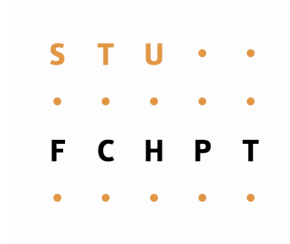


SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA

Fakulta chemickej a potravinárskej technológie
Oddelenie informatizácie a riadenia procesov
Radlinského 9, 812 37 Bratislava



**MODELOVANIE A RIADENIE
LABORATÓRNYCH ZÁSOBNÍKOV
KVAPALINY**

Bakalársky projekt

Vypracoval: Veronika Csizmadiaová
Školiteľ: Ing. Jana Závacká

Bratislava 2008

ABSTRAKT

Bakalárska práca sa zaoberá zistením konštánt ventila hydraulicko-pneumatickej sústavy, návrhom regulátorov pre riadenie pomocou experimentálnych metód syntézy regulátorov a vyhodnotením riadenia pomocou ukazovateľov kvality. Riadenie výšky hladín kvapaliny v druhom zásobníku je založené na ovplyvňovaní prietoku kvapaliny. Okrem teoretických simulácií a modelovania sa aplikovali aj výpočty na reálnom zariadení.

ABSTRACT

This thesis is dealing with modeling a hydraulic-pneumatic system. Mathematical model of this system correspond the mathematical model of liquid reservoirs with no interaction. The mathematical model is used for finding outflow coefficients of the hydraulic-pneumatic system. The thesis also contains a proposal for regulating with experimental methods of synthesis of regulators and evaluation of regulation with quality indices. Regulation of the levels of liquids in other reservoir is based on influencing the flow of the liquid. Besides theoretical simulations and modeling, calculations on real system were applied, as well.

Touto cestou sa chcem poďakovať vedúcej bakalárskej práce Ing. Jane Závackej za všestrannú pomoc, ochotu a odborné vedenie.

OBSAH

1	ÚVOD.....	7
2	MODELOVANIE ZÁSObNÍKOV KVAPALINY BEZ INTERAKCIE.....	8
	2.1 MATEMATICKÝ MODEL ZÁSObNÍKOV KVAPALINY BEZ INTERAKCIE.....	8
	2.2 ODVODENIE LINEARIZOVANÉHO DYNAMICKÉHO MODELU	11
3	HYDRAULICKO-PNEUMATICKÁ SÚSTAVA.....	13
	3.1 OPIS ZARIADENIA.....	13
4	HĽADANIE PARAMETROV MODELU	15
	4.1 KALIBRÁCIA VSTUPNÝCH A VÝSTUPNÝCH SIGNÁLOV	15
	4.1.1 Statická charakteristika čerpadla.....	15
	4.1.2 Statická charakteristika snímača tlaku.....	16
	4.1.3 Statická charakteristika nádrže	17
	4.2 VÝPOČET KONŠTÁNT VENTILOV ZÁSObNÍKOV	18
5	POROVNANIE NELINEÁRNEHO A LINEARIZOVANÉHO MODELU.....	20
6	IDENTIFIKÁCIA SYSTÉMU	22
7	NÁVRH RIADENIA.....	26
8	ZÁVER.....	33
	ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV	34
	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	36
	PRÍLOHY	37

1 ÚVOD

Výroby v chemickej a potravinárskej technológii sú už úplne automatizované. Sú to náročné výroby, ktoré vyžadujú kvalitnú reguláciu. Cieľom výroby je premeniť vstupné suroviny na žiadané produkty s minimálnymi nákladmi, čiže čo najekonomickejšie využiť zdroje surovín, energie, finančného kapitálu a ľudskej práce. Dôležité sú však aj ďalšie faktory a to sú bezpečnosť prevádzky, kvalita produktu, ekologické faktory, atď. Dobrý riadiaci systém by mal vedieť potlačiť vplyv vonkajších porúch, zabezpečiť stabilitu chemicko-technologických procesov a optimalizovať ich výkon. S týchto úvah treba vychádzať pri návrhu regulácie výrobných procesov.

Zásobníky kvapaliny patria medzi najrozšírenejšie zariadenia chemickej technológie. Slúžia na skladovanie kvapalných surovín a produktov. Fyzikálne sú reprezentované ako nádrže, do ktorých priteká a vyteká kvapalina s určitým prietokom. V zásobníkoch kvapaliny je najčastejšie regulovanou veličinou výška hladiny kvapaliny. Cieľom regulácie je udržať hladinu kvapaliny v nádržiach na žiadanej hodnote.

Aby sa mohla regulovať hladina kvapaliny v zásobníku, bude treba proces namodelovať. Na modelovanie procesov sa využívajú materiálové bilancie. Tieto bilancie sú základom pre vytvorenie algoritmov v počítačovom prostredí. Prvou časťou tejto práce je modelovanie zásobníkov kvapaliny bez interakcie, hľadanie neznámych parametrov a porovnanie matematického modelu so skutočným. V druhej časti je popísaná tematika riadenia, postup pri návrhu regulátorov pomocou experimentálnych metód a výsledky riadenia.

Bakalárska práca je rozdelená do ôsmich kapitol. V jednotlivých kapitolách je opísaný postup práce a získané výsledky. V prvej kapitole je odvodený matematický model zásobníkov kvapaliny, v tretej je opísané zariadenie na ktorom sa robili merania. V štvrtej kapitole je opísaný postup hľadania konštánt ventilov, v kapitole päť je porovnanie lineárneho a nelineárneho modelu. V šiestej časti je spracovaná identifikácia, použitá metóda so všetkými získanými výsledkami. Spracovanie návrhu riadenia a vyhodnotenie regulátorov je v kapitole sedem. Záver práce tvorí zhrnutie.

2 Modelovanie zásobníkov kvapaliny bez interakcie

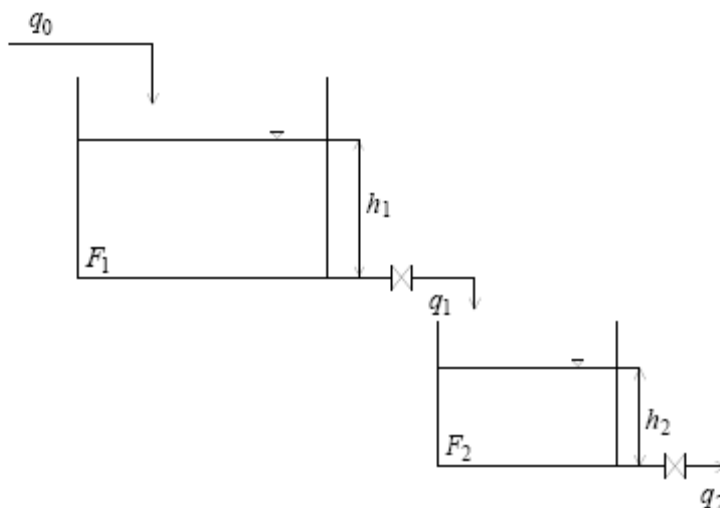
Teoretické modelovanie procesov je nevyhnutné pri návrhu regulácie. Matematické modely sú matematickou abstrakciou reálneho procesu. Teoretické modely sa zostavujú na základe materiálových a energetických bilancií. Tieto bilancie majú tvar diferenciálnych rovníc. Matematický model procesu poskytuje možnosť určiť správanie sa systému, ak sú známe jeho vstupy.

Pri vytváraní matematického modelu pre účel riadenia je dôležitá jednoduchosť, aby sa riadenie dalo realizovať v reálnom čase. Ak potrebujeme spoznať vlastnosti systému, vytvoríme taký model, ktorý čo najlepšie vystihuje fyzikálnu a chemickú podstatu procesu.

Matematické modely sa využívajú na hľadanie optimálnych začiatkových podmienok, na hľadanie poruchových miest, na návrh riadiacich systémov a na tréning obsluhy. [1]

Pomocou matematického modelu zásobníka kvapaliny bez interakcie možno určiť neznáme parametre modelu a zároveň navrhnuť regulátor.

Matematický model zásobníkov kvapaliny bez interakcie



Obr. 1: Dva zásobníky kvapaliny zapojené za sebou

Na (obr. 1) sú zásobníky kvapaliny bez interakcie, kde vstupná veličina je prietok q_0 , stavové veličiny procesu sú výšky hladín v zásobníkoch h_1 a h_2 a sledovanou výstupnou veličinou je h_2 . Potom materiálová bilancia zásobníkov [2] je:

(súčet vstupujúcich tokov hmotnosti) = (súčet vystupujúcich tokov hmotnosti) + (rýchlosť akumulácie hmotnosti v systéme)

$$\dot{m}_0(t) = \dot{m}_1(t) + \frac{dm_1(t)}{dt} \quad (1)$$

$$\dot{m}_1(t) = \dot{m}_2(t) + \frac{dm_2(t)}{dt} \quad (2)$$

$$q_0(t)\rho = q_1(t)\rho + \frac{d[V_1(t)\rho]}{dt} \quad (3)$$

$$q_1(t)\rho = q_2(t)\rho + \frac{d[V_2(t)\rho]}{dt} \quad (4)$$

Predpokladáme, že hustota kvapaliny a prierezy zásobníkov sú konštantné a potom môžeme písať:

$$q_0(t) = q_1(t) + \frac{d[V_1(t)]}{dt} \quad (5)$$

$$q_1(t) = q_2(t) + \frac{d[V_2(t)]}{dt} \quad (6)$$

q_0 je nezávislé od toho, čo sa deje v zásobníkoch, q_1 závisí od výšky hladiny kvapaliny v prvom zásobníku, q_2 závisí od výšky hladiny kvapaliny v druhom zásobníku.

Pre q_1 , q_2 a V_1 , V_2 platí:

$$q_1(t) = k_1 f_1 \sqrt{2g} \sqrt{h_1(t)} = k_{11} \sqrt{h_1(t)} \quad (7)$$

$$q_2(t) = k_2 f_2 \sqrt{2g} \sqrt{h_2(t)} = k_{22} \sqrt{h_2(t)} \quad (8)$$

$$V_1(t) = F_1 h_1(t) \quad (9)$$

$$V_2(t) = F_2 h_2(t) \quad (10)$$

Dosadením q_1 z rovnice (7) a q_2 z rovnice (8), V_1 a V_2 z rovníc (9), (10) do rovnice (5) a (6) dostaneme

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = \frac{q_0(t)}{F_1} - \frac{k_{11}}{F_1} \sqrt{h_1(t)} \quad (11)$$

$$\frac{dh_2(t)}{dt} = \frac{k_{11}}{F_2} \sqrt{h_1(t)} - \frac{k_{22}}{F_2} \sqrt{h_2(t)} \quad (12)$$

pri začiatočných podmienkach:

$$h_1(0) = h_{10} = h_1^s \quad (13)$$

$$h_2(0) = h_{20} = h_2^s \quad (14)$$

Keďže budeme sledovať výšku hladiny iba v druhom zásobníku, rovnica výstupu bude v tvare:

$$y(t) = h_2(t) \quad (15)$$

Veličiny nelineárneho matematického modelu:

stavové veličiny: $h_1(t)$, $h_2(t)$

vstupná veličina: $q_0(t)$

výstupná veličina: $h_2(t)$

Zásobníky sú v ustálenom stave, ak:

$$\begin{aligned} \frac{dh_1(t)}{dt} &= 0 \\ \frac{dh_2(t)}{dt} &= 0 \end{aligned} \quad (16)$$

Potom z rovníc (11), (12) v rovnovážnom stave vypočítame výšky hladín v zásobníkoch v ustálenom stave

$$h_2^s = \left(\frac{q_0^s}{k_{22}} \right)^2 \quad (17)$$

$$h_1^s = \left(\frac{q_0^s}{k_{11}} \right)^2 \quad (18)$$

2.2 Odvodenie linearizovaného dynamického modelu

Všeobecný model môže byť v tvare sústavy diferenciálnych algebraických rovníc alebo vektorovo-maticových diferenciálnych a algebraických rovníc. Za účelom riadenia je výhodné použiť linearizované matematické modely. Podstata linearizácie nelineárnych rovníc spočíva v predpoklade, že veličiny procesu sa menia tak, že odchýlky od ustáleného stavu sú v čase dostatočne malé. Pri linearizácii sa využíva rozvoj do Taylorovho radu a potom sa uvažujú len lineárne členy radu. Takto sa získa lineárny model. Výhodou lineárnych modelov je ich jednoduchosť.

Pri odvodzovaní linearizovaného dynamického modelu postupujeme nasledovne. Odčítaním dynamického matematického modelu a matematického modelu rovnovážneho stavu dostaneme [2]:

$$F_1 \frac{dh_1(t)}{dt} - F_1 \frac{dh_1^S}{dt} = q_0(t) - q_0^S - k_{11}\sqrt{h_1(t)} + k_{11}\sqrt{h_1^S} \quad (19)$$

$$F_2 \frac{dh_2(t)}{dt} - F_2 \frac{dh_2^S}{dt} = k_{11}\sqrt{h_1(t)} - k_{11}\sqrt{h_1^S} - k_{22}\sqrt{h_2(t)} + k_{22}\sqrt{h_2^S} \quad (20)$$

Následne zavedieme odchýlkové veličiny:

$$\text{vstupná veličina: } u(t) = q_0(t) - q_0^S \quad (21)$$

$$\text{stavové veličiny: } x_1(t) = h_1(t) - h_1^S \quad x_2(t) = h_2(t) - h_2^S \quad (22)$$

$$\text{výstupná veličina: } y(t) = x_2(t) = h_2(t) - h_2^S \quad (23)$$

Ďalej nasleduje linearizácia nelineárnych členov:

$$\sqrt{h_1} \Big|_{h_1=h_1^S} = \sqrt{h_1^S} + \frac{d\sqrt{h_1}}{dh_1} \Big|_{h_1^S} (h_1 - h_1^S) = \sqrt{h_1^S} + \frac{1}{2\sqrt{h_1^S}} x_1 \quad (24)$$

$$\sqrt{h_2} \Big|_{h_2=h_2^S} = \sqrt{h_2^S} + \frac{d\sqrt{h_2}}{dh_2} \Big|_{h_2^S} (h_2 - h_2^S) = \sqrt{h_2^S} + \frac{1}{2\sqrt{h_2^S}} x_2 \quad (25)$$

Potom lineárny stavový model zásobníka kvapaliny je

$$F_1 \frac{dx_1(t)}{dt} = u(t) - k_{11} \left(\sqrt{h_1^S} + \frac{1}{2\sqrt{h_1^S}} x_1 \right) + k_{11}\sqrt{h_1^S} \quad (26)$$

$$F_2 \frac{dx_2(t)}{dt} = k_{11} \left(\sqrt{h_1^s} + \frac{1}{2\sqrt{h_1^s}} x_1 \right) - k_{11} \sqrt{h_1^s} - k_{22} \left(\sqrt{h_2^s} + \frac{1}{2\sqrt{h_2^s}} x_2 \right) + k_{22} \sqrt{h_2^s} \quad (27)$$

kde

$$K_1 = \frac{k_{11}}{2\sqrt{h_1^s}} \quad (28)$$

$$K_2 = \frac{k_{22}}{2\sqrt{h_2^s}} \quad (29)$$

Potom po zavedení (28) a (29) výsledný tvar linearizovaného dynamického modelu má tvar

$$\frac{dx_1(t)}{dt} = \frac{1}{F_1} u(t) - \frac{K_1}{F_1} x_1(t) \quad (30)$$

$$\frac{dx_2(t)}{dt} = \frac{K_1}{F_2} x_1(t) - \frac{K_2}{F_2} x_2(t) \quad (31)$$

Rovnica výstupu:

$$y(t) = x_2(t) \quad (32)$$

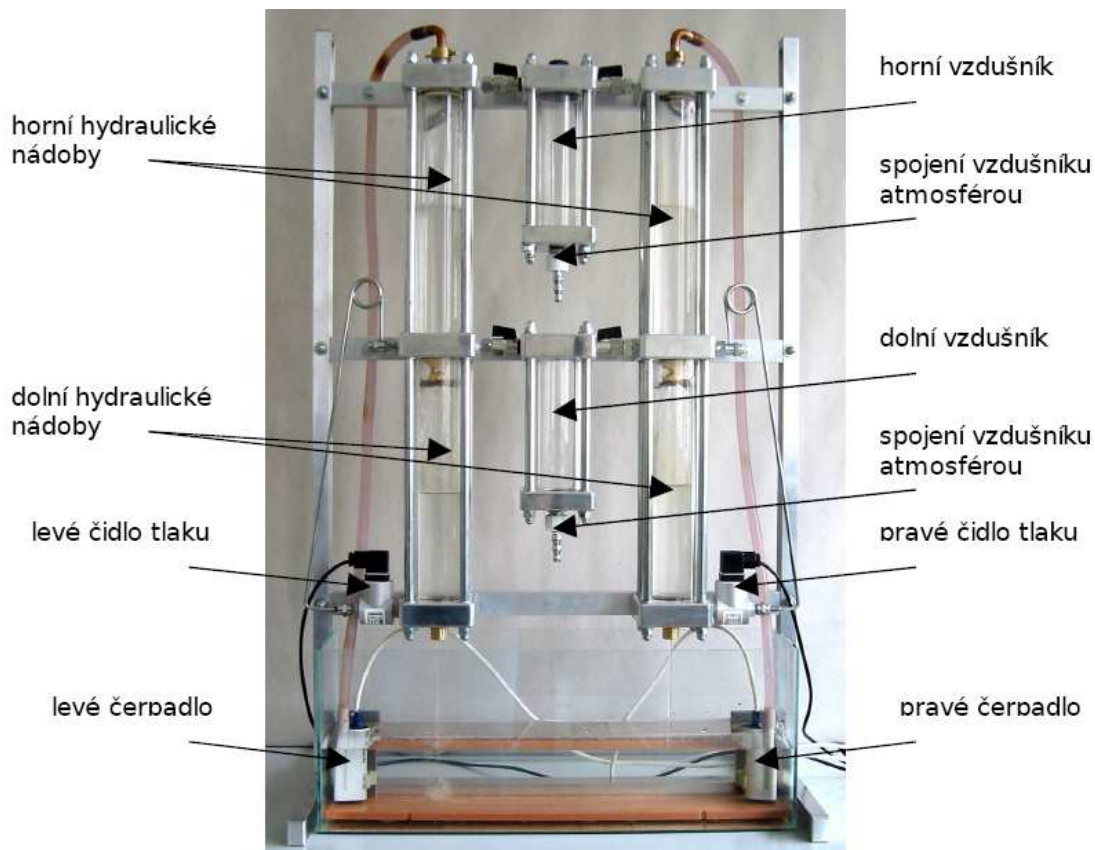
a začiatočné podmienky

$$x_1(0) = h_1(0) - h_1^s = h_1^s - h_1^s = 0 \quad (33)$$

$$x_2(0) = h_2(0) - h_2^s = h_2^s - h_2^s = 0 \quad (34)$$

3 Hydraulicko-pneumatická sústava

3.1 Opis zariadenia



Obr. 2: Hydraulicko-pneumatická sústava

Zariadenie (obr. 2) pozostáva z dvoch nad sebou umiestnených nádob a z dvoch vzdušníkov. Voda je čerpaná zo zásobnej nádrže do hornej nádoby. Odtiaľ preteká cez clonku do druhej nádoby. Voda z druhej nádoby vyteká cez clonku naspäť do zásobnej nádrže.

Vzdušníky slúžia pri skokovej zmene prietoku na vyrovnávanie tlaku nad hladinami v nádržiach. Ručným ovládaním ventilov vzdušníka sa dá zvoliť rôzna konfigurácia sústavy. S clonkou môžeme meniť dynamické vlastnosti sústavy.

Hladiny v dolných nádržiach sa merajú nepriamo diferenčnými tlakovými snímačmi. Výstupy sú signály elektrického napätia v rozsahu od 0 až 10V. Prietok vody sa riadi napätím v rozsahu od 0 až 10V. Vstupné a výstupné signály sú prepojené cez sériové

linku s využitím prístroja CTRL (elektronická ovládacia jednotka modelu). Komunikácia medzi akvizičnou kartou a Matlabom je zabezpečená RT Toolboxom [5].

Matlab [6] je vysokovýkonný integrovaný prostriedok pre vedecko-technické výpočty, modelovanie, návrh algoritmov, simulácie, analýzu a prezentáciu údajov, meranie a spracovanie signálov a návrh riadiacich systémov. Je charakterizovaný integráciou výpočtov, vizualizáciou a programovaním v jednoduchom užívateľskom prostredí. Dovoľuje vytvárať program aj v programovacích jazykoch C alebo Fortran. Medzi jeho základné operácie patria operácie s maticami a vektormi. Základnú časť Matlabu dopĺňajú špeciálne problémovo orientované knižnice, Toolboxy. Ku každému Toolboxu existuje pomerne rozsiahla dokumentácia. Na simuláciu dynamických systémov využíva Matlab program Simulink.

V nasledujúcej tabuľke (tab. 1) sú uvedené jednotlivé rozmery zariadenia.

Tab. 1: Geometrické rozmery zariadenia

Priemer ľavých zásobníkov	5 cm
Priemer pravých zásobníkov	4 cm
Priemer clonky zásobníka	0,4 cm
Priemer clonky dolného vzdušníka	0,02 cm
Výška zásobníka	31 cm
Priemer vzdušníka	5 cm
Výška vzdušníka	20,5 cm
Plocha pravých zásobníkov	12,5664 cm ²
Plocha ľavých zásobníkov	19,6349 cm ²

Na hydraulicko-pneumatickej sústave si môžeme zvoliť rôznu kombináciu zásobníkov. Môžeme modelovať a riadiť dva zásobníky kvapaliny bez interakcie, s interakciou alebo všetky štyri zásobníky. Pri meraniach som využívala iba pravý zásobník. Vzdušník bol po celý čas merania otvorený do atmosféry. Matematický model môjho systému zodpovedá matematickému modelu dvoch zásobníkov kvapaliny bez interakcie.

4 Hľadanie parametrov modelu

Neznáme konštanty ventilov zásobníkov sa dajú určiť pomocou nasledujúceho experimentu. Predpokladáme, že v ustálenom stave je výška hladiny v oboch nádržiach rovnaká a vstupný prietok sa rovná výstupnému prietoku.

Konštanty ventilov sa dajú vypočítať z prietoku a výšky hladín v ustálenom stave. Prietok sa zmeria ručne - meria sa pretečený objem kvapaliny za daný čas.

Namerané číselné hodnoty prietokov sú spracované do (tab. 2).

Tab. 2: Namerané hodnoty vstupných a výstupných signálov

u [V]	q [cm ³ /s]	h ^s [cm]	y [V]
2	8,6922	5,6	0,95
3	12,1942	10,7	2,9
4	14,5142	15,6	4,8
5	16,8240	21	6,7
6	19,3231	27,5	8,9

4.1 Kalibrácia vstupných a výstupných signálov

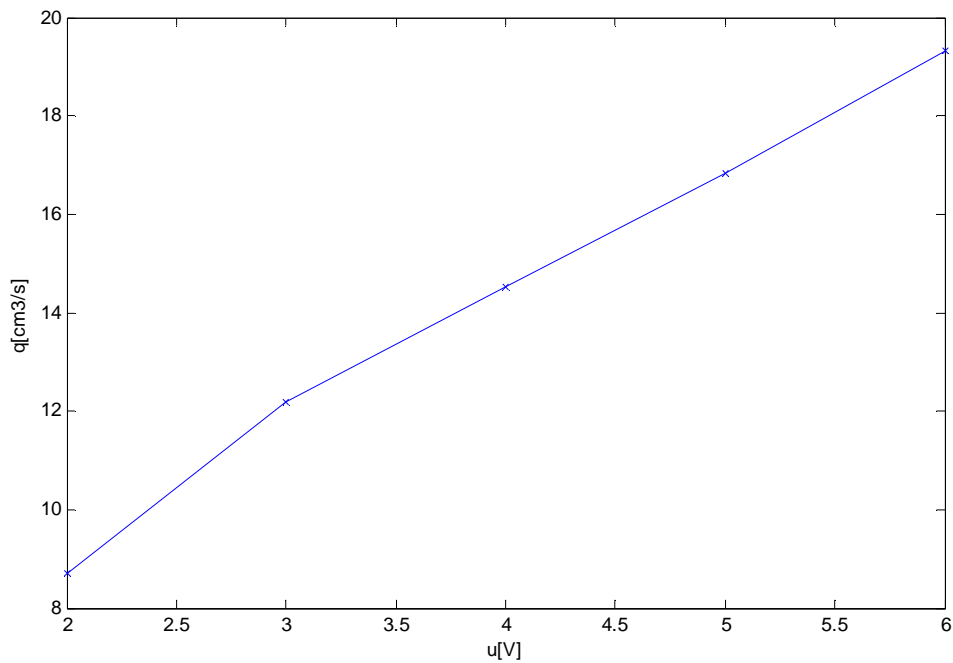
Pri hľadaní parametrov modelu bolo potrebné previesť vstupné signály elektrického napätia na cm³.s⁻¹ a výstupné signály na cm. Vstupný signál predstavoval vstupný prietok kvapaliny do zásobníka vo voltoch. Výstupný signál predstavoval výšku hladiny v druhom zásobníku tiež vo voltoch. Pomocou tlakového snímača bol snímaný výstupný signál elektrického napätia pri rôznych hodnotách vstupných signálov (tab. 2) a zisťovali sa hodnoty prietokov a výšky hladín.

Statická charakteristika čerpadla

Statická charakteristika čerpadla, teda závislosť prietoku od vstupného napätia je využitá na prevod vstupného signálu elektrického napätia na prietok kvapaliny.

Rovnica polynomickej regresnej priamky (obr. 3) je

$$q = 0.1144u^3 - 1.5163u^2 + 8.8418u - 3.8270 \quad (35)$$



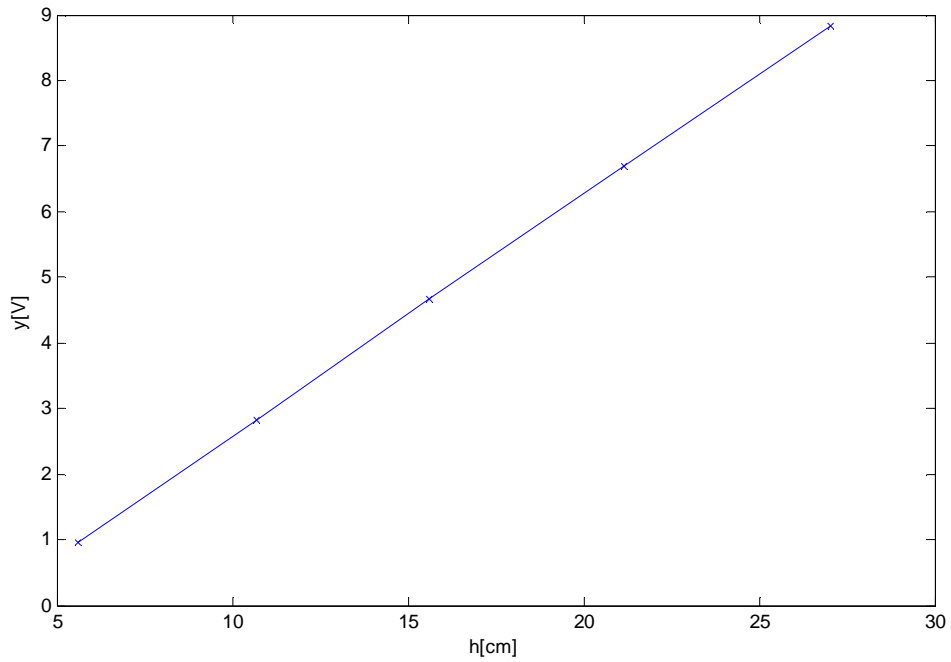
Obr. 3: Statická charakteristika čerpadla

4.1.2 Statická charakteristika snímača tlaku

Statická charakteristika snímača tlaku, teda závislosť výstupného napätia snímača od výšky hladín je využitá na prevod výšky hladiny zásobníku na výstupný signál elektrického napätia.

Rovnica regresnej priamky na (obr. 4) je

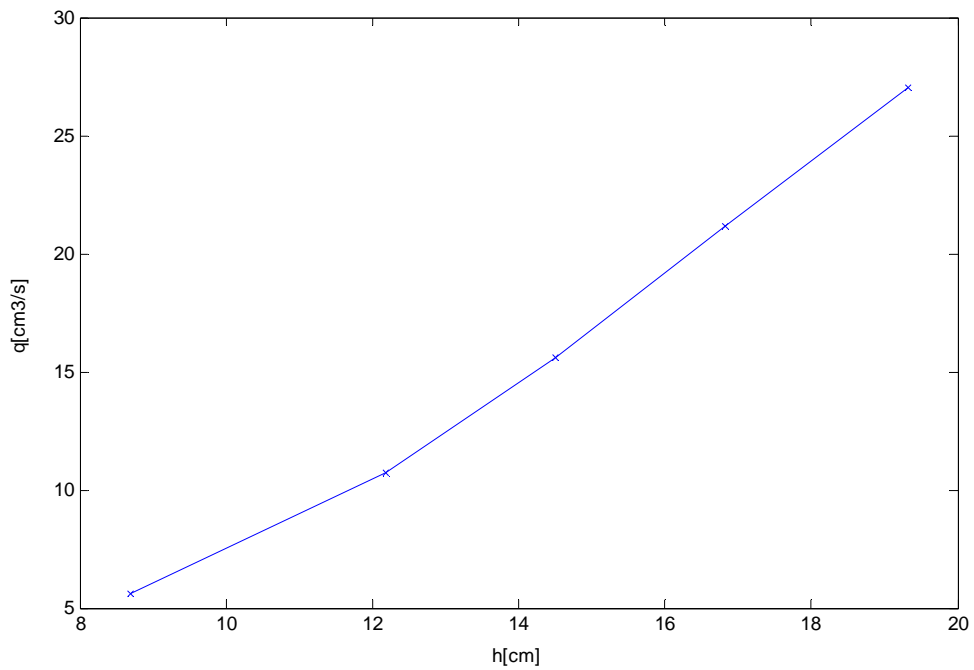
$$y = 0.3683h - 1.1056 \quad (36)$$



Obr. 4: Statická charakteristika snímača tlaku

4.1.3 Statická charakteristika nádrže

Zobrazenie statickej charakteristiky nádrže (závislosť výšky hladín od prietoku kvapaliny) je vykreslené na (obr. 5)



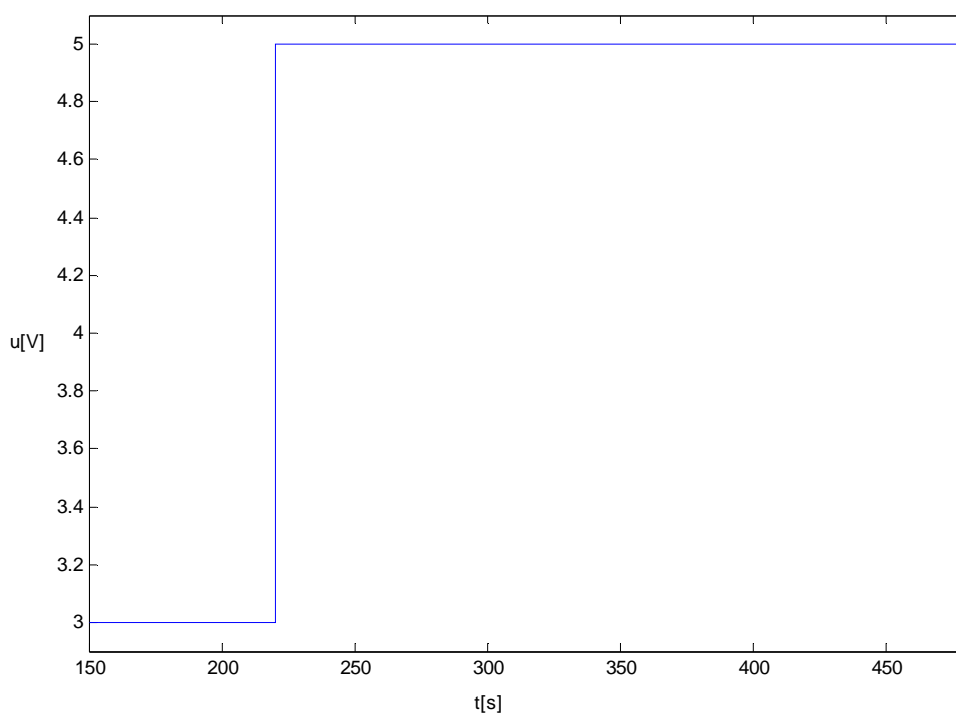
Obr. 5: Statická charakteristika nádrže

4.2 Výpočet konštánt ventilov zásobníkov

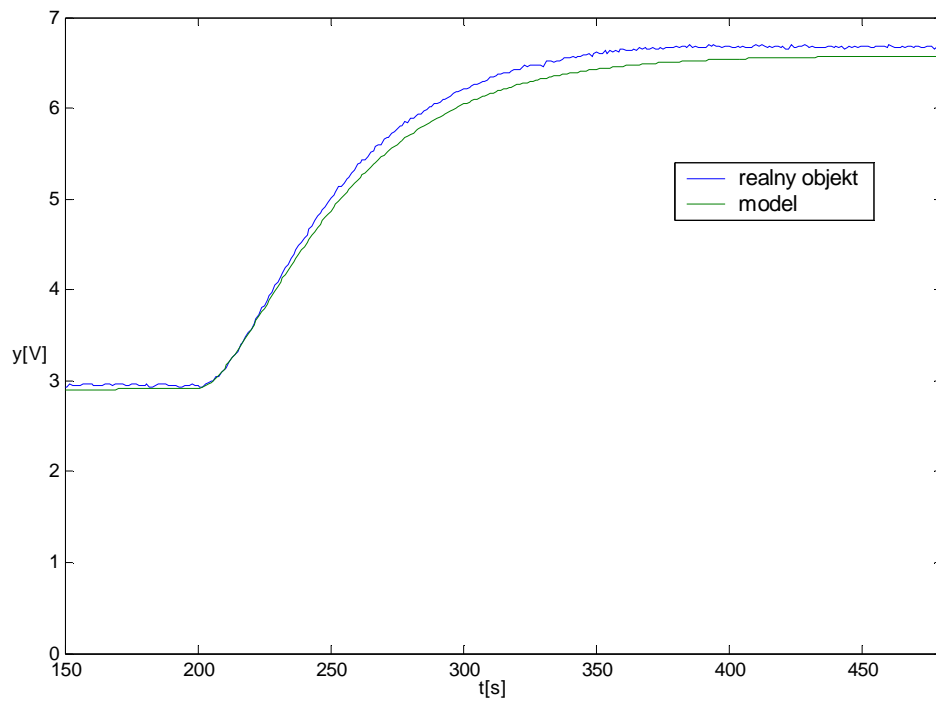
Z nameraných hodnôt prietokov q a výšky hladín h sú vypočítané konštanty ventilov podľa vzťahov (17) a (18). Hodnoty konštánt sú spriemerované pre celú pracovnú oblasť.

Vypočítané konštanty ventilov: $k_{11} = k_{22} = 3,6728 \text{ cm}^{2,5} \text{ s}^{-1}$.

Nameraná prechodová charakteristika bola porovnaná prechodovou charakteristikou matematického modelu s vypočítanými konštantami pomocou m-file-u *s-funkcia.m* a simulačnej schémy č.1, ktoré sa nachádzajú v prílohe. Na vstupe bola realizovaná skoková zmena z 3V na 5V, (obr.6). Výsledok je znázornený na (obr. 7). Odchýlky matematického modelu od reálneho objektu sú minimálne. Chyby mohli vzniknúť pri meraní prietoku a pri prepočte vstupných a výstupných signálov.



Obr. 6: Skoková zmena vstupného prietoku



Obr. 7: Porovnanie simulovaných a experimentálne meraných hodnôt

5 Porovnanie nelineárneho a linearizovaného modelu

Matematický model dvoch zásobníkov kvapaliny sa opiera o výsledky získané v časti: Modelovanie dvoch zásobníkov kvapaliny bez interakcie. V tejto časti je proces opísaný dvoma nelineárnymi diferenciálnymi rovnicami. Ďalej je odvodený linearizovaný matematický model pre okolie ustáleného stavu. Linearizovaný matematický model môžeme napísať aj vo forme stavového modelu. Stavový model dvoch zásobníkov kvapaliny je nasledovný:

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax + Bu \quad (37)$$

$$y(t) = Cx + Du \quad (38)$$

Na základe (30), (31) a (32) majú matice A,B,C,D nasledovný tvar

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} b_1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (39)$$

$$C = (0 \quad 1) \quad D = 0$$

kde

$$\begin{aligned} a_{11} &= -\frac{k_{11}}{2F_1\sqrt{h_1^S}} \\ a_{12} &= 0 \\ a_{21} &= \frac{k_{11}}{2F_2\sqrt{h_1^S}} \\ a_{22} &= -\frac{k_{22}}{2F_2\sqrt{h_2^S}} \\ b_1 &= \frac{1}{F_1} \end{aligned} \quad (40)$$

Lineárny stavový model sa môže používať na opis správania sa procesu len v okolí ustáleného stavu, v ktorom sa linearizácia robila.

Ustálený vstupný prietok do zásobníka je $3V$. Ustálená výška hladiny h_1^S a h_2^S v oboch zásobníkoch sa vypočíta podľa rovníc (17) a (18). Pri výpočte sa používajú tie

hodnoty konštant ventilov, ktoré sa experimentálne zistili v časti: Hľadanie parametrov modelu. Ustálená výška hladín v oboch zásobníkoch je:

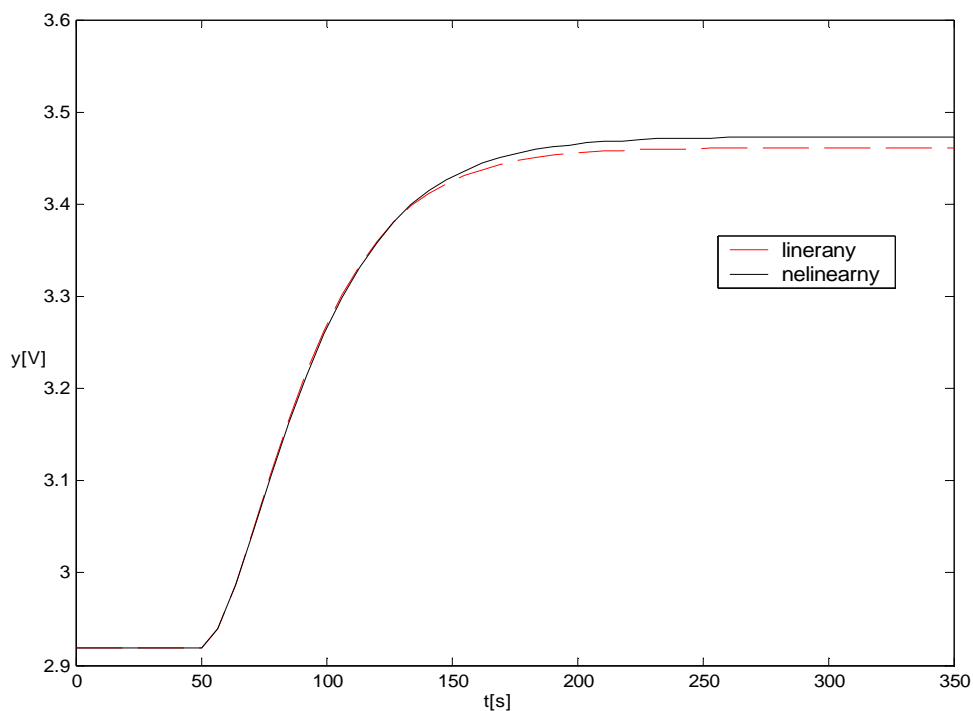
$$h_1^S = h_2^S = 10,7 \text{ cm}$$

Pri týchto podmienkach číselné hodnoty matíc A,B,C,D, ktoré sa vypočítali pomocou m-file-u *matice.m* majú tvar

$$A = \begin{pmatrix} -0.044 & 0 \\ 0.044 & -0.044 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 0.0796 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (41)$$

$$C = (0 \ 1) \quad D = 0$$

Pomocou simulačnej schémy č.2 bola porovnaná odozva nelineárneho a linearizovaného modelu na 10% skokovú zmenu vstupného prietoku. Výsledky sú zhrnuté do nasledujúceho grafu (obr. 8).



Obr. 8: Porovnanie nelineárneho a lineárneho modelu

Z obrázku vyplýva, že medzi nelineárnym a lineárnym modelom je rozdiel. Rozdiel je minimálny a vzniká preto, že stavové a akčné veličiny sú v odchýlkovom tvare. Nelineárny model je vždy presnejší ako lineárny. Lineárny model má však tú výhodu, že je jednoduchší. A táto vlastnosť sa využíva najmä pri návrhu regulátorov.

6 Identifikácia systému

Cieľom riadenia je zabezpečiť žiadanú hodnotu výšky hladín kvapaliny v zásobníku pomocou riadiacej veličiny vstupného prietoku kvapaliny. Najprv je však potrebné systém identifikovať. Identifikácia systému sa robí na základe vyhodnotenia nameranej prechodovej charakteristiky.

Prechodové charakteristiky sa merajú tak, že sa urobí skoková zmena na vstupe zariadenia a v čase sa sleduje zmena výstupnej veličiny. Vstupným signálom je skoková zmena jednej zo vstupných veličín, pričom ostatné vstupné veličiny sú konštantné. Je dôležité, aby pred uskutočnením skokovej zmeny bol systém v ustálenom stave.

Keďže skúmaný systém (zásobníky kvapaliny bez interakcie) je nelineárny, je nutné vykonať niekoľko skokových zmien rozličných veľkostí a znamienok.

Na základe viacerých prechodových charakteristík [3], ktoré sa získali pri rôznych skokových zmenách vstupného prietoku sa vytvorila výsledná prechodová charakteristika podľa vzorca

$$\hat{y}_i = \frac{\sum_{k=1}^N \Delta u_k y_{ik}}{\sum_{k=1}^N (\Delta u_k)^2} \quad (42)$$

kde

i – i -ty bod prechodovej charakteristiky,

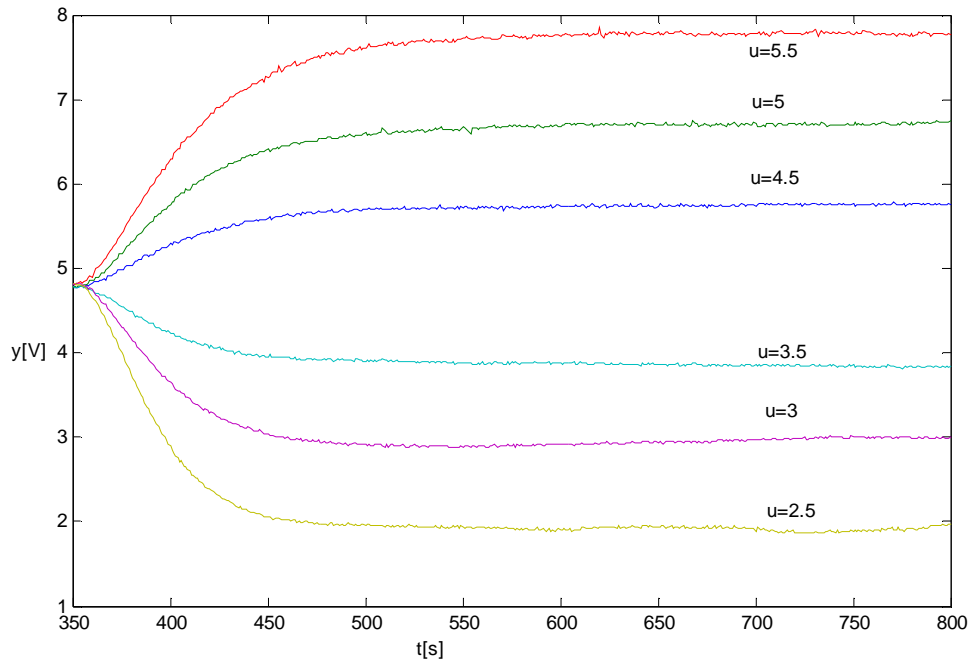
k – k -te meranie, $k = 1, \dots, N$,

Δu_k - skoková zmena vstupu pri k -tom intervale,

y_{ik} – hodnota výstupu pri k -tom meraní v i -tom intervale,

\hat{y}_i - výsledná hodnota prechodovej charakteristiky v čase $t = i\Delta t$, kde Δt je perióda vzorkovania

Na (obr. 9) sú znázornené namerané prechodové charakteristiky, ktoré sa používali na výpočet výslednej prechodovej charakteristiky (obr. 11). Táto bola vypočítaná v Matlabe pomocou m-file-u *priemer.m*. Skoková zmena sa urobila v čase 350s z 4V na 2.5V, 3V, 3.5V, 4.5V, 5V a 5.5V.



Obr. 9: Prechodové charakteristiky systému pri rôznych skokových zmenách vstupného prietoku

Na zistenie prenosu systému z nameranej prechodovej charakteristiky bola použitá Strejcová metóda [4], ktorá aproximuje dynamické vlastnosti identifikovaného systému pomocou náhradného prenosu. Náhradný prenos je približný prenos systému a má tvar

$$G(s) = \frac{Z}{(Ts + 1)^n} e^{-Ds} \quad (43)$$

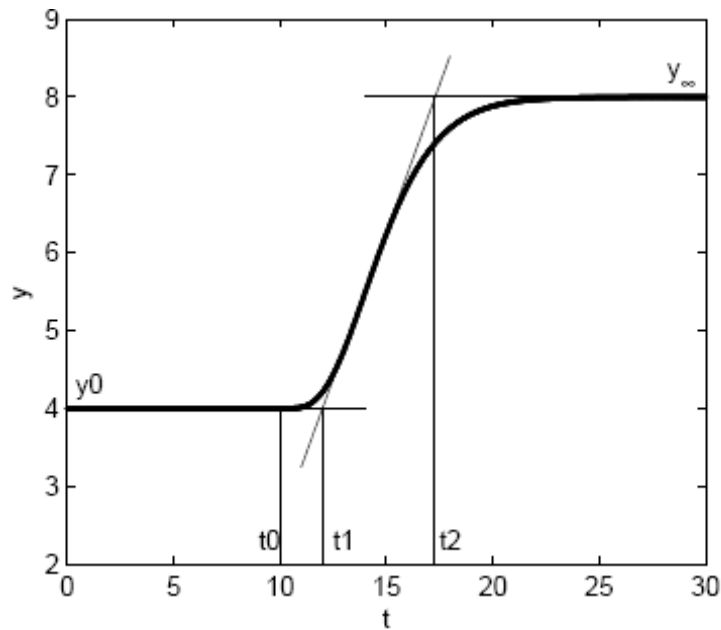
kde

Z – je zosilnenie,

T - je časová konštanta,

n – je rád dynamického systému,

D - dopravné oneskorenie



Obr. 10: Prechodová charakteristika aperiodického systému 2. rádu

Postup pri identifikácii (obr. 10):

1. Na prechodovej charakteristike sa určí inflexný bod
2. Odčítajú sa hodnoty t_u (čas priet'ahu) a t_n (čas nábehu)
3. Určí sa zosilnenie dynamického systému zo vzťahu

$$Z = \frac{y_{\infty} - y_0}{u_{\infty} - u_0}$$

4. Určí sa podiel $f(s) = \frac{t_u}{t_n}$
5. Z tabuľky, ktorá sa nachádza v [4] treba vybrať rád systému n , aby platilo

$$f(n) \leq f_s < f(n+1)$$

6. Dopravné oneskorenie D sa určí ako rozdiel medzi skutočným a fiktívnym časom nábehu.

$$D = [f_s - f(n)]t_n$$

7. Časová konštanta T sa určí podľa vzťahu

$$T = g(n)t_n$$

Výsledná prechodová charakteristika bola identifikovaná ako aperiodický systém 2. rádu podľa hore uvedeného postupu. Výsledky identifikácie sú zhrnuté do (tab. 3).

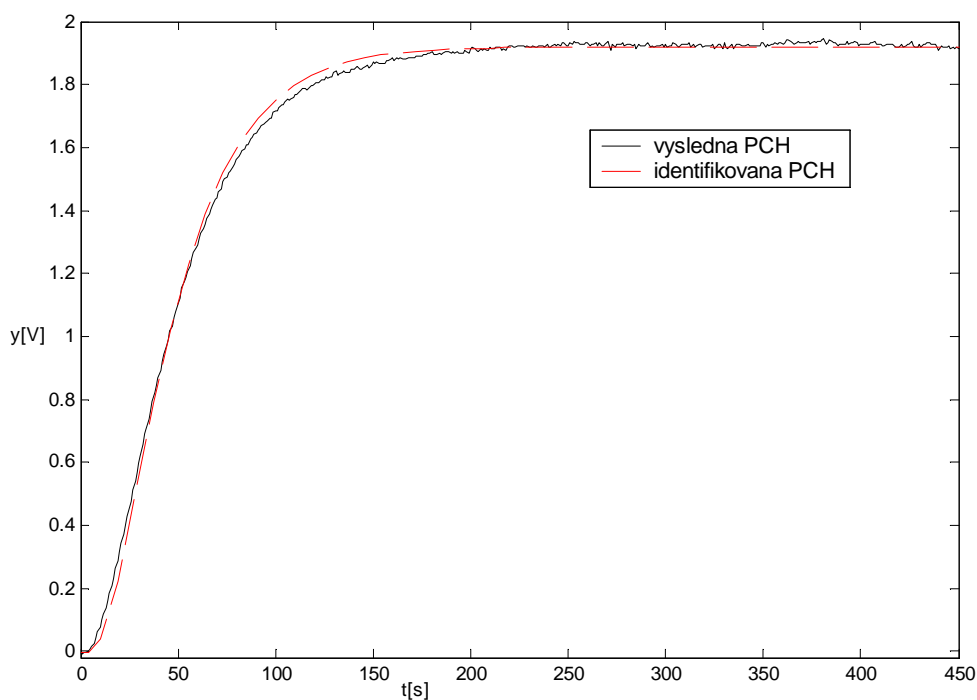
Tabuľka 3: Výsledky identifikácie

Čas prietahu t_u	[s]	10
Čas nábehu t_n	[s]	66
Rád systému n		2
Zosilnenie Z		1,9245
Časová konštanta T	[s]	24,3
Dopravné oneskorenie D	[s]	3,1350

Potom identifikovaný prenos má tvar

$$G(s) = \frac{1.9245}{590.5s^2 + 48.6s + 1} e^{-3.1350s} \quad (44)$$

Ako vidieť na (obr. 11) medzi výslednou prechodovou charakteristikou a prechodovou charakteristikou získanou z identifikácie nie je skoro žiadna odchýlka, takže identifikovaný prenos je správny.



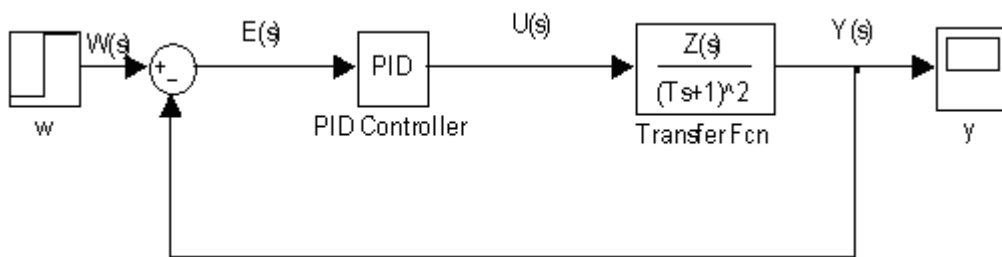
Obr. 11: Porovnanie výslednej prechodovej charakteristiky a charakteristiky získanej z identifikácie

7 Návrh riadenia

Na riadenie výšky hladín kvapaliny v druhom zásobníku bolo použité spätnoväzbové riadenie s PI a PID regulátorom. Riadiacou veličinou je vstupný prietok kvapaliny do zásobníka a riadenou veličinou je výška hladiny v druhom zásobníku.

Hlavným prvkom uzavretého regulačného obvodu je regulátor, kde sa porovnáva meraná a žiadaná veličina a podľa toho sa vyhodnocuje akčný zásah regulátora. Regulátor môže obsahovať tri členy: proporcionálny, integračný a derivačný člen. Spoločným pôsobením týchto členov sa môže dosiahnuť žiadaná kvalita regulácie.

Uvažujme uzavretý spätnoväzbový regulačný obvod s PI, PID regulátorom, podľa schémy na (obr. 12). Symbol $Y(s)$ predstavuje obraz výstupnej veličiny, $W(s)$ obraz žiadanej hodnoty, $E(s)$ obraz regulačnej odchýlky a $U(s)$ je obraz riadiacej veličiny.



Obr. 12: Uzavretý spätnoväzbový regulačný obvod

Prenos regulátora je podľa [4] opísaný rovnicou

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = Z_R \left(1 + \frac{1}{T_I} s + T_D s \right) \quad (45)$$

Úpravou vzťahu (45) a zavedením substitúcie $P = Z_R$, $I = \frac{Z_R}{T_I}$ a $D = Z_R T_D$ získame

prenos regulátora v tvare

$$G_R(s) = P + \frac{I}{s} + Ds \quad (46)$$

Na získanie konštánt regulátora boli vyvinuté analytické a experimentálne metódy. Pri experimentálnych metódach sa na základe výsledkov z identifikácie určia parametre PI a PID regulátora.

Na získanie konštánt PI a PID regulátora sa použila Ziegler-Nicholsova metóda, Cohen-Coon, Rivera-Morari a Chien, Hrones, Reswick-ova metóda.

Ziegler-Nicholsova metóda

Pomocou získaných konštánt z identifikácie sa vypočítajú konštanty PI a PID regulátora podľa vzorcov uvedených v (tab. 4)

Tabuľka 4: Konštanty regulátora podľa Ziegler-Nichols

Regulátor	Z_R	T_I	T_D
PI	$\frac{0,9 t_n}{Z t_u}$	$3,33 t_u$	
PID	$\frac{1,2 t_n}{Z t_u}$	$2t_u$	$0,5t_u$

Cohen-Coon

Z výslednej prechodovej charakteristiky sú určené tieto konštanty: zosilnenie Z, doba prietahu t_u a doba nábehu t_n . Pomocou týchto hodnôt sa potom vypočítajú konštanty regulátorov podľa (tab.5)

Tabuľka 5: Konštanty regulátorov podľa Cohen-Coon

Regulátor	Z_R	T_I	T_D
PI	$\frac{1 t_n}{Z t_u} \left[0,9 + \frac{1 t_u}{12 t_n} \right]$	$t_u \left[\frac{30 + 3 \frac{t_u}{t_n}}{9 + 20 \frac{t_u}{t_n}} \right]$	
PID	$\frac{1 t_n}{Z t_u} \left[\frac{4}{3} + \frac{1 t_u}{4 t_n} \right]$	$t_u \left[\frac{32 + 6 \frac{t_u}{t_n}}{13 + 8 \frac{t_u}{t_n}} \right]$	$t_u \left[\frac{4}{11 + 2 \frac{t_u}{t_n}} \right]$

Rivera-Morari

Pri tejto metóde sa zvolí časová konštanta uzavretého regulačného obvodu. Pomocou zvolenej časovej konštanty a konštánt získaných z identifikácie sa vypočíta zosilnenie, integračná a časová konštanta regulátora (tab. 6).

Tabuľka 6: Konštanty regulátorov podľa Rivera-Morari

Regulátor	Z_R	T_I	T_D	Doporučená voľba T_{URO} : $T_{URO} > 0,2t_n$
PI	$\frac{2t_n + t_u}{2ZT_{URO}}$	$t_n + \frac{t_u}{2}$		$\frac{T_{URO}}{t_u} > 1.7$
PID	$\frac{2t_n + t_u}{2Z(T_{URO} + t_u)}$	$t_n + \frac{t_u}{2}$	$\frac{t_n t_u}{2t_n + t_u}$	$\frac{T_{URO}}{t_u} > 0.25$

Chien, Hrones, Reswick

Táto metóda vychádza z Ziegler-Nicholsovej metódy. Pri tejto metóde je snaha dosiahnuť lepšie tlmenie v regulačnom obvode. Parametre regulátora sa vypočítajú pomocou vzorcov v (tab. 7)

Tabuľka 7: Parametre regulátora podľa Chien, Hrones, Reswick

Preregulovanie 0%			
Regulátor	Z_R	T_I	T_D
PI	$0,35 \frac{T}{ZD}$	$1,2T$	
PID	$0,6 \frac{T}{ZD}$	T	$0,5D$

Podľa hore uvedených metód a vzťahov som vypočítala zosilnenie, časovú a integračnú konštantu PI a PID regulátorov. Vypočítané konštanty regulátorov sú zhrnuté v (tab. 8).

Tabuľka 8: Vypočítané parametre navrhnutých regulátorov

metóda, regulátor	Z_R	T_I	T_D
Ziegler-Nichols PI	3,0865	33,3	
Ziegler-Nichols PID	4,1154	20	5
Cohen-Coon PI	3,1298	25,3149	
Cohen-Coon PID	4,7025	23,1560	3,5390
Rivera-Morari PI $T_{URO} = 23$	1,6040	71	
Rivera-Morari PID $T_{URO} = 23$	1,1180	71	4,6479
Reswick PI	1,4097	29,1600	
Reswick PID	2,4106	24,3	1,5675

Nevyhnutným kritériom je stabilita uzavretého systému riadenia. Pri prechode z jedného rovnovážneho stavu do iného stavu je tiež dôležité dynamické správanie sa systému. O vlastnosti systému v prechodovom stave hovorí kvalita regulácie, ktorá sa dá posúdiť pomocou ukazovateľov kvality regulácie [1].

Pri každej metóde boli porovnané navrhnuté PI a PID regulátory podľa ukazovateľov kvality. Na základe výsledkov vyhodnotenia sa vybral z dvoch regulátorov jeden, ktorý najlepšie spĺňal kritéria kvality regulácie. Z Ziegler-Nicholsovej metódy to bol PID regulátor, Cohen-Coon PID, Rivera-Morari PI a z Chien, Hrones, Reswick PI regulátor. Tieto regulátory sa potom vyhodnotili pomocou ukazovateľov kvality.

Ukazovatele kvality riadenia pre vybrané PI a PID regulátory sú zhrnuté v (tab. 9)

Tabuľka 9: Ukazovatele kvality riadenia

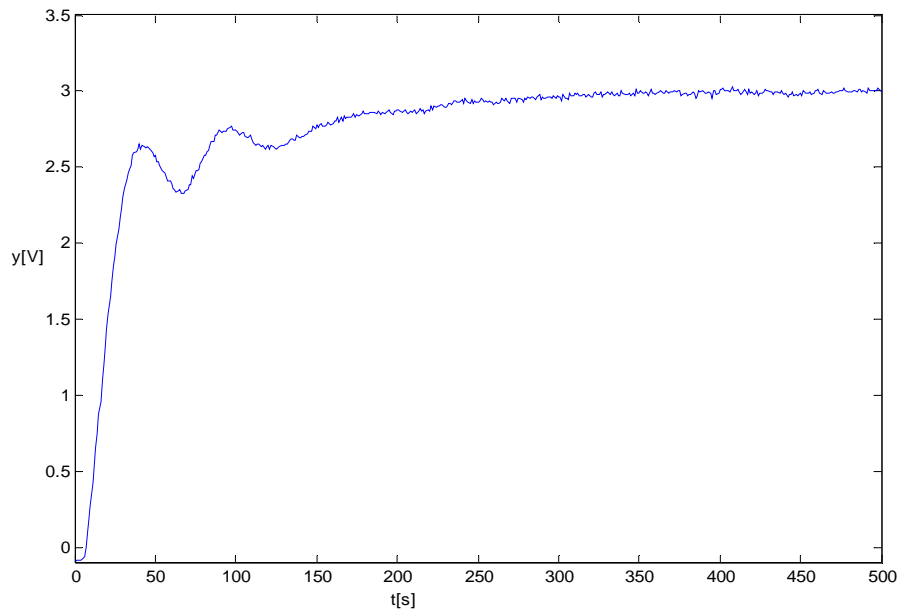
Ukazovatele	TRO (trvalá regulačná odchýlka)	σ_{MAX} [%] (maximálne preregulovanie)	t_{reg} [s] (čas regulácie)	t_{σ} [s] (čas max. preregulov vania)	Periodi- cita	Stabi- lita
Ziegler- Nichols PID	0	51.3	107	36	áno	áno
Reswick PI	0	14.5	205	56	áno	áno
Cohen-Coon PID	0	51.8	114	35	áno	áno
Rivera-Morari PI	0	-	340	-	nie	áno

Dobry regulátor by mal mať nízku hodnotu maximálneho preregulovania, krátky čas regulácie a mal by byť stabilný. To znamená, že zásobníky kvapaliny by mali byť naplnené za krátky čas a tak aby nepretiekli.

V reálnych zásobníkoch kvapaliny trvá veľmi dlho, kým hladina kvapaliny dosiahne žiadanú hodnotu. Preto pri výbere najvhodnejšieho regulátora som dala najväčšiu váhu na čas regulácie.

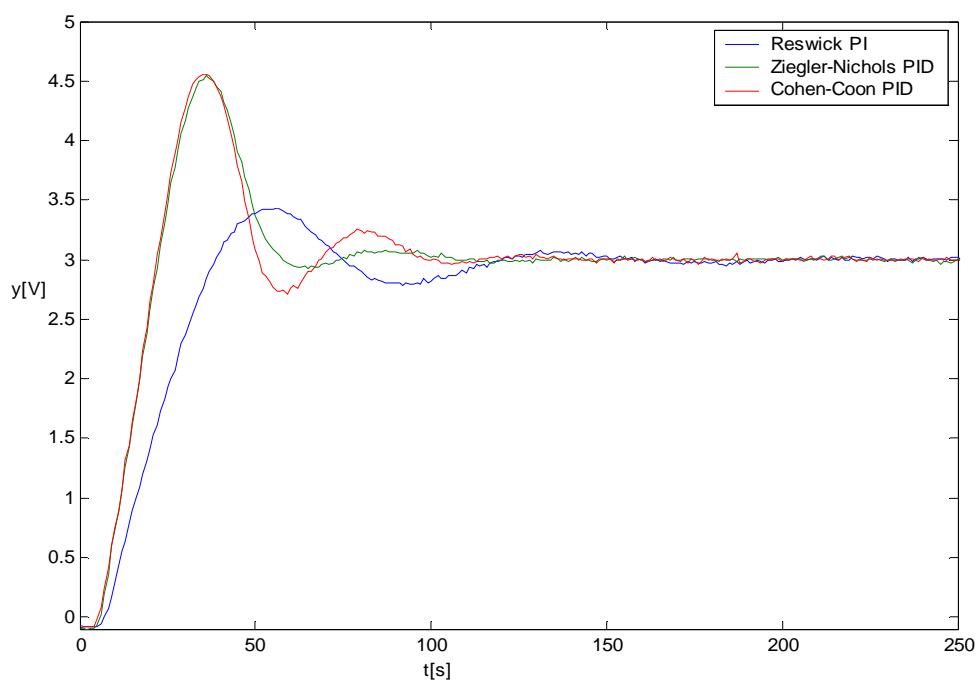
Z (tab. 9) vyplýva, že najlepší z navrhnutých regulátorov sú PID regulátory Ziegler-Nichols a Cohen-Coon, lebo majú najkratší čas regulácie. Nevýhodou týchto PID regulátorov je, že sa nemôžu používať pri najväčšom vstupnom prietoku kvapaliny. Totiž môže dôjsť k pretečeniu horných zásobníkov.

Keď je požiadavka na úplné naplnenie zásobníkov môže sa použiť PI regulátor navrhnutý metódou Chien, Hrones, Reswick, ktorý má nízku hodnotu maximálneho preregulovania. Ďalej je možné použiť aperiodicky regulátor navrhnutý metódou Rivera-Morari. Jeho priebeh je znázornený na (obr. 13), kde žiadaná hodnota je 3V. Keďže tento regulátor je aperiodicky môže sa používať v celom rozsahu vstupných prietokov.



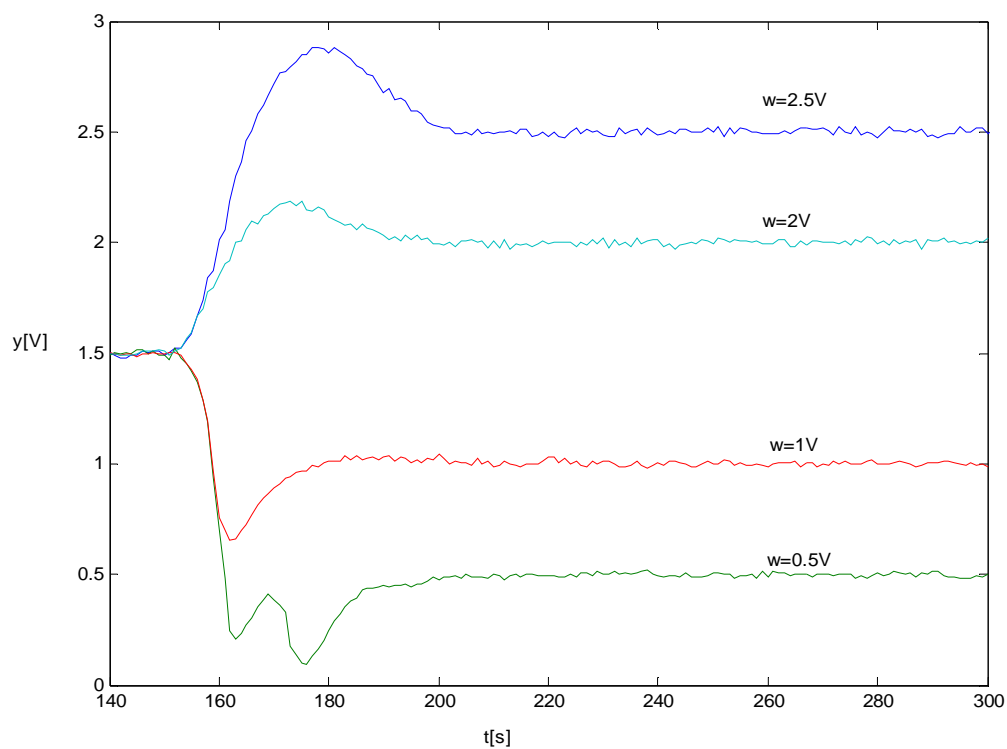
Obr. 13: Priebeh riadenia pomocou regulátora navrhnutého metódou Rivera-Morari

Z (obr. 14) vyplýva, že PI a PID regulátory vypočítané Ziegler-Nicholsovou, Chien, Hrones Reswickovou metódou a Cohen-Coonom uregulujú výstupnú veličinu na žiadanú hodnotu. Na simuláciu vypočítaných PI a PID regulátorov som použila *schému* č.3, ktorá sa nachádza v prílohe.



Obr. 14: Priebehy riadenia pomocou regulátorov navrhnutých metódami Ziegler-Nichols, Cohen-Coon a Chien, Hrones, Reswick

Na (obr. 15) je znázornený priebeh riadenia výšky hladín v druhom zásobníku pri rôznych skokových zmenách vstupného prietoku pomocou PID regulátora, navrhnutého Ziegler-Nicholsovou metódou.



Obr. 15: Priebeh riadenia výšky hladín v zásobníku

8 Záver

Úlohou tejto práce bolo oboznámenie sa s používanou hydraulicko-pneumatickou sústavou, nameranie jej vstupných a výstupných signálov a nájdenie konštánt ventilov nádrže tejto sústavy. Ďalej navrhnúť regulátory na tento systém pomocou experimentálnych metód.

Prvým krokom bolo odvodenie matematického modelu pravej časti hydraulicko-pneumatickej sústavy. Matematický model sústavy prislúchal k matematickému modelu dvoch zásobníkov kvapaliny bez interakcie. Z nameraných hodnôt prietokov q a výšky hladín h v ustálenom stave boli vypočítané neznáme konštanty ventilov nádrže podľa vzťahov (17) a (18). Nameraná prechodová charakteristika reálneho systému bola porovnaná s prechodovou charakteristikou matematického modelu s vypočítanými konštantami. Z výsledkov vyplýva, že vypočítané konštanty ventilov boli správne. Ďalej bol porovnaný nelineárny a lineárny matematický model. Výsledkom porovnania bolo, že nelineárny model je vždy presnejší ako lineárny.

Po nameraní prechodových charakteristík a vytvorení výslednej prechodovej charakteristiky nasledovala identifikácia Strejcovou metódou. Výsledná prechodová charakteristika bola identifikovaná ako aperiodický systém 2. rádu. Na získanie konštánt PI a PID regulátora som použila nasledujúce metódy: Zieglerovu-Nicholsovú, Cohen-Coon, Rivera-Morari a Chien, Hrones, Reswick-ovu metódu. Vypočítané PI a PID regulátory boli vyhodnotené pomocou ukazovateľov kvality.

Pri vyhodnotení regulátorov bola kladená požiadavka na krátky čas regulácie. Tejto požiadavke vyhovelí dva PID regulátory navrhnuté Ziegler-Nicholsom a Cohen Coonom. Tieto regulátory mali tú nevýhodu, že pri najväčšom vstupnom prietoku by došlo k pretečeniu horných zásobníkov. Tento nedostatok by sa dal vyriešiť s obmedzením vstupného prietoku kvapaliny do zásobníka.

Zoznam použitých symbolov

Symbol	Názov veličiny	Jednotka
\dot{m}_0	hmotnostný prietok kvapaliny na vstupe do prvého zásobníka	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
\dot{m}_1	hmotnostný prietok kvapaliny na výstupe z prvého zásobníka	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
\dot{m}_2	hmotnostný prietok kvapaliny na výstupe z druhého zásobníka	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
q_0	objemový prietok kvapaliny na vstupe do prvého zásobníka	$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
q_1	objemový prietok kvapaliny na výstupe z prvého zásobníka	$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
q_2	objemový prietok kvapaliny na výstupe z druhého zásobníka	$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
V_1	objem kvapaliny v prvom zásobníku	m^3
V_2	objem kvapaliny v druhom zásobníku	m^3
F_1	prierez prvého zásobníka	m^2
F_2	prierez druhého zásobníka	m^2
ρ	hustota kvapaliny	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
k_1, k_2	výtokové koeficienty clonky nádrže	
k_{11}, k_{22}	konštanty ventilov	$\text{m}^{2.5}\cdot\text{s}^{-1}$
f_1	prierez odporu medzi zásobníkom	m^2
f_2	prierez výtokového odporu z druhého zásobníka	m^2
g	gravitačné zrýchlenie	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
h_1	výška hladiny v prvom zásobníku	m
h_2	výška hladiny v druhom zásobníku	m
t	čas	s
h_1^S	výška hladiny v prvom zásobníku v ustálenom stave	m
h_2^S	výška hladiny v druhom zásobníku v ustálenom stave	m
q_0^S	objemový prietok kvapaliny na vstupe do prvého zásobníka v ustálenom stave	$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$

u	vstupná veličina	
y	výstupná veličina	
x	stavová veličina	
Z	statické zosilnenie systému	
T	časová konštanta	s
D	dopravné oneskorenie	s
Z _R	zosilnenie regulátora	
T _I	integračná konštanta regulátora	s ⁻¹
T _D	derivačná konštanta regulátora	s
s	argument Laplaceovej transformácie	

Zoznam použitej literatúry

- [1] A. Mészáros, J. Danko, J. Mikleš, M. Bakošová: Základy automatizácie, STU, Bratislava 1997, ISBN 80-227-0940-9
- [2] J. Mikleš, P. Dostál, A. Mészáros: Riadenie technologických procesov, STU, Bratislava, ISBN 80-227-0688-4
- [3] M. Fikar, J. Mikleš: Identifikácia systémov, STU, Bratislava 1998, ISBN 80-227-1177-2
- [4] M. Bakošová, M. Fikar, L. Čirka: Základy automatizácie. Laboratórne cvičenia zo základov automatizácie, STU, Bratislava 2003, ISBN 80-227-1831-9
- [5] J. Macháček, F. Dušek a kol. Hydraulicko-pneumatická soustava, pdf, 2005
- [6] <http://www.kirp.chnik.stuba.sk/~cirka/pedagogika>, Špeciálne jazykové prostriedky počítačov, Matlab a Simulink, Ing. Ľuboš Čirka

Prílohy

S-funkcia, *s-funkcia.m* nelineárneho modelu dvoch zásobníkov kvapaliny bez interakcie, ktorá sa používala pri hľadaní konštant ventilov a pri porovnávaní nelineárneho a linearizovaného modelu:

```
function [sys,h0,str,ts] = spojs(t,h,q,flag)
switch flag,
case 0
    [sys,h0,str,ts] = mdlInitializeSizes;
case 1
    sys = mdlDerivatives(t,h,q);
case 3
    sys = mdlOutputs(t,h,q);
case {2, 4, 9}
    sys = [];
otherwise
    error(['unhandled flag = ',num2str(flag)]);
end;

function [sys,h0,str,ts] = mdlInitializeSizes % inicializacia: do
tejto funkcie vkladáme vlastne údaje
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 2; % počet spojitých stavov
sizes.NumDiscStates = 0; % počet diskretných stavov
sizes.NumOutputs = 1; % počet výstupov
sizes.NumInputs = 1; % počet vstupov
sizes.DirFeedthrough = 0; % = 0 v prípade, že v rovniciach výstupu
nevystupuje u alebo nevystupuje matica D. Inak =1.
sizes.NumSampleTimes = 1; % = 1 pre spojité systémy
sys = simsizes(sizes);
h0=[0 0]; % začiatočne podmienky pre dif. rovnice
str = []; % str je prázdna matica
ts = [0 0]; % veľkosť periódy vzorkovania, pre spojite systémy =[0 0]

function sys = mdlDerivatives(t,h,q,k11,k22,F1,F2) % výpočet
derivácii: do tejto funkcie vkladáme vlastné údaje - rovnice dynamiky
k11=3.6728;
k22=3.6728;
F1=12.5664;
```

```

F2=12.5664;
if h(1)< 0
    h(1)=0;
end
if h(2)<0
    h(2)=0;
end

sys(1) =(1/F1)*q-(k11/F1)*sqrt(h(1));
sys(2) =(k11/F2)*sqrt(h(1))-(k22/F2)*sqrt(h(2));

function sys = mdlOutputs(t,h,q,y) % výpočet výstupov: do tejto
funkcie vkladáme vlastné údaje - rovnice výstupu
sys(1)=h(2);
if h(1)< 0
    h(1)=0;
end
if h(2)<0
    h(2)=0;
end
sys=[h(2)];
sys(1)=0.3683*h(2)-1.1056;

```

Matlab m-file *matice.m* - slúžia na výpočet matíc v časti 5

```

q0s=12.1942 % ustálený vstupný prietok
k11=3.6728; % konštanty ventilov
k22=3.6728;
F1=12.5664; % plocha zásobníka
F2=12.5664;

h2s= (q0s/k22)^2 % výška hladiny v prvom zásobníku v ustálenom stave
h1s = (q0s/k11)^2 % výška hladiny v prvom zásobníku v ustálenom stave
k1=k11/(2*(sqrt(h1s)))
k2=k22/(2*sqrt(h2s))
a11=-k1/F1
a12=0
a21=k1/F2
a22=-k2/F2
b1 =1/F1

```

```

A=[a11 a12;a21 a22]
B=[b1;0]
C=[0 1]
D=0

```

Matlab – m-file *priemer.m* - slúži na výpočet výslednej prechodovej charakteristiky

```

load y1.dat
load y2.dat
load y3.dat
load y4.dat
load y5.dat
load y6.dat
yx1=y1(351:803,3);
yx2=y2(351:803,3);
yx3=y3(351:803,3);
yx4=y4(351:803,3);
yx5=y5(351:803,3);
yx6=[y6(351:803,1) y6(351:803,3)];

u1=4.5-4;
u2=5-4;
u3=5.5-4;
u4=3.5-4;
u5=3-4;
u6=2.5-4;
u=u1^2+u2^2+u3^2+u4^2+u5^2+u6^2;

for i=1:1:453

y(i)=(u1*yx1(i,1)+u2*yx2(i,1)+u3*yx3(i,1)+u4*yx4(i,1)+u5*yx5(i,1)+u6*y
x6(i,2))/u;
end
t=yx6(:,1)-350;
y1=y';
yn=[t y1];
plot(yn(:,1),yn(:,2))

```

Schéma č.1

Simulinková bloková schéma, kde pri hľadaní konštánt ventilov bol použitý m-file *s-funkcia.m*:

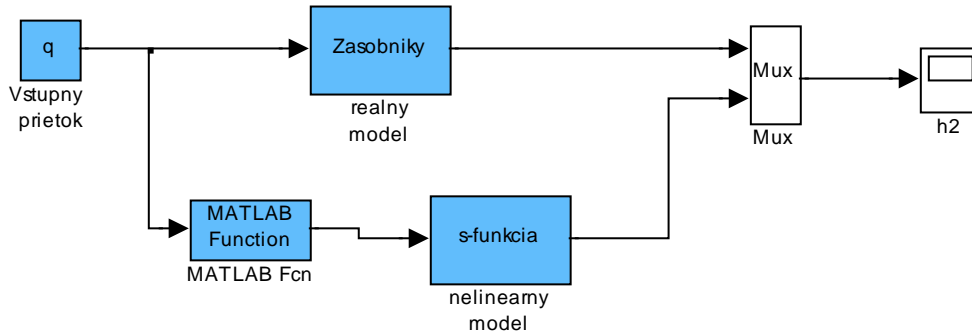


Schéma č.2

Simulačná schéma, ktorá sa používala pri porovnávaní nelineárneho a linearizovaného modelu:

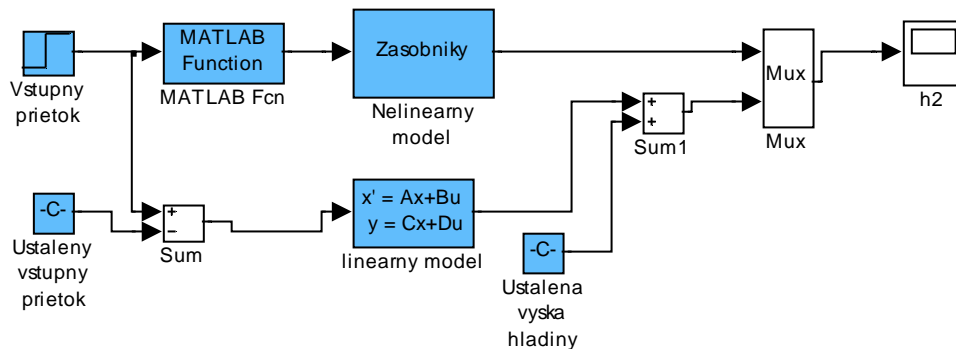


Schéma č.3

Simulinková bloková schéma, ktorá sa používala pri riadení hydraulicko-pneumatickej sústavy

