

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKEJ A POTRAVINÁRSKEJ TECHNOLOGIE

OPTIMÁLNE RIADENIE ZÁSOBNÍKOV KVAPALINY

DIPLOMOVÁ PRÁCA

FCHPT-5414-28517

2010

Bc. Eva Turayová

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKEJ A POTRAVINÁRSKEJ TECHNOLOGIE

OPTIMÁLNE RIADENIE ZÁSOBNÍKOV KVAPALINY

DIPLOMOVÁ PRÁCA

FCHPT-5414-28517

Študijný program: Automatizácia a informatizácia v chémii a potravinárstve

Číslo a názov študijného odboru: 5.2.14 automatizácia

Školiace pracovisko: Oddelenie informatizácie a riadenia procesov

Vedúci diplomového projektu: Ing. Radoslav Paulen

Bratislava 2010

Bc. Eva Turayová



ZADANIE DIPLOMOVEJ PRÁCE

Študentka: **Bc. Eva Turayová**
ID študenta: 28517
Študijný program: automatizácia a informatizácia v chémii a potravinárstve
Študijný odbor: 5.2.14 automatizácia
Vedúci práce: Ing. Radoslav Paulen
Miesto vypracovania: Bratislava

Názov práce: **Optimálne riadenie zásobníkov kvapaliny**

Špecifikácia zadania:

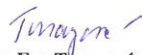
Cieľom práce je nájsť optimálne trajektórie vstupných veličín pre riadenie nelineárneho systému – zásobníkov kvapaliny bez interakcie a toto riadenie aplikovať na reálnom zariadení.

Rozsah práce: 50

Riešenie zadania práce od: 15. 02. 2010

Dátum odovzdania práce: 22. 05. 2010




Bc. Eva Turayová
študentka


prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
vedúci pracoviska


prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
garant študijného programu

Čestné prehlásenie

Podpísaná (Bc. Eva Turayová) týmto prehlasujem, že som diplomovú prácu na tému: „Optimálne riadenie zásobníkov kvapaliny“, vypracovala samostatne, s použitím uvedenej literatúry.

V Bratislave, 22.5.2010

.....

Podpis

Pod'akovanie

Ďakujem môjmu konzultantovi Ing. Radoslavovi Paulenovi, za vynikajúce usmerňovanie pri tvorbe práce, za jeho hodnotné odborné rady, pripomienky a v neposlednom rade aj za príjemný a motivujúci prístup.

Súhrn

Jedným z cieľov práce je nájsť optimálne trajektórie vstupných veličín pre riadenie zásobníkov kvapaliny bez interakcie. Model tohto procesu uvažujeme ako sústavu diferenciálnych rovníc. Vypočítané optimálne riadenie neskôr aplikujeme na zásobníky kvapaliny bez interakcie, pri ktorých vieme merať len výšku hladiny v druhom zásobníku. Toto zariadenie modelujeme aj pomocou tzv. hybridného modelu, ktorý umožňuje zachytiť také charakteristiky, ako sú napríklad vypínače, prepínače, logické podmienky a pod. Navrhujeme dvojpolohový a trojpolohový regulátor a skúmame ich výhody a nevýhody pri riadení dvoch zásobníkov kvapaliny bez interakcie. Tiež navrhujeme optimálne riadenie pomocou metódy parametrizácie vektora riadenia, ktoré neskôr aplikujeme na reálnom zariadení, zásobníkoch kvapaliny bez interakcie.

Kľúčové slová

optimálne riadenie, zásobníky kvapaliny, hybridné systémy

Abstract

One of this work goals is to find optimal control trajectories for control of liquid tanks system without interaction. We consider process model as set of differential equations. Computed optimal control is then applied on a real plant. Liquid level in second tank is measureable only on this plant. This plant is also modeled using hybrid approach resulting in hybrid system model. Using hybrid modeling approach, various characteristics can be captured such as switches or logical conditions. Next, we design bang-bang controllers. We investigate their advantages and drawbacks of their usage for control of considered liquid tanks system. Finally, we design optimal control using control vector parametrization method. This control is then applied on real plant.

Keywords

optimal control, liquid tanks system, hybrid systems

Obsah

Zoznam príloh.....	10
Zoznam obrázkov.....	11
Zoznam tabuliek.....	13
Zoznam symbolov.....	14
Úvod.....	15
1 Optimálne riadenie procesov.....	16
1.1 Optimálny systém.....	16
1.2 Účelová funkcia.....	16
1.3 Podmienky optimalizácie.....	16
1.4 Obmedzenia.....	16
1.5 Cieľ optimalizácie.....	18
1.6 Rozdelenie optimalizačných úloh.....	18
1.7 Matematický model procesu.....	19
1.8 Odvodenie matematického modelu pre reálne zásobníky kvapaliny bez interakcie.....	20
1.8.1 Postup odvodu matematického modelu.....	22
1.9 Návrh optimálneho riadenia zásobníkov kvapaliny bez interakcie.....	25
1.9.1 Výpočet trajektórie združeného vektora $\lambda(t)$ a optimálneho riadenia.....	27
1.10 Riadenie reálneho procesu.....	30
1.10.1 Overenie platnosti modelu v ustálenom stave na reálnom systéme.....	30
1.10.2 Aplikácia optimálneho riadenia na zásobníky kvapaliny bez interakcie.....	32
1.10.3 Aplikácia optimálneho PID regulátora na zásobníky kvapaliny bez interakcie.....	34
2 Hybridný prístup k modelovaniu zásobníkov.....	38
2.1 Vytvorenie HYSDEL – súboru.....	38
2.1.1 Vysvetlenie štruktúry zápisu v jazyku HYSDEL.....	38
2.1.2 HYSDEL- súbor pre systém dvoch zásobníkov kvapaliny bez interakcie.....	39
2.1.3 Porovnanie priebehu výstupných veličín získaných pomocou nelineárneho modelu a modelu HYSDEL.....	40
2.1.4 Porovnanie rôznych modelov s reálnym procesom.....	42
2.2 Jednoduché regulátory navrhnuté pomocou HYSDEL-u.....	44
2.2.1 Dvojpólový regulátor.....	44
2.2.2 Trojpólový regulátor.....	51

3	Časovo optimálne riadenie zásobníkov kvapaliny bez interakcie.....	59
3.1	Výpočet optimálneho riadenia metódou parametrizácie vektora riadenia.....	59
4	Záver.....	65
	Zoznam použitej literatúry.....	68

Zoznam príloh

Diplomová práca v elektronickej forme priložená na CD.

Zoznam obrázkov

Obr.č.1: Systém reálnych zásobníkov kvapaliny.....	20
Obr.č.2: Technický náčrt systému dvoch zásobníkov kvapaliny bez interakcie.....	21
Obr.č.3: Priebehy výšok hladín a združených veličín λ_1 a λ_2 v čase.....	28
Obr.č.4: Priebeh $u^*(t)$ aproximovaného polynómom piateho stupňa.....	29
Obr.č.5: Schéma pre skúmanie priebehu výšky hladiny v druhom zásobníku pri prechode z prvého ustáleného stavu do druhého.....	31
Obr.č.6: Priebeh výšky hladiny v druhom zásobníku pri prechode z prvého ustáleného stavu do druhého	32
Obr.č.7: Schéma pre aplikáciu optimálneho riadenia zásobníkov.....	33
Obr.č.8: Priebeh výšky hladiny v druhom zásobníku, počas aplikácie optimálneho riadenia.....	34
Obr.č.9: Schéma pre riadenie zásobníkov kvapaliny bez interakcie pomocou optimálneho PID regulátora.....	36
Obr.č.10: Priebeh výšky hladiny v čase, pri aplikácii optimálneho PID regulátora.....	36
Obr.č.11: Schéma pre porovnanie nelineárneho modelu a modelu získaného pomocou programovacieho jazyka HYSDEL.....	41
Obr.č.12: Porovnanie priebehov výšok hladín získaných pomocou nelineárneho modelu a modelu získaného pomocou programovacieho jazyka HYSDEL.....	41
Obr.č.13: Schéma pre porovnanie priebehu výstupných veličín.....	42
Obr.č.14: Porovnanie priebehov výšky hladiny v druhom zásobníku, získaných pomocou viacerých variantov modelov.....	43
Obr.č.15: Systém zásobníkov, v ktorom riadime dolný zásobník na žiadanú výšku hladiny (h_r).....	45
Obr.č.16: Simulačná schéma na získanie priebehu výšky hladiny v dolnom zásobníku pri použití dvojpolohového regulátora.....	46
Obr.č.17: Priebeh výšky hladiny dolného zásobníka - použitie dvojpolohového regulátora.....	47

Obr.č.18: Priebeh akčných zásahov pri riadení hladiny dolného zásobníka– použitie dvojpolohového regulátora.....	48
Obr.č.19: Priebeh výšky hladiny dolného zásobníka pri počiatkovej výške hladiny $h_0=10\text{cm}$ - použitie dvojpolohového regulátora.....	49
Obr.č.20: Priebeh akčných zásahov pri riadení hladiny dolného zásobníka z počiatkovej výšky hladiny $h_0=10\text{cm}$ – použitie dvojpolohového regulátora.....	50
Obr.č.21: Simulačná schéma na získanie priebehu výšky hladiny v hornom a dolnom zásobníku pri použití trojpolohového regulátora.....	51
Obr.č.22: Systém zásobníkov, v ktorom riadime horný a dolný zásobník na žiadanú výšku hladiny (h_r).....	52
Obr.č.23: Priebehy výšky hladín horného a dolného zásobníka - použitie trojpolohového regulátora.....	54
Obr.č.24: Priebeh akčných zásahov pri riadení hladiny zásobníkov – použitie trojpolohového regulátora.....	55
Obr.č.25: Priebeh výšok hladín horného a dolného zásobníka pri počiatkovej výške hladiny $h_0=10\text{cm}$ - použitie trojpolohového regulátora.....	56
Obr.č.26: Priebeh akčných zásahov pri riadení hladiny zásobníkov z počiatkovej výšky hladiny $h_0=10\text{cm}$ – použitie trojpolohového regulátora.....	57
Obr.č.27: Vypočítané optimálne riadenie metódou parametrizácie vektora riadenia.....	61
Obr.č.28: Predpokladaný priebeh výšok hladín zásobníkov v čase, počas aplikácie vypočítaného optimálneho riadenia metódou parametrizácie vektora riadenia.....	62
Obr.č.29: Schéma pre riadenie zásobníkov kvapaliny bez interakcie pomocou dopredu vypočítaného optimálneho riadenia metódou parametrizácie vektora riadenia.....	63
Obr.č.30: Priebeh výšky hladiny v druhom zásobníku v čase, pri aplikácii optimálneho riadenia vypočítaného pomocou metódy parametrizácie vektora riadenia.....	63

Zoznam tabuliek

Tab. č.1: Geometrické rozmery sústavy.....	21
Tab. č.2: Ustálené výšky hladín.....	27
Tab.č.3: Prepočítané ustálené výšky hladín a ustálené vstupné prietoky na napätie.....	30
Tab.č.4: Podmienky riadenia pre dvojpohový regulátor.....	45
Tab.č.5: Podmienky riadenia pre trojpohový regulátor.....	52
Tab.č.6: Obmedzenia stavov a vstupov.....	60
Tab.č.7: Počiatočný stav výšky hladiny v druhom zásobníku - prvý ustálený stav.....	60
Tab.č.8: Akčné zásahy.....	61

Zoznam symbolov

$\mathbf{x}(t)$	vektor stavových veličín
$\mathbf{u}(t)$	vektor riadiacich (akčných) veličín
$\mathbf{y}(t)$	vektor výstupných veličín
F_1	plocha horného zásobníka kvapaliny
F_2	plocha dolného zásobníka kvapaliny
k_{11}	konštanta prvého ventilu (za horným zásobníkom)
k_{22}	konštanta druhého ventilu (za dolným zásobníkom)
$q_0(t)$	vstupný prietok
q_0^s	vstupný prietok v ustálenom stave
$q_1(t)$	prietok vytekajúci z horného zásobníka do dolného
$q_2(t)$	prietok vytekajúci z dolného zásobníka
$h_1(t)$	výška hladiny v hornom zásobníku
$h_2(t)$	výška hladiny v dolnom zásobníku
h_1^s	výška hladiny v hornom zásobníku v ustálenom stave
h_2^s	výška hladiny v dolnom zásobníku v ustálenom stave
h_0	počiatočné podmienky pre výšky hladiny
T_s	perióda vzorkovania

Úvod

V priemyselnej výrobe sa kladie veľký dôraz na rozvoj a napredovanie technologickej úrovne. S rozvíjajúcou sa technologickou úrovňou výroby sa znižujú výrobcom výrobné náklady, časová náročnosť, opotrebenie strojov a pod., zvyšuje sa produkcia a následne aj výnosy. Popri zvyšujúcej sa technologickej úrovni výroby, sa musí rozvíjať aj automatizácia výroby, t.j. jej riadenie.

Optimálne riadenie vychádza z výberu najlepšej možnosti riešenia daného optimalizačného problému z ostatných možností riešení, podľa určitých požiadaviek. Ako požiadavky môžeme uvažovať napr. minimalizáciu nákladov na výrobu produktu, zvýšenie výkonnosti vo výrobe produktov a pod. Tieto požiadavky sú cielene spracované a zhodnotené tak, aby bola zároveň zachovaná bezpečnosť prevádzky.

Pred začatím riadenia pomocou regulátora si musíme položiť dve základné otázky: „Aký typ regulátora, na riadenie daného systému chceme použiť? Bude tento regulátor vhodný pre riadenie daného systému?“ Nie je pravidlom, že zložitejší regulátor je lepší ako jednoduchší. Zložitý regulátor potrebuje dlhší čas na výpočty, a tým sa zvyšuje aj čas regulácie. Pri niektorých systémoch však potrebujeme okamžitý zásah regulátora, bez väčšieho časového omeškania, spôsobeného výpočtami. Toto omeškanie by mohlo spôsobiť kvalitatívne nevyhovujúce produkty, s nimi súvisiace straty podniku, až haváriu systému.

V našej práci sa zameriavame na nájdenie optimálnych trajektórií vstupných veličín pre riadenie zásobníkov kvapaliny bez interakcie. Toto optimálne riadenie neskôr aplikujeme na zásobníky kvapaliny bez interakcie, pri ktorých vieme merať len výšku hladiny v druhom zásobníku.

Ďalej uvažujeme systém dvoch zásobníkov kvapaliny bez interakcie ako hybridný systém. Pri jeho riadení aplikujeme logické podmienky. Na tento zápis je vhodný modelovací jazyk vyššej úrovne pre hybridné systémy *HYSDEL*. Zameriavame sa na vhodnosť výberu jednoduchších regulátorov, konkrétne dvoj a trojpolohových regulátorov, pri riadení systému.

Najväčší význam pre riadenie reálnych zásobníkov kvapaliny má časovo optimálne riadenie. Spomínané riadenie aplikujeme na zásobníky kvapaliny bez interakcie. Navrhujeme ho metódou parametrizácie vektora riadenia.

1 Optimálne riadenie procesov

Problém optimálneho riadenia spočíva vo výbere najlepšieho variantu riešenia podľa určitého kritéria z množiny všetkých alebo dovolených variantov. [1]

1.1 Optimálny systém

Optimálnym systémom rozumieme systém, ktorý má v určitom zmysle najlepšie vlastnosti riadenia. Pretože je možné voliť veľký počet hľadísk, podľa ktorých bude posudzované, čo je najlepším chovaním systému, máme tím pádom veľa druhov optimálnych systémov (napr. časovo optimálny, energeticky optimálny a pod.). [1]

1.2 Účelová funkcia

Pri riešení úlohy optimalizácie vo všeobecnosti je nutné z danej množiny M prvkov p určiť taký prvok p^* , pri ktorom kritérium optimalizácie je vyjadrené účelovou funkciou

$$J = J(p) \tag{1.1}$$

nadobúda extrémne hodnoty a to minimá alebo maximá podľa požiadavky úlohy. [1]

1.3 Podmienky optimalizácie

Množina M vyjadruje podmienky optimalizácie, obmedzenia kladené na výber prvkov p . Môže to byť napr. množina prípustných konštrukčných variantov nejakého zariadenia, množina existujúcich dopravných spojov, množina dovolených stavov systému a pod.. [1]

1.4 Obmedzenia

V každej úlohe riadenia reálneho technologického procesu alebo technického systému je nevyhnutné splniť celý rad dopredu zadaných obmedzení. [2]

Úloha obmedzení pri návrhu riadenia má prinajmenšom tri dôležité aspekty [2]:

- Použitie obmedzení pre lepšiu reprezentáciu fyzikálnych systémov: pri tomto aspekte sú brané do úvahy fyzikálne obmedzenia existujúce v praktických aplikáciách. Patrí sem napr. výška hladiny zásobníka kvapaliny. Keby sme zvýšili prítok kvapaliny (vstupný prúd) a znížili alebo ponechali hodnotu odtoku kvapaliny (výstupného prúdu), došlo by k pretečeniu zásobníka, t.j. k poruche. Ďalšími fyzikálnymi obmedzeniami sú napr. miera rozsah teplotnej znášanlivosti konštrukčného materiálu pri výmenníkoch tepla, reaktoroch a pod. Efektívny riadiaci systém musí byť navrhovaný tak, aby jeho akčné zásahy aplikované pri riadení procesu splňali zadané obmedzenia a pracovný bod procesu ležal vždy v ich prieniku.
- Obmedzenia pre zaručenie stability riadenia: v aspekte vystupujú obmedzenia napr. vo forme koncových stabilizujúcich obmedzení.
- Využitie obmedzení ako ďalších ladiacich parametrov regulátora: vykonáva sa za účelom dosiahnutia lepšej kvality riadenia. Pri šoférovaní auta sem patrí napr. obmedzenie akcelerácie auta na zvýšenie komfortu pasažierov a pod..

Z hľadiska charakteru je možné obmedzenia rozdeliť nasledovne [2]:

- Fyzikálne obmedzenia: vstupné veličiny procesu sa počas riadenia môžu meniť iba v konečnom, vopred danom rozsahu a s limitovanou rýchlosťou. Medzi fyzikálne obmedzenia patrí, napr.: rýchlosť otvárania ventilu, teplotná stálosť materiálu, výška hladiny kvapaliny, koncentrácia reakčnej zmesi a pod. Fyzikálne obmedzenia nemôžeme prekročiť.
- Technologické obmedzenia: riadené výstupné a stavové veličiny nesmú vybočiť z dopredu zadaných hraníc, v opačnom prípade obvykle hrozí strata kvality produkcie. Napr. pri nedostatočnom chladení zmesi v reaktore môže dôjsť buď k vytvoreniu úplne iného produktu, aký bolo plánované dosiahnuť, nemusí dôjsť k vôbec žiadnej reakčnej premene, alebo len k čiastočnej. K podobným problémom môže dôjsť aj pri príliš intenzívnom chladení. Problémy závisia od typu reakcie. Pri nedostatočnom miešaní pri procese miešania sa môže získať nekvalitný, nedostatočne premiešaný produkt. Pri výmenníku tepla s externým

ohrevom, pri nedostatočnom ohreve nedochádza k požadovanej intenzite výmeny tepla.

- Bezpečnostné obmedzenia: Pomocné veličiny, ktoré nie sú priamo riadené, nesmú prekročiť z bezpečnostných dôvodov svoje stanovené kritické hranice. Patrí sem napr. tlak v chemickom reaktore, zásobníku kvapaliny a pod..
- Stabilizujúce obmedzenia: Stabilizujúce obmedzenia sú špecifické obmedzenia na stavové veličiny uvažované pri syntéze riadenia, ktoré garantujú stabilitu riadenia procesu. Je možné povedať, že sem patrí výber z fyzikálnych obmedzení, technologických obmedzení a bezpečnostných obmedzení, ktoré zabezpečujú stabilné riadenie.

Všetky vyššie spomínané obmedzenia sa zoradujú podľa dôležitosti, v poradí od najdôležitejších [2]:

1. Fyzikálne obmedzenia
2. Technologické obmedzenia
3. Bezpečnostné obmedzenia
4. Stabilizujúce obmedzenia

1.5 Cieľ optimalizácie

Účelová funkcia vyjadruje cieľ optimalizácie a zároveň je jej hodnota vypočítaná pre konkrétny prvok p z množiny M , mierou optimálnosti tohto prvku. Hodnoty účelovej funkcie pre rôzne prvky p umožňujú porovnávať tieto prvky a určovať, ktorý z prvkov sa viac približuje optimálnemu. Účelová funkcia môže vyjadrovať napr. náklady spojené s realizáciou vybraného variantu, náklady potrebné na prepravu materiálu rôznymi dopravnými spojmi a pod.. [1]

1.6 Rozdelenie optimalizačných úloh

Úlohy optimalizácie rozdelujeme z hľadiska ich podstaty a metód [1]:

Statická optimalizácia: znamená určovanie optimálnych veličín v ustálenom stave. Väčšinou ide o dosiahnutie najlepšej energetickej účinnosti, najlepšej kvality

výroby, najmenších strát materiálu. Účelová funkcia nadobúda extrémne hodnoty a obvykle sa dá vyjadriť algebraickou funkciou jednotlivých parametrov.

Dynamická optimalizácia: vyžaduje dosiahnutie optimálneho priebehu riadiaceho pochodu. Časové priebehy veličín musia byť také, aby kritériálna funkcia nadobúdala svoje extrémne hodnoty. Kritériálna funkcia má v tomto prípade tvar funkcionálu, t.j. predpisu, podľa ktorého sa každej funkcii priradí číselná hodnota. Najbežnejším tvarom funkcionálu je určitý integrál.

1.7 Matematický model procesu

Pri vytváraní matematického modelu procesu vychádzame z reálneho systému. Matematický model procesu reprezentuje informácie a vedomosti, ktoré vieme o danom systéme. Opisujeme v ňom matematické vzťahy medzi veličinami. [3]

Z hľadiska veličín je možné matematické modely rozdeliť nasledovne [3]:

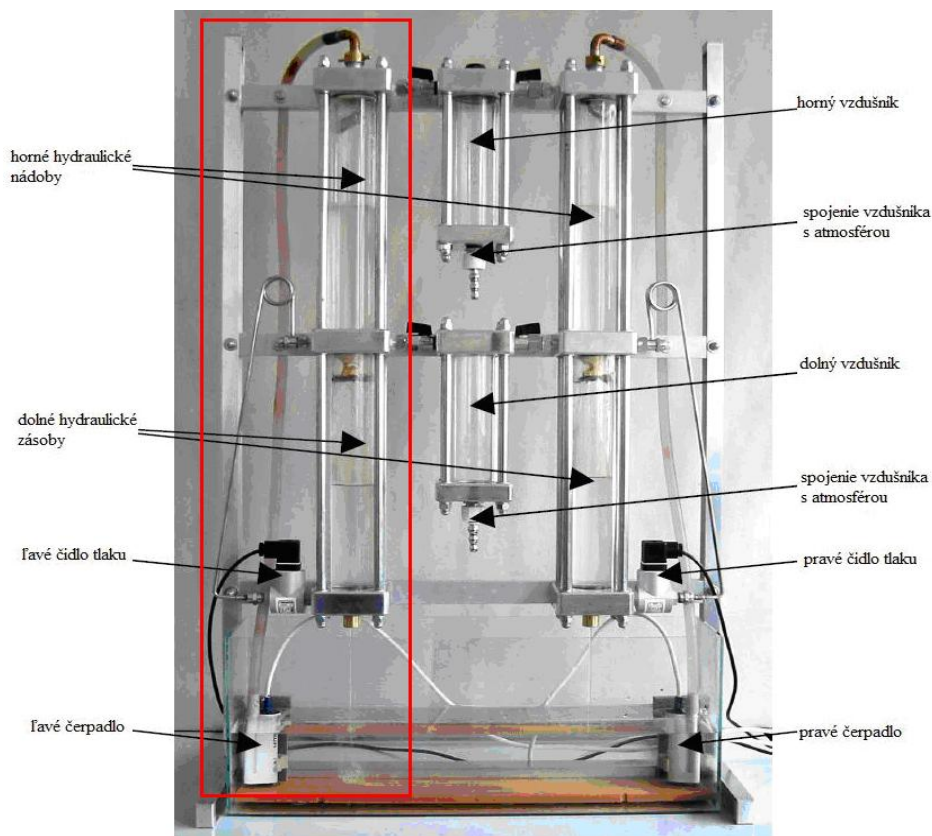
- Stavový model
- Vstupno-výstupný model

Systémy sa delia nasledovne [3]:

- Dynamické/statické systémy: podľa toho, či sa veličiny menia v čase
- Spojité/diskrétné systémy: podľa toho, či sú veličiny v čase spojité/nespojité
- Systémy so sústrednými/rozloženými parametrami: podľa toho, či sa veličiny menia v priestore
- Stacionárne/nestacionárne systémy: podľa toho, či sa parametre menia v čase
- Lineárne/nelineárne systémy: podľa toho, či sú vzťahy medzi veličinami opísané lineárnymi/nelineárnymi funkciami
- Deterministické/stochaistické systémy: podľa výskytu náhodných veličín

1.8 Odvodenie matematického modelu pre reálne zásobníky kvapaliny bez interakcie

Spomínaný reálny systém zásobníkov vyzerá nasledovne:

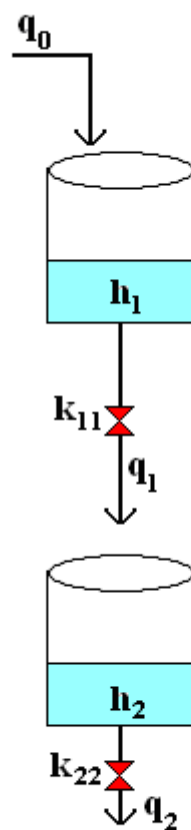


Obr.č.1: Systém reálnych zásobníkov kvapaliny

V našej práci budeme uvažovať len systém dvoch ľavých zásobníkov zapojených za sebou (na Obr.č.1 vyznačené farebne). Zásobníky zapojené za sebou sú bez interakcie, čo znamená, že výšky hladín v jednotlivých zásobníkoch sa navzájom neovplyvňujú. [4]

Matematický model zásobníkov kvapaliny vychádza z materiállovej bilancie:

$\{\text{súčet hmotnostných tokov do systému vstupujúcich}\} = \{\text{súčet hmotnostných tokov zo systému vystupujúcich}\} + \{\text{rýchlosť akumulácie hmotnosti v systéme}\}$



Obr.č.2: Technický náčrt systému dvoch zásobníkov kvapaliny bez interakcie

Tab.č.1: Geometrické rozmery sústavy

Priemer ľavých nádrží	5,0000 cm
Priemer clonky nádrží	0,4000 cm
Výška nádrží	31,0000 cm
Konštanty ventilov	3,6670 cm ^{2,5} s ⁻¹

1.8.1 Postup odvodenia matematického modelu

Z materiálovej bilancie odvodíme dynamický matematický model

$$\frac{d[F_1 \rho h_1(t)]}{dt} = \rho q_0(t) - \rho q_1(t) \quad (1.2)$$

$$\frac{d[F_2 \rho h_2(t)]}{dt} = \rho q_1(t) - \rho q_2(t) \quad (1.3)$$

kde ρ je hustota kvapaliny, F_1 je priemer hornej nádrže, F_2 je priemer dolnej nádrže, $q_0(t)$ je vstupný prietok, $q_1(t)$ je prietok vytekajúci z horného zásobníka do dolného, $q_2(t)$ je prietok vytekajúci z dolného zásobníka, $h_1(t)$ je výška hladiny v hornom zásobníku a $h_2(t)$ je výška hladiny v dolnom zásobníku.

Keďže predpokladáme, že hustota kvapaliny je konštantná, vieme rovnice prepísať do tvaru

$$F_1 \frac{dh_1(t)}{dt} = q_0(t) - q_1(t) \quad (1.4)$$

$$F_2 \frac{dh_2(t)}{dt} = q_1(t) - q_2(t) \quad (1.5)$$

kde platí:

$$q_1(t) = k_{11} \sqrt{h_1(t)} \quad (1.6)$$

$$q_2(t) = k_{22} \sqrt{h_2(t)} \quad (1.7)$$

k_{11} a k_{22} sú konštanty ventilov umiestnených za horným a dolným zásobníkom.

Nelineárny model:

Doplnením rovníc (1.6) a (1.7) do rovníc (1.4) a (1.5) dostávame nelineárny matematický model zásobníkov kvapaliny bez interakcie v tvare

$$F_1 \frac{dh_1(t)}{dt} = q_0(t) - k_{11} \sqrt{h_1(t)} \quad (1.8)$$

$$F_2 \frac{dh_2(t)}{dt} = k_{11} \sqrt{h_1(t)} - k_{22} \sqrt{h_2(t)} \quad (1.9)$$

nelineárne členy

Rovnovážny stav:

Podmienky rovnovážneho stavu:

$$\frac{d h_1(t)}{dt} = \frac{d h_2(t)}{dt} = 0 \quad (1.10)$$

$$h_1(0) = h_{10} = h_1^s \quad (1.11)$$

$$h_2(0) = h_{20} = h_2^s \quad (1.12)$$

h_1^s je výška hladiny v hornom zásobníku v ustálenom stave a h_2^s je výška hladiny v dolnom zásobníku v ustálenom stave.

Zavedení podmienok (1.10), (1.11) a (1.12) platných pre rovnovážny stav dostávame model rovnovážneho stavu pre daný systém

$$0 = q_0^s - k_{11}\sqrt{h_1^s} \quad (1.13)$$

$$0 = k_{11}\sqrt{h_1^s} - k_{22}\sqrt{h_2^s} \quad (1.14)$$

kde q_0^s je vstupný prietok v ustálenom stave.

Z rovníc (1.13) a (1.14) dostávame výpočet ustálených výšok hladín v zásobníkoch:

$$h_1^s = \left(\frac{q_0^s}{k_{11}} \right)^2 \quad (1.15)$$

$$h_2^s = \left(\frac{q_0^s}{k_{22}} \right)^2 \quad (1.16)$$

Odchýlkový tvar modelu:

Pri odvodení odchýlkového tvaru modelu spravíme rozdiel dynamického matematického modelu a modelu v rovnovážnom stave:

$$F_1 \frac{d[h_1(t) - h_1^s]}{dt} = [q_0(t) - q_0^s] - k_{11}[\sqrt{h_1(t)} - \sqrt{h_1^s}] \quad (1.17)$$

$$F_2 \frac{d[h_2(t) - h_2^s]}{dt} = k_{11}[\sqrt{h_1(t)} - \sqrt{h_1^s}] - k_{22}[\sqrt{h_2(t)} - \sqrt{h_2^s}] \quad (1.18)$$

Vstupná odchýlková veličina:

$$u(t) = q_0(t) - q_0^s \quad (1.19)$$

Stavové odchýlkové veličiny:

$$x_1(t) = h_1(t) - h_1^s \quad (1.20)$$

$$x_2(t) = h_2(t) - h_2^s \quad (1.21)$$

Pretože reálne vieme merať len výšku hladiny v druhom zásobníku, zavedieme si jednu výstupnú odchýlkovú veličinu:

$$y(t) = h_2(t) - h_2^s \quad (1.22)$$

$$y(t) = x_2(t) \quad (1.23)$$

Lineárny model:

V niektorých prístupoch k výpočtu optimálneho riadenia je vhodné uvažovať s lineárnym modelom procesu. Linearizáciu nelineárneho modelu vykonávame pomocou metódy Taylorovho rozvoja.

Taylorov rozvoj nelineárnych členov:

$$\sqrt{h_1}(t) \approx \sqrt{h_1^s} + \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{h_1^s}} (h_1(t) - h_1^s) = \sqrt{h_1^s} + \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{h_1^s}} x_1(t) \quad (1.24)$$

$$\sqrt{h_2}(t) \approx \sqrt{h_2^s} + \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{h_2^s}} (h_2(t) - h_2^s) = \sqrt{h_2^s} + \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{h_2^s}} x_2(t) \quad (1.25)$$

Po zlinearizovaní a zavedení odchýlkových veličín dostávame model v tvare lineárnych diferenciálnych rovníc:

$$F_1 \frac{d x_1(t)}{dt} = u(t) - \frac{k_{11}}{2\sqrt{h_1^s}} x_1(t) \quad (1.26)$$

$$F_2 \frac{d x_2(t)}{dt} = \frac{k_{11}}{2\sqrt{h_1^s}} x_1(t) - \frac{k_{22}}{2\sqrt{h_2^s}} x_2(t) \quad (1.27)$$

$$y(t) = x_2(t) \quad (1.28)$$

1.9 Návrh optimálneho riadenia zásobníkov kvapaliny bez interakcie

Pri návrhu optimálneho riadenia zásobníkov kvapaliny bez interakcie vychádzame z linearizovaného odchýlkového modelu, v ktorom sme prislúchajúce rovnice vydelili konštantami plochy horného a dolného zásobníka F_1 a F_2 . Keďže sa veľkosť plôch horného a dolného zásobníka rovná, ďalej už budeme používať len konštantu F pre obidve plochy zásobníkov. Keďže sa rovnajú aj hodnoty konštánt ventilov horného a dolného zásobníka k_{11} a k_{22} , ďalej už budeme používať konštantu k pre obidva ventily.

$$\frac{d x_1(t)}{dt} = \frac{1}{F} u(t) - \frac{1}{F} \frac{k}{2\sqrt{h_1^s}} x_1(t) \quad (1.29)$$

$$\frac{d x_2(t)}{dt} = \frac{1}{F} \frac{k}{2\sqrt{h_1^s}} x_1(t) - \frac{1}{F} \frac{k}{2\sqrt{h_2^s}} x_2(t) \quad (1.30)$$

Pretože vieme merať len výšku hladiny v druhom zásobníku kvapaliny, uvažujeme len s jednou výstupnou rovnicou v tvare

$$y(t) = x_2(t) \quad (1.31)$$

Majme funkcionál [5]:

$$J = \int_{t_0}^{t_f} [x_2^2(t) + r u^2(t)] dt \quad (1.32)$$

kde $x(t)$ je vektor stavov systému

$u(t)$ je vektor riadenia

r je váhový koeficient

t_0 je začiatkový čas

t_f je konečný čas

Majme Hamiltonovu funkciu

$$H = x_2^2(t) + ru^2(t) + \lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2 \quad (1.33)$$

kde f_1 a f_2 sú pravé strany rovníc (1.29) a (1.30), λ_1 a λ_2 sú zložky združeného vektora λ .

Môžeme napísať, že [5]:

$$\frac{d\lambda(t)}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x} = \begin{bmatrix} -\frac{\partial H}{\partial x_1} \\ -\frac{\partial H}{\partial x_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \lambda_1(t) + \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \lambda_2(t) \\ 2x_2(t) + \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \lambda_2(t) \end{bmatrix} \quad (1.34)$$

Z teórie optimálneho riadenia vyplýva, že [5]:

$$\frac{\partial H}{\partial u} = 0 \quad (1.35)$$

potom

$$2ru^*(t) + \lambda_1(t) \frac{\partial f_1}{\partial u} = 0 \quad (1.36)$$

Z rovnice (1.36) vieme vyjadriť optimálne riadenie $u^*(t)$

$$u^*(t) = -\frac{\lambda_1(t) \frac{\partial f_1}{\partial u}}{2r} \quad (1.37)$$

Po doplnení rovnice f_1 (1.29) dostávame optimálne riadenie $u^*(t)$

$$u^*(t) = -\frac{\lambda_1(t) \frac{1}{F_1}}{2r} \quad (1.38)$$

Koncová podmienka pre združený vektor $\lambda(t)$:

$$\lambda(t_f) = \left(\frac{\partial G_{tf}}{\partial x} \right)_{t=tf} \quad (1.39)$$

kde G_{tf} je neintegrálna časť minimalizovaného funkcionálu (1.32)

Po dosadení rovníc f_1 (1.29) a f_2 (1.30) dostávame:

$$\frac{dx_1(t)}{dt} = -\frac{1}{F^2} \frac{\lambda_1(t)}{2r} - \frac{1}{F} \frac{k}{2\sqrt{h_1^s}} x_1(t) \quad (1.40)$$

$$x_1(0) = x_1^s \quad (1.41)$$

$$\frac{dx_2(t)}{dt} = \frac{1}{F} \frac{k}{2\sqrt{h_1^s}} x_1(t) - \frac{1}{F} \frac{k}{2\sqrt{h_2^s}} x_2(t) \quad (1.42)$$

$$x_2(0) = x_2^s \quad (1.43)$$

$$\frac{d\lambda_1(t)}{dt} = \frac{1}{F} \frac{k}{2\sqrt{h_1^s}} \lambda_1(t) - \frac{1}{F} \frac{k}{2\sqrt{h_1^s}} \lambda_2(t) \quad (1.44)$$

$$\lambda_1(t_f) = 0 \quad (1.45)$$

$$\frac{d\lambda_2(t)}{dt} = -2x_2(t) + \frac{1}{F} \frac{k}{2\sqrt{h_2^s}} \lambda_2(t) \quad (1.46)$$

$$\lambda_2(t_f) = 0 \quad (1.47)$$

1.9.1 Výpočet trajektórie združeného vektora $\lambda(t)$ a optimálneho riadenia

Na začiatku sme si zvolili ustálené výšky hladín. Cieľom bolo riadenie procesu z prvého ustáleného stavu do druhého.

Tab.č.2: Ustálené výšky hladín

	1. ustálený stav	2.ustálený stav
$h_1^s[\text{cm}]$	9,0000	16,0000
$h_2^s[\text{cm}]$	9,0000	16,0000
$q_0^s[\text{cm}^3\text{s}^{-1}]$	11,0010	14,6680

Po doplnení geometrických rozmerov sústavy (*Tab.č.1*) a ustálených výšok hladín (*Tab.č.2*) do rovníc (1.40), (1.42), (1.44) a (1.46) sme dostali matice

$$A_{OR} = \begin{bmatrix} -0,0765 & 0 & -(0,2)/r & 0 \\ 0,0765 & -0,0765 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0765 & -0,0765 \\ 0 & -2 & 0 & 0,0765 \end{bmatrix} \quad (1.48)$$

$$B_{OR} = \begin{bmatrix} 0,2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.49)$$

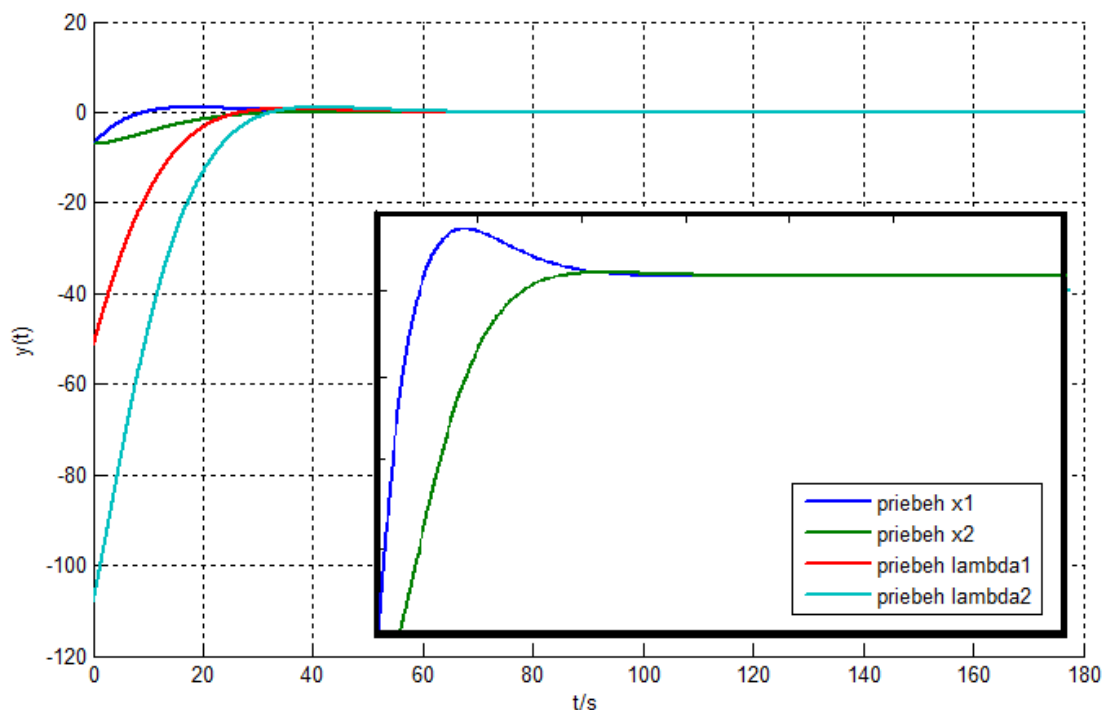
A_{OR} matica koeficientov stavových veličín optimálne riadeného systému

B_{OR} matica koeficientov vstupných veličín v stavovej rovnici optimálne riadeného systému

V programe MATLAB sme si iteratívne vypočítali trajektóriu združeného vektora $\lambda(t)$ a koncový čas t_{tf} . Zvolili sme si váhovú maticu $r = 1,0000$. Dopredu sme si vypočítali aj neskôr použité riadenie. Do úvahy sme brali stabilitu integrovaného systému diferenciálnych rovníc. [6]

Vypočítaný koncový čas:

$$t_{tf} = 183,8275 \text{ s}$$



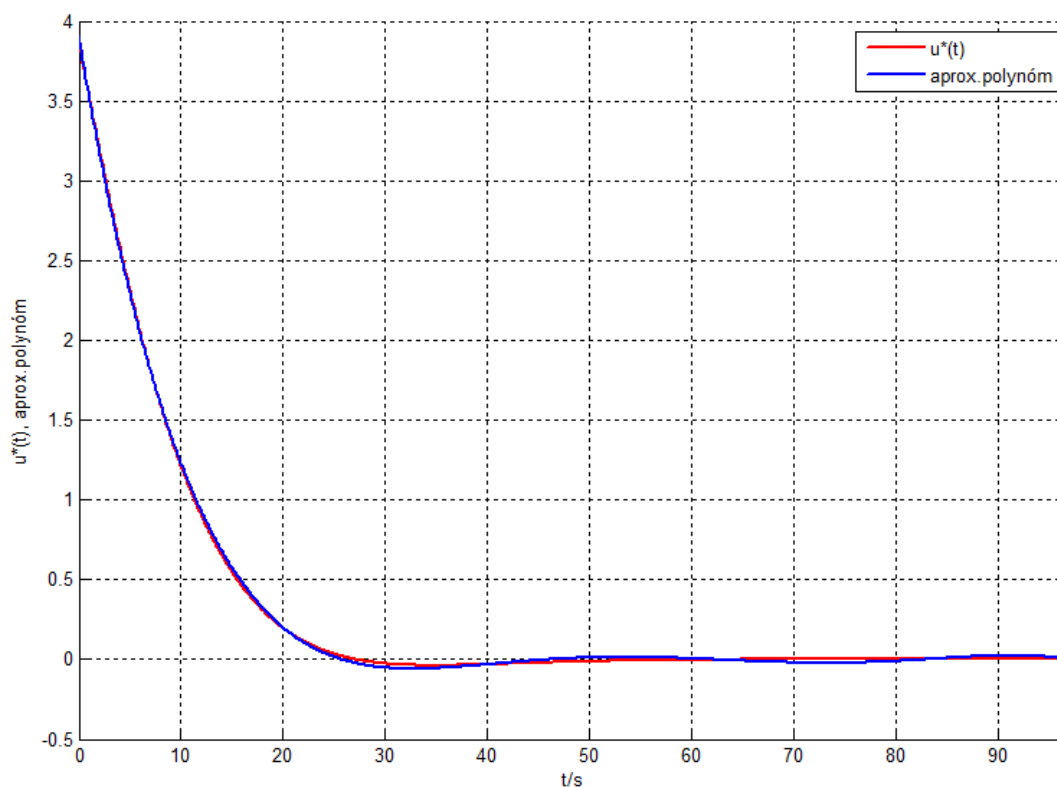
Obr.č.3: Priebehy výšok hladín a združených veličín λ_1
a λ_2 v čase

Pretože sme potrebovali toto optimálne riadenie aplikovať v čase, aproximovali sme ho polynómom piateho stupňa v tvare

$$k_1 T^5 + k_2 T^4 + k_3 T^3 + k_4 T^2 + k_5 T + k_6 = 0 \quad (1.50)$$

ktorý najlepšie opisoval naše vypočítané riadenie.

Pri výpočte optimálneho riadenia sme neuvažovali so vstupnými ani so stavovými obmedzeniami.



Obr.č.4: Priebeh $u^*(t)$ aproximovaného polynómom piateho stupňa

Maximálny možný vstupný prietok do zásobníkov kvapaliny, uvádzaný vo voltoch bol veľkosti 10 V.

Na (Obr.č.4) môžeme vidieť, že nami vypočítané riadenie spĺňa fyzické obmedzenia daného zariadenia.

1.10 Riadenie reálneho systému

Nami dopredu vypočítané optimálne riadenie sme chceli aplikovať na reálnych zásobníkoch kvapaliny bez interakcie.

1.10.1 Overenie platnosti modelu v ustálenom stave na reálnom systéme

Na začiatku sme si zvolili dve ustálené výšky hladín, ku ktorým sme si dopočítali pomocou rovníc (1.15) a (1.16) ustálené vstupné prietoky (Tab.č.2).

Pretože reálny systém pracuje s napätím, museli sme si výšky hladín a vstupné prietoky prepočítať na napätie (Tab.č.3).

Na prepočet výšok hladín na napätie sme použili prepočítavací vzťah:

$$y_2 = 0,3676h_2 - 0,8941 \quad (1.51)$$

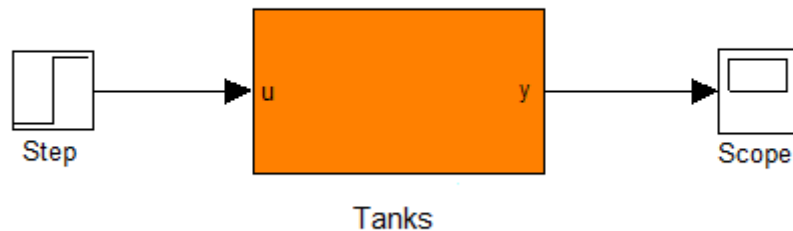
Na prepočet vstupného prietoku kvapaliny na vstupné napätie sme použili prepočítavací vzťah:

$$u = 0,0093q^2 + 0,1437q + 0,0526 \quad (1.52)$$

Tab.č.3: Prepočítané ustálené výšky hladín a ustálené vstupné prietoky na napätie

	Prvý ustálený stav	Druhý ustálený stav
Ustálený vstupný prietok $q[\text{cm}^3\text{s}^{-1}]$	11,0010	14,6680
Ustálený vstupný prietok $u[\text{V}]$	2,7223	4,0215
Ustálená výška hladiny $h_2[\text{cm}]$	9,0000	16,0000
Ustálená výška hladiny $y_2[\text{V}]$	2,4143	4,9875

Skúmali sme, či reálny systém dosiahne nami vypočítané dva ustálené stavy. Použili sme simulačnú schému (Obr.č.5).



Obr.č.5: Schéma pre skúmanie priebehu výšky hladiny v druhom zásobníku pri prechode z prvého ustáleného stavu do druhého

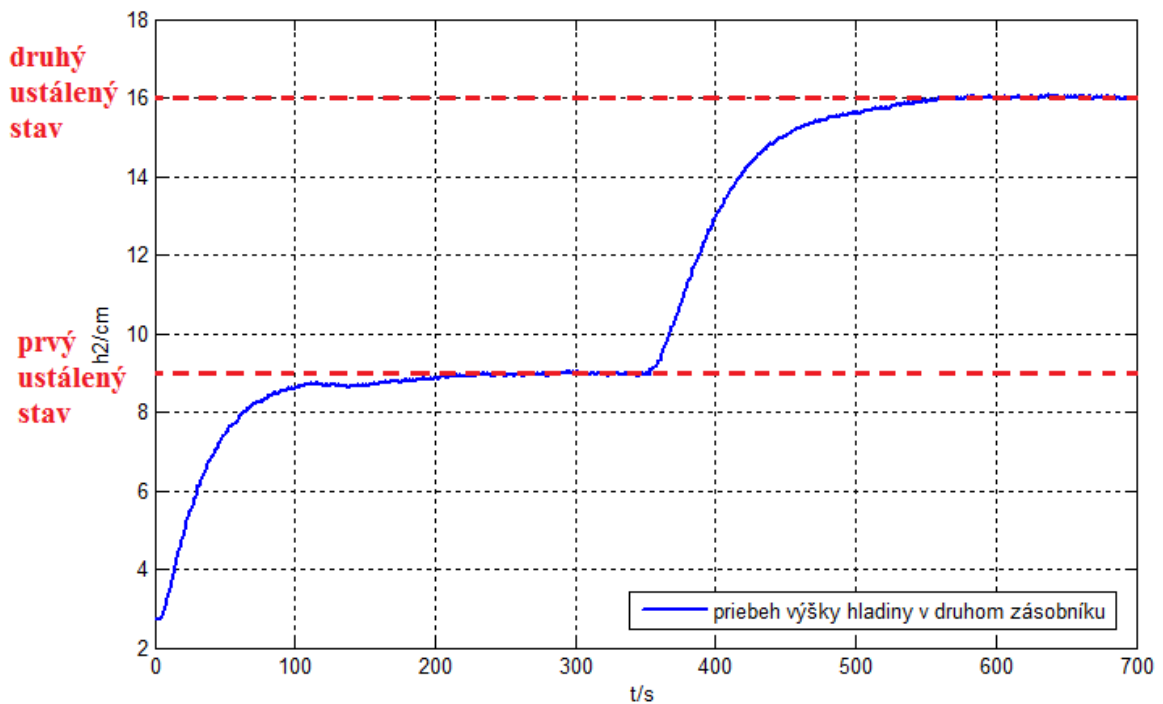
Schému (Obr.č.5) sme vytvorili v programe MATLAB.

Bloky simulačnej schémy:

Step: v tomto bloku sme zadefinovali dva vstupné prietoky a čas skokovej zmeny, kedy má nastať prepnutie medzi týmito dvoma prietokmi.

Tanks: simulačný blok reálnych zásobníkov kvapaliny

Scope: blok grafického zobrazenia priebehu výšky hladiny kvapaliny v reálnych zásobníkoch kvapaliny

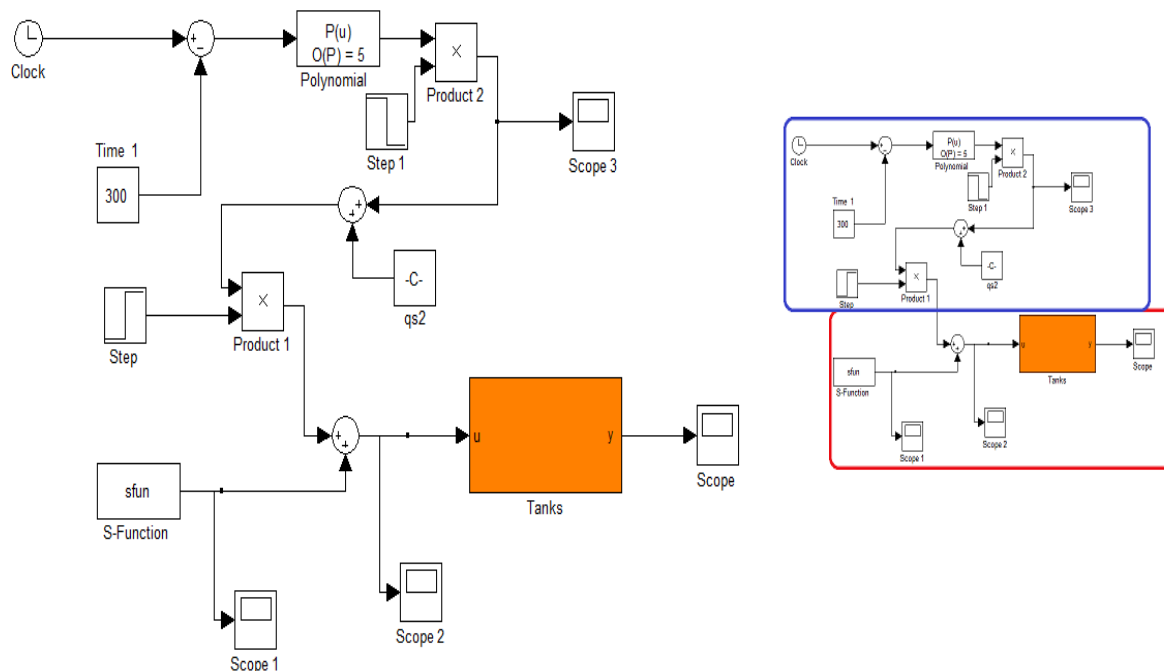


Obr.č.6: Priebeh výšky hladiny v druhom zásobníku pri prechode z prvého ustáleného stavu do druhého

Overili sme si, že výška hladiny v druhom zásobníku sa nám ustálila na predpokladanej hodnote, vypočítanej v tabuľke (Tab.č.3). Zároveň sme si aj potvrdili platnosť prepočítavacích vzťahov (1.51) a (1.52).

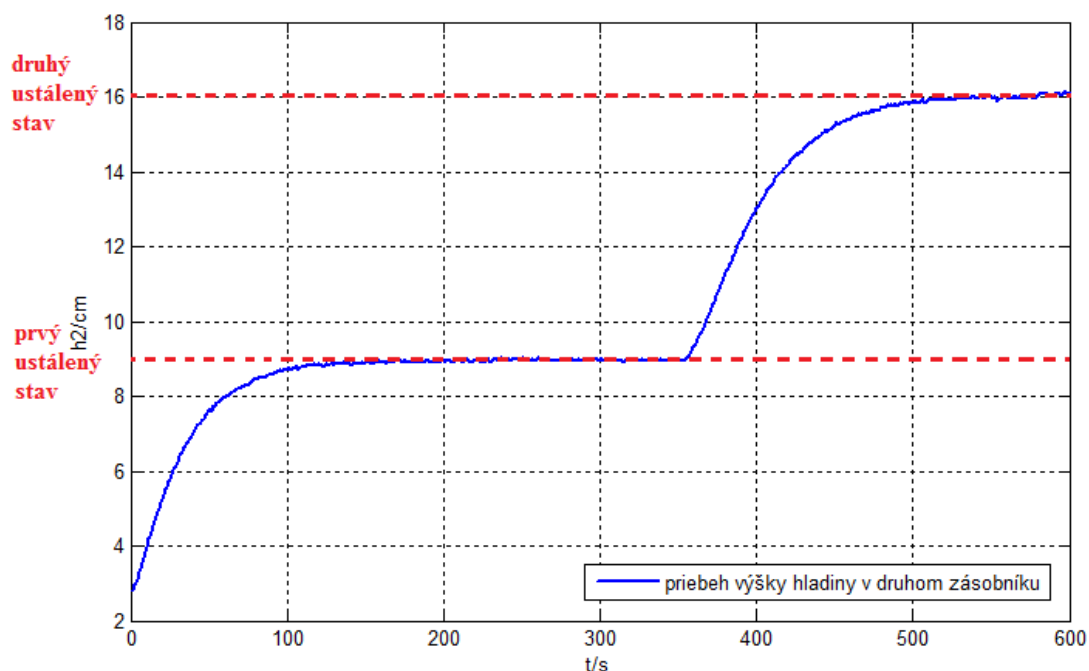
1.10.2 Aplikácia optimálneho riadenia na zásobníky kvapaliny bez interakcie

Pre aplikáciu optimálneho riadenia na reálny systém sme si vytvorili v programe MATLAB simulačnú schému (Obr.č.7).



Obr.č.7: Schéma pre aplikáciu optimálneho riadenia zásobníkov

Na začiatku experimentu nebola v zásobníkoch kvapaliny žiadna kvapalina. Najprv sme použili ako vstupnú veličinu vstupný prietok q_0^s , pre dosiahnutie prvého ustáleného stavu (Tab.č.3). Počkali sme, kým sa výška hladiny kvapaliny v druhom zásobníku ustáli. Aktívna bola len časť schémy vyznačená červenou farbou (Obr.č.7). Po ustálení výšky hladiny v prvom ustálenom stave sme začali aplikovať vypočítané optimálne riadenie. Aktívna bola už aj časť schémy vyznačená modrou farbou (Obr.č.7). Aplikáciou vypočítaného optimálneho riadenia sme dosiahli výškou hladiny kvapaliny druhého zásobníka druhý ustálený stav (Tab.č.3).



Obr.č.8: Priebeh výšky hladiny v druhom zásobníku, počas aplikácie optimálneho riadenia

Prvá časť modrej čiary predstavuje ustálenie výšky hladiny v druhom zásobníku v prvom ustálenom stave. Druhá časť predstavuje odozvu systému na optimálne riadenie z jedného ustáleného stavu do druhého. Zistili sme, že aplikované optimálne riadenie dáva výsledky predikované podľa modelu (Obr.č.3).

1.10.3 Aplikácia optimálneho PID regulátora na zásobníky kvapaliny bez interakcie

Pre odvodenie *optimálneho PID regulátora* sme potrebovali prenos systému, ktorý sme získali nasledovným spôsobom:

$$G_s(s) = [C(sI - A)^{-1}B + D] \quad (1.53)$$

kde

$$A = \begin{pmatrix} -0,0765 & 0 \\ 0,0765 & -0,0765 \end{pmatrix} \quad (1.54)$$

$$B = \begin{pmatrix} 0,2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1.55)$$

$$C = (0 \quad 1) \quad (1.56)$$

$$D = (0) \quad (1.57)$$

sú matice systému, odvodené dosadením geometrických rozmerov sústavy do rovníc (1.26) a (1.27).

Získaný prenos systému má tvar:

$$G_s(s) = \frac{0,0153}{s^2 + 0,1530s + 0,0059} \quad (1.58)$$

Odvedenie optimálneho PID regulátora:

Majme integrálny funkcionál (1.59), pre ktorý chceme nájsť taký optimálny spätnoväzbový riadiaci člen, ktorý minimalizuje kvadratickú odchýlku vstupu y od žiadanej hodnoty w a taktiež minimalizuje zmeny vstupu y , ktoré sú označené ako y' .

$$J(y, y', t) = \int_0^{\infty} [(w - y)^2 + A^2 y'^2] dt \quad (1.59)$$

kde A je váhová matica r , ktorú sme si zvolili $r = 1,0000$

Optimálny PID regulátor má tvar:

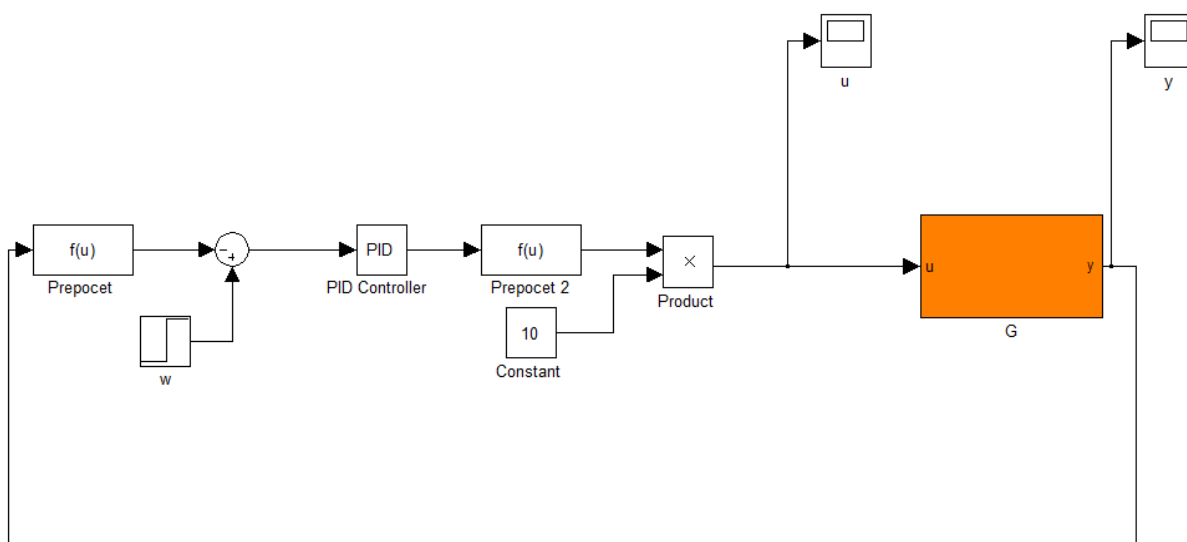
$$G_R(s) = \underbrace{\frac{a_1}{ZA}}_P + \underbrace{\frac{a_0}{ZA}}_I \frac{1}{s} + \underbrace{\frac{a_2}{ZA}}_D s \quad (1.60)$$

a_2, a_1 a a_0 sú koeficienty menovateľa prenosu systému (1.61) a

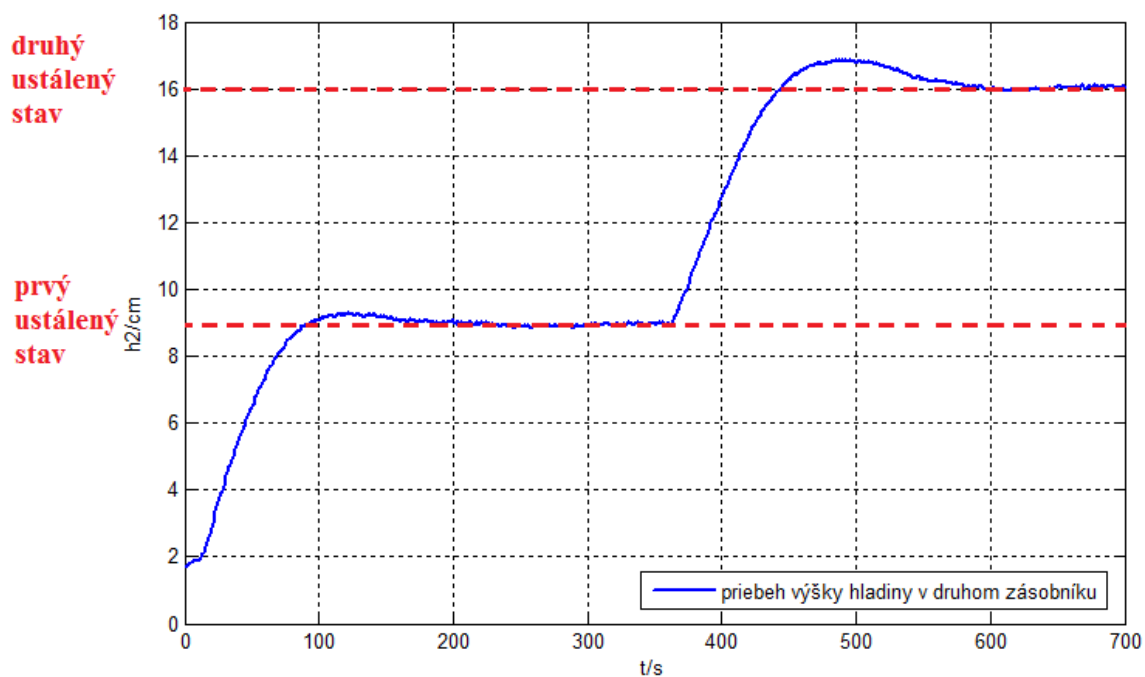
$$Z = \frac{b_0}{a_0} = \frac{0,0153}{0,0059} = 2,5932 \quad (1.61)$$

$$G_R(s) = \underbrace{\frac{0,1530}{2,8027}}_P + \underbrace{\frac{0,0059}{2,8027}}_I \frac{1}{s} + \underbrace{\frac{1}{2,8027}}_D s \quad (1.62)$$

Na aplikáciu *optimálneho PID regulátora* sme si vytvorili schému (Obr. č. 9).



Obr.č.9: Schéma pre riadenie zásobníkov kvapaliny bez interakcie pomocou optimálneho PID regulátora



Obr.č.10: Priebeh výšky hladiny v druhom zásobníku v čase, pri aplikácii optimálneho PID regulátora

Na grafe (*Obr.č.10*) môžeme vidieť odozvu systému na optimálne riadenie pomocou *optimálneho PID regulátora*.

Začínali sme s pracovať s prázdnyimi zásobníkmi. Počkali sme, kým sa nám ustáli výška hladiny v druhom zásobníku v prvom ustálenom stave. Po aplikovaní riadenia vypočítaného *optimálnym PID regulátorom* môžeme vidieť preregulovanie pri nábehu výšky hladiny do druhého ustáleného stavu. *Optimálny PID regulátor* potreboval väčší čas pri prechode z prvého ustáleného stavu do druhého ako pri aplikácií dopredu vypočítaného optimálneho riadenia (*Obr.č.8*).

2 Hybridný prístup k modelovaniu zásobníkov

Spomínaný systém dvoch zásobníkov kvapaliny zapojených za sebou je hybridný systém, pri ktorom je možné pracovať s logickými podmienkami. Pri dosiahnutí určitých podmienok (napr. časových) dôjde k prepnutiu medzi dvoma dynamikami, t.j. k zmene matematického modelu.

Pre modelovanie hybridného systému je vhodné použiť modelovací jazyk vyššej úrovne HYSDEL, ktorý je vložený do programu MATLAB.

2.1 Vytvorenie HYSDEL – súboru

Na začiatku vytvoríme v MATLAB-e súbor, ktorému dáme koncovku `.hys`.

Do súboru zapíšeme príkazy v HYSDEL, ktoré sú potrebné pre modelovanie systému dvoch zásobníkov kvapaliny bez interakcie.

2.1.1 Vysvetlenie štruktúry zápisu v jazyku HYSDEL

Hovoríme, že modelujeme systém zásobníkov kvapaliny:

```
SYSTEM zasobniky{ ...  
}
```

Do SYSTEM sa píše INTERFACE, kde deklarujeme premenné:

```
INTERFACE{  
INPUT { určujeme limity vstupov, výstupy, limity stavových veličín}  
PARAMETER{ definujeme parametre ako sú konštanty ventilov, linearizačné body a  
pod.}  
}
```

Do SYSTEM sa píše aj IMPLEMENTATION, kde vyjadrujeme vzťahy medzi premennými:

```
IMPLEMENTATION{  
AUX {zadefinovanie premenných, potrebných na vyjadrenie vzťahov, dynamiky,  
linearizácia nelinearit }  
AD { zadefinovanie podmienok, kedy má dôjsť k prepnutiu medzi dynamikami}
```

LOGIC{zadefinovanie logických podmienok, kedy má dôjsť k prepnutiu medzi dynamikami }

DA {zadefinovanie, ktorú linearizáciu treba použiť, keď sa nachádzame v danej dynamike}

V CONTINUOUS definujeme stavové veličiny:

CONTINUOUS { }

V OUTPUT definujeme výstupy:

OUTPUT{}

}

2.1.2 HYSDEL- súbor pre systém dvoch zásobníkov kvapaliny bez interakcie

```
SYSTEM zasobniky{
INTERFACE{
INPUT{REAL Qin1 [0,20];}
OUTPUT{REAL Qout1;
REAL Qout2;}
STATE{REAL hh [-10,25];
REAL hd [-10,25];}
PARAMETER{REAL k=3.667;
REAL F1=5;
REAL hhs1=5;
REAL hhs2=15;
REAL hhs3=25;
REAL hds1=5;
REAL hds2=15;
REAL hds3=25;
REAL deltat=0.05;
}
}
IMPLEMENTATION {
AUX {
REAL zh1, zh2, zh3, zd1, zd2, zd3;
BOOL dh1;
BOOL dh2, dh3, dd1, dd2, dd3;
}
AD { dh1 = hh <= 10;
dh2 = hh <= 20;
dd1 = hd <= 10;
dd2 = hd <= 20;}
LOGIC{dh3 = dh2 & ~ dh1;
```

```
dd3 = dd2 & ~ dd1;}
```

```
DA { zh1 = {IF dh1 THEN hh*deltat*0.5/sqrt(hhs1) + deltat*( sqrt(hhs1) -  
hhs1*0.5/(sqrt(hhs1)) )};  
zh2={IF dh3 THEN hh*deltat*0.5/sqrt(hhs2)+deltat*(sqrt(hhs2)-  
hhs2*0.5/(sqrt(hhs2)))};  
zh3={IF ~dh2 THEN hh*deltat*0.5/sqrt(hhs3)+deltat*(sqrt(hhs3)-  
hhs3*0.5/(sqrt(hhs3))) };
```

```
zd1 = {IF dd1 THEN hd*deltat*0.5/sqrt(hds1)+deltat*(sqrt(hds1)-  
hds1*0.5/(sqrt(hds1)))};  
zd2={IF dd3 THEN hd*deltat*0.5/sqrt(hds2)+deltat*(sqrt(hds2)-  
hds2*0.5/(sqrt(hds2)))};  
zd3={IF ~dd2 THEN hd*deltat*0.5/sqrt(hds3)+deltat*(sqrt(hds3)-  
hds3*0.5/(sqrt(hds3)))};
```

```
}
```

```
CONTINUOUS {
```

```
hh = hh + deltat*(Qin1/F1) - k*zh1/F1 - k*zh2/F1 - k*zh3/F1;
```

```
hd = hd + k/F1*(zh1 + zh2 + zh3) - k*zd1/F1 - k*zd2/F1 - k*zd3/F1;
```

```
}
```

```
OUTPUT{Qout1=hh;
```

```
Qout2=hd;
```

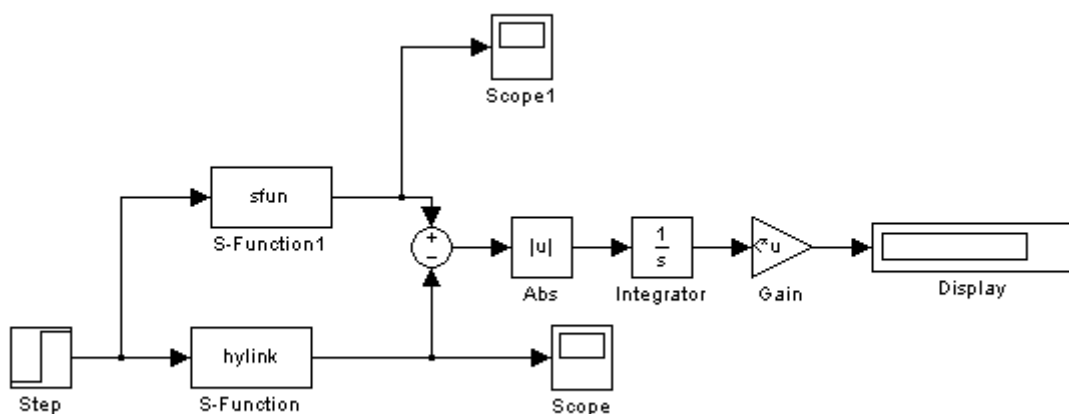
```
}
```

```
}
```

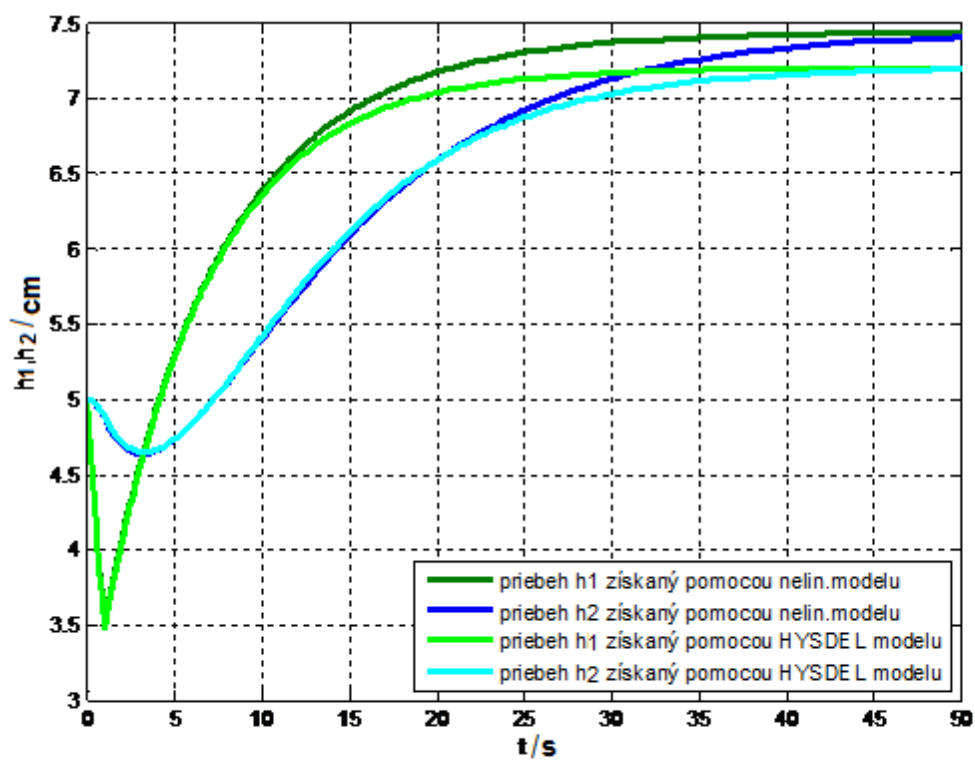
```
}
```

2.1.3 Porovnanie priebehu výstupných veličín získaných pomocou nelineárneho modelu a modelu HYSDEL

Pre porovnanie bola použitá schéma (*Obr.č.11*). Cieľom tohto porovnania bolo zistenie, či máme správne navrhnutý model zásobníkov kvapaliny podľa programovacieho jazyka HYSDEL. Períodu vzorkovania sme nastavili na hodnotu $T_s=0,05$. Začiatková podmienka pre simuláciu bola výška hladiny v hornom, aj dolnom zásobníku rovná 5cm.



Obr.č.11: Schéma pre porovnanie nelineárneho modelu a modelu získaného pomocou programovacieho jazyka HYSDEL

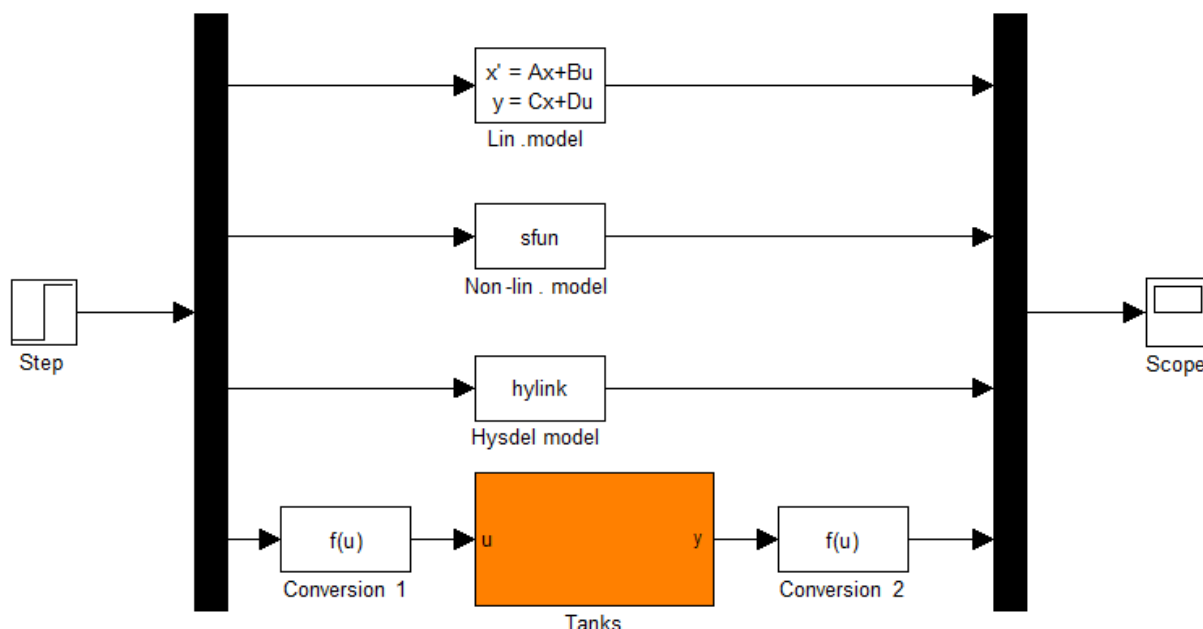


Obr.č.12: Porovnanie priebehov výšok hladín získaných pomocou nelineárneho modelu a modelu získaného pomocou programovacieho jazyka HYSDEL

Z priebehov výšok hladín (*Obr.č.12*), ktoré sme získali pomocou simulácie nelineárneho modelu a HYSDEL modelu sme zistili, že máme správne navrhnutý HYSDEL model. V čase $t = 1s$ sme spravili skokovú zmenu vstupnej veličiny z $u=0$ na $u=10$. Táto skoková zmena nám spôsobila podkmit v prvých častiach priebehov výšok hladín. Môžeme vidieť, že HYSDEL model dobre opisuje dynamické správanie sa systému. V druhých častiach priebehoch výšok hladín HYSDEL model nedosiahol rovnaké hodnoty ustálených výšok hladín ako nelineárny model. Bolo to spôsobené tým, že čím sme ďalej od linearizačných bodov v HYSDEL modeli, tým je väčšia nepresnosť v priebehu výšky hladiny získanej pomocou HYSDEL modelu.

2.1.4 Porovnanie rôznych modelov s reálnym procesom

Porovnali sme priebeh výšok hladín kvapaliny, získaných pomocou linearizovaného modelu systému, nelineárneho modelu, modelu HYSDEL a reálnych zásobníkov. Pre toto porovnanie bola použitá simulačná schéma (*Obr.č.13*). Na začiatku sme uvažovali s vypustenými zásobníkmi. Najprv sme použili ako vstupnú veličinu vstupný prietok q_0^s , pre dosiahnutie prvého ustáleného stavu (*Tab.č.3*). Počkali sme, kým sa výška hladiny kvapaliny ustáli. Potom sme spravili skokovú zmenu vstupného prietoku na q_0^s pre ustálenie výšky hladiny v druhom ustálenom stave (*Tab. č.3*).



Obr.č.13: Schéma pre porovnanie priebehu výstupných veličín

Schému (Obr.č.13) sme vytvorili v programe MATLAB.

Bloky simulačnej schémy:

Step: v tomto bloku sme zadefinovali dva vstupné prietoky a čas skokovej zmeny, kedy má nastať prepnutie medzi týmito dvoma prietokmi

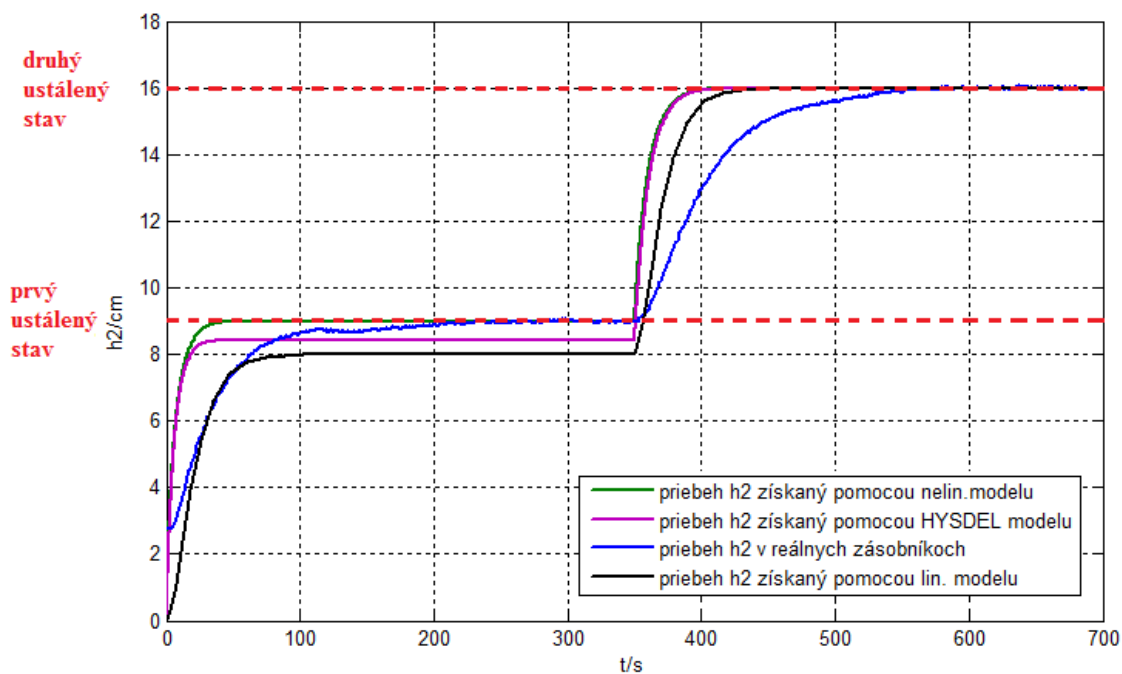
State-space: tomuto bloku sme dali názov Lin. model, lebo sa v ňom nachádza lineárny model zásobníkov kvapaliny bez interakcie, vyjadrený v maticovom tvare

S-function: tomuto bloku sme dali názov Non-lin. model a Hysdel model, lebo sa v ňom nachádza nelineárny model zásobníkov kvapaliny bez interakcie, v tvare diferenciálnych rovníc zapísaný v s-funkcii a v jazyku Hysdel

Fcn: tomuto bloku sme dali názov Conversion1 a Conversion2, nachádzajú sa v ňom prepočty (1.51) a (1.52)

Tanks: je simulačný blok reálnych zásobníkov kvapaliny

Scope: blok grafického zobrazenia priebehu výšky hladiny kvapaliny v reálnych zásobníkoch kvapaliny



Obr.č.14: Porovnanie priebehov výšky hladiny v druhom zásobníku, získaných pomocou viacerých variantov modelov

Na (*Obr.č.14*) vidíme, že sa priebeh výšky hladiny v druhom zásobníku, získaný pomocou *HYSDEL* modelu a nelineárneho modelu veľmi nelíši. Pri prechode do prvého ustáleného stavu nastali odchýlky, ktoré boli spôsobené skutočnosťou, že sme si zvolili v *HYSDEL* modeli ako linearizačné body *5cm*, *15cm* a *25cm*. Čím sme ďalej od linearizačných bodov v *HYSDEL* modeli, tým je väčšia nepresnosť v priebehu výšky hladiny získanej pomocou *HYSDEL* modelu.

Priebeh výšky hladiny v druhom zásobníku, získaný pomocou lineárneho modelu nedosiahol prvý ustálený stav. Druhý ustálený stav dosiahol. Táto skutočnosť je spôsobená tým, že sme si zvolili ako linearizačný bod druhý ustálený stav (*Tab.č.3*). Čím sme ďalej od linearizačných bodov, tým je väčšia nepresnosť v priebehu výšky hladiny. Linearizovaný model je nepresnejší ako nelineárny model.

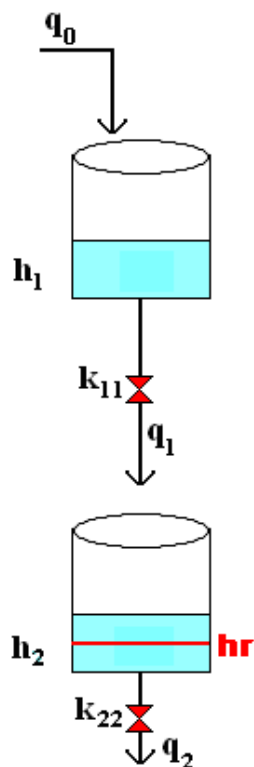
Z priebehu výšky hladiny reálnych zásobníkov môžeme vidieť, že aj keď na začiatku uvažujeme s prázdnyimi zásobníkmi, grafické zobrazenie priebehu výšky hladiny nezačína v nulovom bode. Je to spôsobené tým, že sme si museli pre porovnanie priebehov výšok hladín získaných pomocou rôznych modelov, priebeh výšky hladiny reálnych zásobníkov kvapaliny, prepočítať prepočítavacím vzťahom (*1.51*).

2.2 Jednoduché regulátory navrhnuté pomocou *HYSDEL*-u

Regulátory rozdeľujeme podľa funkcie na spojité a nespojité regulátory. Najrozšírenejšie sú nespojité regulátory, pretože sú jednoduchšie ako spojité. Akčná veličina sa pri nich mení nespojito. Nespojité regulátory rozdeľujeme na dvojpolohové a viacpolohové. [7]

2.2.1 Dvojpolohový regulátor

Pri návrhu dvojpolohového regulátora sme určili dve hodnoty, ktoré nadobúda akčná veličina a to: $u_0=0 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ a $u_{max}=20 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$. Určili sme si taktiež žiadanú hodnotu výšky hladiny (na *Obr.č.15* farebne značená ako *hr*) na ktorú chceme riadiť dolný zásobník, $hr = 7\text{cm}$.



Obr.č.15: Systém zásobníkov, v ktorom riadime dolný zásobník na žiadanú výšku hladiny (h_r)

Na začiatku návrhu dvojpolohového regulátora pomocou programovacieho jazyka HYSDEL si musíme stanoviť, pri akých podmienkach (výškach hladiny kvapaliny v zásobníkoch) dôjde k prepnutiu medzi dvoma akčnými veličinami.

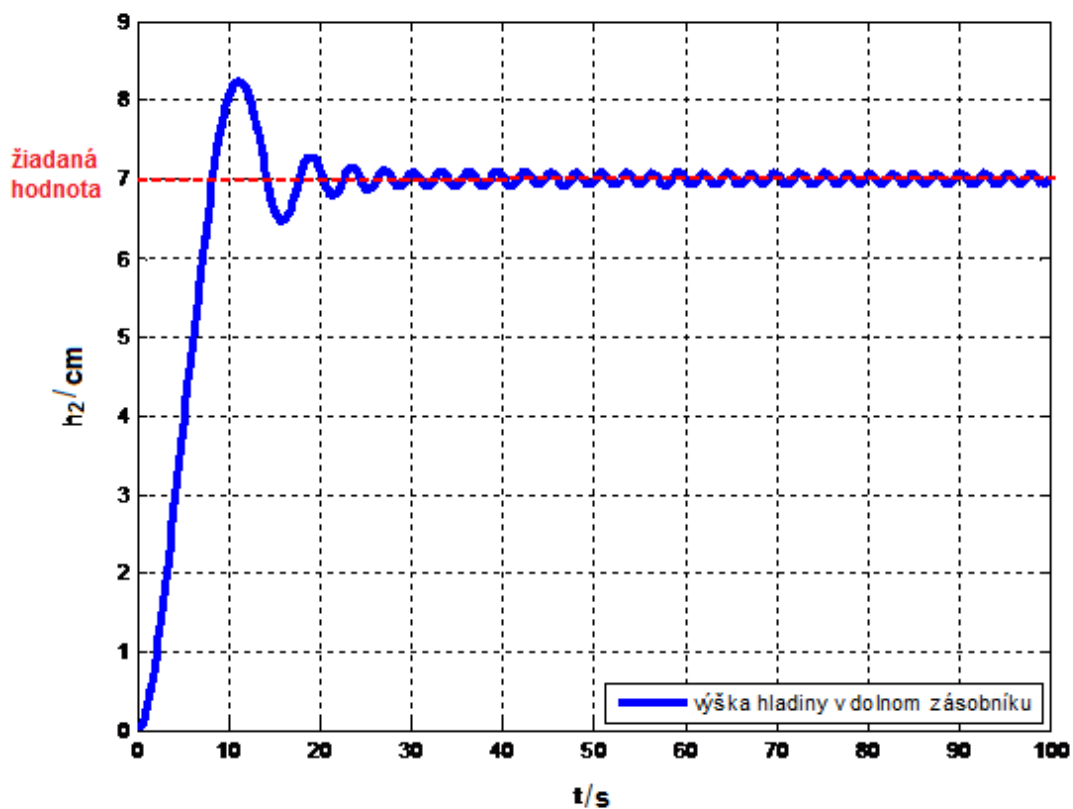
Tab.č.4: Podmienky riadenia pre dvojpolohový regulátor

Podmienka	$h_2 < h_r$	$h_2 \geq h_r$
Akčná veličina	$u_{\max}$	u_0

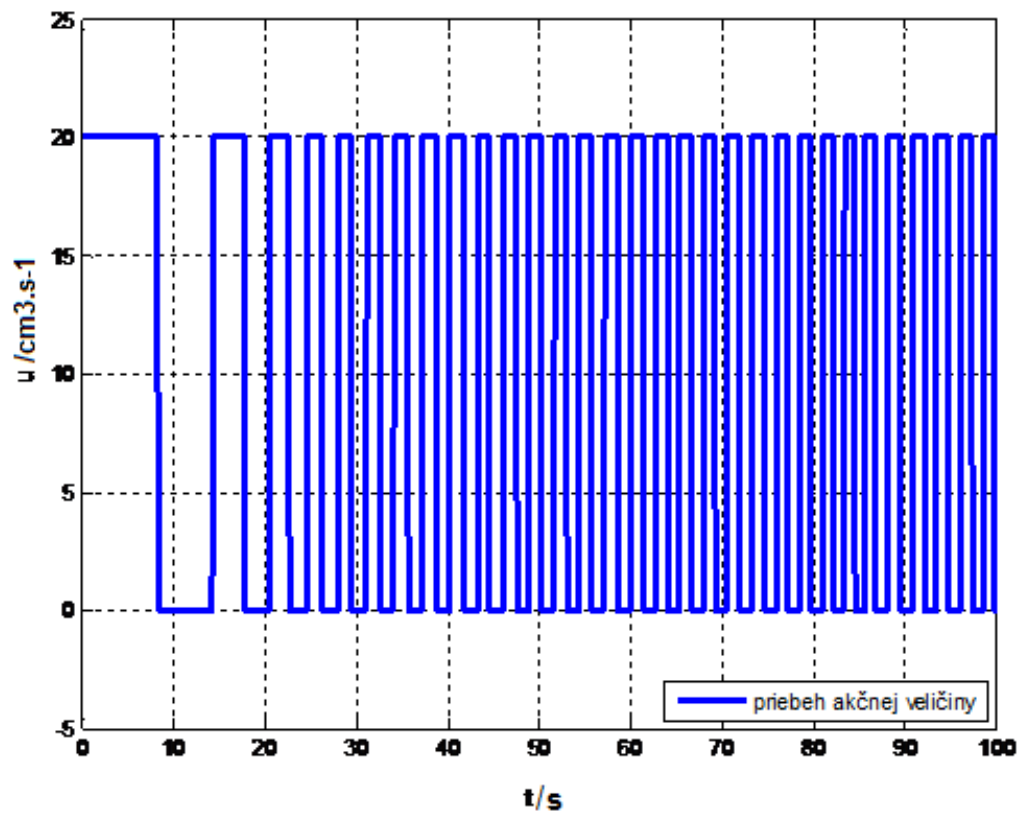
Pre toto riadenie sme si vytvorili regulátor pomocou HYSDEL-u:

```
SYSTEM zásobníky {
INTERFACE {
INPUT {REAL hh [-30,30];
```


Ako prvý variant sme riadili výšku hladiny v dolnom zásobníku na už spomínanú žiadanú hodnotu $h_r = 7\text{cm}$. Na začiatku riadenia sme uvažovali s vypustenými zásobníkmi (Obr.č.17) a (Obr.č.18).

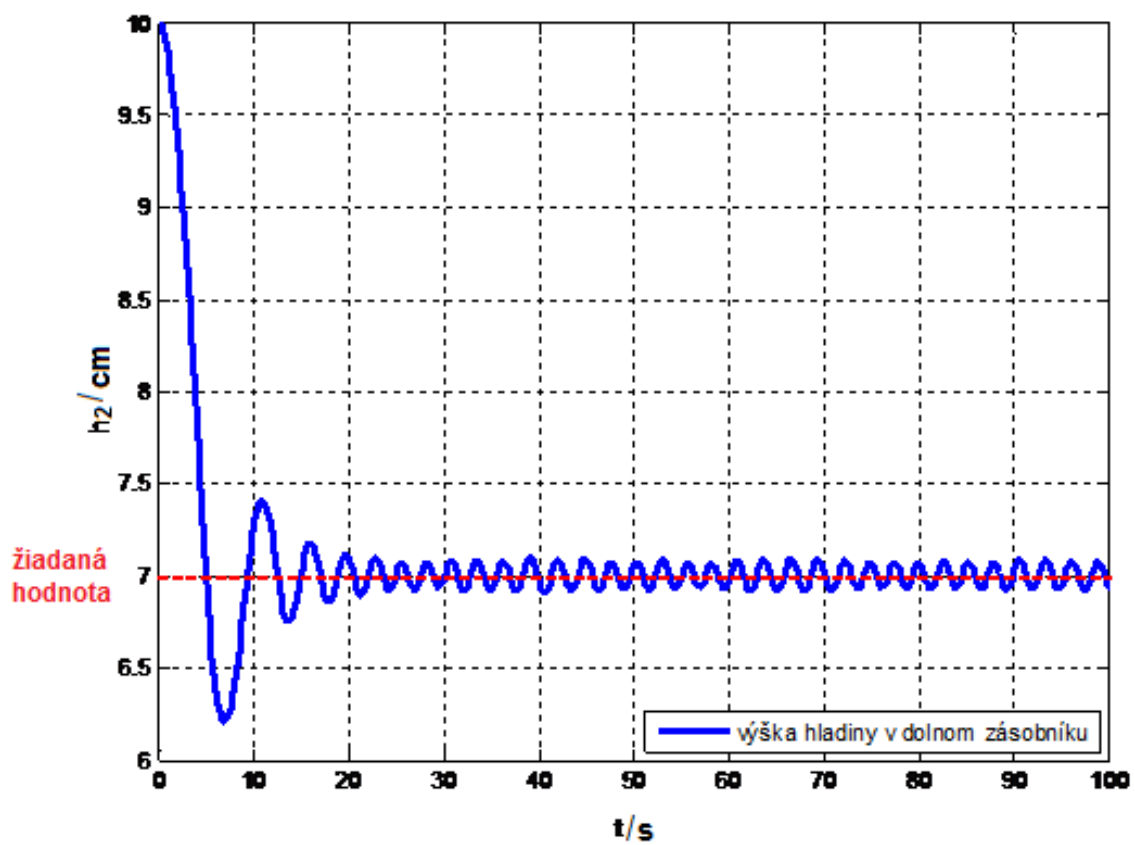


Obr.č.17: Priebeh výšky hladiny dolného zásobníka - použitie dvojpolohového regulátora

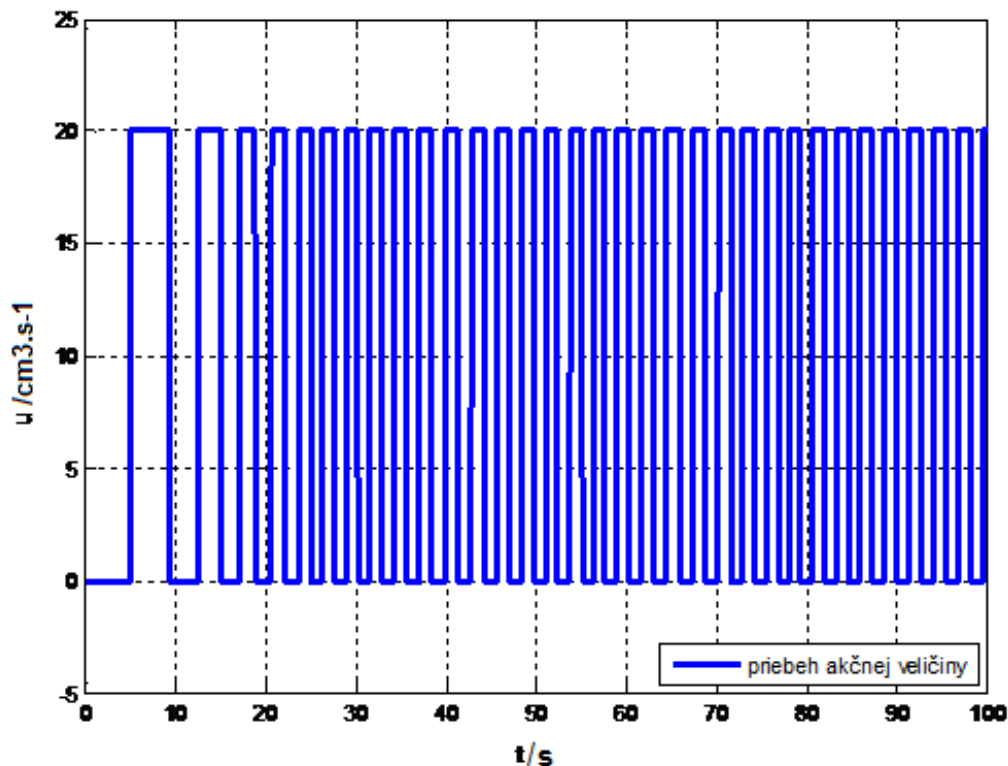


Obr.č.18: Priebeh akčných zásahov pri riadení hladiny dolného zásobníka – použitie dvojpolohového regulátora

Ako druhý variant sme riadili zásobník s počiatočnou výškou hladiny v dolnom zásobníku $h_0=10\text{cm}$, na už spomínanú žiadanú hodnotu $h_r = 7\text{cm}$ (Obr.č.19) a (Obr.č.20).



Obr.č.19: Priebeh výšky hladiny dolného zásobníka pri počiatočnej výške hladiny $h_0=10\text{cm}$ - použitie dvojpolohového regulátora



Obr.č.20: Priebeh akčných zásahov pri riadení hladiny dolného zásobníka z počiatočnej výšky hladiny $h_0=10\text{cm}$ – použitie dvojpohového regulátora

Priebeh výšky hladiny dolného zásobníka sa nám ustálil na nami zvolenej žiadanej hodnote. Môžeme vidieť, že aj po dosiahnutí žiadanej hodnoty, dochádza k neustále opakujúcemu sa zvyšovaniu a znižovaniu výšky hladiny nad a pod žiadanú výšku. Tento jav je zapríčinený tým, že len čo klesne hladina v dolnom zásobníku pod žiadanú hodnotu, čerpadlo riadené regulátorom začne napúšťať a akčná veličina je rovná $u = u_{max}$. Keď dosiahne výška hladiny v zásobníku vyššiu hodnotu ako je žiadaná, čerpadlo prestane napúšťať a akčná veličina u sa zmení na $u = u_0$. Z akčných zásahov môžeme vidieť, že dochádza k neustálemu zapínaniu a vypínaniu čerpadla.

Výhody dvojpohového regulátora:

- Jednoduchá implementácia

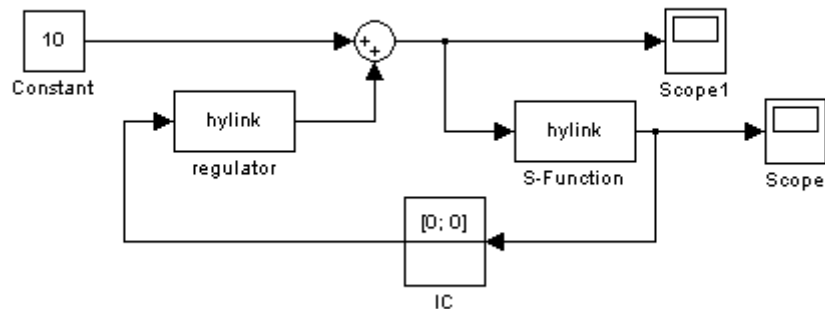
Nevýhody dvojpolohového regulátora:

- Neustále zapínanie/vypínanie čerpadla, ktoré vedie k opotrebeniu prístroja
- Neuvažuje sa horný zásobník

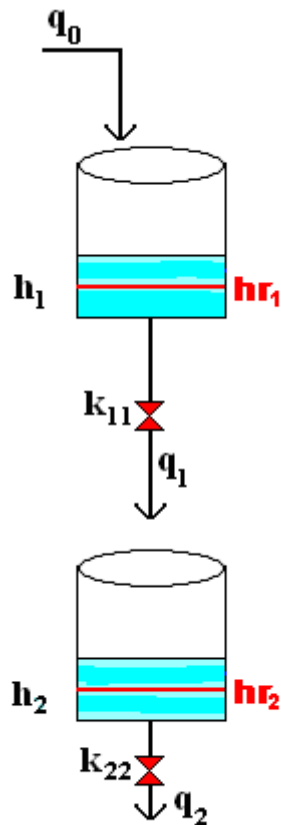
2.2.3 Trojpolohový regulátor

Pri návrhu trojpolohového regulátora už budeme uvažovať aj s výškou hladiny v hornom zásobníku. Určili sme tri hodnoty, ktoré nadobúda akčná veličina a to:

$u_0 = -10 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$, $u_{str} = 0 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ a $u_{max} = 10 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$. Určili sme si taktiež žiadanú výšku hladiny v hornom a dolnom zásobníku (na Obr.č.22 farebne značená ako hr_1 a hr_2) na ktorú chceme riadiť horný a dolný zásobník, $hr_{1,2} = 7 \text{ cm}$.



Obr.č.21: Simulačná schéma na získanie priebehu výšky hladiny v hornom a dolnom zásobníku pri použití trojpolohového regulátora



Obr.č.22: Systém zásobníkov, v ktorom riadime horný a dolný zásobník na žiadanú výšku hladiny (h_r)

Na začiatku návrhu trojpolohového regulátora pomocou programovacieho jazyka HYSDEL, si musíme stanoviť, pri akých podmienkach (výškach hladiny kvapaliny v zásobníkoch) dôjde k prepnutiu medzi tromi akčnými veličinami.

Tab.č.5: Podmienky riadenia pre trojpolohový regulátor

	HM	HS	HV
DM	$u_{\max}$	u_{str}	u_0
DS	$u_{\max}$	u_{str}	u_0
DV	u_{str}	u_0	u_0

HM – v hornom zásobníku je výška hladiny pod žiadanú výšku hladiny

HS – v hornom zásobníku je výška hladiny v oblasti žiadanej výšky hladiny

HV – v hornom zásobníku je výška hladiny nad žiadanú výšku hladiny

DM – v dolnom zásobníku je výška hladiny pod žiadanú výšku hladiny

DS – v dolnom zásobníku je výška hladiny v oblasti žiadanej výšky hladiny

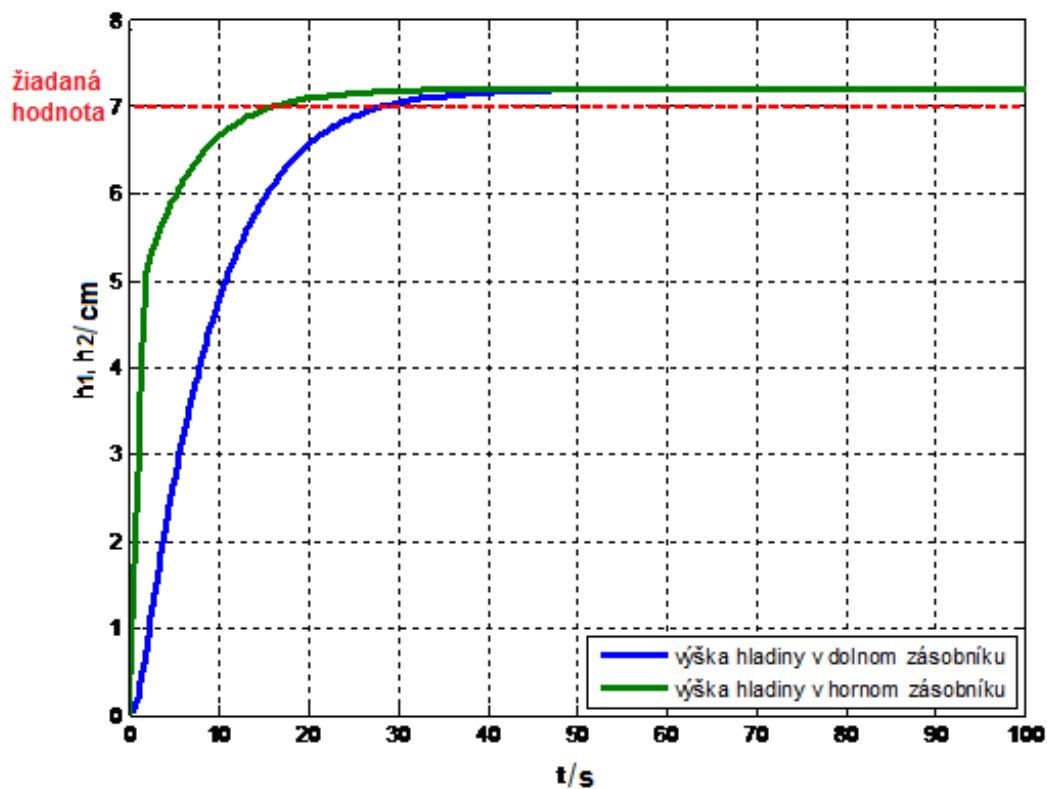
DV - v dolnom zásobníku je výška hladiny nad žiadanú výšku hladiny

Pre toto riadenie sme si vytvorili regulátor pomocou HYSDEL-u:

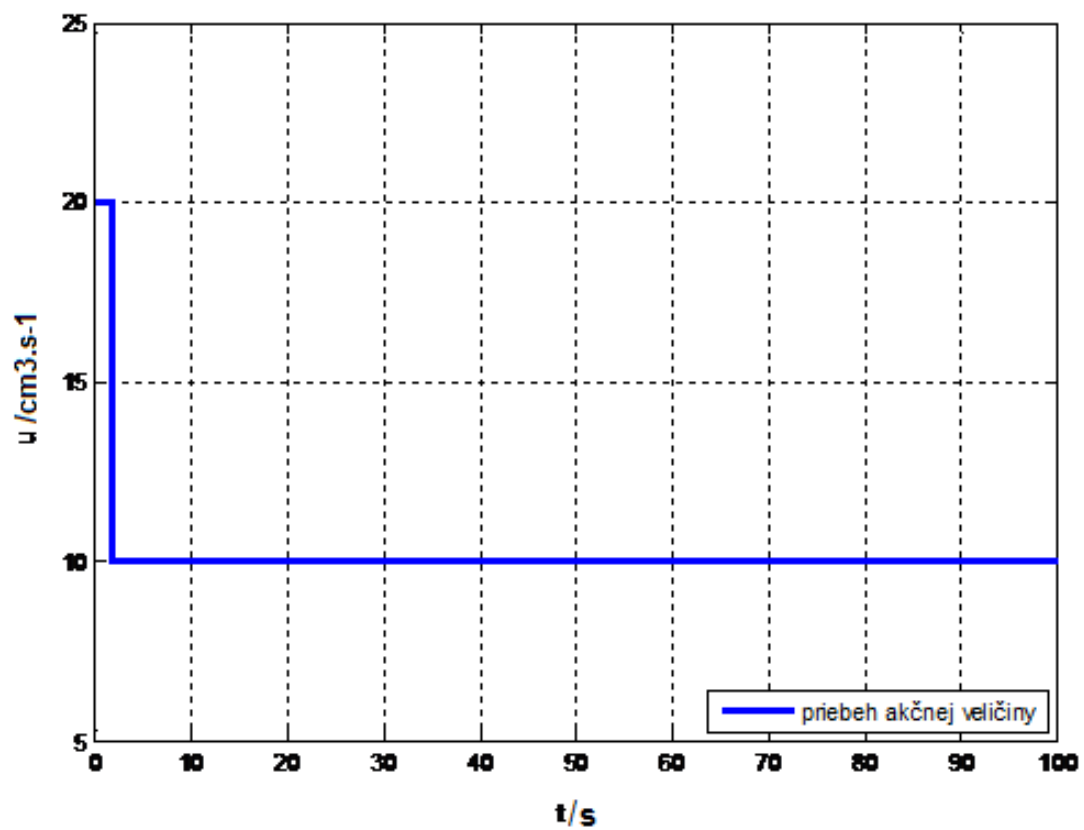
```
SYSTEM zasobniky {  
  INTERFACE {  
    INPUT {REAL hh [-30,30];  
    REAL hd [-30,30];}  
    OUTPUT {REAL u;}  
    PARAMETER {REAL umax=10;  
    REAL ustr=0;  
    REAL umin=-10;  
  }  
  }  
  IMPLEMENTATION {  
    AUX{BOOL hv,hm,dv,dm,hs,ds,p1,p2;  
    REAL u1,u2;}  
    AD {hv = hh >= 9;  
    hm = hh <= 5;  
    dv = hd >= 9;  
    dm = hd <= 5;  
    }  
    LOGIC {  
      hs = ~hv & ~hm;  
      ds = ~dv & ~dm;  
      p1 = hv | (dv & hs);  
      p2 = (hm & dm) | (hm & ds);  
    }  
    DA {  
      u1 = {IF p1 THEN umin ELSE 0};  
      u2 = {IF p2 THEN umax ELSE 0};  
    }  
    OUTPUT {  
      u = u1 + u2;  
    }  
  }  
}
```

Na získanie priebehov výšok hladín v hornom a dolnom zásobníku, ktoré sme riadili trojpolohovým regulátorom, sme použili simulačnú schému (*Obr.č.21*).

Ako prvý variant sme riadili výšku hladiny v dolnom zásobníku na už spomínanú žiadanú hodnotu $h_r = 7\text{cm}$. Na začiatku riadenia sme uvažovali s vypustenými zásobníkmi (Obr.č.23) a (Obr.č.24).

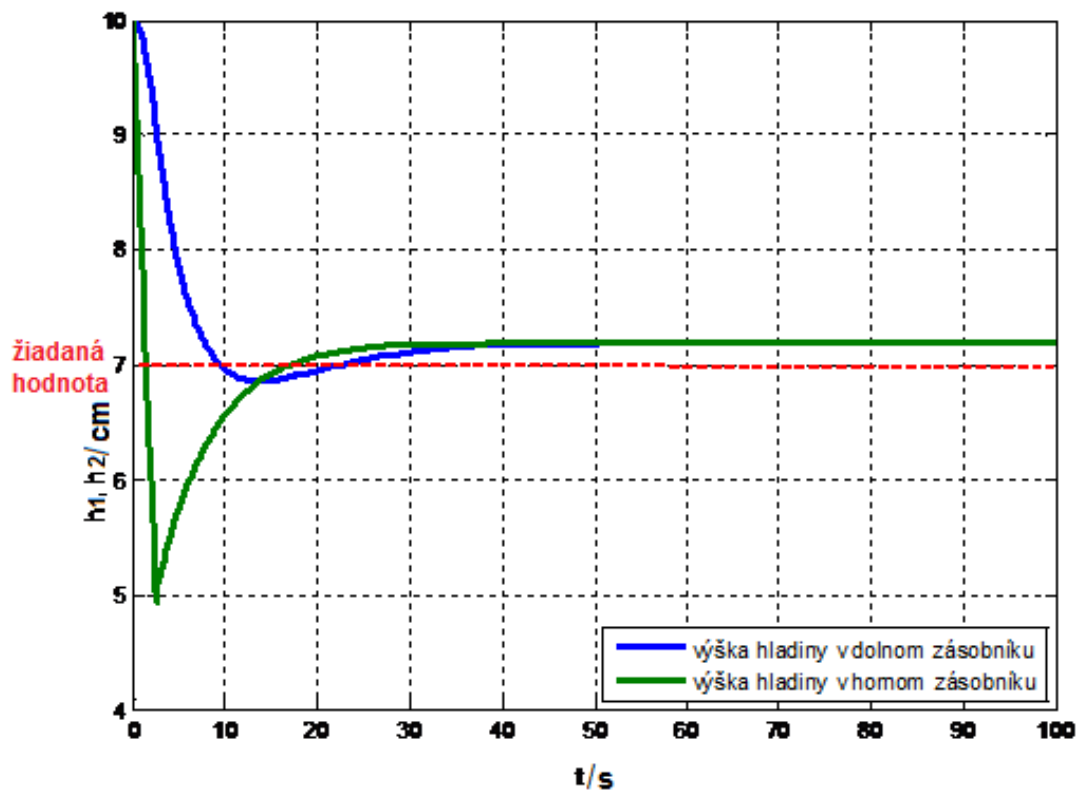


Obr.č.23: Priebehy výšky hladín horného a dolného zásobníka - použitie trojpolohového regulátora

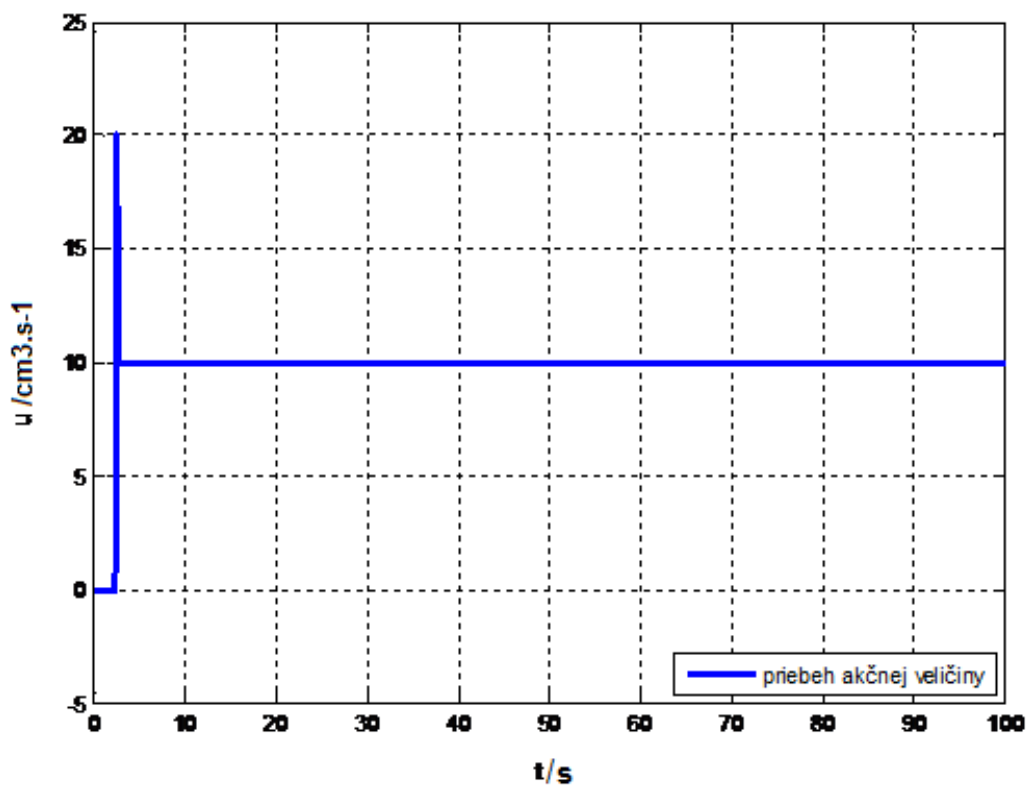


Obr.č.24: Priebeh akčných zásahov pri riadení výšky hladiny – použitie trojpolohového regulátora

Ako druhý variant sme riadili zásobníky s počiatocnými výškami hladiny v zásobníkoch $h_0=10\text{cm}$, na už spomínanú žiadanú hodnotu $h_{r1,2} = 7\text{cm}$ (Obr.č.25) a (Obr.č.26).



Obr.č.25: Priebeh výšok hladín horného a dolného zásobníka pri počiatočnej výške hladiny $h_0=10\text{cm}$ - použitie trojpolohového regulátora



Obr.č.26: Priebeh akčných zásahov pri riadení hladiny zásobníkov z počiatočnej výšky hladiny $h_0=10\text{cm}$ – použitie trojpolohového regulátora

Priebeh výšok hladín zásobníkov sa nám ustálil nad nami zvolenou žiadanou hodnotou, a to na hodnote $h_{1,2}=7,195$. Môžeme vidieť, že už nedochádza k opakujúcemu sa zvyšovaniu a znižovaniu výšky hladiny nad a pod žiadanú výšku.

Z akčných zásahov môžeme vidieť, že taktiež nedochádza k neustálemu zapínaniu a vypínaniu čerpadla. Čerpadlo sa len raz zapne. Akčná veličina sa ustáli na konštantnej hodnote.

Výhody trojpolohového regulátora:

- Uvažuje aj horný zásobník
- Umožňuje zvoliť stredný vstup, ako ustálený prietok pre danú referenciu

Nevýhody trojpolohového regulátora:

- Regulátor kompenzovaný pre viac prepínacích pravidiel
- Časová náročnosť

3 Časovo optimálne riadenie zásobníkov kvapaliny bez interakcie

Majme účelovú funkciu

$$J = \min t_f \quad (4.1)$$

Chceme riadiť výšku hladiny kvapaliny druhého zásobníka z prvého ustáleného stavu do druhého (*Tab.č.3*) v minimálnom koncovom čase t_f .

Pre návrh časovo optimálneho riadenia použijeme metódu parametrizácie vektora riadenia. Parametrizácia vektora riadenia patrí medzi sekvenčné metódy dynamickej optimalizácie. Základ tejto metódy spočíva v parametrizácii riadenia. Riadenie parametrizujeme obyčajne niekoľkými parametrami. Pôvodné stavové rovnice ponechávame v tvare diferenciálnych rovníc/diferenciálno algebraických rovníc. Väčšinou je použité riadenie po úsekoch, čím problém dynamickej optimalizácie pretransformujeme na problém statickej optimalizácie (NLP - nelineárne programovanie). Riešenie je iteračné a v každom kroku sa počíta hodnota účelovej funkcie pri splnených obmedzeniach. Výsledné riešenie je potom zlepšované každou iteráciou. [6]

3.1 Výpočet optimálneho riadenia metódou parametrizácie vektora riadenia

Pomocou programu MATLAB sme si na základe metódy parametrizácie vektora riadenia dopredu iteračne vypočítali, aké riadenie použijeme. Uvažovali sme s nelineárnym modelom zásobníkov kvapaliny bez interakcie, o ktorom sme si z porovnania (*Obr.č.14*) potvrdili, že je najpresnejší. Pri výpočte riadenia sme brali do úvahy obmedzenia (*Tab.č.6*). Chceli sme riadiť výšku hladiny v druhom zásobníku z prvého ustáleného stavu do druhého (*Tab.č.3*). Na základe predchádzajúcich zistení z aplikácie trojpolohového regulátora na zásobníky kvapaliny bez interakcie, sme použili pre výpočet riadenia tri akčné zásahy (*Tab.č.8*). Časovú náročnosť tohto problému sme ošetrili minimalizačnou účelovou funkciou koncového času t_f (4.1). Aj keď sme nevedeli merať výšku hladiny kvapaliny v hornom zásobníku, dokázali sme začleniť

tento zásobník do urýchlenia dosiahnutia druhého ustáleného stavu výšky hladiny v dolnom zásobníku.

Pre zjednodušenie výpočtu optimálneho riadenia sme vychádzali z počiatočného stavu (Tab.č.7), ktorý bol nami zvolený prvý ustálený stav. Len pri prechode z prvého ustáleného stavu do druhého sme chceli aplikovať spomínané optimálne riadenie.

Cieľom riadenia bola už spomínaná minimalizácia koncového času t_f (4.1), počas ktorého sa dostaneme z prvého do druhého ustáleného stavu.

Tab.č.6: Obmedzenia stavov a vstupov

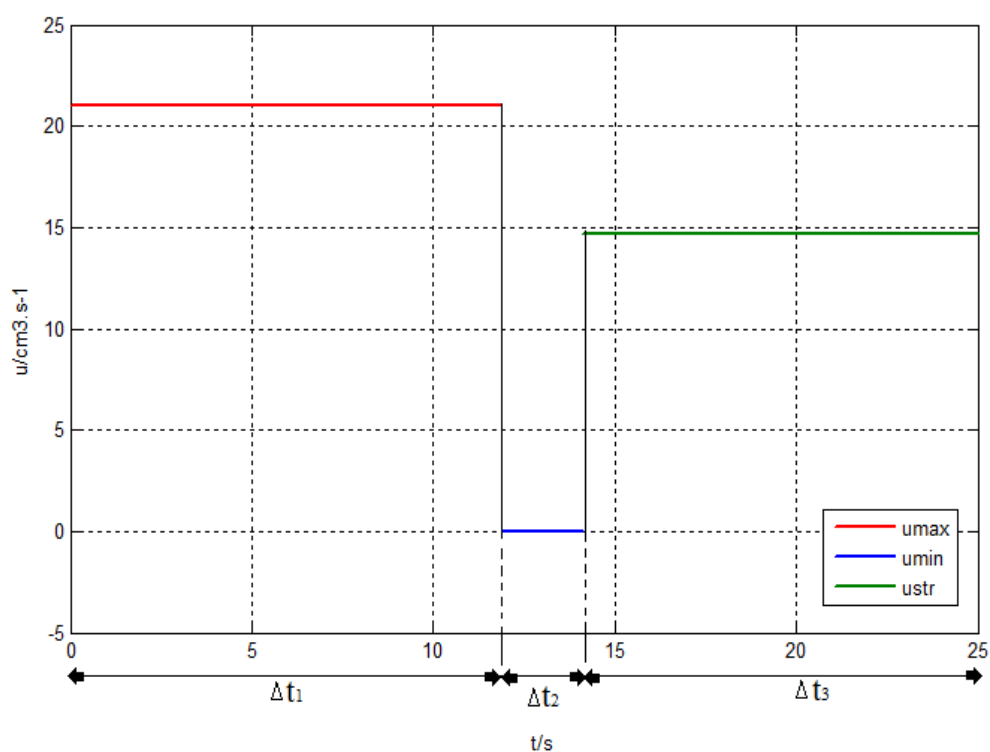
	MIN	MAX
$q_0^s[\text{cm}^3\text{s}^{-1}]$	0,0000	21,0202
$q_0^s[\text{V}]$	0,0000	10,0000
$h_2^s[\text{cm}]$	0,0000	25,4682
$h_2^s[\text{V}]$	0,0000	8,4680

Tab.č.7: Počiatočný stav výšky hladiny v druhom zásobníku - prvý ustálený stav

	h_2^s
cm	9,0000
V	2,4143

Tab.č.8: Akčné zásahy

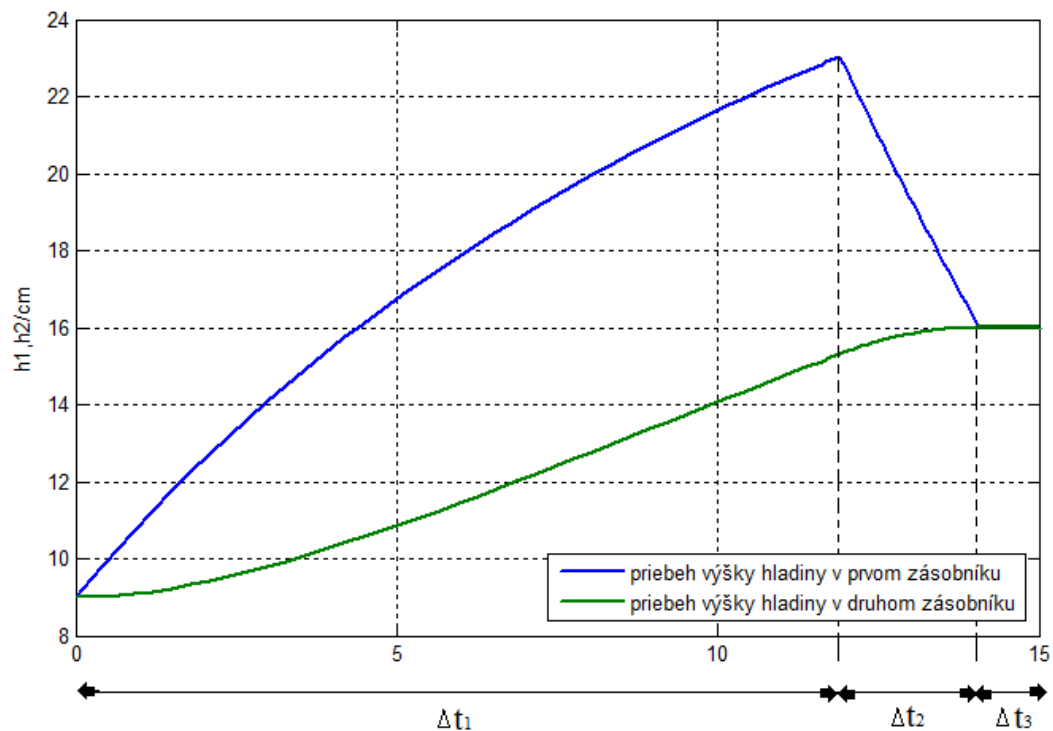
Akčné zásahy	
$u_{\max}[\text{cm}^3\text{s}^{-1}]$	21,0202
$u_{\max}[\text{V}]$	10,0000
$u_{\text{str}}[\text{cm}^3\text{s}^{-1}]$	14,6680
$u_{\text{str}}[\text{V}]$	4,0215
$u_0[\text{cm}^3\text{s}^{-1}]$	0,0000
$u_0[\text{V}]$	0,0000



Obr.č.27: Vypočítané optimálne riadenie metódou parametrizácie vektora riadenia

Na (Obr.č.27) môžeme vidieť vypočítané riadenie v závislosti od času. V časovom úseku Δt_1 sme použili $u_{\max}$. Maximálnym prietokom sa rýchlo napustil horný zásobník. V časovom úseku Δt_2 sme použili u_0 . Dochádzalo k zastaveniu napúšťania horného zásobníka a k jeho vypúšťaniu do dolného zásobníka. Po dosiahnutí nami

zadaného druhého ustáleného stavu v dolnom zásobníku sme použili u_{str} v časovom úseku Δt_3 , ktoré zodpovedalo druhému ustálenému stavu, ktorý sme chceli dosiahnuť. Výška hladiny v dolnom zásobníku sa udržiavala na konštantnej hodnote druhého ustáleného stavu.

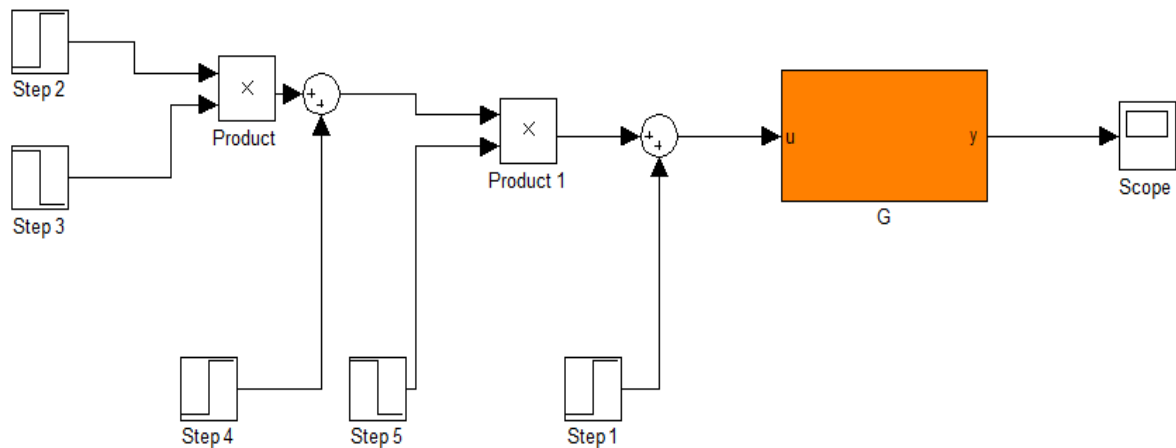


Obr.č.28: Predpokladaný priebeh výšok hladín zásobníkoch v čase, počas aplikácie vypočítaného optimálneho riadenia metódou parametrizácie vektora riadenia

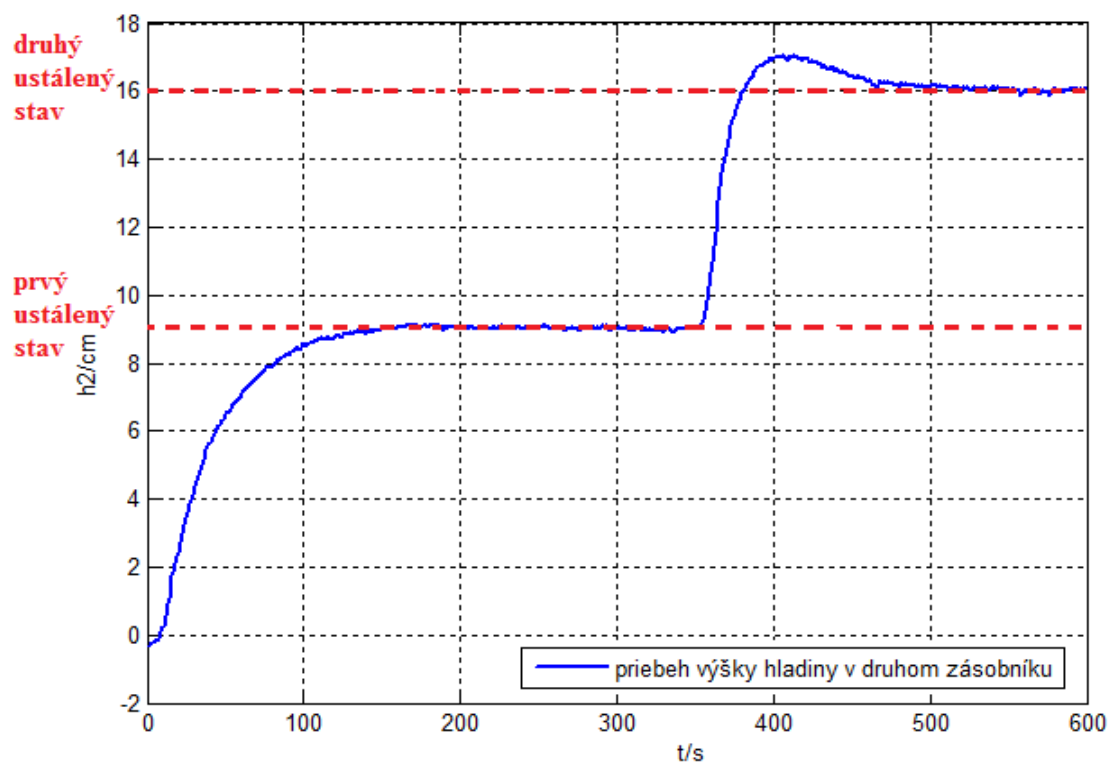
Vypočítaný koncový čas:

$$t_f = 15,0000s$$

Na aplikáciu optimálneho riadenia sme použili schému (Obr.č.29).



Obr.č.29: Schéma pre riadenie zásobníkov kvapaliny bez interakcie pomocou dopredu vypočítaného optimálneho radenia metódou parametrizácie vektora riadenia



Obr.č.30: Priebeh výšky hladiny v druhom zásobníku v čase, pri aplikácii optimálneho riadenia vypočítaného pomocou metódy parametrizácie vektora riadenia

Na (Obr.č.30) môžeme vidieť, že reálny koncový čas, ktorý sme dosiahli pri prechode z prvého ustáleného stavu do druhého bol vyšší ako koncový čas predpokladaný výpočtom (Obr.č.28). Je to spôsobené rýchlou dynamickou odozvou modelu, ktorá sa nezhoduje s odozvou reálneho zariadenia, ako to ukazuje (Obr.č.14).

Pri prechode z prvého ustáleného stavu do druhého, nastalo síce preregulovanie, ale koncový čas, kedy sme dosiahli výškou hladiny v druhom zásobníku druhý ustálený stav bol menší ako pri aplikácií *dopredu navrhnutého optimálneho riadenia* (Obr.č.8) a pri aplikácií *optimálneho PID regulátora* (Obr.č.10).

4 Záver

Na začiatku práce sme sa zamerali na aplikáciu dopredu vypočítaného optimálneho riadenia na reálny systém zásobníkov kvapaliny bez interakcie. V reálnej sústave zásobníkov kvapaliny bez interakcie sme vedeli merať len výšku hladiny v dolnom zásobníku. Pri výpočte optimálneho riadenia sme neuvažovali so vstupnými ani so stavovými obmedzeniami, ale nami vypočítané optimálne riadenie splňalo fyzické obmedzenia zariadenia. Zistili sme, že aplikované optimálne riadenie dáva výsledky predikované podľa modelu. Neskôr sme aplikovali nami navrhnutý optimálny PID regulátor. Optimálny PID regulátor potreboval väčší čas pri prechode z prvého ustáleného stavu do druhého ako pri aplikácií dopredu vypočítaného optimálneho riadenia.

Spomínaný systém dvoch zásobníkov kvapaliny zapojených za sebou môže byť uvažovaný a modelovaný ako hybridný systém, preto sme zvolili hybridný prístup k modelovaniu zásobníkov. Zamýšľali sme sa nad otázkou, kedy je vhodnejšie použiť zložitejší regulátor na riadenie daného systému a kedy jednoduchší. Zo skúsenosti vieme, že čím je regulátor zložitejší, tým sú zložitejšie jeho výpočty. Zložitosť výpočtov spôsobuje oneskorený zásah regulátora, ktorý môže viesť v niektorých situáciách až k havárii systému. Zamerali sme sa na jednoduché regulátory, konkrétne dvojpolohový regulátor a trojpolohový regulátor. V dvojpolohovom regulátore sme riadili len výšku hladiny v dolnom zásobníku. V trojpolohovom regulátore sme riadili výšky hladiny v oboch zásobníkoch. Každým z týchto regulátorov sme sa snažili uradiť výšku hladiny v zásobníku na určitú žiadanú hodnotu. Zistili sme, že pri riadení systému pomocou dvojpolohového regulátora sme dosiahli žiadanú hodnotu výšky hladiny dolného zásobníka síce pomerne rýchlo, ale s menšími nepresnosťami. Výhodou bolo, že sa dá ľahko implementovať. Nevýhodou bolo, že pri jeho aplikácii dochádza k neustálemu zapínaniu/vypínaniu čerpadla, t.j. k neustále meniacemu sa maximálnemu a nulovému prietoku. Táto vysoká frekvencia prepínania čerpadla vedie k opotrebeniu čerpadla a jeho komponentov, k zvýšeniu nákladov na prevádzku čerpadla (pretože na každé zapnutie sa spotrebuje viac energie, ako keby bolo neustále v prevádzke). Jednou z výhod pri riadení systému trojpolohovým regulátorom bolo, že uvažoval aj výšku hladiny kvapaliny v hornom zásobníku. Výšky hladiny uradil na žiadanú hodnotu s malými odchýlkami. Nevýhodou bola vyššia náročnosť na čas, pokiaľ riadil výšku

kvapaliny na žiadanú hodnotu a vyžadoval viac prepínacích pravidiel, čiže jeho návrh bol zložitejší.

Vyššia náročnosť na čas v prípade trojpolohového regulátora nám bola motiváciou pri návrhu optimálneho riadenia metódou parametrizácie vektora riadenia. Chceli sme minimalizovať koncový čas, pri prechode z nami zvoleného prvého ustáleného stavu do druhého. Zvolili sme si tri vstupné prietoky. Pri tejto metóde sme brali do úvahy vstupné a stavové obmedzenia. Vypočítaným riadením sa na začiatku začali zásobníky kvapaliny napúšťať maximálnym prietokom, ktorý bol horným limitom vstupných obmedzení. V dôsledku zádrže kvapaliny sa aj výška hladiny v hornom zásobníku blížila k svojmu hornému limitu obmedzení. Po určitom časovom úseku Δt_1 sa čerpadlo vyplo, aby boli dodržané stavové obmedzenia a nedošlo k pretečeniu horného zásobníka. V dolnom zásobníku nestihla výška hladiny dosiahnuť druhý ustálený stav. Nahromadená kvapalina v hornom zásobníku neustále vytekala do dolného, v ktorom bola po čase Δt_2 dosiahnutá výška hladiny, zodpovedajúca druhému ustálenému stavu. Po dosiahnutí druhého ustáleného stavu sa začal systém zásobníkov kvapaliny napúšťať stredným prietokom, ktorý zodpovedá druhému ustálenému stavu, ktorý chceme dosiahnuť. Týmto riadením sme dokázali minimalizovať koncový čas t_f , za ktorý prejdeme v dolnom zásobníku z prvého ustáleného stavu do druhého.

Na riadenie systému zásobníkov kvapaliny bez interakcie by bolo vhodné použiť aj prediktívne riadenie. Výhodou prediktívneho riadenia je, že to je spätnoväzbové optimálne riadenie. Preto sa moja práca zaoberá princípmi optimality, ktoré je možné použiť aj pri návrhu prediktívneho riadenia.

Zoznam použitej literatúry

- [1] Švarc I.: Teorie automatického řízení II, Brno, Vysoké učení technické, 1989
- [2] Karas A. a spol.: Praktické aspekty prediktívneho riadenia, Bratislava, STU v Bratislave, 2007
- [3] Bakošová M.: Opakovanie základných pojmov, prednáška z predmetu Modelovanie v procesnom priemysle , Bratislava, FCHPT STU v Bratislave, 2010
- [4] Rauová I.: Optimálne riadenie zásobníkov kvapaliny, bakalárska práca, Bratislava, FCHPT STU v Bratislave, 2008
- [5] Mikleš J., Fikar M.: Modelovanie, identifikácia a riadenie procesov II, STU v Bratislave, 2004
- [6] Hirmajer T.: Dynamická optimalizácia procesov s hybridnou dynamikou, Bratislava, FCHPT STU v Bratislave, 2006
- [7] Nespojité regulátory, Dostupné na internete:
http://www.spslevice.sk/SOC/SOC%20-%20PRI/34-Nespojite_regulatory.htm,
Online, 12. 5. 2010