SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA

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

RIADENIE LABORATÓRNYCH ZÁSOBNÍKOV KVAPALINY

Bakalársky projekt

Vypracoval: Sónak Michal
Školiteľ: Ing. Jana Závacká

Bratislava 2009

VYHLÁSENIE AUTORA

Dolu podpísaný Michal Sónak čestne vyhlasujem, že som bakalársku prácu RIADENIE LABORATÓRNYCH ZÁSOBNÍKOV KVAPALINY vypracoval na základe poznatkov získaných počas štúdia a informácií z dostupnej literatúry uvedenej v práci. Práca vznikla v rámci riešenia výskumnej úlohy. Uvedenú prácu som vypracoval pod vedením Ing. Jany Závackej.

V Bratislave dňa 22.5.2009

....
podpis autora

ABSTRAKT

Záverečná bakalárska práca riadenie laboratórnych zásobníkov kvapaliny pozostáva z linearizácie nelineárneho matematického modelu rozvojom do Taylorovho radu. Po linearizácií sú vypočítané konštanty ventilov. Následne je daný systém identifikovaný na dosiahnutie žiadanej hodnoty systému, v našom prípade výšky hladiny kvapaliny v druhom zásobníku, čo je zároveň cieľom riadenia. Pre zistenie prenosu identifikovaného systému z nameranej prechodovej charakteristiky je použitá Strejcova metóda. Následne je navrhnuté riadenie, kde sa hľadá najvhodnejší regulátor, ktorý bude schopný v najkratšom čase uregulovať žiadanú hodnotu výšky hladiny.

ABSTRACT

The final bachelor essay on „Control of Laboratory Liquid Tank“ consists of linearization of non – linear mathematics models by expanding them into Taylor Row. After linerization constants of valves are calculated. Then the systems are necessary to be identified in order to get a required value of the system – a level of liquid in the liquid tank in our case. For an appoximate transmission of the identified system from measured transfer characteristics we use „Strejc“ method. Consequently we continue by controls proposal, where we are looking for the most suitable regulator, which would be able to regulate the required liquid level in the shortest possible time.

Poďakovanie

Ďakujem vedúcej bakalárskej práce Ing. Jane Závackej za pomoc pri získavaní vedomostí v oblasti modelovania a riadenia zásobníkov kvapalín a celkovo za vedenie, rady a pripomienky, ktoré mi poskytla pri zostavovaní bakalárskej práce.

OBSAH

1 Úvod

Zásobníky sú reálne zariadenia, ktoré sa využívajú na uskladnenie a plynulý alebo cyklický odber sypkých alebo kvapalných hmôt. Sú to vlastne nádrže rôznych rozmerov a tvarov, do ktorých priteká a z ktorých opäť odteká určitá surovina. Využívajú sa vo všetkých odvetviach priemyslu.

Základom a cieľom každého priemyslu je vyrábať požadované produkty z daných vstupujúcich surovín. Ide pri tom o čo najefektívnejšie využívanie nákladov, surovín a v neposlednom rade aj najefektívnejšie využívanie ľudskej pracovnej sily. S týmito aspektmi úzko súvisí aj bezpečnosť prevádzky a zamestnancov ako aj ochrana životného prostredia a získanie čo možno najkvalitnejšieho produktu. Každý priemysel využíva stroje, ktoré je potrebné riadiť na dosahovanie požadovaných výsledkov. Kvalitný riadiaci systém by mal minimalizovať vplyv vonkajších porúch, zabezpečiť stabilitu prebiehajúcich procesov a optimalizovať ich výkon. Pri návrhu riadenia treba brať tieto požiadavky do úvahy.

Modelovanie je skúmanie reálnych objektov pomocou spravidla umelo konštruovaných objektov, v ktorých sa vyjadrujú, charakterizujú a definujú iba vybrané vlastnosti, stránky a vzťahy reálneho originálneho objektu. Je to testovanie charakteristík reálneho objektu na ich špeciálne vytvorenom modeli. V tejto práci sa budeme zaoberať modelovaním zásobníkov kvapalín bez interakcie, kde našim cieľom bude uregulovať a udržať hladinu kvapaliny na zadanej žiadanej hodnote.

Táto práca je rozdelená do ôsmych kapitol, kde v druhej je popísané modelovanie zásobníkov kvapaliny bez interakcie, získanie matematického modelu zásobníkov a následná linearizácia nelineárnych diferenciálnych rovníc rozvojom do Taylorovho radu. V tretej kapitole je popísané zariadenie a základné informácie o použitých programoch MATLAB® a SIMULINK®. V ďalších kapitolách sa hľadajú parametre modelu, porovnáva sa nelineárny a linearizovaný model, Strejcovou metódou sa identifikuje systém a v siedmej kapitole je popísaný návrh riadenia a jednotlivé metódy syntézy regulátora. Poslednou ôsmou kapitolou je záver, kde je zhrnutá celá práca.

2 Modelovanie zásobníkov kvapaliny bez interakcie

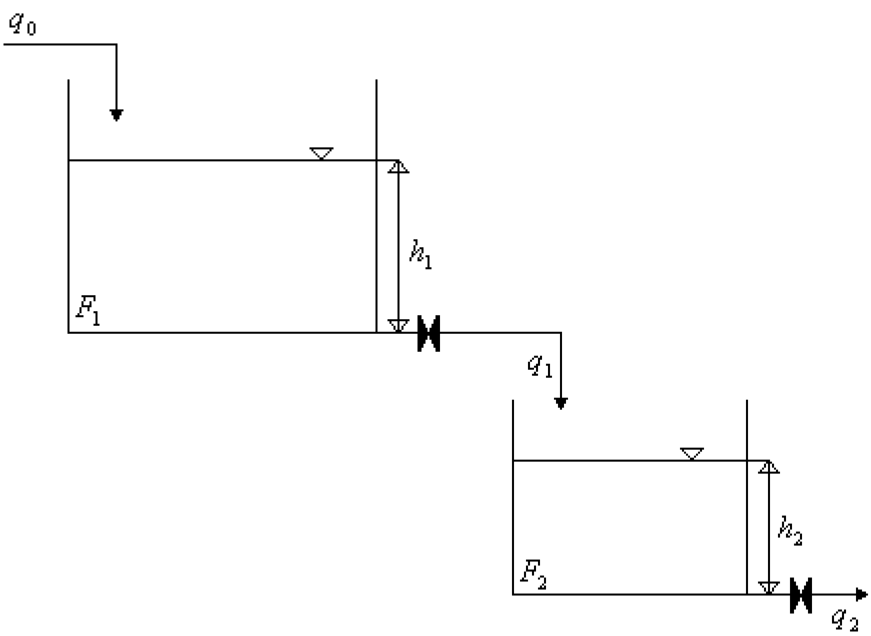
Cieľom matematického modelovania procesov je získanie takého procesu, na ktorom dobre spoznáme jeho statické a dynamické vlastnosti. Matematický model procesu je matematická abstrakcia reálneho procesu.

Na základe vstupných, stavových a výstupných veličín procesu, ak sú známe vstupy do systému, je možné určiť správanie sa celého procesu. Matematické modely majú uplatnenie pri určovaní optimálneho pracovného režimu, pri hľadaní poruchových miest a pri trénovaní nebezpečných situácií pri riadení procesov.

Pri vytváraní matematických modelov je treba mať vždy na zreteli cieľ, pre ktorý matematický model použijeme. Ide o systém alebo vlastnosti, ktoré čo najlepšie vystihujú fyzikálnu a chemickú podstatu procesu. Reálny proces môže byť opísaný teoretickým modelom, ktorý je odvodený s využitím fyzikálnych a chemických zákonov.

Teoretické modely sa používajú hlavne vo fáze projektovania, keď zariadenie, na ktorom budeme pracovať ešte neexistuje. Opisujú systém v celej oblasti jeho činností so všetkými väzbami, sú veľmi zložité a kladú väčšie nároky na simuláciu [2, 7].

2.1 Matematický model zásobníkov kvapaliny bez interakcie



Obr. 1: Dva zásobníky kvapaliny zapojené za sebou

Na obr. 1 je znázornená schéma zásobníkov kvapalín bez interakcie, kde q_0 je vstupný prietok, výšky hladín v zásobníkoch h_1 a h_2 sú stavové veličiny procesu a h_2

je sledovaná výstupná veličina. Veličiny nelineárneho matematického modelu sú:

stavové veličiny: $h_1(t)$, $h_2(t)$

vstupné veličiny: $q_0(t)$

výstupné veličiny: $h_2(t)$

Materiálová bilancia zásobníkov potom je [3] :

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

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

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

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

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

Predpokladáme, že hustota kvapaliny a prierezy zásobníkov sú konštantné :

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

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

a pre V_1, V_2 platí:

$$V_1(t) = F_1 h_1(t) \qquad V_2(t) = F_2 h_2(t) \tag{7}$$

Vstupný prietok q_0 je nezávislý od stavu v zásobníkoch, prietok q_1 závisí od výšky hladiny v prvom zásobníku, prietok q_2 od výšky hladiny v druhom zásobníku. Potom pre q_1, q_2 platí:

$$q_1(t) = k_{11}\sqrt{h_1(t)} \tag{8}$$

$$q_2(t) = k_{22}\sqrt{h_2(t)} \tag{9}$$

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

$$q_0(t) = k_{11}\sqrt{h_1(t)} + F_1 \frac{dh_1(t)}{dt} \tag{10}$$

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

Vydelením rovnice (10) F_1 a rovnice (11) F_2 dostaneme

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = \frac{q_0(t)}{F_1} - \frac{k_{11}}{F_1}\sqrt{h_1(t)} \tag{12}$$

$$\frac{dh_2(t)}{dt} = \frac{k_{11}}{F_2}\sqrt{h_1(t)} - \frac{k_{22}}{F_2}\sqrt{h_2(t)} \tag{13}$$

pri začiatočných podmienkach:

$$h_1(0) = h_{10} = h_1^S \tag{14}$$

$$h_2(0) = h_{20} = h_2^S \tag{15}$$

Rovnica výstupu bude v tvare:

$$y(t) = h_2(t) \tag{16}$$

nakoľko sledujeme výšku hladiny len v druhom zásobníku.

Ak

$$\frac{dh_1(t)}{dt} = 0 \qquad \frac{dh_2(t)}{dt} = 0, \tag{17}$$

zásobníky sú potom v ustálenom stave a následne z nich môžeme vypočítať výšky hladín, dosadením (17) do (10) a (11). Výšky hladín v rovnovážnom stave sú potom:

$$h_1^S = \left(\frac{q_0^S}{k_{11}}\right)^2 \qquad h_2^S = \left(\frac{q_0^S}{k_{22}}\right)^2 \tag{18}$$

2.2 Linearizácia rozvojom do Taylorovho radu

Vzťahy medzi veličinami systému získané na základe matematického modelu sú veľmi často popísané nelineárnymi diferenciálnymi rovnicami. Je to preto, že väčšina reálnych systémov je vo svojej podstate nelineárna. Takéto systémy sa riešia obtiažne a preto sa ich snažíme zjednodušiť. Medzi najčastejšie zjednodušenia patrí linearizácia.

Podstata linearizácie spočíva v predpoklade, že veličiny procesu sa menia tak, že odchýlky od ustáleného stavu sú v čase dostatočne malé. Pri linearizácií sa využíva rozvoj do Taylorovho radu a potom sa uvažujú len lineárne členy radu. Takto získame lineárny model. Výhodou lineárnych modelov je ich jednoduchosť.

Pri odvodzovaní linearizovaného dynamického modelu postupujeme takto. Odčítame dynamický matematický model a matematický model rovnovážneho stavu [3]:

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

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

Zavedieme odchýlkové veličiny :

vstupná veličina : $u(t) = q_0(t) - q_0^s$ (21)

stavové veličiny: $x_1(t) = h_1(t) - h_1^s$ $x_2(t) = h_2(t) - h_2^s$ (22)

výstupná veličina: $y(t) = x_2(t) = h_2(t) - h_2^s$ (23)

Ďalej nasleduje linearizácia nelineárnych členov:

$$\left.\sqrt{h_1}\right|_{h_1 = h_1^S} = \sqrt{h_1^S} + \left.\frac{d\sqrt{h_1}}{dh_1}\right|_{h_1^S} \left(h_1 - h_1^S\right) = \sqrt{h_1^S} + \frac{1}{2\sqrt{h_1^S}} x_1 \tag{24}$$

$$\left.\sqrt{h_2}\right|_{h_2 = h_2^S} = \sqrt{h_2^S} + \left.\frac{d\sqrt{h_2}}{dh_2}\right|_{h_2^S} \left(h_2 - h_2^S\right) = \sqrt{h_2^S} + \frac{1}{2\sqrt{h_2^S}} x_2 \tag{25}$$

Lineárny stavový model zásobníka kvapaliny je

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

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

kde

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

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

Dosadením (28) a (29) do (26) a (27) dostaneme:

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

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

Úpravou (30) a (31) dostaneme tvar linearizovaného dynamického modelu

$$\frac{dx_1(t)}{dt} = \frac{1}{F_1} u(t) - \frac{K_1}{F_1} x_1(t) \qquad (32)$$

$$\frac{dx_2(t)}{dt} = \frac{K_1}{F_2} x_1(t) - \frac{K_2}{F_2} x_2(t) \qquad (33)$$

Rovnica výstupu pre tento model je

$$y(t) = x_2(t) \qquad (34)$$

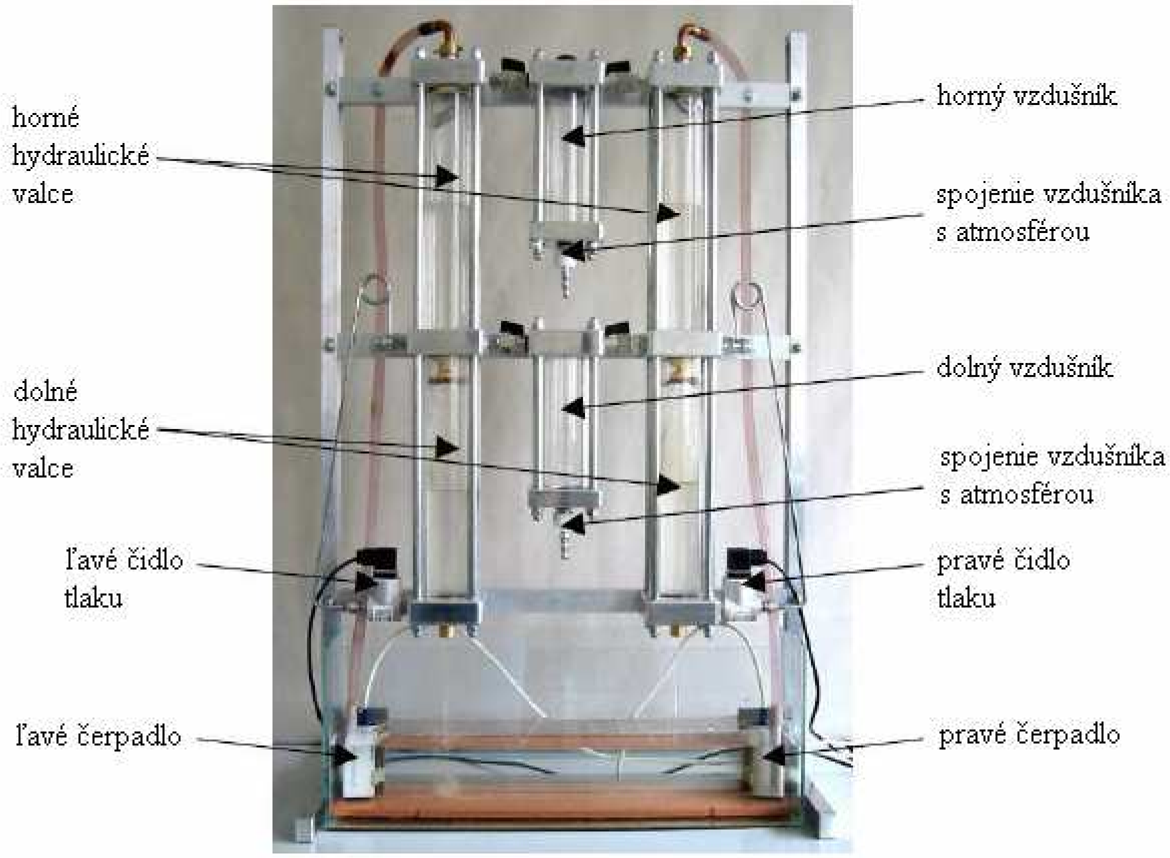
a následne začiatočné podmienky

$$x_1(0) = h_1(0) - h_1^S = h_1^S - h_1^S = 0 \qquad (35)$$

$$x_2(0) = h_2(0) - h_2^S = h_2^S - h_2^S = 0 \qquad (36)$$

3 Hydraulicko-pneumatická sústava

3.1 Popis zariadenia



Obr. 2: Zariadenie hydraulicko-pneumatickej sústavy

Zariadenie hydraulicko-pneumatickej sústavy (obr. 2) sa skladá z dvoch horných a dvoch dolných hydraulických valcov. Na dne spodných hydraulických valcov sú nepriamo diferenčné tlakové snímače, ktorými sa merajú výšky hladín. Medzi dvoma hornými, ako aj medzi dvoma dolnými hydraulickými valcami sa nachádza vzdušník.

Pod sústavou zásobníkov sa nachádza zásobná nádrž s destilovanou vodou, z ktorej sa voda čerpá do horného valca. Odtiaľ preteká clonkou do spodného valca a následne opäť do zásobnej nádrže. Množstvo pretečenej vody sa riadi napätím v rozsahu od 0V až 10V. Výstupy sú signály elektrického napätia v rozsahu od 0V až 10V. S clonkou meníme dynamické vlastnosti sústavy. Rôznu konfiguráciu sústavy ovládame ručným ovládaním ventilov vzdušníka. Vstupné a výstupné signály sú prepojené cez sériovú linku s využitím prístroja CTRL (elektronická ovládacia jednotka modelu) [6].

Nasledovná tab. 1 udáva rozmery hydraulicko-pneumatického zariadenia.

Tab. 1: 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

V práci sme sa venovali zásobníkom bez interakcie, čiže matematický model zodpovedá matematickému modelu dvoch zásobníkov bez interakcie. Pri meraniach sme používali iba pravú časť zariadenia – čiže pravý zásobník, pričom vzdušník na zariadení bol po celý čas otvorený do atmosféry. Jednotlivé výšky hladín ako aj prietoky sme zaznamenávali v počítači pomocou výpočtového prostredia MATLAB.

3.2 MATLAB® a SIMULINK®

MATLAB® je široko používaným výpočtovým prostredím pre výskum a vývoj v mnohých oblastiach priemyselnej, vedeckej a výučbovej činnosti [1]. Je to špičkové integrované prostredie pre vedeckotechnické výpočty, modelovanie, návrhy algoritmov, simulácie, analýzu a prezentáciu dát, paralelne výpočty, meranie a spracovanie signálov, návrhy riadiacich a komunikačných systémov. MATLAB je nástroj tak pre pohodlnú interaktívnu prácu ako aj pre vývoj širokého spektra aplikácií. MATLAB je celosvetový štandard v oblasti technických výpočtov a simulácií v oblasti vedy, výskumu a priemyslu. Svojim užívateľom poskytuje grafické a výpočtové nástroje, ale aj rozsiahle špecializované knižnice funkcií TOOLBOXy spolu s výkonným programovacím jazykom 4. generácie. Ku každému Toolboxu existuje pomerne rozsiahla dokumentácia. Komunikácia medzi akvizičnou kartou a Matlabom je zabezpečená RT Toolboxom.

Najsilnejšou stránkou MATLABu je mimoriadne rýchle výpočtové jadro s optimálnymi algoritmami. Výpočtové jadro, ktorého najpodstatnejšou súčasťou sú algoritmy pre operácie s maticami reálnych a komplexných čísel. MATLAB ponúka všetky bežné operácie ako násobenie, inverzie, determinanty atď. a v najjednoduchšej forme ho možno použiť ako maticový kalkulátor. Grafika v MATLABe umožňuje ľahké zobrazenie a prezentáciu výsledkov získaných výpočtom. Je možné vykresliť rôzne druhy grafov: dvojrozmerné pre funkcie jednej premennej, trojrozmerné pre funkcie dvoch premenných, histogramy, koláčové grafy atď. Všetkým grafickým objektom je možné takmer ľubovoľne meniť vzhľad a to ako pri ich vytváraní, tak aj pri ich vykreslení.

Simulink® je program na simuláciu a modelovanie dynamických systémov, ktorý využíva algoritmy MATLABu pre numerické riešenie nelineárnych diferenciálnych rovníc. Umožňuje rýchlo a ľahko vytvárať modely dynamických sústav vo forme blokových schém a rovníc, simulovať rozsiahle systémy rýchlo, presne a s efektívnym využitím pamäti počítača. Pomocou SIMULINKu a jeho grafického editora môžeme vytvárať modely lineárnych, nelineárnych, v čase diskrétnych alebo spojitých systémov. Hierarchická štruktúra modelov umožňuje koncipovať aj veľmi zložité systémy do priehľadnej sústavy subsystému prakticky bez obmedzenia počtu blokov.

4 Hľadanie parametrov modelu

Predpokladáme, že v ustálenom stave sú výšky v pravom hornom aj dolnom zásobníku ustálené na určitej hodnote, pričom vstupný aj výstupný prietok majú rovnakú hodnotu. Neznáme konštanty ventilov sme určili z prietokov a výšok hladín v ustálenom stave pri určitých hodnotách napätia čerpadla. Hodnoty napätia čerpadla boli v rozsahu od 0V do 10V.

Pracovali sme pri hodnotách 2V až 6V, kedy sme pri rôznych hodnotách vstupných signálov snímali výstupné signály elektrického napätia a tým sme zisťovali hodnoty prietokov a výšky hladín.

Hodnota 2V bola minimálna hodnota, pri ktorej bolo možné odčítať výšku hladiny v zásobníku. Naopak hodnota 6V bola maximálna prípustná hodnota, ktorú sme mohli použiť, aby sme predišli pretečeniu horného zásobníka, kedy by sa prečerpávaná kvapalina dostala do horného prívodu čidiel tlaku a mohla by spôsobiť ich zničenie.

Na hydraulicko-pneumatickej sústave sme si pomocou ventilov nastavili požadovaný systém bez interakcie a namerané hodnoty sme zhrnuli do tab. 2.

Tab. 2: Namerané hodnoty vstupných a výstupných signálov

u [V]	q [$cm^3.s^{-1}$]	h [cm]	y [V]
2	9,06	6	0,4911
3	11,78	11,2	2,5109
4	14,73	15,7	4,3000
5	17,32	21,4	6,4983
6	19,15	27,2	8,8000

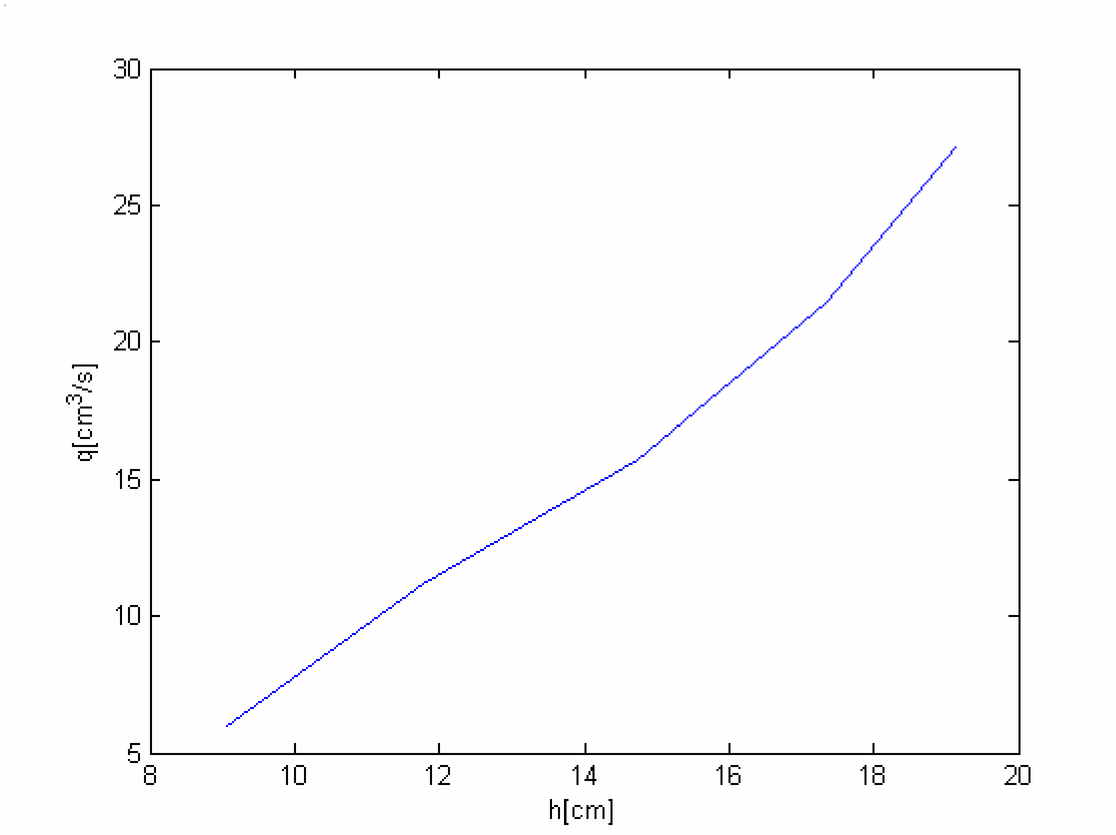
4.1 Kalibrácia signálov

Vstupný signál, predstavujúci vstupný prietok kvapaliny a výstupný signál predstavujúci výšku hladiny kvapaliny boli v jednotkách volty [V]. Bolo potrebné previesť ich na hodnoty vyjadrené v cm. Tak bol kalibrovaním prevedený vstupný prietok kvapaliny vo voltoch na $cm^3.s^{-1}$ a výstupný signál vo voltoch [V] na cm.

4.1.1 Statická charakteristika nádrže

Statická charakteristika nádrže je vyjadrená závislosťou výšky hladín od prietoku kvapaliny. Rovnicu regresnej priamky sme vypočítali v programe Matlab príkazom polyfit(h,q,1).

Rovnica regresnej priamky $$q = 0.4863h - 6.4818 \tag{37}$$

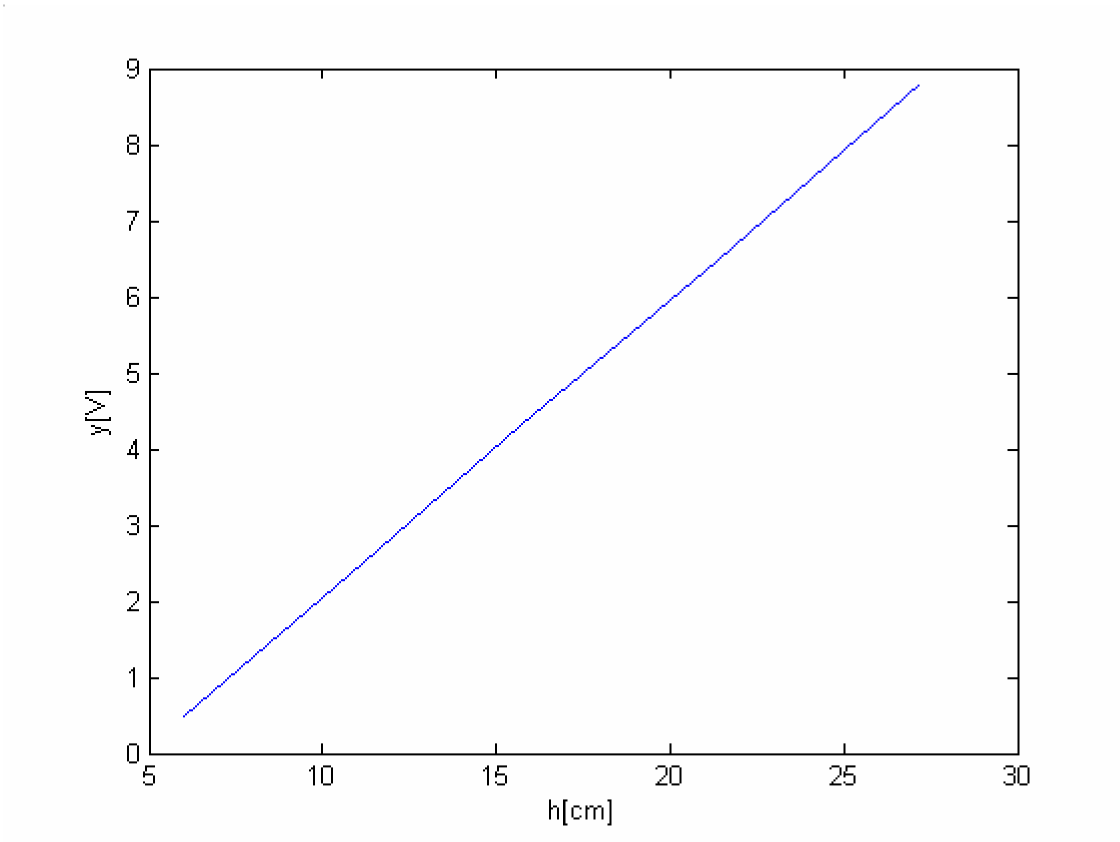


Obr. 3 : Statická charakteristika nádrže

4.1.2 Statická charakteristika snímača tlaku

Na prevod výšky hladiny v zásobníku na výstupný signál elektrického napätia sme použili závislosť výstupného napätia [V] a výšky hladín [cm]. Táto závislosť sa nazýva statická charakteristika snímača tlaku. Rovnicu regresnej priamky sme vypočítali v programe Matlab príkazom polyfit(h,y,1).

Rovnica regresnej priamky $$y = 0.3917h - 1.8651 \tag{38}$$



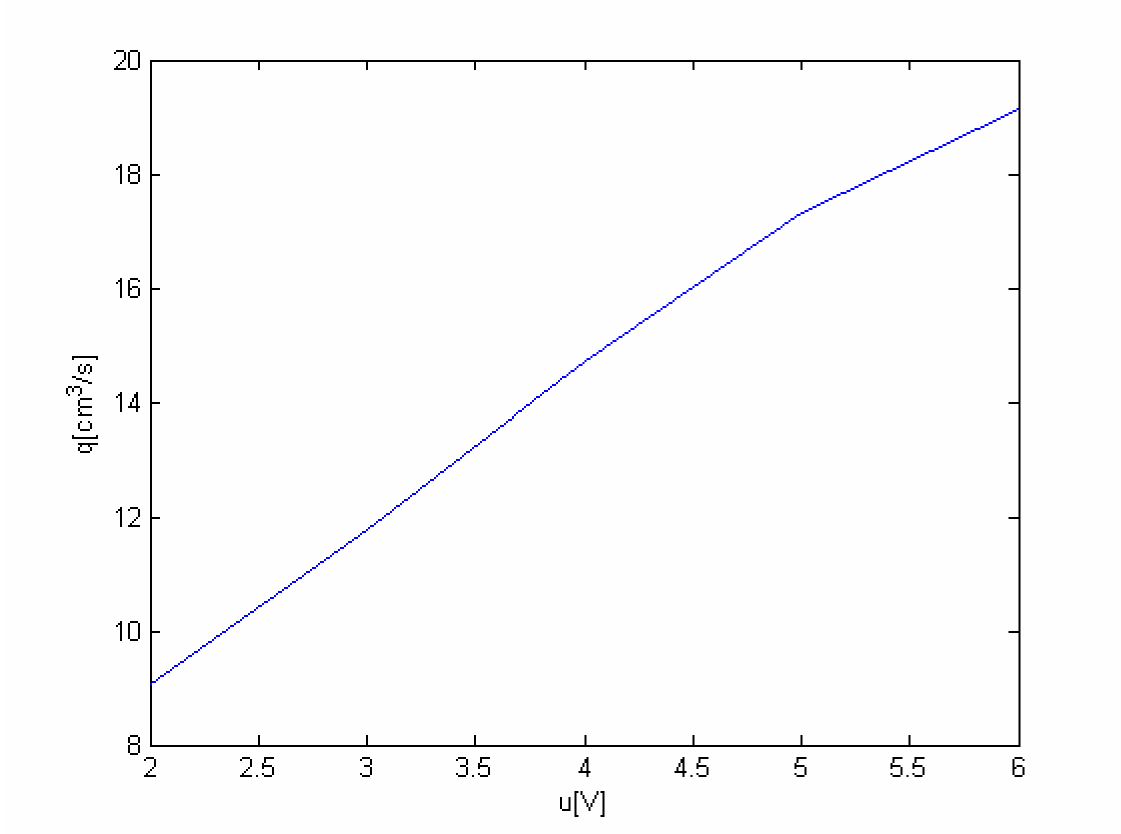
Obr. 4: Statická charakteristika snímača tlaku

4.1.3 Statická charakteristika čerpadla

Pomocou statickej charakteristiky sme previedli vstupný signál elektrického napätia vo voltoch na prietok kvapaliny v $cm^3.s^{-1}$. Statická charakteristika čerpadla je závislosť prietoku od vstupného napätia. Rovnicu polynomickej regresnej priamky sme vypočítali v programe Matlab príkazom polyfit(u,q,3).

<u>Rovnica polynomickej regresnej priamky</u>

$$q = -0.0825u^3 + 0.8371u^2 + 0.1154u + 6.1380 \tag{39}$$



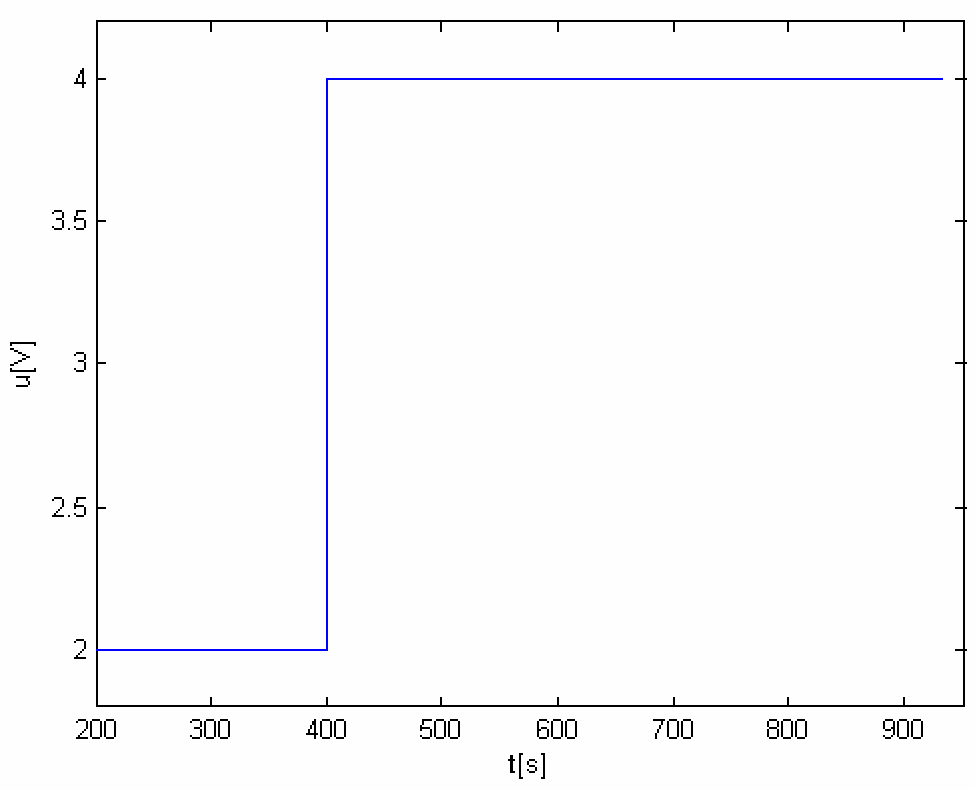
Obr. 5: Statická charakteristika čerpadla

4.2 Výpočet konštánt ventilov zásobníkov

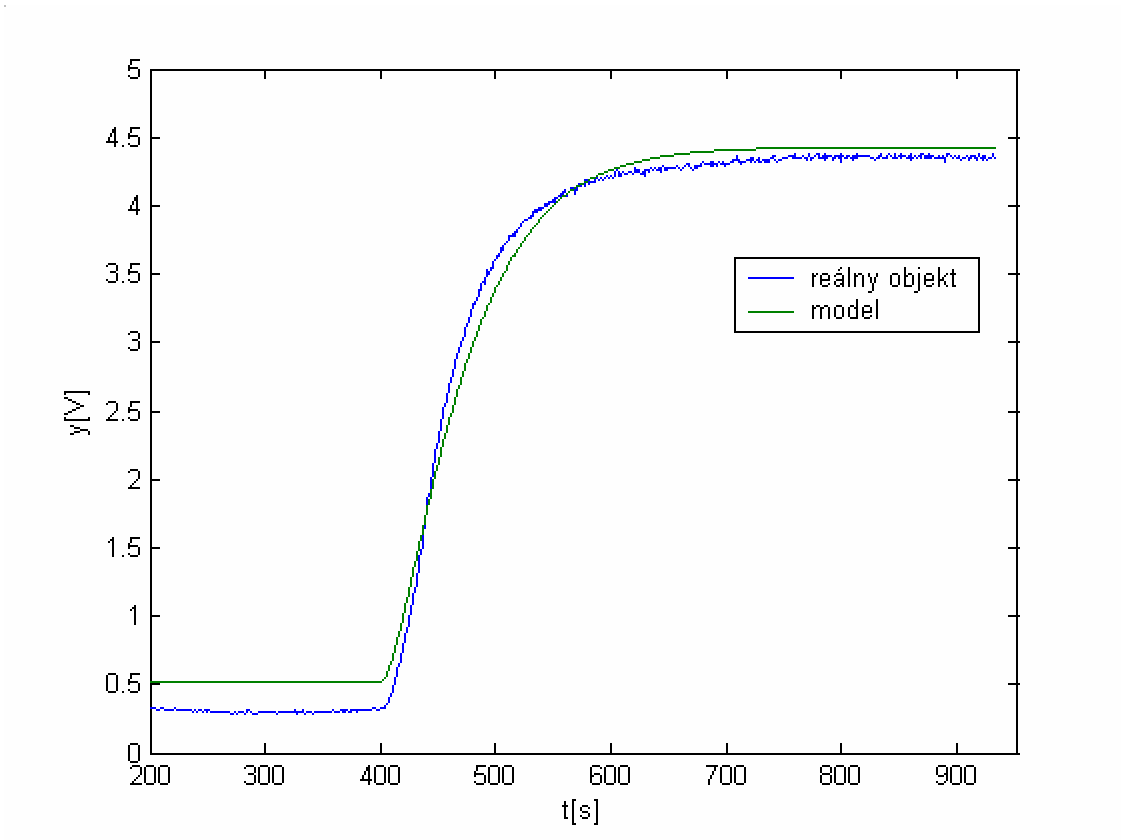
Pre každú hodnotu napätia od 2V do 6V sme namerali prietoky q a výšky h zhrnuté v tabuľke 2, z ktorých sme podľa rovnice (18) vypočítali konštanty ventilov zásobníkov, ktoré sme potom spriemerovali.

Vypočítané konštanty ventilov sú: $k_{11} = k_{22} = 3.67038\,cm^{2,5}.s^{-1}$

V príslušnej simulačnej schéme (schéma A) sme pre hodnotu 2V urobili prechodovú charakteristiku s použitím s-funkcie. S-funkcia (sfunkcia1.m) aj použitá schéma (schéma A) sú v prílohe. Porovnali sme ju s nameranou prechodovou charakteristikou pri skokovej zmene z 2V na 4V (obr. 6). Porovnávaním matematického modelu s reálnym modelom sa vyskytli odchýlky, ktoré mohli vzniknúť pri meraní veličín ako aj chybami čerpadla (obr. 7).



Obr. 6 : Skoková zmena vstupného prietoku z 2V na 4V



Obr. 7: Porovnanie nameranej a vypočítanej prechodovej charakteristiky

5 Porovnanie nelineárneho a linearizovaného modelu

Vzťahy medzi veličinami systému získané na základe matematického modelu sú veľmi často popísané nelineárnymi diferenciálnymi rovnicami. Je to preto, že väčšina reálnych systémov je vo svojej podstate nelineárna. Takéto systémy sa obtiažne riešia a preto sa ich snažíme zjednodušiť. Medzi najčastejšie zjednodušenia patrí linearizácia. Jej podstata spočíva v predpoklade, že zmeny veličiny procesu v okolí nejakého pracovného bodu, kde sa často pohybujeme, sú dostatočne malé a tak ich môžeme nahradiť lineárnymi odchýlkami.

Najčastejšie používaná linearizačná metóda je metóda rozvojom do Taylorovho radu. V našom prípade ide o nelineárny systém (12) a (13), ktorý sme následne linearizovali v okolí zvoleného pracovného bodu. Nelinearita je spôsobená odmocninami v bilančnej rovnici pri zisťovaní matematického modelu.

Linearizovaný model môžme potom napísať vo forme stavového modelu

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax + Bu \tag{40}$$

$$y(t) = Cx + Du \tag{41}$$

kde matice A,B,C a D sú definované

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \qquad B = \begin{pmatrix} b_1 \\ 0 \end{pmatrix} \qquad C = \begin{pmatrix} 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad D = 0 \tag{42}$$

Konštanty matíc sú potom

$$a_{11} = -\frac{k_{11}}{2F_1\sqrt{h_1^S}} \qquad a_{12} = 0 \qquad a_{21} = \frac{k_{11}}{2F_2\sqrt{h_1^S}}$$

$$a_{22} = -\frac{k_{22}}{2F_2\sqrt{h_2^S}} \qquad b_1 = \frac{1}{F_1} \tag{43}$$

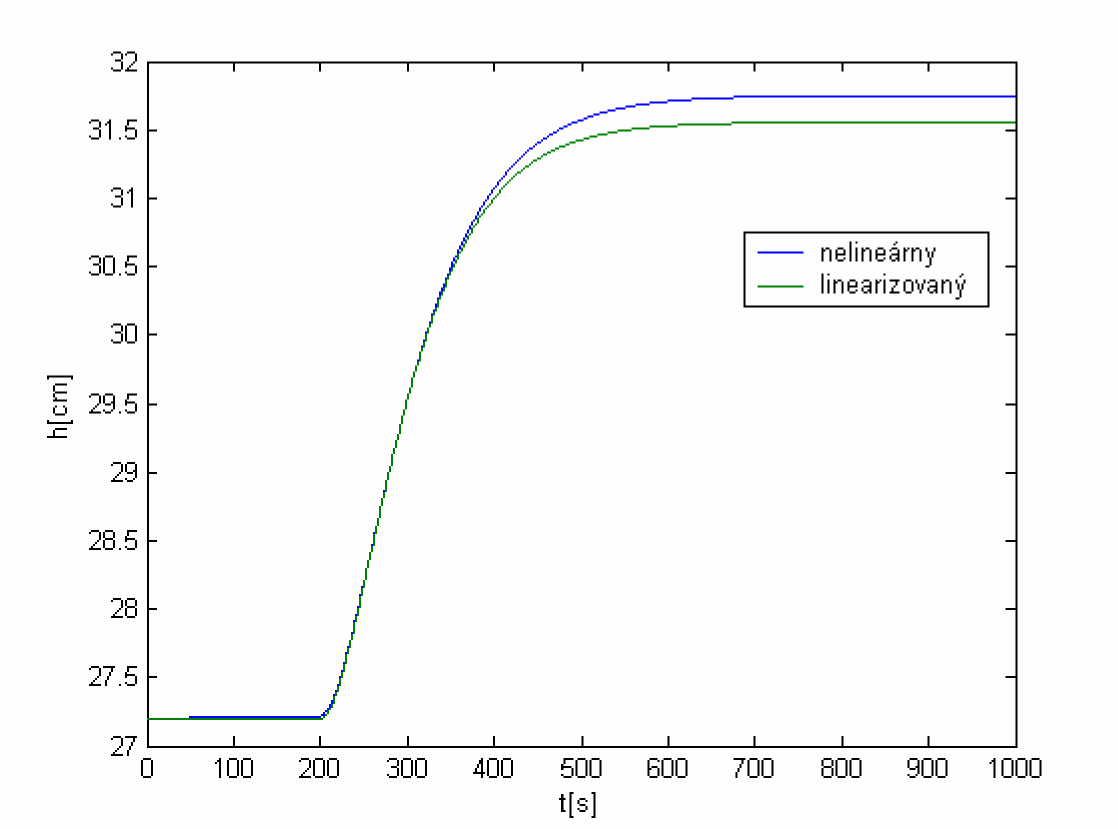
Tvar matíc je vytvorený na základe rovníc (32), (33) a (34) odvodených v kapitole 2.2 Linearizácia rozvojom do Taylorovho radu. Je potrebné zdôrazniť, že koeficienty v linearizovanom modeli (v tomto prípade len koeficienty a_{ij}) sú závislé na počiatočnom ustálenom stave, teda na polohe pracovného bodu, v okolí ktorého nelineárny model linearizujeme.

Ustálená výška hladín v zásobníkoch pre ustálený vstupný prietok q =19.15cm^3.s^{-1} bola $h_1^S = h_2^S = 27{,}2217cm$. Pri týchto podmienkach boli hodnoty matíc nasledovné

$$A = \begin{pmatrix} -0.0179 & 0 \\ 0.0179 & -0.0179 \end{pmatrix} \qquad B = \begin{pmatrix} 0.0509 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad D = 0 \tag{44}$$

Nakoniec sme porovnali nelineárny a linearizovaný model s použitím 8% skokovej zmeny vstupného prietoku. Porovnanie je zhrnuté na obr. 8.



Obr. 8: Porovnanie nelineárneho a lineárneho modelu

Modely sme porovnávali na simulačnej schéme, ktorá je zakreslená v prílohe (schéma B). Simulácia môže byť chápaná ako prevod numerických výsledkov daného matematického modelu do reality.

Porovnaním nelineárneho a linearizovaného modelu vznikla len malá odchýlka, nakoľko stavové a akčné veličiny sú v odchýlkovom tvare. Čo sa týka presnosti je nelineárny model vždy presnejší ako lineárny, ale na druhej strane lineárny model je zase jednoduchší.

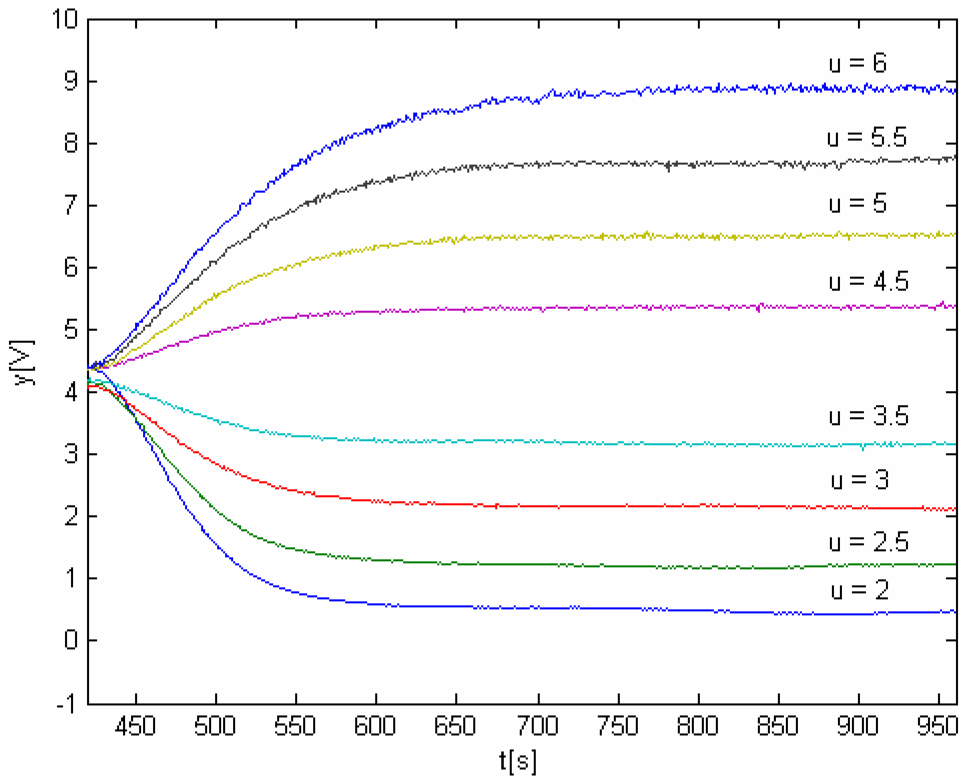
6 Identifikácia systému

Aby sme dosiahli žiadanú hodnotu systému, v našom prípade výšku hladiny kvapaliny v zásobníku na základe vstupného prietoku kvapaliny ako riadiacej veličiny, je najskôr potrebné daný systém identifikovať. Identifikácia sa uskutočňuje spracovaním hodnôt prechodovej charakteristiky.

Najčastejším používaným vstupným signálom pre návrh regulátora je skoková zmena jednej zo vstupných veličín pri zachovaní ostatných vstupných veličín konštantných. Pred uskutočnením skokovej zmeny je nutné, aby bol skúmaný systém v ustálenom stave. Časový priebeh výstupnej veličiny, ktorý je odozvou na skokovú zmenu jednej zo vstupných veličín, voláme reálnou prechodovou charakteristikou [2].

Keďže skúmaný systém je nelineárny, je potrebné urobiť niekoľko skokových zmien rozličných veľkostí [6].

Na určenie výslednej prechodovej charakteristiky som urobil skokové zmeny v čase 420s zo 4V na 2V, 2.5V, 3V, 3.5V, 4.5V, 5V, 5.5V a 6V, ktoré sú znázornene na obr. 9.



Obr. 9 : Prechodové charakteristiky systému pre rôzne skokové zmeny

6.1 Strejcova metóda

Pre približný prenos identifikovaného systému z nameranej prechodovej charakteristiky sme použili Strejcovú metódu. Dynamické vlastnosti identifikovaného systému aproximujeme pomocou náhradného prenosu v tvare

$$G(s)=\frac{Z}{(Ts+1)^n}e^{-Ds} \tag{45}$$

kde Z je zosilnenie, T časová konštanta, D dopravné oneskorenie a n je rád systému, ktoré potrebujeme určiť [2].

Postup pri identifikácii je nasledovný (obr. 10) :

1. z nameranej prechodovej charakteristiky určiť hodnoty Z

$$Z=\frac{y_\infty - y_0}{u_\infty - u_0}, \tag{46}$$

   t_u, t_n po zvolení inflexného bodu

2. určiť podiel $f_s = \dfrac{t_u}{t_n}$ (47)
3. z tab. 3 vybrať rád systému n tak, aby platilo $f(n) \le f_S < f(n+1)$

Tab. 3 : Tabuľka pre Strejcovu metódu identifikácie

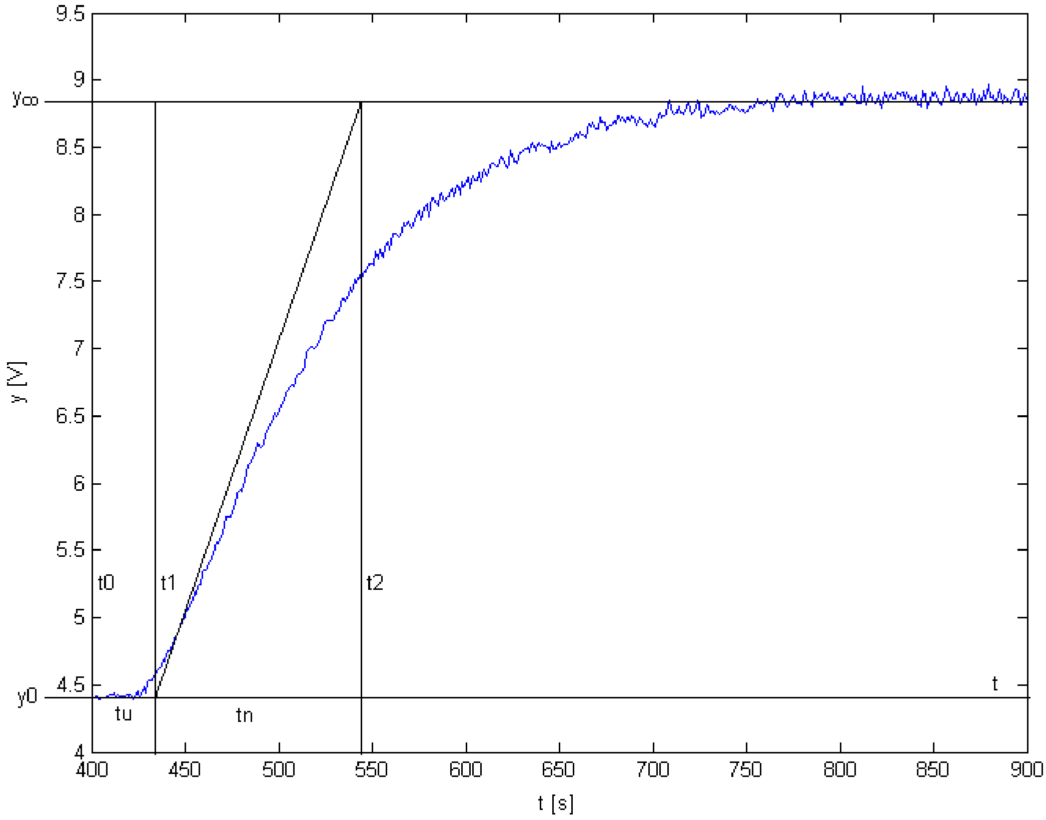
n	1	2	3	4	5	6
$f(n)=\frac{t_u}{t_n}$	0,000	0,104	0,218	0,319	0,410	0,493
$g(n)=\frac{T}{t_n}$	1,000	0,368	0,271	0,224	0,195	0,161

4. dopravné oneskorenie D sa určí ako rozdiel medzi skutočným a fiktívnym časom nábehu t_n

$$D=[f_S - f(n)]t_n \tag{48}$$

5. časová konštanta T sa určí pomocou hodnôt z riadku funkcie g(n) pre príslušné n. Odčíta sa g(n) a T sa určí ako

$$T=g(n)t_n \tag{49}$$



Obr. 10: Prechodová charakteristika systému

Identifikovaný systém s prechodovou charakteristikou (obr. 10) bol aperiodický systém 2. rádu. Výsledky identifikácie sú v tab. 4.

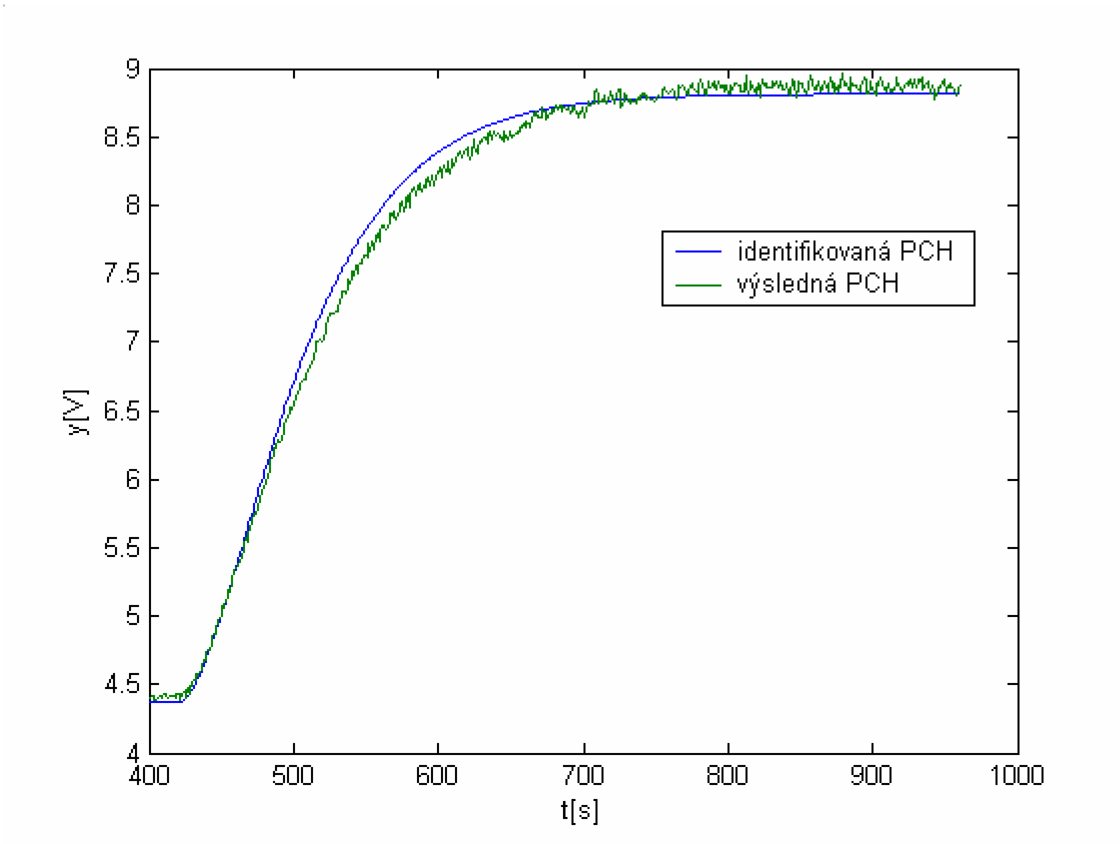
Tab. 4: Výsledky identifikácie

čas prieťahu t_u	[s]	13,77
čas nábehu t_n	[s]	124
rád systému		2
zosilnenie Z		2,2231
časová konštanta T	[s]	45,632
dopravné oneskorenie D	[s]	0,8804

Identifikovaný prenos má potom tvar

$$G(s) = \frac{2.2231}{2082.28s^2 + 91.264s + 1} e^{-0,8804s} \qquad (50)$$

Pri porovnaní výslednej prechodovej charakteristiky s charakteristikou získanou z identifikácie mal rozdiel medzi nimi len minimálnu odchýlku (obr. 11). Z toho vyplýva, že daný identifikovaný prenos (50) je správny.



Obr. 11: Porovnanie charakteristík

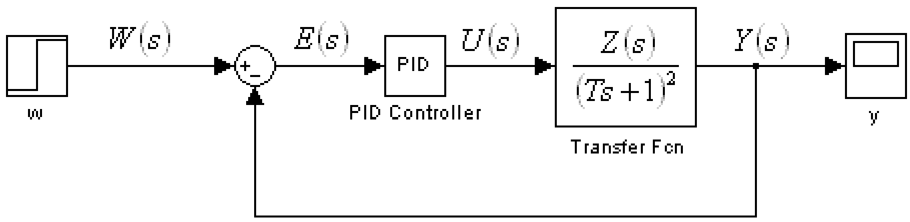
7 Návrh riadenia

Úloha návrhu regulátora sa obyčajne formuluje tak, že pre daný prenos G(s) (50) je potrebné nájsť taký prenos $G_R(s)$ (51), aby uzavretý systém riadenia bol vnútorne stabilný a realizovateľný a aby mal ďalšie vyžadované vlastnosti. Tie ďalšie vyžadované vlastnosti sú:

Regulátor musí byť fyzikálne realizovateľný a trvalá regulačná odchýlka riadenia pri spätnoväzbovom riadení po skokovej zmene vstupnej žiadanej veličiny w musí v čase konvergovať k nule. V regulátore sa porovnáva meraná a žiadaná veličina. Regulátor porovnáva tieto veličiny a vyhodnocuje akčný zásah.

Na riadenie výšky hladiny kvapaliny v druhom zásobníku sa používalo spätnoväzbové riadenie s pridaným PI alebo PID regulátorom. Schéma uzavretého spätnoväzbového regulačného obvodu je na obr. 12, kde

- W(s) obraz riadiacej veličiny
- E(s) je obraz regulačnej odchýlky
- U(s) je obraz riadiacej veličiny
- Y(s) je obraz riadenej veličiny



Obr. 12: Schéma uzavretého spätnoväzbového regulačného obvodu

7.1 PID regulácia, jej zložky a PID regulátor

Činnosť prevažnej väčšiny regulátorov zahŕňa v sebe operáciu jedného alebo kombinácie viacerých z nasledovných regulačných prvkov: proporcionálny P, integračný I alebo derivačný D člen. Ich spojením vzniká proporcionálno-integračno-derivačná činnosť PID regulácia [7].

Kombináciou členov opísaných vyššie sa môžu vytvárať rôzne typy regulátorov so špecifickými vlastnosťami ako je P, PI, PD a PID regulátor. PID regulátor vzniká paralelným zapojením P,I a D člena. Prenos regulátora je opísaný rovnicou [7]

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = Z_R\left(1 + \frac{1}{T_I} s + T_D s\right) \tag{51}$$

alebo po úprave

$$G_R(s) = P + \frac{I}{s} + Ds \tag{52}$$

kde Z_R je zosilnenie regulátora, T_I je integračná časová konštanta a T_D je derivačná časová konštanta a kde $P = Z_R$, $I = \frac{Z_R}{T_I}$ a $D = Z_R T_D$ [2,3,7].

Na určenie vhodného regulátora, resp. na získanie konštánt pre PID regulátor, boli použité rôzne metódy.

7.2 Metódy na získanie konštánt regulátora

7.2.1 Ziegler – Nicholsova metóda syntézy regulátora

Metóda je založená na vyhodnotení odmeranej odozvy systému na skokovú zmenu vstupnej veličiny, z ktorej sa vyhodnotí Z, t_u, t_n a pomocou nich sa potom vypočítajú konštanty regulátora (tab. 5).

Tab. 5 : Ziegler – Nicholsova metóda syntézy regulátora – konštanty

Regulátor	Z_R	T_I	T_D
PI	$\frac{0.9}{Z}\frac{t_n}{t_u}$	$0{,}33\, t_u$	
PID	$\frac{1.2}{Z}\frac{t_n}{t_u}$	$2\, t_u$	$0.5\, t_u$

7.2.2 Cohen-Coonova metóda syntézy regulátora

Z výslednej prechodovej charakteristiky sú určené konštanty Z, t_u, t_n a pomocou nich sú potom určené konštanty regulátorov (tab. 6).

Tab. 6 : Cohen-Coonova metóda syntézy regulátora – konštanty

Regulátor	Z_R	T_I	T_D
PI	$\frac{1}{Z}\frac{t_n}{t_u}\left[0.9+\frac{1}{12}\frac{t_u}{t_n}\right]$	$t_u\left[\frac{30+3\frac{t_u}{t_n}}{9+20\frac{t_u}{t_n}}\right]$	
PID	$\frac{1}{Z}\frac{t_n}{t_u}\left[\frac{4}{3}+\frac{1}{4}\frac{t_u}{t_n}\right]$	$t_u\left[\frac{32+6\frac{t_u}{t_n}}{13+8\frac{t_u}{t_n}}\right]$	$t_u\left[\frac{4}{11+2\frac{t_u}{t_n}}\right]$

7.2.3 Syntéza regulátora metódou Rivera-Morari

Z výslednej prechodovej charakteristiky sú určené konštanty Z, t_u, t_n. Zvolí sa časová konštanta uzavretého regulačného obvodu, ktorá by mala byť väčšia ako 0.2 násobok doby nábehu $t_{URO}>0.2.t_n$. Pomocou nich sú potom určené konštanty regulátorov (tab. 7).

Tab. 7 : Syntéza regulátora metódou Rivera-Morari - konštanty

Regulátor	Z_R	T_I	T_D	$T_{URO} > 0.2\, t_n$
PI	$\frac{2t_n+t_u}{2ZT_{URO}}$	$t_n+\frac{t_u}{2}$		$\frac{T_{URO}}{t_u}>1.7$
PID	$\frac{2t_n+t_u}{2Z(T_{URO}+t_u)}$	$t_n+\frac{t_u}{2}$	$\frac{t_n t_u}{2t_n+t_u}$	$\frac{T_{URO}}{t_u}>0.25$

7.2.4 Syntéza regulátora metódou Chien, Hrones, Reswick

Táto metóda syntézy regulátora vychádza z Ziegler – Nicholsovej metódy. Touto metódou dosahujeme lepšie tlmenie v regulačnom obvode. Z výslednej prechodovej charakteristiky sú určené konštanty Z, t_u, t_n a pomocou nich sú potom určené konštanty regulátorov (tab. 8). Túto metódu sme robili s 0% preregulovaním.

Tab. 8 : Syntéza regulátora metódou Chien, Hrones, Reswick - konštanty

Regulátor	Z_R	T_I	T_D
PI	$0.35\frac{T}{ZD}$	$1.2T$	
PID	$0.6\frac{T}{ZD}$	T	$0.5\,D$

7.2.5 Haalmanova metóda syntézy regulátora

Vstupnými údajmi pre túto metódu návrhu regulačného obvodu sú zosilnenie sústavy Z_R , časová konštanta T_I . Táto metóda umožňuje návrh regulačného obvodu len pre PI regulátor a vzťahy na výpočet jeho konštánt zobrazené v tab. 9.

Tab. 9 : Haalmanova metóda syntézy regulátora – konštanty

Regulátor	Z_R	T_I
PI	$\frac{2T}{3D}$	T

Každou metódou sme vypočítali Z_R zosilnenie regulátora, T_I integračnú časovú konštantu a T_D derivačnú časovú konštantu. Hodnoty sú zhrnuté v tab. 10.

Tab. 10 : Vypočítané parametre navrhnutých regulátorov

metóda, regulátor	Z_R	T_I	T_D
Ziegler - Nichols PI	3.6456	45.8541	-
Ziegler – Nichols PID	4.8608	27.54	6.885
Cohen - Coon PI	3.6831	37.2238	-
Cohen - Coon PID	5.5134	32.3878	4.9082
Rivera - Morari PID	1.3083	130.885	-
Rivera - Morari PI	1.0018	130.885	6.5228
Reswick PI	8.1602	54.7584	-
Reswick PID	13.9888	45.632	0.4402
Haalman PI	34.5540	45.632	-

Vypočítané parametre navrhnutých regulátorov sa neskôr použili na získanie proporcionálneho, integračného a derivačného člena pre PI a PID regulátor, kde $P = Z_R,\ I = \dfrac{Z_R}{T_I}\ a\ D = Z_R T_D$.

7.3 Stabilita spätnoväzbového dynamického systému

Najdôležitejším aspektom spätnoväzbového dynamického systému je jeho stabilita. Spätnoväzbový systém (obr. 12) je stabilný vtedy a len vtedy, ak všetky korene charakteristickej rovnice $1+G(s).G_R(s)=0$ majú zápornú reálnu časť, tzn. že ležia v zápornej polrovine komplexnej roviny.

Stabilita je základnou a nevyhnutnou podmienkou správnej funkcie systémov. Je to vlastnosť systému, ktorá vyjadruje jeho schopnosť vrátiť sa do pôvodného rovnovážneho stavu po pôsobení krátkodobej vonkajšej poruchy. Vlastne odozva systému na ohraničený vstupný signál je takisto ohraničená [2,3,7].

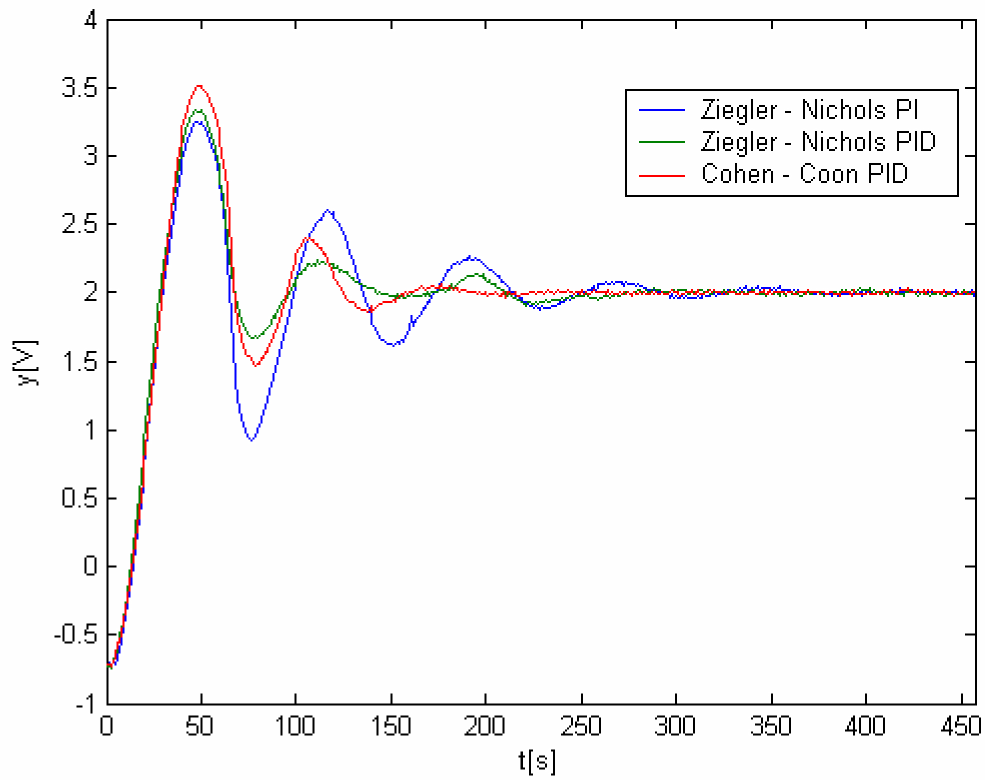
Stabilita však nie je postačujúcim kritériom správnej funkcie uzavretého systému riadenia. Dôležité je aj dynamické správanie sa systému po prechode z jedného rovnovážneho stavu do iného stavu. Vlastnosti systému v prechodovom stave hovoria o kvalite riadenia (regulácie). Kvalitu regulácie posudzujeme podľa ukazovateľov kvality. Pre každý PI a

PID regulátor odvodený vyššie uvedenými metódami boli určené ukazovatele kvality zhrnuté v tab. 11.

Tab. 11 : Ukazovatele kvality riadenia

Ukazovatele	TRO	σ_{MAX} [%]	t_{reg} [s]	t_{σ} [s]	Periodicita	Stabilita
Ziegler - Nichols PI	0.0086	63.06	235.71	50	áno	áno
Ziegler - Nichols PID	0.0011	66.80	220.35	50	áno	áno
Cohen - Coon PID	0.0062	75.98	119.35	50	áno	áno
Rivera - Morari PID	0.0282	-	471.11		nie	áno

Práca bola časovo náročná, nakoľko dlho trvalo, kým sa hladiny ustálili a kým sa dosiahla žiadaná hodnota 2V. Preto sme sa zamerali na čas regulácie. Vo všeobecnosti sa za dobrý regulátor pokladá regulátor s krátkym časom regulácie, mal by byť stabilný a hodnota maximálneho preregulovania by mala byť čo najnižšia. Najnižší čas regulácie mali regulátory PI a PID navrhnuté Ziegler-Nicholsovou metódou a PID regulátor navrhnutý metódou Cohen-Coon. Sú znázornené na obr. 13.



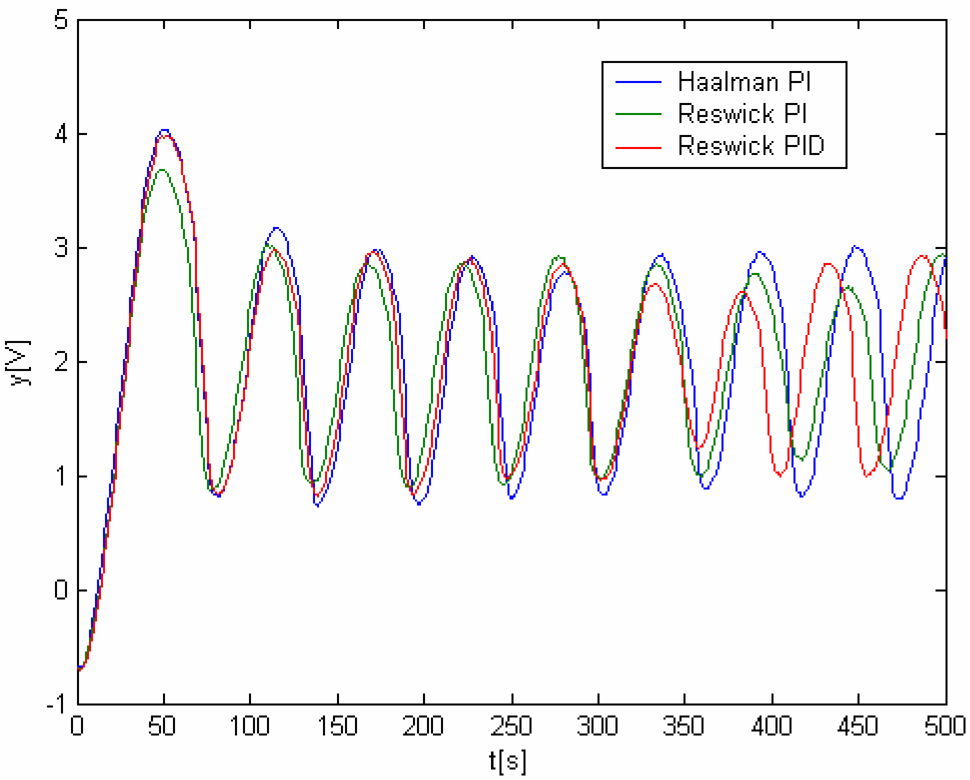
Obr. 13 : Priebeh riadenia pomocou regulátorov navrhnutých metódami Ziegler-Nichols PI a PID a metódou Cohen-Coon PID

Z obr. 13 vyplýva, že regulátory navrhnuté metódou Ziegler-Nichols PI a PID a metódou Cohen-Coon PID sú schopné uregulovať žiadanú hodnotu 2V.

Regulátory navrhnuté metódou Haalman PI a Reswick PI a PID neboli v tomto prípade ideálne, nakoľko boli nekonečne periodické a nikdy by nedosiahli zadanú žiadanú hodnotu 2V, ale vždy kulminovali v okolí žiadanej hodnoty. Daný priebeh riadenia je znázornený na obr. 14.

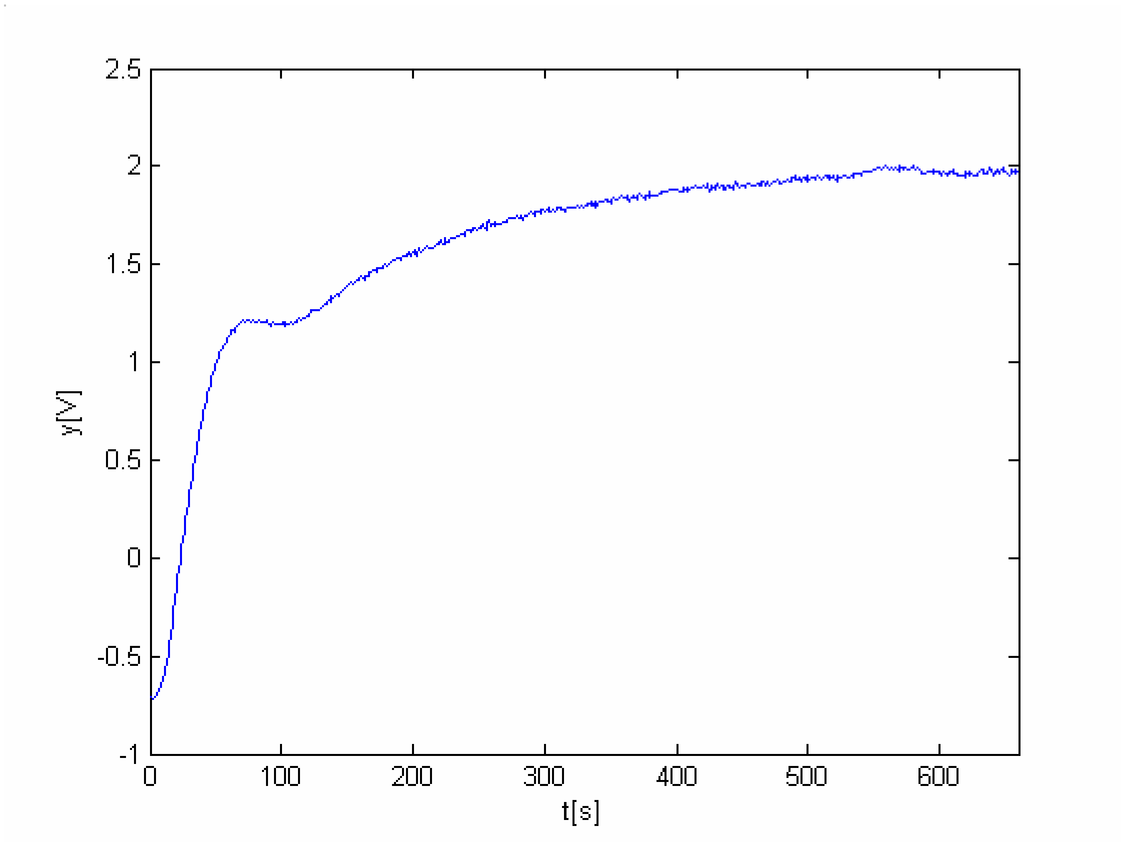
Tab. 14 : Ukazovatele kvality riadenia

Ukazovatele	TRO	σ_{MAX} [%]	t_{reg} [s]	t_{σ} [s]	Periodicita	Stabilita
Reswick PI	- 0.0408	80.19	-	49	áno	áno
Reswick PID	0.6962	204.73	-	53	áno	áno
Haalman PI	0.3863	149.76	-	52	áno	áno



Obr. 14 : Priebeh riadenia pomocou regulátorov navrhnutých metódami Haalman PI a Reswick PI a PID

Ďalej sme robili priebeh riadenia pomocou metódy Rivera-Morari PI. Metódou Rivera-Morari sa mala dosiahnuť žiadaná hodnota 2V, ktorá sa aj dosiahla a nakoľko je daný regulátor navrhnutý touto metódou aperiodický, možno ho používať v celom rozsahu vstupných prietokov. Jeho priebeh dokumentuje obr. 15.

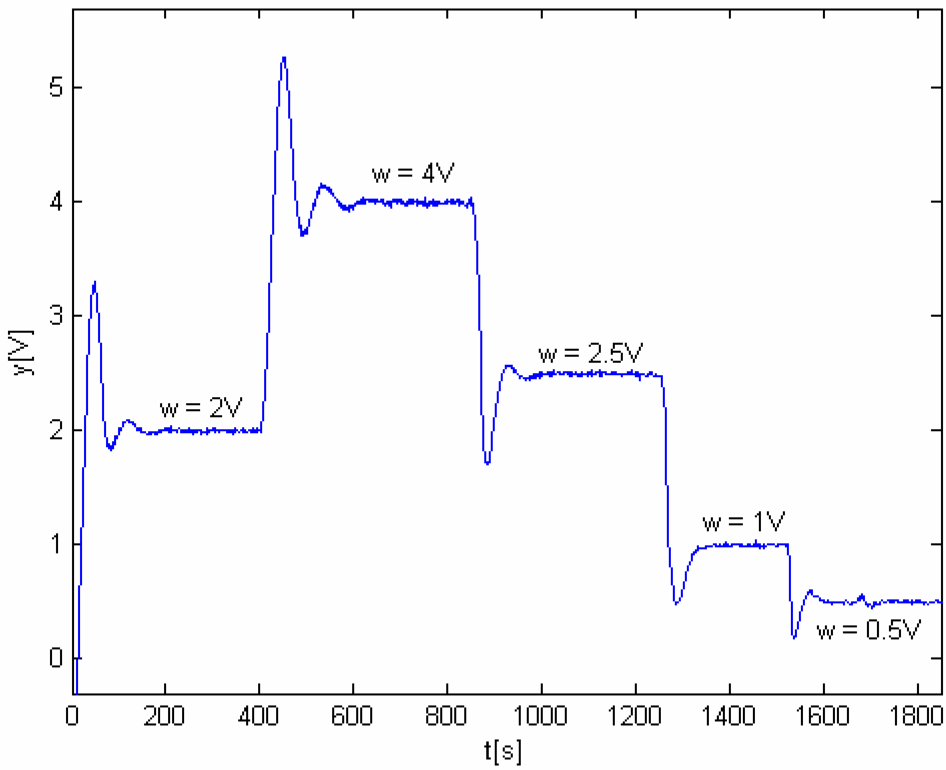


Obr. 15 : Priebeh riadenia pomocou regulátora navrhnutého metódou Rivera Morari

Všetky priebehy sme simulovali pomocou schémy zobrazenej v prílohe (schéma C).

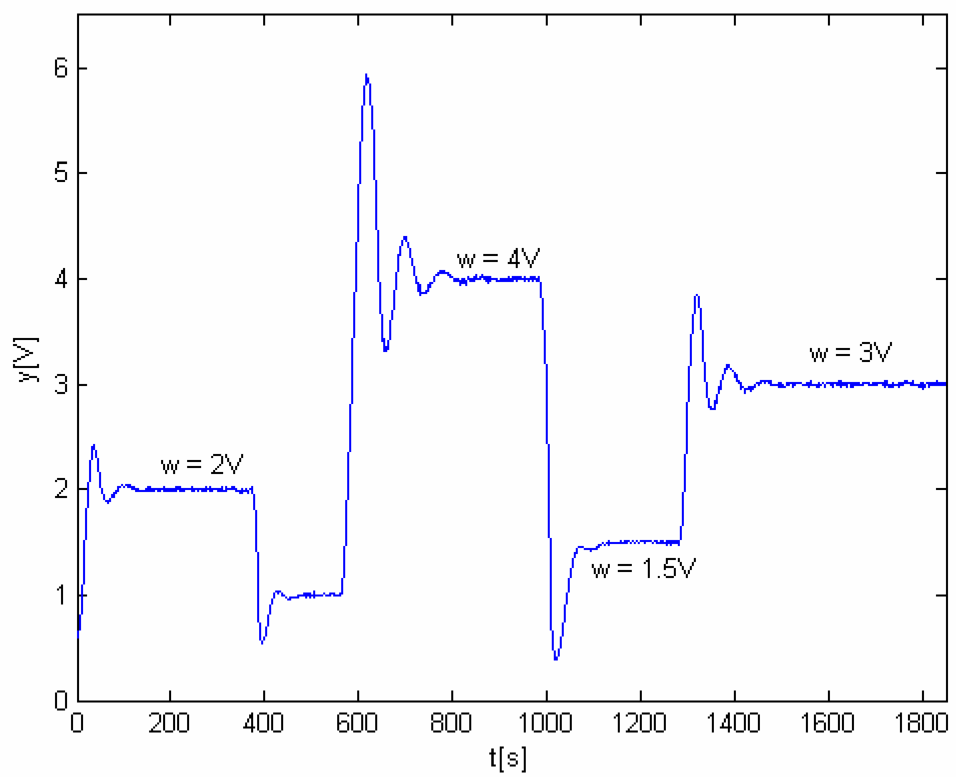
Priebeh riadenia výšky hladiny v druhom zásobníku bol časovo najlepšie použitím regulátorov navrhnutých metódou Ziegler-Nichols a Cohen-Coon a preto sme na nich ešte vyskúšali rôzne skokové zmeny vstupného prietoku.

Skokové zmeny pre regulátor navrhnutý Ziegler-Nicholsovou metódou boli v čase 400s z hodnoty 2V na hodnotu 4V, v čase 850s na hodnotu 2.5V, v čase 1250s na hodnotu 1V a nakoniec v čase 1250s na hodnotu 0.5V. Regulátor všetky zadané skokové zmeny ureguloval, čo je znázornené aj na obr. 16.



Obr. 16 : Rôzne skokové zmeny pre regulátor navrhnutý metódou Ziegler-Nichols

Podobne sme skokové zmeny urobili aj pre regulátor navrhnutý metódou Cohen-Coon. Skokové zmeny boli uskutočnené v čase 300s na hodnotu 2V, v čase 370s na hodnotu 1V, v čase 560s na hodnotu 4V, v čase 980s na hodnotu 1.5V a nakoniec v čase 1280s na hodnotu 3V. Dané skokové zmeny sú znázornené na obr. 17.



Obr. 17: Rôzne skokové zmeny pre regulátor navrhnutý metódou Cohen-Coon

Všetky priebehy sme simulovali pomocou schémy zobrazenej v prílohe (schéma C).

8 Záver

Úlohou práce bolo namodelovať a potom riadiť zásobníky kvapalín zapojené za sebou. Cieľom práce bolo udržať výšku hladiny v zásobníku na žiadanej zvolenej hodnote a hľadanie najvhodnejšieho regulátora, ktorý by bol schopný uregulovať výšku hladiny za čo možno najkratší čas.

Na začiatku práce bol odvodený nelineárny matematický model zásobníkov kvapalín bez interakcie, kde boli vypočítané vzťahy (18) pre výpočet výšky hladín v rovnovážnom stave. Následne bol nelineárny matematický model linearizovaný rozvojom do Taylorovho radu.

Po linearizácií boli namerané hodnoty vstupných a výstupných signálov zhrnuté v tab. 2. Na základe nameraných hodnôt boli vypočítané konštanty ventilov pomocou vzťahu (18) a porovnala sa nameraná a vypočítaná prechodová charakteristika (obr. 7).

Porovnaním nelineárneho a linearizovaného modelu v kapitole 5 s použitím 8% skokovej zmeny po vypočítaní konštánt matíc pomocou vzťahov (43) vznikla len malá odchýlka.

V kapitole 6 Identifikácia systému bolo potrebné systém najskôr identifikovať, aby sme dosiahli žiadanú hodnotu systému, v našom prípade výšku hladiny kvapaliny v zásobníku. Pre prenos identifikovaného systému z nameranej prechodovej charakteristiky bola použitá Strejcova metóda. Výsledkom bolo nájdenie identifikovaného prenosu (50). Boli porovnané výsledná a identifikovaná PCH. Ich rozdiel bol minimálny z čoho vyplýva, identifikovaný prenos bol správny.

V kapitole 7 Návrh riadenia sa hľadal najvhodnejší regulátor, teda ten ktorý by bol schopný v najkratšom čase uregulovať žiadanú hodnotu výšky hladiny. Boli použité rôzne metódy na získanie konštánt regulátora: Ziegler – Nicholsova, Cohen-Coonova, Rivera-Morari, Hrones, Reswick, Chien a Haalmanova metóda syntézy regulátora. Priebeh riadenia výšky hladiny v druhom zásobníku bol časovo najlepšie použitím regulátorov PID navrhnutých metódou Ziegler-Nichols a Cohen-Coon. Ešte dodatočne boli pre tieto dva regulátory urobené rôzne skokové zmeny vstupných prietokov, ktoré boli s podmienkou krátkeho času uregulované na žiadané hodnoty.

Zoznam symbolov

Symboly	Názov veličiny	Jednotka
$\dot{m}_0$	hmotnostný prietok kvapaliny na vstupe do prvého zásobníka	$kg.s^{-1}$
$\dot{m}_1$	hmotnostný prietok kvapaliny na výstupe z prvého zásobníka	$kg.s^{-1}$
$\dot{m}_2$	hmotnostný prietok kvapaliny na výstupe z druhého zásobníka	$kg.s^{-1}$
q_0	objemový prietok kvapaliny na vstupe do prvého zásobníka	$m^3.s^{-1}$
q_1	objemový prietok kvapaliny na výstupe z prvého zásobníka	$m^3.s^{-1}$
q_2	objemový prietok kvapaliny na výstupe z druhého zásobníka	$m^3.s^{-1}$
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	$kg.m^{-3}$
k_1, k_2	výtokové koeficienty clonky nádrže	
k_{11}, k_{22}	konštanty ventilov	$m^{2,5}s^{-1}$
f_1	prierez odporu medzi zásobníkom	m^2
f_2	prierez výtokového odporu z druhého zásobníka	m^2
g	gravitačné zrýchlenie	$m.s^{-2}$
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	$m^3.s^{-1}$
T	časová konštanta	s
D	dopravné oneskorenie	s
T_D	derivačná konštanta regulátora	s
T_I	integračná konštanta regulátora	s^{-1}
Z	statické zosilnenie systému	
Z_R	zosilnenie regulátora	
s	argument Laplaceovej transformácie	
x	stavová veličina	
u	vstupná veličina	
y	výstupná veličina	

Zoznam použitej literatúry

[1] <http://www.humusoft.cz/produkty/matlab/index.php?lang=cz&p1=1&p2=1>, Matlab a Simulink

[2] M. Bakošová, M. Fikar, Ľ. Čirka: Základy automatizácie. Laboratórne cvičenia zo základov automatizácie, STU, Bratislava 2003, ISBN 80-227-1831-9

[3] J. Mikleš, P. Dostál, A. Mészáros: Riadenie technologických procesov, STU, Bratislava 1994, ISBN 80-227-0688-4

[4] M. Fikar, J. Mikleš: Identifikácia systémov, STU, Bratislava 1998, ISBN 80-227-1177-2

[5] J. Macháček, F. Dušek a kol. Hydraulicko-pneumatická soustava, pdf, 2005

[6] V. Csizmadiaová: Modelovanie a riadenie laboratórnych zásobníkov kvapaliny. Bakalárska práca, ÚIAM FCHPT STU v Bratislave, Radlinského 9, 812 37 Bratislava, 2008 <http://www.kirp.chtf.stuba.sk/index.php?menu=2&submenu=6&part=0&show_id=4&year=2008&submit=Zobrazi%C5%A5>.

[7] A. Mészáros, J. Danko, J. Mikleš, M. Bakošová: Základy automatizácie, STU, Bratislava 1997, ISBN 80-227-0940-9

Prílohy

S – funkcia, sfunkcia1.m nelineárneho modelu dvoch zásobníkov kvapaliny bez interakcie bola použitá pri porovnávaní nelineárneho a linearizovaného modelu a pri hľadaní konštánt ventilov:

```
function [sys,h0,str,ts] = sfunkcia1(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 diskrétnych 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=[27.2 27.2]; % 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=3.67038;
k22=3.67038;
```

```
F1=19.6349;
F2=19.6349;
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)=0.3917*h(2)-1.8651;
```

M-file matice.m bol použitý pri zisťovaní matíc pri porovnávaní nelineárneho a linearizovaného modelu

```
q0s=19.15 % ustálený vstupný prietok pri 6V
k11=3.67038; % konštanty ventilov
k22=3.67038;
F1=19.6349; % plocha zásobníka
F2=19.6349;
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
```

<u>Použité schémy</u>

Schéma A **: Simulinková bloková schéma, použitá pri hľadaní konštánt ventilov s použitou s-funkciou sfunkcia1.m:**

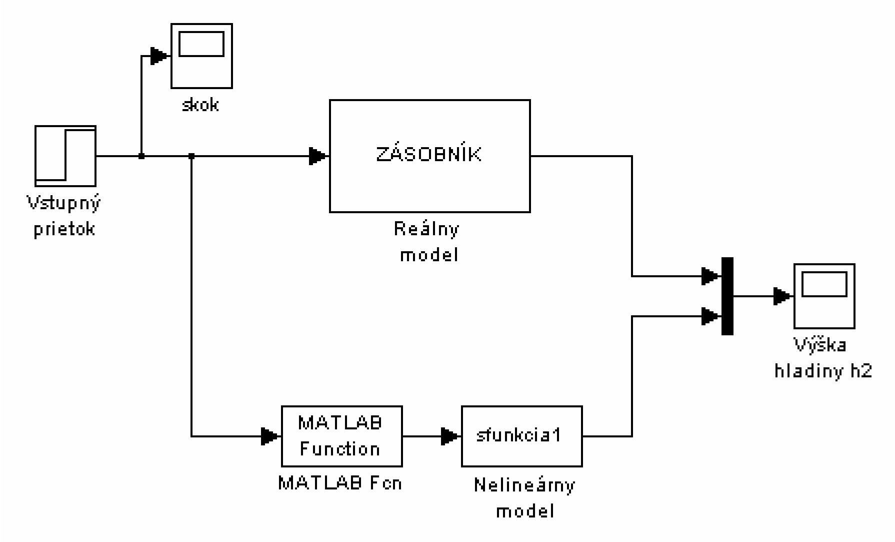


Schéma B **: Simulinková bloková schéma, použitá pri porovnávaní nelineárneho a linearizovaného modelu s použitými maticami matice.m:**

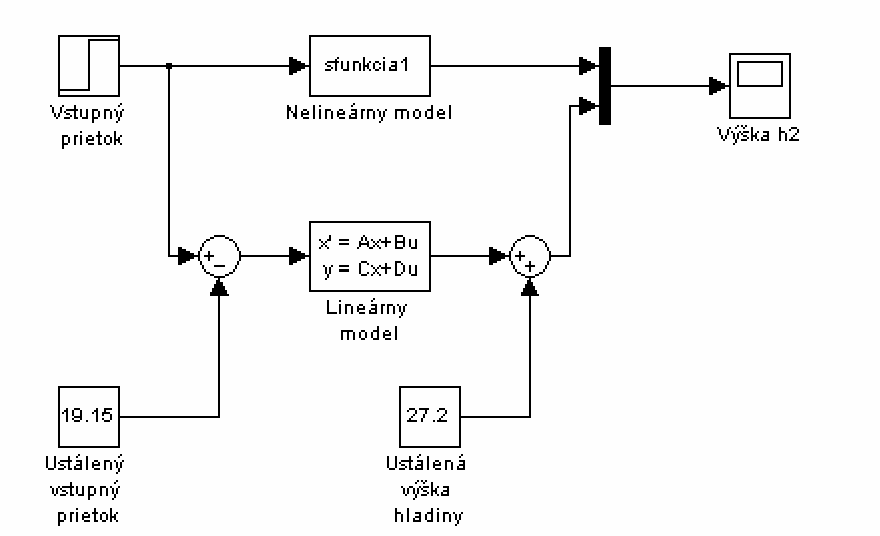


Schéma C **: Simulinková bloková schéma, použitá na riadenie celej sústavy s použitým PID regulátorom**