

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Fakulta chemickej a potravinárskej technológie

Evidenčné číslo: FCHPT-5415-65832

Identifikácia a návrh riadenia pre laboratórny chemický reaktor

Bakalárska práca

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Fakulta chemickej a potravinárskej technológie

Evidenčné číslo: FCHPT-5415-65832

Identifikácia a návrh riadenia pre laboratórny chemický reaktor

Bakalárska práca

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

Študijný odbor: 5.2.14. automatizácia, 5.2.52. priemyselné inžinierstvo

Školiace pracovisko: Ústav informatizácie, automatizácie a matematiky

Vedúci záverečnej práce: Ing. Juraj Oravec, PhD.

Bratislava 2016

Linda Hanulová



ZADANIE BAKALÁRSKEJ PRÁCE

Študentka: **Linda Hanulová**
ID študenta: 65832
Študijný program: automatizácia, informatizácia a manažment v chémii a potravinárstve
Kombinácia študijných odborov: 5.2.14. automatizácia, 5.2.52. priemyselné inžinierstvo
Vedúci práce: Ing. Juraj Oravec, PhD.
Miesto vypracovania: FCHPT, STU

Názov práce: **Identifikácia a návrh riadenia pre laboratórny chemický reaktor**

Špecifikácia zadania:

Cieľom bakalárskej práce je identifikovať matematický model laboratórneho chemického reaktora ARMFELD PCT43 a následne navrhnúť riadenie tohto procesu. Matematický model by mal popisovať správanie sa systému s ohľadom na meniaci sa prítok reagujúcej zložky. Na základe získaného modelu sa navrhne vhodný spôsob riadenia s ohľadom na celkovú kvalitu regulácie.

Rozsah práce: 40

Zoznam odbornej literatúry:

1. Mikleš, J. – Fikar, M. *Process Modelling, Identification, and Control*. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg New York, 2007. 480 s. ISBN 978-3-540-71969-4.
2. Bakošová, M. – Fikar, M. *Riadenie procesov*. 2008. 1 s. ISBN 978-80-227-2841-6.
3. Extracts from instruction manual PCT40, Armfield, 2005.

Riešenie zadania práce od: 15. 02. 2016

Dátum odovzdania práce: 08. 05. 2016

L. S.

Linda Hanulová
študentka

prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
vedúci pracoviska

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

Ďakujem môjmu vedúcemu bakalárskej práce Ing. Jurajovi Oravcovi, PhD. za jeho ochotu a čas, všetky cenné rady, pripomienky a odborné vedenie pri písaní a koordinácii mojej bakalárskej práce.

Linda Hanulová
Bratislava, 2016

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá experimentálnou identifikáciou a návrhom riadenia laboratórneho chemického reaktora, v ktorom prebiehal proces neutralizácie kyseliny octovej a hydroxidu sodného. Riadenou veličinou je pH roztoku na výstupe z reaktora a riadiacou veličinou je objemový prietok zásady na vstupe do reaktora. Najskôr sa získal matematický model prietokového chemického reaktora s miešacím reakčnej zmesi. Keďže študovaný reaktor predstavuje komplexný nelineárny proces, tak sa identifikácia realizovala pomocou série nameraných prechodových charakteristík. Získal sa tak model v tvare prenosovej funkcie, ktorý slúžil ako východisko pri návrhu a ladení PID regulátora. Postupne boli naladené P, PI, PID a PD regulátory s ohľadom na nefiltrovaný a filtrovaný meraný signál. Kvalita riadenia bola vyhodnotená na základe viacerých kritérií kvality. Pre PID regulátor, ktorý zabezpečil najvyššiu kvalitu regulácie bola analyzovaná kvalita riadenia pre sériu skokových zmien žiadanej veličiny.

Kľúčové slová:

Návrh riadenia; identifikácia; chemický reaktor.

Abstract

This bachelor thesis is focused on the experimental identification and controller design for a laboratory chemical reactor. The controlled variable is pH-value of the output, and the control input is volumetric flow-rate of base feeding the reactor vessel. The mathematical model of continuous stirred-tank reactor was obtained. The chemical reactor represents complex system with non-linear behaviour. The system was identified using the set of step responses. The system was described in the form of transfer function. This model served to design a PID controller. Several P, PI, PID, and PD controllers were tuned subject to the filtered and non-filtered measured signal of controlled variable. The control performance was evaluated using various quality criteria. The control performances of the PID controller that ensured the best values of quality criteria were investigated subject to the set of set-point changes.

Keywords:

Controller design; identification; chemical reactor.

Obsah

Zoznam symbolov	1
Zoznam skratiek	3
Zoznam obrázkov	7
Zoznam tabuliek	9
Úvod	11
1 Teoretická časť	13
1.1 Kyselina octová	13
1.1.1 Vlastnosti kyseliny octovej	14
1.1.2 Výskyt kyseliny octovej	15
1.1.3 Biologická výroba a chemická syntéza kyseliny octovej . . .	15
1.1.4 Bezpečnosť práce s kyselinou octovou	15
1.2 Hydroxid sodný	16
1.2.1 Vlastnosti hydroxidu sodného	16
1.2.2 Príprava hydroxidu sodného	17
1.2.3 Priemyselná výroba hydroxidu sodného	18
1.2.4 Bezpečnosť práce s hydroxidom sodným	18
1.3 Uzavretý regulačný obvod	18

1.4	PID regulátory	21
1.4.1	Proporcionálna zložka	21
1.4.2	Integračná zložka	22
1.4.3	Derivačná zložka	23
1.5	Ukazovatele kvality regulácie	23
1.5.1	Časové kritériá kvality riadenia	24
1.5.2	Integrálne kritériá kvality riadenia	24
2	Experimentálna časť	27
2.1	Laboratórny chemický reaktor	27
2.1.1	Kalibrácia pH senzora	28
2.1.2	Kalibrácia púmp	29
2.2	Pracovné podmienky neutralizácie	32
2.3	Identifikácia procesu chemického reaktora	33
2.4	Riadenie chemického reaktora	39
2.5	Kvality riadenia pH	43
	Záver	61
	Literatúra	65
	Prílohy	67

Zoznam symbolov

D	dopravné oneskorenie systému
e	regulačná odchýlka
$E(s)$	regulačná odchýlka v Laplaceovej oblasti
$G(s)$	prenos
$G_F(s)$	prenos filtra
$G_p(s)$	prenos systému
$G_{pr}(s)$	prenos poruchy
$G_r(s)$	prenos regulátora
k	smernica priamky
n	rád systému
N	počet meraní
q	úsek priamky
$r(t)$	poruchová veličina v časovej oblasti
$R(s)$	poruchová veličina v Laplaceovej oblasti
s	Laplaceov operátor

t	s	čas
T		časová konštanta systému
T_D		derivačná časová konštanta PID regulátora
T_F		časová konštanta filtra
T_I		integračná časová konštanta PID regulátora
$u(t)$		vstupná veličina v časovej oblasti
$u(0)$		počiatočná hodnota vstupnej veličiny
$u(\infty)$		konečná hodnota vstupnej veličiny
$U(s)$		vstupná veličina v Laplaceovej oblasti
U	V	napätie
$\dot{V}$	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	objemový prietok
$w(t)$		žiadaná veličina v časovej oblasti
$W(s)$		žiadaná veličina v Laplaceovej oblasti
$y(t)$		počiatočná hodnota výstupu
$y(0)$		výstupná veličina v časovej oblasti
$y(\infty)$		ustálená hodnota výstupu
$Y(s)$		výstupná veličina v Laplaceovej oblasti
Z		zosilenie systému
Z_R		zosilenie regulátora

Zoznam skratiek

<i>IAE</i>	integrál absolútnych hodnôt regulačnej odchýlky
<i>ISE</i>	integrál kvadrátu regulačnej odchýlky
<i>ITAE</i>	integrál absolútnych hodnôt regulačnej odchýlky vynásobený časom
<i>PID</i>	proporcionálno-integračno-derivačný
<i>URO</i>	uzavretý regulačný obvod

Zoznam obrázkov

1.1	Kyselina octová.	14
1.2	Hydroxid sodný.	16
1.3	Bloková schéma URO.	19
1.4	Zjednodušená bloková schéma URO.	19
1.5	Časové ukazovatele kvality riadenia.	25
2.1	Chemický reaktor Armfield PCT41.	28
2.2	Kalibračná krivka pH senzora.	29
2.3	Kalibračné krivky pre pumpu A a pumpu B.	31
2.4	Zariadenie na úpravu vody	33
2.5	Namerané údaje pH pre napätie $1,5 \rightarrow 2,0$ V.	35
2.6	Namerané údaje pH pre napätie $2,0 \rightarrow 2,5$ V.	35
2.7	Namerané údaje pH pre napätie $2,5 \rightarrow 3,0$ V.	36
2.8	Namerané údaje pH pre napätie $3,0 \rightarrow 2,5$ V.	36
2.9	Namerané údaje pH pre napätie $2,5 \rightarrow 2,0$ V.	37
2.10	Namerané údaje pH pre napätie $2,0 \rightarrow 1,5$ V.	37
2.11	Porovnanie modelu s nameranými údajmi pH pre napätie $1,5 \rightarrow 2,0$ V.	40
2.12	Porovnanie modelu s nameranými údajmi pH pre napätie $2,0 \rightarrow 2,5$ V.	40
2.13	Porovnanie modelu s nameranými údajmi pH pre napätie $2,5 \rightarrow 3,0$ V.	41
2.14	Porovnanie modelu s nameranými údajmi pH pre napätie $3,0 \rightarrow 2,5$ V.	41
2.15	Porovnanie modelu s nameranými údajmi pH pre napätie $2,5 \rightarrow 2,0$ V.	42

2.16	Porovnanie modelu s nameranými údajmi pH pre napätie $2,0 \rightarrow 1,5$ V.	42
2.17	Riadenie pH pomocou P regulátora bez filtra	46
2.18	Riadenie pH pomocou P regulátora s filtrom.	46
2.19	Porovnanie kvality riadenia pH pomocou P regulátora.	47
2.20	Akčný zásah vykonaný P regulátorom	47
2.21	Riadenie pH pomocou PI regulátora bez filtra.	48
2.22	Riadenie pH pomocou PI regulátora s filtrom.	48
2.23	Porovnanie kvality riadenia pH pomocou PI regulátora.	49
2.24	Akčný zásah vykonaný PI regulátorom.	49
2.25	Riadenie pH pomocou PD regulátora bez filtra.	50
2.26	Riadenie pH pomocou PD regulátora s filtrom.	50
2.27	Porovnanie kvality riadenia pH pomocou PD regulátora.	51
2.28	Akčný zásah vykonaný PD regulátorom.	51
2.29	Riadenie pH pomocou PID regulátora bez filtra.	52
2.30	Riadenie pH pomocou PID regulátora s filtrom.	52
2.31	Porovnanie kvality riadenia pH pomocou PID regulátora.	53
2.32	Akčný zásah vykonaný PID regulátorom.	53
2.33	Riadenie z $\text{pH} = 5$ na žiadanú hodnotu $\text{pH} = 7$ pomocou PID re- gulátora s filtrom.	55
2.34	Akčný zásah vykonaný PID regulátorom s filtrom pri riadení na žiadanú hodnotu $\text{pH} = 7$	55
2.35	Riadenie z $\text{pH} = 7$ na žiadanú hodnotu $\text{pH} = 9$ pomocou PID re- gulátora s filtrom.	56
2.36	Akčný zásah vykonaný PID regulátorom s filtrom pri riadení na žiadanú hodnotu $\text{pH} = 9$	56
2.37	Riadenie z $\text{pH} = 9$ na žiadanú hodnotu $\text{pH} = 11$ pomocou PID regulátora s filtrom.	57

2.38 Akčný zásah vykonaný PID regulátorom s filtrom pri riadení na žiadanú hodnotu $\text{pH} = 11$	57
2.39 Riadenie z $\text{pH} = 11$ na žiadanú hodnotu $\text{pH} = 9$ pomocou PID regulátora s filtrom.	58
2.40 Akčný zásah vykonaný PID regulátorom s filtrom pri riadení na žiadanú hodnotu $\text{pH} = 9$	58
2.41 Riadenie z $\text{pH} = 9$ na žiadanú hodnotu $\text{pH} = 7$ pomocou PID regulátora s filtrom.	59
2.42 Akčný zásah vykonaný PID regulátorom s filtrom pri riadení na žiadanú hodnotu $\text{pH} = 7$	59
2.43 Riadenie z $\text{pH} = 7$ na žiadanú hodnotu $\text{pH} = 5$ pomocou PID regulátora s filtrom.	60
2.44 Akčný zásah vykonaný PID regulátorom s filtrom pri riadení na žiadanú hodnotu $\text{pH} = 5$	60

Zoznam tabuliek

1.1	Fyzikálne vlastnosti kyseliny octovej.	14
1.2	Fyzikálne vlastnosti hydroxidu sodného.	17
2.1	Kalibrácia pH senzora.	29
2.2	Kalibrácia púmp.	32
2.3	Parametre pre Strejcovu metódu indetifikácie.	38
2.4	Navrhnuté regulátory.	43
2.5	Vyhodnotenie kvality riadenia.	45
2.6	Vyhodnotenie kvality riadenia s navrhnutým PID regulátorom pre rôzne referencie.	54

Úvod

Chemické reaktory patria k najrozšírenejším procesom chemického, potravinárskeho, petrochemického a farmaceutického priemyslu. V chemickom reaktore dochádza k zmene surovín, reaktantov, na produkt pomocou chemickej reakcie. Každá chemická reakcia je spojená s uvoľňovaním alebo so spotrebovaním energie z okolia a preto sa jedná o riadenie komplikovaných zariadení s potenciálnymi bezpečnostnými rizikami. Ďalšími nezanedbateľnými aspektami sú celková efektivita riadenia, kvalita produkcie, spotreba energetických zdrojov, ako aj minimalizácia negatívnych dopadov na životné prostredie. Preto má veľký význam študovať možnosti riadenia chemických reaktorov.

Cieľom mojej bakalárskej práce je experimentálne identifikovať matematický model laboratórneho chemického reaktora pre proces neutralizácie pomocou nameraných prechodových charakteristík. Ďalším cieľom mojej práce je na základe identifikovaného modelu navrhnúť spätnoväzbové riadenie reaktora. Riadenou veličinou je pH roztoku na výstupe z reaktora a riadiacou veličinou je prietok zásady na vstupe do reaktora. Kvalita riadenia sa vyhodnotí graficky pomocou priebehov riadenia a analyticky pomocou viacerých ukazovateľov kvality.

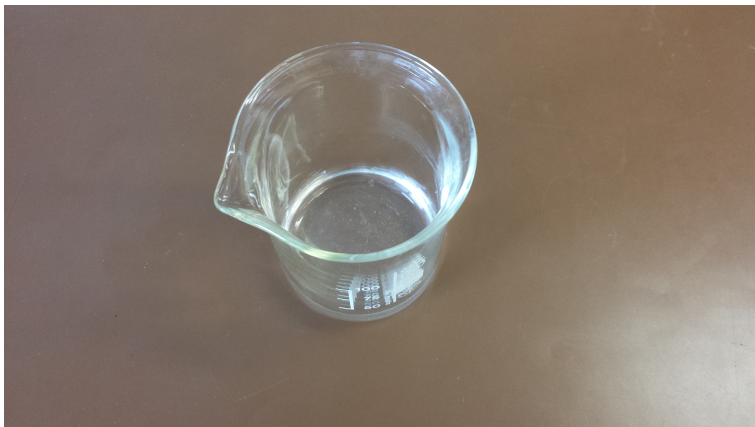
Kapitola 1

Teoretická časť

V teoretickej časti mojej bakalárskej práce sa zaoberám neutralizáciou slabej kyseliny octovej a silnej zásady – hydroxidu sodného. Uvedené sú základné vlastnosti oboch reaktantov, ich využitie, možnosti ich biologickej a chemickej syntézy, ako aj bezpečnostné aspekty. Ďalej sa v teoretickej časti svojej práce zaoberám uzavretým regulačným obvodom, vlastnosťami PID regulátorov a kritériami kvality riadenia.

1.1 Kyselina octová

Kyselina octová (CH_3COOH) je chemická zlúčenina známa svojou kyslou chuťou a štiplavou vôňou (obr. 1.1). Jej vodný roztok v koncentrácií od 5% do 8% sa predáva pod názvom *ocot*. Kyselina octová je jednou z najvýznamnejších priemyselných organických surovín. Používa sa v laboratóriu aj v chemickom priemysle ako významné rozpúšťadlo pri príprave čistých chemických zlúčenín. Priamo ako chemická surovina slúži k výrobe rady ďalších organických zlúčenín. Najvýznamnejším produktom je vinylacetát, ktorý následne slúži ako surovina (monomér) pre prípravu polyvinylacetátu. Používa sa ako tradičný prostriedok na okysľovanie a dochucovanie rôznych pokrmov, ale tiež ako konzervant zabraňujúci rastu baktérií



Obr. 1.1: Kyselina octová.

a kvasiniek.

1.1.1 Vlastnosti kyseliny octovej

Čistá bezvodá kyselina tuhne pri nižších teplotách na bezfarebnú až bielu kryštalickú látku pripomínajúcu ľad, preto sa tiež nazýva ľadová kyselina octová. Je hygroskopická, takže pohlcuje vzdušnú vlhkosť. Je leptavá a jej pary spôsobujú podráždenie očí, poleptanie sliznice, bolesť v krku a upchanie pľúc [1].

Základné fyzikálne vlastnosti kyseliny octovej sú sumarizované v tab. 1.1.

Tabuľka 1.1: Fyzikálne vlastnosti kyseliny octovej.

Vlastnosť	Hodnota	Jednotka
Molárna hmotnosť	60,05	g/mol
Teplota topenia	16,5	°C
Teplota varu	118,1	°C
Hustota (20°C)	1,049	g/cm ⁻³
Rozpustnosť vo vode	neobmedzene miešateľná	

1.1.2 Výskyt kyseliny octovej

Kyselina octová je jedným z prírodných metabolitov v živých organizmoch. Aktívnu formou je jej komplex s koenzýmom A, označovaný acetyl-CoA (acetylkoenzym A), ktorý je jedným z najdôležitejších medziproduktov bunkového metabolizmu sacharidov a tukov. Vyskytuje sa bežne v rastlinách, a tiež vo forme solí (octanov). Vo väčšom množstve je obsiahnutá v kvasnúcim ovocí, ako následný fermentačný produkt premeny sacharidov [1].

1.1.3 Biologická výroba a chemická syntéza kyseliny octovej

Zriedený roztok kyseliny octovej sa získava biologickou oxidáciou etanolu podľa nasledujúcej rovnice



Chemická syntéza kyseliny octovej prebieha hydrogenáciou oxidu uhoľnatého za prítomnosti katalyzátorov



Kyselina octová môže byť tiež pripravená reakciou oxidu uhoľnatého s metanolom:



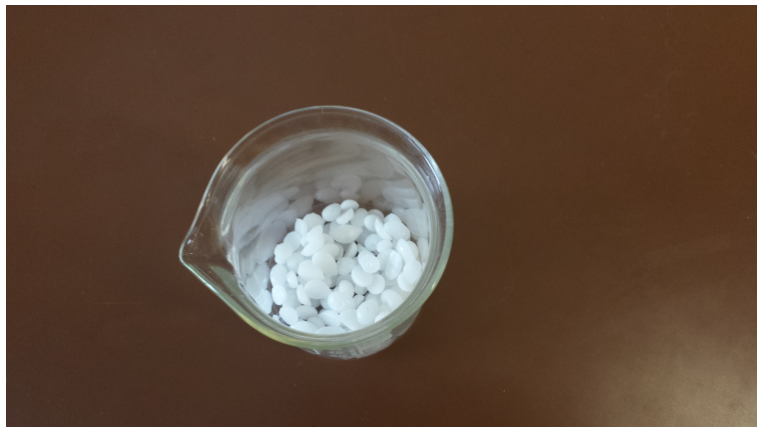
1.1.4 Bezpečnosť práce s kyselinou octovou

Bezpečnosť práce s kyselinou octovou upravujú nasledujúce R a S vety:

R-vety:

- R10: horľavá,
- R35: spôsobuje ťažké poleptanie.

S-vety:



Obr. 1.2: Hydroxid sodný.

- S1/2: uchovávať uzamknuté a mimo dosahu detí,
- S23: nevdychnúť plyn/dym/pary/aerosóly,
- S26: pri zasiahnutí očí okamžite dôkladne vypláchnite vodou a vyhľadajte lekársku pomoc,
- S45: v prípade nehody, alebo ak sa necítite dobre, okamžite vyhľadajte lekársku pomoc.

1.2 Hydroxid sodný

Hydroxid sodný (NaOH) je silná zásaditá anorganická zlúčenina (obr. 1.2). Staršie triviálne názvy tejto zlúčeniny sú: *lúh sodný*, *kaustická soľ* [1].

1.2.1 Vlastnosti hydroxidu sodného

Hydroxid sodný je silne hygroskopická, za normálnych podmienok biela pevná látka, leptajúca pokožku. Vo vodnom roztoku sa správa ako silná zásada. Pohlcuje

oxid uhličitý zo vzduchu, čím vzniká uhličitan sodný, preto sa musí uchovávať v hermetický uzavretých nádobách [1].

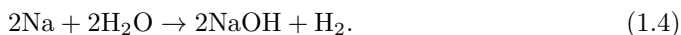
Základné fyzikálne vlastnosti hydroxidu sodného sú sumarizované v tab. 1.2.

Tabuľka 1.2: Fyzikálne vlastnosti hydroxidu sodného.

Vlastnosť	Hodnota	Jednotka
Molárna hmotnosť	39,997	g/mol
Teplota topenia	323	°C
Teplota varu	1390	°C
Hustota	2,13	g/cm ⁻³
Rozpustnosť vo vode (20°C)	1090	g/l

1.2.2 Príprava hydroxidu sodného

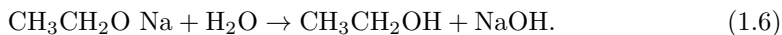
Hydroxid sodný vzniká búrlivou exotermickou reakciou kovového sodíka s vodou za vzniku plynného vodíka:



Hydroxid sodný vzniká tiež rozpúšťaním oxidu sodného vo vode:



Hydroxid sodný sa v roztoku uvoľňuje zo solí veľmi slabých kyselín. Príkladom môže byť hydrolýza alkoholátov sodných, napr. etanolátu sodného:



Hydroxid sodný vzniká v katódovom priestore pri elektrolýze vodných roztokov sodných solí, predovšetkým chloridu sodného:



1.2.3 Priemyselná výroba hydroxidu sodného

Hydroxid sodný sa vyrába elektrolytickým rozkladom roztoku chloridu sodného, pričom vedľajším produktom býva plynny chlór. Používajú sa rôzne metódy, ktorými sa zabráňuje spätnej reakcii chlóru so vzniknutým hydroxidom [1].

1.2.4 Bezpečnosť práce s hydroxidom sodným

Bezpečnosť práce s hydroxidom sodným upravujú nasledujúce R a S vety:

R-vety:

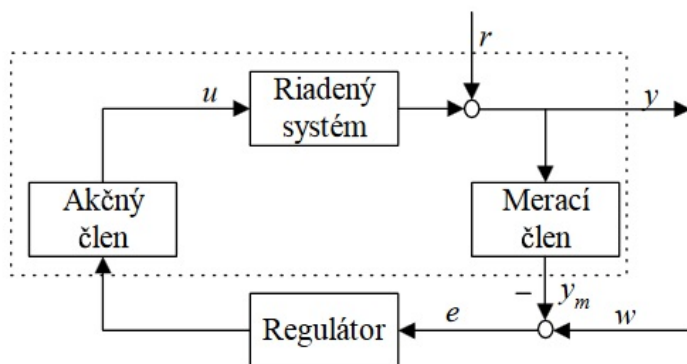
- R10: horľavá.

S-vety:

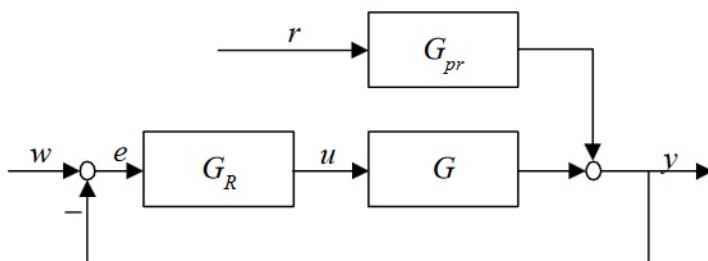
- S1/2: uchovávať uzamknuté a mimo dosahu detí,
- S26 - pri zasiahnutí očí okamžite dôkladne vypláchnite vodou a vyhľadajte lekársku pomoc,
- S37/39: noste vhodné rukavice a ochranné okuliare alebo ochranný štít,
- S45: v prípade nehody, alebo ak sa necítite dobre, okamžite vyhľadajte lekársku pomoc.

1.3 Uzavretý regulačný obvod

Všetky odvetvia priemyslu zahŕňajú množstvo procesov, ktorých správne riadenie môže pomôcť zvýšiť efektívnosť, produktivitu práce a objem výroby. Práca s technologickými procesmi môže byť častokrát pre človeka nebezpečná. Automatickým riadením možno znížiť, v niektorých prípadoch úplne eliminovať, množstvo potrebnej pracovnej sily a tým znížiť riziká spojené s prácou na pracovisku. V chemicko-technologických procesoch majú chemické reaktory nezastupiteľnú úlohu. Preto je veľmi dôležité vedieť ich správne riadiť.



Obr. 1.3: Bloková schéma URO [2].



Obr. 1.4: Zjednodušená bloková schéma URO [2].

Uzavretý regulačný obvod (URO) predstavuje efektívny spôsob spätnoväzbového riadenia. Bloková schéma tohto regulačného obvodu je na obr. 1.3, kde w predstavuje žiadanú veličinu, e predstavuje regulačnú odchýlku, r predstavuje poruchu, u je riadiaca veličina, y je riadená veličina a y_m je meraná veličina. Ak akčný a merací člen zaradíme k regulovanému procesu dostaneme zjednodušenú schému URO (obr. 1.4), kde G predstavuje prenos riadeného procesu, G_R je prenos regulátora a G_{pr} predstavuje prenos poruchy pôsobiacej na daný proces [2].

Prenos (prenosová funkcia) je podiel Laplaceovho obrazu výstupnej a vstupnej veličiny pri nulových počiatkových podmienkach [3].

V procese riadenia sa reguluje hodnota riadenej veličiny y . Informáciu o jej hodnote zisťuje merací člen. Na jeho výstupe je nameraná hodnota výstupu y_m . Údaj o hodnote riadenej veličiny spracováva regulátor vo forme regulačnej odchýlky e , teda rozdielu žiadanej w a riadenej veličiny y . Regulátor je zariadenie, ktoré vyhodnocuje regulačnú odchýlku e a na základe zákona riadenia generuje akčný signál. Tento signál ide do akčného člena, v ktorom sa vykoná zmena akčnej veličiny u . Keďže sa informácia o procese dostáva pomocou riadiaceho člena vždy späť na vstup procesu, hovoríme, že sa jedná o spätnoväzbové riadenie so zápornou spätnou väzbou [2].

Z obr. 1.3 vyplýva, že žiadaná w a poruchová veličina r reprezentujú dve vstupné veličiny URO. Preto pri opisovaní dynamických vlastností URO rozlišujeme medzi odozvou na žiadanú a poruchovú veličinu. Regulátor tak plní úlohu sledovania a regulácie [2].

Pri *úlohe sledovania* regulátor zabezpečuje čo najlepšiu konvergenciu výstupnej veličiny y k meniacej sa hodnote žiadanej veličiny w , pri nulovej poruche r .

Pri *úlohe regulácie* regulátor minimalizuje vplyv nenulovej poruchy r na výstupnú veličinu y a zaisťuje jej konvergenciu k nemeniacej sa žiadanej veličine w [3].

Pre výstupnú veličinu v Laplaceovej oblasti vyplýva z prenosovej algebry vzťah

$$Y(s) = G_{\text{pr}}(s)R(s) + G_{\text{P}}(s)G_{\text{A}}(s)G_{\text{R}}(s) (W(s) - G_{\text{m}}(s)Y(s)), \quad (1.8)$$

ktorý je možné upraviť do tvaru prenosovej funkcie

$$Y(s) = \frac{G_{\text{pr}}(s)}{1 + G_{\text{P}}(s)G_{\text{A}}(s)G_{\text{R}}(s)G_{\text{m}}(s)} R(s) + \frac{G_{\text{P}}(s)G_{\text{A}}(s)G_{\text{R}}(s)}{1 + G_{\text{P}}(s)G_{\text{A}}(s)G_{\text{R}}(s)G_{\text{m}}(s)} W(s). \quad (1.9)$$

Potom na základe (1.9) sú prenosové funkcie URO vzhľadom na poruchu a žiadanú

veličinu v tvare

$$G_{yw}(s) = \frac{G_P(s)G_A(s)G_R(s)}{1 + G_P(s)G_A(s)G_R(s)G_m(s)} \quad (1.10)$$

$$G_{yr}(s) = \frac{G_{pr}(s)}{1 + G_P(s)G_A(s)G_R(s)G_m(s)} \quad (1.11)$$

Požiadavky kladené na uzavretý regulačný obvod sú:

- stabilita – URO musí byť stabilný,
- regulácia – URO musí zabezpečiť minimalizáciu vplyvu porúch na riadený proces,
- sledovanie – URO musí zabezpečiť, aby riadená veličina sledovala žiadanú veličinu čo najrýchlejšie a najpresnejšie [2].

1.4 PID regulátory

V priemysle sa najčastejšie používajú proporcionálno - integračno - derivačné (PID) regulátory. Ich výhodou je robustnosť, efektivita a jednoduchá implementácia. PID regulátor sa skladá z proporcionálnej, integračnej a derivačnej zložky. Bežne sa používajú PID regulátory, v ktorých je vynechaná jedna (PI, PD regulátor) alebo dve zložky (P regulátor). V ďalšej časti sú podrobnejšie opísané vlastnosti jednotlivých zložiek PID regulátora.

1.4.1 Proporcionálna zložka

Proporcionálna zložka regulátora (P) závisí len od aktuálnej hodnoty rozdielu žiadanej a riadenej veličiny, teda od hodnoty regulačnej odchýlky $e(t)$.

Zákon riadenia pre P zložku je v tvare

$$u_P(t) = Z_R e(t), \quad (1.12)$$

kde Z_R je zosilnenie regulátora. Proporcionálna zložka regulátora je opísaná prenosom

$$G_{R,P}(s) = Z_R, \quad (1.13)$$

P zložka regulátora pracuje proporcionálne iba v určitom rozsahu vstupných hodnôt, lebo akčná veličina môže byť iba v rozsahu medzi $u_{\min}$ a $u_{\max}$.

Výhodou P regulátora je jeho jednoduchosť, ale jeho nevýhodou je, že nie je schopný odstrániť trvalú regulačnú odchýlku (TRO) [2].

1.4.2 Integračná zložka

Zákon riadenia pre integračnú (I) zložku je v tvare

$$u_I(t) = \frac{Z_R}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (1.14)$$

kde Z_R je zosilnenie regulátora a $T_I > 0$ je integračná časová konštanta a určuje rýchlosť zmeny akčného zásahu. Čím je hodnota T_I menšia, tým väčšie zmeny riadenia sú generované a systém sa stáva periodický. Integračná zložka rozširuje zákon riadenia o informáciu, ako sa regulačná odchýlka vyvíjala v minulosti, od začiatku riadenia do teraz.

Integračná zložka je opísaná prenosom

$$G_{R,I}(s) = \frac{Z_R}{T_I s}. \quad (1.15)$$

V spojení s P zložkou vzniká proporcionálno – integračný (PI regulátor) opísaný prenosom

$$G_R(s) = Z_R + \frac{Z_R}{T_I s}. \quad (1.16)$$

Zavedením integrátora do regulátora sa odstraňuje trvalá regulačná odchýlka tým, že sa mení akčný zásah, kým nebude trvalá regulačná odchýlka nulová [2].

1.4.3 Derivačná zložka

Zákon riadenia pre derivačnú (D) zložku je v tvare

$$u_D(t) = Z_R T_D \frac{de(t)}{dt}, \quad (1.17)$$

kde Z_R je zosilnenie regulátora a $T_D \geq 0$ je derivačná konštanta regulátora.

Derivačná zložka je opísaná prenosom

$$G_{R,D}(s) = Z_R T_D s, \quad (1.18)$$

ktorý nie je rýdzi a teda nie je fyzikálne realizovateľný. Tento problém sa prekoná tak, že sa zavedie filtrovaná D zložka regulátora s prenosom v tvare

$$G_R(s) = \frac{T_D s}{1 + \frac{T_D}{N} s}, \quad (1.19)$$

kde N je filter D zložky. Väčšinou sa nastavuje hodnota $N = 100$.

Derivačná zložka regulátora je interpretovaná ako predikcia budúceho správania sa regulačnej odchýlky na základe lineárnej interpolácie. Preto sa D zložka používa na zvýšenie tlmenia systému a tým zlepšuje stabilitu URO. Nevýhodou je citlivosť D zložky na šum merania [2].

V spojení s P zložkou regulátora vzniká proporcionálno – derivačný (PD regulátor) opísaný prenosom

$$G_R(s) = Z_R + Z_R T_D s. \quad (1.20)$$

Všetky tri zložky spolu vytvárajú PID regulátor s prenosom

$$G_R(s) = Z_R + \frac{Z_R}{T_I s} + Z_R T_D s. \quad (1.21)$$

1.5 Ukazovatele kvality regulácie

Kvalitu riadenia možno vyhodnotiť graficky, pomocou priebehov riadenej a riadiacej veličiny, ako aj analyticky, s použitím rôznych kritérií kvality. V ďalšej časti

sú podrobnejšie predstavené viaceré kritéria kvality v časovej oblasti, aj integrálne ukazovatele kvality. V experimentálnej časti svojej práce som z nameraných údajov vyhodnocovala viaceré z nich.

1.5.1 Časové kritériá kvality riadenia

V časovej oblasti možno vyhodnotiť nasledovné ukazovatele kvality riadenia (1.5):

- *Trvalá regulačná odchýlka* (TRO) – je definovaná ako rozdiel medzi žiadanou veličinou w a riadeným výstupom y v novom ustálenom stave, teda

$$e(\infty) = w(\infty) - y(\infty). \quad (1.22)$$

V prípade regulátora bez integračnej zložky je nenulová.

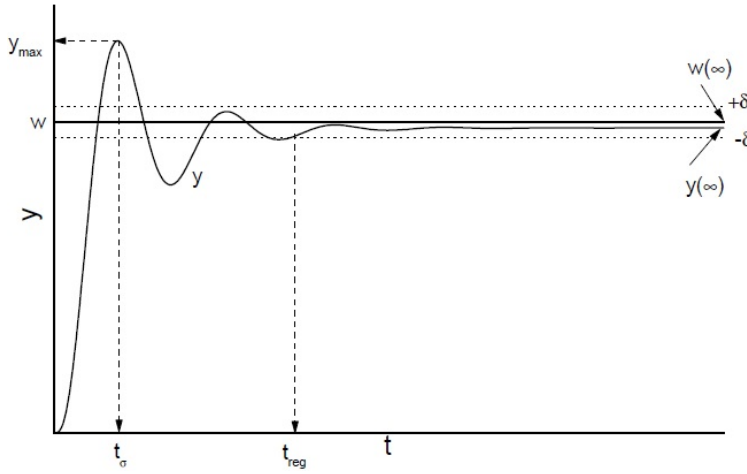
- *Maximálne preregulovanie* $\sigma_{\max}$ - udáva v percentách normovanú veľkosť maximálnej odchýlky výstupnej veličiny od jej ustálenej hodnoty. Matematicky ju vyjadruje vzťah:

$$\sigma_{\max} = \frac{y_{\max} - y(\infty)}{y(\infty) - y(0)} \times 100 \%. \quad (1.23)$$

- *Čas maximálneho preregulovania* t_{σ} – je čas, v ktorom dochádza k maximálnemu preregulovaniu.
- *Čas regulácie* t_{reg} – je čas, v ktorom sa riadená veličina natrvalo ustáli v δ -okolí žiadanej veličiny. δ - okolie vyjadruje šírku pásma tolerance so stredom v novej ustálenej hodnote výstupu. Štandardne platí, že $\delta = 1\% - 5\%$ [2].

1.5.2 Integrálne kritériá kvality riadenia

Integrálne kritéria charakterizujú priebeh regulačného pochodu na nekonečnom časovom horizonte. Pri návrhu regulátora je potom dôležité, aby jednotlivé kritériá mali čo najmenšiu hodnotu [4].



Obr. 1.5: Časové ukazovatele kvality riadenia [3].

Vo všeobecnosti možno integrálne kritéria kvality opísať v tvare

$$I_k = \int_0^{\infty} f_k(e(t)) dt, \quad (1.24)$$

kde funkcia $f_k \geq 0$ môže nadobúdať rôzne výrazy.

Medzi najpoužívanéjšie integrálne kritéria patria IAE, ISE a ITAE.

- IAE (angl.: *Integral Absolute Value of Error*)

$$I_{IAE} = \int_0^{\infty} |e(t)| dt. \quad (1.25)$$

Toto kritérium je vhodné aj pre periodické deje, pretože všetky plochy pod krivkou $e(t)$ majú kladné znamienko. Avšak, z výpočtového hľadiska nie je jednoduché ho implementovať, keďže absolútna hodnota nie je diferencovateľná.

- ITAE (angl.: *Integral of the Time Multiplied Absolute Value of Error*)

$$I_{ITAE} = \int_0^{\infty} |te(t)| dt. \quad (1.26)$$

Na rozdiel od IAE, penalizuje aj čas regulácie.

- ISE (angl.: *Integral Squared Value of Error*)

$$I_{\text{ISE}} = \int_0^{\infty} e^2(t) dt. \quad (1.27)$$

Na rozdiel od IAE, toto kritérium umožňuje analytický výpočet aj v bodoch, v ktorých regulačná odchýlka mení znamienko.

Kapitola 2

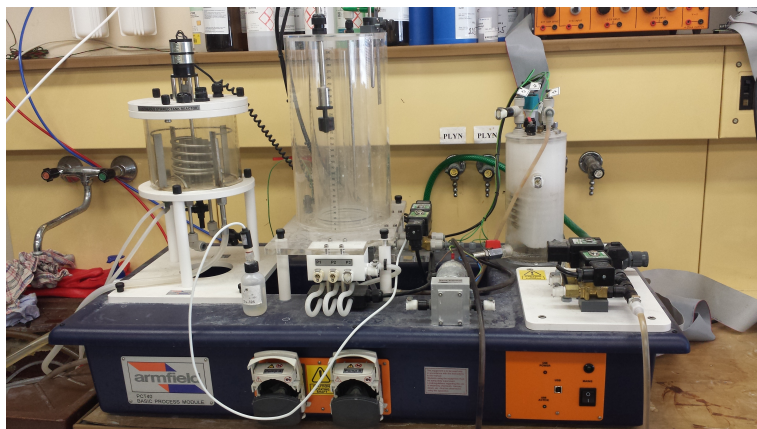
Experimentálna časť

V experimentálnej časti mojej práce sa zaoberám identifikáciou a riadením laboratórneho chemického reaktora Armfield PCT41. Spracovaná je kalibrácia pH senzora, kalibrácia obidvoch púmp, identifikácia systému pomocou série nameraných prechodových charakteristík, návrh regulácie a vyhodnotenie kvality riadenia. Postupne som na riadenie pH ladila P, PI, PID a PD regulátor s ohľadom na filtrovaný a nefiltrovaný signál nameranej hodnoty pH. Pre PID regulátor, ktorý dosiahol najlepšie hodnoty kritérií kvality som vyhodnotila kvalitu riadenia pre viaceré skokové zmeny žiadanej veličiny.

2.1 Laboratórny chemický reaktor

V mojej práci sa zaoberám identifikáciou neutralizácie prebiehajúcej v laboratórnom chemickom reaktore Armfield PCT41, pozri obr. 2.1 [5].

Základný modul PCT41 obsahuje všetko, čo je potrebné pre experimenty s jednoduchými spätnoväzbovými regulačnými obvodmi. Základné časti zariadenia sú: nosná konzola, veľká procesná nádoba, malá procesná nádoba s odporovým topením a tepelným výmenníkom, solenoidové ventily, zubové čerpadlo, peristaltické



Obr. 2.1: Chemický reaktor Armfield PCT41.

čerpadlá, reaktor s tepelným výmenníkom a s miešadlom.

2.1.1 Kalibrácia pH senzora

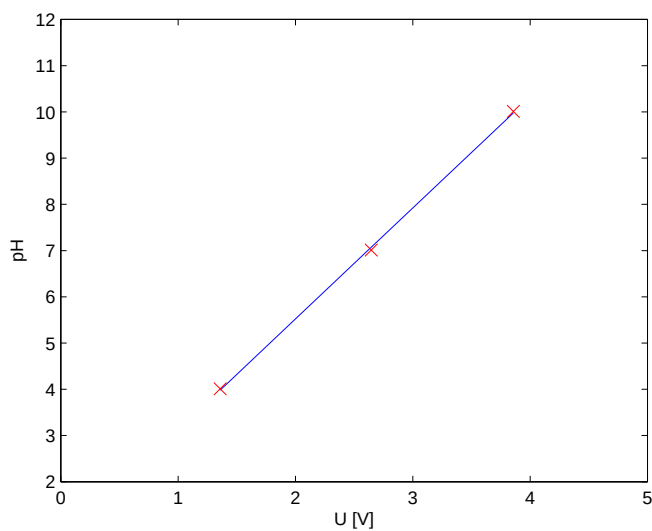
Pri riadení pH v chemickom reaktore je meracím členom pH senzor. Aby sa zabezpečila vysoká presnosť nameraných údajov pH, pred každým meraním som vykonala jeho kalibráciu.

Kalibrácia je súbor meraní, pomocou ktorých sa stanoví závislosť medzi referenčnými látkami a neznámou nameranou vzorkou. Na tieto účely som zostrojila kalibračnú krivku tejto závislosti.

Samotná kalibrácia pH senzora spočívala v tom, že som odmerala napätie na senzore, ktoré zodpovedá trom referenčných materiálom – štandardom, ktorých pH bolo 4,01, 7,01 a 10,01. Namerané údaje napätia sú spracované v tab. 2.1. Pomocou nameraných údajov napätia som zostrojila kalibračnú krivku tejto závislosti, pozri obr. 2.2. Kalibračná krivka je opísaná rovnicou priamky v tvare:

$$pH = k U + q = 2,4011U + 0,71661, \quad (2.1)$$

kde pH je stanovená hodnota pH, U je namerané napätie na pH senzore, k je



Obr. 2.2: Kalibračná krivka pH senzora.

smernica kalibračnej priamky a q je úsek kalibračnej priamky.

Na základe tejto kalibračnej krivky môžeme merať pH v chemickom reaktore pri skokovej zmene vstupného objemového prietoku zásady.

Tabuľka 2.1: Kalibrácia pH senzora.

pH	U [V]
4,01	1,371
7,01	2,645
10,01	3,865

2.1.2 Kalibrácia púmp

Pri riadení pH chemického reaktora sú možnými akčnými členmi dve pumpy, a to pumpa A, ktorá riadi prietok kyseliny octovej do chemického reaktora a pumpa B,

ktorá riadi prietok zásady, hydroxidu sodného, do reaktora. Obidve pumpy pracujú v rozsahu napätia U od 0 do 5 V.

V mojej práci sa zaoberám riadením pH pomocou meniaceho sa prietoku zásady, pričom prietok kyseliny je konštantný. Základným pracovným bodom je stav, kedy obidve pumpy privádzajú rovnaký prietok kyseliny a zásady do reaktora. Tento prietok som nastavila na polovicu celkovej kapacity prietoku pumpy B, teda 2,5 V. Aby som zabezpečila rovnaký prietok kyseliny cez pumpu A, musela som vykonať kalibráciu oboch púp.

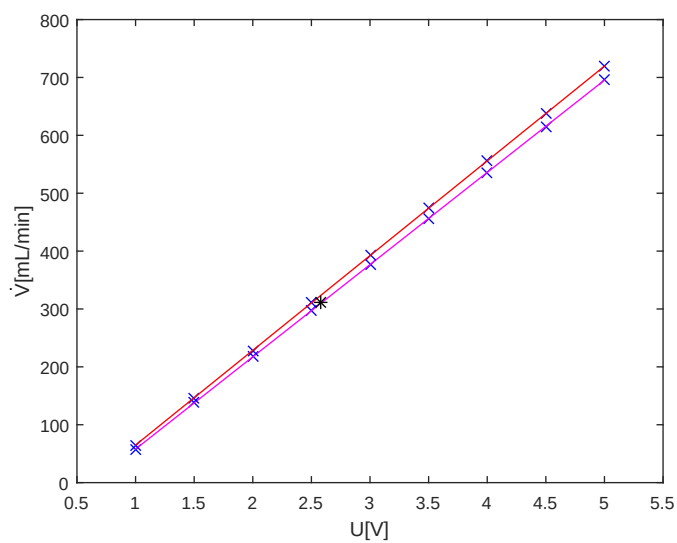
Pomocou odmerného valca som odmerala objem, ktorý pretiekol pumpami A a B za 30 s pre rôzne hodnoty napätia v rozsahu 0 až 5 V s krokom 0,5 V. Namerané hodnoty sú spracované v tab. 2.2. Namerané údaje som graficky vyhodnotila lineárnou aproximáciou založenej na metóde najmenších štvorcov v prostredí MATLAB, čím som získala nasledujúce kalibračné krivky pre pumpu A a B:

$$U_A = k_A \dot{V}_A + q_A = 79,6667 \dot{V}_A - 49,3889, \quad (2.2)$$

$$U_B = k_B \dot{V}_B + q_B = 81,8333 \dot{V}_B - 49,3889, \quad (2.3)$$

kde U_A a U_B je napätie na pumpe A a B, $\dot{V}_A$ a $\dot{V}_B$ je objemový prietok pumpou A a B, k_A a k_B sú smernice kalibračných kriviek, q_A a q_B sú úseky kalibračných kriviek. Kalibračné krivky som spracovala graficky, pozri obr. 2.3.

Z nameraných údajov (tab. 2.2) vyplýva, že požadovanému napätiu 2,5 V zodpovedá prietok 162 mL / 30 sekúnd, teda 324 mL/min. Aby som zabezpečila rovnaký prietok kyseliny a zásady som z kalibračných kriviek (obr. 2.3) dopočítala napätie na pumpe A: $U_A = 4,3173$ V. Tomuto pracovnému bodu zodpovedá čierna hviezdička na obr. 2.3.



Obr. 2.3: Kalibračné krivky pre pumpu A (fialová), pumpu B (červená), namerané údaje (modrá) a pracovný bod (čierna).

Tabuľka 2.2: Kalibrácia púmp.

U [V]	$\dot{V}_A$ [mL/30 s]	$\dot{V}_B$ [mL/30 s]
0,0	†	†
0,5	†	†
1,0	60	70
1,5	140	150
2,0	220	230
2,5	290	310
3,0	380	380
3,5	450	460
4,0	530	560
4,5	620	650
5,0	700	720

2.2 Pracovné podmienky neutralizácie

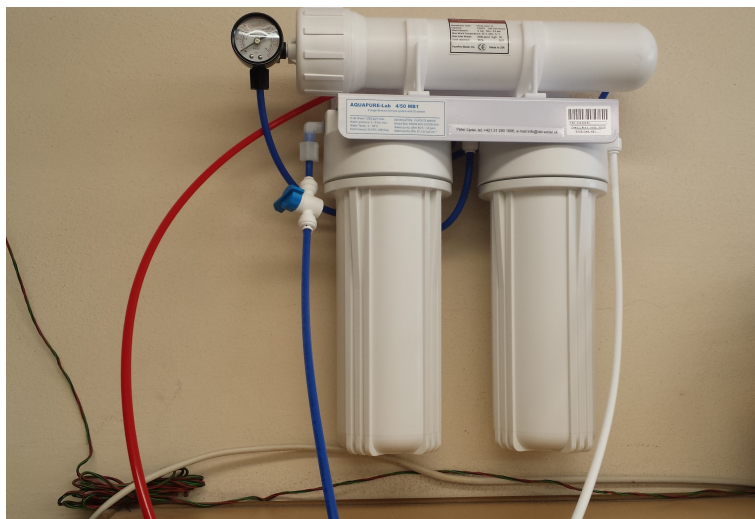
V prietokovom chemickom reaktore s miešaním reakčnej zmesi prebieha proces neutralizácie



Neutralizácia je chemická reakcia kyseliny, t.j. látky, ktorá je schopná uvoľňovať vodíkové kationy H^+ so zásadou, t.j. látky, ktorá je schopná odštiepovať anióny OH^- , za vzniku soli a vody.

Pri realizácii neutralizácie dosiahneme neutrálny charakter výsledného roztoku pri zmiešaní ekvivalentných látkových množstiev kyseliny a zásady.

Pred každým meraním som prepočítala, koľko gramov kyseliny octovej a hydroxidu sodného potrebujem navážiť do pripraveného množstva deionizovanej vody. Vychádzala som z molárnej hmotnosti kyseliny octovej a hydroxidu sodného,



Obr. 2.4: Zariadenie na prípravu deionizovanej vody AQUAPURE-Lab 4/50 MB 1.

pozri tab. 1.1, 1.2.

Molárna hmotnosť kyseliny octovej je $60,05 \text{ g/mol}$, z čoho vyplýva, že na 100 L roztoku je potrebné navážiť $60,05 \text{ g}$ kyseliny octovej. Rovnakým spôsobom som navážila množstvo hydroxidu sodného, ktorého molárna hmotnosť je $39,99 \text{ g/mol}$, a preto na 100 L roztoku je potrebných $39,99 \text{ g}$ hydroxidu sodného.

Na laboratórne účely sa používa deionizovaná voda, ktorá má omnoho vyššiu čistotu a veľmi nízku vodivosť. Prístroj, ktorý som používala na prípravu deionizovanej vody bol AQUAPURE-Lab 4/50 MB 1 (obr. 2.4).

2.3 Identifikácia procesu chemického reaktora

Cieľom môjho projektu je navrhnúť spätnoväzbové riadenie pre chemický reaktor. Pre návrh regulátora je potrebné získať model procesu vo vhodnom tvare. Na tieto účely som použila metódu identifikáciu podľa Strejca [3].

Táto metóda identifikácie stanoví parametre procesu v tvare prenosovej fun-

kcie v tvare:

$$G_s(s) = \frac{Z}{(Ts + 1)^n} e^{-Ds}, \quad (2.5)$$

kde Z je zosilnenie systému, T je časová konštanta systému, n je rád systému a D je dopravné oneskorenie systému.

Metóda identifikácie podľa Strejca je založená na spracovaní prechodových charakteristík. Preto prvým krokom k identifikácii je nameranie prechodových charakteristík.

Prechodová charakteristika je grafické zobrazenie prechodovej funkcie.

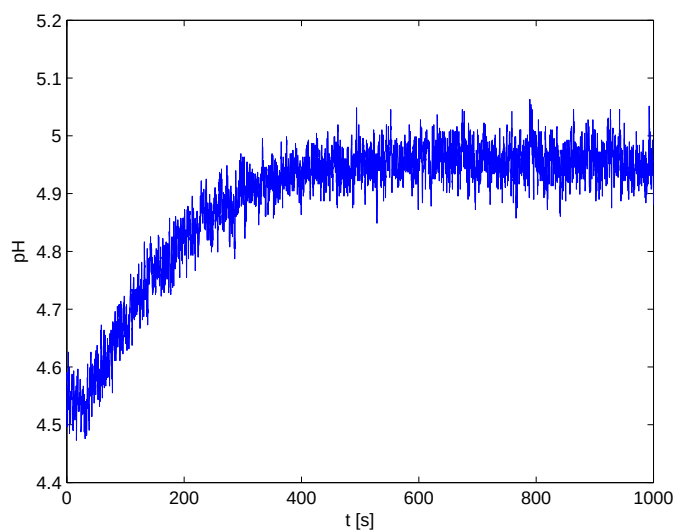
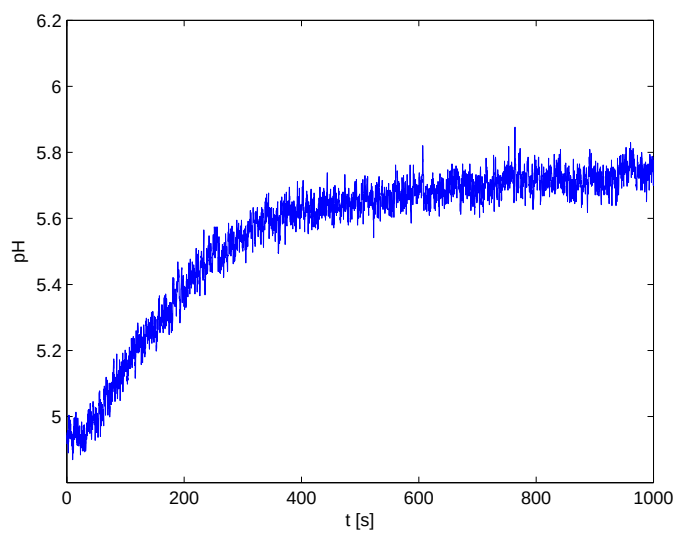
Prechodová funkcia je odozva systému na jednotkovú skokovú zmenu pri nulových začiatočných podmienkach.

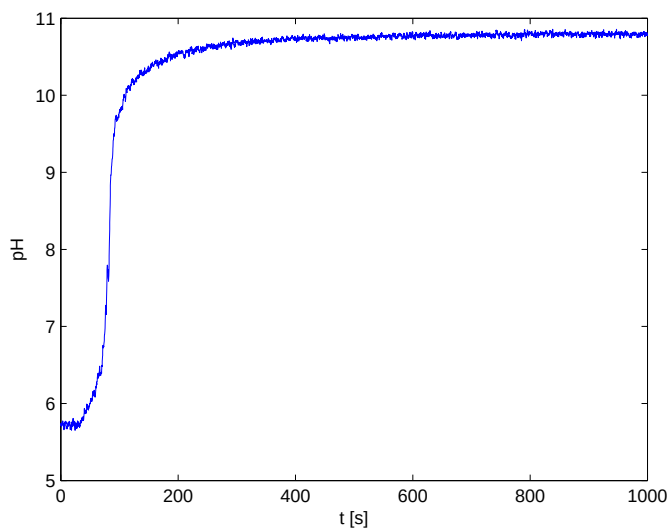
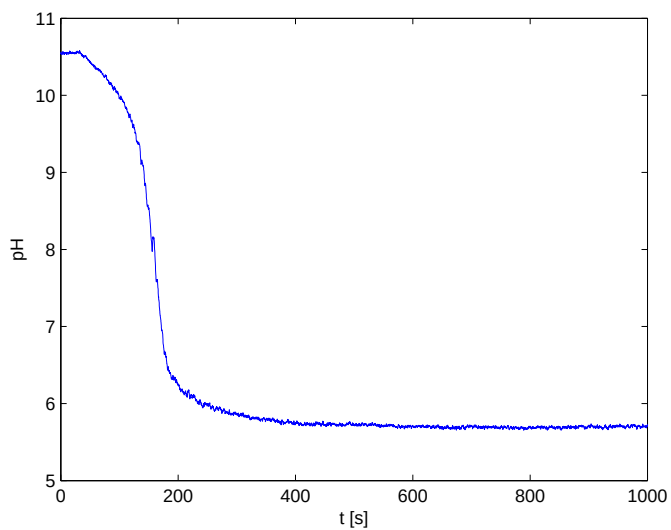
Meranou veličinou procesu je hodnota pH v reakčnej zmesi. Riadiacou alebo vstupnou veličinou je napätie na pumpe B, ktoré priamo úmerne ovplyvňuje prítok zásady do reaktora.

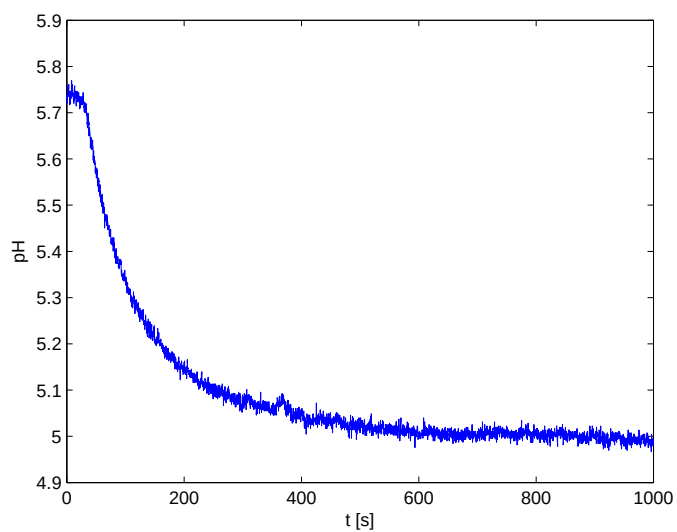
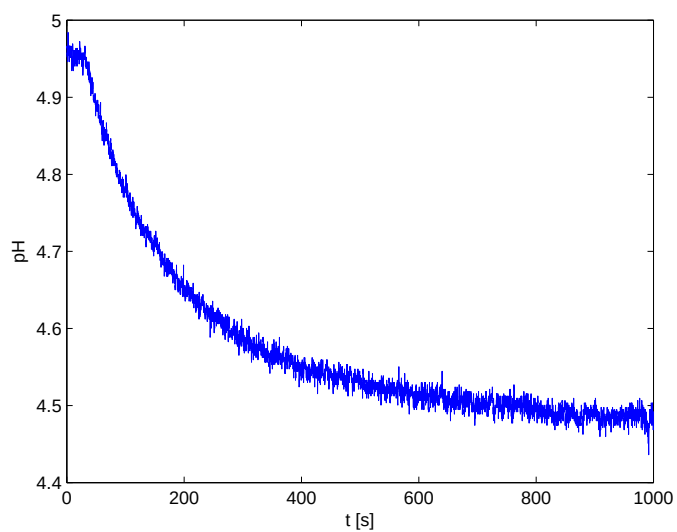
Keďže správanie sa chemickej reakcie je nelineárne, tak pre potreby identifikácie som postupne namerala šesť charakteristík systému pri rôznych podmienkach. Napätie U postupne stúpalo: $1,5 \rightarrow 2,0 \rightarrow 2,5 \rightarrow 3,0$ V a potom postupne klesalo: $3,0 \rightarrow 2,5 \rightarrow 2,0 \rightarrow 1,5$ V. Takže pri práci som robila skokové zmeny o veľkosti 0,5 V. Namerané údaje pH môžete vidieť na grafoch obr. 2.5–2.10.

Následne som namerané údaje normalizovala tak, aby som mohla identifikovať proces metódou identifikácie podľa Strejca. Najskôr bolo potrebné zabezpečiť, aby namerané údaje predstavovali odozvu systému na jednotkovú skokovú zmenu pri nulových začiatočných podmienkach. Z jednotlivých meraní som tak získala šesť prechodových charakteristík. Po normalizácii som vypočítala jednu prechodovú charakteristiku pre nominálny systém. Táto priemerná odozva systému mi slúžila na identifikáciu systému a odvodenie matematického modelu chemického reaktora.

Na nominálnej prechodovej charakteristike som určila inflexný bod a preložila som ním dotyčnicu, ktorá na rovnobežkách s časovou osou prechádzajúcimi

Obr. 2.5: Namerané údaje pH pre napätie $1,5 \rightarrow 2,0$ V.Obr. 2.6: Namerané údaje pH pre napätie $2,0 \rightarrow 2,5$ V.

Obr. 2.7: Namerané údaje pH pre napätie $2,5 \rightarrow 3,0$ V.Obr. 2.8: Namerané údaje pH pre napätie $3,0 \rightarrow 2,5$ V.

Obr. 2.9: Namerané údaje pH pre napätie $2,5 \rightarrow 2,0$ V.Obr. 2.10: Namerané údaje pH pre napätie $2,0 \rightarrow 1,5$ V.

Tabuľka 2.3: Parametre pre Strejcovu metódu indetifikácie.

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

hodnotami $y(0)$, $y(\infty)$ vymedzila časové údaje: čas prietahu t_u a čas nábehu t_n .

Z nominálnej prechodovej charakteristiky som postupne identifikovala všetky parametre prenosovej funkcie systému G_s (2.5). Najskôr som stanovila hodnotu zosilnenia.

Zosilnenie systému Z je hodnota, na ktorej sa systém ustáli pri jednotkovej skokovej zmene vstupnej veličiny pri nulových počiatočných podmienkach. Vypočíta sa ako

$$Z = \frac{y(\infty) - y(0)}{u(\infty) - u(0)} = \frac{4,972 - 0}{1 - 0} = 4,972, \quad (2.6)$$

kde hodnoty y v čase 0 a v nekonečne predstavujú normalizované hodnoty pH na začiatku merania a v ustálenom stave. Hodnoty u v nule a v nekonečne predstavujú normalizované hodnoty napätia U pred a po skokovej zmene.

Časová konštanta systému T určuje rýchlosť, s akou sa systému ustáluje. Pre systém prvého rádu, $n = 1$, predstavuje časová konštanta čas, ktorý je potrebný na to, aby výstup nadobudol 63% z hodnoty zosilnenia Z . Zo známych hodnôt času prietahu t_u a času nábehu t_n som určila pomocný parameter f_s ako podiel

$$f_s = \frac{t_u}{t_n} = \frac{8,3635}{89,2103}. \quad (2.7)$$

Pomocou parametra f_s som z tab. 2.3 určila rád systému, tak aby platilo

$$f(n) \leq f(s) < f(n+1), \quad (2.8)$$

potom $f_s = 0,0938$.

Časovú konštantu T som určila pomocou hodnoty času nábehu t_n a pomocného parametra $g(n)$ odčítaného z tab. 2.3 pre príslušnú hodnotu n :

$$T = t_n g(n) = 89,2103 \cdot 1 = 89,2103. \quad (2.9)$$

Dopravné oneskorenie predstavuje čas, za ktorý sa zmena na vstupe prejaví zmenou na výstupe. Jeho hodnotu som určila ako rozdiel medzi skutočným a fiktívnym časom nábehu t_u :

$$D = (f_s - f(n)) t_n = (0,0938 - 0) 89,2103 = 8,3635. \quad (2.10)$$

Uvedeným postupom som identifikovala chemický reaktor pomocou prenosovej funkcie (2.5) systému 1. rádu v tvare:

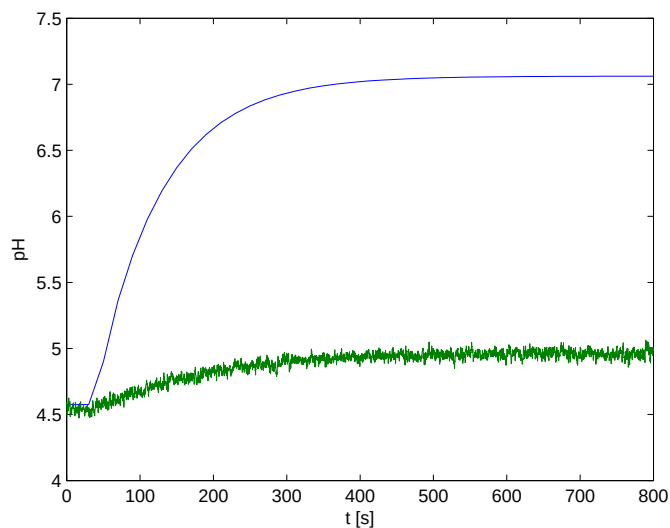
$$G(s) = \frac{4,972}{89,2103s + 1} e^{-8,3635s}. \quad (2.11)$$

Na overenie kvality identifikácie som použila validáciu získaného modelu. Výsledky môžete vidieť na grafoch obr. 2.11–2.16.

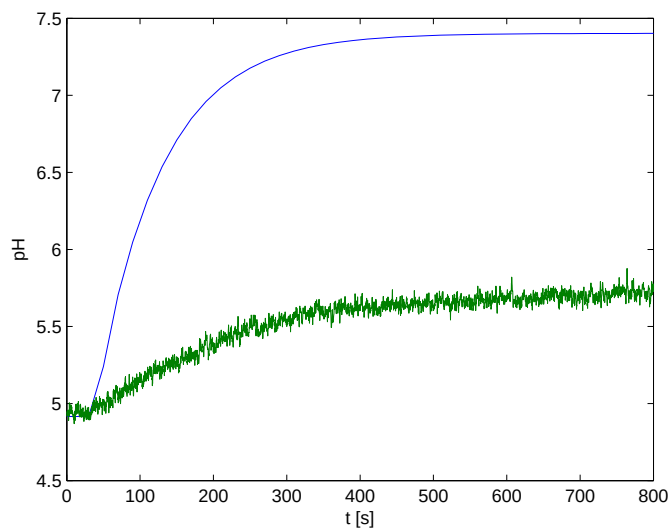
2.4 Riadenie chemického reaktora

Hlavným cieľom mojej práce bolo navrhnúť vhodný regulátor pre riadenie laboratórneho chemického reaktora. Riadenie chemického reaktora zabezpečoval jednoduchý uzavretý regulačný obvod so zápornou spätnou väzbou.

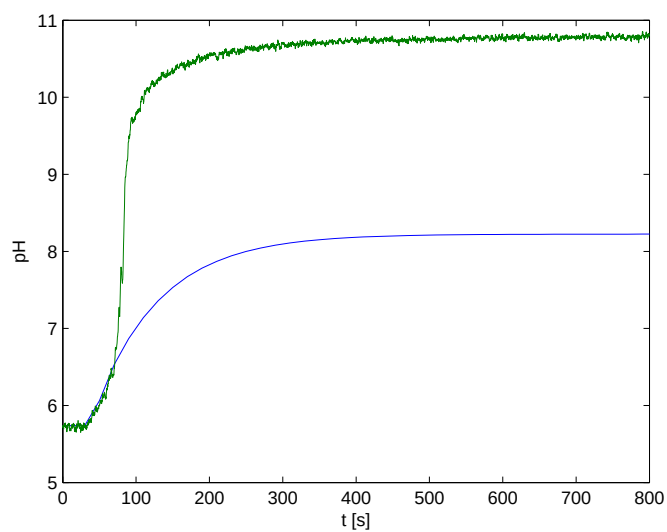
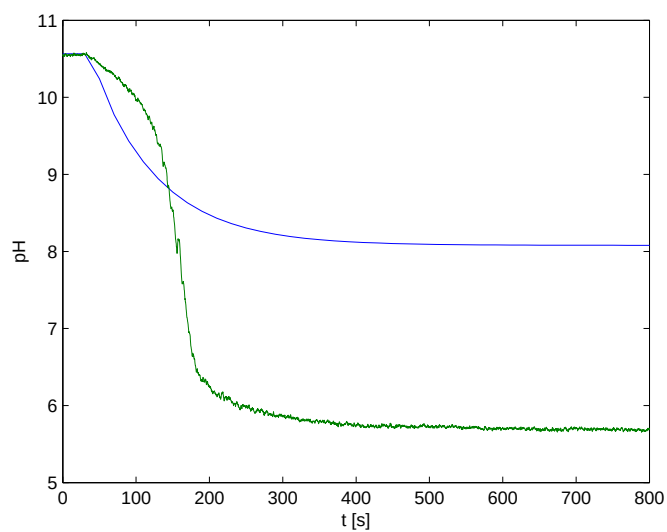
Riadiacou veličinou bolo napätie na pumpe B, ktoré určuje objemový prietok roztoku hydroxidu sodného na vstupe do reaktora. Objemový prietok vstupujúceho roztoku kyseliny octovej bol nastavený na konštantnú hodnotu zodpovedajúcu strednej hodnote prietoku zásady. Riadenou veličinou bolo pH reakčnej zmesi na výstupe z reaktora. Žiadaná veličina bola zvolená na hodnotu neutrálneho roztoku, teda $\text{pH} = 7$.

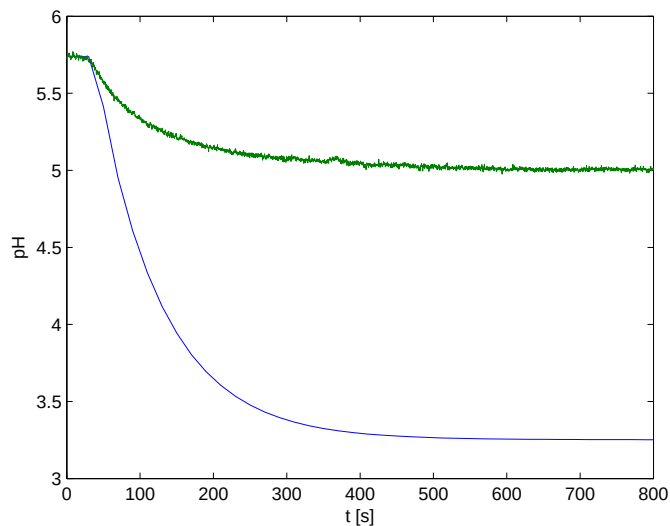


Obr. 2.11: Porovnanie modelu s nameranými údajmi pH pre napätie 1,5 $\rightarrow$ 2,0 V.

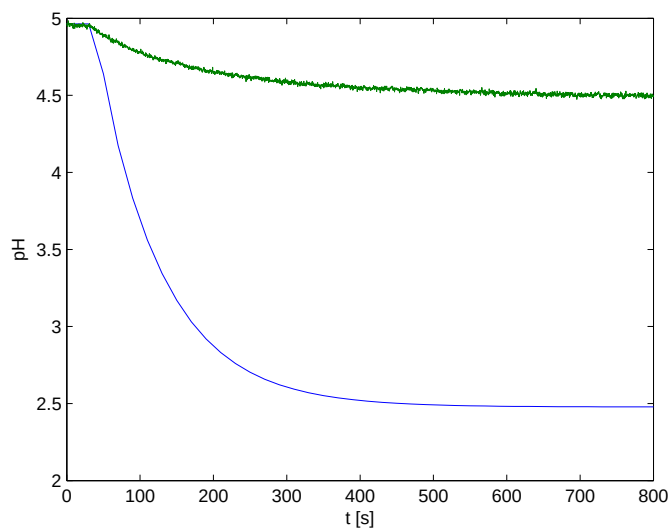


Obr. 2.12: Porovnanie modelu s nameranými údajmi pH pre napätie 2,0 $\rightarrow$ 2,5 V.

Obr. 2.13: Porovnanie modelu s nameranými údajmi pH pre napätie $2,5 \rightarrow 3,0$ V.Obr. 2.14: Porovnanie modelu s nameranými údajmi pH pre napätie $3,0 \rightarrow 2,5$ V.



Obr. 2.15: Porovnanie modelu s nameranými údajmi pH pre napätie $2,5 \rightarrow 2,0$ V.



Obr. 2.16: Porovnanie modelu s nameranými údajmi pH pre napätie $2,0 \rightarrow 1,5$ V.

Pri hľadaní vhodného regulátora na riadenie pH som systematicky postupovala od jednoduchších k zložitejším regulátorom. Najskôr som na základe identifikovaného modelu (2.11) navrhla regulátory pomocou známych experimentálnych metód. Tieto regulátory nedosahovali požadovanú kvalitu riadenia, a tak som parametre regulátora ďalej systematicky ladila. Najskôr som nalaďila najjednoduchší P regulátor, ku ktorému som postupne pridávala ďalšie zložky regulátora. Postupne som sa po viac ako 50 experimentoch dopracovala k vhodnej kombinácii zložiek PID regulátora. Výsledné hodnoty parametrov regulátora sú uvedené v tab. 2.4.

Tabuľka 2.4: Navrhnuté regulátory.

Zložka	P	PI	PD	PID
Z_R	0,35	0,35	0,35	0,35
T_I	†	145,00	†	145,00
T_D	†	†	0,50	0,50

Na potlačenie šumu výstupnej veličiny som do uzavretého regulačného obvodu pridala filter, ktorý svojím vplyvom zlepšil kvalitu regulácie [6]. Použitý filter je v tvare prenosovej funkcie prvého rádu

$$G_F = \frac{1}{T_F s + 1}. \quad (2.12)$$

kde T_F je časová konštanta filtra. Časovú konštantu filtra T_F som ladila tak, že som volila kompromis medzi vplyvom šumu na meranú veličinu a oneskorením filtrovaného signálu za nameranou hodnotou pH. Výsledná hodnota konštanty filtra je $T_F = 7$ s.

2.5 Kvality riadenia pH

Pre navrhnuté typy PID regulátora (tab. 2.4) som graficky spracovala priebehy riadenej veličiny pH a riadiacej veličiny, napätia na pumpe B. Tieto grafy su zo-

brazené na obr. 2.17–2.31. Obr. 2.20, 2.24, 2.28, 2.32 zobrazujú priebehy akčných zásahov.

Na obr. 2.17, 2.18 sú priebehy riadenia pH pomocou naladeného P regulátora s filtrom a bez filtra meranej veličiny. Z grafických priebehov je zrejmé, že P regulátor nezabezpečil, aby sa pH dostalo do δ -okolía žiadanej veličiny pH. Riadenie pH pomocou filtrovaného signálu signálu je menej zašumené, ale TRO je o čosi väčšia. Grafické porovnanie obidvoch priebehov je na obr. 2.19, 2.20.

Priebehy riadenia meranej veličiny pomocou PI regulátora bez filtra a s filtrom sú zobrazené na obr. 2.21, 2.22. Maximálne preregulovanie $\sigma_{\max}$ je v prípade PI regulátora väčšie, ale použitím I zložky sa kvalita riadenia aj napriek tomu zlepšila a integračná zložka pomohla odstrániť TRO. Filtrovaný signál je menej zašumený, ale tým, že filter vnáša do procesu oneskorenie sa $\sigma_{\max}$ ešte zväčšilo. Čas regulácie t_{reg} nie je možné jednoznačne určiť, nakoľko sa vplyvom šumu a oscilácií meraná veličina natrvalo neustaľuje v δ -okolí žiadanej veličiny. Graficky sú obidva priebehy porovnané na obr. 2.23, 2.24.

Na obr. 2.25, 2.26 sú priebehy riadenia pH pomocou PD regulátora. Je vidieť, že tento regulátor nezabezpečil dostatočnú kvalitu riadenia, pH sa nedostalo do δ -okolía žiadanej veličiny a rovnako ako P regulátor, aj PD regulátor zanechal TRO. K potlačeniu šumu došlo pri riadení pomocou filtrovaného signálu. Grafické porovnanie obidvoch priebehov je na obr. 2.27, 2.28.

Riadenie pH pomocou PID regulátora je na obr. 2.29. Z grafického priebehu je vidieť, že tento regulátor zabezpečil cieľ riadenia veľmi dobre. Žiadaná veličina sa dostala do δ -okolía, trvalá regulačná odchýlka je nulová a $\sigma_{\max}$ je malé. Na obr. 2.30 je priebeh riadenia pomocou filtrovaného signálu. Tento regulátor ešte zlepšil všetky kritériá, ale tak ako pri ostatných regulačných priebehoch s filtrovanou meranou veličinou (obr. 2.18, 2.22, 2.26), aj v tomto prípade sa zväčšilo maximálne preregulovanie $\sigma_{\max}$. Graficky sú obidva priebehy porovnané na obr. 2.31, 2.32.

Pre všetky navrhnuté typy PID regulátora (tab. 2.4) som vyhodnotila kvalitu regulácie pomocou nasledujúcich ukazovateľov kvality v časovej oblasti: $\sigma_{\max}$, t_{σ} , t_{reg} , aj pomocou integrálneho kritéria kvality *ISE*. Vypočítané hodnoty sú spracované v tab. 2.5.

Z grafov 2.21, 2.22, 2.29, 2.30 vidieť, že regulátory PI a PID neodstránili TRO tak, ako to hovorí teória. Je to spôsobené tým, že sa jedná o zložitý reálny systém. Označenie TRO^* v tab. 2.5 znamená, že v prípade regulátorov s integračnou zložkou uvažujem nulovú hodnotu trvalej regulačnej odchýlky napriek tomu, že grafické priebehy namerané na reálnom procese vykazujú mierne oscilácie v okolí žiadanej veličiny.

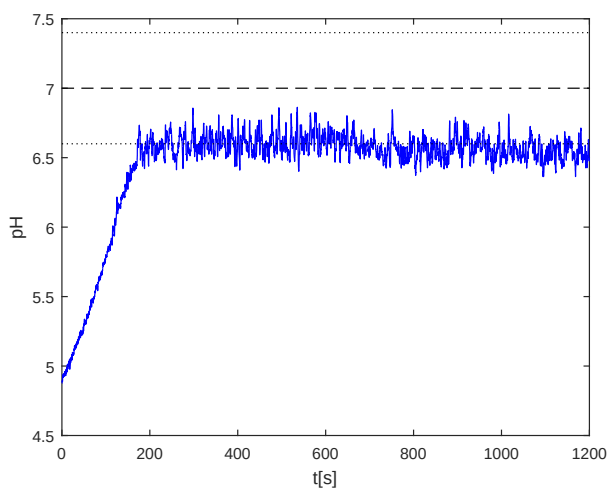
Tabuľka 2.5: Vyhodnotenie kvality riadenia.

Regulátor	TRO^*	$\sigma_{\max} [\%]$	t_{σ}	$t_{\text{reg}} [\text{s}]$	ISE
P (bez filtra)	0,50	9,38	450	†	1070,2
P (s filtrom)	0,57	†	†	†	1425,6
PI (bez filtra)	0,00	50,00	180	†	878,7
PI (s filtrom)	0,00	100,00	140	†	915,8
PD (bez filtra)	0,72	16,00	430	†	7640,1
PD (s filtrom)	0,63	†	†	†	5704,4
PID (bez filtra)	0,00	23,33	195	507,2	2648,4
PID (s filtrom)	0,00	66,51	165	289,2	2325,1

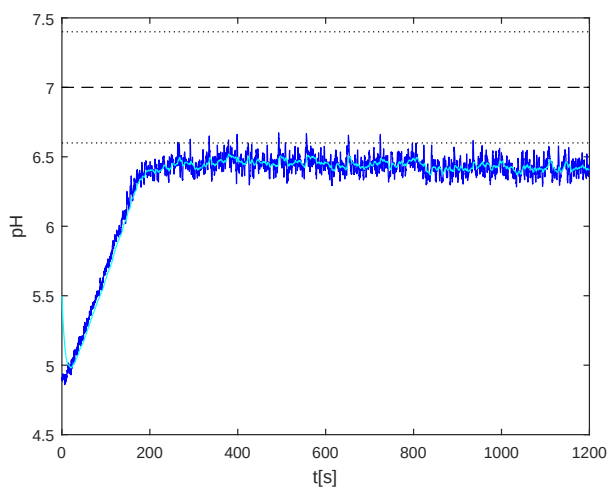
Vzhľadom na získané hodnoty všetkých kritérií kvality možno konštatovať, že na riadenie laboratórneho chemického reaktora je najvhodnejšie použiť navrhnutý PID regulátor s filtrom meranej hodnoty pH.

Tento regulátor som ďalej použila pri riadení pH na rôzne hodnoty žiadanej veličiny a tiež som vypočítala dané kritéria kvality 2.6.

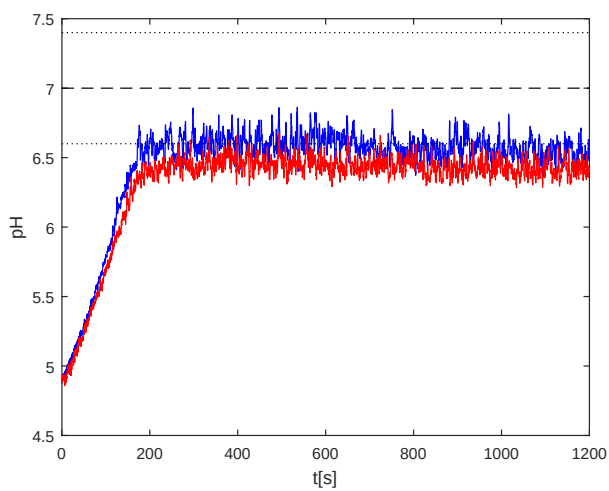
Na obr. 2.33–2.43 sú grafické priebehy riadenia na rôzne hodnoty žiadanej



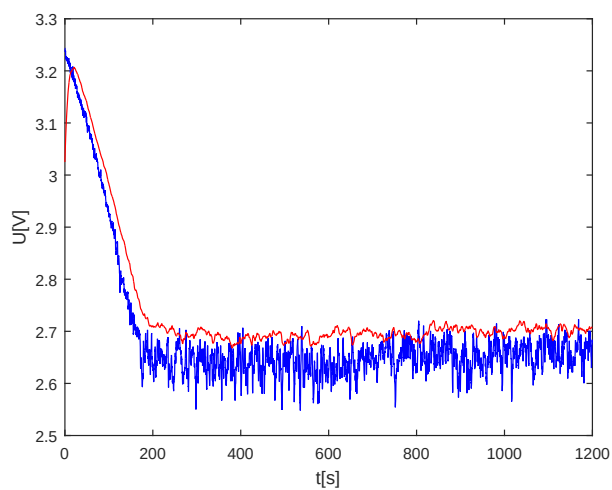
Obr. 2.17: Riadenie pH pomocou P regulátora bez filtra (modrá), referencia (čierna), pásmo tolerancie (bodkovaná).



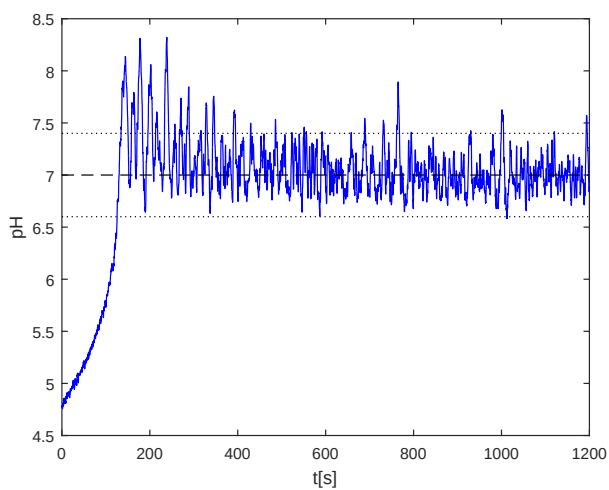
Obr. 2.18: Riadenie pH pomocou P regulátora s filtrom. Nefiltrovaná hodnota pH (modrá), filtrovaná hodnota pH (tyrkysová), referencia (čierna), pásmo tolerancie (bodkovaná).



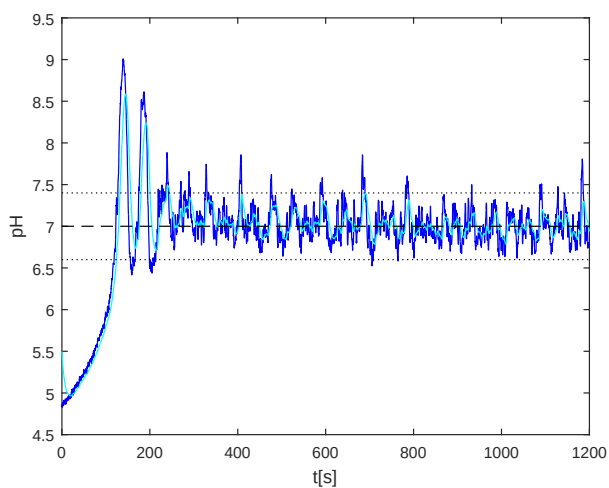
Obr. 2.19: Porovnanie kvality riadenia pH pomocou P regulátora, bez filtra (modrá), s filtrom (červená), referencia (čierna), pásmo tolerancie (bodkovaná).



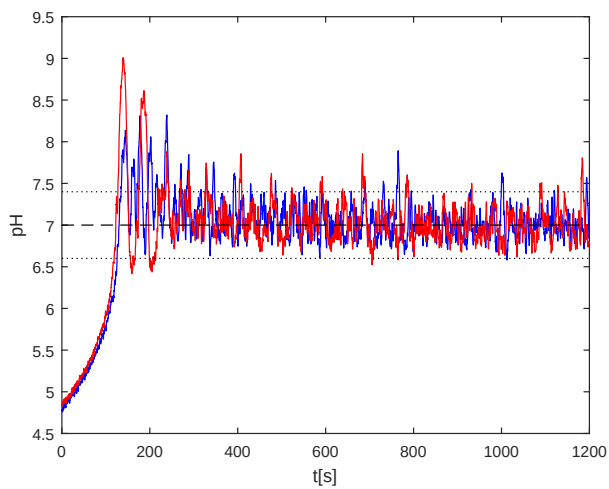
Obr. 2.20: Akčný zásah vykonaný P regulátorom bez filtra (modrá), s filtrom (červená).



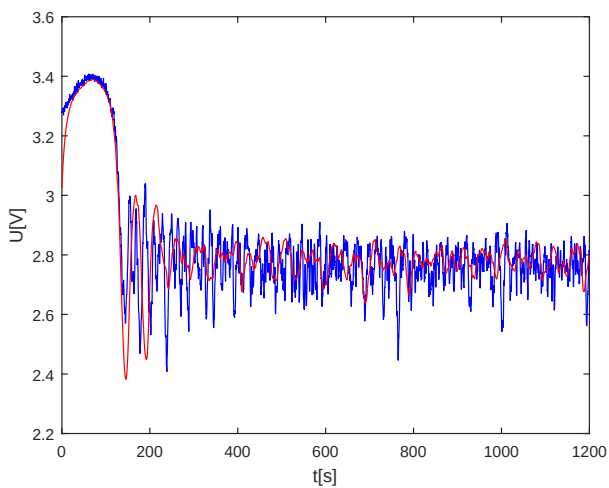
Obr. 2.21: Riadenie pH pomocou PI regulátora bez filtra (modrá), referencia (čierna), pásmo tolerancie (bodkovaná).



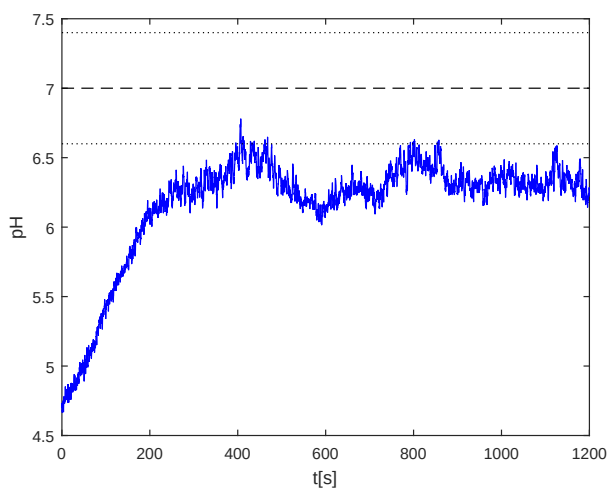
Obr. 2.22: Riadenie pH pomocou PI regulátora s filtrom. Nefiltrovaná hodnota pH (modrá), filtrovaná hodnota pH (tyrkysová), referencia (čierna), pásmo tolerancie (bodkovaná).



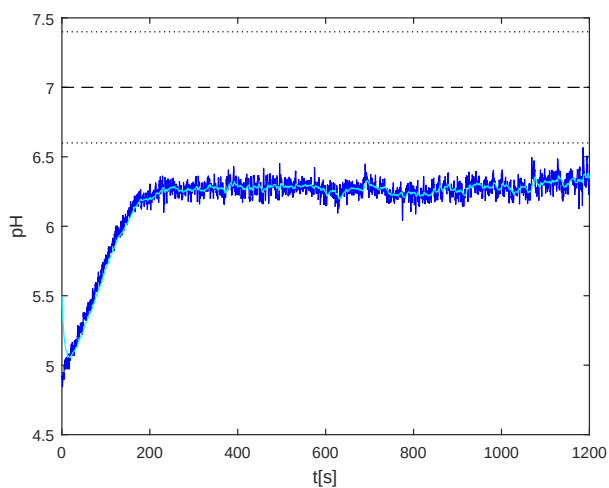
Obr. 2.23: Porovnanie kvality riadenia pH pomocou PI regulátora, bez filtra (modrá), s filtrom (červená), referencia (čierna), pásmo tolerancie (bodkovaná).



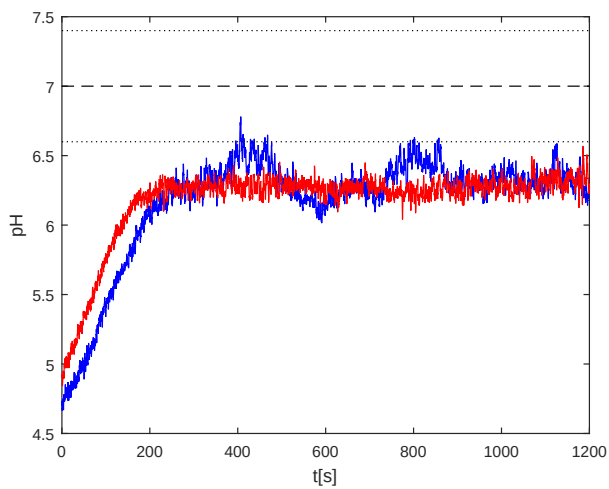
Obr. 2.24: Akčný zásah vykonaný PI regulátorom bez filtra (modrá), s filtrom (červená).



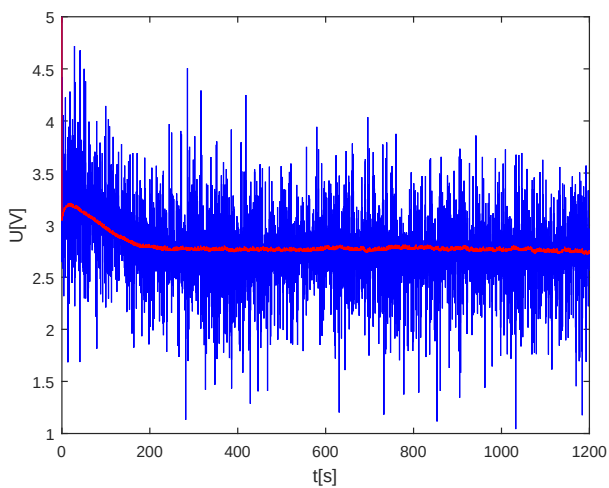
Obr. 2.25: Riadenie pH pomocou PD regulátora bez filtra (modrá), referencia (čierna), pásmo tolerancie (bodkovaná).



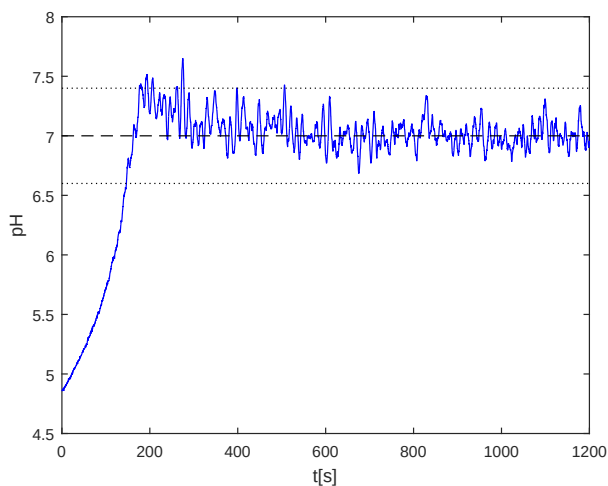
Obr. 2.26: Riadenie pH pomocou PD regulátora s filtrom. Nefiltrovaná hodnota pH (modrá), filtrovaná hodnota pH (tyrkysová), referencia (čierna), pásmo tolerancie (bodkovaná).



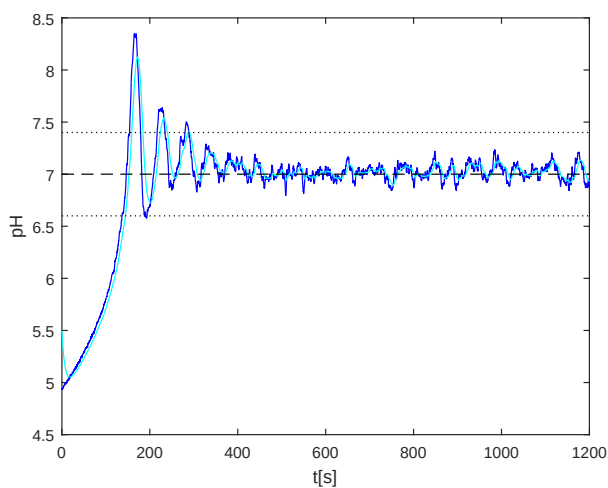
Obr. 2.27: Porovnanie kvality riadenia pH pomocou PD regulátora bez filtra (modrá), s filtrom (červená), referencia (čierna), pásmo tolerancie (bodkovaná)).



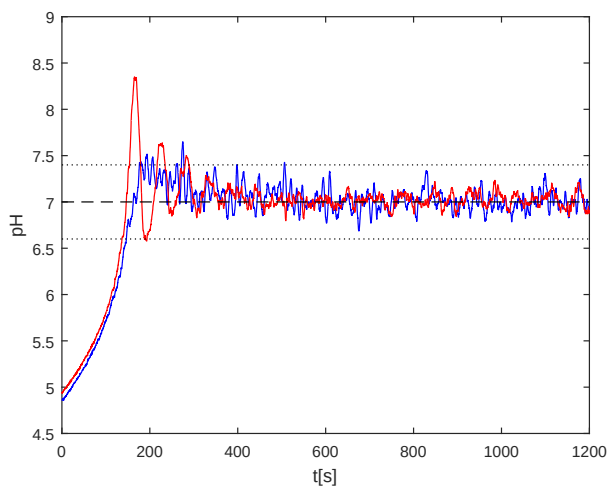
Obr. 2.28: Akčný zásah vykonaný PD regulátorom bez filtra (modrá), s filtrom (červená).



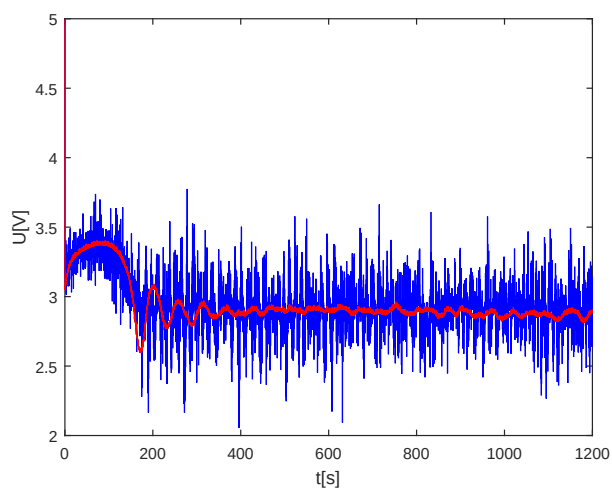
Obr. 2.29: Riadenie pH pomocou PID regulátora bez filtra (modrá), referencia (čierna), pásmo tolerance (bodkovaná).



Obr. 2.30: Riadenie pH pomocou PID regulátora s filtrom. Nefiltrovaná hodnota pH (modrá), filtrovaná hodnota pH (tyrkysová), referencia (čierna), pásmo tolerance (bodkovaná).



Obr. 2.31: Porovnanie kvality riadenia pH pomocou PID regulátora bez filtra (modrá), s filtrom (červená), referencia (čierna), pásmo tolerancie (bodkovaná).

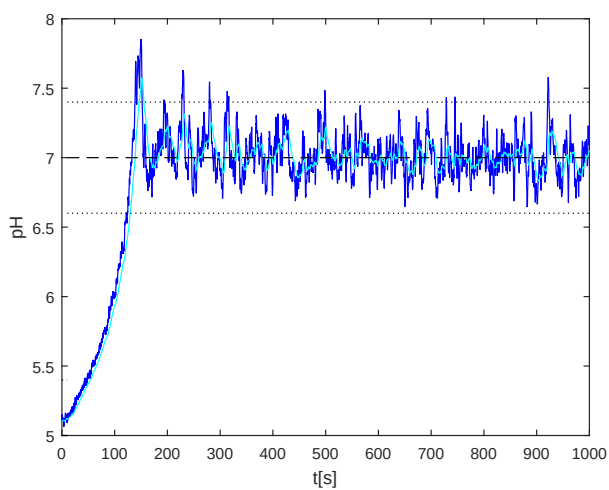


Obr. 2.32: Akčný zásah vykonaný PID regulátorom bez filtra (modrá), s filtrom (červená).

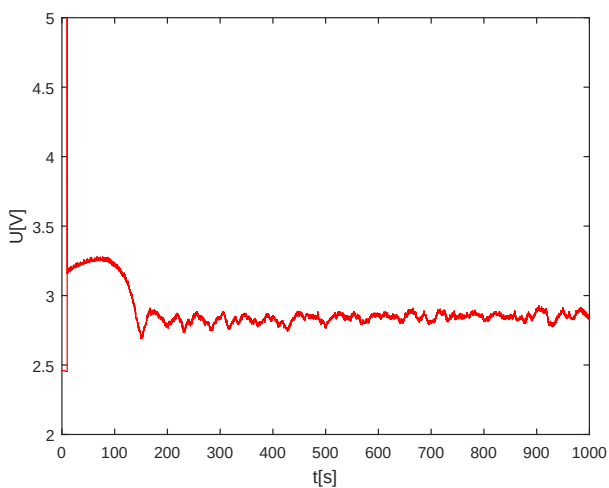
Tabuľka 2.6: Vyhodnotenie kvality riadenia s navrhnutým PID regulátorom pre rôzne referencie.

Referencia	TRO^*	$\sigma_{\max} [\%]$	$t_{\sigma} [s]$	$t_{\text{reg}} [s]$	ISE
$5 \rightarrow 7$	0	42,75	240,0	†	3788,8
$7 \rightarrow 9$	0	†	†	474,8	824,8
$9 \rightarrow 11$	0	†	†	276,5	1173,8
$11 \rightarrow 9$	0	111,00	95,3	714,4	1889,1
$9 \rightarrow 7$	0	48,00	50,1	977,8	849,7
$7 \rightarrow 5$	0	†	†	169,0	731,6

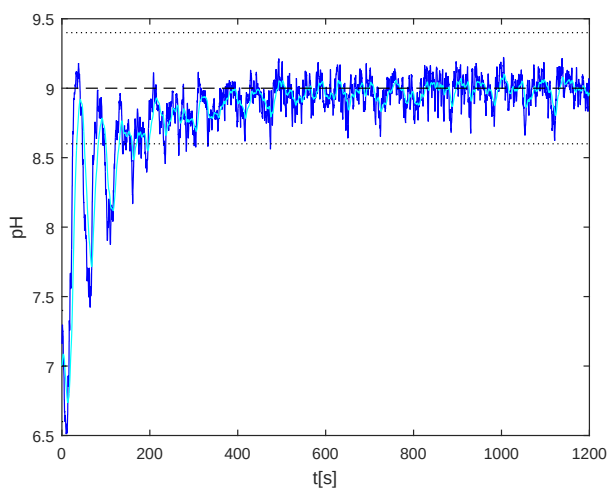
veličiny pri zvolenom PID regulátore s filtrom. Tieto merania slúžili aj na to, aby som otestovala kvalitu riadenia so zvoleným regulátorom. Z grafických priebehov a z vypočítaných kritérií kvality je zrejmé, že navrhnutý PID regulátor je vhodný na riadenie pH, pretože pri riadení na vybrané hodnoty žiadanej veličiny zabezpečil cieľ riadenia veľmi dobre. Akčné zásahy generované zvoleným PID regulátorom pri týchto meraniach sú na obr. [2.34](#), [2.36](#), [2.38](#), [2.40](#), [2.42](#), [2.44](#).



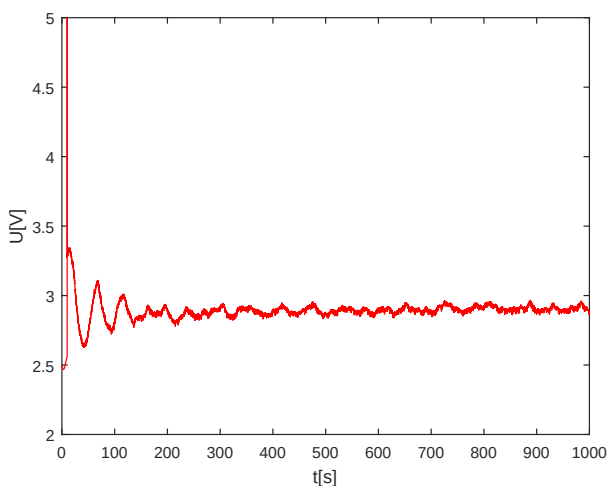
Obr. 2.33: Riadenie z $\text{pH} = 5$ na žiadanú hodnotu $\text{pH} = 7$ pomocou PID regulátora s filtrom. Nefiltrovaná hodnota pH (modrá), filtrovaná hodnota pH (tyrkysová), referencia (čierna), pásmo tolerance (bodkovaná).



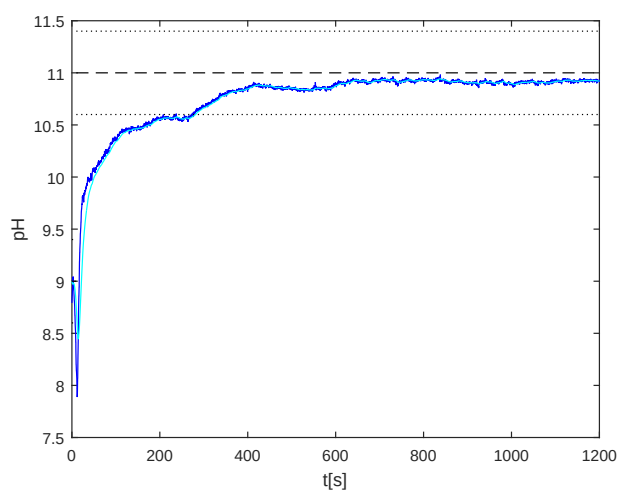
Obr. 2.34: Akčný zásah vykonaný PID regulátorom s filtrom pri riadení na žiadanú hodnotu $\text{pH} = 7$.



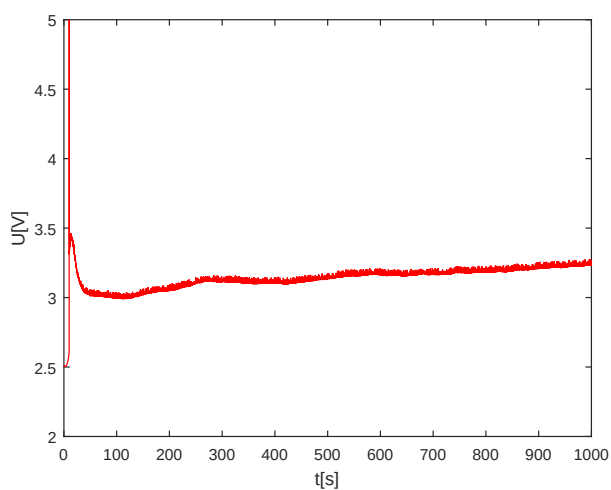
Obr. 2.35: Riadenie z $\text{pH} = 7$ na žiadanú hodnotu $\text{pH} = 9$ pomocou PID regulátora s filtrom. Nefiltrovaná hodnota pH (modrá), filtrovaná hodnota pH (tyrkysová), referencia (čierna), pásmo tolerancie (bodkovaná).



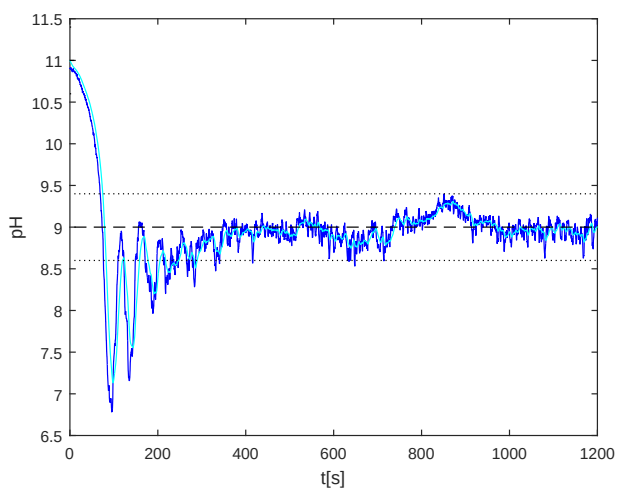
Obr. 2.36: Akčný zásah vykonaný PID regulátorom s filtrom pri riadení na žiadanú hodnotu $\text{pH} = 9$.



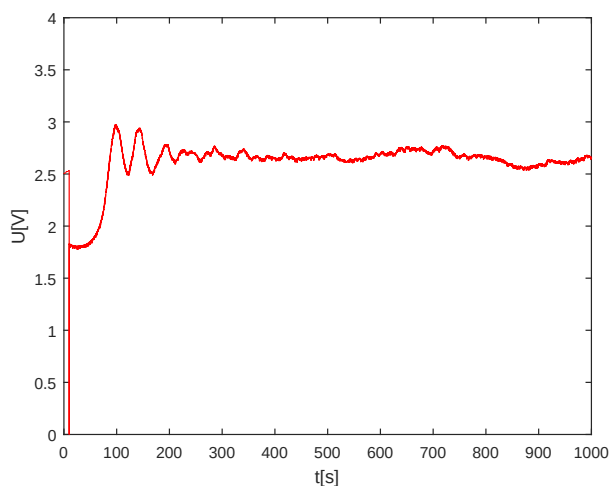
Obr. 2.37: Riadenie z $\text{pH} = 9$ na žiadanú hodnotu $\text{pH} = 11$ pomocou PID regulátora s filtrom. Nefiltrovaná hodnota pH (modrá), filtrovaná hodnota pH (tyrkysová), referencia (čierna), pásmo tolerancie (bodkovaná).



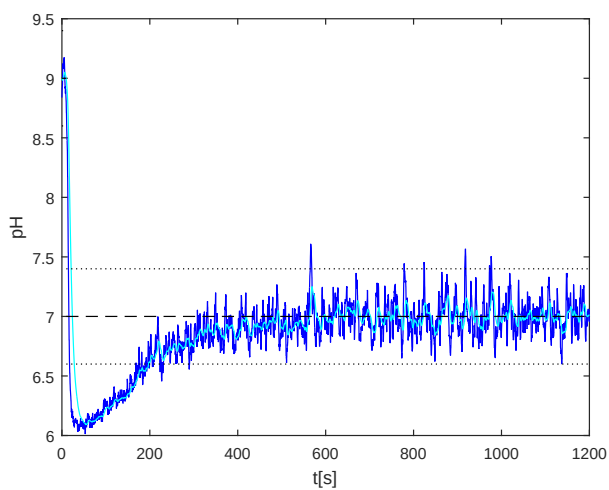
Obr. 2.38: Akčný zásah vykonaný PID regulátorom s filtrom pri riadení na žiadanú hodnotu $\text{pH} = 11$.



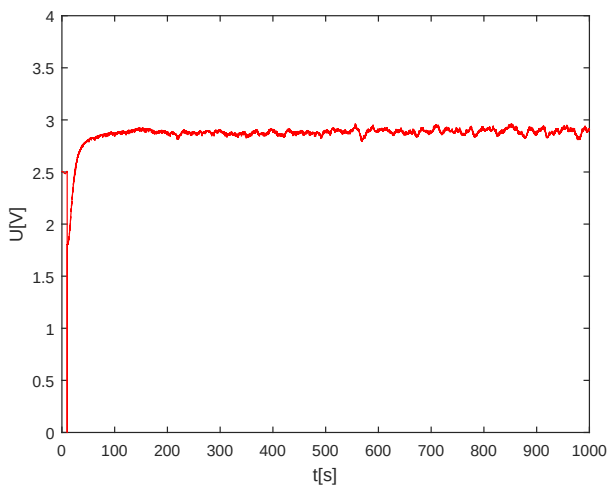
Obr. 2.39: Riadenie z $\text{pH} = 11$ na žiadanú hodnotu $\text{pH} = 9$ pomocou PID regulátora s filtrom. Nefiltrovaná hodnota pH (modrá), filtrovaná hodnota pH (tyrkysová), referencia (čierna), pásmo tolerancie (bodkovaná).



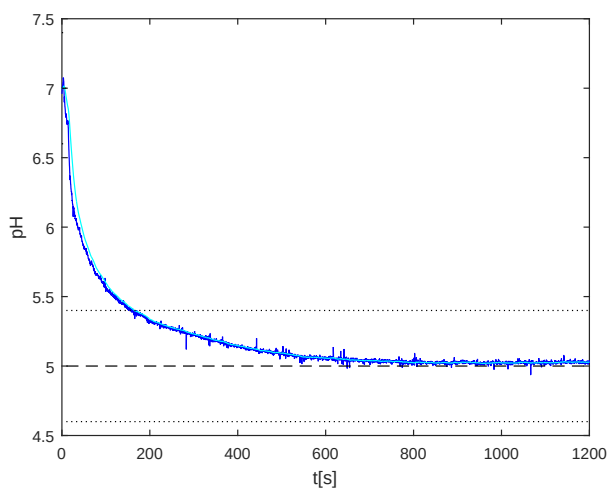
Obr. 2.40: Akčný zásah vykonaný PID regulátorom s filtrom pri riadení na žiadanú hodnotu $\text{pH} = 9$.



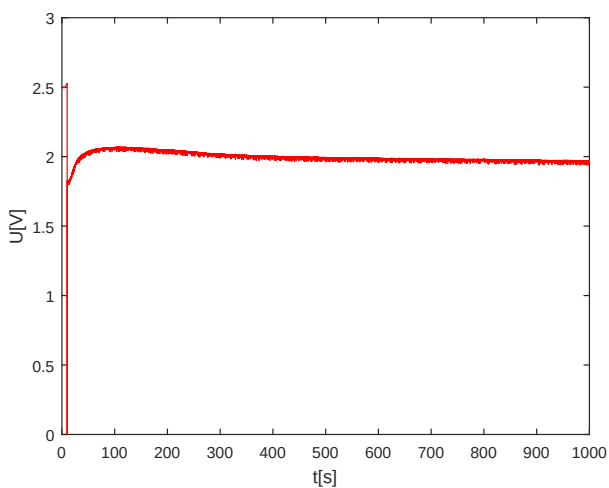
Obr. 2.41: Riadenie z $\text{pH} = 9$ na žiadanú hodnotu $\text{pH} = 7$ pomocou PID regulátora s filtrom. Nefiltrovaná hodnota pH (modrá), filtrovaná hodnota pH (tyrkysová), referencia (čierna), pásmo tolerancie (bodkovaná).



Obr. 2.42: Akčný zásah vykonaný PID regulátorom s filtrom pri riadení na žiadanú hodnotu $\text{pH} = 7$.



Obr. 2.43: Riadenie z $\text{pH} = 7$ na žiadanú hodnotu $\text{pH} = 5$ pomocou PID regulátora s filtrom. Nefiltrovaná hodnota pH (modrá), filtrovaná hodnota pH (tyrkysová), referencia (čierna), pásmo tolerancie (bodkovaná).



Obr. 2.44: Akčný zásah vykonaný PID regulátorom s filtrom pri riadení na žiadanú hodnotu $\text{pH} = 5$.

Záver

Hlavným cieľom mojej bakalárskej práce bola experimentálna identifikácia matematického modelu chemického reaktora a návrh spätnoväzbového riadenia pre proces neutralizácie. Čiastkovými cieľmi práce bolo vytvorenie simulačných schém v prostredí MATLAB/Simulink na ovládanie chemického reaktora pre potreby kalibrácie púmp, pH senzora a meranie prechodových charakteristík. Ďalej bolo mojim cieľom nameranie a spracovanie prechodových charakteristík a identifikovanie modelu chemického reaktora v tvare prenosovej funkcie. Na riadenie chemického reaktora som implementovala uzavretý regulačný obvod s rôznymi typmi PID regulátora.

V teoretickej časti práce som sa zaoberala základnými vlastnosťami, výskytom, výrobou a použitím kyseliny octovej a hydroxidu sodného, teda chemikáliami, ktoré vstupovali ako reaktanty do procesu neutralizácie v chemickom reaktore. Neutralizácia je chemická reakcia kyseliny so zásadou. Pri použití ekvivalentného množstva kyseliny a zásady dosiahneme neutrálny charakter roztoku. Overila som si to, keď sa pri rovnakom objemovom prietoku kyseliny octovej a hydroxidu sodného do reaktora pH roztoku ustálilo približne na hodnote 7.

V experimentálnej časti mojej práce som sa zaoberala experimentálnou identifikáciou chemického reaktora a návrhom spätnoväzbového riadenia. Dôležitou časťou vrámci experimentálnej časti boli namerané údaje. Pomocou nich som mohla identifikovať model systému, aj navrhnúť riadenie reaktora. Dôležitou

súčasťou chemického reaktora je aj pH senzor, ktorý slúži ako merací člen pH. Aby sa dosiahla čo najvyššia presnosť nameraných údajov, pred každým meraním som robila jeho kalibráciu. Kalibrácia slúži na stanovenie závislosti medzi určitými referenčnými látkami — štandardmi a vzorkou. Táto kvantitatívna analýza sa vyhodnocuje kalibračnou krivkou. V práci som sa zaoberala riadením pH meniacim sa prietokom zásady, ale základný pracovný bod bol stav, kedy prietok kyseliny a zásady do reaktora bol rovnaký. Na dosiahnutie rovnakého prietoku kyseliny som tiež musela vykonať kalibráciu oboidvoch púmp.

Na identifikáciu procesu som použila metódu identifikácie podľa Strejca. Táto metóda je založená na spracovaní a vyhodnotení prechodovej charakteristiky. Takže na to, aby som mohla daný proces identifikovať, potrebovala som získať nominálnu prechodovú charakteristiku. Meranou veličinou v procese bola hodnota pH a radiacou veličinou bolo napätie ovplyvňujúce prietok zásady privádzanej do chemického reaktora. Preto realizovaná skoková zmena bola zmena prietoku zásady, pričom objemový prietok kyseliny octovej bol konštantný. Nakoľko chemický reaktor mal nelineárne správanie, tak som postupne realizovala šesť skokových zmien prietoku zásady, tri skoky smerom nahor a tri skoky smerom nadol. Namerané prechodové charakteristiky som normalizovala a spracovala tak, že som získala prechodovú charakteristiku nominálneho systému. Výsledná nominálna prechodová charakteristika mi slúžila na samotnú identifikáciu a odvodenie matematického modelu chemického reaktora. Získala som tak matematický model systému v tvare prenosovej funkcie prvého rádu. Kvalitu modelu som overila pomocou validácie identifikácie.

Identifikovaný prenos som ďalej použila na návrh regulácie pre chemický reaktor. Pri práci so zložitým reálnym procesom nie je jednoduché nájsť pre tento proces vhodný regulátor. Pomocou toolboxu PIDDESIGN som sa pokúšala navrhnúť parametre regulátora, ktoré bolo potrebné po implementácii na riadenie reaktora ďalej ladiť. Preto bolo hľadanie vhodného PID regulátora založené na

systematickom ladení jednotlivých parametrov. Zo všetkých pokusov som vybrala štyri regulátory, vhodné na porovnanie, a pre tieto regulátory som vypočítala jednotlivé hodnoty kritérií kvality.

Kvôli zlepšeniu kvality regulácie som do uzavretého regulačného obvodu pridala filter meranej hodnoty pH, ktorý síce do procesu vniesol oneskorenie, ale aj napriek tomu zlepšil takmer všetky kritériá kvality. Za najlepší regulátor som vybrala PID regulátor s filtrom. Pre tento regulátor som ďalej vyhodnocovala kvalitu regulácie pri riadení na rôzne hodnoty žiadanej veličiny.

Všetky podporné súbory a simulačné schémy pre MATLAB/Simulink sú priložené k tejto práci a sú aj dostupné v LMS Moodle v module *Laboratórium procesov*, kde som vytvorila podpornú stránku v anglickom jazyku na prácu s procesom Armfield PCT41.

Literatúra

- [1] D. Valigura, T. Gracza, A. Lásiková, A. Mašlejová, B. Papánková, J. Šima, K. Špírková a M. Tatarko. *Chemické tabulky*. STU v Bratislave, 2011.
- [2] M. Bakošová a M. Fikar. *Riadenie procesov*. STU v Bratislave, 2008.
- [3] M. Bakošová, M. Fikar a L. Čírka. *Základy automatizácie*. STU v Bratislave, 2003.
- [4] J. Mikleš a M. Fikar. *Process Modelling, Identification, and Control*. Springer, 2008.
- [5] *Extracts from instruction manual PCT40*. Armfield, 2005.
- [6] J. Mihalík a I. Gladišová. *Číslíková filtrácia signálov (Návody na cvičenia)*. FEI TU Košice, 2013.

Prílohy

K mojej bakalárskej práci prikladám podporné súbory, ktoré som vytvorila v prostredí MATLAB/Simulink. Tieto súbory umožňujú identifikovať proces prebiehajúci v chemickom reaktore, kalibrovať akčné členy a pH senzor, implementovať spätnoväzbové riadenie a navrhovať regulátory. Všetky vytvorené podporné súbory sú tiež dostupné v LMS Moodle v module *Laboratórium procesov*, kde som vytvorila stránku v anglickom jazyku: <http://www.kirp.chnikf.stuba.sk/moodle/mod/page/view.php?id=30629> na prácu s laboratórnym procesom Armfield PCT41.