## SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE FAKULTA CHEMICKEJ A POTRAVINÁRSKEJ TECHNOLÓGIE

## SPOJITÉ RIADENIE LABORATÓRNEHO ZARIADENIA PCT40

## DIPLOMOVÁ PRÁCA

FCHPT - 5414 - 25121

Bc. Veronika Csizmadiaová

## SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE FAKULTA CHEMICKEJ A POTRAVINÁRSKEJ TECHNOLÓGIE

## SPOJITÉ RIADENIE LABORATÓRNEHO ZARIADENIA PCT40

## DIPLOMOVÁ PRÁCA

FCHPT - 5414 - 25121

Študijný program:Automatizácia a informatizácia v chémii a potravinárstveČíslo a názov študijného odboru:5.2.14 automatizáciaŠkoliace pracovisko:Oddelenie informatizácie a riadenia procesovVedúci záverečnej práce/školiteľ:Ing. Ľuboš Čirka, PhD.

Bratislava 2010

Bc. Veronika Csizmadiaová

Slovenská technická univerzita v Bratislave Oddelenie informatizácie a riadenia procesov Fakulta chemickej a potravinárskej technológie Akademický rok: 2009/2010 Evidenčné číslo: FCHPT-5414-25121



## ZADANIE DIPLOMOVEJ PRÁCE

Študentka:Bc. Veronika CsizmadiaováID študenta:25121Študijný program:automatizácia a informatizácia v chémii a potravinárstveŠtudijný odbor:5.2.14 automatizácia

Názov práce:

Vedúci práce:

#### Spojité riadenie laboratórneho zariadenia PCT40

Špecifikácia zadania:

Úlohou diplomovej práce je:

Ing. Ľuboš Čirka, PhD.

1. pripojenie laboratórneho zariadenia (PCT40) k riadiacemu počítaču (PC);

- 2. oboznámenie sa s riadiacim systémom, ktorý je k dispozícii (MATLAB);
- 3. analyzovanie jeho statických a dynamických vlastnosti na základe meraní;

4. riadenie PCT40 rôznymi typmi spojitých regulátorov;

5. vypracovanie dokumentácie.

Rozsah práce: 50

Riešenie zadania práce od: Dátum odovzdania práce: 15. 02. 2010 22. 05. 2010



mamadiana Bc. Veronika Csizmadiaová študentka

prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc. vedúci pracoviska

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

## Poďakovanie

Touto cestou d'akujem Ing. Ľ. Čirkovi, PhD. za ochotu, cenné rady a usmernenie pri vypracovaní diplomovej práce.

Bratislava, 2010

Veronika Csizmadiaová

#### Súhrn

Diplomová práca sa zaoberá spojitým riadením zásobníka kvapaliny, ktorý je súčasťou laboratórneho zariadenia PCT40. Laboratórne zariadenie PCT40 bolo vyrobené na výučbu riadenia procesov. Skladá sa z troch chemickotechnologických zariadení medzi ktoré patrí aj zásobník kvapaliny. Práca obsahuje opis zásobníka kvapaliny, jeho ovládanie pomocou I/O karty a kalibráciu vstupných a výstupných signálov zásobníka. Na riadenie zásobníka kvapaliny sú využívané PI regulátory navrhnuté experimentálnymi a analytickými metódami, polynomický regulátor navrhnutý metódou umiestnenia pólov a polynomický LQ (Linear Quadratic) regulátor. Simulovanie riadenia sa realizuje pomocou dynamického matematického modelu zásobníka kvapaliny. Simulačne overené regulátory sú aplikované na reálne zariadenie.

Kľúčové slová: laboratórne zariadenie PCT40, Matlab, statická charakteristika, zásobník kvapaliny, regulátory

## Abstract

The diploma thesis deals with continuous control of a liquid tank, which is a part of laboratory device PCT40. The laboratory device PCT40 was made for education of process control. It consists of three technological devices, including the liquid tank. The work contains description of the liquid tank, it's controlled by I/O card and calibration of input and output signals of the tank. For the control of liquid tank are used PI controllers designed by experimental and analytical methods, polynomial controller designed by pole placement and polynomial LQ (Linear Quadratic) controller. Control simulation is realized by means of dynamic mathematic plant of the liquid tank. Controllers verified by simulation are implemented on real devices.

Keywords: laboratory device PCT40, Matlab, static characteristic, liquid tank, controllers

## Obsah

Zoznam príloh	
Zoznam symbolov, skratiek a značiek	9
Zoznam ilustrácií	
Zoznam tabuliek	
Úvod	
1 Laboratórne zariadenie PCT40	
1.1 Výmenník tepla	
1.2 Chemický reaktor	
1.3 Zásobník kvapaliny	
1.4 Ovládanie multifunkčnej stanice PCT40	
2 Kalibrácia vstupných a výstupných signálov zásobníka kvapaliny	
2.1 Statická charakteristika prietokomera	
2.2 Statická charakteristika PSV	
2.3 Statická charakteristika čerpadla A a B	
2.4 Statická charakteristika hydrostatického snímača tlaku	
3 Identifikácia zásobníka kvapaliny	
4 Modelovanie zásobníka kvapaliny	
5 Návrh spojitých regulátorov	
5.1 Syntéza regulátora experimentálnymi metódami	
5.1.1 Chienova – Hronesova – Reswickova metóda [12], [13]	
5.1.2 Metóda Rivera - Morari [14]	
5.2 Syntéza regulátora analytickými metódami	
5.3 Syntéza polynomického regulátora	
5.4 Syntéza polynomického LQ regulátora [17]	
5.5 Anti Reset Wind – up zapojenie	
6 Riadenie výšky hladiny kvapaliny v zásobníku navrhnutými spojitými	
regulátormi	
6.1 Spojité riadenie výšky hladiny kvapaliny pomocou PSV	
6.2 Spojité riadenie výšky hladiny kvapaliny pomocou čerpadla	
Záver	
Zoznam použitej literatúry	

hy77
------

#### Zoznam príloh

- Príloha A: Schéma zapojenia: PCT40 PC
- Príloha B: Simulinková schéma pri riadení s PI regulátorom (vstupnou veličinou je percento otvorenia ventilu)
- Príloha C: Simulinková schéma pri riadení s polynomickým a polynomickým LQ regulátorom (vstupnou veličinou je percento otvorenia ventilu)
- Príloha D: Simulinková schéma pri riadení s PI regulátorom (vstupnou veličinou je výkon čerpadla A)
- Príloha E: Simulinková schéma pri riadení s polynomickým a polynomickým LQ regulátorom (vstupnou veličinou je výkon čerpadla A)
- Príloha F: CD médium elektronická verzia diplomovej práce

## Zoznam symbolov, skratiek a značiek

CHR URO	Charakteristická Rovnica Uzavretého Regulačného Obvodu	
I/O karta	vstupno – výstupná karta	
LQ	Linear Quadratic	
РСН	Prechodová Charakteristika	
PSV	Proporcionálno Solenoidný Ventil	
SOL1	SOLenoidný ventil 1	
SOL2	SOLenoidný ventil 2	
SOL3	SOLenoidný ventil 3	
USB	Universal Serial Bus	
URO	Uzavretý Regulačný Obvod	

## Zoznam ilustrácií

Obr. 1 M	lultifunkčná stanica Armfield PCT40	16
Obr. 2 V	ýmenník tepla	17
Obr. 3 C	hemický reaktor	18
Obr. 4 Za	ásobník kvapaliny	19
Obr. 5 So	olenoidné ventily SOL1, SOL2 a SOL3, ventil PSV, prietokomer F1	20
Obr. 6 Pe	eristaltické čerpadlá (čerpadlo A, čerpadlo B)	20
Obr. 7 Za	ariadenie PCT43	21
Obr. 8 Si	mulinková schéma na ovládanie multifunkčného zariadenia PCT40	23
Obr. 9 St	atická charakteristika prietokomera F1	27
Obr. 10	Závislosť výstupného signálu z prietokomera F1 od vstupného signálu pre	
	PSV	29
Obr. 11	Závislosť vstupného signálu pre PSV od otvorenia ventilu v %	29
Obr. 12	Statická charakteristika PSV	31
Obr. 13	Závislosť výstupného signálu z prietokomera F1 od vstupného signálu pre čerpadlo A	32
Obr. 14	Závislosť výstupného signálu z prietokomera F1 od vstupného signálu pre čerpadlo B	33
Obr. 15	Závislosť vstupného signálu pre čerpadlo A a B od výkonu čerpadla A aj B v %	33
Obr. 16	Statická charakteristika čerpadla A	35
Obr. 17	Statická charakteristika čerpadla B	35
Obr. 18	Statická charakteristika snímača tlaku	36
Obr. 19	Normovaná prechodová charakteristika, kde vstupnou veličinou bolo precento otvorenia ventilu	39
Obr. 20	Normovaná prechodová charakteristika, kde vstupnou veličinou bol výkon čerpadla v percentách	39
Obr. 21	Prechodová charakteristika systému 1. rádu	40
Obr. 22	Porovnanie normovanej PCH a PCH získanej z identifikácie, vstupnou veličinou bolo otvorenie ventilu v percentách	41
Obr. 23	Porovnanie normovanej PCH a PCH získanej z identifikácie, vstupnou veličinou bol výkon čerpadla v percentách	42
Obr. 24	Bloková schéma uzavretého regulačného obvodu	45
Obr. 25	Bloková schéma anti – windup zapojenia	52

Obr. 26	Simulácia saturácie integrátora a porovnanie výstupnej a akčnej veličiny pred a po odstránení efektu wind – up
Obr. 27	Priebeh výstupnej veličiny pri riadení s PI regulátorom nastaveným Chienovou – Hronesovou – Reswickovou metódou
Obr. 28	Priebeh akčného zásahu pri riadení s PI regulátorom nastaveným Chienovou – Hronesovou – Reswickovou metódou
Obr. 29	Priebeh výstupnej veličiny pri riadení s PI regulátorom nastaveným metódou Rivera – Morari
Obr. 30	Priebeh akčného zásahu pri riadení s PI regulátorom nastaveným metódou Rivera – Morari
Obr. 31	Priebeh výstupnej veličiny pri riadení s PI regulátorom nastaveným metódou umiestnenia pólov (dva rôzne póly)
Obr. 32	Priebeh akčného zásahu pri riadení s PI regulátorom nastaveným metódou umiestnenia pólov (dva rôzne póly)
Obr. 33	Priebeh výstupnej veličiny pri riadení s PI regulátorom nastaveným metódou umiestnenia pólov (dvojnásobný pól)
Obr. 34	Priebeh akčného zásahu pri riadení s PI regulátorom nastaveným metódou umiestnenia pólov (dvojnásobný pól)
Obr. 35	Priebeh výstupnej veličiny pri riadení s polynomickým regulátorom navrhnutým metódou umiestnenia pólov
Obr. 36	Priebeh akčného zásahu pri riadení s polynomickým regulátorom navrhnutým metódou umiestnenia pólov
Obr. 37	Priebeh akčného zásahu a regulačnej odchýlky pre rôzne $\psi$
Obr. 38	Priebeh akčného zásahu a regulačnej odchýlky pre rôzne $\varphi$
Obr. 39	Priebeh výstupnej veličiny pri riadení s polynomickým LQ regulátorom 62
Obr. 40	Priebeh akčného zásahu pri riadení s polynomickým LQ regulátorom 63
Obr. 41	Priebeh výstupnej veličiny pri riadení s PI regulátorom nastaveným Chienovou – Hronesovou – Reswickou metódou (akčná veličina je výkon čerpadla A v %)
Obr. 42	Priebeh akčného zásahu pri riadení s PI regulátorom nastaveným Chienovou – Hronesovou – Reswickou metódou (akčná veličina je výkon čerpadla A v %)
Obr. 43	Priebeh výstupnej veličiny pri riadení s PI regulátorom nastaveným metódou Rivera – Morari (akčná veličina je výkon čerpadla A v %)
Obr. 44	Priebeh akčného zásahu pri riadení s PI regulátorom nastaveným metódou Rivera – Morari (akčná veličina je výkon čerpadla A v %)

Obr. 45	Priebeh výstupnej veličiny pri riadení s PI regulátorom nastaveným metódou umiestnenia pólov (dva rôzne póly, akčná veličina je výkon čerpadla A v %).
Obr. 46	Priebeh akčného zásahu pri riadení s PI regulátorom nastaveným metódou umiestnenia pólov (dva rôzne póly, akčná veličina je výkon čerpadla A v %)
Obr. 47	Priebeh výstupnej veličiny pri riadení s PI regulátorom nastaveným metódou umiestnenia pólov (dvojnásobný pól, akčná veličina je výkon čerpadla A v %)
Obr. 48	Priebeh akčného zásahu pri riadení s PI regulátorom nastaveným metódou umiestnenia pólov (dvojnásobný pól, akčná veličina je výkon čerpadla A v %)
Obr. 49	Priebeh výstupnej veličiny pri riadení s polynomickým regulátorom s integračnou zložkou (akčná veličina je výkon čerpadla A v %)
Obr. 50	Priebeh akčného zásahu pri riadení s polynomickým regulátorom s integračnou zložkou (akčná veličina je výkon čerpadla A v %)
Obr. 51	Priebeh výstupnej veličiny pri riadení s polynomickým LQ regulátorom (akčná veličina je výkon čerpadla A v %)
Obr. 52	Priebeh akčného zásahu pri riadení s polynomickým LQ regulátorom (akčná veličina je výkon čerpadla A v %)

## Zoznam tabuliek

Tab. 1	Technologické parametre výmenníka tepla	18
Tab. 2	Technologické parametre chemického reaktora	19
Tab. 3	Technologické parametre zásobníka kvapaliny	21
Tab. 4	Namerané hodnoty výstupných signálov zo snímača a prietoku	27
Tab. 5	Namerané hodnoty výstupných signálov z prietokomera a vstupných signálov pre PSV	28
Tab. 6	Namerané hodnoty prietokov pri rôznych hodnotách otvorenia ventilu	30
Tab. 7	Namerané hodnoty výstupných signálov z prietokomera a vstupných signálov pre čerpadlo A	31
Tab. 8	Namerané hodnoty výstupných signálov z prietokomera a vstupných signálov pre čerpadlo B	32
Tab. 9	Namerané hodnoty prietokov pri rôznych hodnotách výkonu čerpadla A	34
Tab. 10	Namerané hodnoty prietokov pri rôznych hodnotách výkonu čerpadla B	34
Tab. 11	Namerané hodnoty výšok hladín	37
Tab. 12	2 Konštanty regulátora podľa Chienovej – Hronesovej – Reswickovej metódy, pre riadenie na žiadanú veličinu	46
Tab. 13	8 Konštanty regulátora podľa metódy Rivera – Morari	47

#### Úvod

Výroby v chemickom priemysle sú už úplne automatizované. Chemické procesy sú riadené pomocou počítačov, riadiacich systémov. Riadiaci systém by mal zabezpečiť stabilitu a bezpečnosť procesu, odstrániť poruchy v riadenom procese a zabezpečiť požadovanú kvalitu riadenia. Pred návrhom riadiaceho systému musíme brať do úvahy fyzikálne správanie sa riadeného procesu, stanoviť ciele riadenia, zistiť vlastnosti senzorov a akčných členov, zabezpečiť komunikáciu medzi senzormi a akčnými členmi a uvažovať s možnými poruchami.

Fyzikálne správanie sa riadeného procesu dokážeme opísať matematicky pomocou materiálových a entalpických bilancií. Materiálové a entalpické bilancie tvoria matematický model systému. Po vytvorení matematického modelu musíme stanoviť ciele riadenia. To znamená, zadefinovať čo chceme dosiahnuť (či chceme napr. zvýšiť koncentráciu produktov alebo znížiť spotrebu energiu) a s ktorými akčnými členmi to môžeme dosiahnuť. Teda zadefinujeme vstupné, stavové a výstupné veličiny procesu. Informácie o vstupných, stavových a výstupných veličinách poskytujú senzory a akčné členy nám umožňujú ovplyvňovať ich správanie sa v procese. Senzory a akčné členy potrebujeme prepojiť, umožniť komunikáciu medzi nimi. Na zabezpečenie komunikácie, ak máme k dispozícii Matlab, môžeme použiť napr. Simulink. Prenos údajov medzi Matlabom (počítač) a zariadením sa zabezpečí napr. cez I/O kartu. Ak máme zabezpečenú komunikáciu medzi senzormi a akčnými členmi, dokážme opísať vzťahy medzi nimi a môžeme navrhnúť riadiaci algoritmus. Na riadenie výstupných veličín môžeme použiť napr. PI, PID a polynomické regulátory v uzavretom spätnoväzbovom obvode. Tieto regulátory sú založené na matematickom modeli, na ich výpočet potrebujeme poznať prenosovú funkciu systému. Ak odvodený matematický model nie je úplný (napr. pri zásobníkov kvapaliny nepoznáme konštantu ventilu), prenosovú funkciu môžeme získať identifikáciou z prechodovej charakteristiky. Na základe známeho prenosu navrhneme regulátory. Navrhnuté regulátory overíme teoretickou simuláciou a funkčné (overené) regulátory aplikujeme na reálny proces.

Práca sa zaoberá spojitým riadením zásobníka kvapaliny, ktorý je súčasťou multifunkčnej stanice Armfield PCT40. Je rozdelená do 6 kapitol. V prvej kapitole je opísané multifunkčné zariadenie PCT40 (základný modul PCT40 a prídavný modul

PCT41) a jeho ovládanie cez I/O kartu. V druhej kapitole je opísaná kalibrácia vstupných a výstupných signálov zásobníka kvapaliny. V tretej je spracovaná identifikácia, použitá metóda so všetkými získanými výsledkami. V štvrtej kapitole je odvodený dynamický matematický model zásobníka kvapaliny a uvedená vypočítaná konštanta ventilu. Návrh rôznych typov spojitých regulátorov je v kapitole 5 a riadenie výšky hladiny kvapaliny v zásobníku navrhnutými regulátormi je v kapitole 6. Záver práce tvorí zhrnutie.

#### 1 Laboratórne zariadenie PCT40

Laboratórne zariadenie PCT40 vyrobila spoločnosť Armfield ako pomôcku pri výučbe riadenia procesov. Umožňuje základné meranie a riadenie procesných veličín.

Multifunkčná stanica Armfield PCT40 [1] je sústava viacerých zariadení. Pozostáva zo základného modulu PCT40 a prídavných modulov PCT41 a PCT42. Základný modul PCT40 (obr.1) pozostáva z dvoch chemickotechnologických zariadení ako je zásobník kvapaliny a výmenník tepla. Na základnom module sú tiež umiestnené potrubia, čerpadlá, ventily, senzory a ďalšie elektrické prvky, ktoré slúžia na meranie a reguláciu procesných veličín. Stanica je pripojená na vodovod cez tlakový regulačný ventil s integrovaným filtrom.



Obr. 1 Multifunkčná stanica Armfield PCT40

Prídavný modul PCT41 predstavuje chemický reaktor, ktorý je umiestnený v ľavej časti základného modulu. Prídavný modul PCT42 je snímač na meranie pH. Všetky tri chemickotechnologické zariadenia môžu byť navzájom poprepájané. Na jednotlivých zariadeniach môžeme realizovať rôzne typy riadení.

#### 1.1 Výmenník tepla



Obr. 2 Výmenník tepla

Výmenník tepla [1] (obr. 2) pozostáva z valcovej nádoby, ktorá je umiestnená v pravej časti základného modulu PCT40. Obsahuje dve špirály, kde jedna slúži na chladenie a druhá na ohrev. Teplota kvapaliny v chladiacej špirále je snímaná na vstupe aj na výstupe. Ďalší snímač teploty sníma teplotu kvapaliny vo vnútri výmenníka tepla. Vo výmenníku meriame aj výšku hladiny kvapaliny. Snímač hladiny nám zabezpečí to, že ohrevná špirála sa nezapne dovtedy, kým nebude úplne ponorená. Je tu aj termostat, ktorý slúži na to, že keď teplota kvapaliny vo výmenníku presiahne požadovanú hodnotu ohrev sa vypne. Kvapalinu do výmenníka tepla a do chladiacej špirály môžeme privádzať cez PSV alebo pomocou peristaltického čerpadla. Na čerpanie horúcej kvapaliny nám slúži čerpadlo (gear pump). Výmenník tepla má aj jeden ručný vypúšťací ventil. Technologické parametre výmenníka tepla sú zhrnuté do tab. 1.

parameter	hodnota
Príkon ohrevnej špirály	2 kW
Maximálna teplota kvapaliny	80 °C
Rozsah teplotných snímačov	typ K, 0 – 200 °C

Tab. 1 Technologické parametre výmenníka tepla

#### 1.2 Chemický reaktor



Obr. 3 Chemický reaktor

Chemický reaktor [2] (obr. 3) pozostáva z valcovej nádoby, ktorá je umiestnená v ľavej časti základného modulu PCT40. Ohrev alebo chladenie reaktora je zabezpečené špirálou. Homogénnosť reakčnej zmesi zabezpečuje miešadlo v strede nádoby. Vstupné suroviny sa do reaktora privádzajú cez peristaltické čerpadlá alebo cez PSV. Konštantná výška hladiny reakčnej zmesi v reaktore je zabezpečená prepadovou rúrkou. Teplotu látky na vstupe môžeme sledovať pomocou snímača teploty. Koncentrácia produktov sa meria

pomocou snímača elektrickej vodivosti. Chemický reaktor má tiež jeden ručný vypúšťací ventil. V tab. 2 sú technologické parametre chemického reaktora

parameter	hodnota
Výška nádoby	10,8 cm
Objem nádoby	21
Priemer nádoby	15,3 cm

Tab. 2 Technologické parametre chemického reaktora

#### 1.3 Zásobník kvapaliny

Pri experimentoch som využívala iba zásobník kvapaliny.



Obr. 4 Zásobník kvapaliny

Zásobník kvapaliny [1] (obr. 4) je valcová nádoba z akrylu, ktorá je umiestnená v strede základného modulu PCT40. Vo vnútri zásobníka je umiestnený odmontovateľný

valec, ktorý slúži na zväčšenie objemu. Teda samotný zásobník tvorí priestor v medzikruží. Kvapalina sa do zásobníka privádza zhora. Ako kvapalina bola použitá voda, ktorá sa privádzala z vodovodu. Kvapalina do zásobníka môže byť privádzaná cez PSV (obr. 5) alebo pomocou peristaltického čerpadla. K dispozícii máme dve peristaltické čerpadlá, ktoré sa nachádzajú na prednej časti základného modulu (obr. 6). Prietok privádzanej vody sa meria prietokomerom F1 (obr. 5). Voda zo zásobníka vyteká cez solenoidné ventily SOL2 a SOL3 (obr. 5) alebo sa odčerpáva pomocou peristaltického čerpadla. Na vypúšťanie kvapaliny môžeme použiť aj ručný ventil na spodku zásobníka. V zásobníku sa nachádza aj prepadová rúrka, ktorá zabráni pretečeniu zásobníka. Technologické parametre zásobníka kvapaliny sú zhrnuté do tab. 3.



Obr. 5 Solenoidné ventily SOL1, SOL2 a SOL3, ventil PSV, prietokomer F1



Obr. 6 Peristaltické čerpadlá (čerpadlo A, čerpadlo B)

Na meranie výšky hladiny kvapaliny v zásobníku môžeme použiť nasledujúce prvky:

- a) hydrostatický snímač tlaku
- b) elektródy vodivostného snímača
- c) plavák
- d) pravítko, ktoré je nalepené na stenu zásobníka

Počas mojich experimentov výška hladiny kvapaliny bola snímaná pomocou hydrostatického snímača tlaku a sledovaná pravítkom.

parameter	hodnota
Výška nádoby	30 cm
Objem nádoby	41
Plocha nádoby	$133,33 \text{ cm}^2$

Tab. 3 Technologické parametre zásobníka kvapaliny

#### 1.4 Ovládanie multifunkčnej stanice PCT40

Multifunkčnú stanicu PCT40 (základný modul PCT40 a prídavné moduly PCT41 a PCT42) môžeme ovládať cez USB, I/O kartu alebo pomocou zariadenia PCT43 (obr. 7).



**Obr. 7 Zariadenie PCT43** 

Spoločnosť Armfield dodala k stanici kompletný vzdelávací softvér, cez ktorý môžeme komunikovať so stanicou. Ak na riadenie stanice PCT40 chceme použiť tento softvér, tak potrebujeme počítač. Počítač komunikuje s multifunkčnou stanicou cez USB rozhranie. Softvér obsahuje schémy chemickotechnologických procesov, umožňuje vykresľovať a uchovávať hodnoty vstupných a výstupných údajov. Ďalej umožňuje riadiť procesy s dvojpolohovými, spojitými regulátormi, a rozvetvenými regulačnými obvodmi. Vstupy do jednotlivých chemickotechnologických procesov môžeme nastaviť aj manuálne. K softvéru je dokumentácia, ktorá obsahuje niekoľko úloh pre študentov na laboratórne cvičenia. Viac informácií o vzdelávacom softvéri je v literatúre [3], [4].

Zariadenie PCT43 [5] sa používa na riadenie multifunkčnej stanice PCT40 bez pripojenia počítača. Obsahuje ovládacie prvky pre čerpadlá, ventily a ohrev a PID regulátor. Procesné veličiny merané pomocou snímačov sú zobrazované na displeji v pravej časti zariadenia. Na riadenie procesných veličín môžeme použiť PSV, peristaltické čerpadlá a čerpadlo pre horúcu kvapalinu, ktoré môžu byť nastavené manuálne alebo PID regulátorom. Základný a prídavné moduly sú prepojené so zariadením PCT43 cez technologickú kartu.

S multifunkčnou stanicou sa dá komunikovať aj cez softvér Matlab (viac o softvéri možno nájsť v literatúre [6]). Na ovládanie multifunkčnej stanice sa používa Simulink a Matlab Real-time Toolbox. Simulinková schéma komunikuje so stanicou cez multifunkčnú I/O kartu MF624 od firmy Humusoft. Karta má 8 digitálnych vstupov, 8 digitálnych výstupov, 14 bitový A/D prevodník a 8 D/A prevodníkov 14 bitových s výstupným rozsahom  $\pm 10V$  [7]. Keďže multifunkčná stanica sa skladá zo základného a prídavných modulov má celkovo 9 vstupov a 17 výstupov, preto boli použité dve technologické karty MF624. Vzhľadom k počítaču máme 12 analógových a 5 digitálnych vstupov, 4 digitálne výstupy a 5 analógových výstupov (schéma zapojenia PCT40 – PC je v prílohe A). Analógové vstupy a výstupy majú rozsah -10 – 10V a digitálne vstupy a výstupy 0 – 5V. Simulink má zadefinované vnútorné premenné v rozsahu <-1,1>. Napätie vstupných a výstupných signálov stanice PCT40 môže byť v rozsahu 0 – 5V. V prípade analógových výstupov, keď vnútorná premenná bude mať hodnotu -1, na výstupe bude -10V, ak bude mať hodnotu 1, na výstupe bude 10V. Keďže výstup z karty môže byť iba v rozsahu 0 – 5V, musí sa zmeniť rozsah vnútornej premennej Simulinku (pre

analógový výstupný signál) na <0,0.5>. Tieto obmedzenia platia pre PSV, peristaltické čerpadlá a pre čerpadlo horúcej kvapaliny. Napätie výstupných signálov stanice PCT40 je tiež v rozsahu od 0 – 5V, čiže rozsah vnútornej premennej Simulinku (pre analógový vstupný signál) bude tiež v rozmedzí <0,0.5>. V prípade digitálnych vstupov (výstupov), keď na vstupe (výstupe) bude 0V tak vnútorná premenná bude mať hodnotu 0 a keď na vstupe (výstupe) bude 5V vnútorná premenná bude mať hodnotu 1.

Simulinková schéma na ovládanie laboratórneho zariadenia PCT40 je na obr. 8.



Obr. 8 Simulinková schéma na ovládanie multifunkčného zariadenia PCT40

Popis niektorých blokov v Simulinkovej schéme:

Pump A speed	<ul> <li>ovládanie peristaltického čerpadla A</li> </ul>
Pump B speed	- ovládanie peristaltického čerpadla B
Gear pump	- ovládanie čerpadla, cez ktoré sa čerpá horúca kvapalina
PSV control	- ovládanie PSV
SSR Drive	- zapnutie a vypnutie ohrevnej špirály

- *SOL1* zapnutie a vypnutie solenoidného ventilu SOL1
- *SOL2* zapnutie a vypnutie vypúšťacieho solenoidného ventilu SOL2 na zásobníku kvapaliny
- *SOL3* zapnutie a vypnutie vypúšťacieho solenoidného ventilu SOL3 na zásobníku kvapaliny
- *PCT41 stimer* slúži na vypnutie a zapnutie miešadla v chemickom reaktore
- *Temperature T1* teplotný snímač, zobrazuje teplotu kvapaliny vo vnútri výmenníka
- *Temperature T2* teplotný snímač, zobrazuje teplotu kvapaliny na vstupe do chladiacej špirály
- *Temperature T3* teplotný snímač, zobrazuje teplotu kvapaliny na výstupe z chladiacej špirály
- *Temperature T4* teplotný snímač, zobrazuje teplotu látky na vstupe do chemického reaktora
- Pressure 1 P1 je piezoelektrický diferenciálny snímač tlaku. Tento blok udáva tlak čerpanej kvapaliny do chemického reaktora.
- Pressure 2 P2 je piezoelektrický diferenciálny snímač tlaku. Tento blok udáva tlak čerpanej kvapaliny do chemického reaktora.
- Pressure 3 P3 je piezoelektrický diferenciálny snímač tlaku. Tento blok udáva tlak čerpanej kvapaliny do zásobníka alebo výmenníka tepla.
- Level L1 hydrostatický snímač tlaku, zobrazuje výšku hladiny kvapaliny v zásobníku
- *Flowrate F1* snímač prietoku, zobrazuje prietok čerpanej vody do zariadení
- *Conductivity* snímač vodivosti, udáva vodivosť reakčnej zmesi v chemickom reaktore
- *pH* snímač pH, udáva hodnotu pH reakčnej zmesi v chemickom reaktore
- Level Switch plavák, udáva výšku hladiny kvapaliny v zásobníku

Diff Level Switch - vodivostný snímač hladiny, udáva výšku hladiny v zásobníku kvapaliny

Adapter Humusoft- technologická karta, ktorá zabezpečuje komunikáciu medziMF624 (1),(2)počítačom a multifunkčnou stanicou

Ako som už vyššie spomínala, pri experimentoch som využívala iba zásobník kvapaliny. Ako kvapalinu som použila vodu z vodovodu. Vodu do zásobníka kvapaliny som privádzala cez PSV a pomocou čerpadla A. Čerpadlo B som po kalibrácii vstupných a výstupných signálov z technických dôvodov nemohla používať. Keď som kvapalinu do zásobníka privádzala cez PSV vstupnou veličinou do zásobníka bolo percento otvorenia ventilu. Keď som na dopravu kvapaliny do zásobníka použila čerpadlo A, tak vstupnou veličinou bol výkon čerpadla v percentách. Výstupnou veličinou bola v oboch prípadoch výška hladiny kvapaliny v zásobníku. Výšku hladiny kvapaliny som snímala pomocou hydrostatického snímača tlaku. Voda zo zásobníka môže vytekať do odtoku cez ventily SOL2, SOL3 a cez ručný ventil. Z technických dôvodov som ventil SOL3 nemohla používať. Ventil SOL1 pri meraniach prechodovej charakteristiky nestačil, pretože vytekalo málo kvapaliny a zásobník sa stále napĺňal, hladina kvapaliny sa neustálila. Pri meraniach som preto používala ručný ventil, ktorý bol nastavený do požadovanej polohy a ventil SOL1.

# 2 Kalibrácia vstupných a výstupných signálov zásobníka kvapaliny

Pred identifikáciou a riadením zásobníka kvapaliny je potrebné urobiť kalibráciu vstupných a výstupných signálov.

Vstupná veličina u zásobníka kvapaliny je väčšinou prietok kvapaliny do zásobníka. Ak je kvapalina privádzaná cez ventil alebo čerpaná čerpadlom, vstupná veličina môže byť aj percento otvorenia ventilu alebo výkon čerpadla v percentách. Vstupný signál pre PSV a čerpadlá predstavuje napätie vo voltoch. Z toho dôvodu som previedla vstupný signál pre PSV na percento otvorenia ventilu a pre čerpadlá na výkon čerpadla v percentách. Prietok kvapaliny do zásobníka je snímaný prietokomerom. Prietokomer udáva prietok kvapaliny vo voltoch. Požadovaná jednotka prietoku bola cm<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, preto bolo potrebné spraviť kalibráciu prietokomera.

Výstupná veličina zo zásobníka je výška hladiny kvapaliny, ktorá sa väčšinou udáva v m. Výšku hladiny v zásobníku udáva snímač vo voltoch a preto bolo potrebné spraviť prepočet výšky hladín na požadovanú jednotku.

#### 2.1 Statická charakteristika prietokomera

Pred PSV a čerpadlá (akčné členy) je vložený prietokomer, ktorý sníma prietok privádzanej vody do zásobníka kvapaliny. Prietokomer udáva prietok kvapaliny v rozsahu od 0 – 5V, čo je v Simulinkovej schéme rozsah od 0 – 0.5. Prietok kvapaliny do zásobníka v cm<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> som zisťovala experimentálne. Merala som pretečený objem kvapaliny za daný čas pri rôznych hodnotách vstupného signálu, pričom som zachytávala výstupný signál zo snímača. Závislosť prietoku kvapaliny od výstupného signálu zo snímača je znázornená na obr. 9. Namerané hodnoty signálov zo snímača a prietok kvapaliny sú zhrnuté do tab. 4.

Rovnica regresnej priamky na obr. 9 je:

$$q = 49.1821u_{\rm q} - 0.4509\tag{1}$$

Výstupný signál z prietokomera F1	Prietok kvapaliny [cm <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
0.0022	0
0.1583	7.0734
0.2174	10.1626
0.2744	12.6642
0.3285	15.5491
0.3808	18.7882
0.4317	20.6452
0.4876	23.6897

Tab. 4 Namerané hodnoty výstupných signálov zo snímača a prietoku



Obr. 9 Statická charakteristika prietokomera F1

#### 2.2 Statická charakteristika PSV

Ako som už vyššie spomínala vstupný signál v Simulinku pre PSV by mal byť v rozsahu 0 - 0.5. Najprv je potrebné overiť, či vstupný signál pre PSV je skutočne v tomto rozsahu. Skutočný rozsah vstupného signálu pre PSV som zisťovala tak, že som menila vstupný signál pre PSV v rozsahu od 0 - 1 a pozorovala som, ako sa mení prietok kvapaliny do zásobníka. V rozsahu 0 - 0.1 bol prietok kvapaliny do zásobníka nulový a v rozsahu 0.1 - 0.2 veľmi malý (voda do zásobníka iba kvapkala). Prietok kvapaliny sa menil od hodnoty 0.2 vstupného signálu po hodnotu 0.7. Od hodnoty 0.7 vstupného signálu bol prietok kvapaliny do zásobníka konštantný. Z toho vyplýva, že pracovný rozsah vstupného signálu pre PSV je od 0.1 po 0.7. Závislosť výstupného signálu z prietokomera F1 od vstupného signálu pre PSV je znázornená na obr. 10 a namerané hodnoty sú zhrnuté do tab. 5.

Vstupný signál pre PSV	Výstupný signál z prietokomera
0	0
0.1	0.00195
0.2	0.0384
0.25	0.1402
0.3	0.2199
0.35	0.2675
0.4	0.3019
0.45	0.3198
0.5	0.3310
0.55	0.3361
0.6	0.3402
0.65	0.3458
0.7	0.3500

Tab. 5 Namerané hodnoty výstupných signálov z prietokomera a vstupných signálov pre PSV



Obr. 10 Závislosť výstupného signálu z prietokomera F1 od vstupného signálu pre PSV

Na obr. 11 je znázornená závislosť vstupného signálu pre PSV od otvorenia ventilu v percentách. Závislosť je využitá na prevod otvorenia ventilu v percentách na vstupný signál pre PSV.

Rovnica regresnej priamky na obr. 11 je:

$$u = 0.006u_{percent} + 0.1$$
 (2)



Obr. 11 Závislosť vstupného signálu pre PSV od otvorenia ventilu v %

Statická charakteristika PSV je závislosť prietoku od percenta otvorenia ventilu. Statická charakteristika je využitá na prevod otvorenia ventilu v percentách na prietok kvapaliny.

Rovnica polynomickej regresnej priamky na obr. 12 je:

$$q = 1.6228.10^{-6}u_{percent}^{4} - 3.398.10^{-4}u_{percent}^{3} + 0.0201u_{percent}^{2} - 0.0635u_{percent} - 0.3053$$
(3)

V tab. 8 sú spracované namerané číselné hodnoty prietokov pri rôznych hodnotách otvorenia ventilu.

Otvorenie ventilu [%]	Prietok kvapaliny [cm <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
0	0
16.6666	1.4377
25	6.4444
33.3333	10.3642
41.6667	12.7053
50	14.3972
58.3333	15.2775
66.6667	15.8284
75	16.0792
83.3333	16.2809
91.6667	16.5563
100	16.7628

Tab. 6 Namerané hodnoty prietokov pri rôznych hodnotách otvorenia ventilu



Obr. 12 Statická charakteristika PSV

#### 2.3 Statická charakteristika čerpadla A a B

Pri čerpadlách A a B bolo tiež potrebné najprv získať závislosť výstupného signálu z prietokomera F1 od vstupného signálu pre čerpadlá A a B. Zo závislosti na obr. 13 a 14 vyplýva, že pracovný rozsah vstupného signálu pre čerpadlá A a B je od 0.1 do 0.5. V tab. 7 a 8 sú spracované namerané číselné hodnoty vstupných a výstupných signálov.

Vstupný signál pre čerpadlo A	Výstupný signál z prietokomera
0	0
0.1	0.0022
0.2	0.1583
0.25	0.2174
0.3	0.2744
0.35	0.3285
0.4	0.3808

Tab. 7 Namerané hodnoty výstupných signálov z prietokomera a vstupných signálov pre čerpadlo A

0.45	0.4317
0.5	0.4876

Vstupný signál pre čerpadlo B	Výstupný signál z prietokomera
0	0
0.1	0.0021
0.175	0.1349
0.2	0.1768
0.25	0.2348
0.3	0.2900
0.35	0.3435
0.4	0.3940
0.45	0.4539
0.5	0.5093

Tab. 8 Namerané hodnoty výstupných signálov z prietokomera a vstupných signálov pre čerpadlo B



Obr. 13 Závislosť výstupného signálu z prietokomera F1 od vstupného signálu pre čerpadlo A



Obr. 14 Závislosť výstupného signálu z prietokomera F1 od vstupného signálu pre čerpadlo B

Na obr. 15 je znázornená závislosť vstupného signálu pre čerpadlá A a B od výkonu čerpadla v percentách. Závislosť sa využíva na prevod výkonu čerpadla A a B na vstupný signál pre čerpadlá.

Rovnica regresnej priamky na obr. 15 je:

$$u = 0.004u_{percent} + 0.1 \tag{4}$$



Obr. 15 Závislosť vstupného signálu pre čerpadlo A a B od výkonu čerpadla A aj B v %

Statická charakteristika čerpadla A a B, teda závislosť prietoku od výkonu čerpadla, je vykreslená na obr. 16 a 17. Namerané číselné hodnoty prietokov pri rôznych výkonoch čerpadla A a B sú zhrnuté do tab. 9 a 10.

Výkon čerpadla A [%]	Prietok kvapaliny [cm <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
0	0
25	7.0734
37.5	10.1626
50	12.6642
62.5	15.5491
75	18.7882
87.5	20.6452
100	23.6897

Tab. 9 Namerané hodnoty prietokov pri rôznych hodnotách výkonu čerpadla A

Tab. 10 Namerané hodnoty prietokov pri rôznych hodnotách výkonu čerpadla B

Výkon čerpadla B [%]	Prietok kvapaliny [cm <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
0	0
18.75	6.1838
25	8.2445
37.5	11.0971
50	13.8119
62.5	16.4432
75	18.9268
87.5	21.8729
100	24.5975

Rovnica regresnej priamky na obr. 16 je:

$$q = 0.2323u_{percent} + 0.8702 \tag{5}$$



Obr. 16 Statická charakteristika čerpadla A

Rovnica regresnej priamky na obr. 17 je:

$$q = 0.2356u_{percent} + 1.52 \tag{6}$$



Obr. 17 Statická charakteristika čerpadla B
### 2.4 Statická charakteristika hydrostatického snímača tlaku

U zásobníkov kvapaliny je výstupnou veličinou výška hladiny kvapaliny. Výška hladiny bola snímaná hydrostatickým snímačom tlaku. Hydrostatický snímač tlaku udáva výšku hladiny kvapaliny v zásobníku v rozsahu 0 - 5V. V Simulinkovej schéme je to vstupný signál v rozsahu od 0 - 0.5. Výšku hladiny kvapaliny som zisťovala experimentálne. Pri určitej hodnote vstupného signálu som odčítala výšku hladiny kvapaliny v mm na pravítku, ktoré je nalepené na stene zásobníka, pričom som zachytávala výstupný signál zo snímača.

Statická charakteristika snímača tlaku, teda závislosť výšky hladín od výstupného signálu snímača, je vykreslená na obr. 18.

Rovnica regresnej priamky na obr. 18 je:

$$h = 595.6417 y_{\rm h} - 3.8222 \tag{7}$$

Chyba merania je  $\pm 2$  mm.

Namerané číselné hodnoty výšok hladín sú spracované do tab. 11.



Obr. 18 Statická charakteristika snímača tlaku

Tab. 11	Namerané	hodnoty	výšok	hladín
---------	----------	---------	-------	--------

Výška hladiny kvapaliny nameraná hydrostatickým snímačom tlaku [mm]	Skutočná výška hladiny v zásobníku [mm]
0.0214	10
0.0380	20
0.0582	30
0.0732	40
0.0910	50
0.1067	60
0.1227	70
0.1407	80
0.1567	90
0.1766	100
0.2093	120
0.2427	140
0.2759	160
0.3081	180
0.3448	200
0.3926	230
0.4431	260
0.5066	300

# 3 Identifikácia zásobníka kvapaliny

Po kalibrácii vstupných a výstupných signálov zásobníka kvapaliny nasleduje identifikácia. Pri identifikácii sa získava prenos systému v okolí zvoleného pracovného bodu.

Identifikácia sa robí z prechodovej charakteristiky. Prechodovú charakteristiku získame tak, že urobíme skokovú zmenu jednej zo vstupných veličín, pričom ostatné vstupné veličiny zostávajú konštantné a zachytávame pritom zmenu výstupnej veličiny. Dôležité je, aby pred uskutočnením skokovej zmeny bol systém v ustálenom stave. [8]

Pri nelineárnych systémoch je potrebné vykonať viacej skokových zmien rôznych veľkostí a znamienok. Z prechodových charakteristík sa stanoví výsledná prechodová charakteristika pomocou vyhodnocovacieho vzorca:

$$\hat{y}_i = \frac{\sum_{k=1}^N \Delta u_k y_{ik}}{\sum_{k=1}^N (\Delta u_k)^2} \tag{8}$$

kde

i je i-tý bod prechodovej charakteristiky

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

 $\Delta u_k$  - skoková zmena vstupu pri k-tom meraní

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

 $\hat{y}_i$  - výsledná hodnota PCH v čase  $t = i\Delta t$ , kde  $\Delta t$  perióda vzorkovania [9].

Zásobník kvapaliny je nelineárny systém 1. rádu. Vstupnou veličinou do zásobníka je najprv percento otvorenia ventilu a potom výkon čerpadla A v percentách a výstupnou veličinou je výška hladiny kvapaliny v zásobníku. Pred identifikáciou som získala viac prechodových charakteristík pre obidve vstupné veličiny. Z prechodových charakteristík som vypočítala normovanú prechodovú charakteristiku (obr. 19 a 20) zo vzorca (8). Referenčný stav pri PSV je  $u_{ref} = 33.3333\%$ ,  $y_{ref} = 7.2395mm$  a pri čerpadle A je  $u_{ref} = 25\%$  a  $y_{ref} = 4.2480 mm$ 



Obr. 19 Normovaná prechodová charakteristika, kde vstupnou veličinou bolo percento otvorenia ventilu



Obr. 20 Normovaná prechodová charakteristika, kde vstupnou veličinou bol výkon čerpadla v percentách

Výsledné prechodové charakteristiky som identifikovala metódou systému 1. rádu.

Pri metóde systému 1. rádu [9] uvažujeme náhradu systému prenosom v tvare:

$$G(s) = \frac{Z}{Ts+1}e^{-Ds}$$
<sup>(9)</sup>

V náhradnom prenose vystupujú neznáme parametre a to Z zosilnenie , T časová konštanta a D dopravné oneskorenie. Výstup y(t) po Laplaceovej transformácii je daný vzťahom:

$$y(t) = \begin{cases} 0, \ t < D \\ Z(1 - e^{-\frac{t-D}{T}}), \ t \ge D \end{cases}$$
(10)

Zosilnenie systému je hodnota, na ktorej sa ustáli výstupná veličina, čiže  $y(\infty)$ , pričom na vstupe je jednotkový skok (obr. 21).



Obr. 21 Prechodová charakteristika systému 1. rádu

Uvažujeme, že na prechodovej charakteristike poznáme dva body  $t_1$ ,  $y_1$  a  $t_2$ ,  $y_2$ . Z rovnice (10) vyplýva, že:

$$y_1 = Z(1 - e^{-\frac{t_1 - D}{T}}) \tag{11}$$

$$y_2 = Z(1 - e^{-\frac{t_2 - D}{T}}) \tag{12}$$

Zlogaritmovaním vzťahov (11) a (12) dostaneme nasledujúce vzťahy:

$$T = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{Z - y_1}{Z - y_2}} \tag{13}$$

$$D = \frac{t_2 x - t_1}{x - 1}, \ x = \frac{\ln \frac{Z - y_1}{Z}}{\ln \frac{Z - y_2}{Z}}$$
(14)

Vzťahy (13) a (14) slúžia na výpočet časovej konštanty a dopravného oneskorenia. [9]

Normované prechodové charakteristiky som identifikovala ako systém 1. rádu s dopravným oneskorením.

Prenos identifikovaného systému, keď vstupnou veličinou je percento otvorenia ventilu je:

$$G(s) = \frac{1.7750}{163.1053s+1} e^{-2.7727s}$$
(15)

Prenos identifikovaného systému, keď vstupnou veličinou je výkon čerpadla A v percentách je:

$$G(s) = \frac{3.7641}{169.4562s+1} e^{-4.2293s} \tag{16}$$

Na obr. 22 a 23 je porovnaná normovaná prechodová charakteristika a prechodová charakteristika získaná identifikáciou.



Obr. 22 Porovnanie normovanej PCH a PCH získanej z identifikácie, vstupnou veličinou bolo otvorenie ventilu v percentách



Obr. 23 Porovnanie normovanej PCH a PCH získanej z identifikácie, vstupnou veličinou bol výkon čerpadla v percentách

# 4 Modelovanie zásobníka kvapaliny

Dynamický matematický model zásobníka kvapaliny (obr. 4) získame pomocou materiálovej bilancie, ktorá má tvar:

$$q_0(t)\rho = q_1(t)\rho + \frac{d(Fh(t)\rho)}{dt}$$
(17)

kde

- $q_0(t)$  je prietok na vstupe do zásobníka
- $q_1(t)$  je prietok na výstupe zo zásobníka
- F je prierez zásobníka
- $\rho$  je hustota kvapaliny
- h(t) je výška hladiny v zásobníku

Ak predpokladáme, že hustota kvapaliny a prierez zásobníka sú konštantné, potom dynamický matematický model zásobníka má tvar:

$$q_0(t) = q_1(t) + F \frac{dh(t)}{dt}$$
(18)

Prietok  $q_0$  je vstupná veličina do zásobníka a jeho hodnota je známa. Prietok  $q_1$  závisí od výšky hladiny v zásobníku a môžeme ho vyjadriť vzťahom

$$q_1(t) = k_1 f \sqrt{2gh(t)} = k_{11} \sqrt{h(t)}$$
(19)

kde  $k_1$  je konštanta, f je plocha prierezu výtokového otvoru a g je gravitačné zrýchlenie.

Dosadením  $q_1$  do rovnice (18) dostaneme

$$q_0(t) = k_{11}\sqrt{h(t)} + F\frac{dh(t)}{dt}$$
(20)

pri začiatočnej podmienke:

$$h(0) = h^s \tag{21}$$

V zásobníku budeme sledovať výšku hladiny kvapaliny, teda rovnica výstupu bude v tvare:

$$y(t) = h(t) \tag{22}$$

Z hore uvedených vyplýva, že vstupná veličina je prietok kvapaliny do zásobníka, stavová veličina je výška hladiny kvapaliny a výstupná veličina je tiež výška hladiny v zásobníku.

Zásobník je v rovnovážnom stave, ak platí:

$$\frac{dh(t)}{dt} = 0 \tag{23}$$

Výšku hladiny kvapaliny v rovnovážnom stave potom môžeme vypočítať na základe vzťahu:

$$h^{s} = \left(\frac{q_{0}^{s}}{k_{11}}\right)^{2} \tag{24}$$

[8]

Pri reálnom zásobníku kvapaliny konštanta ventilu  $k_{11}$  bola neznáma. Konštanta ventilu sa dá vypočítať rôznymi spôsobmi, napr. z ustáleného prietoku  $q_0^s$  a z ustálenej výšky hladiny  $h^s$  na základe vzťahu (24) alebo pomocou Kalmanovho filtra (ktorý možno nájsť v literatúre [10]). Na výpočet konštanty ventilu som použila obidve metódy. Výsledky získané s obidvoma metódami boli rovnaké. Pri výpočte  $k_{11}$  som zistila, že jej hodnota sa vo zvolenej pracovnej oblasti mení. Získané hodnoty konštánt som spriemerovala pre celú pracovnú oblasť.

Ak vstupnou veličinou bolo percento otvorenia ventilu, tak konštanta ventilu je  $k_{11} = 6.3449 \ cm^{2.5} s^{-1}$  a pracovná oblasť bola od 25% do 70% otvorenia ventilu.

Ak vstupnou veličinou bol výkon čerpadla v percentách, tak konštanta ventilu je $k_{11} = 4.1195 \ cm^{2.5} s^{-1}$ a pracovná oblasť bola od 25% do 70% výkonu čerpadla.

Nelineárny model a vypočítanú konštantu ventilu som využívala pri simulácii navrhnutých spojitých regulátorov.

# 5 Návrh spojitých regulátorov

Po identifikácii systému nasleduje návrh rôznych typov spojitých regulátorov.

Regulátor je zariadenie v uzavretom regulačnom obvode (obr. 24), pomocou ktorého sa uskutočňuje proces automatickej regulácie. Vyhodnocuje rozdiel medzi výstupnou y(t) a žiadanou veličinou w(t), ktorá sa nazýva regulačná odchýlka e(t). Na základe tejto regulačnej odchýlky potom vygeneruje akčný zásah u(t) do riadeného procesu podľa zákona riadenia tak, aby regulačná odchýlka bola nulová alebo čo najmenšia. Medzi základné typy regulátorov patria P, I, D, PI, PD a PID regulátory. [11]



Obr. 24 Bloková schéma uzavretého regulačného obvodu

Ak budeme uvažovať, že v obr. 24 člen regulátora predstavuje PID regulátor, potom prenosová funkcia regulátora bude mať podľa [8] tvar:

$$G_R(s) = Z_R (1 + \frac{1}{T_{\rm I}s} + T_{\rm D}s)$$
(25)

kde  $Z_R$  je zosilnenie,  $T_I$  je integračná konštanta a  $T_D$  je derivačná konštanta regulátora.

Na získanie konštánt regulátora ( $Z_R$ ,  $T_I$  a  $T_D$ ) boli vyvinuté rôzne experimentálne a analytické metódy.

### 5.1 Syntéza regulátora experimentálnymi metódami

Pri experimentálnych metódach sa určia neznáme parametre ( $Z_R$ ,  $T_I$  a  $T_D$ ) regulátora na základe parametrov systému identifikovaných z prechodovej charakteristiky. Parametre systému sú zosilnenie *Z*, časová konštanta *T*, dopravné oneskorenie *D* a rád systému *n*.

### 5.1.1 Chienova – Hronesova – Reswickova metóda [12], [13]

*Chienova – Hronesova – Reswickova* metóda bola odvodená za predpokladu, že riadený systém je opísaný prenosom prvého rádu s dopravným oneskorením

$$G(s) = \frac{Z}{T_{s+1}}e^{-Ds}$$
(26)

Parametre riadeného procesu sa získajú identifikáciou z prechodovej charakteristiky, napr. metódou systému 1. rádu.

Metóda Chienova – Hronesova -Reswcikova umožňuje výpočet parametrov dvoch typov regulátorov. Prvý typ regulátora slúži pre riadenie na žiadanú veličinu a druhý typ na odstránenie poruchy na vstupe do systému. Umožňuje tiež voľbu regulačného priebehu (aperiodický  $\delta = 0\%$  alebo s preregulovaním  $\delta = 20\%$ ).

Neznáme parametre P, PI a PID regulátora (pre riadenie na žiadanú veličinu s 20% preregulovaním) sa vypočítajú na základe vzťahov z tab. 12.

Preregulovanie $\delta = 20\%$							
Regulátor	$Z_R$	T <sub>I</sub>	T <sub>D</sub>				
Р	$0.7 \frac{T}{ZD}$						
PI	$0.6 \frac{T}{ZD}$	Т					
PID	$0.95 \frac{T}{ZD}$	1.35 <i>T</i>	0.47 <i>D</i>				

Tab. 12 Konštanty regulátora podľa Chienovej – Hronesovej – Reswickovej metódy, pre riadenie na žiadanú veličinu

### 5.1.2 Metóda Rivera - Morari [14]

*Metóda Rivera - Morari* predpokladá, že riadený systém je opísaný prenosom prvého rádu s dopravným oneskorením

$$G(s) = \frac{Z}{Ts+1}e^{-Ds}$$
(27)

Parametre riadeného procesu sa získajú identifikáciou z prechodovej charakteristiky, napr. metódou systému 1. rádu.

O uzavretom regulačnom odvode sa predpokladá, že sa chová ako systém 1. rádu s dopravným oneskorením.

$$G_{URO}(s) = \frac{Z_{URO}}{T_{URO}s+1} e^{-D_{URO}s}$$
(28)

Pri tejto metóde sa volí časová konštanta uzavretého regulačného obvodu  $T_{URO}$ . Doporučená voľba pre  $T_{URO}$  je, aby bola väčšia ako 20% z časovej konštanty systému T. Po identifikácii systému a vhodne zvolenej  $T_{URO}$  sa konštanty regulátora vypočítajú na základe vzťahov z tab. 13.

The result of th						
Regulátor	Z <sub>R</sub>	TI	T <sub>D</sub>	doporučená voľba T <sub>URO</sub> : T <sub>URO</sub> > 0.2T a zároveň		
PI	$\frac{T}{ZT_{URO}}$	Т		$\frac{T_{URO}}{D} > 1.7$		
PI (spresnený)	$\frac{2T+D}{2ZT_{URO}}$	$T + \frac{D}{2}$		$\frac{T_{URO}}{D} > 1.7$		
PID	$\frac{2T+D}{2Z(T_{URO}+D)}$	$T + \frac{D}{2}$	$\frac{TD}{2T+D}$	$\frac{T_{URO}}{D} > 0.25$		

Tab. 13 Konštanty regulátora podľa metódy Rivera - Morari

# 5.2 Syntéza regulátora analytickými metódami

Medzi analytické metódy syntézy regulátora patrí metóda umiestnenia pólov. Pri metóde umiestnenia pólov vnútime uzavretému regulačnému obvodu póly, čím predurčíme jeho dynamické správanie sa, napr. stabilitu, aperiodický alebo periodický priebeh sledovanej veličiny.

Pri metóde umiestnenia pólov predpokladáme, že poznáme prenos riadeného systému. Vychádzame z charakteristickej rovnice URO, ktorý obsahuje aj neznáme parametre regulátora, ktoré hľadáme.

CHR URO môžeme vytvoriť 2 spôsobmi.

1. spôsob: pomocou známeho prenosu riadeného procesu  $G_s(s)$  a neznámeho regulátora  $G_R(s)$ 

$$1 + G_s(s)G_R(s) = 0 (29)$$

$$s^{n} + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_{1}s + a_{0} = 0$$
(30)

- 2. spôsob: pomocou zvolených n pólov
  - $s_1 n$  násobný:

$$(s - s_1)^n = s^n + \tilde{a}_{n-1}s^{n-1} + \dots + \tilde{a}_1s + \tilde{a}_0 = 0$$
(31)

-  $s_1, \ldots, s_n n$  rôznych:

$$(s - s_1) \dots (s - s_n) = s^n + \tilde{a}_{n-1}s^{n-1} + \dots + \tilde{a}_1s + \tilde{a}_0 = 0$$
(32)

-  $s_1$  a  $s_2$  (n-1) – násobný:

$$(s - s_1)(s - s_2)^{n-1} = s^n + \tilde{a}_{n-1}s^{n-1} + \dots + \tilde{a}_1s + \tilde{a}_0 = 0$$
(33)

CHR URO získané obidvoma spôsobmi sa musia rovnať

$$s^{n} + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_{1}s + a_{0} = s^{n} + \tilde{a}_{n-1}s^{n-1} + \dots + \tilde{a}_{1}s + \tilde{a}_{0}$$
(34)

Neznáme parametre sa získajú riešením sústavy (34) *n* rovníc o *n* neznámych (porovnaním koeficientov).

$$a_{n-1} = \tilde{a}_{n-1}$$

$$\vdots$$

$$a_0 = \tilde{a}_0$$
(35)

Pri výbere štruktúry regulátora musíme dávať pozor na to, aby sme dostali toľko rovníc koľko neznámych parametrov regulátora budeme mať. [15]

# 5.3 Syntéza polynomického regulátora

Majme uzavretý spätnoväzbový obvod so zápornou spätnou väzbou (obr. 24).

Riadený systém je opísaný prenosom

$$G_s = \frac{B(s)}{A(s)} \tag{36}$$

kde  $A(s), B(s) \in R_{ps}, (R_{ps} \text{ je okruh rýdzich a stabilných racionálnych funkcií) a majú tvar:$ 

$$A(s) = \frac{a(s)}{n(s)}, \quad B(s) = \frac{b(s)}{n(s)}$$
 (37)

pričom  $a(s), b(s) \in P$ , (*P* je okruh polynómov).

Pre prenos regulátora platí:

$$G_R(s) = \frac{Q(s)}{P(s)} = \frac{\frac{q(s)}{m(s)}}{\frac{p(s)}{m(s)}}$$
(38)

kde  $Q(s), P(s) \in R_{ps}$ , a  $q(s), p(s) \in P$ . Platí, že deg  $n(s) \ge deg a(s)$  a deg  $m(s) \ge deg p(s)$ .

Prenos uzavretého regulačného obvodu má tvar:

$$G_{URO} = \frac{G_s(s)G_R(s)}{1 + G_s(s)G_R(s)}$$
(39)

Keď dosadíme vzťahy (36), (37) a (38) do rovnice (39) dostaneme

$$G_{URO} = \frac{B(s)Q(s)}{A(s)P(s) + B(s)Q(s)} = \frac{b(s)q(s)}{a(s)p(s) + b(s)q(s)}$$
(40)

Menovateľ URO a(s)p(s) + b(s)q(s) sa nazýva charakteristický polynóm uzavretého regulačného obvodu.

URO bude rýdzi a stabilný ak platí podľa [16]

$$A(s)P(s) + B(s)Q(s) = 1$$
(41)

teda je jednotka v okruhu  $R_{ps}$ . Riešením rovnice (41) získame množinu stabilizujúcich regulátorov.

Ak chceme regulátory navrhnúť pomocou metódy umiestnenia pólov, potom diofantická rovnica bude mať tvar:

$$a(s)p(s) + b(s)q(s) = m(s)n(s) = c(s)$$
 (42)

Uzavretý obvod bude stabilný vtedy, ak polynóm c(s) bude stabilný. Pri návrhu regulátora volíme korene polynómu c(s) alebo jeho tvar tak, aby bol stabilný a zároveň spĺňal požiadavky na riadenie a pomocou rovnice (42) dopočítame parametre regulátora (polynómy q(s) a p(s)).

Treba poznamenať, že diofantickú rovnicu (42) už riešime v okruhu polynómov, pretože v okruhu  $R_{ps}$  ju nevieme priamo vyriešiť [16].

Ak chceme navrhnúť regulátor s integračnou činnosťou tak vzťah (42) vyzerá nasledovne

$$a(s)f(s)p(s) + b(s)q(s) = m(s)n(s) = c(s)$$
(43)

kde f(s) = s je menovateľ integrátora.

### 5.4 Syntéza polynomického LQ regulátora [17]

Pri syntéze polynomického LQ regulátora vychádzame z nekonvenčného LQ problému suboptimáleho sledovania.

Úlohou optimálneho riadenia je nájsť taký polynomický regulátor, ktorý zabezpečí asymptotickú stabilitu spätnoväzbového systému a zároveň minimalizuje kvadratické kritérium. Optimálny polynomický LQ regulátor má zabezpečiť aj asymptotické sledovanie žiadanej veličiny.

Pri optimálnom riadení minimalizujeme kvadratické kritérium

$$J = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \{ \tilde{u}^*(s) \varphi \tilde{u}(s) + e^*(s) \psi e(s) \} ds$$
(44)

kde  $\varphi > 0$ ,  $\psi \ge 0$  sú váhové koeficienty,  $\tilde{u}$  je derivácia akčnej veličiny, pričom predpokladáme, že referenčná veličina je skoková zmena.

Cieľom je minimalizovať kritérium (44) tak, aby uzavretý regulačný obvod bol asymptoticky stabilný.

Na výpočet parametrov optimálneho regulátora používame diofantickú rovnicu (43). Pravá strana tejto diofantickej rovnice má tvar:

$$c(s) = d_c(s)d_f(s) \tag{45}$$

 $d_c$  a  $d_f$  sú stabilné polynómy určené spektrálnym faktorizačným rozkladom.

$$d_c^{*}(s)d_c(s) = \varphi a^{*}(s)f^{*}(s)a(s)f(s) + \psi b^{*}(s)b(s)$$
(46)

$$d_f^{*}(s)d_f(s) = a^{*}(s)a(s)h^{*}(s)h(s)$$
(47)

kde h(s)=1. Polynóm h(s) je čitateľ integrátora.

Riešením diofantickej rovnice (43) s pravou stranou (45) získame parametre (polynómy q(s) a p(s)) optimálneho polynomického regulátora.

### 5.5 Anti Reset Wind – up zapojenie

Regulátor na základe regulačnej odchýlky generuje akčný zásah do riadeného procesu. Akčný zásah je vždy obmedzený v určitom intervale  $u_{min} - u_{max}$ . Dôvodom obmedzenia je, že ho realizujú akčné členy, ktoré pracujú iba v určitom rozmedzí, napr. ventil môže pracovať len v intervale 0 – 100 % otvorenia (medzi úplným zavretím a otvorením). V prípade, že akčný zásah je na hornom alebo dolnom obmedzení vstup do riadeného procesu nie je rovnaký výstupom z regulátora. Akčný zásah sa vtedy dostane do stavu saturácie, čo vedie k nesprávnej činnosti regulátora. Keď akčný zásah je v stave saturácie a regulátor obsahuje I zložku, integrátor pokračuje v integrovaní regulačnej odchýlky. Nárast integračnej zložky sa zastaví vtedy, keď regulačná odchýlka zmení znamienko. Zmena znamienka regulačnej odchýlky nespôsobí okamžitú zmenu akčného zásahu, pretože prevláda integračná zložka regulátora. Toto oneskorenie sa prejaví v uzavretom regulačnom obvode a zhorší kvalitu regulácie, nastane výrazné preregulovanie.

Na odstránenie alebo potlačenie efektu wind – up môžeme použiť spätný výpočet. Spätný výpočet spočíva v tom, že ak je vypočítaný akčný zásah mimo obmedzení, prepočíta sa integračná zložka tak, aby bolo obmedzenie opäť dosiahnuté. Prepočet sa v praxi realizuje dynamicky s časovou konštantou  $T_t$ . Bloková schéma anti – windup zapojenia je na obr. 25, kde vidieť, že URO je doplnený o prídavný spätnoväzbový obvod. Vstup do prídavného obvodu je rozdiel medzi vypočítaným a skutočným akčným zásahom. Ak je tento rozdiel nenulový, signál integračnej zložky sa bude meniť dovtedy, kým nebude na požadovanej hodnote. Ak je rozdiel medzi vypočítaným a skutočným a skutočným akčným zásahom. zásahom nulový, tak vypočítaný akčný zásah sa privádza do riadeného procesu. Časová konštanta  $T_t$  určuje rýchlosť akou sa integrátor previnie späť na správnu hodnotu. Odporúčaná voľba  $T_t$  je  $T_t = \sqrt{T_I T_D}$  pre PID regulátory a  $T_t = T_I$  (možno nájsť v literatúre [18]) pre PI regulátory. [10]

Na obr. 26 je porovnaná akčná a výstupná veličina pred a po odstránení efektu wind – up. Akčná veličina je obmedzená v intervale 0 – 100.



Obr. 25 Bloková schéma anti – windup zapojenia



Obr. 26 Simulácia saturácie integrátora a porovnanie výstupnej a akčnej veličiny pred a po odstránení efektu wind-up

# 6 Riadenie výšky hladiny kvapaliny v zásobníku navrhnutými spojitými regulátormi

V tejto kapitole sú aplikované jednotlivé typy spojitých regulátorov z kapitoly 5. Pri riadení zásobníka kvapaliny je riadenou veličinou výška hladiny kvapaliny a riadiacou veličinou je percento otvorenia ventilu alebo výkon čerpadla v percentách.

# 6.1 Spojité riadenie výšky hladiny kvapaliny pomocou PSV

Akčným členom pri riadení výšky hladiny kvapaliny bol PSV, teda riadiacou veličinou bolo percento otvorenia ventilu. Na riadenie výšky hladiny kvapaliny boli navrhnuté regulátory experimentálnymi a analytickými metódami. Ďalej bol navrhnutý polynomický regulátor metódou umiestnenia pólov a polynomický LQ regulátor. Pri regulátoroch vypočítanými experimentálnymi a analytickými metódami som použila anti – windup zapojenie (schéma zapojenia je v prílohe B). Pri regulácii s polynomickým a polynomickým LQ regulátorom som použila jednoduchý spätnoväzbový obvod so zápornou spätnou väzbou (schéma zapojenia je v prílohe C).

### Regulátory navrhnuté metódou Chien- Hrones – Reswick a Rivera Morari

Pri metóde Chien – Hrones – Reswick som neznáme parametre PI regulátora vypočítala pomocou identifikovaného prenosu (15) a podľa tab. 12. Vybrala som si riadenie na žiadanú veličinu s 20% preregulovaním. Prenosová funkcia PI regulátora má nasledovaný tvar:

$$G_R(s) = \frac{19.8847s + 0.1219}{s} \tag{48}$$

Pomocou metódy Rivera – Morari som navrhla PI regulátor, ktorého parametre som vypočítala na základe tab. 13 a prenosu (15). Prenos PI regulátora vyzerá nasledovne:

$$G_R(s) = \frac{2.8082s + 0.0171}{s}, T_{URO} = 33 s$$

$$53$$
(49)

Časovú konštantu  $T_t$  pri anti – windup zapojení som zvolila nasledovne:

$$T_t = T_I \tag{50}$$

Na obr. 27 a 28 je znázornené riadenie PI regulátorom nastaveným Chienovou – Hronesovou – Reswickovou metódou.



Obr. 27 Priebeh výstupnej veličiny pri riadení s PI regulátorom nastaveným Chienovou – Hronesovou – Reswickovou metódou



Obr. 28 Priebeh akčného zásahu pri riadení s PI regulátorom nastaveným Chienovou – Hronesovou – Reswickovou metódou

Na obr. 29 je znázornený priebeh výstupnej veličiny pri riadení s PI regulátorom navrhnutým metódou Rivera – Morari a na obr. 30 je vykreslený priebeh akčného zásahu v percentách otvorenia ventilu a prietok cm<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.



Obr. 29 Priebeh výstupnej veličiny pri riadení s PI regulátorom nastaveným metódou Rivera - Morari



Obr. 30 Priebeh akčného zásahu pri riadení s PI regulátorom nastaveným metódou Rivera - Morari

#### Regulátory navrhnuté metódou umiestnenia pólov

Pri metóde umiestnenia pólov volím póly URO, čím predurčím jeho správanie. Ak chceme, aby regulačný obvod bol rýchlejší ako riadený proces, musíme póly URO umiestniť viac doľava ako sú póly riadeného procesu. Póly URO však nemôžeme umiestniť príliš naľavo, pretože URO sa môže stať nestabilným. Z toho vyplýva, že najlepšie je zvoliť póly URO o niečo naľavo od pólov riadeného procesu.

Najprv bolo potrebné vypočítať pól riadeného procesu, ktorý má hodnotu s = -0.0061. Pri metóde umiestnenia pólov som navrhla dva PI regulátory. Pri návrhu prvého PI regulátora som zvolila dva rôzne póly URO a pri návrhu druhého jeden dvojnásobný pól.

Podľa pólu riadeného procesu som zvolila nasledujúce póly URO:

1. dva rôzne póly

$$s_1 = -0.009$$
  
 $s_2 = -0.1$  (51)

2. dvojnásobný

$$s_1 = -0.008$$
  
 $s_2 = -0.008$  (52)

PI regulátory som potom vypočítala podľa postupu opísaného v časti 5.2. Prenos prvého PI regulátora (dva rôzne póly) má tvar:

$$G_R(s) = \frac{6.4067s + 0.0875}{s} \tag{53}$$

Prenos druhého PI regulátora (dvojnásobný pól) má tvar:

$$G_R(s) = \frac{0.9404s + 0.0059}{s} \tag{54}$$

Na obr. 31 a 32 je vykreslený priebeh výstupnej veličiny a akčného zásahu pri riadení s PI regulátorom navrhnutým metódou umiestnenia pólov (dva rôzne póly).



Obr. 31 Priebeh výstupnej veličiny pri riadení s PI regulátorom nastaveným metódou umiestnenia pólov (dva rôzne póly)



Obr. 32 Priebeh akčného zásahu pri riadení s PI regulátorom nastaveným metódou umiestnenia pólov (dva rôzne póly)

Na obr. 33 a 34 je znázornený priebeh riadenia s PI regulátorom nastaveným metódou umiestnenia pólov (dvojnásobný pól).



Obr. 33 Priebeh výstupnej veličiny pri riadení s PI regulátorom nastaveným metódou umiestnenia pólov (dvojnásobný pól)



Obr. 34 Priebeh akčného zásahu pri riadení s PI regulátorom nastaveným metódou umiestnenia pólov (dvojnásobný pól)

### Polynomický regulátor navrhnutý metódou umiestnenia pólov

Na riadenie výšky hladiny kvapaliny používam aj polynomický regulátor s integračnou zložkou, ktorý je navrhnutý podľa postupu opísaného v časti (5.3). Na základe pólu riadeného procesu boli zvolené nasledujúce korene polynómu c(s):

$$s_1 = -0.1$$
  
 $s_2 = -0.1$   
 $s_3 = -0.009$  (55)

Polynomický regulátor s integračnou zložkou má tvar:

$$G_R = \frac{q_1 s + q_0}{(p_1 s + p_0)s} = \frac{0.005947s + 5.07.10^{-5}}{(0.006131s + 0.001244)s}$$
(56)

Na obr. 35 a 36 je vykreslený priebeh výstupnej a akčnej veličiny pri riadení výšky hladiny kvapaliny v zásobníku s polynomickým regulátorom s integračnou zložkou.



Obr. 35 Priebeh výstupnej veličiny pri riadení s polynomickým regulátorom navrhnutým metódou umiestnenia pólov



Obr. 36 Priebeh akčného zásahu pri riadení s polynomickým regulátorom navrhnutým metódou umiestnenia pólov

### Polynomický LQ regulátor

Polynomický LQ regulátor sa vypočíta podľa postupu opísaného v časti (5.4). Pri výpočte polynomického LQ regulátora je dôležitá voľba váhových koeficientov ( $\psi$ ,  $\varphi$ ). Pomocou váhových koeficientov môžeme znížiť hodnotu akčného zásahu do riadeného procesu alebo znížiť hodnotu regulačnej odchýlky.

Ak znížime hodnotu akčného zásahu do riadeného procesu (váhový koeficient  $\varphi$  bude mať väčšiu hodnotu ako  $\psi$ ), tak výstupná veličina pomalšie dosiahne hodnotu žiadanej veličiny, čiže sa zväčší regulačná odchýlka. Vyplýva to aj z obr. 37, kde je znázornený priebeh akčného zásahu a regulačnej odchýlky pri riadení výšky hladiny kvapaliny v zásobníku (na nelineárnom modeli) pri  $\varphi = 1$ a rôznych hodnotách  $\psi = 1$ , 0.1, 0.01, 0.001.

Ak znížime hodnotu regulačnej odchýlky (váhový koeficient  $\psi$  bude mať väčšiu hodnotu ako  $\varphi$ ), tak hodnota akčných zásahov do procesu bude veľká. Na obr. 38 vidíme priebeh akčného zásahu a regulačnej odchýlky pri riadení výšky hladiny kvapaliny (na nelineárnom modeli) pri  $\psi = 1$  a rôznych hodnotách  $\varphi = 1$ , 0.1, 0.01, 0.001. Na tomto

obrázku vidieť, že čím je regulačná odchýlka menšia, tým sú generované väčšie hodnoty akčných zásahov do procesu.



Obr. 37 Priebeh akčného zásahu a regulačnej odchýlky pre rôzne  $\psi$ 



Obr. 38 Priebeh akčného zásahu a regulačnej odchýlky pre rôzne  $\varphi$ 

Akčný zásah do procesu pri zásobníku kvapaliny je obmedzený ( $0\% \le u \le 100\%$ ). LQ regulátory neuvažujú obmedzenie a keby som chcela, aby výstupná veličina čo najrýchlejšie dosiahla žiadanú veličinu môže sa stať, že akčný zásah bude zotrvávať na obmedzení a zhorší sa kvalita regulácie. Pri riadení polynomickým LQ regulátorom nepoužívam ani anti – windup zapojenie, čiže nedokážem odstrániť problém saturácie. Zvolila som preto kompromis medzi veľkosťou akčného zásahu a dobou regulácie. Zvolené váhové koeficienty sú nasledovné:

$$\varphi = 1, \quad \psi = 0.05$$
 (57)

Polynomický LQ regulátor s integračnou zložkou má potom tvar:

$$G_R = \frac{q_1 s + q_0}{(p_1 s + p_0)s} = \frac{36.4715s + 0.2236}{(163.1053s + 11.4225)s}$$
(58)

Na obr. 39 a 40 je znázornený priebeh výstupnej a akčnej veličiny pri riadení výšky hladiny kvapaliny v zásobníku s polynomickým LQ regulátorom.



Obr. 39 Priebeh výstupnej veličiny pri riadení s polynomickým LQ regulátorom



Obr. 40 Priebeh akčného zásahu pri riadení s polynomickým LQ regulátorom

### 6.2 Spojité riadenie výšky hladiny kvapaliny pomocou čerpadla

Pri spojitom riadení výšky hladiny kvapaliny bolo v druhom prípade akčným členom čerpadlo A, teda riadiacou veličinou bol výkon čerpadla v percentách. Na riadenie výšky hladiny kvapaliny aj v tomto prípade boli navrhnuté PI regulátory experimentálnymi a analytickými metódami, polynomický regulátor metódou umiestnenia pólov a polynomický LQ regulátor. Pri PI regulátoroch som aj v tomto prípade použila anti – windup zapojenie (schéma zapojenia je v prílohe D) a pri regulácii s polynomickým a polynomickým LQ regulátorom jednoduchý spätnoväzbový obvod so zápornou spätnou väzbou (schéma zapojenia je v prílohe E).

#### Regulátory navrhnuté metódou Chien- Hrones – Reswick a Rivera Morari

Pri návrhu regulátorov vychádzam z identifikovaného prenosu (16).

Pri metóde Chien – Hrones –Reswick som neznáme parametre PI regulátora vypočítala podľa tab. 12. Vybrala som si riadenie na žiadanú veličinu s 20% preregulovaním. Prenosová funkcia PI regulátora vyzerá nasledovne:

$$G_R(s) = \frac{6.3867s + 0.0377}{s} \tag{59}$$

Pri metóde Rivera – Morari som parametre PI regulátora vypočítala na základe tab. 13. Prenos PI regulátora má tvar:

$$G_R(s) = \frac{1.3406s + 0.0078}{s}, T_{URO} = 34 s$$
(60)

Časovú konštantu  $T_t$  pri anti – windup zapojení som zvolila tak isto ako v predošlom prípade.

$$T_t = T_I \tag{61}$$

Na obr. 41 a 42 je vykreslený priebeh riadenia s PI regulátorom nastaveným Chienovou – Hronesovou – Reswickovou metódou.



Obr. 41 Priebeh výstupnej veličiny pri riadení s PI regulátorom nastaveným Chienovou – Hronesovou – Reswickou metódou (akčná veličina je výkon čerpadla A v %)



Obr. 42 Priebeh akčného zásahu pri riadení s PI regulátorom nastaveným Chienovou – Hronesovou – Reswickou metódou (akčná veličina je výkon čerpadla A v %)

Na obr. 43 a 44 je znázornený priebeh výstupnej a akčnej veličiny s PI regulátorom nastaveným metódou Rivera - Morari.



Obr. 43 Priebeh výstupnej veličiny pri riadení s PI regulátorom nastaveným metódou Rivera – Morari (akčná veličina je výkon čerpadla A v %)



Obr. 44 Priebeh akčného zásahu pri riadení s PI regulátorom nastaveným metódou Rivera – Morari (akčná veličina je výkon čerpadla A v %)

### Regulátory navrhnuté metódou umiestnenia pólov

Pri tejto metóde návrhu regulátora som postupovala podobným spôsobom ako pri návrhu regulátora, pri ktorom riadiacou veličinou bolo percento otvorenia ventilu.

Pól riadeného procesu podľa (16) má hodnotu

$$s = -0.0059$$
 (62)

Podľa tejto hodnoty som zvolila nasledujúce póly URO:

1 dva rôzne póly

$$s_1 = -0.005$$
  
 $s_2 = -0.2$  (63)

2 dvojnásobný

$$s_1 = -0.03$$
  
 $s_2 = -0.03$  (64)

Prenosová funkcia PI regulátora (dva rôzne póly) má tvar:

$$G_R(s) = \frac{7.2917s + 0.0450}{s} \tag{65}$$

Prenosová funkcia PI regulátora (dvojnásobný pól) má tvar:

$$G_R(s) = \frac{2.1342s + 0.0405}{s} \tag{66}$$

Na obr. 45 a 46 je vykreslený priebeh výstupnej veličiny a akčného zásahu pri riadení s PI regulátorom navrhnutým metódou umiestnenia pólov (dva rôzne póly).

Na obr. 47 a 48 je znázornený priebeh riadenia pri riadení s PI regulátorom navrhnutým metódou umiestnenia pólov (dvojnásobný pól).



Obr. 45 Priebeh výstupnej veličiny pri riadení s PI regulátorom nastaveným metódou umiestnenia pólov (dva rôzne póly, akčná veličina je výkon čerpadla A v %)



Obr. 46 Priebeh akčného zásahu pri riadení s PI regulátorom nastaveným metódou umiestnenia pólov (dva rôzne póly, akčná veličina je výkon čerpadla A v %)



Obr. 47 Priebeh výstupnej veličiny pri riadení s PI regulátorom nastaveným metódou umiestnenia pólov (dvojnásobný pól, akčná veličina je výkon čerpadla A v %)



Obr. 48 Priebeh akčného zásahu pri riadení s PI regulátorom nastaveným metódou umiestnenia pólov (dvojnásobný pól, akčná veličina je výkon čerpadla A v %)

### Polynomický regulátor navrhnutý metódou umiestnenia pólov

Polynomický regulátor s integračnou zložkou je navrhnutý podľa postupu opísaného v časti (5.3).

Na základe pólu riadeného procesu (62) som zvolila nasledujúce korene polynómu c(s):

$$s_1 = -0.05$$
  
 $s_2 = -0.05$   
 $s_3 = -0.009$  (67)

Polynomický regulátor s integračnou zložkou potom má tvar:

$$G_R = \frac{q_1 s + q_0}{(p_1 s + p_0)s} = \frac{0.0007416s + 5.978.10^{-6}}{(0.005901s + 0.0006084)s}$$
(68)

Na obr. 49 a 50 je vykreslený priebeh riadenia výšky hladiny s polynomickým regulátorom s integračnou zložkou.



Obr. 49 Priebeh výstupnej veličiny pri riadení s polynomickým regulátorom s integračnou zložkou (akčná veličina je výkon čerpadla A v %)



Obr. 50 Priebeh akčného zásahu pri riadení s polynomickým regulátorom s integračnou zložkou (akčná veličina je výkon čerpadla A v %)

#### Polynomický LQ regulátor

Pri návrhu polynomického LQ regulátora v prípade, že riadiaca veličina je výkon čerpadla A v percentách, som postupovala rovnako ako v prípade, keď riadiacou veličinou bolo percento otvorenia ventilu. Keď že identifikované prenosy (15) a (16) sú podobné, získam pri voľ be váhových koeficientov podobné priebehy akčných zásahov a regulačných odchýliek.

Keďže akčný zásah aj v tomto prípade môže byť iba medzi 0% a 100% zvolila som si nasledujúce hodnoty váhových koeficientov:

$$\varphi = 1, \quad \psi = 0.1 \tag{69}$$

Polynomický LQ regulátor s integračnou zložkou má potom tvar:

$$G_R = \frac{q_1 s + q_0}{(p_1 s + p_0)s} = \frac{53.5868s + 0.3162}{(169.4562s + 20.1100)s}$$
(70)

Na obr. 51 a 52 je znázornený priebeh výstupnej a akčnej veličiny pri riadení výšky hladiny kvapaliny v zásobníku s polynomickým LQ regulátorom.



Obr. 51 Priebeh výstupnej veličiny pri riadení s polynomickým LQ regulátorom (akčná veličina je výkon čerpadla A v %)


Obr. 52 Priebeh akčného zásahu pri riadení s polynomickým LQ regulátorom (akčná veličina je výkon čerpadla A v %)

## Záver

Cieľom diplomovej práce bolo spojité riadenie zásobníka kvapaliny. Zásobník kvapaliny je súčasťou multifunkčnej stanice Armfield PCT40. Najprv bolo potrebné oboznámiť sa s používaným laboratórnym zariadením a riadiacim systémom, ktorý bol k dispozícii. Po oboznámení analyzovať jeho statické a dynamické vlastnosti na základe meraní. Ďalej navrhnúť riadenie zásobníka rôznymi typmi spojitých regulátorov.

V prvom rade bolo potrebné oboznámiť sa multifunkčným zariadením PCT40, hlavne zásobníkom kvapaliny. Bolo potrebné zistiť, aké akčné členy a snímače mám k dispozícii a stanoviť ciele riadenia. Cieľom riadenia bolo udržať výšku hladiny kvapaliny v zásobníku na požadovanej hodnote. Mala som k dispozícii dva akčné členy, ventil PSV a čerpadlo A. Výšku hladiny kvapaliny v zásobníku som merala pomocou hydrostatického snímača tlaku a prietok kvapaliny do zásobníka prietokomerom. Komunikácia medzi počítačom a zásobníkom kvapaliny bola zabezpečená cez I/O kartu. Zásobník som ovládala cez softvér Matlab, pomocou Simulinkovej schémy (obr. 8). Snímače a akčné členy mali vstupné a výstupné signály vo voltoch. Bolo potrebné spraviť kalibráciu vstupných a výstupné signálov a prepočet na požadované jednotky. Kalibráciou som získala statickú charakteristiku prietokomera, hydrostatického snímača tlaku, PSV a čerpadla A a B.

Po kalibrácii vstupných a výstupných signálov zásobníka nasledovala identifikácia. Po identifikácii prechodovej charakteristiky som získala prenosovú funkciu systému v okolí zvoleného pracovného bodu. Výstupnou veličinou bola výška hladiny kvapaliny v zásobníku a vstupnou veličinou bolo v prvom prípade percento otvorenia ventilu, a v druhom prípade výkon čerpadla A v percentách. To znamená, že som mala dve prenosové funkcie. Prvá prenosová funkcia je pomer medzi výškou hladiny kvapaliny a otvorením ventilu v percentách, vzťah (15). Druhá prenosová funkcia je pomer medzi výškou hladiny kvapaliny a výkonom čerpadla A v percentách, vzťah (16). Odvodila som aj dynamický matematický model zásobníka kvapaliny, kde neznámou veličinou bola konštanta ventilu. Konštantu ventilu som vypočítala pomocou ustálených prietokov a z ustálených výšok hladín, ktoré som získala meraním a pomocou Kalmanovho filtra. Výsledky získané s oboma spôsobmi boli rovnaké. Nelineárny model a vypočítanú konštantu ventilu som využívala pri simuláciách navrhnutých spojitých regulátorov. Po identifikácii systému nasledoval návrh rôznych typov spojitých regulátorov. Na získanie konštánt PI regulátora som použila experimentálne metódy (Chienova – Hronesova – Reswickova metóda, metóda Rivera - Morari) a metódu umiestnenia pólov. Pri metóde umiestnenia pólov som zvolila najprv dva rôzne póly URO a potom jeden dvojnásobný. Navrhla som aj polynomický regulátor s metódou umiestnenia pólov a polynomický LQ regulátor. Pri regulátoroch navrhnutými experimentálnymi a analytickými metódami som použila anti – windup zapojenie a pri polynomických regulátoroch som použila jednoduchý spätnoväzbový obvod zo zápornou spätnou väzbou. Pri riadení som tiež použila dve rôzne riadiace veličiny. V prvom prípade riadiacou veličinou bolo percento otvorenia ventilu a v druhom prípade výkon čerpadla A v percentách. Pri riadení s polynomickým LQ regulátorom, keď výstupnou veličinou bolo percento otvorenia ventilu, po druhej skokovej zmene nastala porucha v systéme, ktorý regulátor nezvládol. Po ďalšej skokovej zmene však už ureguloval výstupnú veličinu na žiadanú hodnotu. Môžem povedať, že všetky navrhnuté regulátory uregulovali výstupnú veličinu

## Zoznam použitej literatúry

- [1] Discover with armfield Engineering Teaching and Research Equipment, Instruction manual PCT40, 2008
- [2] Discover with armfield Engineering Teaching and Research Equipment, Instruction manual PCT41, 2008
- [3] Kadlec, K.: Měření a regulace hladiny PCT 40 úvodní část [online]. pdf. [cit. 21.03.2010]. Dostupné na internete: <<u>http://www.vscht.cz/ufmt/kadleck.html</u>>
- [4] Kadlec, K.: Měření a regulace hladiny PCT 40, Návod k provedení laboratorní práce [online]. VŠCHT – Praha, únor 2008, pdf. [cit. 21.03.2010]. Dostupné na internete: <<u>http://www.vscht.cz/ufmt/kadleck.html</u>>
- [5] Discover with armfield Engineering Teaching and Research Equipment, Instruction manual PCT43, 2008
- [6] Čirka, Ľ.: Špeciálne jazykové prostriedky počítačov SJPP, Matlab a Simulink [online]. [cit. 21.04.2010]. Dostupné na internete:
   <a href="http://www.kirp.chtf.stuba.sk/~cirka/vyuka/matlab">http://www.kirp.chtf.stuba.sk/~cirka/vyuka/matlab</a>>
- [7] MF624 Multifunction I/O Card, User's Manual, HUMUSOFT, 2006
- [8] Fikar, M. Bakošová, M.: Riadenie procesov. 1.vyd. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2008. 193 s. ISBN 978–80–227-2841-6
- [9] Fikar, M. Mikleš, J.: Identifikácia systémov. 1.vyd. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 1998. 114 s. ISBN 80-227-1177-2
- [10] Mikleš, J. Fikar, M.: Modelovanie, identifikácia a riadenie procesov II. Identifikácia a optimálne riadenie. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2004. 260 s. ISBN 80-227-2134-4
- [11] Balátě, J.: Automatické řízení. 2.vyd. Praha: Vydavateľstvo BEN-technická literatura, 2008. 664 s. ISBN 80-7300-148-9
- [12] Åström, K. Hägglund, T.: PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. 2. vyd. Research Triangle Park: Instrument Society of America, 1995. 334 s. ISBN 1-55617-516-7
- [13] Hlava, J.: Číslicové PID regulátory [online]. TU Liberec. [cit. 21.03.2010]. Dostupné na internete: <<u>http://www.fm.tul.cz/~krtsub/fm/par/digitalPID.pdf</u>>
- [14] Ogunnaike, B. Ray, W.: Process, Dynamics, Modeling, and Control. Oxford: Oxford University Press, 1994. ISBN 0-19-509119-1
- [15] Bakošová, M.: Riadenie procesov [online]. Prednášky. Bratislava: FCHPT STU v Bratislave, 2007. [cit. 21.04.2010]. Dostupné na internete:

< <u>http://www.kirp.chtf.stuba.sk/moodle/mod/resource/view.php?id=10968</u>>

- [16] Havlena, V. Štecha, J.: Moderní teorie řízení [online]. Skripta ČVUT, FEL 2000.
  [cit. 26.04.2010]. Dostupné na internete:
  <a href="http://support.dce.felk.cvut.cz/e-kurzy/file.php/15/prednasky/mtr\_old.pdf">http://support.dce.felk.cvut.cz/e-kurzy/file.php/15/prednasky/mtr\_old.pdf</a>>
- [17] Čirka, Ľ.: Adaptívne LQ riadenie, Youlova-Kučerova parametrizácia regulátorov a modelov procesov: dizertačná práca. Bratislava: FCHPT STU, 2003. 131 s.
- [18] Visioli, A.: Practical PID Control. 1. vyd. London: Springer Verlag, 2006. 322 s. ISBN 1-84628-585-2

## Prílohy

## Príloha A: Schéma zapojenia : PCT40 – PC

Schéma zapojenia: PCT40 - PC							
60 pin I/O connector		Humusoft MF624 - <b>1</b> konektor X1		Simulink kanál č.			
1	AOUT0 – Temperature T1	1	AD0	In 1			
2	AOUT1 – Temperature T2	2	AD1	In 2			
3	AOUT2 – Temperature T3	3	AD2	In 3			
4	AOUT3 – Temperature T4	4	AD3	In 4			
5	AOUT4 – Pressure P1	5	AD4	In 5			
6	AOUT5 – Pressure P2	6	AD5	In 6			
7	AOUT6 – Pressure P3	7	AD6	In 7			
8	AOUT7 – Level L1	8	AD7	In 8			
17	AGND – analog ground	9	AGND – analog ground	-			
22	AIN0 – Pump A speed	20	DA0 – analog out 0	Out 1			
23	AGND – analog ground	9	AGND – analog ground	-			
24	AIN1 – Pump B speed	21	DA1 – analog out 1	Out 2			
25	AGND – analog ground	9	AGND – analog ground	-			
30	DOUT2 – HW Vessel Low Level	12	DIN0	In 17			
31	DOUT3 – HW Vessel Over Temp	13	DIN1	In 18			
33	DOUT4 – Thermostat on/off	14	DIN2	In 19			
34	DOUT5 – Level switch on/off	15	DIN3	In 20			
36	DOUT7 – Diff. Level switch on/off	16	DIN4	In 21			
37	DGND – digital ground	29	DGND – digital ground	-			
41	DIN3 – SSR Drive	30	DOUT0	Out 17			
42		29					
43	DIN4 - Solenoid Valve SOL1 on/off	31	DOUT1	Out 18			
44	DIN5 – Solenoid Valve SOL2 on/off	32	DOUT2	Out 19			
45	DIN6 - Solenoid Valve SOL3 on/off	33	DOUT3	Out 20			
46	DIN7 – PCT 41 Stirrer on/off	34	DOUT4	Out 21			

47	DGND – digital ground	29	DGND	-
48	Aux1 - USB/PCT43 control	35	??	-
49	Aux2 - Gear pump or PCT 44 Valve	22	DA2 – analog out 2	Out 3
50	Aux3 – PSV Control	23	DA3 – analog out 3	Out 4
60 pin I/O connector		Humusoft MF614 - 1 konektor X2		
-	-	-	-	-

Schéma zapojenia: PCT40 - PC						
60 pin I/O connector		Humusoft MF624 - <b>2</b> konektor X1		Simulink kanál č.		
9	AOUT8 – Flowrate F1	1	AD0	In 1		
10	AOUT9 – User Input	2	AD1	In 2		
11	AOUT10 – Conductivity	3	AD2	In 3		
12	AOUT11 – pH	4	AD3	In 4		
17	AGND – analog ground	9	AGND – analog ground	-		
60 pin I/O connector			Humusoft MF614 - 2 konektor X2			
-	-	-	-	-		

**Príloha B:** Simulinková schéma pri riadení s PI regulátorom (vstupnou veličinou je percento otvorenia ventilu)

Simulinková schéma, ktorú som použila pri riadení s PI regulátormi, keď riadiacou veličinou bolo percento otvorenia ventilu



**Príloha C:** Simulinková schéma pri riadení s polynomickým a polynomickým LQ regulátorom (vstupnou veličinou je percento otvorenia ventilu)

Simulinková schéma, ktorú som použila pri riadení s polynomickým regulátorom navrhnutým metódou umiestnenia pólov a polynomickým LQ regulátorom, keď riadiacou veličinou bolo percento otvorenia ventilu



**Príloha D:** Simulinková schéma pri riadení s PI regulátorom (vstupnou veličinou je výkon čerpadla A)

Simulinková schéma, ktorú som použila pri riadení s PI regulátormi, keď riadiacou veličinou bol výkon čerpadla A v %



**Príloha E:** Simulinková schéma pri riadení s polynomickým a polynomickým LQ regulátorom (vstupnou veličinou je výkon čerpadla A)

Simulinková schéma, ktorú som použila pri riadení s polynomickým regulátorom navrhnutým metódou umiestnenia pólov a polynomickým LQ regulátorom, keď riadiacou veličinou bolo percento otvorenia ventilu

