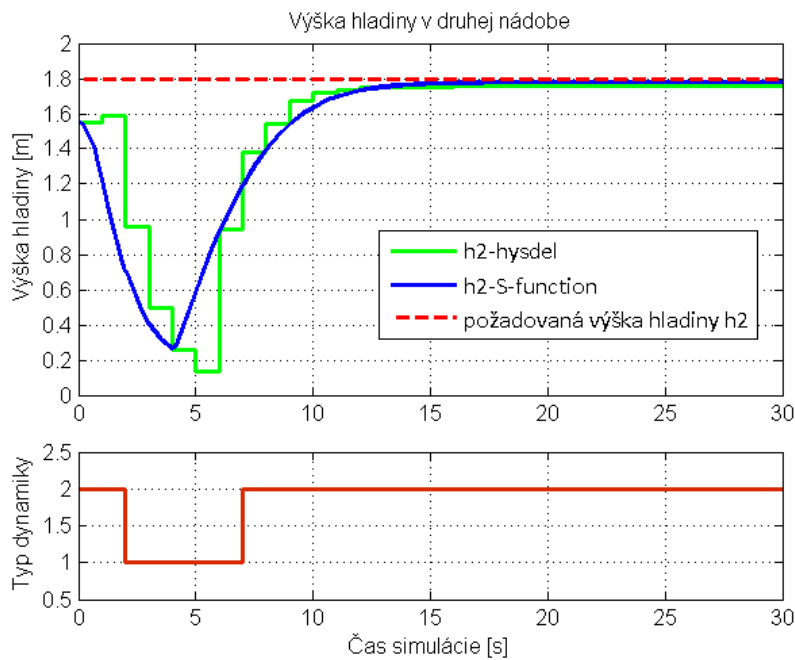
Kde pod maskou regulátora v prípade oboch modelov a pre **dynamiku A** a obdobne pre **dynamiku B** s príslušnými hodnotami je schéma:



Obr. 9 Schéma regulátora optimálneho stavového riadenia na ustálený stav

Výsledky optimálneho stavového riadenia na ustálený stav s použitím regulačnej schémy na Obr.8 a hodnotami matice $R = 1$ a váhovej matice $Q = [10 \ 0; 0 \ 1]$ a prepínania dynamiky na základe splnenia podmienky $h_2(t) > h$ môžeme vidieť na Obr. 10 a Obr. 11.

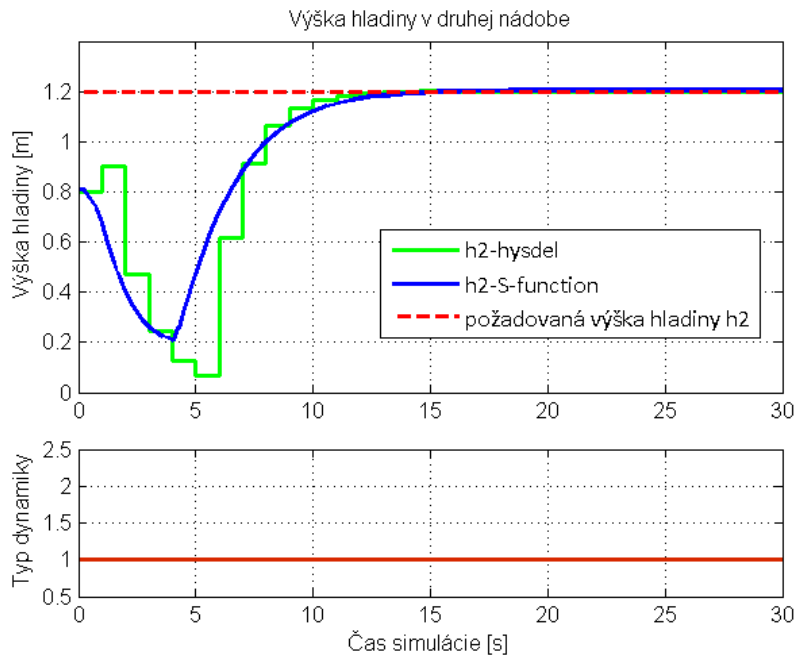
V prípade na Obr. 10 sme riadili výšku hladiny v *druhej nádobe* z počiatočnej podmienky $h_2 = 1,55 \text{ m}$, na *ustálený stav* $w(t) = 1,8 \text{ m}$.



Obr. 10 Riadenie na ustálený stav $h_{2ref} = 1,8 \text{ m}$, s PP=[1.5;1.55]

Na začiatku simulácie sa modely nachádzajú v *dynamike B*, v ktorej sa nachádza aj nový *ustálený stav* hladiny. Kvapalina najprv z nádoby vyteká a teda sa dostane systém do *dynamiky A* v čase simulácie $t = 2 \text{ s}$. Pôsobením regulátora v čase simulácie $t = 8 \text{ s}$ sa dynamika opäť prepne do *dynamiky B* a následne sa uradi hladina *druhej nádoby* na požadovaný *ustálený stav*.

Na Obr. 11 sme riadili výšku hladiny v *druhej nádobe* z počiatočnej podmienky $h_2 = 0,8 \text{ m}$, na *ustálený stav* $w(t) = 1,2 \text{ m}$.



Obr. 11 Riadenie na ustálený stav $h_{2ref} = 1,2m$, s PP=[0.8;0.8]

Na začiatku simulácie sa model nachádza v *dynamike A*, v ktorej sa nachádza aj nový *ustálený stav* hladiny. Kvapalina z nádoby vyteká a systém zostáva v *dynamike A*. Pôsobením regulátora kvapalina nevytečie úplne ale uriadí sa hladina *druhej nádoby* na požadovaný *ustálený stav* približne v čase simulácie $t = 14 s$. *Dynamika A* sa neprepne a ostáva aktívna počas celej doby simulácie.