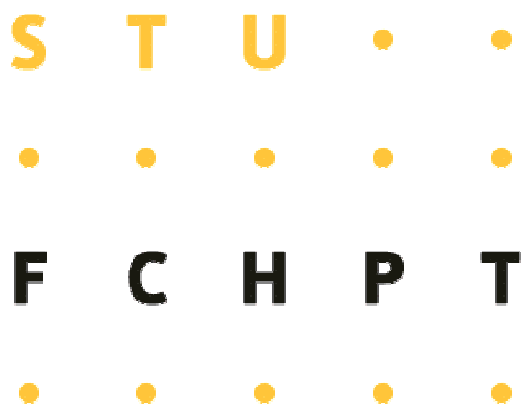


SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE



**FAKULTA CHEMICKÉJ A POTRAVINÁRSKEJ TECHNOLOGIE
ÚSTAV INFORMATIZÁCIE, AUTOMATIZÁCIE
A MATEMATIKY
ODDELENIE INFORMATIZÁCIE A RIADENIA PROCESOV**



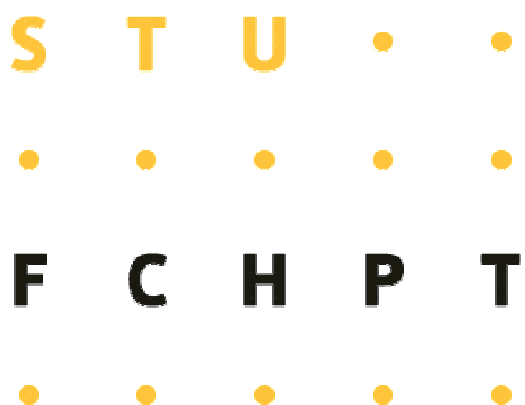
**RIADENIE LABORATÓRNEHO CHEMICKÉHO REAKTORA
BAKALÁRSKA PRÁCA**

FCHPT-5415-58721

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE



**FAKULTA CHEMICKÉJ A POTRAVINÁRSKEJ TECHNOLOGIE
ÚSTAV INFORMATIZÁCIE, AUTOMATIZÁCIE
A MATEMATIKY
ODDELENIE INFORMATIZÁCIE A RIADENIA PROCESOV**



**RIADENIE LABORATÓRNEHO CHEMICKÉHO REAKTORA
BAKALÁRSKA PRÁCA**

FCHPT-5415-58721

Študijný program: Automatizácia, informatizácia a manažment v chémii a potravinárstve

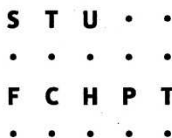
Číslo a názov študijného odboru: 5.2.14 Automatizácia + 5.2.52 Priemyselné inžinierstvo

Školiace pracovisko: Fakulta chemickej a potravinárskej technológie

Vedúci záverečnej práce/školiť: Ing. Jana Závacká

Bratislava 2011

Ján Pačesa



ZADANIE BAKALÁRSKEJ PRÁCE

Študent: **Ján Pačesa**
ID študenta: 58721
Študijný program: automatizácia, informatizácia a manažment v chémii a potravinárstve
Kombinácia študijných odborov: 5.2.14 automatizácia, 5.2.52 priemyselné inžinierstvo
Vedúca práce: Ing. Jana Závacká

Názov práce: **Riadenie laboratórneho chemického reaktora**

Špecifikácia zadania:

- oboznámenie sa s laborátnym zariadením
- meranie charakteristík a uskutočnenie identifikácie laboratórneho procesu
- návrh regulátorov a riadenie laboratórneho procesu

Rozsah práce: 25

Riešenie zadania práce od: 14. 02. 2011
Dátum odovzdania práce: 21. 05. 2011



Ján Pačesa
Študent

prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
Vedúci pracoviska

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

Čestné prehlásenie

Čestne prehlasujem, že na bakalárskej práci som pracoval samostatne, na základe vlastných teoretických a praktických poznatkov, konzultácii a štúdia odbornej literatúry, ktorej úplný prehľad je uvedený v zozname použitej literatúry.

.....
Ján Pačesa

Pod'akovanie

Týmto ďakujem vedúcej mojej bakalárskej práce Ing. Jane Závackej za vedenie, rady, pripomienky, poskytnuté vedomosti a za ochotu vždy mi pomôcť pri akomkoľvek probléme, ktorý sa vyskytol pri vypracovávaní bakalárskej práce.

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá riadením vodivosti v laboratórnom chemickom reaktore. Použitý chemický reaktor je súčasťou výučbového zariadenia vyvinutého firmou Armfield. Teoretická časť práce popisuje základné delenie chemických reaktorov. Ďalej v tejto časti práce objasňujem pojmy: identifikácia procesu Strejcovou metódou, spätnoväzbové riadenie, návrh regulátorov a kritéria kvality riadenia. Praktická časť obsahuje opis zariadenia, postup identifikácie z prechodových charakteristík a návrh regulátorov pomocou získaných dát z identifikácie. Následne sú v práci uvedené výsledky riadenia pomocou rôznych regulátorov a na základe kritérií kvality je v závere vybratý najlepší regulátor.

Abstract

This bachelor thesis deals with the management of conductivity in a laboratory chemical reactor. Used chemical reactor is a part of the educational equipment developed by Armfield company. The theoretical part describes basic division of chemical reactors. Furthermore, in this part I clarify these concepts: identification process by Strejc method, feedback control, controller design and quality control criteria. The practical part includes a description of the equipment, process of the identification from transition characteristics and design of regulators using data derived from the identification process. Subsequently in the thesis, I presented results of management using different regulators. To conclude, based on quality criteria the best regulator is selected.

Obsah

Zoznam použitých symbolov a skratiek	10
Úvod.....	12
1 Chemické reaktory	13
1.1 Prietokové chemické reaktory	14
2 Identifikácia dynamického systému Strejcovou metódou	15
2.1 Princíp identifikácie Strejcovou metódou	15
2.2 Postup identifikácie	16
3 Spätnoväzbové riadenie procesov	17
3.1 Uzavretý regulačný obvod	17
3.1.1 Dvojpohový regulátor.....	18
3.1.2 Proporcionálny regulátor	19
3.1.3 Integračný regulátor.....	19
3.1.4 Derivačný regulátor	19
3.1.5 PID regulátor	20
4 Metódy návrhu regulátorov.....	21
4.1 Návrh regulátorov podľa Strejca.....	21
4.2 Návrh regulátorov podľa Ziegler-Nicholsa	22
4.3 Návrh regulátorov podľa Cohen-Coona.....	22
5 Ukazovatele kvality	23
6 Opis zariadenia	26
7 Zostrojenie charakteristík čerpadiel.....	29
7.1 Charakteristika čerpadla PSV	29
7.2 Charakteristika peristaltického čerpadla	34
8 Identifikácia systému	35
8.1 Postup identifikácie	36
8.2 Výsledky identifikácie	37
8.3 Overenie identifikácie	38
9 Riadenie chemického reaktora.....	39
9.1 Postup a výsledky riadenia.....	39
9.2 Grafické priebehy riadenia.....	40
9.2.1 PI regulátor navrhnutý podľa Strejca	40

9.2.2 PI regulátor navrhnutý podľa Ziegler-Nicholsa	40
9.2.3 PID regulátor navrhnutý podľa Ziegler-Nicholsa.....	41
9.2.4 PI regulátor navrhnutý podľa Cohen-Coona	41
9.2.5 PID regulátor navrhnutý podľa Cohen-Coona	41
9.3 Výber najvhodnejšieho regulátora	42
10 Záver	43
Zoznam použitej literatúry	44

Zoznam použitých symbolov a skratiek

Symbol/skratka	Názov	Fyzikálna jednotka
V	Objem	m^3
$\dot{Q}$	Objemový prietok	$m^3 s^{-1}$
t	Čas	s
n	Látkove množstvo	mol
m	Hmotnosť	kg
M	Mólova hmotnosť	$g \cdot mol^{-1}$
c	Mólová koncentrácia	$mol \cdot m^{-3}$
T	Časová konštanta	s
T_I	Integračná časová konštanta	s^{-1}
T_D	Derivačná konštanta	s
D	Dopravné oneskorenie	s
Z	Statické zosilnenie systému	
Z_R	Zosilnenie regulátora	
s	Argument Laplaceovej transformácie	
t_n	Čas nábehu	s
t_u	Čas priet'ahu	s
t_{reg}	Čas regulácie	s
σ_{max}	Maximálne preregulovanie	%
t_σ	Čas maximálneho preregulovania	s
$G_R(s)$	Prenos regulátora	
$G(s)$	Prenos systému	
G	Elektrická vodivosť	S
u	Vstupná veličina	
y	Výstupná veličina	

$e(t)$	Regulačná odchýlka
IAE	Integrál absolútnej hodnoty regulačnej odchýlky
PSV	Proportioning Solenoid Valve

Úvod

Chemické reaktory patria medzi najdôležitejšie zariadenia v chemickom priemysle. Preto je osobitne potrebné vedieť ich aj optimálne riadiť. Riadenie optimálnej teploty reakčnej zmesi vo vnútri reaktora možno simulovať pomocou rôznych programov. Málokto si však vie tento proces predstaviť konkrétne. Práve preto boli vyvinuté experimentálne zariadenia firmy Armfield, ktoré slúžia na lepšie pochopenie teóriou vysvetľovaných problémov. Študent si takto môže nadobudnuté teoretické vedomosti vyskúšať v praxi.

Cieľom mojej bakalárskej práce bolo navrhnúť regulátor, pomocou ktorého by som potom mohol optimálne riadiť elektrickú vodivosť v laboratórnom chemickom reaktore. Moja práca sa delí na dve základné časti – teoretickú časť (kapitoly 1 až 5) a praktickú časť (kapitoly 6 až 10).

Teoretická časť mojej práce začína stručným popisom chemických reaktorov v kapitole 1 s osobitným zreteľom na prietokové chemické reaktory. V kapitole 2 sa venujem opisu identifikácie dynamického systému Strejcovou metódou. V kapitolách 3 a 4 popisujem princíp spätnoväzbového riadenia za pomoci rôznych regulátorov. V poslednej 5. kapitole teoretickej časti popisujem kritéria kvality pre regulátory.

Praktická časť práce opisuje už samotný priebeh mojej práce s laboratórnym zariadením firmy Armfield, ktorého stručný opis uvádzam v kapitole 6. K tomu, aby som vôbec bol schopný regulátory spätnoväzbového riadenia navrhnúť, bolo potrebné zostrojiť charakteristiky čerpadiel kvapalín; postup popisuje kapitola 7. Následne som proces identifikoval Strejcovou metódou, výsledky uvádzam v kapitole 8. Za pomoci získaných údajov z identifikácie som navrhol konkrétne regulátory ktoré uvádzam v kapitole 9. Táto kapitola obsahuje aj grafické priebehy riadenia pre jednotlivé regulátory. Na základe zhodnotenia kritérií kvality použitých regulátorov som v závere mojej práce vybral najlepší regulátor.

Ako teoretický základ k tejto bakalárskej práci som využíval knižné zdroje, ktoré uvádzam v zozname použitej literatúry.

1 Chemické reaktory

Chemické reaktory slúžia na vlastnú premenu chemických látok, ktoré sa nachádzajú vo vnútri reaktora. V chemickom reaktore prebiehajú rôzne riadené chemické reakcie. Existuje nespočetné množstvo chemických reaktorov a je preto ťažké zaviesť ich jednoduchú a presnú klasifikáciu. Najčastejšie je v odbornej literatúre uvádzané triedenie chemických reaktorov podľa týchto kritérií [5]:

1. Spôsob privádzania reaktantov a odvádzania produktov,
2. Charakter prúdenia v reaktore,
3. Spôsob výmeny tepla,
4. Počet a druh fáz reagujúcej zmesi,
5. Prítomnosť katalyzátora.

Vzhľadom k zadaniu mojej bakalárskej práce podrobnejšie popíšem rozdelenie chemických reaktorov len podľa prvého kritéria (spôsob privádzania reaktantov a odvádzania produktov). Podľa tohto hľadiska delíme chemické reaktory na vsádzkové (diskontinuálne), poloprietokové a prietokové (kontinuálne). V počiatočnej fáze vývinu chemickej technológie sa chemické reakcie uskutočňovali výlučne vo vsádzkových chemických reaktoroch, pretože vtedy sa ešte vyrábali malé množstvá produktov [4]. V súčasnosti sa vsádzkové reaktory využívajú prednostne tam, kde sa stretávame s ťažkosťami, spojenými s nepretržitým prívodom reagujúcich látok (tuhé látky, pasty a pod.), a preto nie je možné použiť prietokový chemický reaktor. Medzi ďalšie nezanedbateľné výhody vsádzkových reaktorov patrí predovšetkým skutočnosť, že ich môžeme bez väčších problémov medzi jednotlivými vsádzkami vyčistiť a nevyžadujú zložitú meráciu a riadiacu techniku. Hlavným nedostatkom vsádzkových reaktorov sú vysoké prevádzkové náklady, spojené s veľkým počtom prípravných operácií – ako napríklad plnenie reaktora, vyhrievanie, chladenie, vyprázdňovanie či jeho čistenie [4].

Téma mojej bakalárskej práce je riadenie laboratórneho prietokového chemického reaktora, preto v ďalšej časti mojej práce zhrniem základné vlastnosti prietokových chemických reaktorov.

1.1 Prietokové chemické reaktory

Ako už sám názov napovedá, v tomto type chemického reaktora sú reaktanty privádzané do reaktora nepretržite – hovoríme aj o nástreku [4]. Reaktanty sa do reaktora spravidla privádzajú konštantnou rýchlosťou a produkty sa zároveň kontinuálne odvádzajú. Produkty sa väčšinou po opustení reaktora ešte čistia a separujú. Podľa charakteru prúdenia rozlišujeme dve hlavné skupiny prietokových reaktorov: miešacie a rúrkové [5]. Rúrkové chemické reaktory sa používajú v prípade, ak nie je žiaduce, aby pri chemickej reakcii došlo k výraznému zmiešaniu východiskových zložiek s produktmi reakcie. Používajú sa hlavne pri chemických reakciách prebiehajúcich v plynnej fáze alebo pri reakciách, ktoré sa uskutočňujú za vysokého tlaku. Miešacie reaktory sú obvykle valcovité nádoby, ktoré majú vo svojom vnútri zabudovaný miešač. Obsahujú taktiež tepelný výmenník (napríklad vo forme ohrevného hada) a technické prístroje na meranie a reguláciu teploty a tlaku reakčnej zmesi. Používajú sa pre reakcie prebiehajúce v kvapalnej fáze a typické je napríklad použitie viacerých miešacích reaktorov zapojených kaskádovo za sebou [6].

Medzi hlavné výhody prietokových chemických reaktorov môžeme zaradiť minimálne nároky na obsluhu reaktora pri ustálenom stave, to znamená, že hmotnostný tok reakčnej zmesi na vstupe a na výstupe sa s časom nemení, pretože reaktor sa plní a vyprázdňuje prakticky sám. To poskytuje možnosť automatickej regulácie, čo sa prejaví na znížení nákladov na jednotku množstva vyrobeného produktu v porovnaní so vsádzkovými reaktormi. Ako nevýhody prietokových reaktorov sú uvádzané veľké nároky na presné meranie a riadenie, vyššiu náročnosť na obsluhu pri spúšťaní a odstávke – pretože sa zvyčajne spúšťa alebo odstavuje nielen reaktor ale s ním aj celá výrobná linka, či ich jednoúčelovosť. Prietokové chemické reaktory sa používajú hlavne pri veľkokapacitných výrobách, kde prebiehajú rýchle reakcie [6].

2 Identifikácia dynamického systému Strejcovou metódou

Táto metóda je pomenovaná podľa Jiřího Strejca. Strejcová metóda aproximuje systém prenosovou funkciou v tvare [1] :

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

pre ktorú:

Z – Zosilnenie

T – Časová konštanta

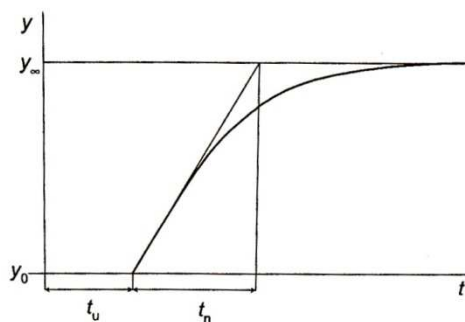
D – Dopravné oneskorenie

n – Rád systému.

2.1 Princíp identifikácie Strejcovou metódou

Princíp identifikácie Strejcovou metódou spočíva v tom, že v ustálenom stave zmeníme skokovo jednu zo vstupných veličín, pričom všetky ostatné vstupné veličiny ostanú konštantné a pozorujeme vplyv skokovej zmeny vstupnej veličiny na výstupnú veličinu. Jej časový priebeh voláme reálna prechodová charakteristika [1].

Dôležitými údajmi, ktoré sa získajú z grafu reálnej prechodovej charakteristiky, sú časy t_0 , t_1 , t_2 , ustálená hodnota výstupnej veličiny pred realizáciou skokovej zmeny vstupnej veličiny y_0 a ustálená hodnota výstupnej veličiny po realizácii skokovej zmeny vstupnej veličiny y_∞ . Čas t_0 reprezentuje čas, v ktorom sme realizovali skokovú zmenu vstupnej veličiny. Časy t_1 a t_2 sa určia z reálnej prechodovej charakteristiky tak, že na prechodovej charakteristike určíme inflexný bod, preložíme ním dotyčnicu k prechodovej charakteristike, ktorá na rovnobežkách s časovou osou prechádzajúcimi hodnotami y_0 a y_∞ , vymedzí časové údaje t_1 a t_2 . Premenné veličiny u_0 a u_∞ reprezentujú veľkosť vstupnej veličiny pred, respektíve po skokovej zmene. Dotyčnicu v inflexnom bode určíme najjednoduchšie tak, že zostrojíme priamku minimálneho sklonu, ktorá ešte nepretne reálnu prechodovú charakteristiku v troch bodoch. V prípade, že nameriame prechodovú charakteristiku prvého rádu, ktorá neobsahuje inflexný bod, prekladáme dotyčnicu miestom s najväčším sklonom spôsobom znázorneným na obr. 1 [1].



Obr.1: Spôsob identifikácie systému prvého rádu podľa Strejca [1]

2.2 Postup identifikácie

Identifikácia sa vykonáva v nasledovných krokoch [2] :

1. Určenie času nábehu

$$t_n = t_2 - t_1 \quad (2)$$

2. Určenie času priet'ahu

$$t_u = t_1 - t_0 \quad (3)$$

3. Určenie Zosilnenia systému

$$Z = \frac{y_\infty - y_0}{u_\infty - u_0} \quad (4)$$

4. Určenie podielu f_s

$$f_s = \frac{t_u}{t_n} \quad (5)$$

5. Z tab.1 za pomoci hodnoty f_s vyberieme odpovedajúci rád systému tak, aby platilo

$$f(n) \leq f_s < f(n+1) \quad (6)$$

Tab.1: Tabuľka pre Strejcovu metódu identifikácie [1]

n	1	2	3	4	5	6	7	8
f_n	0	0,104	0,218	0,319	0,410	0,493	0,570	0,642
g_n	1	0,368	0,271	0,224	0,195	0,161	0,149	0,139

V prípade, že vypočítaná hodnota f_s je väčšia, ako maximálna možná hodnota uvedená v tabuľke, t_u sa zmenší na prijateľnú mieru o hodnotu, ktorá sa potom v ďalšom kroku pripočíta k vypočítanej hodnote dopravného oneskorenia.

6. Určenie dopravného oneskorenia

$$D = [f_s - f(n)]t_n \quad (7)$$

7. Určenie časovej konštanty

$$T = g(n)t_n \quad (8)$$

3 Spätnoväzbové riadenie procesov

V priemysle je absolútne esenciálne vedieť daný proces efektívne riadiť. To môže byť zabezpečené jednak tým, že budeme zamestnávať veľký počet zamestnancov, ktorí by napríklad stáli pri každom chemickom reaktore a manuálne by obsluhovali napríklad prívody chladiacej kvapaliny, alebo iné vstupy a výstupy reaktora. Aby sa predišlo obrovským finančným nákladom spojeným s potrebou množstva kvalifikovanej pracovnej sily, alebo aby sa podľa možnosti úplne eliminoval ľudský faktor, ktorý môže pri zlyhaní jedného pracovníka viesť k havárii celého zariadenia, prešlo sa k iným systémom riadenia a jeden z týchto pokročilejších systémov je aj uzavretý regulačný obvod.

3.1 Uzavretý regulačný obvod

Uzavretý regulačný obvod (URO) je vo všeobecnosti súbor technických prostriedkov, ktoré slúžia na to, aby konkrétne zariadenie dobre pracovalo v automatickom režime. Schému uzavretého regulačného obvodu môžeme vidieť na obr. 2., kde jednotlivé označenia znamenajú [2]:

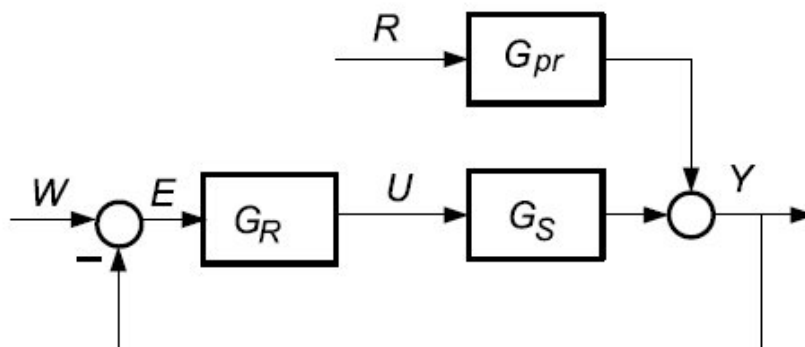
$W(s)$ – Obraz vstupnej veličiny

$E(s)$ – Obraz regulačnej odchýlky

$U(s)$ – Obraz riadiacej veličiny

$R(s)$ – Obraz poruchovej veličiny

$Y(s)$ – Obraz riadenej veličiny



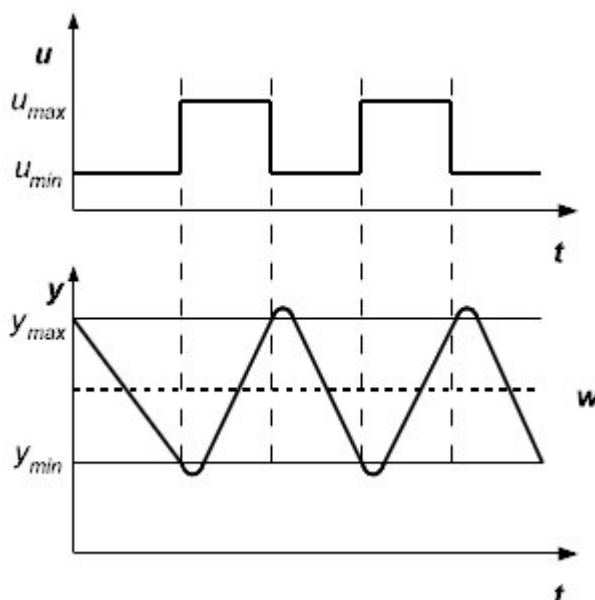
Obr.2: Schéma spätnoväzbového regulačného obvodu [1]

3.1.1 Dvojpolohový regulátor

Najjednoduchším spôsobom spätnoväzbovového riadenia je riadenie za pomoci dvojpolohového regulátora. Zákon riadenia dvojpolohového regulátora je daný vzťahom [1]:

$$u(t) = u_{max} \text{ ak } e(t) > 0 \text{ alebo } u(t) = u_{min} \text{ ak } e(t) < 0 \quad (9)$$

Dvojpolohový regulátor patrí medzi najlacnejšie regulátory a preto má široké uplatnenie v jednoduchých technických zariadeniach (žehličky, chladničky a pod.), pri ktorých sa nevyžaduje dosiahnutie presnej hodnoty žiadanej veličiny, iba permanentná oscilácia regulovanej veličiny v blízkom okolí žiadanej veličiny, ako je zobrazené na obr.3.



Obr.3: Závislosť vstupnej a výstupnej veličiny od času pre dvojpolohový regulátor [1]

Výstupná veličina pri reálnom riadení dvojpohodovým regulátorom vždy o niečo presahuje maximálnu a minimálnu hodnotu.

3.1.2 Proporcionálny regulátor

Proporcionálny regulátor predstavuje isté vylepšenie dvojpohodového regulátora. Princíp proporcionálneho regulátora je v tom, že je v ňom zavedené pásmo proporcionality riadenia pre malé regulačné odchýlky. Zákon riadenia a prenos proporcionálneho regulátora má po Laplaceovej transformácii tvar [1] :

$$u(t) = Z_R e(t) \quad (10)$$

$$G_R = Z_R \quad (11)$$

3.1.3 Integrovaný regulátor

Hlavný nedostatok proporcionálneho regulátora spočíva v tom, že nevie odstrániť trvalú regulačnú odchýlku úplne. Na jej úplné odstránenie je potrebné zaviesť ešte integrovanú zložku, ktorej zákon riadenia a prenos má tvar:

$$u(t) = \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt \quad (12)$$

$$G_R(s) = \frac{1}{T_I s} \quad (13)$$

Veličinu T_I nazývame integrovanou časovou konštantou a určuje rýchlosť zmeny akčného zásahu v prípade jednotkovej regulačnej odchýlky. I zložka je nestabilný systém a má integračné vlastnosti, pretože koreň charakteristickej rovnice (inými slovami pól) je nulový [1].

3.1.4 Derivačný regulátor

Používa sa v kombinácii s predošlými regulátormi, zabezpečuje rýchlejšiu reguláciu a zvyšuje stabilitu práce zariadenia, pretože derivačný regulátor predpovedá vývoj regulačnej odchýlky. Zákon riadenia a prenos pre derivačný regulátor nadobúdajú formu:

$$u(t) = T_D \frac{de(t)}{dt} \quad (14)$$

$$G_R(s) = T_D s \quad (15)$$

Ako možno ihneď konštatovať, D regulátor nie je fyzikálne realizovateľný systém, pretože stupeň čitateľa prenosu je vyšší ako stupeň menovateľa prenosu, ak je za menovateľ prenosu dosadená jednotku. Preto sa k D regulátoru zapája filter prvého rádu. Výsledný prenos už fyzikálne realizovateľného prenosu D regulátora má tvar:

$$G_R(s) = \frac{T_D s}{\frac{T_D s}{N} + 1} \quad (16)$$

Pri voľbe konštanty N sa kladie dôraz na to, aby časová konštanta $(\frac{T_D}{N})$ bola malá, preto $N \gg T_D$ a typické hodnoty N spadajú do intervalu $N \in (5,20)$ [1].

3.1.5 PID regulátor

Kombináciami proporcionálneho, integračného a derivačného regulátora v zapojení bez interakcie sú tvorené rôzne regulátory ako napríklad PI, PD, PID. Prenos a zákon riadenia PID regulátora potom nadobúdajú štruktúru [1] :

$$u(t) = Z_R(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt}) \quad (17)$$

$$G_R(s) = Z_R(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s) \quad (18)$$

V 60. a 70. rokoch dvadsiateho storočia prevládal názor, že väčšina priemyselných PID regulátorov bude postupne nahradená zložitejšími regulátormi. Dnes však možno konštatovať, že tento názor bol mylný. Boli navrhnuté pokročilejšie systémy riadenia, avšak ich zastúpenie je oproti PID regulátorom zanedbateľné. Jednou z najväčších výhod PID regulátorov je skutočnosť, že práca s PID regulátormi je bežne veľmi dobre známa pre obsluhu regulátorov v priemysle. Keďže PID regulátor má iba tri parametre, jeho hrubé nastavenie môže byť pomerne ľahko skúšané metódou pokusov a omylov. Pokročilé regulátory majú zvyčajne veľmi veľa parametrov, čo robí ich nastavenie za pomoci metódy

pokusov a omylov skoro nerealizovateľným. Ich obsluha stráca intuitívny pocit, čo sa udeje s riadeným procesom, ak je jeden z parametrov zmenený [3].

4 Metódy návrhu regulátorov

Po úspešnej realizácii identifikácie systému podľa Strejca môžeme empiricky získané údaje použiť na nastavenie jednotlivých zložiek rôznych typov regulátorov. V praktickej časti mojej bakalárskej práce som používal regulátory navrhnuté podľa Strejca, Ziegler-Nicholsa a Cohen-Coona, takže v nasledujúcej časti stručne zhriem vzťahy na výpočet zosilnení, integračných a derivačných konštánt použitých regulátorov. Všetkými tromi spôsobmi určujeme parametre regulátora v tvare vzorca č.18, na základe určených hodnôt T, Z, n, t_u a t_n z identifikácie.

4.1 Návrh regulátorov podľa Strejca

Parametre regulátorov sa určia za pomoci vzťahov uvedených v tab. 2.

Tab.2: Tabuľka výpočtových vzťahov parametrov jednotlivých regulátorov navrhnutých podľa Strejca [2]

Typ regulátora	Z_R	T_I	T_D
P	$\frac{1}{Z} \frac{1}{n-1}$	-	-
PI	$\frac{1}{Z} \frac{n+2}{4(n-1)}$	$T \frac{n+2}{3}$	-
PID	$\frac{1}{Z} \frac{7n+16}{16(n-2)}$	$T \frac{7n+16}{15}$	$T \frac{(n+1)(n+3)}{7n+16}$

Ako vidíme zo vzťahov pre výpočet zosilnenia jednotlivých typov regulátorov, Strejcovou metódou nie je možné navrhnuť žiadny regulátor pre systém prvého rádu a taktiež nedovoľuje navrhnuť PID regulátor pre riadený systém druhého rádu.

4.2 Návrh regulátorov podľa Ziegler-Nicholsa

Jedná sa o jednu z najpoužívanějších metód návrhu PID regulátorov, ktorá bola vyvinutá v štyridsiatych rokoch dvadsiateho storočia [2]. Vyvinuli ju John G. Ziegler a Nathaniel B. Nichols. Nastavenie sa realizuje buď pomocou metódy trvalých kmitov alebo pomocou prechodovej charakteristiky. V práci navrhujem regulátory pomocou prechodovej charakteristiky. Ich výpočtové vzťahy uvádzam v tab. 3.

Tab.3: Tabuľka výpočtových vzťahov parametrov jednotlivých regulátorov navrhnutých podľa Ziegler-Nicholsa [1]

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

4.3 Návrh regulátorov podľa Cohen-Coona

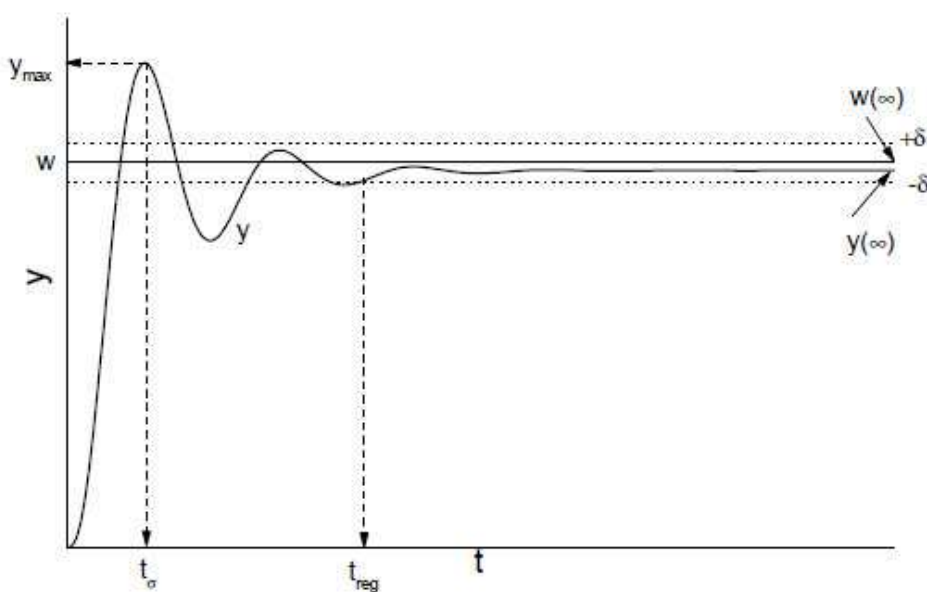
Jednotlivé parametre regulátora získame výpočtom podľa vzťahov uvedených v tab. 4.

Tab.4: Tabuľka výpočtových vzťahov parametrov jednotlivých regulátorov navrhnutých podľa Cohen-Coona [7]

Typ regulátora	Z_R	T_I	T_D
P	$\frac{1}{Z} \frac{t_n}{t_u} \left(1 + \frac{1}{3} \frac{t_u}{t_n}\right)$	-	-
PI	$\frac{1}{Z} \frac{t_n}{t_u} \left(0,9 + \frac{1}{12} \frac{t_u}{t_n}\right)$	$t_u \left(\frac{30 + 3 \frac{t_u}{t_n}}{9 + 20 \frac{t_u}{t_n}} \right)$	-
PID	$\frac{1}{Z} \frac{t_n}{t_u} \left(\frac{4}{3} + \frac{1}{4} \frac{t_u}{t_n}\right)$	$t_u \left(\frac{32 + 6 \frac{t_u}{t_n}}{13 + 8 \frac{t_u}{t_n}} \right)$	$t_u \left(\frac{4}{11 + 2 \frac{t_u}{t_n}} \right)$

5 Ukazovatele kvality

K porovnaniu jednotlivých navrhnutých regulátorov sú zavedené určité kritéria kvality, na základe ktorých je možné regulátory medzi sebou porovnávať. V krátkosti sa zmienim o kritériách v časovej oblasti. Na obr. 4. uvádzam typický priebeh odozvy uzavretého regulačného obvodu na skokovú zmenu žiadanej veličiny.



Obr.4: Typický priebeh URO na skokovú zmenu žiadanej veličiny s vyznačenými kritériami kvality [2]

V časovej oblasti je možné vyhodnocovať nasledujúce kritéria kvality:

- a) Maximálne preregulovanie σ_{max} - udáva sa v percentách a vyjadruje normovanú veľkosť maximálnej odchýlky výstupnej veličiny od jej ustálenej hodnoty. Vo všeobecnosti je potrebné snažiť sa o to, aby bol maximálny prekmit čo najmenší. Za pomoci hodnôt odčítaných z grafu sa maximálny prekmit dá vypočítať vzťahom:

$$\sigma_{max} = \frac{y_{max} - y_{\infty}}{y_{\infty} - y_0} \cdot 100\% \quad (19)$$

- b) Čas regulácie t_{reg} - je definovaný ako čas, po ktorom riadená veličina natrvalo ostane v $\pm\delta$ okolí novej žiadanej veličiny w . Inými slovami, regulačná odchýlka e po dosiahnutí času regulácie nebude už nikdy väčšia ako stanovená hodnota $\pm\delta$. Je to dôležité kritérium kvality a našou snahou by malo byť dosiahnutie čo najmenšej hodnoty t_{reg} .
- c) Čas maximálneho preregulovania t_{σ} - je to čas, v ktorom nastane maximálne preregulovanie.

V praktickej časti som pre navrhnuté regulátory na hodnotenie kvality mimo už uvedených časových kritérií využil aj jedno integrálne kritérium – integrál absolútnej hodnoty regulačnej odchýlky – IAE. Skratka pochádza z anglického názvu Integral absolut value of error a vzorec pre výpočet IAE má tvar:

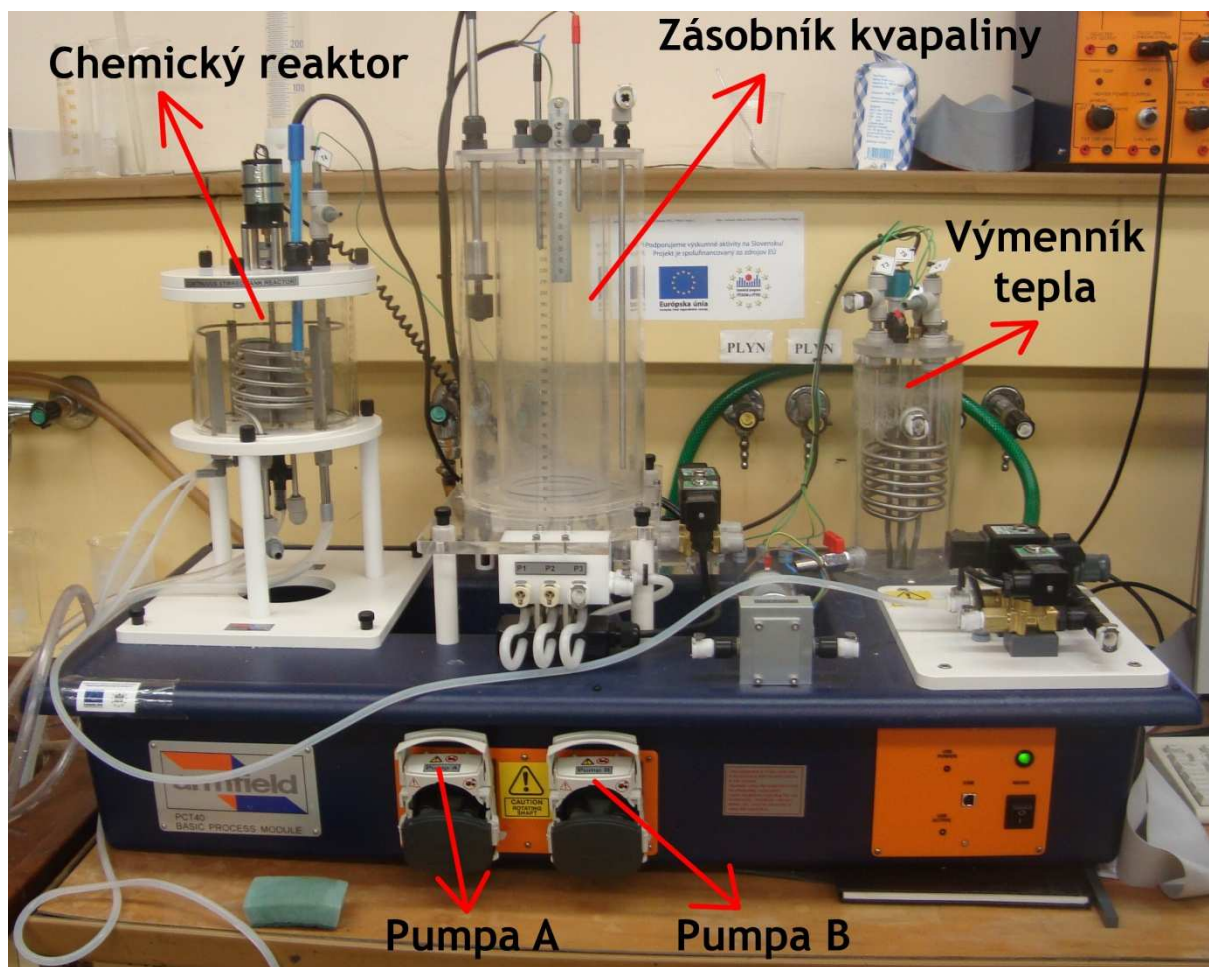
$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (20)$$

Ako možno vidieť, toto kritérium kvality integruje regulačnú odchýlku počas celého času riadenia a z absolútnej hodnoty je zrejmé, že sa kladné ako aj záporné príspevky regulačnej odchýlky sčítavajú. Z definície vyplýva, že pre PI a PID regulátory sa hodnota IAE postupom času ustáli na konštantnej hodnote (Integračná zložka eliminuje regulačnú odchýlku). Naopak, pre P regulátory bude hodnota IAE po určitom čase lineárne rásť, pretože P regulátor zanecháva istú trvalú regulačnú odchýlku [2].

Experimentálna časť

6 Opis zariadenia

Laboratórne zariadenie (obr.5), na ktorom som vykonával merania charakteristík čerpadiel, identifikoval a riadil chemický reaktor je vyrábané firmou Armfield. Predstavuje cenovo výhodný spôsob učenia rôznych techník riadenia procesov. Použité zariadenie v nasledujúcej časti mojej práce krátko opíšem.

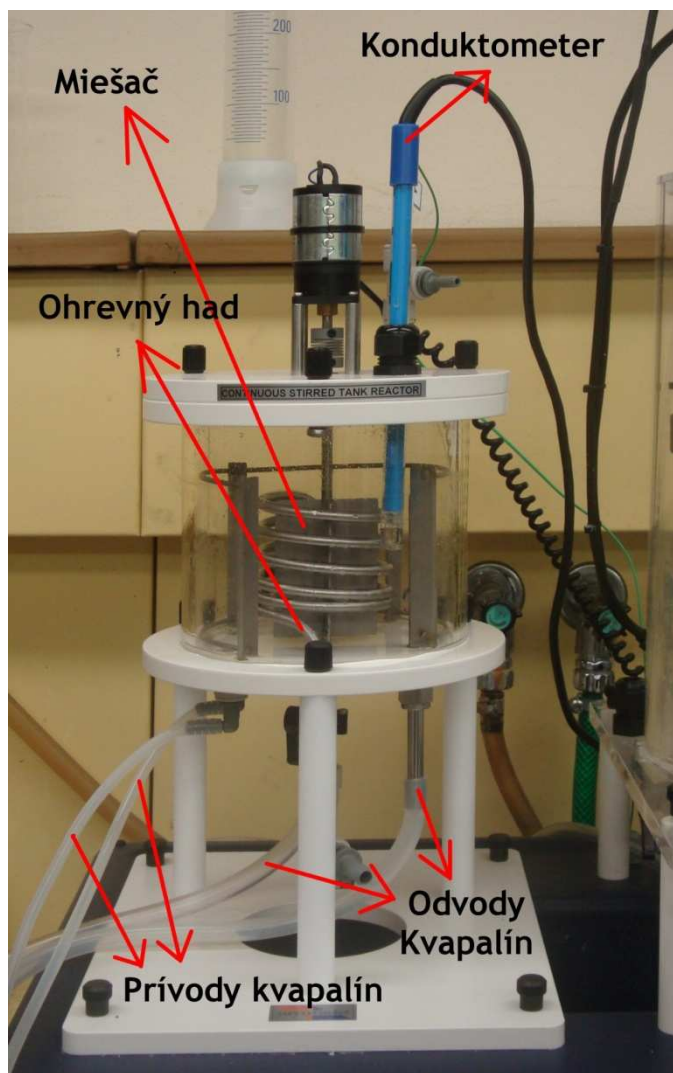


Obr.5: Čelný pohľad na zariadenie s vyznačenými hlavnými zariadeniami a peristaltickými pumpami

Samotné zariadenie sa skladá z viacerých komponentov. Primárna časť zariadenia má označenie PCT 40, je základnou časťou zariadenia a nevyhnutnou podmienkou inštalovania ďalších rozšírení zariadenia. Zariadenie PCT 40 má hmotnosť cca. 40 kg a tvorí ho predovšetkým základný masívny podstavec. Stredom podstavca vedie žliabok, do ktorého odtekajú kvapaliny z prídavných zariadení. Na jednom konci žliabka je umiestnený ventil, ktorým sa zo žliabka vypúšťa nahromadená kvapalina. Zadná strana podstavca obsahuje

konektor na privod elektrického prúdu, prúdový chránič, ktorý zabezpečuje elektrický obvod tak, aby došlo k rýchlemu odpojeniu obvodu v prípade, že dochádza k úniku aj veľmi malej časti elektrického prúdu mimo chránený obvod (napríklad pri poškodení izolácie) a sú tu umiestnené aj konektory na pripojenie vlastných senzorov zariadenia. Pravá strana podstavca obsahuje konektory na pripojenie elektronickej konzoly PCT 43. Na pravej strane prednej časti podstavca sa nachádza hlavný spínač zariadenia, tlejivka, ktorá signalizuje zapnuté zariadenie svetlom zelenej farby a USB port. V strede prednej časti sa nachádzajú dve identické peristaltické pumpy, ktoré po uvedení do prevádzky rotačnými kotúčmi vlnovitými pohybmi posúvajú kvapalinu v rúrke. Pumpa umiestnená z predného pohľadu na ľavej strane podstavca má označenie PUMP A a pumpa na pravej strane podstavca je označená PUMP B. V strede podstavca je umiestnená veľká nádoba – zásobník kvapaliny. Zásobník obsahuje snímateľnú rúrku menšieho priemeru, ktorá pri inštalácii vytvára zásobník typu rúrka v rúrke, pričom kvapalina priteká do medzirúrkového priestoru. Zásobník obsahuje centimetrovú škálu na odčítanie výšky hladiny kvapaliny. V zásobníku je tiež zabudovaný piezoelektrický tlakový senzor na meranie výšky kvapalinového stĺpca v zásobníku (L1). Jedna strana senzora je pripojená na dno zásobníka a druhá je otvorená do atmosféry. Z tlakového rozdielu sa potom určí výška vodného stĺpca kvapaliny v zásobníku. Pred zásobníkom sú taktiež nainštalované tri clonky, za pomoci ktorých môžeme určiť množstvo prietoku kvapaliny v rúrke. Všetky tri clonky sú pripojené k senzorom zmeny tlaku, ku ktorému dôjde pri prúdení kvapaliny cez zúžené miesto potrubia – clonku. Clonky pripojené k tlakovým senzorom P1 a P2 majú v priemere 1,9 milimetra a slúžia na meranie malých hodnôt prietoku, ktoré sú používané pri práci s prídavným zariadením PCT 41. Clonka pripojená k tlakovému senzoru P3 má v priemere 3,9 milimetra a slúži na meranie väčších hodnôt prietoku, ktoré sa používajú pri práci so základným zariadením PCT 40. Vpravo od veľkého zásobníka kvapaliny je umiestnená malá nádoba - nádrž na teplú kvapalinu. Zohrievanie kvapaliny v nádrži je vykonávané prostredníctvom elektricky ohrievaného ohrevného hada z nehrdzavejúcej ocele, ktorý je súčasťou nádrže. Nádrž obsahuje taktiež termostat, ktorý zabráni prehriatiu kvapaliny, ak je dosiahnutá kritická teplota a senzor, ktorý sníma výšku hladiny ohrievanej kvapaliny. Senzor tiež bráni ohrievaniu, ak nie je dosiahnutá určitá minimálna výška hladiny ohrievanej kvapaliny v nádrži. Teplota tekutiny, ktorá prichádza a odchádza z malej nádrže, je meraná za pomoci dvoch senzorov teploty (T2 a T3). Teplota tekutiny v nádrži je meraná pomocou teplotného senzora T1. Pred nádržou na teplú kvapalinu sú sériovo zapojené nasledovné zariadenia: solenoidné čerpadlo (PSV), pomocou ktorého sa dá regulovať vstupný prietok kvapaliny, turbínový prietokomer (F1), ktorý má rozsah

merania od 0,0 do 1,5 litra za minútu a tlakový regulátor (PSV), ktorý je napojený na externý prívod vody. Medzi zásobníkom kvapaliny a nádržou pre teplú vodu sa nachádza pumpa, poháňaná DC motorom (využíva jednosmerný prúd). Pumpa sa používa na čerpanie teplej vody.



Obr. 6: Popis prietokového chemického reaktora v zariadení PCT 41

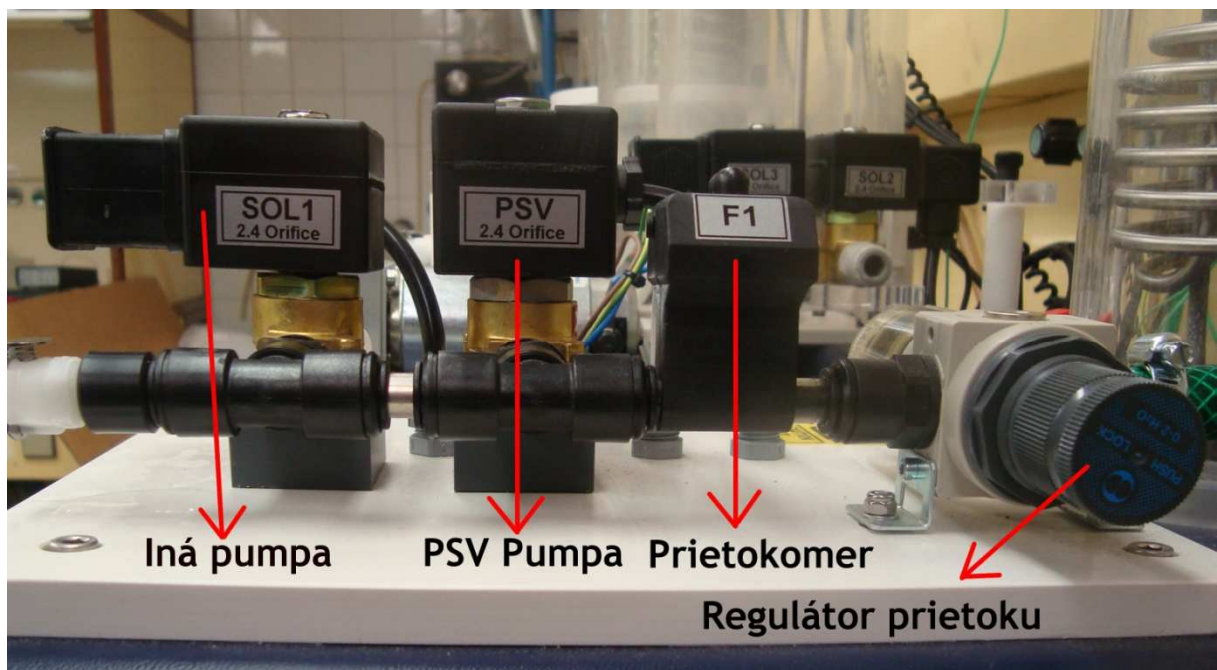
Prídavné zariadenie PCT 41 (obr.6) rozširuje základné zariadenie PCT 40 o prietokový chemický reaktor, ktorý sa inštaluje na základnú dosku na ľavej strane od ústredného zásobníka kvapaliny a má hmotnosť cca 8 kilogramov. Reaktor obsahuje miešadlo, špirálu na ohrev alebo chladenie reakčnej zmesi a snímač vodivosti.

K prídavnému zariadeniu PCT 41 je pripojený senzor teploty T4, pomocou ktorého sa meria teplota kvapaliny v reaktore. K základnej doske PCT 40 sa dá pripojiť cez už zmieňované konektory aj ďalšie prídavné zariadenie PCT 43. Ide o elektronickú konzolu,

pomocou ktorej sa dajú ovládať procesy, vykonávané na zariadeniach PCT 40 a PCT41. Konzola sa používa k priamemu elektronickému ovládaniu zariadení namiesto externého počítača a má hmotnosť cca. 10 kilogramov. Konzola obsahuje prvky na riadenie čerpadiel, ventilov a ohrievača a displej na zobrazenie dát zo senzorov. V konzole je taktiež zabudovaný PID regulátor. Používanie tejto konzoly umožňuje aj zobrazovanie dát zo senzorov na externom počítači (pomocou USB pripojenia), ale samotná regulácia sa realizuje cez hardvér zariadenia PCT 43 a nie cez softvér počítača. Elektronickú konzolu som počas svojich meraní nevyužíval, na získavanie dát som využíval prepojenie zariadenia s externým počítačom a všetky potrebné operácie som vykonával pomocou počítačového programu SIMULINK, čo je rozširujúca platforma programu MATLAB.

7 Zostrojenie charakteristík čerpadiel

7.1 Charakteristika čerpadla PSV

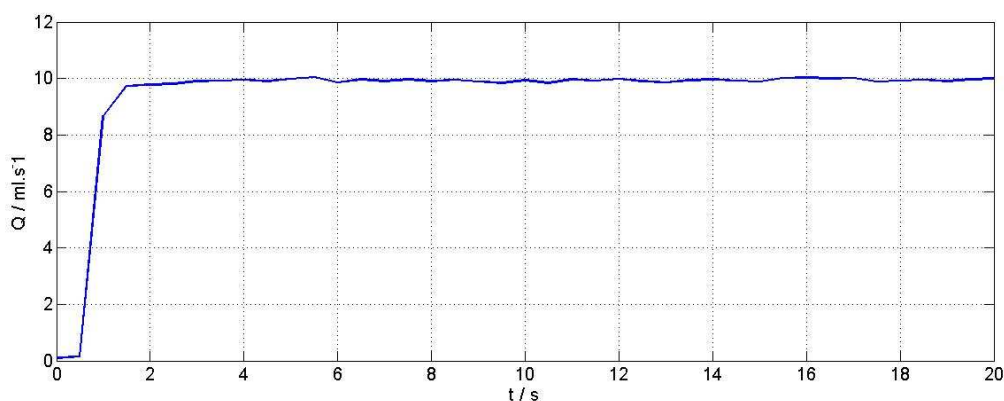


Obr.7: Pohľad na PSV Pumpu z pravej strany zariadenia

Po oboznámení sa s chodom zariadenia sa javilo ako prvotná úloha za pomoci odčítaných a nameraných hodnôt prietoku vody cez čerpadlo označované v anglickom originálnom manuáli k zariadeniu ako PSV Valve (Proportioning Solenoid Valve, obr.7)

zostrojiť charakteristiku tohto čerpadla, čo znamená, že som zostrojil závislosť objemového prietoku $\dot{Q}$ od pootvorenia regulačného ventilu v pumpe.

Šlo o pumpu, ktorá bola pri práci používaná k čerpaniu vody do chemického reaktora. Regulátor vstupného prietoku čerpadla musel byť vždy nastavený v konštantnej pozícii a preto bolo dôležité venovať jeho nastaveniu osobitnú pozornosť. Iavný regulátor totiž určuje veľkosť maximálneho prietoku vody vpustenej do ďalších zariadení. Pokyny na zmenu pootvorenia ventilu v pumpe PSV som vydával za pomoci počítačovej platformy SIMULINK. Pre rôzne hodnoty uvoľnenia regulačného ventilu v pumpe (100% otvorenie znamenalo maximálny možný prietok) som odčítaval ustálený prietok pomocou senzora F1, ktorého grafický výstup som získal v programe MATLAB (obr.8) a taktiež som kalibroval prietokomer priamou metódou merania pretečeného objemu za čas pomocou odmerného valca a stopiek. Namerané hodnoty prietoku som zhrnul do tab.5.



Obr.8: Grafické zobrazenie prietoku vody čerpanej pumpou PSV v MATLABe

Tab. 5: Namerané hodnoty prietoku pri rôznych hodnotách pootvorenia regulačného ventilu PSV pumpy získane z grafického výstupu v MATLABe

Pootvorenie ventilu / %	Q / $ml. s^{-1}$
50	3,67
55	5,62
60	7,25
65	8,48
70	9,97
75	10,47
80	10,92
85	11,26
90	11,55
95	11,80
100	11,89

Pri empirickom zisťovaní objemového prietoku som zvolil ten postup, že pre každú inú hodnotu pootvorenia regulačného ventilu bol päťkrát zmeraný čas, za ktorý do odmerného valca pretiekol ten istý objem vody. Časy, za ktoré sa odmerný valec naplnil vodou po určitý objem pre každé pootvorenie ventilu sa nikdy od seba významne nelíšili a preto považujem dátový súbor skladajúci sa z piatich meraní za dostatočný. Z týchto piatich časových údajov som vypočítal priemerný čas ($\bar{t}$) a ním som podľa vzorca

$$\dot{Q} = \frac{V}{\bar{t}} \quad (21)$$

vypočítal empiricky stanovený prietok. Napríklad pre pootvorenie regulačného ventilu pre pumpu PSV na 65 % uvádzam namerané údaje v tab.6 a výpočet prietoku vo vzorci 22. Všetky namerané hodnoty prietoku zistené empiricky pre rôzne hodnoty pootvorenia ventilu som zhrnul do tab.7.

Tab. 6: Namerané hodnoty časových intervalov, počas ktorých pumpa PSV prečerpala do odmerného valca 100 ml vody

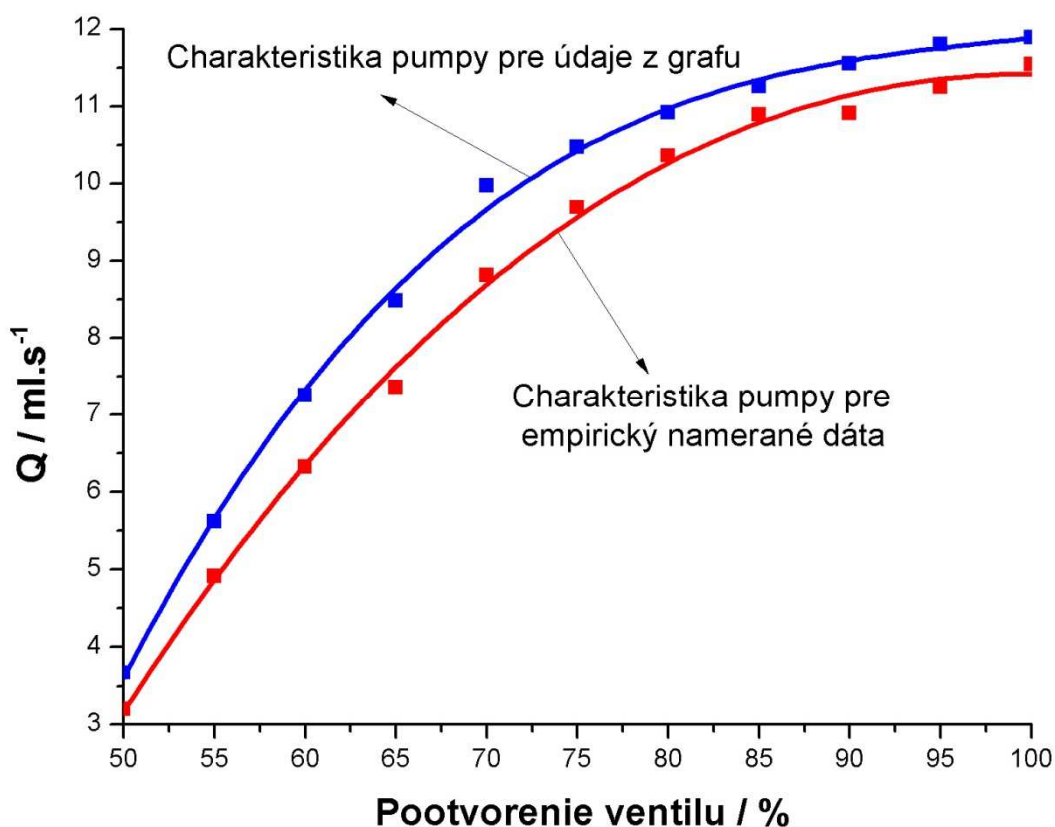
Pootvorenie = 65 %	t_1/s	t_2/s	t_3/s	t_4/s	t_5/s	$\bar{t}/s$	V/ml
	13,85	13,52	13,64	13,49	13,45	13,59	100

$$Q_{exp} = \frac{V}{\bar{t}} = \frac{100 \text{ ml}}{13,59s} = 7,360 \text{ ml} \cdot s^{-1} \quad (22)$$

Tab. 7: Namerané hodnoty prietoku pri rôznych hodnotách pootvorenia regulačného ventilu PSV pumpy získane empiricky pomocou odmerného valca a stopiek

Pootvorenie ventilu / %	$Q / \text{ml} \cdot s^{-1}$
50	3,20
55	4,91
60	6,32
65	7,36
70	8,81
75	9,69
80	10,36
85	10,89
90	10,91
95	11,25
100	11,54

Na tomto mieste je potrebné poznamenať, že použité čerpadlo začalo prečerpávať vodu vždy až po tom, čo bolo otvorenie regulačného ventilu nastavené na hodnotu minimálne 50 %, preto aj zostrojená charakteristika čerpadla začína na horizontálnej osi od tejto hodnoty. Závislosť objemového prietoku vody od pootvorenia ventilu som zostrojil pre dáta odčítané z grafu, ako aj pre dáta získané empiricky. Namerané dáta prietoku pre rôzne pootvorenie ventilu som aproximoval polynómom tretieho stupňa. Výsledné charakteristiky sú zachytené na obr. 9.



Obr.9: Charakteristika čerpadla PSV

Hodnoty prietoku odčítané za pomoci MATLABu a hodnoty empiricky stanovené sa trochu líšia, vzniknutú odchýlku pripisujem drobným nepresnostiam meracieho člena zariadenia. Rovnica funkčnej závislosti prietoku od pootvorenia ventilu pre údaje z grafu má tvar

$$y = -48,07921 + 1,76059x - 0,01747x^2 + 5,85 \cdot 10^{-5}x^3 \quad (23)$$

Rovnica pre empiricky namerané dáta

$$y = -28,11361 + 0,92043x - 6,54 \cdot 10^{-3}x^2 + 1,29 \cdot 10^{-5}x^3 \quad (24)$$

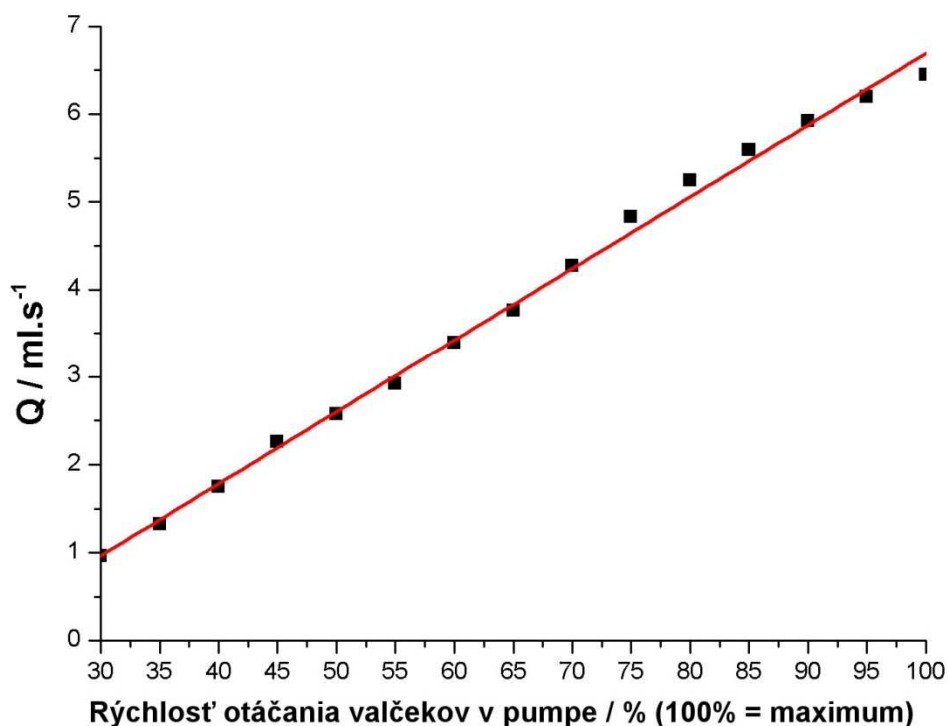
V ďalšej časti mojej bakalárskej práce som na prepočet prietoku v závislosti od pootvorenia ventilu cez pumpu PSV používal len rovnicu získanú z hodnôt odčítaných z grafu.

7.2 Charakteristika peristaltického čerpadla

Charakteristika čerpadla pre peristaltickú pumpu, ktorá v anglickom manuáli nesie názov PUMP A (vid'. obr. 5.) bola určená už len za pomoci odmerného valca, pretože sa k tejto pumpke neviaže žiaden prietokomer. V riadiacej schéme som menil rýchlosť pohybu valčekov v pumpke, ktorých pohyb dodával kvapaline značnú kinetickú energiu a posúval vodu v hadičke smerom od pumpy. Práve kvôli pohybu valčekov v pumpke dostala táto pumpa prívlastok peristaltická. Názov pumpy je odvodený od vlnovitého pohybu stien tráviacich orgánov v ľudskom tele, ktorý slúži na posúvanie ich obsahu. Táto pumpa začala prečerpávať kvapalinu už pri 30 % z maximálnej rýchlosti otáčania valčekov. Namerané údaje prietoku pre rôzne rýchlosti otáčania valčekov v peristaltickej pumpke sú uvedené v tab. 8. Charakteristika čerpadla je na obr. 10.

Tab. 8: Namerané hodnoty Prietoku pri rôznych hodnotách rýchlosti otáčania valčekov v peristaltickej pumpke

Rýchlosť otáčania valčekov / %	$Q / ml.s^{-1}$
30	0,96
35	1,32
40	1,75
45	2,26
50	2,57
55	2,92
60	3,39
65	3,76
70	4,27
75	4,83
80	5,25
85	5,59
90	5,92
95	6,20
100	6,45



Obr.10: Charakteristika peristaltického čerpadla (PUMP A)

Ako zreteľne vyplýva z obr. 10, závislosť prietoku od rýchlosti otáčok valčiekov v peristaltickom čerpadle je lineárna, po spracovaní metódou najmenších štvorcov nadobúda závislosť tvar

$$y = -1,49231 + 0,08187x \quad (25)$$

Hodnota korelačného koeficientu pre danú lineárnu závislosť je 0,99591.

8 Identifikácia systému

Po úspešnom zvládnutí vykreslenia charakteristík oboch čerpadiel som pristúpil k samotnej identifikácii procesu podľa Strejca, ktorej princíp som opísal v teoretickej časti tejto práce. Ostáva len doplniť, že použité vstupné veličiny boli dve: prietok kvapaliny cez pumpu PSV a prietok kvapaliny cez pumpu A. Výstupná veličina, ktorej odozva na jednotkovú skokovú zmenu jedného zo vstupných prúdov použitých kvapalín bola

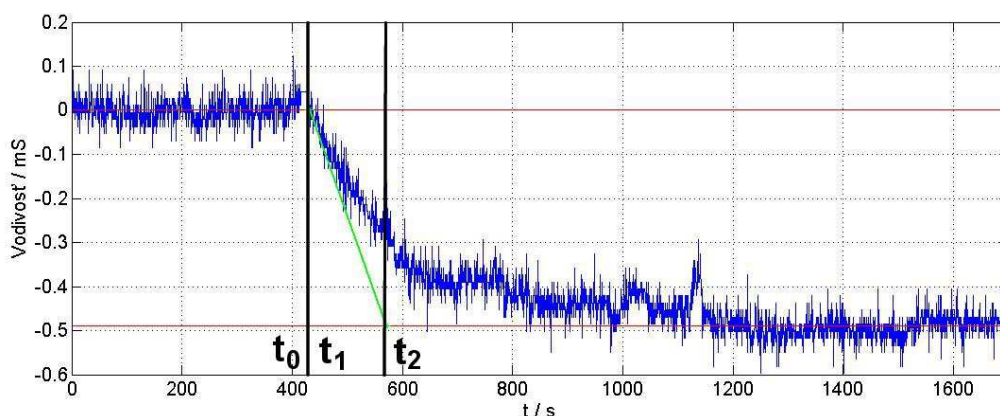
predmetom merania, bola elektrická vodivosť, ktorú snímал senzor, ktorý sa nachádza v hornej časti chemického reaktora (vid'. obr.6).

Skôr, ako som pristúpil k samotnej identifikácii, bolo ešte potrebné určiť kvapaliny, ktoré budú cez jednotlivé pumpy čerpané. V prípade pumpy PSV to bola voda, ktorá bola čerpaná z vodovodnej siete, v prípade pumpy PUMP A som použil vodný roztok chloridu sodného. V kanistri o objeme 20 litrov vody som rozpustil 250 ml soli. Soľ ktorú som používal bola obyčajná kuchynská soľ „Prešovská soľ jódovaná“, ktorá uvádzala na štítku svoje základné chemické zloženie (NaCl minimálne 99,50%), ktoré som však pre potreby tejto práce zaokrúhlil na 100%. Výpočet koncentrácie soli v roztoku

$$c = \frac{n}{V} = \frac{\frac{m}{M}}{V} = \frac{\frac{295 \text{ g}}{58,443 \text{ g.mol}^{-1}}}{20 \text{ dm}^3} = 0,252 \text{ mol.dm}^{-3} \quad (26)$$

8.1 Postup identifikácie

Pred samotnou identifikáciou som nastavil prietok soľného roztoku na konštantnú hodnotu – na hodnotu 50 % percent maximálnej hodnoty prietoku. Relatívne malý prietok soľného roztoku som zvolil preto, aby zo soľného roztoku, ktorý som pred každým meraním pripravil, neubúdalo príliš rýchlo. Počkal som, kým sa chemický reaktor naplnil soľným roztokom a v čase ktorý som si zaznačil som za ustáleného stavu skokovo zvýšil alebo znížil prietok vody cez pumpu PSV, čo malo za následok zvýšenie resp. zníženie vodivosti roztoku, ktorý sa za neustáleho miešania vytvoril v reaktore. Identifikáciu pre skokovú zmenu prietoku cez pumpu PSV som spravil štyrikrát. V ďalšom opíšem identifikáciu pre skokovú zmenu prietoku vody cez pumpu PSV z hodnoty 100 % na 65 % v čase 7 minút, z normovanej reálnej prechodovej charakteristiky, ako je zobrazené na obr.11.



Obr.11: Identifikácia systému prvého rádu z reálnej prechodovej charakteristiky

8.2 Výsledky identifikácie

Výsledky identifikácie som zhrnul do prehľadnej tabuľky (tab.9).

Tab. 9: Výsledky identifikácie

Čas prietahu	4 s
Čas nábehu	138,5s
Rád systému	1
Zosilnenie	-0,49
Časová konštanta	138,5s
Dopravné oneskorenie	4,001 s

Identifikovaný prenos potom nadobúda tvar

$$G(s) = \frac{Z}{(Ts+1)^n} e^{-Ds} = \frac{-0,49}{(138,5s+1)^1} e^{-4,001s} \quad (27)$$

Obdobne som postupoval pre ďalšie tri skokové zmeny, výsledné prenosy prvého a druhého rádu som určil ako priemerné prenosy zo štyroch náhradných prenosov pre každý rád a nadobudli tvar

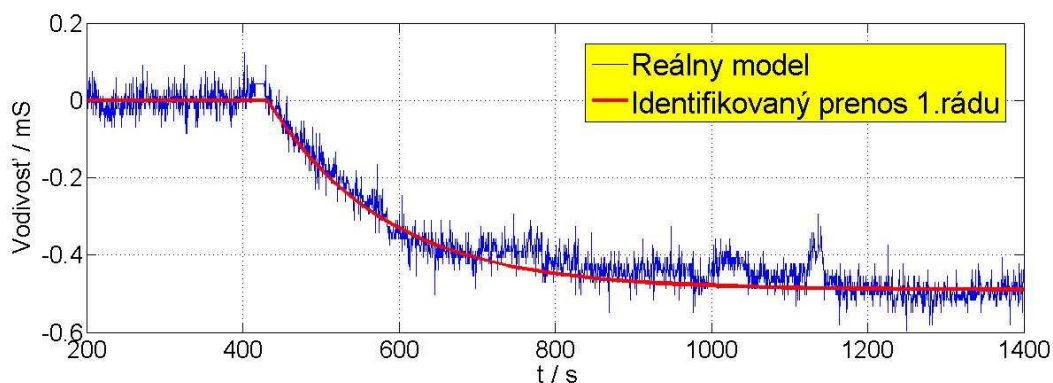
$$G_{\text{prvý rád}}(s) = \frac{-0,4267}{114,1667s+1} e^{-3,501} \quad (28)$$

$$G_{\text{druhý rád}}(s) = \frac{-0,4230}{(58,389s+1)^2} e^{-10,165s} \quad (29)$$

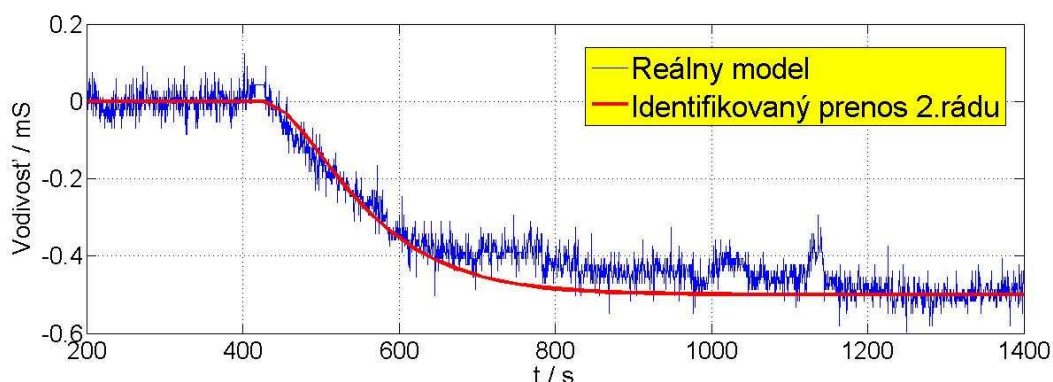
Zosilnenie bolo vždy záporné. Bolo to spôsobené tým, že pri zvýšení vstupného prietoku vody cez pumpu PSV došlo k poklesu vodivosti. Výraz (4) teda musel byť záporný. Pri znížení vstupného prietoku vody cez pumpu PSV došlo síce k zvýšeniu vodivosti a teda čitateľ zlomku na výpočet zosilnenia nadobudol kladnú hodnotu, ale nový prietok vody bol v porovnaní s prietokom pred realizáciou skokovej zmeny nižší, preto aj v tomto prípade vyšlo zosilnenie záporné.

8.3 Overenie identifikácie

Kvôli overeniu, či identifikovaný prenos dobre opisuje prebiehajúci proces, som vytvoril jednoduchú simulačnú schému a simuloval som jednotkovú skokovú zmenu v tom istom čase, v ktorom som reálne zmenil prietok vody cez pumpu PSV. Grafy výstupov reálneho procesu a simulovaného správania sa prenosu som potom spojil do jedného grafu. Pre systém prvého rádu je porovnanie uvedené na obr.12, pre systém druhého rádu na obr.13.



Obr.12: Porovnanie odozvy identifikovaného prenosu s reálnym modelom na jednotkovú skokovú zmenu pre systém prvého rádu



Obr.13: Porovnanie odozvy identifikovaného prenosu s reálnym modelom na jednotkovú skokovú zmenu pre systém druhého rádu

9 Riadenie chemického reaktora

Po úspešnej identifikácii procesu som prešiel k vlastnému riadeniu chemického reaktora. Za riadiacu veličinu som zvolil prietok vodného roztoku chloridu sodného. Druhý vstupný prúd kvapaliny do chemického reaktora bola voda. Na základe vzťahov uvedených v teoretickej časti môjho bakalárskeho projektu som navrhol 5 regulátorov pre identifikovaný systém druhého rádu, ktorých parametre uvádzam v tab. 10. Prenosy regulátorov sú v tvare (18). Navrhol som aj regulátory pre systém prvého rádu, avšak pri experimentálnom overení priebehu regulácie nebola regulácia v porovnaní s regulátormi druhého rádu dobrá, preto sa nimi ďalej nezaobrám.

Tab. 10: Určenie parametrov jednotlivých regulátorov

Metóda, typ	Z_R	T_L	T_D
Strejc, PI	-2,3641	77,8520	-
Ziegler-Nichols, PI	-12,6594	88,8011	-
Ziegler-Nichols, PID	-16,8793	53,3340	13,3335
Cohen-Coon, PI	-12,8564	65,8062	-
Cohen-Coon, PID	-19,3457	61,3637	9,4096

9.1 Postup a výsledky riadenia

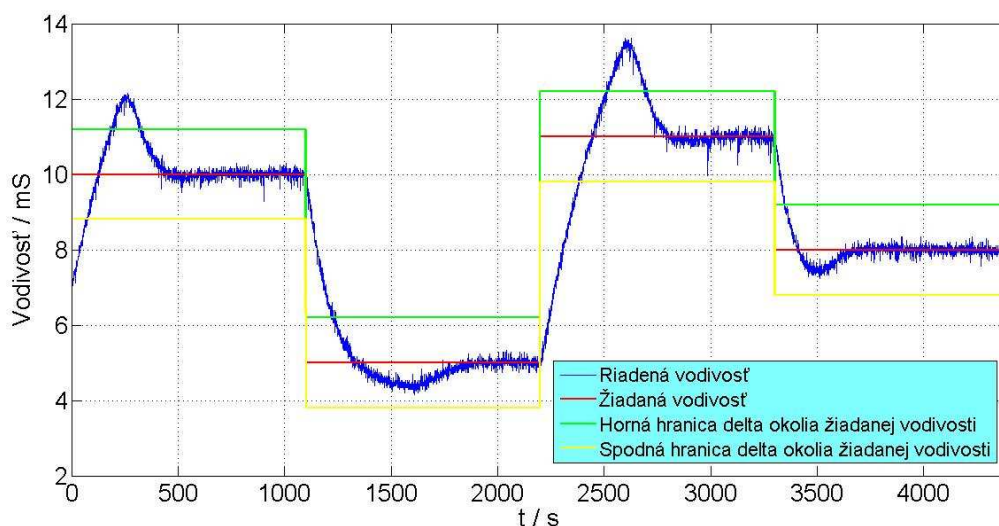
Vodivosť v chemickom reaktore som najskôr nastavil na konštantnú hodnotu 7 mS. Skokové zmeny pre regulátory boli v čase 0 s zo 7 mS na 10 mS, v čase 1100 s na hodnotu 5 mS v čase 2200 s na 11 S a v čase 3300 na hodnotu 8 mS. Kritéria kvality, ktoré som pri každom regulátore vyhodnocoval, boli maximálne preregulovanie (σ_{MAX}), čas regulácie (t_{reg}), čas maximálneho preregulovania (t_σ) a IAE. Hodnotu IAE som odčítal pre celú oblasť riadenia. Ukazovatele kvality v časovej oblasti (σ_{MAX} , t_{reg} a t_σ) som vyhodnocoval pre najväčšiu skokovú zmenu, teda pre tretiu v poradí. Delta okolie bolo $\pm 1,2$ mS. Vyhodnotenie ukazovateľov kvality pre jednotlivé regulátory uvádzam v tab.11.

Tab. 11: Vyhodnotenie ukazovateľov kvality pre jednotlivé regulátory

Regulátor	σ_{MAX} [%]	$t_{reg}[s]$	$t_{\sigma}[s]$	IAE
PI Strejc	42,50	501	401	2643,8
PI Ziegler-Nichols	55,83	551	461	2883,8
PID Ziegler-Nichols	41,08	499	410	2843,1
PI Cohen-Coon	61,63	507	436	2850,9
PID Cohen-Coon	41,25	486	403	2710,4

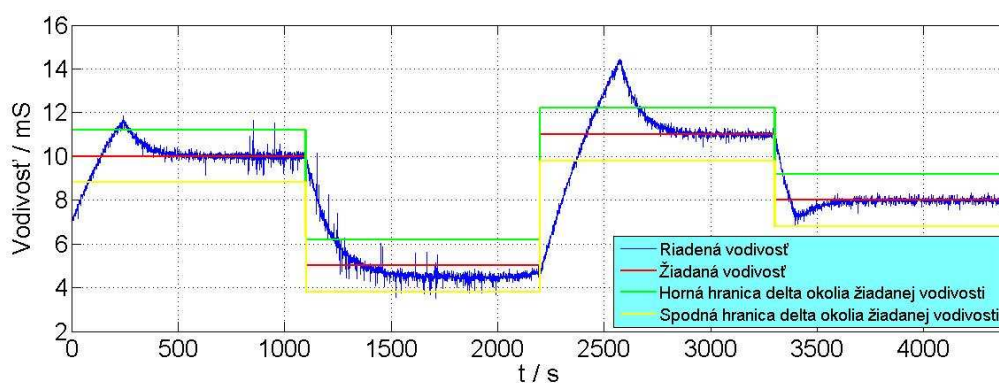
9.2 Grafické priebehy riadenia

9.2.1 PI regulátor navrhnutý podľa Strejca



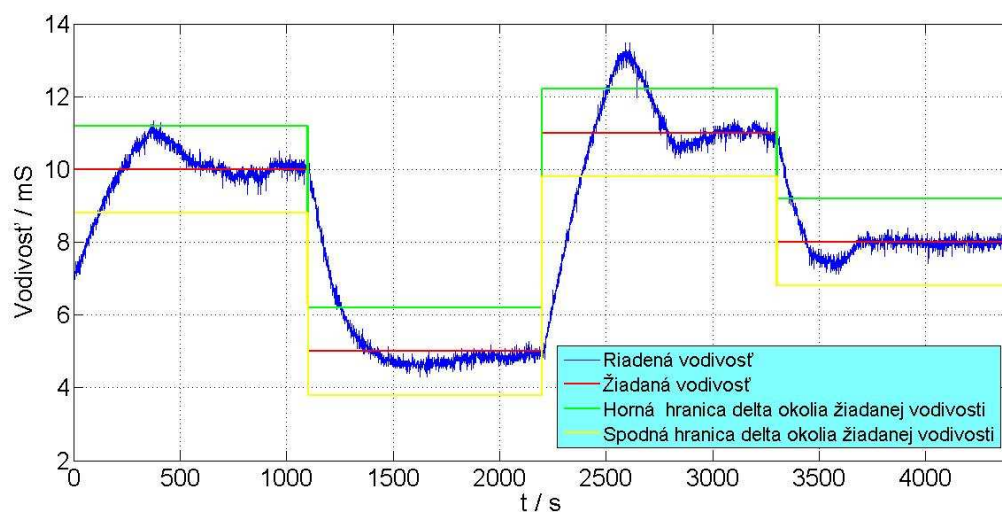
Obr.14: Riadenie vodivosti PI regulátorom, navrhnutým podľa Strejca

9.2.2 PI regulátor navrhnutý podľa Ziegler-Nicholsa



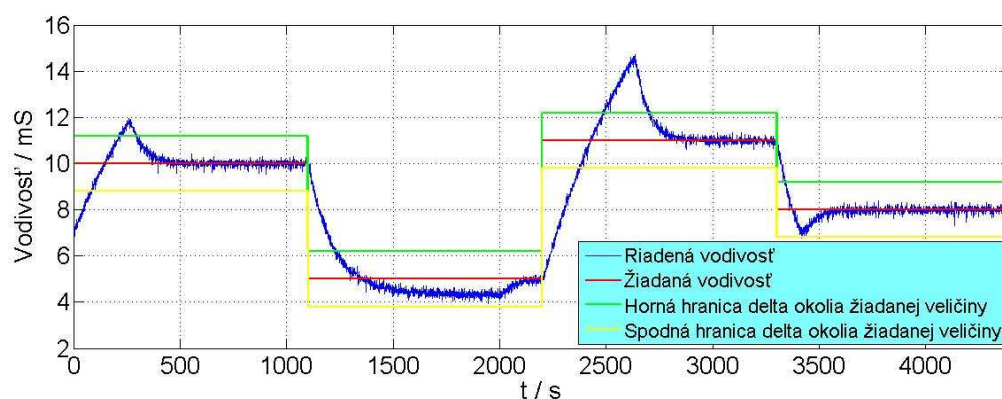
Obr.15: Riadenie vodivosti PI regulátorom, navrhnutým podľa Ziegler-Nicholsa

9.2.3 PID regulátor navrhnutý podľa Ziegler-Nicholsa



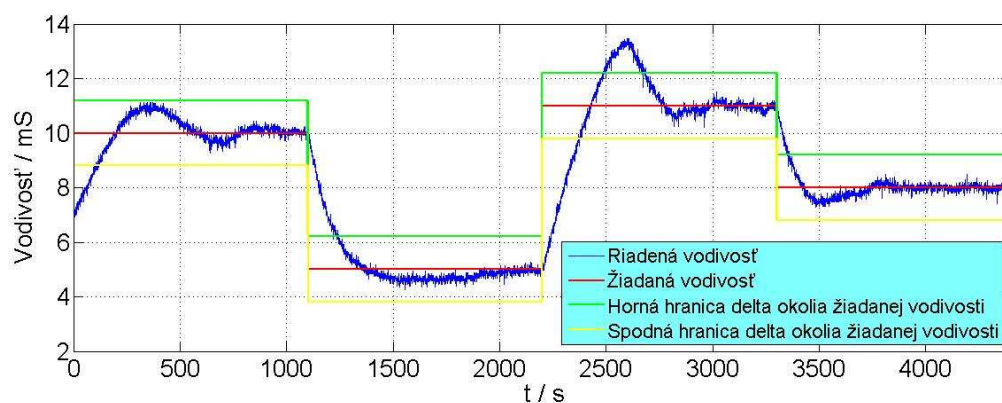
Obr.16: Riadenie vodivosti PID regulátorom, navrhnutým podľa Ziegler-Nicholsa

9.2.4 PI regulátor navrhnutý podľa Cohen-Coona



Obr.17: Riadenie vodivosti PI regulátorom, navrhnutým podľa Cohen-Coona

9.2.5 PID regulátor navrhnutý podľa Cohen-Coona



Obr.18: Riadenie vodivosti PI regulátorom, navrhnutým podľa Cohen-Coona

9.3 Výber najvhodnejšieho regulátora

Na základe ukazovateľov kvality, ktoré som zhrnul do tab.11, som za najvhodnejší vybral PI regulátor navrhnutý podľa Strejca. Kľúčovými kritériami kvality boli pre mňa čas regulácie a hodnota IAE. Ako je vidieť z údajov, PI regulátor navrhnutý podľa Strejca má síce čas regulácie o dve sekundy väčší ako PID regulátor navrhnutý podľa Ziegler-Nicholsa, no tento rozdiel považujem za minimálny. Na druhej strane, v hodnotení ukazovateľa kvality IAE je rozdiel v prospech regulátora navrhnutého podľa Strejca omnoho markantnejší. Pokiaľ som teda vyhodnotil obe kľúčové kritériá kvality komplexne, t.j. aj vo vzájomnom vzťahu týchto kritérií, javil sa mi PI regulátor navrhnutý podľa Strejca najvhodnejší pre riadenie elektrickej vodivosti použitého laboratórneho chemického reaktora.

10 Záver

Úlohou mojej bakalárskej práce bolo zostrojiť charakteristiky použitých čerpadiel, identifikovať proces miešania vodného roztoku chloridu sodného a vody podľa Strejcovej metódy a následne riadiť vodivosť vo vnútri prietokového chemického reaktora, ktorý je súčasťou zariadenia od firmy Armfield. Cieľom práce bol návrh do úvahy prichádzajúcich regulátorov a z týchto na základe kritérií kvality zvoliť najvhodnejší regulátor. K návrhu PI a PID regulátorov som využil metódy podľa Strejca, Ziegler-Nicholsa a Cohen-Coona. Za pomoci daných regulátorov navrhnutých pre systém druhého rádu som riadil vodivosť roztoku na žiadanú hodnotu pre 4 rôzne skokové zmeny. Ako najvhodnejší regulátor som zvolil PI regulátor navrhnutý podľa Strejca, ktorý síce mal čas regulácie pre najväčšiu skokovú zmenu vodivosti o zanedbateľné dve sekundy väčší, ako PID regulátor navrhnutý podľa Ziegler-Nicholsa, ale hodnotu IAE mal o 200 jednotiek menšiu ako porovnávaný PID regulátor navrhnutý podľa Ziegler-Nicholsa.

Zoznam použitej literatúry

- [1] BAKOŠOVÁ, M. - FIKAR, M.: *Riadenie procesov*. Bratislava: STU, 2008
ISBN 978-80-227-2841-6
- [2] BAKOŠOVÁ, M. - FIKAR, M. – ČIRKA, L.: *Základy automatizácie*. Bratislava: STU, 2003 ISBN 80-227-1831-9
- [3] THOMAS, B.: *Identification, Decoupling and PID-Control of Industrial Processes*. Göteborg: Chalmers University of Technology, 1990 ISBN 91-7032-525-1
- [4] MOLNÁR, A. – JAŠŠO, I.: *Chemické reaktory*. Bratislava: STU, 1990
ISBN 80-227-0313-3
- [5] FELLNER, P. et al.: *Anorganická technológia*. Bratislava: STU, 2005
ISBN 80-227-2292-8
- [6] DITL, P.: *Chemické reaktory*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000 ISBN 80-01-02207-2
- [7] BENNETT, J. et al.: *PID Tuning Via Classical Methods* [online]. Dostupné na internete:
< <https://controls.engin.umich.edu/wiki/index.php/PIDTuningClassical#Introduction> >.