

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Fakulta chemickej a potravinárskej technológie

Evidenčné číslo: FCHPT-113709-72356

Návrh robustného riadenia pre laboratórny chemický reaktor

Bakalárska práca

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Fakulta chemickej a potravinárskej technológie

Evidenčné číslo: FCHPT-113709-72356

Návrh robustného 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 2018

Michal Slávik



ZADANIE BAKALÁRSKEJ PRÁCE

Študent: **Michal Slávik**
ID študenta: 72356
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: Oddelenie informatizácie a riadenia procesov

Názov práce: **Návrh robustného riadenia pre laboratórny chemický reaktor**

Jazyk, v ktorom sa práca vypracuje: slovenský jazyk

Špecifikácia zadania:

Cieľom bakalárskej práce je identifikovať parametre modelu laboratórneho chemického reaktora ARMFIELD PCT43, v ktorom prebieha chemická reakcia neutralizácie. Matematický model chemického reaktora má byť experimentálne identifikovaný ako systém s intervalovými neurčitostami. Následne je cieľom práce navrhnuť a implementovať robustné riadenie na základe riešenia problému konvexnej optimalizácie. Na základe získaného modelu sa navrhne vhodný spôsob riadenia s ohľadom na celkovú kvalitu regulácie. Dosiahnutá kvalita riadenia sa vyhodnotí s ohľadom na úlohu sledovania žiadanej hodnoty pH reakčnej zmesi na výstupe z chemického reaktora.

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: 12. 02. 2018

Dátum odovzdania práce: 06. 05. 2018

Michal Slávik
študent

prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
vedúci pracoviska

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

Veľké poďakovanie patrí vedúcemu mojej bakalárskej práce Ing. Jurajovi Oravcovi, PhD. za jeho ochotu pomôcť, trpezlivosť, odborné a cenné rady, vďaka ktorým nebola pre mňa táto práca len povinnosťou. Veľké poďakovanie patrí aj mojej rodine a priateľom, ktorí stáli celý čas pri mne a boli mojou oporou.

Michal Slávik
Bratislava, 2018

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá experimentálnou identifikáciou a návrhom robustného riadenia laboratórneho chemického reaktora. V chemickom reaktore, ktorý je riadeným systémom, prebieha proces neutralizácie roztoku kyseliny octovej a roztoku zásady hydroxidu sodného. Riadenou veličinou je hodnota pH na výstupe z laboratórneho chemického reaktora. Riadiacou veličinou je napätie na čerpadlách, ktoré priamo ovplyvňuje objemový prietok roztoku kyseliny octovej alebo roztoku hydroxidu sodného na vstupe do laboratórneho chemického reaktora. Čerpadlá vystupujú ako akčné členy a pH senzor ako merací člen. Na základe experimentálne nameraných prechodových charakteristík sa získali vstupno-výstupné matematické modely laboratórneho chemického reaktora. Keďže proces neutralizácie má nesymetrické a nelineárne správanie, je potrebné meranie viacerých prechodových charakteristík. Výsledný vstupno-výstupný matematický model je vo forme prenosových funkcií s intervalovými neurčitostami. Po identifikovaní správania sa procesu neutralizácie je navrhnuté robustné prediktívne riadenie pre úlohu sledovania hodnoty pH a je vyhodnotená kvalita riadenia.

Kľúčové slová:

Laboratórny chemický reaktor, neutralizácia, identifikácia, intervalové neurčitosti, robustné prediktívne riadenie, kvalita riadenia.

Abstract

The aim of this bachelor thesis was experimental identification and robust control design for the laboratory chemical reactor. The control plant was the continuous stirred-tank reactor where ran the neutralization reaction of the acetic acid solution and the basic sodium hydroxide solution. The controlled variable was the pH value of the outlet reaction mixture and the manipulated variable was the voltage of the pump representing the volumetric flow rate of the acetic solution or the base solution dosing the reaction vessel. The actuators were the pumps and the sensor was the pH probe. The parameters of the mathematical model of the laboratory chemical reactor in the form of the transfer function were evaluated based on the experimentally measured step responses. As the neutralization process had non-linear and asymmetric behaviour, it was necessary to measure the set of step responses to identify the model parameters. The evaluated mathematical model had the form of the transfer functions with interval uncertainties. Based on the derived model of the controlled plant, the robust model predictive control was designed to address the set-point tracking problem. The quality of the evaluated control performance was judged using various criteria.

Keywords:

Laboratory chemical reactor, neutralization, identification, interval uncertainties, robust model predictive control, control performance.

Obsah

Zoznam symbolov	1
Zoznam skratiek	7
Zoznam obrázkov	11
Zoznam tabuliek	14
Úvod	15
1 Teoretická časť	17
1.1 Kyselina octová	17
1.1.1 Vlastnosti kyseliny octovej	18
1.1.2 Výskyt kyseliny octovej	19
1.1.3 Biologická výroba kyseliny octovej	19
1.1.4 Chemická syntéza kyseliny octovej	20
1.1.5 Bezpečnosť pri práci s kyselinou octovou	20
1.2 Hydroxid sodný	21
1.2.1 Vlastnosti hydroxidu sodného	21
1.2.2 Príprava hydroxidu sodného	22
1.2.3 Bezpečnosť pri práci s hydroxidom sodným	23
1.3 Strejcova metóda identifikácie dynamických systémov vyšších rádov	23

1.4	Aproximácia nameraných údajov pomocou polynómu	27
1.5	Titračná krivka	28
1.6	Uzavretý regulačný obvod	30
1.7	Ukazovatele kvality riadenia	31
1.7.1	Časové ukazovatele kvality riadenia	32
1.7.2	Integrálne ukazovatele kvality riadenia	33
1.8	Robustné prediktívne riadenie	35
1.8.1	Optimalizačný problém návrhu MPC	36
2	Experimentálna časť	41
2.1	Laboratórny chemický reaktor	42
2.2	Kalibrácia pH senzora	43
2.3	Kalibrácia čerpadiel	45
2.4	Prevodová charakteristika procesu	47
2.5	Identifikácia procesu laboratórneho chemického reaktora	50
2.6	Neurčitý model chemického reaktora	58
2.7	Aplikácia uzavretého regulačného obvodu	64
2.8	Riadenie chemického reaktora a vyhodnotenie kvality riadenia	65
	Záver	77
	Literatúra	81

Zoznam symbolov

A		stavová matica
A_v		vrcholová stavová matica
a_r		koefficienty aproximačného polynómu
B		matica vstupov
B_v		vrcholová matica vstupov
C		matica výstupov
C_v		vrcholová matica výstupov
D	s	dopravné oneskorenie systému
d_1	s	je súčet $(T + D)$
d_2	s ²	je súčin $(T D)$
$E(s)$		Laplaceov obraz regulačnej odchýlky
$e(t)$		hodnota regulačnej odchýlky v čase t
e_∞		trvalá regulačná odchýlka
$G(s)$		prenosová funkcia (prenos)
$G_A(s)$		prenos akčného člena

$G_M(s)$		prenos meracieho člena
$G_P(s)$		prenos riadeného procesu
$G_R(s)$		prenos regulátora
$G_{PR}(s)$		prenos poruchy
$G_S(s)$		prenos riadeného systému
h		počet stavov riadeného systému
I		jednotková matica
j		počet výstupov riadeného systému
K		matica regulátora
k	V^{-1}	smernica kalibračnej krivky pre kalibráciu pH senzora
k_A	$\text{ml s}^{-1} V^{-1}$	smernica kalibračnej krivky pre kalibráciu čerpadla A
k_B	$\text{ml s}^{-1} V^{-1}$	smernica kalibračnej krivky pre kalibráciu čerpadla B
l		počet vstupov riadeného systému
m		počet nameraných údajov
N		zvolený časový úsek, resp. počet krokov predikčného horizontu
n		rád systému
P		Ljapunovova matica
p		počet členov aproximačného polynómu
pH		záporný dekadický logaritmus aktivity vodíkových katiónov
Q		váhová matica penalizujúca kvadratickú odchýlku stavov
q		úsek kalibračnej krivky pre kalibráciu pH senzora
q_A	ml s^{-1}	úsek kalibračnej krivky pre kalibráciu čerpadla A
q_B	ml s^{-1}	úsek kalibračnej krivky pre kalibráciu čerpadla B

R		váhová matica penalizujúca kvadratickú odchýlku akčných zásahov
$R(s)$		Laplaceov obraz poruchy
r		rád aproximačného polynómu
$r(t)$		hodnota poruchovej veličiny v čase t
s		argument Laplaceovej transformácie
T	s	časová konštanta systému
t	s	čas
t_0	s	čas skokovej zmeny
t_n	s	čas nábehu
t_u	s	čas prietahu
t_{reg}	s	čas regulácie
t_σ	s	čas maximálneho preregulovania
U	V	napätie
U_A	V	napätie na čerpadle A
U_B	V	napätie na čerpadle B
$U(s)$		Laplaceov obraz vstupu (riadiacej veličiny) po saturácii
$U(t)$	V	riadiaca veličina po saturácii
$U'(s)$		Laplaceov obraz riadiacej veličiny pred saturáciou
$U'(t)$	V	riadiaca veličina pred saturáciou
U^S	V	ustálená riadiaca veličina
u		vektor vstupov riadeného systému
u_{max}	V	maximálna hodnota riadiacej veličiny
u_{min}	V	minimálna hodnota riadiacej veličiny

u_0	V	hodnota riadiacej veličiny v čase skokovej zmeny
$u(t)$	V	hodnota odchýlkovej riadiacej veličiny v čase t
u_∞	V	hodnota riadiacej veličiny po skokovej zmene
$\dot{V}$	ml s^{-1}	objemový prietok
$\dot{V}_A$	ml s^{-1}	objemový prietok čerpadla A
$\dot{V}_B$	ml s^{-1}	objemový prietok čerpadla B
$W(s)$		Laplaceov obraz žiadanej veličiny
$w(t)$		hodnota žiadanej veličiny v čase t
w_∞		ustálená hodnota žiadanej veličiny po skokovej zmene
X		inverzná matica k Ljapunovovej matici P
x		vektor stavov riadeného systému
$x(0)$		počiatočný stav riadeného systému
x_i		súradnice nezávislej premennej
Y		ladiaci parameter pre návrh matice regulátora K
$Y(s)$		Laplaceov obraz výstupu (riadenej veličiny) so započítanou poruchou
$Y_S(s)$		Laplaceov obraz výstupu (riadenej veličiny) bez poruchy
y		vektor výstupov riadeného systému
y_0		hodnota riadenej veličiny v čase skokovej zmeny
y_i		namerané hodnoty
$\hat{y}_i$		funkčné hodnoty aproximačného polynómu v bodoch x_i
$y(t)$		hodnota riadenej veličiny so započítanou poruchou v čase t
$y_S(t)$		hodnota riadenej veličiny bez poruchy v čase t
$y_{\max}$		maximálna hodnota riadenej veličiny po skokovej zmene

$y_{\min}$		minimálna hodnota riadenej veličiny
y_{∞}		ustálená hodnota riadenej veličiny po skokovej zmene
Z	V^{-1}	zosilnenie systému
$\sigma_{\max}$	%	maximálne preregulovanie
σ_A		suma štvorcov odchýliek pri získaní titračnej krivky pri zmene kyseliny
σ_B		suma štvorcov odchýliek pri získaní titračnej krivky pri zmene zásady
γ		koefficient zmrštenia elipsoidu

Zoznam skratiek

CSTR	prietokový chemický reaktor s miešaním akčnej zmesi
IAE	integrál absolútnej hodnoty regulačnej odchýlky
IE	integrál regulačnej odchýlky
ISE	integrál kvadrátu regulačnej odchýlky
ISU	integrál kvadrátu odchýlkovej radiacej veličiny
ITAE	integrál absolútnej hodnoty regulačnej odchýlky s penalizovaním času regulácie
ITSE	integrál kvadrátu regulačnej odchýlky s penalizovaním času regulácie
LQR	lineárne-kvadratický regulátor
MPC	prediktívne riadenie založené na modeli
PID	proporcionálno-integračno-derivačný
RMPC	robustné prediktívne riadenie založené na modeli
TRO	trvalá regulačná odchýlka
URO	uzavretý regulačný obvod

Zoznam obrázkov

1.1	Ladová kyselina octová.	19
1.2	Hydroxid sodný.	22
1.3	Skoková zmena vstupnej veličiny.	25
1.4	Reálna prechodová charakteristika.	25
1.5	Titračná krivka.	29
1.6	Uzavretý regulačný obvod.	32
1.7	Odozva URO na skokovú zmenu vstupnej veličiny.	33
2.1	Laboratórny chemický reaktor Armfield PCT40.	42
2.2	pH senzor.	44
2.3	Kalibračná krivka pH senzora.	45
2.4	Kalibračná krivka čerpadiel.	48
2.5	Prevodová charakteristika pri meniacom sa objemovom toku roz- toku kyseliny octovej.	50
2.6	Prevodová charakteristika pri meniacom sa objemovom toku roz- toku hydroxidu sodného.	51
2.7	Normalizované prechodové charakteristiky pri meniacom sa objemo- vom toku roztoku kyseliny octovej.	55
2.8	Normalizované prechodové charakteristiky pri meniacom sa objemo- vom toku roztoku hydroxidu sodného.	56

2.9	Porovnanie nameraných údajov prechodovej charakteristiky s identifikáciou a aproximáciou.	57
2.10	Padého aproximácia.	58
2.11	Robustná obálka so zanedbaním dopravným oneskorením pre meniaci sa objemový prietok roztoku kyseliny octovej.	62
2.12	Robustná obálka so zanedbaním dopravným oneskorením pre meniaci sa objemový prietok roztoku hydroxidu sodného.	63
2.13	Robustná obálka s aproximovaným dopravným oneskorením pre meniaci sa objemový prietok roztoku kyseliny octovej.	63
2.14	Robustná obálka s aproximovaným dopravným oneskorením pre meniaci sa objemový prietok roztoku hydroxidu sodného.	64
2.15	Priebeh riadenia pH pri skokovej zmene z $pH\ 6 \rightarrow 7$ pri meniacom sa prietoku roztoku kyseliny octovej.	67
2.16	Priebeh napätia U na čerpadle A pri skokovej zmene z $pH\ 6 \rightarrow 7$ pri meniacom sa prietoku roztoku kyseliny octovej.	68
2.17	Priebeh riadenia pH pri skokovej zmene z $pH\ 7 \rightarrow 8$ pri meniacom sa prietoku roztoku kyseliny octovej.	69
2.18	Priebeh napätia U na čerpadle A pri skokovej zmene z $pH\ 7 \rightarrow 8$ pri meniacom sa prietoku roztoku kyseliny octovej.	70
2.19	Priebeh riadenia pH pri skokovej zmene z $pH\ 8 \rightarrow 7$ pri meniacom sa prietoku roztoku kyseliny octovej.	70
2.20	Priebeh napätia U na čerpadle A pri skokovej zmene z $pH\ 8 \rightarrow 7$ pri meniacom sa prietoku roztoku kyseliny octovej.	71
2.21	Priebeh riadenia pH pri skokovej zmene z $pH\ 7 \rightarrow 6$ pri meniacom sa prietoku roztoku kyseliny octovej.	71
2.22	Priebeh napätia U na čerpadle A pri skokovej zmene z $pH\ 7 \rightarrow 6$ pri meniacom sa prietoku roztoku kyseliny octovej.	72

2.23	Priebeh riadenia pH pri skokovej zmene z $pH\ 6 \rightarrow 7$ pri meniacom sa prietoku roztoku hydroxidu sodného.	72
2.24	Priebeh napätia U na čerpadle B pri skokovej zmene z $pH\ 6 \rightarrow 7$ pri meniacom sa prietoku roztoku hydroxidu sodného.	73
2.25	Priebeh riadenia pH pri skokovej zmene z $pH\ 7 \rightarrow 8$ pri meniacom sa prietoku roztoku hydroxidu sodného.	73
2.26	Priebeh napätia U na čerpadle B pri skokovej zmene z $pH\ 7 \rightarrow 8$ pri meniacom sa prietoku roztoku hydroxidu sodného.	74
2.27	Priebeh riadenia pH pri skokovej zmene z $pH\ 8 \rightarrow 7$ pri meniacom sa prietoku roztoku hydroxidu sodného.	74
2.28	Priebeh napätia U na čerpadle B pri skokovej zmene z $pH\ 8 \rightarrow 7$ pri meniacom sa prietoku roztoku hydroxidu sodného.	75
2.29	Priebeh riadenia pH pri skokovej zmene z $pH\ 7 \rightarrow 6$ pri meniacom sa prietoku roztoku hydroxidu sodného.	75
2.30	Priebeh napätia U na čerpadle B pri skokovej zmene z $pH\ 7 \rightarrow 6$ pri meniacom sa prietoku roztoku hydroxidu sodného.	76

Zoznam tabuliek

1.1	Základné fyzikálne vlastnosti kyseliny octovej.	18
1.2	Základné fyzikálne vlastnosti hydroxidu sodného.	22
1.3	Tabuľka pre Strejcovu metódu identifikácie.	27
2.1	Hodnoty napätia U pre dané hodnoty pH referenčných roztokov. . .	45
2.2	Namerané hodnoty pre kalibráciu čerpadiel.	47
2.3	Meranie prevodovej charakteristiky pre meniaci sa objemový tok roztoku kyseliny octovej.	51
2.4	Meranie prevodovej charakteristiky pre meniaci sa objemový tok roztoku hydroxidu sodného.	52
2.5	Identifikované parametre prenosov systémov pri meniacom sa obje- movom toku roztoku kyseliny octovej.	54
2.6	Identifikované parametre prenosov systémov pri meniacom sa obje- movom toku roztoku hydroxidu sodného.	55
2.7	Aproximované parametre prenosov systémov pri meniacom sa obje- movom toku roztoku kyseliny octovej.	56
2.8	Aproximované parametre prenosov systémov pri meniacom sa obje- movom toku roztoku hydroxidu sodného.	57
2.9	Hranice intervalových neurčitostí identifikovaných prenosov so za- nedbaním dopravným oneskorením pre meniaci sa objemový prietok roztoku kyseliny octovej.	60

2.10	Hranice intervalových neurčitostí identifikovaných prenosov so zanedbaním dopravním oneskorením pre meniaci sa objemový prietok roztoku hydroxidu sodného.	61
2.11	Hranice intervalových neurčitostí identifikovaných prenosov s aproximovaným dopravním oneskorením pre meniaci sa objemový prietok roztoku kyseliny octovej.	61
2.12	Hranice intervalových neurčitostí identifikovaných prenosov s aproximovaným dopravním oneskorením pre meniaci sa objemový prietok roztoku hydroxidu sodného.	62
2.13	Kvalita riadenia pri zmene prietoku roztoku kyseliny octovej.	68
2.14	Kvalita riadenia pri zmene prietoku roztoku hydroxidu sodného.	69

Úvod

Chemické reaktory a chemické reakcie, ktoré v nich prebiehajú, napr. zmena surovín na produkty, sú dôležitou súčasťou nie len chemického a potravinárskeho odvetvia priemyslu. Motiváciou, prečo študovať, spoznávať a skúmať takéto zariadenia a reakcie prebiehajúce v nich, je naučiť sa efektívne ich riadiť. Jedná sa o riadenie komplikovaných zariadení s možnými bezpečnostnými rizikami, vzhľadom na to, že takmer každá chemická reakcia uvoľňuje, resp. spotrebúva energiu vo forme tepla do okolia, resp. z okolia. Pomocou optimálneho riadenia vieme predísť rizikám a predchádzať havarijným stavom. Je dôležité uvedomiť si, že vďaka optimálnemu riadeniu vieme minimalizovať náklady na výrobu, napr. spotrebu množstva surovín, energie, a pod., a tým zvýšime celkový zisk, pričom zároveň berieme ohľad na požadovanú kvalitu a efektivitu výroby, minimalizáciu negatívnych dopadov na životné prostredie, a pod.

Cieľom mojej bakalárskej práce je navrhnúť robustné prediktívne riadenie pre proces neutralizácie za účelom dosiahnutia žiadanej hodnoty pH s požadovanou kvalitou riadenia a následné vyhodnotenie kvality riadenia graficky pomocou priebehov riadenej veličiny a analyticky s využitím časových a integrálnych ukazovateľov kvality riadenia. Reaktantami sú roztok slabšej kyseliny octovej a roztok silnej zásady hydroxidu sodného. Pred samotným návrhom riadenia je potrebné identifikovať vstupno-výstupné matematické modely laboratórneho chemického reaktora vo forme prenosových funkcií s intervalovými neurčitostami pre proces neutralizá-

cie pomocou experimentálne nameraných prechodových charakteristík. Neutralizáciu uskutočňujem v dvoch prípadoch, prvým je zmena prietoku roztoku kyseliny octovej pri konštantnom prietoku roztoku hydroxidu sodného a druhým je zmena prietoku roztoku hydroxidu sodného pri konštantnom prietoku roztoku kyseliny octovej. Riadenou veličinou je hodnota pH na výstupe z laboratórneho chemického reaktora, riadiacou veličinou je napätie na čerpadlách, na ktorého zmenu zareaguje objemový prietok kyseliny alebo zásady na vstupe do laboratórneho chemického reaktora, pričom čerpadlá vystupujú ako akčné členy a pH senzor ako merací člen.

Kapitola 1

Teoretická časť

V teoretickej časti mojej bakalárskej práce sa zaoberám charakteristikou, vlastnosťami a prípravou použitých látok v rámci skúmaného procesu neutralizácie, ako aj bezpečnosťou pri práci s nimi. Uvažovanými reaktantami sú slabá kyselina octová a silná zásada hydroxid sodný. Ďalej sa zaoberám charakterizáciou titračnej krivky, teoretickými princípmi identifikácie prechodových charakteristík pomocou Strejcovej metódy, spôsobom aproximácie nameraných údajov pomocou polynómu, popisom uzavretého regulačného obvodu, rôznym kritériám kvality riadenia a nakoniec návrhu robustného prediktívneho riadenia pre proces neutralizácie prebiehajúci v laboratórnom chemickom reaktore.

1.1 Kyselina octová

Kyselina octová (CH_3COOH , kyselina etánová) je druhá najjednoduchšia jednosýtna organická (karboxylová) kyselina. Je jednou z najvýznamnejších priemyselných organických surovín. Používa sa v laboratóriu a aj v chemickom priemysle ako významné rozpúšťadlo pri príprave čistých chemických zlúčenín. Je jednou zo surovín na výrobu kyseliny salicylovej, ktorá je hlavnou zložkou liekov proti horúč-

kam a zápalom (*Acylpyrin*, *Aspirin*, *Anopyrin* a iné). Kyselina octová sa používa aj ako súčasť čistiacich prostriedkov na odstraňovanie vodného kameňa a vo forme octu v potravinárskom priemysle [1].

1.1.1 Vlastnosti kyseliny octovej

Za normálnych podmienok je to bezfarebná kvapalina ostrého zápachu, dokonale miešateľná s vodou, etanolom alebo dimetyléterom. Čistá bezvodá kyselina octová tuhne za nižších teplôt na bezfarebnú až bielu kryštalickú látku, pripomínajúcu ľad, preto sa taktiež nazýva *ľadová kyselina octová* (Obr. 1.1). Jej 8 % vodný roztok sa nazýva *ocot*, ktorý má výraznú kyslú chuť, charakteristický zápach a používa sa na dochucovanie jedál. Kyselina octová je hygroskopická, čo znamená, že pohlcuje vzdušnú vlhkosť [1].

V malých dávkach a pri dostatočnom zriedení s vodou nie je zdraviu škodlivá. Vyššie koncentrácie sú už agresívne a môžu spôsobiť pri kontakte s pokožkou rozsiahle popáleniny, ktoré sa môžu objaviť až po niekoľkých hodinách. Pri vdychnutí pár môže dôjsť k silnému poleptaniu slizníc, pri zasiahnutí očí zasa k poleptaniu rohovky, čo môže spôsobiť slepotu [1].

Základné fyzikálne vlastnosti sú uvedené v Tab. 1.1.

Tabuľka 1.1: Základné fyzikálne vlastnosti kyseliny octovej [1].

Vlastnosť	Hodnota	Jednotka
Molárna hmotnosť	60,0516	g mol^{-1}
Teplota topenia	16,6	$^{\circ}\text{C}$
Teplota varu	117,9	$^{\circ}\text{C}$
Hustota (kvapalina, 20°C)	1,055	g cm^{-3}
Hustota (pevná látka)	1,266	g cm^{-3}
Rozpustnosť vo vode	neobmedzene miešateľná	–



Obr. 1.1: Laidová kyselina octová [1].

1.1.2 Výskyt kyseliny octovej

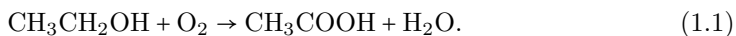
Kyselina octová je jedným z prírodných metabolitov v živých organizmoch. Aktívnou formou je jej komplex s koenzýmom A, označovaný ako *acetylkoenzým A* (acetyl-CoA), ktorý je jedným z najdôležitejších medziproduktov bunkového metabolismu sacharidov a tukov [1].

V rastlinách sa vyskytuje ako voľná kyselina a taktiež vo forme solí (octanov). Vo väčšom množstve je taktiež obsiahnutá v kvasnúcim ovocí, ako následný fermentačný produkt premeny sacharidov [1].

Kyselina octová tvorí prirodzenú zložku pošvového mazu u väčšiny primátov, vrátane človeka, kde pôsobí ako slabé antibakteriálne činidlo [1].

1.1.3 Biologická výroba kyseliny octovej

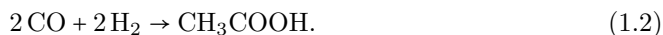
Zriedený vodný roztok kyseliny octovej sa získava biologickou oxidáciou etanolu podľa celkovej rovnice:



Roztok kyseliny octovej s vyššou koncentráciou vieme dosiahnuť následnou destiláciou [1].

1.1.4 Chemická syntéza kyseliny octovej

Chemická syntéza kyseliny octovej prebieha pomocou hydrogenácie oxidu uhoľnatého v prítomnosti katalyzátorov podľa rovnice:



Vyrába sa reakciou oxidu uhoľnatého s metanolom:



ktorá v súčasnosti predstavuje najpoužívanější spôsob na výrobu kyseliny octovej v priemysle [1].

1.1.5 Bezpečnosť pri práci s kyselinou octovou

Bezpečnosť pri práci s kyselinou octovou upravujú takzvané R (rizikové) a S (bezpečnostné) vety [1].

R vety pre kyselinu octovú:

- R10: Horľavá.
- R35: Spôsobuje ťažké poleptanie.

S vety pre kyselinu octovú:

- S1/2: Uchovávať uzamknuté a mimo dosahu detí.
- S23: Nevdychujte plyny/dym/páry/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, lúh sodný) je silne zásaditá anorganická zlúčenina. Má pestré využitie v chemickom priemysle (napr. výroba mydiel), v textilnom priemysle (výroba umelého hodvábu), vo vodárenských spoločnostiach pri úprave pitnej vody, v potravinárskom priemysle sa využíva pri spracovaní tukov a olejov. V domácnostiach sa využíva pri čistení odpadových potrubí a pri praní. V chemických laboratóriách sa používa kalibrovaný roztok hydroxidu sodného ako titračné činidlo pri kvantitatívnom stanovovaní obsahu kyselín vo vzorkách [2].

1.2.1 Vlastnosti hydroxidu sodného

Hydroxid sodný je v čistom stave pevná biela látka vyskytujúca sa najmä vo forme granulí (Obr. 1.2). Je to veľmi hygroskopická látka. Zo vzduchu pohlcuje oxid uhličitý, čím vzniká uhličitan sodný, a preto musí byť udržiavaná v hermeticky uzavretých nádobách. Vodný roztok hydroxidu sodného (min. 49 %) je bezfarebná číra viskózna kvapalina, ktorá kryštalizuje pri teplote pod 10 °C. Hydroxid sodný sa dobre rozpúšťa v etanole, metanole alebo vo vode, ale je nerozpustný v dietylétere. Jeho rozpúšťanie vo vode predstavuje exotermickú reakciu, čo znamená, že tento dej je sprevádzaný uvoľňovaním tepla do okolia, pričom sa roztok zohrieva [2].

Hydroxid sodný nie je horľavý ani výbušný, ale spôsobuje silné poleptanie tkanív v organizme. Pri použití spôsobuje najmä poleptanie pažeráka, na rozdiel od kyselín, ktoré spôsobujú poleptanie žalúdka. Avšak pri väčšom použití hydroxidu sodného môže dôjsť aj k poleptaniu žalúdka a tenkého čreva. Pri zasiahnutí očí veľmi vážne poškodzuje zrak, pretože rýchlo preniká do rohovky a prednej očnej komory, čo môže viesť k strate zraku [2].

Základné fyzikálne vlastnosti sú uvedené v Tab. 1.2.



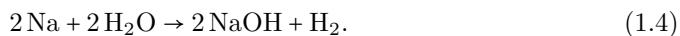
Obr. 1.2: Hydroxid sodný.

Tabuľka 1.2: Základné fyzikálne vlastnosti hydroxidu sodného [2].

Vlastnosť	Hodnota	Jednotka
Molárna hmotnosť	39,997	g mol^{-1}
Teplota topenia	318,4	$^{\circ}\text{C}$
Teplota varu	1390,0	$^{\circ}\text{C}$
Hustota (20°C)	2,130	g cm^{-3}
Rozpustnosť vo vode (20°C)	1087	g dm^{-3}

1.2.2 Príprava hydroxidu sodného

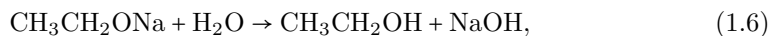
Hydroxid sodný vzniká búrlivou exotermickou reakciou kovového sodíka s vodou za vzniku plynného vodíka, pričom v prítomnosti vzdušného kyslíka vzplanie vznikajúci vodík [2]:



Ďalej môžeme hydroxid sodný pripraviť rozpúšťaním oxidu sodného vo vode [2]:



Taktiež sa uvoľňuje zo solí veľmi slabých kyselín:



kde príkladom takejto reakcie je hydrolýza alkoholátov sodných, napr. etanolát sodný [2].

1.2.3 Bezpečnosť pri práci s hydroxidom sodným

Bezpečnosť práce s hydroxidom sodným upravujú nasledujúce R (rizikové) a S (bezpečnostné) vety [2]:

R veta pre hydroxid sodný:

- R35: Spôsobuje ťažké poleptanie.

S vety pre hydroxid sodný:

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

1.3 Strejcova metóda identifikácie dynamických systémov vyšších rádov

Na kvalitné navrhnutie pokročilého riadenia dynamického procesu neutralizácie v laboratórnom chemickom reaktore je veľmi dôležité získať správny matematický model procesu. Na získanie kvalitného modelu procesu slúži identifikácia systému.

Cieľom identifikácie je získať kvalitný vstupno-výstupný model vo forme prenosovej funkcie, ktorá bude modelovať komplexné správanie sa riadeného systému. Parametre prenosovej funkcie sa identifikujú pomocou Strejcovej metódy.

Neznáme parametre prenosovej funkcie sa vypočítajú na základe experimentálne nameraných prechodových charakteristík.

Prenosová funkcia (*prenos*) $G(s)$ dynamického systému je definovaný ako podiel Laplaceovho obrazu výstupnej veličiny a Laplaceovho obrazu vstupnej veličiny pri nulových začiatočných podmienkach:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}, \quad (1.7)$$

kde s je argument Laplaceovej transformácie, $Y(s)$ je Laplaceov obraz výstupnej veličiny a $U(s)$ je Laplaceov obraz vstupnej veličiny [8].

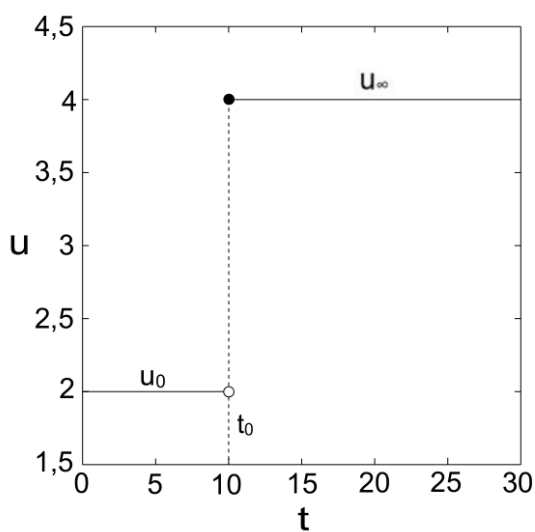
Strejcova metóda identifikácie je založená na vyhodnotení odmeranej odozvy systému na skokovú zmenu jednej zo vstupných veličín, pričom ostatné vstupné veličiny sa zachovávajú konštantné (Obr. 1.3). Je nutné, aby bol pred uskutočnením skokovej zmeny skúmaný systém v ustálenom stave, čiže, z pohľadu odchýlkových veličín, pri nulových začiatočných podmienkach. Časový priebeh výstupnej veličiny, ktorý je odozvou na skokovú zmenu jednej zo vstupných veličín pri nulových začiatočných podmienkach, nazývame *reálnou prechodovou charakteristikou* (Obr. 1.4) [8].

Prechodová charakteristika je grafické zobrazenie prechodovej funkcie. *Prechodová funkcia* je odozva dynamického systému na jednotkovú skokovú zmenu vstupnej veličiny pri nulových začiatočných podmienkach [16].

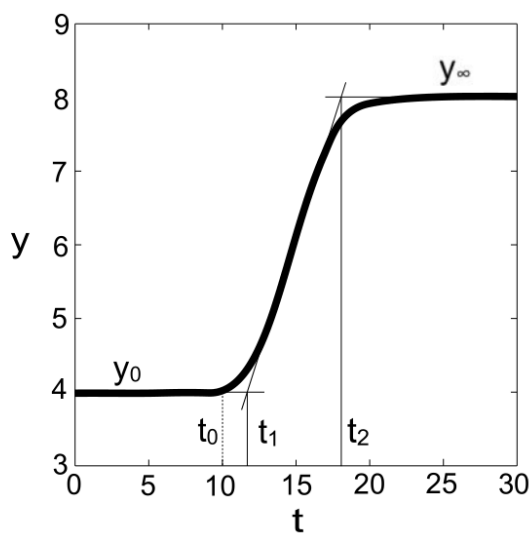
Výsledný prenos má tvar:

$$G(s) = \frac{Z}{(Ts + 1)^n} e^{-Ds}, \quad (1.8)$$

kde Z je zosilnenie systému, T časová konštanta systému, D dopravné oneskorenie systému a n je rád systému, ktoré potrebujeme určiť [8].



Obr. 1.3: Skoková zmena vstupnej veličiny [6].



Obr. 1.4: Reálna prechodová charakteristika zobrazujúca odozvu systému na skokovú zmenu vstupnej veličiny s dotyčnicou priloženou v inflexnom bode [6].

Zosilnenie Z je hodnota, na ktorej sa systém ustáli pri jednotkovej skokovej zmene vstupnej veličiny pri nulových začiatočných podmienkach [8].

Časová konštanta T je hodnota, ktorá udáva, ako rýchlo sa po skokovej zmene vstupnej veličiny výstup ustáli na novej hodnote [8].

Dopravné oneskorenie D predstavuje čas, za ktorý sa zmena na vstupe prejaví zmenou na výstupe [8].

Rád dynamického systému n určuje rád polynómu v menovateli prenosu [8].

Zosilnenie Z určíme z nameranej prechodovej charakteristiky pomocou vzťahu:

$$Z = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{y_{\infty} - y_0}{u_{\infty} - u_0}, \quad (1.9)$$

kde y_{∞} je ustálená hodnota výstupu po skokovej zmene, y_0 je hodnota výstupu v čase skokovej zmeny (t_0), u_0 je hodnota vstupu v čase skokovej zmeny (t_0) a u_{∞} je hodnota vstupu po skokovej zmene [8].

Z nameranej prechodovej charakteristiky ďalej určíme pomocné časové údaje, teda čas prietahu t_u a čas nábehu t_n , ktoré sú podľa Obr. 1.4 definované nasledovne:

$$t_u = t_1 - t_0, \quad (1.10)$$

$$t_n = t_2 - t_1, \quad (1.11)$$

kde časy t_1 a t_2 získame priložením dotyčnice v inflexnom bode prechodovej charakteristiky a t_0 je čas, kedy nastala skoková zmena [8].

Zo získaných časových údajov vypočítame pomocný parameter f_s z podielu:

$$f_s = t_u/t_n. \quad (1.12)$$

Tento parameter porovnáme s hodnotami parametrov $f(n)$ v Tab. 1.3, pričom k hodnote parametra f_s prislúcha najbližšia menšia hodnota $f(n)$. Na základe získanej hodnoty parametra $f(n)$ sa určí rád dynamického systému n a hodnota parametra $g(n)$ [8].

Dopravné oneskorenie systému D získame zo vzťahu [8]:

$$D = (f_s - f(n)) t_n. \quad (1.13)$$

Tabuľka 1.3: Tabuľka pre Strejcovu metódu identifikácie [8].

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

Časovú konštantu systému T získame zo vzťahu [8]:

$$T = g(n) t_n, \quad (1.14)$$

čím sú dopočítané všetky neznáme parametre identifikovaného systému (1.8).

1.4 Aproximácia nameraných údajov pomocou polynómu

Aproximáciu nameraných dát vykonávame vtedy, keď sa snažíme opísať správanie systému vzhľadom na množinu nameraných bodov.

Jednou z najpoužívanějších aproximačných funkcií je polynóm, nakoľko má vhodné vlastnosti, ako spojitosť, hladkosť, z čoho vyplýva aj jeho diferencovateľnosť, ktorá je využívaná mnohými optimalizačnými nástrojmi. Pri aproximácii nameraných dát polynómom sa snažíme minimalizovať sumu štvorcov odchýliek aproximujúceho polynómu od nameraných údajov.

Tento optimalizačný problém má ohraničenia v tvare rovnosti, je konvexný a jeho účelová funkcia a ohraničenia majú tvar [14]:

$$\min_a \sum_{i=1}^m (\hat{y}_i - y_i)^2, \quad (1.15)$$

$$\text{v.n.: } \hat{y}_i = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2^2 + a_3 x_3^3 + \dots + a_r x_i^r, \quad (1.16)$$

kde x_i sú príslušné súradnice nezávislej premennej, y_i sú namerané hodnoty, $\hat{y}_i$ sú funkčné hodnoty aproximačného polynómu v bodoch x_i , a_r sú koeficienty aproxi-

mačného polynómu, r je rád aproximačného polynómu a m je počet nameraných údajov.

Výhodou daného optimalizačného problému je, že sa dá transformovať do maticového tvaru, zachováva si konvexnosť a stáva sa z neho optimalizačný problém bez ohraničení v tvare [14]:

$$\arg \min_a (Ma - y)^\top (Ma - y), \quad (1.17)$$

kde matica $M \in \mathbb{R}^{(m \times p)}$, obsahuje bázické funkcie premenných x_i , ktoré násobia i -ty koeficient aproximačného polynómu a_i , p je počet členov aproximačného polynómu. Aproximovanie ľubovoľnou kombináciou bázických premenných predstavuje z pohľadu výpočtovej zložitosti jednoduchý optimalizačný problém, ktorý je možné riešiť analyticky. Vektor $y \in \mathbb{R}^m$ obsahuje namerané hodnoty y_i . Vektor koeficientov a má $(r + 1)$ prvkov a obsahuje všetky optimalizované premenné a_i , ktoré vypočítame zo vzťahu:

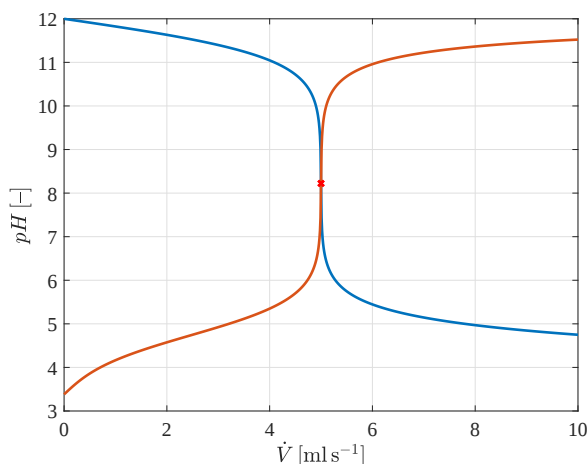
$$a^* = (M^\top M)^{-1} M^\top y. \quad (1.18)$$

Mať k dispozícii analytické riešenie optimalizačného problému je výhoda, pretože väčšinu optimalizačných problémov je potrebné riešiť cez rôzne nástroje matematického programovania, napr. lineárne programovanie, kvadratické programovanie, a pod. Tieto prístupy si vyžadujú iteračný výpočet. Z toho vyplývajú ďalšie teoretické a numerické problémy, ako je garancia konvergenzie, tolerancia-/presnosť riešenia, a pod. [14].

1.5 Titračná krivka

Titračná krivka vyjadruje závislosť pH titrovaného roztoku (*titrandu*) od objemu pridávaného skúmadla (*titrantu*) alebo od stupňa titrácie. Podľa relatívnej sily kyseliny alebo zásady rozlišujeme 5 typov titrácií [11]:

1. titrácia silnej kyseliny silnou zásadou,



Obr. 1.5: Titračná krivka: titrácie silnej zásady slabou kyselinou (modrá), titrácie slabej kyseliny silnou zásadou (červená), bod ekvivalencie titrácie (červený krížik) [12].

2. titrácia silnej zásady silnou kyselinou,
3. titrácia slabej kyseliny silnou zásadou,
4. titrácia slabej zásady silnou kyselinou,
5. titrácia viacsýtnych kyselín.

Každý typ titrácie má svoj charakteristický tvar titračnej krivky. V mojej práci som sa zaoberal dôsledkami dvoch typov titrácie. Prvou bola titrácia silnej zásady (hydroxid sodný) slabou kyselinou (kyselinou octovou), ktorá má tvar titračnej krivky znázornený na Obr. 1.5 (modrá). Aj keď tento typ titrácie nepatrí medzi spomínané typy titrácií, pre potreby Experimentálnej časti mojej práce má praktický význam z pohľadu návrhu časti riadiaceho systému. Druhou bola titrácia slabej kyseliny (kyseliny octovej) silnou zásadou (hydroxidom sodným), ktorej analytický vypočítaný tvar titračnej krivky je znázornený na Obr. 1.5 (červená) [11].

1.6 Uzavretý regulačný obvod

V každom odvetví priemyselnej výroby vieme identifikovať procesy, ktoré sú schopné pri optimálnom riadení znížiť náklady na výrobu a zároveň zvýšiť množstvo alebo kvalitu vyrobeného produktu. Mnoho automatizovaných procesov taktiež znižuje riziko pracovných úrazov v podnikoch, pretože vykonávajú práce, ktoré by mohli byť pre človeka život ohrozujúce. Práve vďaka týmto faktorom je takmer nevyhnutné zaoberať sa návrhom optimálneho riadenia automatizovaných procesov.

Uzavretý regulačný obvod (URO) predstavuje efektívny spôsob spätnoväzbového riadenia so zápornou spätnou väzbou. Na Obr. 1.6 je zobrazená bloková schéma uzavretého regulačného obvodu, kde $W(s)$ je Laplaceov obraz žiadanej veličiny $w(t)$, $E(s)$ je Laplaceov obraz regulačnej odchýlky $e(t)$, $R(s)$ je Laplaceov obraz poruchy $r(t)$, $U(s)$ je Laplaceov obraz riadiacej veličiny $U(t)$ po saturácii, $u(t)$ je odchýlková riadiaca veličina, U^S je ustálená riadiaca veličina, $U'(s)$ je Laplaceov obraz riadiacej veličiny $U'(t)$ pred saturáciou, $Y(s)$ je Laplaceov obraz riadenej veličiny $y(t)$ so započítanou poruchou a $Y_S(s)$ je Laplaceov obraz riadenej veličiny $y_S(t)$ bez poruchy. Blok $G_R(s)$ predstavuje prenos regulátora, blok $G_A(s)$ prenos akčného člena, blok $G_P(s)$ prenos riadeného procesu, blok $G_M(s)$ prenos meracieho člena a všetky tieto tri bloky môžeme uzavrieť do jedného spoločného bloku $G_S(s)$, ktorý predstavuje prenos riadeného systému. Posledným blokom je blok $G_{PR}(s)$, ktorý predstavuje prenos poruchy [9].

Cieľom riadenia je dosiahnuť stav, aby hodnota riadenej veličiny $y(t)$ dosiahla hodnotu žiadanej veličiny $w(t)$. Merací člen slúži na to, aby nám poskytoval fyzikálnu hodnotu riadenej veličiny $y(t)$ v danom čase t . Táto hodnota sa odpočíta od žiadanej hodnoty, čo nám udáva hodnotu regulačnej odchýlky $e(t)$, a preto danému obvodu hovoríme, že je uzavretý so zápornou spätnou väzbou. Údaj o regulačnej odchýlke spracováva regulátor a na základe zákona riadenia vypočíta akčný zásah $u(t)$. Vzhľadom na to, že regulátor pracuje s odchýlkovými veliči-

nami, akčný zásah z regulátora nemôže ísť priamo do akčného člena, pretože sa jedná o odchýlkovú veličinu a nie fyzikálnu, s ktorou pracuje akčný člen. Preto je potrebné k akčnému zásahu z regulátora pripočítať ustálenú hodnotu riadiacej veličiny U^S . Týmto sa dosiahne fyzikálna hodnota riadiacej veličiny, ktorá už môže byť poslaná do akčného člena. Ešte predtým, ako sa aplikuje táto hodnota do akčného člena, je vhodné použiť *saturáciu*, kde nastavíme hodnoty podľa toho, v akom minimálnom a maximálnom rozsahu môže daný akčný člen pracovať. Akčný člen na základe takto upraveného signálu z regulátora uskutoční zmenu riadiacej veličiny [9].

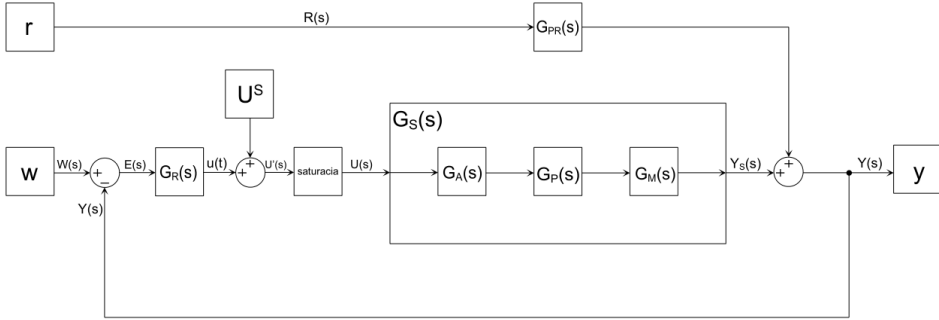
Žiadaná veličina $w(t)$ a poruchová veličina $r(t)$ predstavujú vstupné veličiny uzavretého regulačného obvodu, z čoho vyplýva, že pri opisovaní jeho dynamických vlastností uvažujeme odozvu na žiadanú veličinu a odozvu na poruchovú veličinu. Regulátor teda zabezpečuje úlohu sledovania a úlohu regulácie [8]. *Úloha sledovania*: vyhodnocuje zabezpečenie dosiahnutia žiadanej veličiny $w(t)$ pri nulovej poruche $r(t)$. *Úloha regulácie*: vyhodnocuje zabezpečenie odstránenia vplyvu poruchy $r(t)$ pri nulovej žiadanej veličine $w(t)$.

Podmienky na správne navrhnutý uzavretý regulačný obvod sú [8]:

- musí byť stabilný (*stabilita* URO),
- riadená veličina musí dosiahnuť, čo najpresnejšie a najrýchlejšie sledovanie žiadanej veličiny (*úloha sledovania*),
- musí dosiahnuť minimalizáciu vplyvu porúch na riadený proces (*úloha regulácie*).

1.7 Ukazovatele kvality riadenia

Kvalitu riadenia vieme posúdiť z grafického priebehu riadenej a riadiacej veličiny vzhľadom na žiadanú veličinu. Slúžia nám na to *časové* a *integrálne* ukazovatele



Obr. 1.6: Bloková schéma uzavretého regulačného obvodu [8].

kvality riadenia.

1.7.1 Časové ukazovatele kvality riadenia

Medzi základné časové ukazovatele kvality riadenia patria [8]:

Trvalá regulačná odchýlka (TRO, e_∞) je určená ako rozdiel medzi žiadanou w a riadenou y veličinou v novom ustálenom stave po vykonaní skokovej zmeny. Je teda daná vzťahom:

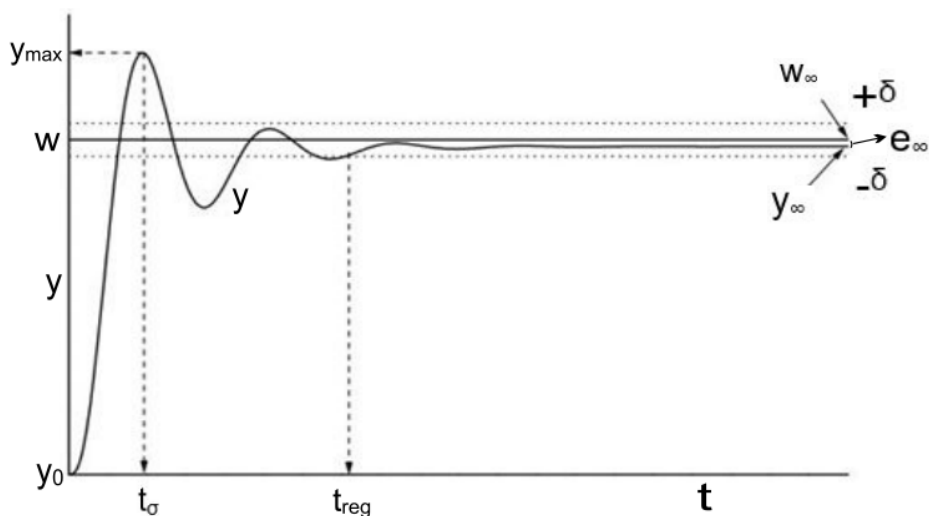
$$e_\infty = w_\infty - y_\infty. \quad (1.19)$$

Maximálne preregulovanie $\sigma_{\max}$ je dané v percentách a udáva veľkosť maximálnej odchýlky riadenej veličiny od jej normovanej hodnoty v ustálenom stave. Vypočítame ho podľa vzťahu:

$$\sigma_{\max} = \frac{y_{\max} - y_\infty}{y_\infty - y_0} \times 100 \%. \quad (1.20)$$

Čas maximálneho preregulovania t_σ je čas, v ktorom nastane maximálne preregulovanie.

Čas regulácie t_{reg} je čas, v ktorom sa riadená veličina natrvalo dostane do δ -okolía žiadanej veličiny. δ -okolie vyjadruje v akej maximálnej alebo minimálnej



Obr. 1.7: Odozva uzavretého regulačného obvodu na skokovú zmenu vstupnej veličiny [8].

trvalej regulačnej odchýlke budeme akceptovať novú ustálenú hodnotu riadenej veličiny.

Uvedené časové ukazovatele kvality riadenia sú zobrazené na Obr. 1.7.

1.7.2 Integrálne ukazovatele kvality riadenia

Medzi základné integrálne ukazovatele kvality riadenia patria [16]:

Integrál regulačnej odchýlky (angl.: *Integral of Error*, IE) je najjednoduchším integrálnym ukazovateľom kvality riadenia a jeho hodnota je daná pomocou vzťahu:

$$IE = \int_0^{\infty} e(t) dt. \quad (1.21)$$

Nevýhodou tohto ukazovateľa je to, že môže nadobúdať nulové hodnoty pri periodickom priebehu riadenej veličiny, pretože sa kladné a záporné časti regulačnej odchýlky odčítavajú. Práve z tohto dôvodu je ukazovateľ vhodný iba pre aperi-

odické regulačné pochody. Konečnú hodnotu nadobúda len pri odstránení trvalej regulačnej odchýlky.

Integrál absolútnej hodnoty regulačnej odchýlky (angl.: *Integral Absolute Value of Error*, IAE), na rozdiel od IE je jeho výhodou to, že neskresľuje informácie o regulačnom pochode, a preto je vhodný aj pri periodických pochodoch. Rovnako ako pri IE, vieme získať jeho konečnú hodnotu len pri odstránení trvalej regulačnej odchýlky. Z pohľadu optimalizácie môže byť nevýhodou kritéria IAE to, že táto funkcia nie je hladká, a to práve v optime. Hodnotu IAE vypočítame pomocou vzťahu:

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt. \quad (1.22)$$

Integrál kvadrátu regulačnej odchýlky (angl.: *Integral Squared Value of Error*, ISE) má podobné vlastnosti ako IAE, avšak jeho výhodou na rozdiel od IAE je hladkosť funkcie. Nevýhodou ukazovateľa je, že dáva väčšiu prioritu regulačným odchýlkam väčším ako jedna a zároveň menšiu prioritu regulačným odchýlkam menším ako jedna. Hodnotu ISE vypočítame pomocou vzťahu:

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt. \quad (1.23)$$

Integrál absolútnej hodnoty regulačnej odchýlky s penalizovaním času regulácie (angl.: *Integral Time Multiplied Absolute Value of Error*, ITAE) je ukazovateľ kvality odvodený od IAE, ktorý zároveň penalizuje čas regulácie. Vypočítame ho pomocou vzťahu:

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt. \quad (1.24)$$

Integrál kvadrátu regulačnej odchýlky s penalizovaním času regulácie (angl.: *Integral Time Multiplied Squared Value of Error*, ITSE) je ukazovateľ odvodený od ISE, ktorý zároveň penalizuje čas regulácie. Vypočítame ho pomocou vzťahu:

$$ITSE = \int_0^{\infty} t e^2(t) dt. \quad (1.25)$$

Integrál kvadrátu odchýlkovej riadiacej veličiny (angl.: *Integral Squared Value of Deviation Control Variable*, ISU) je odvodený od ISE, avšak na rozdiel od hodnotenia kvality na základe regulačnej odchýlky sa kvalita vyhodnocuje na základe riadiacej veličiny. Vypočítame ho pomocou vzťahu:

$$ISU = \int_0^{\infty} u^2(t) dt. \quad (1.26)$$

V mojej práci budem používať dva integrálne ukazovatele kvality riadenia, a to ISE a ISU.

1.8 Robustné prediktívne riadenie

Prediktívne riadenie založené na modeli je metódou riadenia vhodnou pre riadenie pokročilých riadených systémov. Hlavnou výhodou tohto prístupu k riadeniu je, že funguje na princípoch optimalizácie akčných zásahov v každom kroku riadenia zvoleného časového úseku. Tým sa zabezpečuje minimalizácia nežiadúceho vplyvu porúch pri riadení systému. Pri výpočte akčných zásahov sa využívajú predikcie (odhady), ako sa bude riadený systém správať v budúcnosti. Takýto princíp riadenia sa označuje ako MPC (angl.: *Model Predictive Control*). MPC rovnako ako ďalšie metódy riadenia, napr. PID regulátory (angl.: *Proportional–Integral–Derivative Controller*), LQR (angl.: *Linear-Quadratic Regulator*) zabezpečuje úlohu sledovania a úlohu regulácie. Avšak dôležitou výhodou MPC oproti uvedeným metódam riadenia je, že pri určení optimálneho akčného zásahu sa berú do úvahy aj ohraničenia, ktoré sa mnohokrát vyskytujú pri riadení reálnych systémov, a ktoré môžu byť na riadiace, riadené veličiny, ako aj na model systému [10].

Ak sa pri identifikácii riadeného systému získa model, ktorý má odchýlky od riadeného systému, ktoré nie sú zanedbateľné, tak je vhodné uvažovať vplyv neurčitostí modelu. Často aplikovaným prístupom je identifikovať, tzv. *intervalové neurčitosti*, teda hranice intervalov hodnôt, v ktorých sa nachádzajú jednotlivé parametre prenosov. V takomto prípade je vhodné použiť rozšírenú formu MPC, a

to robustné prediktívne riadenie (angl.: *Robust Model Predictive Control*, RMPC). Tento prístup je schopný do istej miery veľmi dobre kompenzovať aj nelineárne a nesymetrické správanie sa riadených systémov [10].

Robustné prediktívne riadenie použité v uzavretom regulačnom obvode má nasledujúce vlastnosti [10]:

- riadenie je realizované v diskretnom čase,
- optimalizácia akčných zásahov v každom kroku riadenia zvoleného časového úseku (predikčný horizont),
- riadenie s ohľadom na nezanedbateľné odchýlky modelu od riadeného systému,
- riadenie mnohorozmerných systémov (výhoda v porovnaní s PID regulátormi),
- dokáže pracovať s ohraničeniami na riadiace a riadené veličiny, ako aj na model systému (výhoda v porovnaní s LQR, ktoré zohľadňuje len ohraničenia na model systému v tvare rovností),
- efektívna kompenzácia vplyvov porúch.

Zavedenie robustného prediktívneho riadenia v priemyselnej produkcii je výhodné z pohľadu napríklad zníženia spotreby vstupných surovín, zníženia nákladov pri výrobe, a tým zvýšeniu zisku, zvýšeniu kvality vyrobených produktov, ako aj zvýšeniu ochrany životného prostredia [15].

1.8.1 Optimalizačný problém návrhu MPC

Ak chceme riadiť systém pomocou prediktívneho riadenia (MPC) musíme riešiť optimalizačný problém, ktorý pozostáva z účelovej funkcie a z ohraničení, ktoré

sú v tvare rovností alebo v tvare nerovností. Tvar optimalizačného problému pre *nomínálne* MPC, teda bez uvažovania neurčitostí je nasledovný [10]:

$$\min_{u_0, u_1, \dots, u_{N-1}} x_k^\top P x_k + \sum_{k=0}^{N-1} (x_k^\top Q x_k + u_k^\top R u_k), \quad (1.27)$$

$$\text{v.n.: } x_{k+1} = A x_k + B u_k, \quad (1.28)$$

$$y_k = C x_k, \quad (1.29)$$

$$u_{\min} \leq u_k \leq u_{\max}, \quad (1.30)$$

$$y_{\min} \leq y_k \leq y_{\max}, \quad (1.31)$$

$$x_k = x(0), \quad (1.32)$$

$\forall k \geq 0$, kde N je zvolený časový úsek, resp. počet krokov predikčného horizontu, x je vektor stavov riadeného systému, a ak by bolo h počet stavov riadeného systému, tak $x \in \mathbb{R}^h$, u je vektor vstupov riadeného systému, a ak by bolo l počet vstupov riadeného systému, tak $u \in \mathbb{R}^l$, y je vektor výstupov riadeného systému, a ak by bolo j počet výstupov riadeného systému, tak $y \in \mathbb{R}^j$. A je stavová matica s rozmermi $h \times h$, B je matica vstupov s rozmermi $h \times l$, C je matica výstupov s rozmermi $j \times h$.

Matice P , Q a R sú tzv. váhové matice. Matice P a Q penalizujú kvadratickú odchýlku stavov riadeného systému od ustáleného stavu. Matica R penalizuje kvadratickú odchýlku akčných zásahov riadeného systému od ustáleného stavu. Maticu R teda môžeme jednoducho chápať ako určenie ceny akčných zásahov použitých na riadenie systému. To znamená, že nám určí, ako veľmi chceme minimalizovať akčné zásahy použité na riadenie systému. Ak teda používame viac ako jeden akčný zásah na riadenie systému, tak váhová matica R dokáže určiť aj to, ktorý z použitých akčných zásahov je lepšie použiť, aby bolo riadenie systému optimálne, a tým sa nám minimalizujú náklady na výrobu a zároveň maximalizuje zisk. V rámci mojej bakalárskej práce sa jedná o množstvo použitého roztoku kyseliny octovej alebo roztoku hydroxidu sodného na dosiahnutie žiadanej hodnoty pH s požadovanou kvalitou. Vektory $u_{\min}$, $u_{\max}$, $y_{\min}$ a $y_{\max}$ sú obmedzenia na akčné zásahy

a výstupy riadeného systému. Sú vopred určené, či už technickými špecifikáciami riadeného systému alebo presnými nárokmi na požadovanú kvalitu vyrábaného produktu. Ohraničenie (1.32) nám udáva, že optimalizácia začína v každom kroku z nového počiatočného stavu riadeného systému [10].

Hlavnou prioritou tohto optimalizačného problému teda nie je len zabezpečiť stabilitu riadeného systému, ale rovnako vysoko dbať aj na kvalitu riadenia. Práve preto na dosiahnutie vysokej kvality riadenia minimalizujeme kvadrát odchýliek stavov riadeného systému, aby sme získali požadovanú hodnotu žiadanej veličiny, a taktiež minimalizujeme kvadrát odchýliek akčných zásahov riadeného systému, čím minimalizujeme náklady na výrobu produktov [10].

Z uvedených informácií o definovaní optimalizačného problému prediktívneho riadenia teda vyplýva, že ak chceme takto efektívne riadiť nejaký systém, tak musíme získať, čo najpresnejší jeho model a zároveň musíme naladiť vhodné váhové matice P , Q a R [10].

Niekedy je vhodné použiť na riadenie systému rozšírenú formu MPC, tzv. robustné MPC. Dôvody sú uvedené v kapitole 1.8 *Teoretickej časti* tejto práce. Vzhľadom na to, že získavame pri identifikácii riadeného systému jeho neurčitý model, tak nás zaujíma hlavne jeho hraničné správanie. A to je dôvod, prečo riadený systém nie je popísaný iba jedným nominálnym matematickým modelom, ale viacerými vstupno-výstupnými modelmi. Preto, ak chceme riadiť pomocou robustného prediktívneho riadenia musíme uvažovať celú množinu hraničných (vrcholových) vstupno-výstupných modelov. Neurčitosť modelu nám teda spôsobuje väčší počet ohraničení a optimalizačný problém bude náročnejší na výpočet. Takýto optimalizačný problém pozostáva z účelovej funkcie a ohraničení, ktoré sú v tvare

lineárnych maticových nerovností a má nasledovný tvar [13]:

$$\min_{\gamma} \gamma, \quad (1.33)$$

$$\text{v.n.:} \begin{bmatrix} X & (A_v X + B_v Y)^\top & (Q^{1/2} X)^\top & (R^{1/2} Y)^\top \\ (A_v X + B_v Y) & X & 0 & 0 \\ Q^{1/2} X & 0 & \gamma I & 0 \\ R^{1/2} Y & 0 & 0 & \gamma I \end{bmatrix} \geq 0, \quad (1.34)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & x_k^\top \\ x_k & X \end{bmatrix} \geq 0, \quad (1.35)$$

$$\begin{bmatrix} u_{\max}^2 I & Y \\ Y^\top & X \end{bmatrix} \geq 0, \quad (1.36)$$

$$\begin{bmatrix} X & (C_v(A_v X + B_v Y))^\top \\ C_v(A_v X + B_v Y) & y_{\max}^2 I \end{bmatrix} \geq 0, \quad (1.37)$$

kde γ je koeficient zmrštenia elipsoidu, I je jednotková matica, X je inverzná matica k Ljapunovovej matici P , ktorá zabezpečuje stabilitu riadeného systému a rovnako ako matica P je symetrická (štvorcová) a pozitívne definitná, čiže jej vlastné čísla sú kladné a $P = \gamma X^{-1}$. Y je pomocná matica ladenia matice K , ktorá predstavuje regulátor a je medzi nimi vzťah [10]:

$$K = Y X^{-1}. \quad (1.38)$$

Dolný index v pri maticiach A , B , C naznačuje to, že už nemáme iba jeden nominálny vstupno-výstupný model, ale uvažujeme celú množinu vrcholových vstupno-výstupných modelov.

Obmedzenia (1.34) – (1.37) ohraničujú hodnoty vlastných čísel matíc. Tento typ obmedzení voláme lineárne maticové nerovnosti (angl.: *Linear Matrix Inequalities*, LMI). Riešenie optimalizačného problému, ktorý má konvexnú účelovú funkciu a obmedzenia v tvare LMI nazývame semidefinitným programovaním (angl.: *Semidefinite Programming*, SDP) [10].

Ohraničenie (1.34) nám zabezpečuje vstup modelu do optimalizácie, zároveň je týmto ohraničením zabezpečená aj stabilita riadeného systému, ako aj kvalita riadenia. Istá forma energie riadeného systému pri dosahovaní ustáleného stavu musí s každým ďalším krokom podľa Ljapunovovej teórie stability klesať, a práve týmto ohraničením je zabezpečené klesanie hodnoty s predpísanou mierou/cenou, až pokiaľ sa nenadobudne ustálený stav [10].

Ohraničenie (1.35) nám zabezpečuje vstup merania do optimalizácie a tak tiež hovorí o stabilite riadeného systému. Súčasne hovorí aj o minimalizácii *invariantnej množiny* v tvare elipsoidu. Táto vlastnosť hovorí o tom, že ak sa raz do tejto množiny dostaneme, už z nej nevyjdeme von. Táto množina obsahuje stavy systému, ktoré vieme riadiť s garanciou Ljapunovovej stability. Tieto stavy sa snažíme dostať do ustáleného stavu. Naša žiadaná hodnota je ustálený stav, ktorý sa vždy nachádza v strede elipsoidu a je nulový v odchýlkovom tvare [10].

Ohraničenie (1.36) nám zabezpečuje obmedzenia na akčné zásahy (riadiacu veličinu) riadeného systému [10].

Ohraničenie (1.37) nám zabezpečuje obmedzenia na výstupy (riadenú veličinu) riadeného systému [10].

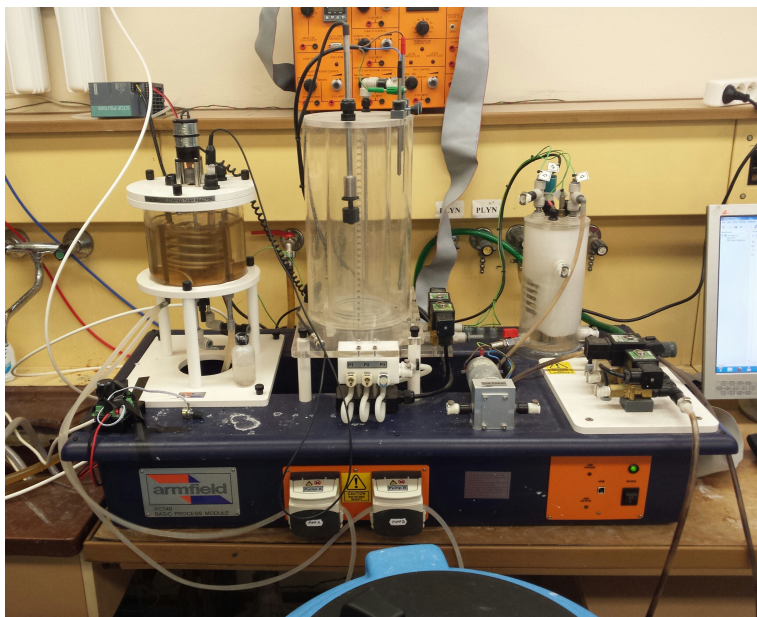
Optimalizačným problémom teda minimalizujeme koeficient zmrštenia, pretože stabilitu riadeného systému nám práve zaručuje jeho nízka hodnota, ktorá nám zároveň zabezpečuje aj invariantnosť množiny elipsoidu, a teda, že každý ďalší stav pri dosahovaní ustáleného stavu riadeného systému sa bude nachádzať v tejto množine a nikdy nie mimo nej [10].

Z uvedených informácií o definovaní optimalizačného problému robustného prediktívneho riadenia teda vyplýva, že ak chceme takto efektívne riadiť nejaký systém, tak musíme získať, čo najpresnejší jeho neurčitý model a zároveň musíme vybrať vhodné váhové matice Q a R [10].

Kapitola 2

Experimentálna časť

V experimentálnej časti mojej bakalárskej práce sa zaoberám riadením laboratórneho chemického reaktora Armfield PCT40 Basic Process Module. Spracovaná je kalibrácia čerpadiel aj pH senzora. Ďalej sa zaoberám identifikáciou procesu neutralizácie pomocou nameraných prechodových charakteristík pre prípad meniaceho sa prietoku roztoku kyseliny octovej a konštantného prietoku roztoku hydroxidu sodného ako aj meniaceho sa prietoku roztoku hydroxidu sodného a konštantného prietoku roztoku kyseliny octovej, na základe ktorých som získal vstupno-výstupné matematické modely s intervalovými neurčitostami. Zhotovené sú prevodové charakteristiky pre oba uvažované prípady, ktoré slúžia na správne pochopenie správania sa procesu neutralizácie, ako aj na zistenie rozsahu pracovných bodov. V tejto časti práce sa zaoberám aj aproximovaním dopravného oneskorenia pre oba prípady. Nakoniec sa zaoberám aplikovaniu robustného prediktívneho riadenia, ktoré slúži pre úlohu sledovania pH v reakčnej zmesi, ako aj vyhodnotením kvality riadenia.



Obr. 2.1: Laboratórny chemický reaktor Armfield PCT40.

2.1 Laboratórny chemický reaktor

Vo svojej práci sa zaoberám identifikáciou procesu neutralizácie, ktorý prebieha v laboratórnom chemickom reaktore Armfield PCT40 Basic Process Module (Obr. 2.1).

Tento proces predstavuje prietokový chemický reaktor s miešaním akčnej zmesi (angl.: *Continuous Stirred-Tank Reactor*, CSTR) a pozostáva zo všetkých častí, ktoré sú potrebné pre experimenty so spätnoväzbovými regulačnými obvodmi.

Chemický reaktor pozostáva z týchto zložiek: nosná konzola, veľká procesná nádoba, malá procesná nádoba s odporovým topením a tepelným výmenníkom, solenoidové ventily, zubové čerpadlo, peristaltické čerpadlá, reaktor s tepelným výmenníkom a s miešadlom [5].

2.2 Kalibrácia pH senzora

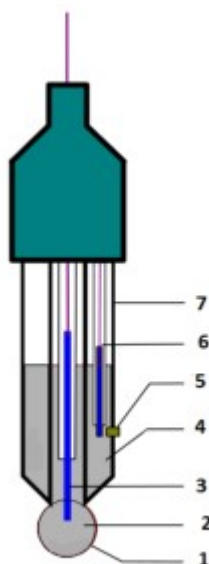
Pri meraní hodnoty pH v chemickom reaktore sa používa kombinovaný pH senzor značky GHM, ktorý spája referenčnú a indikačnú elektródu do jednej elektródy. Zložky takéhoto pH senzora sú na Obr. 2.2, pričom jednotlivé čísla predstavujú [3]:

1. sklenená membrána vyrobená zo špeciálneho skla,
2. vnútorný elektrolyt (kyslý trojmolárny roztok KCl),
3. indikačná elektróda,
4. vonkajší elektrolyt (kyslý trojmolárny roztok KCl),
5. styčný bod so študovaným roztokom,
6. referenčná elektróda,
7. telo elektródy vyrobené z nevodivého skla.

pH senzor predstavuje merací člen, ktorý slúži na získavanie aktuálnej hodnoty pH v reakčnej zmesi. Na zabezpečenie presnosti namerania údajov pH bolo potrebné vykonať takmer pred každým meraním kalibráciu pH senzora.

Kalibrácia predstavuje proces konfigurácie prístroja na poskytnutie výsledku pre vzorku v prijateľnom rozsahu [4]. Kalibrácia teda predstavuje súbor meraní, pomocou ktorých vieme určiť závislosť medzi dvoma údajmi, na základe meraní niekoľkých referenčných látok so známou hodnotou meranej veličiny. Túto závislosť vieme zobraziť na tzv. *kalibračnej krivke*.

pH senzor nemeria pH hodnotu priamo, a preto som meral napätie, ktoré v roztoku spôsobujú častice s elektrickým nábojom (ióny: anióny a kationy). pH senzor meria napätie v rozsahu 0 – 5 V. Kalibrácia pH senzora v mojom prípade znamenala, že som odmeral napätie U troch referenčných roztokov, ktorých pH bolo 4,01 (kyslý), 7,01 (neutrálny) a 10,01 (zásaditý). Získané hodnoty napätia pre



Obr. 2.2: pH senzor [3].

dané hodnoty pH referenčných roztokov sú uvedené v Tab. 2.1. Pomocou získaných údajov o napätí som zostrojil kalibračnú krivku pH senzora (Obr. 2.3), ktorá predstavuje závislosť hodnôt pH roztokov od napätia U roztokov. Táto závislosť je lineárna, a preto sa dá po vyhodnotení metódou najmenších štvorcov, zapísať pomocou rovnice v tvare priamky:

$$pH = kU + q = 2,3620U + 1,1365, \quad (2.1)$$

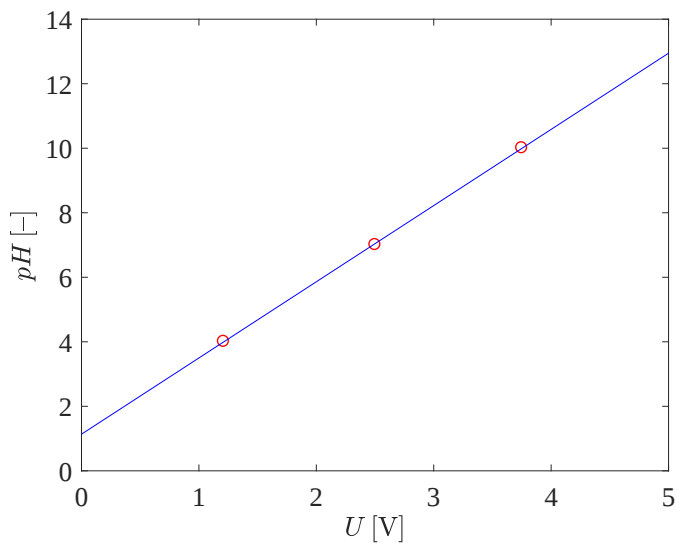
kde pH je hľadaná hodnota pH roztoku, U je namerané napätie na pH senzore, k je smernica kalibračnej krivky a q je úsek kalibračnej krivky. Pomocou rovnice (2.1) vieme prepočítavať namerané napätie na pH senzore na hľadanú hodnotu pH roztoku. Vďaka tejto závislosti vieme merať pH akéhokoľvek roztoku a nemusia to byť len dané referenčné roztoky.

V mojej bakalárskej práci som pracoval s 0,01 molárnym roztokom concen-

trovanej 99 % kyseliny octovej s výsledným $pH = 4,3$ a s 0,01 molárnym roztokom hydroxidu sodného s $pH = 11,8$.

Tabuľka 2.1: Hodnoty napätia U pre dané hodnoty pH referenčných roztokov.

$pH [-]$	$U [V]$
4,01	1,21
7,01	2,50
10,01	3,75



Obr. 2.3: Kalibračná krivka pH senzora (modrá), namerané hodnoty (◦).

2.3 Kalibrácia čerpadiel

Na riadenie procesu neutralizácie v chemickom reaktore sú potrebné dve čerpadlá, a to čerpadlo A a čerpadlo B, ktoré do chemického reaktora privádzajú kyselinu

a zásadu. Čerpadlo A privádza roztok slabšej kyseliny octovej a čerpadlo B roztok silnej zásady - hydroxidu sodného. V procese riadenia neutralizácie vystupujú čerpadlá ako akčné členy. Obe čerpadlá pracujú v rozsahu 0 – 5 V. Pričom 0 V je nulový objemový prietok kyseliny alebo zásady do chemického reaktora a pri 5 V je maximálny.

Kalibrácia čerpadiel je nutná, nakoľko aj napriek tomu, že pri rovnakom napätí by mali prečerpať rovnaký objemový prietok, nie je tomu tak, kvôli rôznemu opotrebovaniu čerpadiel. Musíme kalibrovať obidve čerpadlá, pretože pri meraní prechodových charakteristík sa najprv menil len objemový prietok čerpadla A, pričom objemový prietok čerpadla B bol konštantný, a potom len objemový prietok čerpadla B, pričom objemový prietok čerpadla A bol konštantný.

Kalibrácia čerpadiel prebiehala tak, že som pomocou odmerného valca odmeral prečerpávaný objem vody z nádoby pomocou čerpadla A za určitý čas a pri určitom napätí. Rovnako som postupoval aj pri čerpadle B. Objemový prietok pre čerpadlo A a čerpadlo B som následne určil ako podiel objemu odmeraného odmerným valcom a času, za ktorý sa objem vody prečerpá z vedra do odmerného valca. Namerané hodnoty sú uvedené v Tab. 2.2. Získané údaje som následne vyhodnotil lineárnou aproximáciou, ktorá je založená na metóde najmenších štvorcov, vďaka čomu som získal kalibračné krivky (Obr. 2.4) pre čerpadlo A a pre čerpadlo B. Tieto kalibračné krivky predstavujú závislosť hodnôt objemových tokov $\dot{V}_A$, $\dot{V}_B$ čerpadla A a B od napätia U :

$$\dot{V}_A = k_A U_A + q_A = 2,4300 U_A - 1,2767, \quad (2.2)$$

$$\dot{V}_B = k_B U_B + q_B = 2,9100 U_B - 1,9867, \quad (2.3)$$

kde U_A , U_B je napätie na jednotlivých čerpadlách A a B, k_A , k_B sú smernice kalibračných kriviek, $\dot{V}_A$, $\dot{V}_B$ sú objemové prietoky jednotlivých čerpadiel A a B a q_A , q_B sú úseky kalibračných kriviek.

Tabuľka 2.2: Namerané hodnoty pre kalibráciu čerpadiel.

U [V]	$\dot{V}_A$ [ml s ⁻¹]	$\dot{V}_B$ [ml s ⁻¹]
1	1,08	1,25
2	3,33	3,50
3	6,25	6,67
4	9,00	9,50
5	10,40	12,80

2.4 Prevodová charakteristika procesu

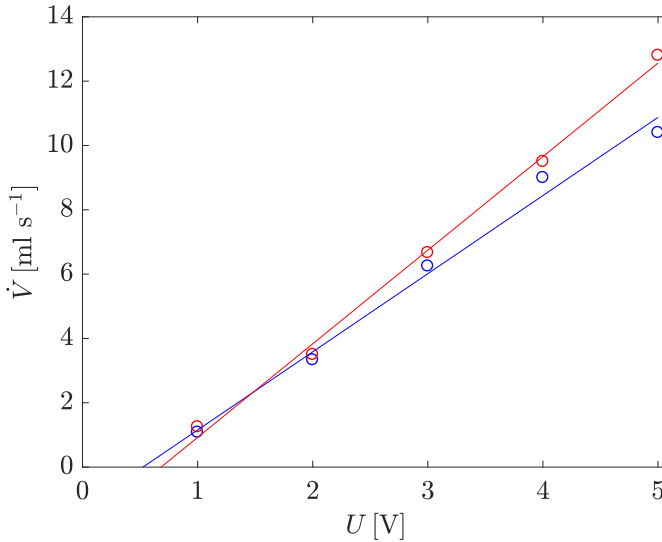
V rámci experimentálnej časti mojej práce bolo potrebné, aby som nameral prevodovú (statickú) charakteristiku procesu neutralizácie roztoku kyseliny octovej s roztokom hydroxidu sodného.

Prevodová charakteristika nám umožňuje analyzovať základné vlastnosti procesu dôležité z pohľadu riadenia, akými sú napríklad nelineárne a nesymetrické správanie sa systému, rozsah pracovných bodov a pod. V mojom prípade som zostrojil až dve prevodové charakteristiky, nakoľko sa snažím dôkladne opísať proces neutralizácie s ohľadom na meniaci sa prietok roztoku kyseliny, aj roztoku zásady.

Prevodová (statická) charakteristika procesu vyjadruje závislosť medzi výstupnou veličinou v ustálenom stave od vstupnej veličiny v ustálenom stave [8].

V prvom prípade bola výstupnou veličinou hodnota pH a vstupnou veličinou hodnota napätia vo voltoch na čerpadle, ktoré zabezpečuje objemový prietok roztoku kyseliny octovej pri konštantnom objemovom toku roztoku hydroxidu sodného.

V druhom prípade bola výstupnou veličinou hodnota pH a vstupnou veličinou hodnota napätia vo voltoch na čerpadle, ktoré zabezpečuje objemový prietok roztoku hydroxidu sodného pri konštantnom objemovom toku roztoku kyseliny



Obr. 2.4: Kalibračná krivka čerpadiel: čerpadlo A (modrá), čerpadlo B (červená), namerané hodnoty ($\circ$).

octovej.

Zistenie prevodovej charakteristiky bolo dôležité pri analyzovaní správania sa procesu neutralizácie a pri odhade vývoja pH od zmeny objemového toku roztoku kyseliny octovej alebo roztoku hydroxidu sodného, ako aj pri určení minimálnych a maximálnych možných hodnôt pH pri minimálnych a maximálnych hodnotách objemového toku roztoku kyseliny octovej a roztoku hydroxidu sodného. Pomocou prevodovej charakteristiky vieme, v akom pracovnom režime pracujeme.

Prevodovú charakteristiku som zostrojil tak, že som postupne pridával rôzny objemový tok roztoku kyseliny octovej do konštantného objemového toku roztoku hydroxidu sodného, pričom som meral hodnotu pH po ustálení vzniknutého roztoku. Daný experiment som taktiež uskutočnil v opačnom poradí. Pridával som rôzne objemové prietoky roztoku hydroxidu sodného do konštantného objemového prietoku roztoku kyseliny octovej. Výsledky meraní sú uvedené v Tab. 2.3 pre me-

niaci sa objemový tok roztoku kyseliny octovej a konštantný objemový tok roztoku hydroxidu sodného a v Tab. 2.4 pre meniaci sa objemový tok roztoku hydroxidu sodného a konštantný objemový tok roztoku kyseliny octovej.

Namerané závislosti v oboch prípadoch neboli lineárne. Tieto prevodové charakteristiky z chemického pohľadu predstavujú *titračné krivky*. Viac o tejto problematike je v kapitole 1.5 *Teoretickej časti* tejto práce.

Aproximáciu nameraných dát je možné pre obidva prípady naformulovať ako optimalizačný problém v tvare (1.15) – (1.16). Viac o tejto problematike je uvedené v kapitole 1.4 *Teoretickej časti* tejto práce. Numericky som optimalizačný problém riešil v prostredí MATLAB. Systematickým analyzovaním optimalizačného problému pre prvý prípad som stanovil aproximačný polynóm 3. rádu (Obr. 2.5). Rovnakým postupom som zistil, že pre druhý prípad je najvhodnejšie použiť polynóm 4. rádu (Obr. 2.6). Presnosť aproximácie som overil v prostredí MATLAB pomocou funkcie `polyfit`. Správnosť oboch experimentálne stanovených prevodových charakteristík dokazuje aj to, že obidve vykazujú podobné správanie, ako titračné krivky na Obr. 1.5. Výsledný aproximačný polynóm s hodnotami optimálnych koeficientov pre meniaci sa objemový prietok roztoku kyseliny octovej pri konštantnom objemovom prietoku roztoku hydroxidu sodného má tvar:

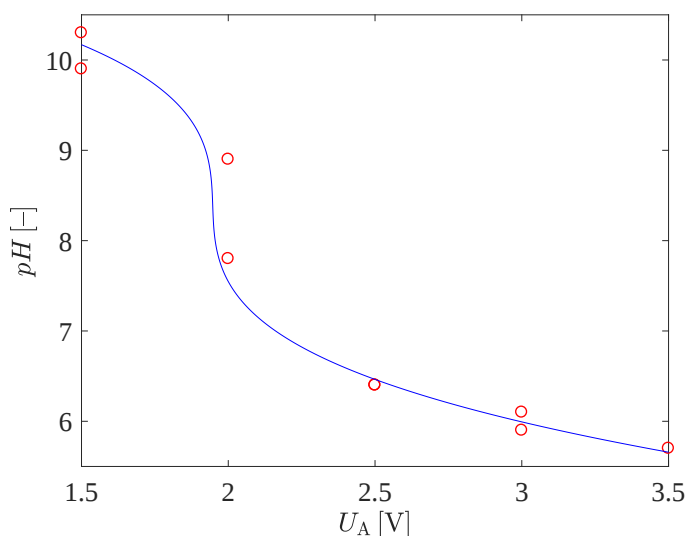
$$U_A = a_0 + a_1 pH + a_2 pH^2 + a_3 pH^3, \quad (2.4)$$

kde $a_0 = 46,3639$, $a_1 = -15,8725$, $a_2 = 1,8920$, $a_3 = -0,0752$ a suma štvorcov odchýliek $\sigma_A = 0,0893$.

Výsledný aproximačný polynóm s hodnotami optimálnych koeficientov pre meniaci sa objemový prietok roztoku hydroxidu sodného pri konštantnom objemovom prietoku roztoku kyseliny octovej má tvar:

$$U_B = b_0 + b_1 pH + b_2 pH^2 + b_3 pH^3 + b_4 pH^4, \quad (2.5)$$

kde $b_0 = 163,8425$, $b_1 = -99,3960$, $b_2 = 22,2906$, $b_3 = -2,1728$, $b_4 = 0,0782$ a suma štvorcov odchýliek $\sigma_B = 0,0834$.



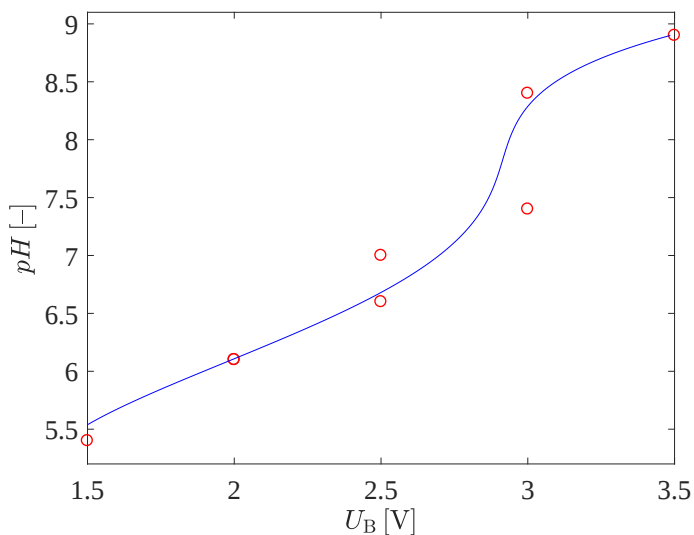
Obr. 2.5: Prevodová charakteristika pri meniacom sa objemovom toku roztoku kyseliny octovej: namerané hodnoty ($\circ$), aproximácia pomocou polynómu (modrá).

Aby sa zvýšila kvalita aproximácie, jednotlivé aproximačné polynómy (2.4), (2.5) boli vyhodnotené vzhľadom na invertované premenné. Pretože strmosť titračnej krivky v okolí bodu ekvivalencie znižovala presnosť aproximácie a viedla na fyzikálne nerealizovateľné správanie sa priebehu pH.

2.5 Identifikácia procesu laboratórneho chemického reaktora

Identifikácia správania sa reálneho procesu je potrebnou súčasťou pri návrhu pokročilého riadenia, ktoré je založené na modeli.

Proces neutralizácie, ktorým sa zaoberám má nelineárne a nesymetrické správanie. V praxi to znamená, že prechodová charakteristika skokovej zmeny prie-



Obr. 2.6: Prevodová charakteristika pri meniacom sa objemovom toku roztoku hydroxidu sodného: namerané hodnoty ($\circ$), aproximácia pomocou polynómu (modrá).

Tabuľka 2.3: Meranie prevodovej charakteristiky pre meniaci sa objemový tok roztoku kyseliny octovej a $U_B = 2,5$ V.

U_A [V]	pH [-]
1,5	9,9
2,0	7,8
2,5	6,4
3,0	6,1
3,5	5,7
3,0	5,9
2,5	6,4
2,0	8,9
1,5	10,3

Tabuľka 2.4: Meranie prevodovej charakteristiky pre meniaci sa objemový tok roztoku hydroxidu sodného a $U_A = 2,5$ V.

U_B [V]	pH [-]
1,5	5,4
2,0	6,1
2,5	6,6
3,0	7,4
3,5	8,9
3,0	8,4
2,5	7,0
2,0	6,1
1,33	5,4

toku roztoku kyseliny octovej alebo prietoku roztoku hydroxidu sodného smerom nahor a smerom nadol nemá rovnaký priebeh. Z uvedeného dôvodu bolo potrebné pre účely správnej identifikácie procesu vykonať viacero prechodových charakteristík. V mojej práci som robil dve sady meraní prechodových charakteristík.

Prvú sadu meraní prechodových charakteristík som uskutočňoval tak, že som postupne vykonal osem skokových zmien hodnoty napätia vo voltoch na čerpadle A, ktoré zabezpečuje objemový prietok roztoku kyseliny octovej. Počas týchto meraní bol objemový prietok roztoku hydroxidu sodného konštantný, teda hodnotu napätia na čerpadle B som nemenil. Hodnoty napätia som zvyšoval smerom nahor s veľkosťou skoku $0,5$ V: $1,5 \rightarrow 2,0 \rightarrow 2,5 \rightarrow 3,0 \rightarrow 3,5$ V. Potom sa znižoval prietok roztoku kyseliny s rovnakou veľkosťou skoku: $3,5 \rightarrow 3,0 \rightarrow 2,5 \rightarrow 2,0 \rightarrow 1,5$ V.

Druhú sadu meraní prechodových charakteristík som uskutočňoval tak, že som postupne vykonal osem skokových zmien hodnoty napätia vo voltoch na čerpadle B, ktoré zabezpečuje objemový prietok roztoku hydroxidu sodného. Objemový prietok roztoku kyseliny octovej bol konštantný, čiže hodnotu napätia na

čerpadle A som nemenil. Hodnoty napätia som zvyšoval smerom nahor s veľkosťou skoku 0,5 V: $1,5 \rightarrow 2,0 \rightarrow 2,5 \rightarrow 3,0 \rightarrow 3,5$ V. A potom som znižoval prietok roztoku zásady s rovnakou veľkosťou skoku: $3,5 \rightarrow 3,0 \rightarrow 2,5 \rightarrow 2,0 \rightarrow 1,5$ V.

Získal som tak sadu šestnástich meraní, ktoré bolo potrebné spracovať do formy vhodnej na identifikáciu modelu pomocou prechodových charakteristík. Všetky namerané priebehy bolo potrebné normalizovať, pretože prechodová funkcia je definovaná ako odozva dynamického systému na jednotkovú skokovú zmenu vstupnej veličiny pri nulových začiatočných podmienkach.

Grafy normalizovaných prechodových charakteristík pre prvú sadu meraní sú zobrazené na Obr. 2.7 a grafy normalizovaných prechodových charakteristík pre druhú sadu meraní sú na Obr. 2.8. Na grafoch je vidieť, že namerané hodnoty pH boli ovplyvnené šumom merania. Normalizované prechodové charakteristiky som identifikoval pomocou Strejcovej metódy opísanej v kapitole 1.3 *Teoretickej časti* tejto práce. Postupne som identifikoval rád dynamického systému n , zosilnenie Z , časovú konštantu T a dopravné oneskorenie systému D . Všetky identifikované parametre prenosov identifikovaných s ohľadom na meniaci sa prietok roztoku kyseliny octovej: $G_{A,1} - G_{A,8}$ pre prvú sadu meraní sú uvedené v Tab. 2.5. Systémy identifikované pre druhú sadu meraní s ohľadom na meniaci sa prietok roztoku hydroxidu sodného: $G_{B,1} - G_{B,8}$ sú zhrnuté v Tab. 2.6.

Pri identifikácii procesu laboratórneho chemického reaktora pomocou Strejcovej metódy som získal prenosy 1. rádu s dopravným oneskorením. Pre praktické využitie na analýzu a syntézu regulačných obvodov, sa často používa aproximácia prenosu člena dopravného oneskorenia. Tento spôsob často vedie na prenos vyššieho rádu, ale už bez dopravného oneskorenia. Pre takto získané prenosy možno použiť klasické postupy syntézy, akoby išlo o systémy bez dopravného oneskorenia. V mojom prípade som použil lineárnu aproximáciu dopravného oneskorenia Taylorovým rozvojom menovateľa prenosu systému do 1. rádu, ktorý má tvar [17]:

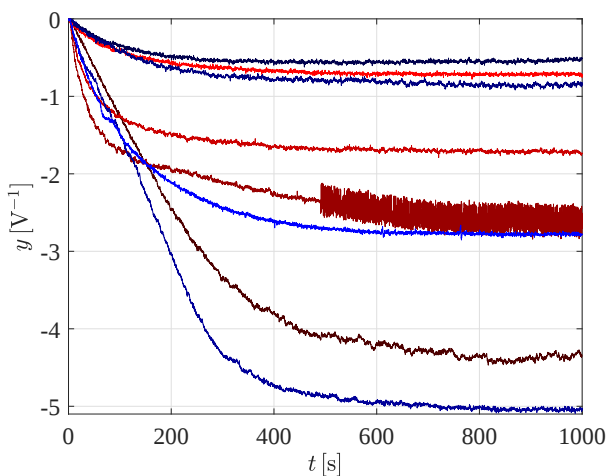
$$G(s) = \frac{Z}{T D s^2 + (T + D) s + 1}, \quad (2.6)$$

kde TD je parameter d_2 , $(T + D)$ je parameter d_1 a ich hodnoty sú uvedené v Tab. 2.7 pre meniaci sa objemový prietok roztoku kyseliny octovej a konštantný objemový prietok roztoku hydroxidu sodného, a v Tab. 2.8 pre meniaci sa objemový prietok roztoku hydroxidu sodného a konštantný objemový prietok roztoku kyseliny octovej. Získal som tak množinu nových prenosov 2. rádu.

Na Obr. 2.9 je vidieť porovnanie vybranej nameranej prechodovej charakteristiky s identifikovaným prenosom pomocou Strejcovej metódy, ako aj s prenosom, ktorý má aproximované dopravné oneskorenie Taylorovým rozvojom menovateľa prenosu systému do 1. rádu. Identifikované modely sa dostatočne presne zhodujú s experimentálnymi údajmi. Na aproximáciu dopravného oneskorenia som nepoužil Padého lineárnu aproximáciu dopravného oneskorenia prenosu systému do 1. rádu, pretože som nechcel do systému zaviesť nestabilné nuly (prekmit na Obr. 2.10), čím som predišiel nereálnemu priebehu pH.

Tabuľka 2.5: Identifikované parametre prenosov systémov pri meniacom sa objemovom toku roztoku kyseliny octovej.

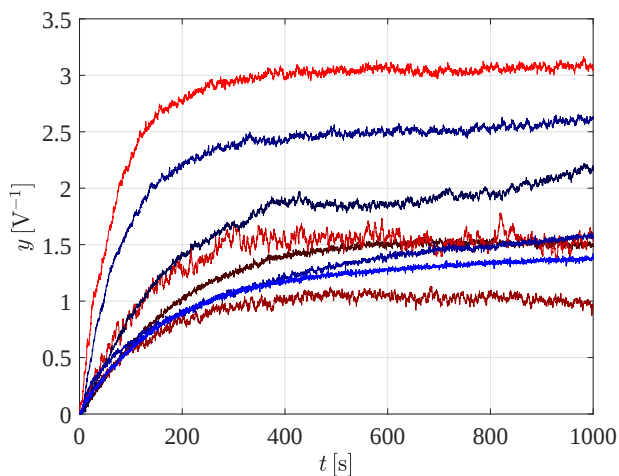
prenos	U_A [V]	n [-]	Z [V^{-1}]	T [s]	D [s]
$G_{A,1}$	1,5 $\rightarrow$ 2,0	1	-4,4	175,6	5,4
$G_{A,2}$	2,0 $\rightarrow$ 2,5	1	-2,6	46,9	2,2
$G_{A,3}$	2,5 $\rightarrow$ 3,0	1	-1,7	54,2	0,1
$G_{A,4}$	3,0 $\rightarrow$ 3,5	1	-0,7	100,9	1,3
$G_{A,5}$	3,5 $\rightarrow$ 3,0	1	-0,6	86,7	0,9
$G_{A,6}$	3,0 $\rightarrow$ 2,5	1	-0,8	136,6	2,6
$G_{A,7}$	2,5 $\rightarrow$ 2,0	1	-5,1	159,8	2,2
$G_{A,8}$	2,0 $\rightarrow$ 1,5	1	-2,8	108,8	1,8



Obr. 2.7: Normalizované prechodové charakteristiky pri meniacom sa objemovom toku roztoku kyseliny octovej, skokové zmeny smerom nahor (odtiene červenej od najtmavšej po najbledšiu), skokové zmeny smerom nadol (odtiene modrej od najtmavšej po najbledšiu).

Tabuľka 2.6: Identifikované parametre prenosov systémov pri meniacom sa objemovom toku roztoku hydroxidu sodného.

prenos	U_B [V]	n [-]	Z [V ⁻¹]	T [s]	D [s]
$G_{B,1}$	1,5 → 2,0	1	1,6	178,7	5,7
$G_{B,2}$	2,0 → 2,5	1	1,1	123,8	0,7
$G_{B,3}$	2,5 → 3,0	1	1,6	118,7	2,2
$G_{B,4}$	3,0 → 3,5	1	3,1	70,8	1,9
$G_{B,5}$	3,5 → 3,0	1	2,2	193,7	1,7
$G_{B,6}$	3,0 → 2,5	1	2,5	69,9	7,0
$G_{B,7}$	2,5 → 2,0	1	1,6	110,1	2,0
$G_{B,8}$	2,0 → 1,5	1	1,4	146,9	1,7



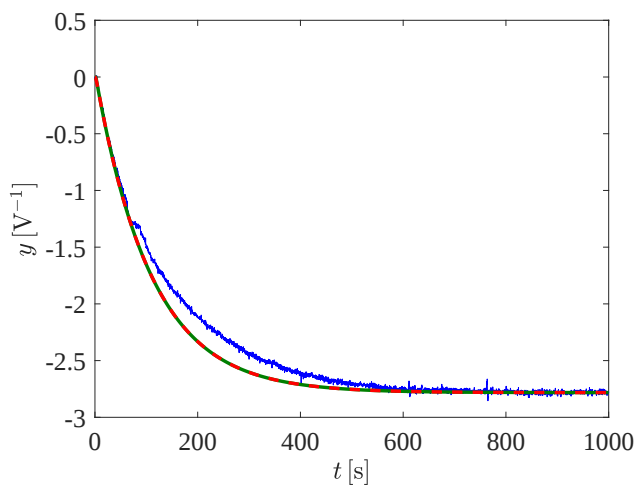
Obr. 2.8: Normalizované prechodové charakteristiky pri meniacom sa objemovom toku roztoku hydroxidu sodného, skokové zmeny smerom nahor (odtiene červenej od najtmavšej po najbledšiu), skokové zmeny smerom nadol (odtiene modrej od najtmavšej po najbledšiu).

Tabuľka 2.7: Aproximované parametre prenosov systémov pri meniacom sa objemovom toku roztoku kyseliny octovej.

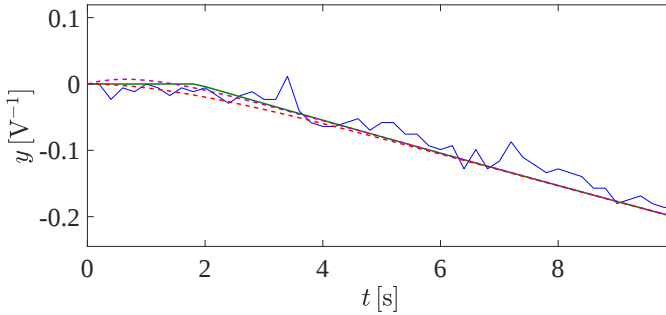
prenos	U_A [V]	n [-]	Z [V^{-1}]	d_2 [s^2]	d_1 [s]
$G_{A,1}$	1,5 $\rightarrow$ 2,0	2	-4,4	956,0	181,0
$G_{A,2}$	2,0 $\rightarrow$ 2,5	2	-2,6	101,9	49,1
$G_{A,3}$	2,5 $\rightarrow$ 3,0	2	-1,7	5,4	54,3
$G_{A,4}$	3,0 $\rightarrow$ 3,5	2	-0,7	130,4	102,2
$G_{A,5}$	3,5 $\rightarrow$ 3,0	2	-0,6	81,4	87,6
$G_{A,6}$	3,0 $\rightarrow$ 2,5	2	-0,8	349,6	139,2
$G_{A,7}$	2,5 $\rightarrow$ 2,0	2	-5,1	344,3	161,9
$G_{A,8}$	2,0 $\rightarrow$ 1,5	2	-2,8	200,8	110,6

Tabuľka 2.8: Aproximované parametre prenosov systémov pri meniacom sa objemovom toku roztoku hydroxidu sodného.

prenos	U_B [V]	n [-]	Z [V ⁻¹]	d_2 [s ²]	d_1 [s]
$G_{B,1}$	1,5 → 2,0	2	1,6	1021,7	184,4
$G_{B,2}$	2,0 → 2,5	2	1,1	92,7	124,5
$G_{B,3}$	2,5 → 3,0	2	1,6	256,9	120,9
$G_{B,4}$	3,0 → 3,5	2	3,1	132,8	72,7
$G_{B,5}$	3,5 → 3,0	2	2,2	325,4	195,4
$G_{B,6}$	3,0 → 2,5	2	2,5	491,5	76,9
$G_{B,7}$	2,5 → 2,0	2	1,6	222,1	112,1
$G_{B,8}$	2,0 → 1,5	2	1,4	255,4	148,6



Obr. 2.9: Porovnanie nameraných údajov prechodovej charakteristiky s identifikáciou a aproximáciou: namerané hodnoty (modrá), identifikácia prenosu pomocou Strejca (zelená) a lineárna aproximácia Taylorovým rozvojom menovateľa prenosu systému do 1. rádu (čiarkovaná červená).



Obr. 2.10: Porovnanie nameraných údajov prechodovej charakteristiky s identifikáciou a aproximáciou: namerané hodnoty (modrá), identifikácia prenosu pomocou Strejca (zelená), lineárna aproximácia Taylorovým rozvojom menovateľa prenosu systému do 1. rádu (červená) a Padého lineárna aproximácia dopravného oneskorenia prenosu systému do 1. rádu (fialová).

2.6 Neurčitý model chemického reaktora

Pri riadení reálneho systému sa vyskytuje určitá miera neurčitosti, čo znamená, že nemáme dostatok informácií o jeho celkovom správaní sa. Neurčitosti vznikajú hlavne kvôli zjednodušujúcim podmienkam pri identifikovaní reálneho systému, vplyvu šumu merania, vplyvu poruchy, nelineárneho a nesymetrického správania sa riadeného systému a pod. V mojej práci som pri riadení laboratórneho chemického reaktora uvažoval vplyv intervalových neurčitostí. To znamená, že parametre prenosu boli známe iba v určitých intervaloch. Poznať hranice týchto intervalov bolo nevyhnutné pre implementáciu zamýšľaného robustného prediktívneho riadenia. Tento prístup je vhodný na riadenie systémov s neurčitostami, ktorých správanie popisuje tzv. *robustná obálka* [7].

Minimálne a maximálne hodnoty parametrov prenosov zosilnenia Z , časovej konštanty T a dopravného oneskorenia D riadeného systému vytvárajú hranice intervalovej neurčitosti systému laboratórneho chemického reaktora. Identifikované

hodnoty vzhľadom na meniaci sa objemový prietok roztoku kyseliny octovej a konštantný objemový prietok roztoku hydroxidu sodného sú uvedené v Tab. 2.9 a pre meniaci sa objemový prietok roztoku hydroxidu sodného a konštantný objemový prietok roztoku kyseliny octovej sú v Tab. 2.10. Na základe týchto hodnôt možno konštatovať, že dopravné oneskorenie môže byť zanedbané vzhľadom na časovú konštantu systému.

Prenosy, ktoré majú hodnoty zosilnenia, časovej konštanty a dopravného oneskorenia známe iba v intervaloch, tvoria tzv. *rodinu neurčitého systému*. Rodinu neurčitých systémov tvoria všetky systémy, vzniknuté pre všetky zamýšľané hodnoty neurčitého parametra. Graficky sa rodiny neurčitých systémov dajú vyjadrovať ako rôzne geometrické útvary, pričom prenosy vytvorené pomocou maximálnych a minimálnych hodnôt neurčitých parametrov vytvárajú vrcholy takéhoto geometrického útvaru [7]. V mojom prípade uvažujem dva neurčité parametre: Z , T , a to pri meniacom sa objemovom prietoku roztoku kyseliny octovej a pri konštantnom objemovom toku roztoku hydroxidu sodného, čiže môžem vytvoriť $2^2 = 4$ rôzne prenosy, teda štyri vrcholové systémy. A rovnako aj pri meniacom sa objemovom prietoku roztoku hydroxidu sodného a pri konštantnom objemovom toku roztoku kyseliny octovej môžem vytvoriť štyri rôzne prenosy, teda štyri vrcholové systémy.

Tieto systémy využijeme na získanie limitného správania sa systému, ktoré je nevyhnutné pri návrhu robustného prediktívneho riadenia. Z grafických priebehov na Obr. 2.11 je vidieť, že každá nameraná prechodová charakteristika pri meniacom sa objemovom prietoku roztoku kyseliny octovej a konštantnom objemovom prietoku roztoku hydroxidu sodného má priebeh v oblasti vymedzenej dvoma limitnými prenosmi. Rovnaké správanie je aj na Obr. 2.12 pri meniacom sa objemovom prietoku roztoku hydroxidu sodného a konštantnom objemovom prietoku roztoku kyseliny octovej.

Robustné prediktívne riadenie budem môcť implementovať na neurčitý sys-

Tabuľka 2.9: Hranice intervalových neurčitostí identifikovaných prenosov so zanedbaním dopravným oneskorením pre meniaci sa objemový prietok roztoku kyseliny octovej.

parameter	minimum	nominálna	maximum
Z	-5,1	-2,9	-0,6
T	46,9	111,3	175,6

tém, ktorého zosilnenie Z a časovú konštantu T pre meniaci sa objemový prietok roztoku kyseliny octovej a konštantný objemový prietok roztoku hydroxidu sodného som určil ako intervaly, viď Tab. 2.9. Pre meniaci sa objemový prietok roztoku hydroxidu sodného a konštantný objemový prietok roztoku kyseliny octovej sú to intervaly, viď Tab. 2.10.

Minimálne a maximálne hodnoty parametrov prenosov: zosilnenie Z , d_2 a d_1 , pre ktoré som aproximoval dopravné oneskorenie Taylorovým rozvojom menovateľa prenosu systému do 1. rádu, udávajú hranice intervalovej neurčitosti systému a sú uvedené v Tab. 2.11 pre meniaci sa objemový prietok roztoku kyseliny octovej a konštantný objemový prietok roztoku hydroxidu sodného. V Tab. 2.12 sú hodnoty pre meniaci sa objemový prietok roztoku hydroxidu sodného a konštantný objemový prietok roztoku kyseliny octovej.

V tomto prípade existujú tri neurčité parametre pri meniacom sa objemovom prietoku roztoku kyseliny octovej a pri konštantnom objemovom toku roztoku hydroxidu sodného, čiže môžem vytvoriť $2^3 = 8$ rôznych prenosov, teda osem vrcholových systémov. A rovnako aj pri meniacom sa objemovom prietoku roztoku hydroxidu sodného a pri konštantnom objemovom toku roztoku kyseliny octovej môžem vytvoriť osem rôznych prenosov, teda osem vrcholových systémov.

Tieto systémy využijeme opäť na získanie limitného správania sa systému, ktoré je nevyhnutné pri návrhu robustného prediktívneho riadenia. Z grafických priebehov na Obr. 2.13 je vidieť, že každá nameraná prechodová charakteristika

Tabuľka 2.10: Hranice intervalových neurčitostí identifikovaných prenosov so zanedbaním dopravným oneskorením pre meniaci sa objemový prietok roztoku hydroxidu sodného.

parameter	minimum	nominálna	maximum
Z	1,1	2,1	3,1
T	69,9	131,8	193,7

Tabuľka 2.11: Hranice intervalových neurčitostí identifikovaných prenosov s aproximovaným dopravným oneskorením pre meniaci sa objemový prietok roztoku kyseliny octovej.

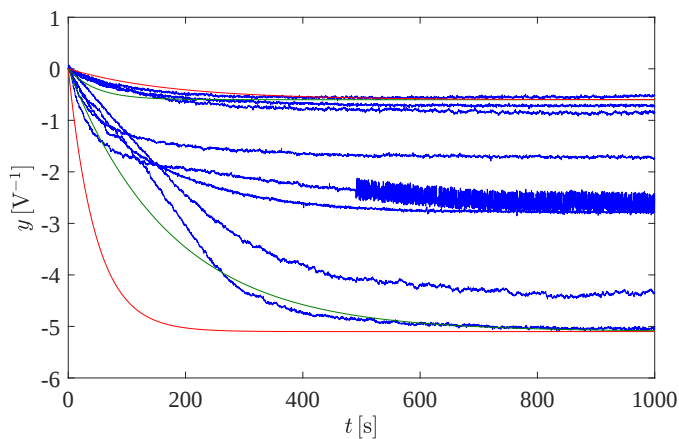
parameter	minimum	nominálna	maximum
Z	-5,1	-2,9	-0,6
d_2	5,4	480,7	956
d_1	49,1	115,1	181

pri meniacom sa objemovom prietoku roztoku kyseliny octovej a konštantnom objemovom prietoku roztoku hydroxidu sodného má priebeh v oblasti vymedzenej tromi limitnými prenosmi. Rovnaké správanie je aj na Obr. 2.14 pri meniacom sa objemovom prietoku roztoku hydroxidu sodného a konštantnom objemovom prietoku roztoku kyseliny octovej.

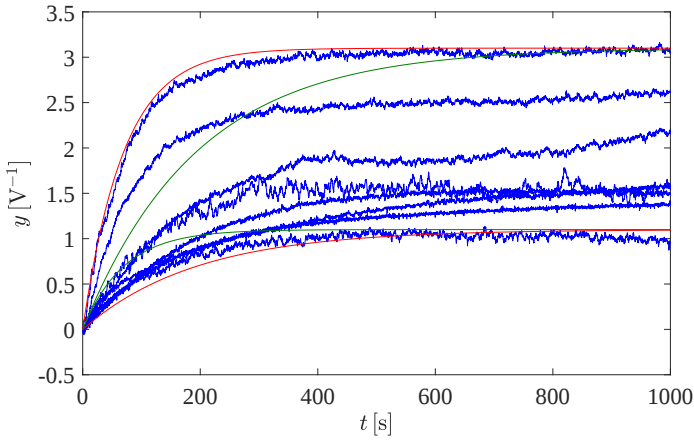
Robustné prediktívne riadenie budem môcť implementovať na neurčitý systém, ktorého zosilnenie Z , parametre d_2 a d_1 pre meniaci sa objemový prietok roztoku kyseliny octovej a konštantný objemový prietok roztoku hydroxidu sodného som určil ako intervaly (Tab. 2.11). Pre meniaci sa objemový prietok roztoku hydroxidu sodného a konštantný objemový prietok roztoku kyseliny octovej sú to intervaly (Tab. 2.12).

Tabuľka 2.12: Hranice intervalových neurčitostí identifikovaných prenosov s aproximovaným dopravným oneskorením pre meniaci sa objemový prietok roztoku hydroxidu sodného.

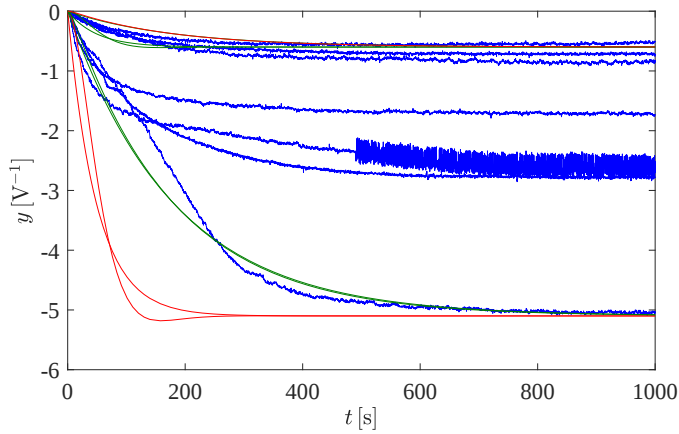
parameter	minimum	nominálna	maximum
Z	1,1	2,1	3,1
d_2	92,7	557,2	1021,7
d_1	72,7	134,1	195,4



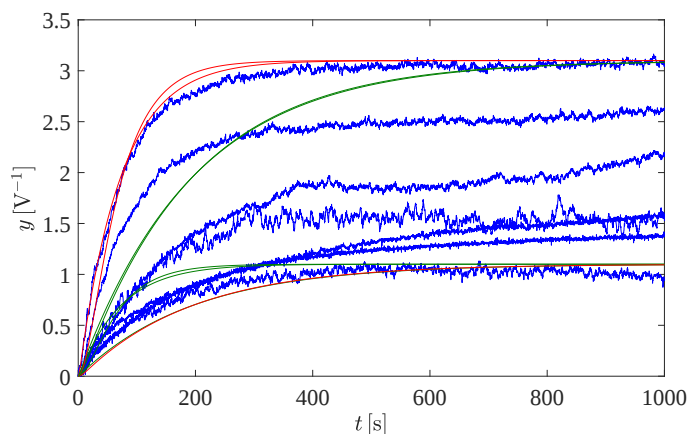
Obr. 2.11: Robustná obálka pre meniaci sa objemový prietok roztoku kyseliny octovej: robustná obálka so zanedbaným dopravným oneskorením (červené), ostatné vrcholové systémy (zelené), normalizované prechodové charakteristiky (modré).



Obr. 2.12: Robustná obálka pre meniaci sa objemový prietok roztoku hydroxidu sodného: robustná obálka so zanedbaným dopravným oneskorením (červené), ostatné vrcholové systémy (zelené), normalizované prechodové charakteristiky (modré).



Obr. 2.13: Robustná obálka pre meniaci sa objemový prietok roztoku kyseliny octovej: robustná obálka s aproximovaným dopravným oneskorením (červené), ostatné vrcholové systémy (zelené), normalizované prechodové charakteristiky (modré).



Obr. 2.14: Robustná obálka pre meniaci sa objemový prietok roztoku hydroxidu sodného: robustná obálka s aproximovaným dopravným oneskorením (červené), ostatné vrcholové systémy (zelené), normalizované prechodové charakteristiky (modré).

2.7 Aplikácia uzavretého regulačného obvodu

O tom ako funguje uzavretý regulačný obvod bolo vysvetlené v kapitole 1.6 *Teoretickej časti* tejto práce. V tejto kapitole sa budem zaoberať, čo predstavujú jednotlivé časti uzavretého regulačného obvodu v mojej bakalárskej práci.

Riadeným systémom je laboratórny chemický reaktor, riadeným procesom je proces neutralizácie kyseliny octovej a hydroxidu sodného. Žiadanou veličinou je zvolená hodnota pH v reakčnej zmesi, riadenou veličinou je hodnota pH na výstupe z laboratórneho chemického reaktora, riadiacou veličinou je napätie na peristaltických čerpadlách, ktorého hodnoty sú v rozsahu od 0 – 5 V a na ktorého zmenu zareaguje objemový prietok roztoku kyseliny octovej alebo roztoku hydroxidu sodného na vstupe do laboratórneho chemického reaktora. Meracím členom je pH senzor a akčnými členmi sú peristaltické čerpadlá.

Cielom mojej práce je aplikovať na riadenie laboratórneho chemického reaktora robustné prediktívne riadenie a nie obyčajný PID regulátor. Tento pokročilý prístup riadenia je založený na princípoch optimalizácie, ktorá prebieha v každom kroku riadenia. Tento prístup je vhodný na efektívne kompenzovanie vplyvu porúch na riadenie.

2.8 Riadenie chemického reaktora a vyhodnotenie kvality riadenia

Hlavnou časťou mojej bakalárskej práce bolo aplikovať robustné riadenie pre proces neutralizácie. Riadenie som navrhoval za účelom dosiahnutia žiadanej hodnoty pH s požadovanou kvalitou riadenia v dvoch prípadoch: v prvom prípade som menil prietok roztoku kyseliny octovej a prietok roztoku hydroxidu sodného bol konštantný, v druhom prípade som menil prietok roztoku hydroxidu sodného a prietok roztoku kyseliny octovej bol konštantný.

Neutralizácia je proces s nelineárnym a nesymetrickým správaním, a práve preto som použil na riadenie RMPC regulátor a musel som vykonať viac skokových zmien smerom nahor aj nadol pre oba prípady. Viac informácií o robustnom prediktívnom riadení je v kapitole 1.8 *Teoretickej časti* tejto práce. Po návrhu RMPC regulátora bolo potrebné nájsť správnu kombináciu koeficientov váhových matic Q a R na dosiahnutie požadovanej kvality riadenia. V mojom prípade to bola kombinácia troch jednotiek pre oba prípady riadenia, kde prvá jednotka predstavuje váhu na penalizáciu proporcionálnej zložky RMPC regulátora, druhá jednotka predstavuje váhu na penalizáciu integračnej zložky RMPC regulátora a posledná jednotka predstavuje váhu na penalizáciu akčného zásahu.

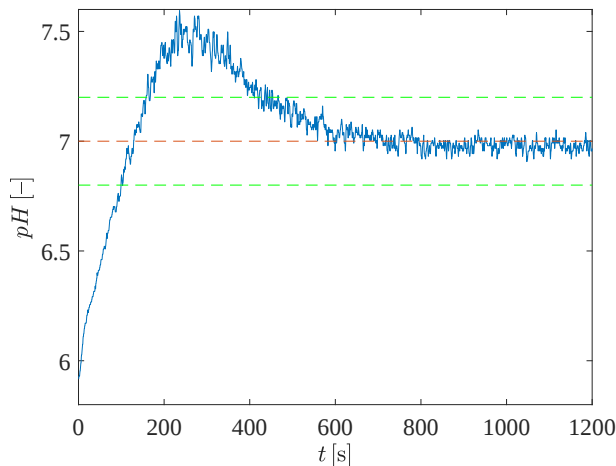
Experimentálne namerané priebehy navrhnutého robustného prediktívneho riadenia procesu neutralizácie pri zmene prietoku roztoku kyseliny octovej a pri konštantnom prietoku roztoku hydroxidu sodného vidíme na Obr. 2.15 – 2.22. A

grafické výsledky riadenia procesu neutralizácie pri zmene prietoku roztoku hydroxidu sodného a pri konštantnom prietoku roztoku kyseliny octovej vidíme na Obr. 2.23 – 2.30.

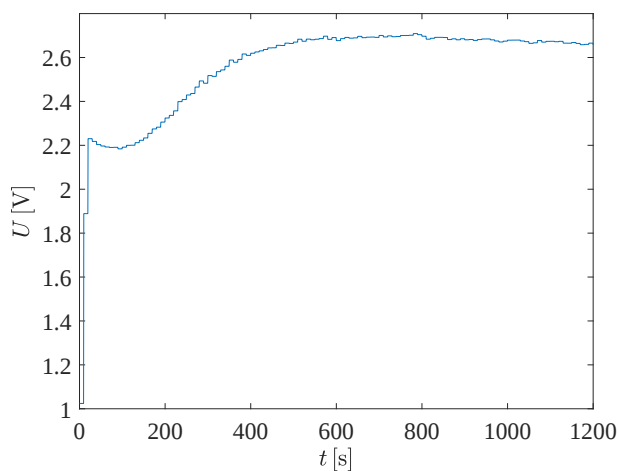
Pomocou časových a integrálnych ukazovateľov kvality riadenia, ako aj priebehov riadenej veličiny som ju následne vyhodnocoval. Postup vyhodnotenia kvality riadenia pomocou časových ukazovateľov a ich význam je uvedený v podkapitole 1.7.1 a postup vyhodnotenia kvality riadenia pomocou integrálnych ukazovateľov a ich význam je uvedený v podkapitole 1.7.2 *Teoretickej časti* tejto práce. Pri vyhodnocovaní kvality riadenia som musel zobrať do úvahy aj to, že pracujem s reálnym procesom, a preto som zanedbával kmitanie s malou amplitúdou, ktoré bolo spôsobené šumom merania. Práve tento šum merania spôsobuje aj to, že trvalá regulačná odchýlka nie je absolútne nulová, avšak vzhľadom na to, že regulačná odchýlka je v ustálenom stave spôsobená hlavne šumom merania, tak ju môžeme zanedbať. V Tab. 2.13 sú uvedené hodnoty vyhodnotenia časových a integrálnych ukazovateľov kvality riadenia pre zmenu prietoku roztoku kyseliny octovej pri konštantnom prietoku roztoku hydroxidu sodného a v Tab. 2.14 pre zmenu prietoku roztoku hydroxidu sodného pri konštantnom prietoku roztoku kyseliny octovej, vzhľadom na zvolené δ -okolie 0,2 *pH*. Voľba tohto okolia zohľadňovala práve šum merania. Z rozdielnych hodnôt času regulácie, maximálneho preregulovania, času maximálneho preregulovania, ISE a ISU ako aj z priebehov na Obr. 2.15, 2.17, 2.19, 2.21 pre zmenu prietoku roztoku kyseliny octovej a z priebehov na Obr. 2.23, 2.25, 2.27, 2.29 pre zmenu prietoku roztoku hydroxidu sodného, môžeme vidieť ako sa proces neutralizácie správa nesymetricky a nelineárne pri daných skokových zmenách, ktoré zároveň prebiehajú v okolí bodu ekvivalencie, čo výrazne zhoršuje implementovať správne riadenie, pretože veľmi malá zmena prietoku roztoku kyseliny octovej v prvom prípade alebo roztoku hydroxidu sodného v druhom prípade, spôsobuje veľmi veľkú zmenu hodnoty *pH*. Aj porovnaním hodnôt a priebehov pri riadení pomocou prietoku roztoku kyseliny octovej a pri ria-

dení pomocou prietoku roztoku hydroxidu sodného dostávame rozdielne hodnoty pri daných skokových zmenách, čo je taktiež spôsobené tým, že proces neutralizácie má nesymetrické a nelineárne správanie, ako aj tým, že kyselina octová je slabou kyselinou, pričom hydroxid sodný je silnou zásadou, a teda nie je jedno či riadime prietokom kyseliny alebo zásady. Ďalším príkladom toho, že nie je ľahké takýto proces riadiť je to, že zvolená kombinácia koeficientov váhových matíc má lepšiu odozvu pri zmene prietoku roztoku kyseliny octovej, ako pri zmene prietoku roztoku hydroxidu sodného. Všetky tieto rozdiely v hodnotách časových a integrálnych ukazovateľov kvality riadenia, ako aj v priebehoch jednotlivých skokových zmien by sa dali zmenšiť ďalším ladením koeficientov váhových matíc, ktorému by som sa rád v budúcnosti venoval.

Napriek všetkým rozdielom a náročnosti riadenia procesu neutralizácie môžem konštatovať, že navrhnutý RMPC regulátor dosiahol pri všetkých skokových zmenách v oboch prípadoch požadovanú kvalitu riadenia.



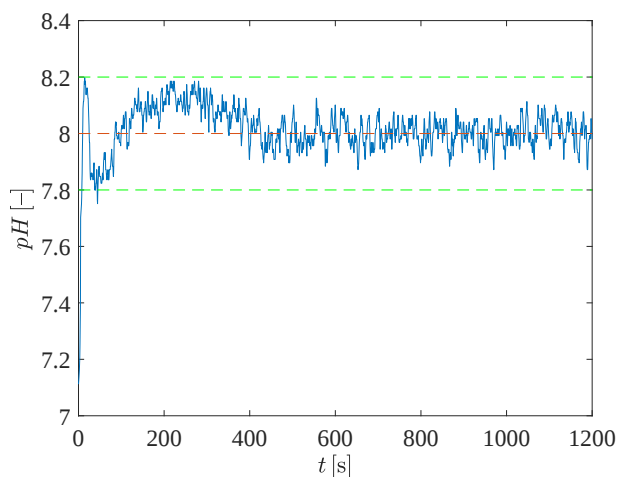
Obr. 2.15: Priebeh riadenia pH pri skokovej zmene z $pH\ 6 \rightarrow 7$: hodnota pH (modrá), žiadaná hodnota pH (červená), δ -okolie žiadanej hodnoty pH (zelené) pri meniacom sa prietoku roztoku kyseliny octovej.



Obr. 2.16: Priebeh napätia U na čerpadle A pri skokovej zmene z pH $6 \rightarrow 7$ pri meniacom sa prietoku roztoku kyseliny octovej.

Tabuľka 2.13: Kvalita riadenia pri zmene prietoku roztoku kyseliny octovej.

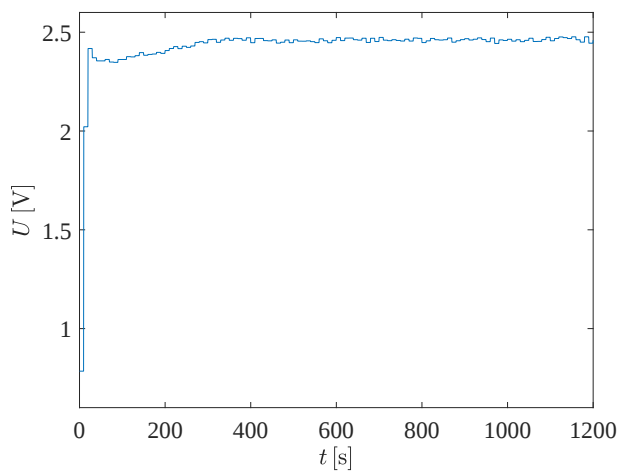
zmena pH	t_{reg} [s]	σ_{max} [%]	t_{σ} [s]	TRO	ISE	ISU
$6 \rightarrow 7$	440	46	260	0	89,4	7983,4
$7 \rightarrow 8$	8	12	240	0	14,5	7164,0
$8 \rightarrow 7$	195	-11	720	0	209,4	10541,0
$7 \rightarrow 6$	448	-2	1180	0	263,0	15169,0



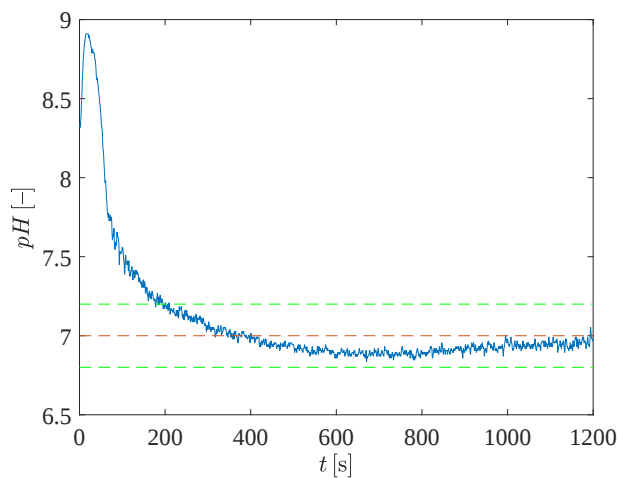
Obr. 2.17: Priebeh riadenia pH pri skokovej zmene z $pH\ 7 \rightarrow 8$: hodnota pH (modrá), žiadaná hodnota pH (červená), δ -okolie žiadanej hodnoty pH (zelené) pri meniacom sa prietoku roztoku kyseliny octovej.

Tabuľka 2.14: Kvalita riadenia pri zmene prietoku roztoku hydroxidu sodného.

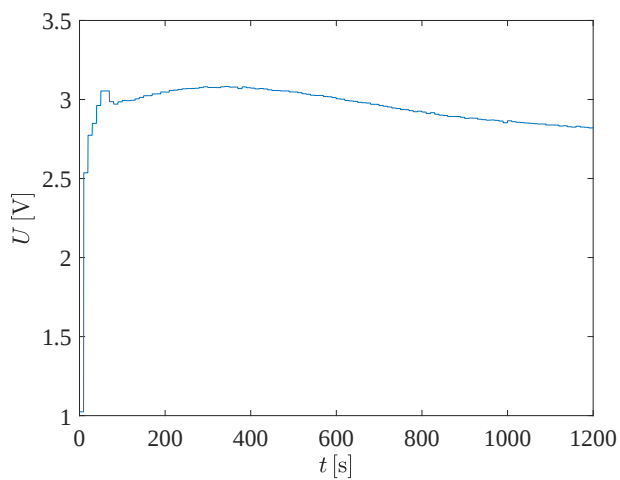
zmena pH	t_{reg} [s]	σ_{max} [%]	t_{σ} [s]	TRO	ISE	ISU
6 $\rightarrow$ 7	560	52	370	0	159,7	9097,9
7 $\rightarrow$ 8	740	56	375	0	168,4	9847,4
8 $\rightarrow$ 7	180	-15	680	0	91,7	7654,6
7 $\rightarrow$ 6	498	-12	970	0	289,7	4831,0



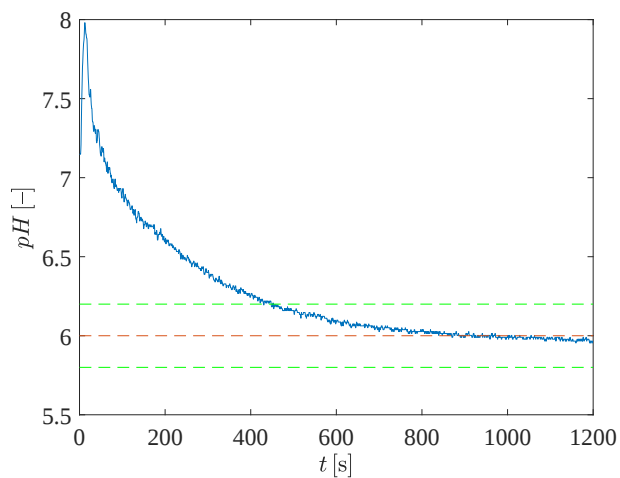
Obr. 2.18: Pribeh napätia U na čerpadle A pri skokovej zmene z pH $7 \rightarrow 8$ pri meniacom sa prietoku roztoku kyseliny octovej.



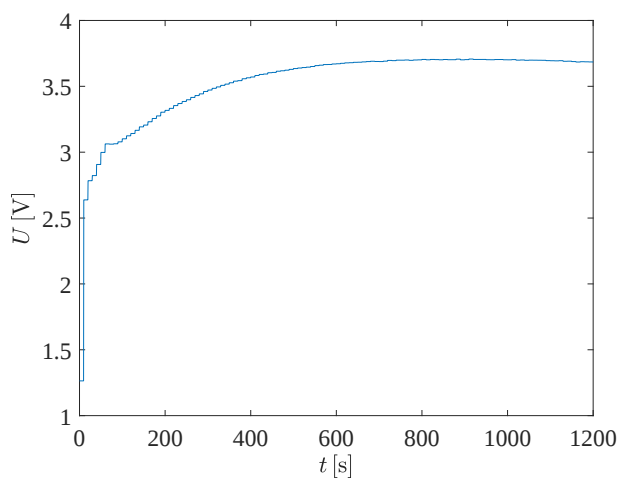
Obr. 2.19: Pribeh riadenia pH pri skokovej zmene z pH $8 \rightarrow 7$: hodnota pH (modrá), žiadaná hodnota pH (červená), δ -okolie žiadanej hodnoty pH (zelené) pri meniacom sa prietoku roztoku kyseliny octovej.



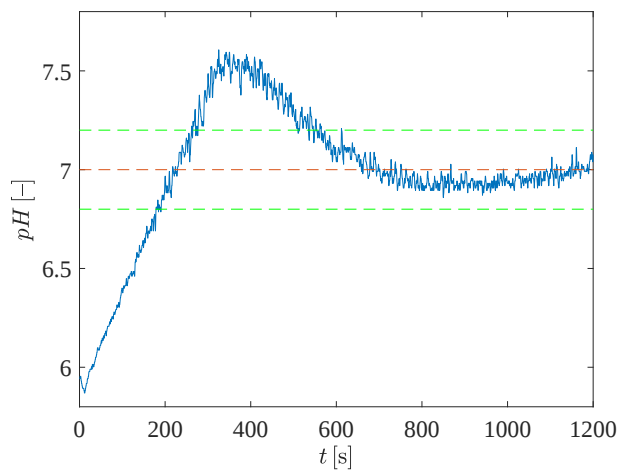
Obr. 2.20: Pribeh napätia U na čerpadle A pri skokovej zmene z pH $8 \rightarrow 7$ pri meniacom sa prietoku roztoku kyseliny octovej.



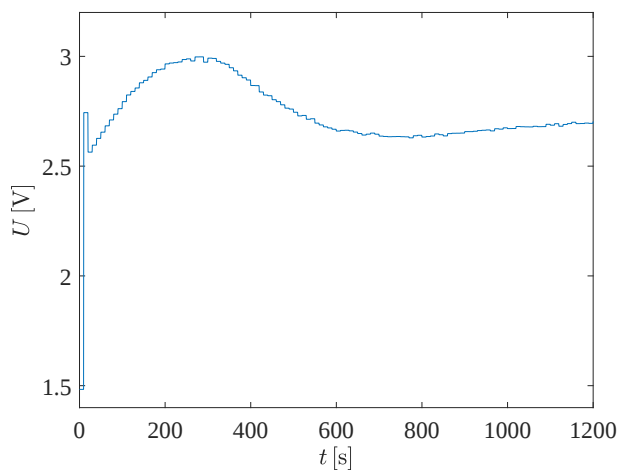
Obr. 2.21: Pribeh riadenia pH pri skokovej zmene z pH $7 \rightarrow 6$: hodnota pH (modrá), žiadaná hodnota pH (červená), δ -okolie žiadanej hodnoty pH (zelené) pri meniacom sa prietoku roztoku kyseliny octovej.



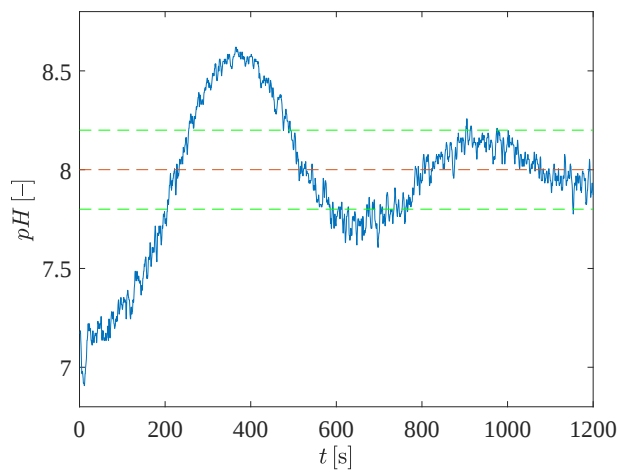
Obr. 2.22: Pribeh napätia U na čerpadle A pri skokovej zmene z $pH\ 7 \rightarrow 6$ pri meniacom sa prietoku roztoku kyseliny octovej.



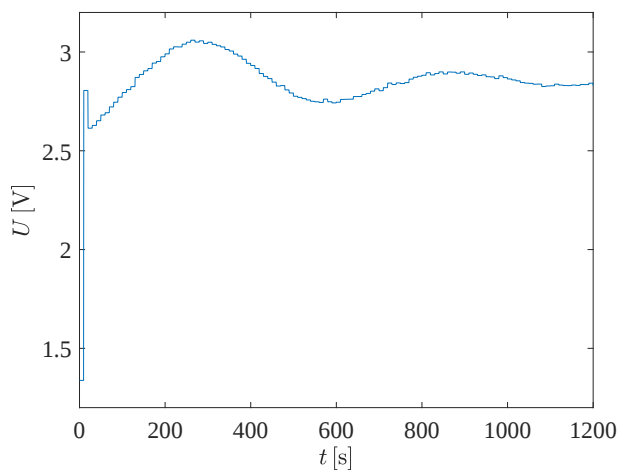
Obr. 2.23: Pribeh riadenia pH pri skokovej zmene z $pH\ 6 \rightarrow 7$: hodnota pH (modrá), žiadaná hodnota pH (červená), δ -okolie žiadanej hodnoty pH (zelené) pri meniacom sa prietoku roztoku hydroxidu sodného.



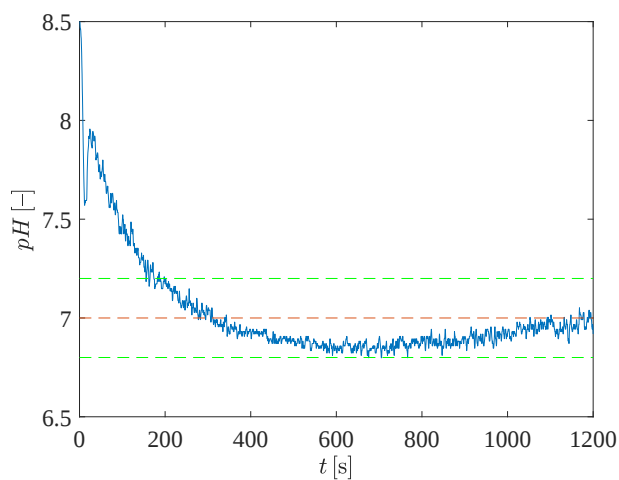
Obr. 2.24: Pribeh napätia U na čerpadle B pri skokovej zmene z pH 6 $\rightarrow$ 7 pri meniacom sa prietoku roztoku hydroxidu sodného.



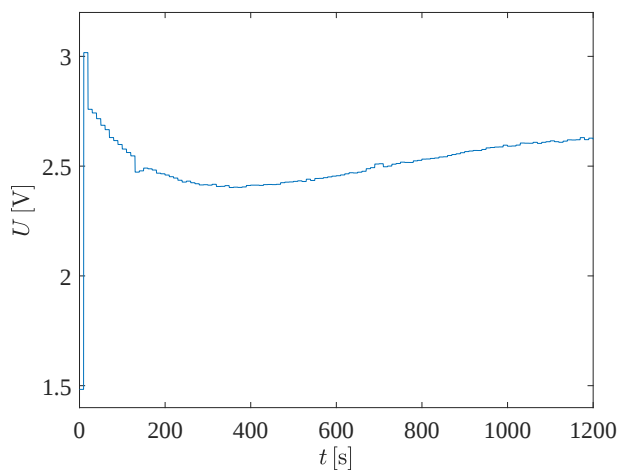
Obr. 2.25: Pribeh riadenia pH pri skokovej zmene z pH 7 $\rightarrow$ 8: hodnota pH (modrá), žiadaná hodnota pH (červená), δ -okolie žiadanej hodnoty pH (zelené) pri meniacom sa prietoku roztoku hydroxidu sodného.



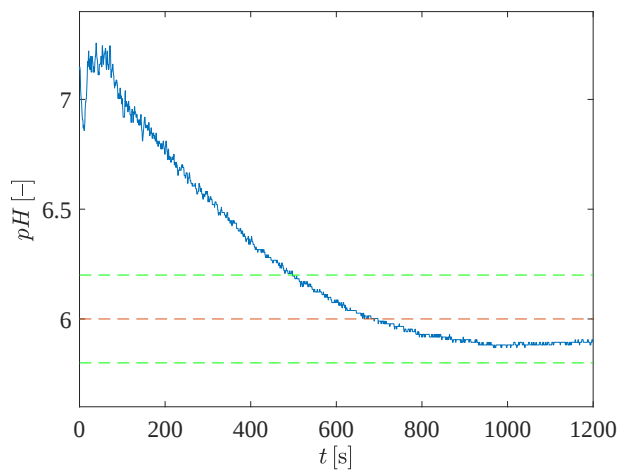
Obr. 2.26: Pribeh napätia U na čerpadle B pri skokovej zmene z pH $7 \rightarrow 8$ pri meniacom sa prietoku roztoku hydroxidu sodného.



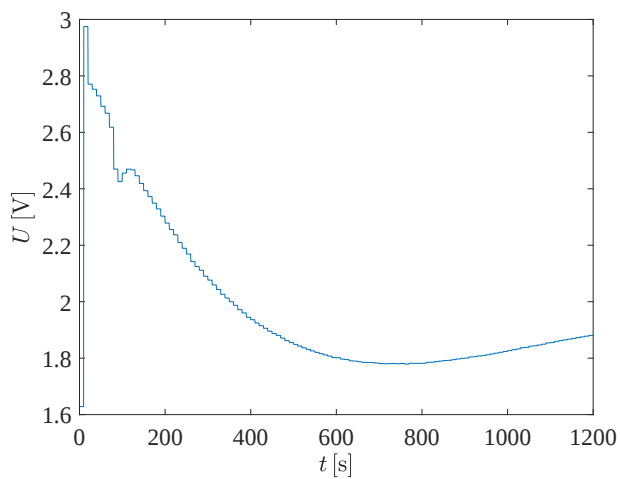
Obr. 2.27: Pribeh riadenia pH pri skokovej zmene z pH $8 \rightarrow 7$: hodnota pH (modrá), žiadaná hodnota pH (červená), δ -okolie žiadanej hodnoty pH (zelené) pri meniacom sa prietoku roztoku hydroxidu sodného.



Obr. 2.28: Pribeh napätia U na čerpadle B pri skokovej zmene z pH $8 \rightarrow 7$ pri meniacom sa prietoku roztoku hydroxidu sodného.



Obr. 2.29: Pribeh riadenia pH pri skokovej zmene z pH $7 \rightarrow 6$: hodnota pH (modrá), žiadaná hodnota pH (červená), δ -okolie žiadanej hodnoty pH (zelené) pri meniacom sa prietoku roztoku hydroxidu sodného.



Obr. 2.30: Priebeh napätia U na čerpadle B pri skokovej zmene z $pH\ 7 \rightarrow 6$ pri meniacom sa prietoku roztoku hydroxidu sodného.

Záver

Hlavným cieľom mojej bakalárskej práce bolo navrhnúť pokročilé robustné riadenie, resp. robustné prediktívne riadenie, procesu neutralizácie roztoku kyseliny octovej a roztoku hydroxidu sodného za účelom dosiahnutia žiadanej hodnoty pH s požadovanou kvalitou riadenia.

Najskôr bolo potrebné, aby som sa oboznámil s laboratórnym chemickým reaktorom *Armfield PCT40 Basic Process Module* a s uvažovaným procesom neutralizácie, ktorý v laboratórnom chemickom reaktore prebiehal. Následne, aby som mohol efektívne pracovať s laboratórnym chemickým reaktorom, som kalibroval merací člen, ktorým bol pH senzor a kalibroval som aj akčné členy, ktorými boli dve čerpadlá, pričom jedno zabezpečovalo objemový prietok roztoku kyseliny octovej a druhé zabezpečovalo objemový prietok roztoku hydroxidu sodného do laboratórneho chemického reaktora.

Z experimentálne nameraných údajov som zostrojil dve prevodové charakteristiky systému, ktoré majú priebeh zodpovedajúci titračným krivkám daného procesu neutralizácie. Dôvodom, prečo boli dve je, že v jednom prípade som menil koncentráciu roztoku kyseliny octovej a v druhom prípade som menil koncentráciu roztoku hydroxidu sodného. Vďaka prevodovým charakteristikám som získal informácie dôležité z pohľadu riadenia, a to, že neutralizácia je procesom, ktorý sa správa nesymetricky a nelineárne, čo znamená, že na riadenie bude lepšie použiť pokročilejšiu metódu. A získal som aj informáciu o rozsahu pracovných bodov, čo

znamená, že viem v akých minimálnych a maximálnych hodnotách sa môžem pri riadení hodnoty pH pohybovať.

Následne som identifikoval vstupno-výstupný matematický model laboratórneho chemického reaktora pre prípad meniaceho sa objemového prietoku roztoku kyseliny octovej pri konštantnom objemovom prietoku roztoku hydroxidu sodného a potom aj pre prípad meniaceho sa objemového prietoku roztoku hydroxidu sodného pri konštantnom objemovom prietoku roztoku kyseliny octovej. Vzhľadom na to, že proces neutralizácie má nelineárne a nesymetrické správanie, identifikáciu som uskutočnil na základe ôsmich prechodových charakteristík experimentálne nameraných pre skokové zmeny vstupu smerom nahor aj nadol pre prvý prípad, čiže postupne sa menil objemový prietok roztoku kyseliny octovej a objemový prietok roztoku hydroxidu sodného bol konštantný. Takisto som robil aj identifikáciu pre osem nameraných prechodových charakteristík pre skokové zmeny vstupu smerom nahor aj nadol pre druhý prípad, čiže postupne sa menil objemový prietok roztoku hydroxidu sodného a objemový prietok roztoku kyseliny octovej bol konštantný.

Pre prvý aj pre druhý prípad som získal výsledné vstupno-výstupné matematické modely laboratórneho chemického reaktora vo forme prenosových funkcií 1. rádu s intervalovými neurčitostami pre proces neutralizácie. Prenosové funkcie mali malé dopravné oneskorenie, ktoré som zanedbal, pre zjednodušenie návrhu pokročilého riadenia. V rámci práce som dopravné oneskorenie tiež aproximoval lineárnou aproximáciou Taylorovým rozvojom menovateľa prenosu systému do 1. rádu, aby som mohol pri ďalšej práci s daným procesom študovať, aký vplyv bude mať zohľadnenie aproximovaného dopravného oneskorenia na kvalitu riadenia.

Po získaní vstupno-výstupných matematických modelov som na ich základe navrhol robustné prediktívne riadenie procesu neutralizácie za účelom dosiahnutia požadovanej hodnoty pH, čo sa mi aj úspešne podarilo a nakoniec som vyhodnotil kvalitu riadenia pomocou časových a integrálnych ukazovateľov, ako aj na základe priebehov riadenej veličiny v danom rozsahu hodnôt pH od 6 – 8.

Súbory, ktoré som vytvoril alebo používal v prostredí MATLAB/Simulink sú dostupné v e-learningovom systéme Moodle v kurze *Laboratórium procesov*.

Literatúra

- [1] Acetic acid. on-line [cit. 2018.03.02]: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/acetic_acid#section=Top.
- [2] Sodium hydroxide. on-line [cit. 2018.03.03]: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/14798#section=Top>.
- [3] Glass electrode. on-line [cit. 2018.03.04]: https://en.wikipedia.org/wiki/Glass_electrode.
- [4] What is calibration? on-line [cit. 2018.03.04]: <https://www.aicompanies.com/education/calibration/what-is-calibration/>.
- [5] Extracts from instruction manual PCT40. Armfield, 2005.
- [6] M. Bakošová. Strejcová metóda identifikácie prenosovej funkcie a experimentálne metódy návrhu regulátora. on-line [cit. 2018.03.10]: <http://www.kirp.chnikf.stuba.sk/moodle/course/view.php?id=214>.
- [7] M. Bakošová. Úvod do robustného riadenia. on-line [cit. 2018.04.02]: http://www.kirp.chnikf.stuba.sk/moodle/pluginfile.php/23815/mod_resource/content/4/predn1%201h.pdf.
- [8] M. Bakošová, M. Fikar a L. Čírka. Základy automatizácie. STU v Bratislave, 2003.

- [9] M. Bakošová a M. Fikar. Riadenie procesov. Vydavateľstvo STU, Bratislava, 2008.
- [10] F. Borrelli, A. Bemporad a M. Morari. Predictive Control for linear and hybrid systems. Cambridge University Press, 2014.
- [11] J. Garaj, D. Bustin a Z. Hladký. Analytická chémia. Alfa vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1987.
- [12] J. Holaza, M. Klaučo, J. Drgoňa, J. Oravec, M. Kvasnica a M. Fikar. Mpc-based reference governor control of a continuous stirred-tank reactor. Computers & Chemical Engineering, 108:289–299, 2018.
- [13] M. V. Kothare, V. Balakrishnan a M. Morari. Robust Constrained Model Predictive Control Using Linear Matrix Inequalities. Automatica, 32:1361–1379, 1996.
- [14] M. Kvasnica. Fitovanie so všeobecnými bázičnými funkciami. on-line [cit. 2018.03.15]: http://www.kirp.chnikf.stuba.sk/moodle/pluginfile.php/58325/mod_resource/content/1/opt_03.pdf.
- [15] M. Kvasnica. Introduction to model predictive control. on-line [cit. 2018.04.05]: http://kirp.chnikf.stuba.sk/~kvasnica/mpc/01_mpc_introduction.pdf.
- [16] J. Mikleš a M. Fikar. Process Modelling, Identification, and Control. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg New York, 2007.
- [17] R. Paulen. Riadenie systémov s dopravným oneskorením. STU Bratislava, 2006.