

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
Fakulta chemickej a potravinárskej technológie

Evidenčné číslo: FCHPT-5414-61829

Pokročilé metódy riadenia pH v chemickom reaktore

Diplomová práca

2017

Bc. Kinga Batárová

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
Fakulta chemickej a potravinárskej technológie

Evidenčné číslo: FCHPT-5414-61829

Pokročilé metódy riadenia pH v chemickom reaktore

Diplomová práca

Študijný program: automatizácia a informatizácia v chémii a potravinárstve

Študijný odbor: 5.2.14 automatizácia

Školiace pracovisko: Ústav informatizácie, automatizácie a matematiky

Vedúci záverečnej práce: Ing. Juraj Holaza, PhD.

Bratislava, 2017

Bc. Kinga Batárová



ZADANIE DIPLOMOVEJ PRÁCE

Študentka: **Bc. Kinga Batárová**
ID študenta: 61563
Študijný program: automatizácia a informatizácia v chémii a potravinárstve
Študijný odbor: 5.2.14. automatizácia
Vedúci práce: Ing. Juraj Holaza

Názov práce: **Pokročilé metódy riadenia pH v chemickom reaktore**

Jazyk, v ktorom sa práca vypracuje: slovenský jazyk

Špecifikácia zadania:

Práca sa zameriava na návrh pokročilého riadenia pH v chemicko-technologickom procese, kde prebieha chemická reakcia medzi kyselinou octovou a hydroxidom sodným. Čiastkové ciele práce možno rozdeliť nasledovne:

- 1.) Zoznámenie sa s procesom riadenia pH.
- 2.) Návrh jednoduchých a pokročilých riadiacich algoritmov.
- 3.) Implementácia riadiacich stratégií vo výpočtovom prostredí MATLAB/Simulink.
- 4.) Porovnanie a vyhodnotenie kvality riadenia jednotlivých regulátorov.

Rozsah práce: 50

Zoznam odbornej literatúry:

1. M. King, Process Control: A Practical Approach, Wiley, 2010.

Riešenie zadania práce od: 13. 02. 2017

Dátum odovzdania práce: 21. 05. 2017

Bc. Kinga Batárová
študentka

prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
vedúci pracoviska

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

Abstrakt

Práca sa zaoberá odvodením matematického modelu chemického reaktora, identifikáciou reaktora a návrhom riadenia pre tento proces. Budeme riadiť pH na výstupe z reaktora. Na riadenie pH navrhujeme PID regulátor a prediktívny regulátor (MPC). MPC je vo forme optimalizačného problému.

pH budeme riadiť prietokom zásady, ktorú postupne pridávame ku roztoku kyseliny s konštantným prietokom. Porovnáme výsledky získané navrhnutými regulátormi a vyhodnotíme kvalitu riadenia.

Abstrakt

Main goals of the thesis are to derive the mathematical model of the chemical reactor, to identify the process and control design. We want to control pH on the output from the system. To control pH we design PID controller and model predictive controller (MPC). MPC is formulated as an optimisation problem.

We control pH by changing the flow rate of the base, which we add to the solution of the acid with constant flow rate. We compare the results we got controlling the process with designed controllers and evaluate quality of control.

Podakovanie

Ďakujem môjmu vedúcemu diplomovej práce, Ing. Jurajovi Holazovi, PhD. za jeho odborné vedenie a cenné rady, ktoré mi poskytol pri vypracovaní tejto práce.

Obsah

Zoznam tabuliek	3
Zoznam obrázkov	4
1 Úvod	1
2 Opis chemického reaktora	2
2.1 Schéma chemického reaktora	3
2.2 Matematický model reaktora	4
3 Identifikácia	7
3.1 N4SID	7
3.1.1 Syntax	7
3.1.2 Opis	7
3.1.3 Výstupné parametre	8
3.2 Identifikácia chemického reaktora	10
4 Riadenie pH	13
5 PID riadenie	16
5.1 PIDTUNE	16

5.1.1	Syntax	16
5.1.2	Opis	16
5.1.3	Vstupné parametre	17
5.1.4	Výstupné parametre	19
5.2	PID riadenie chemického reaktora	20
6	Prediktívne riadenie (MPC)	22
6.1	Lineárne programovanie	23
6.2	Kvadratické programovanie	24
6.3	Formulácia prediktívneho riadenia	24
6.3.1	Štandardná formulácia MPC - úloha regulácie	24
6.3.2	MPC so sledovaním referencie	27
6.3.3	MPC s integračnou zložkou	29
6.3.4	Disturbance modeling	30
6.4	Matematické modely pre návrh MPC	31
6.5	Návrh prediktívneho riadenia pre nelineárny model chemického reaktora	32
7	Výsledky riadenia	34
7.1	Výsledky získané pomocou PID regulátora	34
7.2	Výsledky získané pomocou prediktívneho riadenia	37
7.2.1	Riadenie pH	37
7.2.2	Riadenie pH pomocou procesnej veličiny	43
8	Hodnotenie výsledkov	46
9	Záver	49
	Literatúra	50

Zoznam tabuliek

7.1	Rozdelenie intervalu F_B	35
7.2	Navrhnuté PID regulátory na riadenie pH	35
7.3	Navrhnuté prediktívne regulátory na riadenie pH	37
7.4	Rozdelenie intervalu F_B	43
7.5	Navrhnuté prediktívne regulátory na riadenie pH pomocou pro- cesnej veličiny	43
8.1	Vyhodnotenie kvality riadenia nelineárneho modelu	47

Zoznam obrázkov

2.1	Schéma chemického reaktora	3
2.2	Titračná krivka	6
3.1	Titračná krivka	10
3.2	Dáta pre identifikáciu	11
3.3	Porovnanie odoziev z nelineárneho a lineárneho modelu . . .	12
4.1	Závislosť pH a PV od Fb	15
5.1	Schéma riadenia pomocou PID	20
6.1	URO s MPC	23
6.2	Schéma riadenia pomocou MPC	33
7.1	Priebeh pH	36
7.2	Použité akčné zásahy	36
7.3	Riadenie pH na 1. intervale	37
7.4	Riadenie pH na 2. intervale	38
7.5	Riadenie pH na 3. intervale	38
7.6	Riadenie pH na 4. intervale	39
7.7	Riadenie pH na 5. intervale	39

7.8 Riadenie pH na 6. intervale	40
7.9 Riadenie pH na 7. intervale	40
7.10 Riadenie pH na 8. intervale	41
7.11 Riadenie pH na 9. intervale	41
7.12 Priebeh pH	42
7.13 Použité akčné zásahy	42
7.14 Priebeh pH	44
7.15 Priebeh procesnej veličiny (PV)	44
7.16 Použité akčné zásahy	45

Kapitola 1

Úvod

Riadene pH má veľké uplatnenie napríklad v potravinárskom, farmaceutickom priemysle alebo v spracovaní odpadových vôd. V priemysle sa vyžaduje presné riadenie pH, preto je často riadený na určitom intervale. Chceme riadiť pH v chemickom reaktore, v ktorom prebieha chemická reakcia medzi kyselinou octovou a hydroxidom sodným. Navrhnuť riadenie pre tento proces ale nie je jednoduché kvôli silnej nelineárnej závislosti medzi pH a koncentráciou zásady. Nároky na kvalitu riadenia sú vysoké. Aby sme dokázali zabezpečiť požadovanú kvalitu riadenia, sme na riadenie pH navrhli okrem PID riadenia aj optimálne riadenie, ktoré bude manipulovať s prietokom zásady tak, aby pH bolo udržiavané na zvolenej hodnote.

Kapitola 2

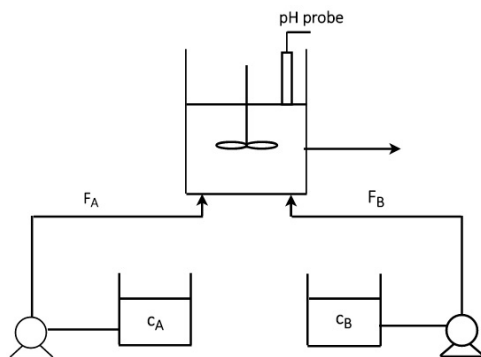
Opis chemického reaktora

Chemické reaktory predstavujú typické výrobné jednotky chemických technológií. Z hľadiska riadenia patria medzi najťažšie zvládnuteľné procesy. Pri riadení chemického reaktora sa snažíme zvýšiť produktivitu, kvalitným riadením zabezpečujeme bezpečnosť prevádzky a kvalitu produkcie.

Chceme maximalizovať konverziu a výťažnosť reakcie. Výťažnosť vyjadruje, koľko z reaktantov zreaguje na produkty počas reakcie. Snažíme sa teda o to, aby nám reakcia bežala s čo najväčšou výťažnosťou. Konverzia vyjadruje, koľko z reaktantov nezreagovalo - koľko z nich vraciame naspäť do reaktora.

Riadiaci systém reaktora by mal byť schopný maximalizovať produkciu, minimalizovať fluktuáciu v kvalite produktov a v prísune reaktantov, a mal by byť schopný reagovať podľa toho, aký chceme mať výťažok a konverziu. Zabezpečením stabilného fungovania reaktora dokážeme zabezpečiť aj stabilitu ostatných zariadení, ktoré sú umiestnené za ním v prevádzke.

2.1 Schéma chemického reaktora



Obr. 2.1: Schéma chemického reaktora

Systém chemického reaktora sa skladá z dvoch nádrží, z ktorých sa čerpá roztok kyseliny octovej (CH_3COOH) a roztok hydroxidu sodného (NaOH). Prietok kyseliny F_A je konštantný s hodnotou 5 ml/min, prietok zásady F_B sa mení v rozsahu 0 – 10 ml/min. Na zabezpečenie požadovaných prietokov sa používajú membránové čerpadlá, ktoré sú umiestnené paralelne. Koncentrácia roztokov CH_3COOH a NaOH v uskladňovacích zásobníkoch je 0.05 mol/l.

Disociácia kyseliny octovej a hydroxidu sodného vo vode:



kyselina octová patrí medzi slabé kyseliny, nedisociuje sa úplne vo vode.

Hydroxid sodný ako silná zásada sa vo vode úplne disociuje:



Koncentrácia hydroxidu sodného sa rovná koncentrácie ich iónov (koncentrácie sodných katiónov a koncentrácie hydroxidových aniónov):

$$x_B = [NaOH] = [Na^+] = [OH^-] \quad (2.3)$$

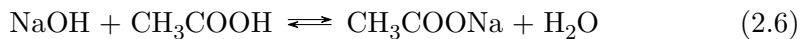
Koncentrácia vzniknutých katiónov je rovnaká, ako koncentrácia aniónov:

$$[Na^+] + [H^+] = [CH_3COO^-] + [OH^-] \quad (2.4)$$

Keďže kyselina octová sa vo vode úplne nerozpustí, koncentráciu iónov kyseliny vo vode môžeme vyjadriť nasledovne:

$$x_A = [CH_3COOH] + [CH_3COO^-] \quad (2.5)$$

V chemickom reaktore prebieha reakcia medzi kyselinou octovou a hydroxidom sodným, pričom vzniká produkt so špecifickým pH, ktoré je merané pH sondou. Produktom reakcie je octan sodný a voda.



2.2 Matematický model reaktora

Matematický model chemického reaktora je reprezentovaný diferenciálnymi rovnicami, ktoré sú stavovými rovnicami matematického modelu, a rovnicou elektroneutrality. Stavové rovnice modelu:

$$V \frac{dx_A}{dt} = F_{ACA} - (F_A + F_B)x_A \quad (2.7a)$$

$$V \frac{dx_B}{dt} = F_{BCB} - (F_A + F_B)x_B \quad (2.7b)$$

kde $V = 1.5$ l je objem chemického reaktora, c_A je vstupná koncentrácia kyseliny octovej, c_B je vstupná koncentrácia hydroxidu sodného, F_A je prietok kyseliny octovej, F_B je prietok hydroxidu sodného

Riešením diferenciálnych rovníc získame hodnoty stavov modelu x_A , x_B pre prietoky F_B na intervale 0 - 10 ml/min.

Dosadením rovníc

$$[Na^+] = x_B \quad (2.8)$$

$$[CH_3COO^-] = \frac{k_A x_A}{[H^+] + k_A} \quad (2.9)$$

$$[OH^-] = \frac{k_W}{[H^+]} \quad (2.10)$$

do vzťahu (2.4) dokážeme odvodiť rovnicu elektroneutrality:

$$[H^+]^3 = (x_B + k_A)[H^+]^2 + (k_A x_A - k_W)[H^+] - k_A k_W = 0 \quad (2.11)$$

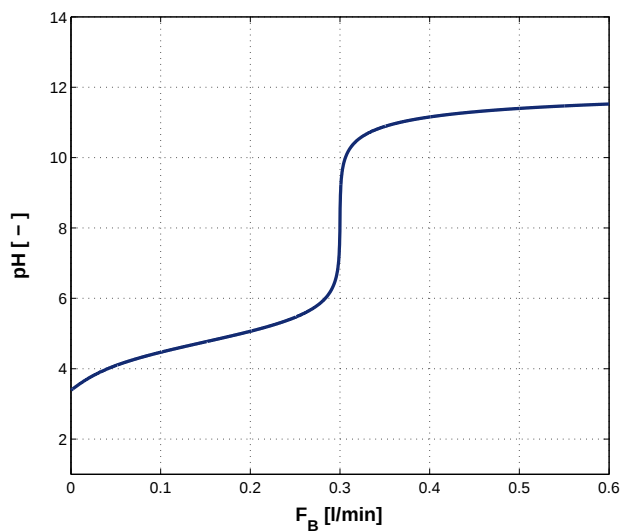
kde $k_A = 10^{-5}$ je disociačná konštanta kyseliny octovej a $k_W = 10^{-14} = [OH^-][H^+]$ je iónový súčin vody. Vyriešením algebraickej rovnice (2.11) získame hodnotu koncentrácie kationov vodíka $[H^+]$. Dosadením $[H^+]$ do výstupnej rovnice

$$pH = -\log([H^+]) \quad (2.12)$$

dokážeme vypočítať pH roztoku v chemickom reaktore.

pH sa udáva v rozsahu 0 - 14. V prípade hodnoty pH v rozsahu 0 - 7 ide o kyslé prostredie, v prípade hodnôt v rozsahu 7 - 14 o ide o zásadité prostredie. Ak $pH = 7$, ide o neutrálne prostredie. V reaktore máme slabú kyselinu, ku

ktorému postupne pridávame silnú zásadu. Hodnota pH v reaktore sa potom mení v závislosti od množstva pridanej zásady. Závislosť medzi hodnotou pH a prietoku zásady opisuje titračná krivka:



Obr. 2.2: Titračná krivka

Kapitola 3

Identifikácia

Model chemického reaktora sme identifikovali využitím toolboxu N4SID v Matlabe. N4SID vráti identifikovaný model ľubovoľného rádu v spojitom alebo diskrétnom čase. Model je v tvare stavového opisu.

3.1 N4SID

3.1.1 Syntax

```
sys = n4sid(data,nx)
```

```
sys = n4sid(data,nx,Name,Value)
```

```
sys = n4sid(data,nx,Name,Value,opt)
```

```
[sys,x0] = n4sid(data,nx,Name,Value,opt)
```

3.1.2 Opis

sys = n4sid(data,nx) - identifikujeme model rádu n_x v tvare stavového opisu na základe nameraných vstupno-výstupných dát

sys = n4sid(data,nx,Name,Value) - máme možnosť špecifikovať aj ďalšie parametre pri identifikácii, nastaviť ďalšie vlastnosti identifikovaného systému

sys = n4sid(data,nx,Name,Value,opt) - okrem vlastností modelu môžeme špecifikovať aj nastavenia identifikácie

[sys,x0] = n4sid(data,nx,Name,Value,opt), - pomocou tohto predpisu okrem identifikácie systému vieme odhadnúť aj počiatočné stavy systému

3.1.3 Výstupné parametre

SYS - sys je IDSS model. IDSS model je systém, ktorý je vo forme stavového opisu v spojitom alebo diskretnom čase s identifikovateľnými koeficientami.

V spojitom čase má tvar:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ke(t) \quad (3.1a)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + e(t) \quad (3.1b)$$

kde $u(t)$ je vstup do systému, $y(t)$ je výstup zo systému, $x(t)$ je vektor n_x stavov systému a $e(t)$ je vektor porúch.

V diskretnom čase model má tvar:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Ke(k) \quad (3.2a)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) + e(k) \quad (3.2b)$$

Prvky matíc stavového opisu A, B, C, D, aj prvky matice porúch K môžu byť identifikovateľnými parametrami. IDSS model obsahuje hodnoty prvkov týchto matíc v koeficientoch A, B, C, D, K identifikovaného modelu.

x0 - Počiatočné stavy, ktoré sú vypočítané spolu s identifikovaným systémom.

Vstupné parametre

DATA - dáta, na základe ktorých model identifikujeme. Keď pracujeme v časovej oblasti, dáta na identifikáciu sú v tvare objektu *IDDATA*, ktorý obsahuje hodnoty vstupného a výstupného signálu. Vo frekvenčnej oblasti vstupné dáta máme buď v tvare objektu *IDDATA* alebo vo forme frekvenčnej charakteristiky.

NX - rád identifikovaného systému. Môžeme ho definovať ako skalár alebo ako vektor. Ďalšou možnosťou je nastaviť $NX = 'best'$, vtedy sa automaticky vyberie optimálny rád modelu v rozsahu 1:10.

Name-Value Pair Arguments - nastavenie vlastností identifikovaného modelu. Name znamená názov vlastnosti, a Value jeho hodnotu. Môžeme nastaviť rôzne vlastnosti modelu pomocou parametrov (Name1, Value1, ..., NameN, ValueN), v akomkoľvek poradí. Vieme nastaviť napríklad periódu vzorkovania T_s , štruktúru (formu) modelu, či chceme identifikovať aj poruchy, ktoré na systém vplývajú, atď.

Periódou vzorkovania T_s - špecifikujeme periódu vzorkovania modelu. Pre spojité modely nastavíme $T_s = 0$, pre diskrétné modely ju nastavíme ako skalár s hodnotou väčšou ako nula.

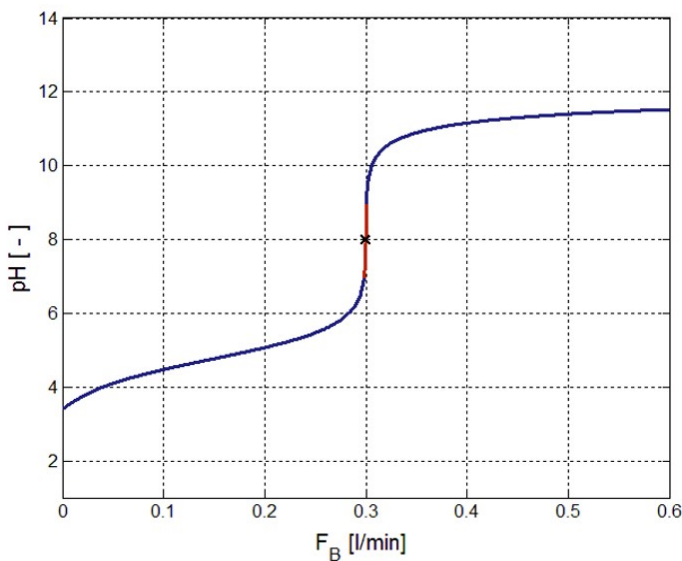
Disturbance Model - určíme, či identifikujeme aj maticu porúch K . Môže nadobudnúť 2 hodnoty: none — maticu K neodhadujeme, nastavíme jej hodnotu rovnú 0. Predpokladáme, že na model nevplývajú žiadne poruchy. estimate — odhadujeme aj maticu porúch K

OPT - špecifikujeme nastavenia identifikácie pomocou príkazu `n4sidOptions`. Môžeme nastaviť napríklad, aké chceme mať začiatkové hodnoty stavov x_0 .

3.2 Identifikácia chemického reaktora

Na vstupe do systému máme prietok zásady, na výstupe pH zariadeného roztoku. Závislosť medzi prietokom zásady a pH je nelineárna, čo vidíme aj na titračnej krivke. (Obr. 2)

Vidíme, že v strednej časti titračnej krivky je zosilnenie veľké, aj malá zmena prietoku zásady vyvolá veľkú zmenu pH na výstupe. Inde je dynamika pomalšia, zosilnenie systému je menšia. Potrebujeme preto väčšiu zmenu prietoku zásady na vstupe, aby zmena pH bola pozorovateľná. Najväčší sklon má titračná krivka pri neutrálnom pH ($\text{pH} = 7$).



Obr. 3.1: Titračná krivka

Model chemického reaktora sme chceli identifikovať na intervale pH, ktorý zodpovedá prietokom F_B 0 - 10 l/min. Rozsahu prietoku zásady 0 - 10 l/min zodpovedá rozsah pH 3.15 - 12.22.

Pri identifikácii sme postupovali tak, že sme si interval F_B rozdelili na niekoľko častí na základe dynamiky titračnej krivky. Na každom intervale sme si vykonali niekoľko skokových zmien prietoku zásady a sledovali sme na výstupe zmenu pH.

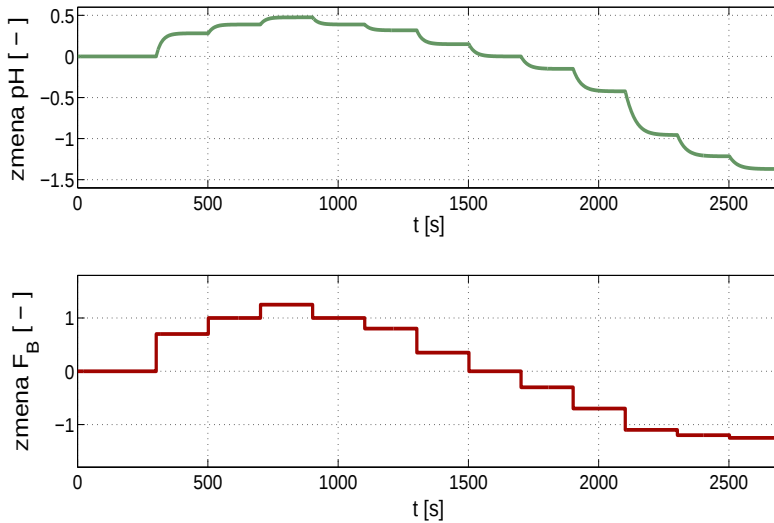
Z nameraných vstupno - výstupných dát sme získali model chemického reaktora na jednotlivých intervaloch F_B . Na identifikáciu sme použili identifikačný toolbox N4SID. Získali sme lineárne modely 2. rádu. Modely sú v tvare diskrétného stavového opisu:

$$x_{k+1} = A_d x_k + B_d u_k, \quad (3.3a)$$

$$y_k = C_d x_k + D_d u_k \quad (3.3b)$$

Periódá vzorkovania $T_s = 10$ s.

Skokové zmeny vykonané na 1. zvolenom intervale, ktorému zodpovedá prietok 0 - 2.5 ml/min a hodnoty pH 3.12 - 5.00:



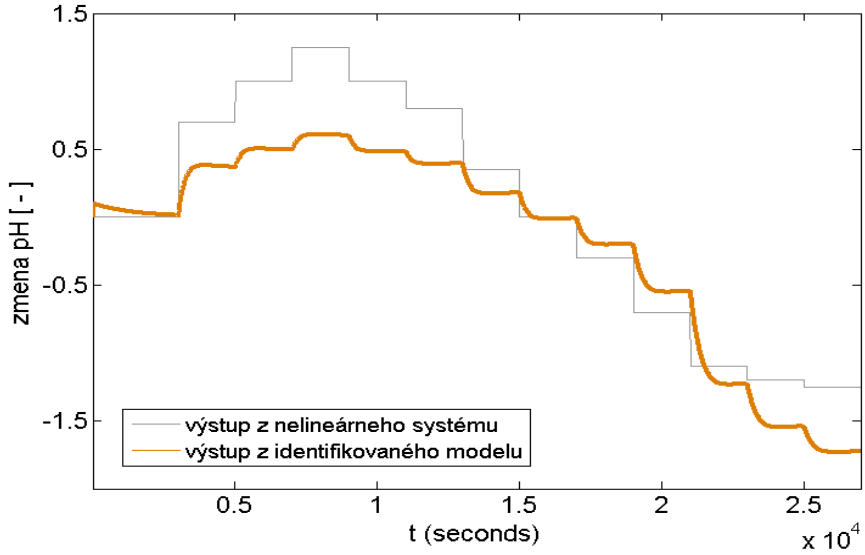
Obr. 3.2: Dáta pre identifikáciu

Identifikovaný model 2. rádu:

$$x_{k+1} = \begin{bmatrix} 0.9600 & 0.0877 \\ 0.0034 & 0.9254 \end{bmatrix} x_k + \begin{bmatrix} 0.0208 \\ -0.0072 \end{bmatrix} u_k, \quad (3.4a)$$

$$y_k = \begin{bmatrix} 2.6818 & 3.1682 \end{bmatrix} x_k + \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} u_k, \quad (3.4b)$$

Overili sme si správnosť identifikácie. Porovnali sme odozvu nelineárneho a identifikovaného modelu na skokové zmeny vstupu:



Obr. 3.3: Porovnanie odoziev z nelineárneho a lineárneho a modelu

Kapitola 4

Riadenie pH

Na vstupe do chemického reaktora máme roztok kyseliny, ku ktorému sa postupne pridáva roztok zásady. Zmiešaním prúdov na výstupe dosiahneme požadovanú hodnotu pH. Hodnota pH po pridaní zásady sa zmení okamžite. Časová konštanta pri riadení pH teda nie je veľká, ale zosilnenie je výrazne premenlivé.

Pri riadení pH môžeme postupovať rôznymi spôsobmi. Môžeme si napríklad rozdeliť titračnú krivku na viaceré časti na základe dynamiky a navrhnúť si samostatný regulátor pre jednotlivé časti. Zosilnenie daného regulátora závisí od toho, pri akej hodnote pH pracujeme. Na častiach titračnej krivky, kde je zosilnenie samotného procesu malé, potrebujeme na riadenie pH regulátor s veľkým zosilnením, a na častiach titračnej krivky s veľkým zosilnením navrhujeme regulátor s malým zosilnením. Tento prístup k riadeniu sa volá gain scheduling.

Ďalšou možnosťou je použiť takzvané linearizujúce riadenie, kde neriadime na pH ale na pomocnú veličinu PV. Riadenou veličinou je v tomto prípade rozdiel koncentrácie kyslých častí a zásaditých častí, čo môžeme vyjadriť nasledujúcim vzťahom:

$$PV = ([CH_3COOH] + [H^+]) - ([NaOH] + [OH^-]) \quad (4.1)$$

kde

$$[H^+] = 10^{-pH} \quad (4.2)$$

$$[OH^-] = \frac{k_w}{[H^+]} = \frac{10^{-14}}{10^{-pH}} = 10^{pH-14} \quad (4.3)$$

$$[NaOH] = \frac{[Na^+][OH^-]}{K_B} = \frac{[Na^+]10^{pH-14}}{K_B} \quad (4.4)$$

$$[CH_3COOH] = \frac{x_A[H^+]}{K_A} = \frac{x_A10^{-pH}}{K_A} \quad (4.5)$$

Po dosadení za jednotlivých koncentracii iónov dostaneme výsledný vzťah pre výpočet procesnej veličiny:

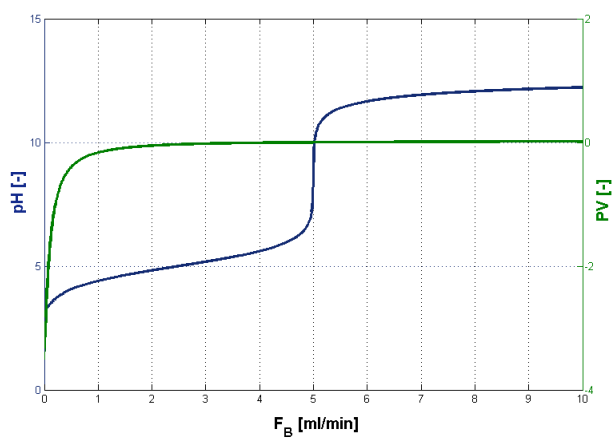
$$PV = 10^{pH-14} \left(\frac{[Na^+]}{K_B} + 1 \right) - 10^{-pH} \left(\frac{x_A}{K_A} + 1 \right) \quad (4.6)$$

Keďže pracujeme so slabou kyselinou a silnou zásadou, potrebujeme modifikovať tento vzťah do nasledujúcej podoby:

$$PV = 10^{pH-14} - 10^{-pH} \left(\frac{x_A}{K_A} + 1 \right) \quad (4.7)$$

Keď používame silnú kyselinu a silnú zásadu, použijeme vzťah:

$$PV = 10^{pH-14} - 10^{-pH} \quad (4.8)$$



Obr. 4.1: Závislost pH a PV od F_B

Dostaneme lineárnejší priebeh riadenej veličiny PV , ktorou môžeme pri riadení nahradiť na určitých intervaloch pH , alebo na celom intervale 3.15 - 12.22.

Kapitola 5

PID riadenie

Najpr sme si navrhli pre lineárny model chemického reaktora riadenie pomocou PID regulátora. Regulátor bol navrhnutý pomocou algoritmu PIDTUNE.

5.1 PIDTUNE

5.1.1 Syntax

$C = \text{pidtune}(\text{sys}, \text{type})$ alebo $C = \text{pidtune}(\text{sys}, C0)$

$C = \text{pidtune}(\text{sys}, \text{type}, \text{wc})$ alebo $C = \text{pidtune}(\text{sys}, C0, \text{wc})$

$C = \text{pidtune}(\text{sys}, \text{type}, \text{wc}, \text{opts})$ alebo $C = \text{pidtune}(\text{sys}, C0, \text{wc}, \text{opts})$

5.1.2 Opis

PIDTUNE mení parametre PID regulátora C tak, aby bola rovnováha medzi rýchlosťou odozvy a stabilitou uzavretého regulačného obvodu. Keď odozva je rýchlejšia, to väčšinou znamená menšiu stabilitu, a pri pomalšej odozve máme väčšiu stabilitu URO.

Vo funkcii PIDTUNE nastavíme typ regulátora pomocou vstupu TYPE alebo C0. Regulátor C je v rovnakej časovej oblasti ako identifikovaný model. Ak navrhujeme PID regulátor pre diskretný model s periódou vzorkovania T_s , PIDTUNE navrhne regulátor v diskretnom čase s rovnakou periódou vzorkovania.

C = pidtune(sys,type) - návrh PID regulátora typu TYPE, pre identifikovaný systém SYS. Pomocou TYPE vieme navrhnúť PID regulátor s paralelnou štruktúrou.

C = pidtune(sys,C0) - navrhne regulátor rovnakého typu s rovnakou štruktúrou ako je regulátor C0.

5.1.3 Vstupné parametre

SYS - dynamický model systému s jedným vstupom a jedným výstupom pre návrh riadenia. SYS môže byť:

- systém v spojitom čase alebo systém v diskretnom čase
- stabilný alebo nestabilný systém. Systém s nestabilnými pólmi môže byť nestabilizovateľný pomocou PID riadenia
- model s dopravným oneskorením. Môže sa stať, že pri riadení modelu s veľkým dopravným oneskorením PID regulátor nedokáže zabezpečiť požadovanú kvalitu riadenia.
- vektor modelov. Keď SYS je vektor, PIDTUNE navrhne samostatný regulátor pre každý model vektora

TYPE - typ regulátora. Určíme, ktoré zložky chceme aby navrhnutý PID regulátor obsahoval.

Poznáme tieto typy PID regulátorov:

1-DOF PID regulátor

P - s proporcinálnou zložkou

I - s integračnou zložkou

PI - s proporcinálnou a integračnou zložkou

PD - s proporcinálnou a derivačnou zložkou

PDF - s proporcinálnou a derivačnou zložkou s filtrom prvého rádu

PID - s proporcinálnou, integračnou a derivačnou zložkou

PIDF - s proporcinálnou, integračnou a derivačnou zložkou s filtrom prvého rádu

2-DOF PID regulátor

PI2 - 2-DOF s proporcinálnou a integračnou zložkou

PD2 - 2-DOF s proporcinálnou a derivačnou zložkou

PDF2 - 2-DOF s proporcinálnou a derivačnou zložkou s filtrom prvého rádu

PID2 - 2-DOF s proporcinálnou, integračnou a derivačnou zložkou

PIDF2 - 2-DOF s proporcinálnou, integračnou a derivačnou zložkou s filtrom prvého rádu

Ak vieme zabezpečiť požadovanú kvalitu riadenia použitím regulátora aj s jednoduchšou štruktúrou, ako s typom regulátora, aký sme si zadefinovali, funkcia PIDTUNE vráti C ako regulátor s jednoduchšou štruktúrou. Napríklad C môže byť PI regulátor, aj keď sme si jeho typ zadefinovali ako PIDF.

C0 - pomocou C0 dokážeme navrhnuť regulátor so štandardnou alebo paralelnou štruktúrou. Môže mať hodnotu: pid, pidstd, pid2 alebo pidstd2. pid je 1DoF regulátor s paralelnou štruktúrou, pidstd je 1DoF regulátor v štandardnom tvare, pid2 je 2DoF regulátor s paralelnou štruktúrou a pidstd2

je 2DoF regulátor v štandardnom tvare.

OPTS - ďalšie nastavenia pre návrh PID regulátora, ako napríklad bezpečnosť vo fáze. Nastavenie OPTS špecifikujeme pomocou príkazu `pdtuneOptions`.

5.1.4 Výstupné parametre

C - návrh regulátora pre identifikovaný systém **SYS**. Ak **SYS** je vektor lineárnych modelov, **PIDTUNE** navrhne samostatný regulátor pre každý z týchto modelov, a vráti vektor PID regulátorov.

Štruktúra regulátora

PID regulátor môže mať štandardnú alebo paralelnú štruktúru.

PID s paralelnou štruktúrou:

- v spojitom čase:

$$G_R(z) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s \quad (5.1)$$

- v diskretnom čase:

$$G_R(s) = K_p + K_i \frac{T_s}{z-1} + K_d \frac{z-1}{T_s} \quad (5.2)$$

PID so štandardnou štruktúrou:

- v spojitom čase:

$$G_R(s) = K_p \left(1 + K_i \frac{1}{s} + K_d s\right) \quad (5.3)$$

- v diskretnom čase:

$$G_R(z) = K_p \left(1 + K_i \frac{T_s}{z-1} + K_d \frac{z-1}{T_s}\right) \quad (5.4)$$

kde $K_p = Z_R$ je proporcionálna zložka, $K_I = \frac{1}{T_I}$ je integračná zložka a $K_D = T_D$ je derivačná zložka regulátora. Z_R je zosilnenie regulátora, T_I je integračná časová konštanta regulátora a T_D je derivačná časová konštanta regulátora.

5.2 PID riadenie chemického reaktora

Pre model chemického reaktora sme si navrhli diskretný PI regulátor s periódou vzorkovania $T_s = 10$ s. Regulátor má paralelnú štruktúru.

Navrhnutý PI regulátor je v tvare:

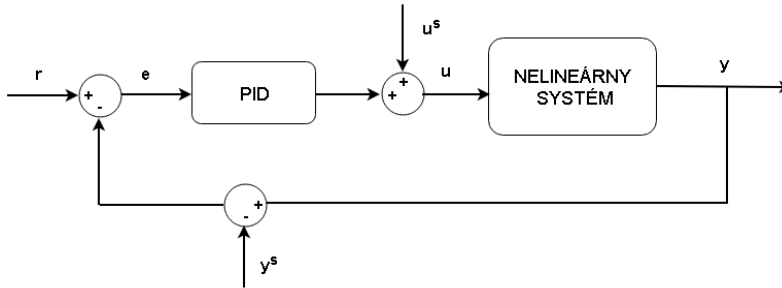
$$G_R(s) = K_p + K_i \frac{T_s}{z - 1} \quad (5.5)$$

kde $K_p = Z_R$, $K_I = \frac{1}{T_I}$

Zákon riadenia navrhnutým PID regulátorom:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i T_s \sum_{i=1}^k e(i) = K_p e_k + u(k-1) + K_i T_s e(k) \quad (5.6)$$

Riadiaca schéma PID regulátorom:



Obr. 5.1: Schéma riadenia pomocou PID

Do regulátora vstupuje zmena regulačnej odchýlky e , ktorý je definovaný ako rozdiel zmeny referencie r a zmeny výstupu y zo systému. Na základe zmeny odchýlky PID regulátor vypočíta zmenu akčného zásahu u . Vstupom do nelineárneho systému je fyzikálna hodnota akčného zásahu, preto pred vstupom

do riadeného systému k nemu pripočítame jej ustálenú hodnotu na danom intervale riadenia. Ako výstup z riadeného systému získame hodnotu pH. Od tejto hodnoty odpočítame ustálenú hodnotu pH pre výpočet zmeny regulačnej odchýlky v ďalšom kroku simulácie.

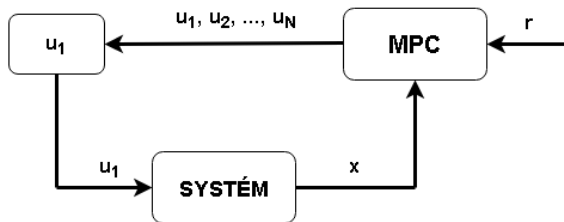
Kapitola 6

Prediktívne riadenie (MPC)

Prediktívne riadenie je optimálne riadenie. Je v o forme optimalizačného problému, ktorý riešime v každej perióde vzorkovania po celom predikčnom horizonte. Predikčný horizont vyjadruje, ako ďaleko do budúcnosti pozeráme. Zložitosť optimalizačného problému závisí od dĺžky predikčného horizontu. Ako riešenie optimalizačného problému dostaneme sekvenciu akčných zásahov po danom predikčnom horizonte. Na výpočet týchto akčných zásahov regulátor využíva predikované stavy a výstupy z riadeného systému.

Zo sekvencie vypočítaných akčných zásahov v danom kroku riadenia implementuje iba 1. do systému. Na riadenie systému môže použiť iba také akčné zásahy, ktoré patria do nejakej prípustnej oblasti určenej ohraničeniami a ktoré udržia vo svojich prípustných hraniciach aj predikované a výstupy.

Na obrázku vidíme uzavretý regulačný obvod, kde systém riadime prediktívnym regulátorom:



Obr. 6.1: URO s MPC

Existuje veľa rôznych matematických formulácií prediktívneho riadenia, ako napríklad lineárne programovanie, nelineárne programovanie alebo kvadratické programovanie. Najčastejšie sa používa kvadratická formulácia MPC.

6.1 Lineárne programovanie

Optimalizačný problém nazývame lineárnym programovaním, ak účelová funkcia je lineárna a ohraničenia sú lineárne v tvare rovnosti alebo nerovnosti.

$$\min \quad c^T x + r \quad (6.1a)$$

$$\text{s.t.} \quad Ax \leq B \quad (6.1b)$$

$$Gx = H \quad (6.1c)$$

$$(6.1d)$$

kde x je vektor optimalizovaných premenných, c je vektor konštánt, $c \in R^n$, $G \in R^{m \times n}$, $A \in R^{p \times n}$, $H \in R^m$, $g \in R^p$. Konštanta m reprezentuje počet ohraničení v tvare rovnosti a konštanta p reprezentuje počet ohraničení v tvare nerovnosti.

6.2 Kvadratické programovanie

Optimalizačný problém nazývame kvadratickým programovaním, ak účelová funkcia je kvadratická a všetky ohraničenia sú lineárne v tvare rovnosti alebo nerovnosti. Všeobecne ich môžeme vyjadriť v tvare:

$$\min \quad x^T P x + q^T x + r \quad (6.2a)$$

$$\text{s.t.} \quad A x \leq b \quad (6.2b)$$

$$G x = H \quad (6.2c)$$

$$(6.2d)$$

kde x je vektor optimalizovaných premenných, P je hessian, čo je štvorcová matica rozmeru $n \times n$, $G \in R^{m \times n}$, $A \in R^{p \times n}$, $H \in R^m$, $g \in R^p$.

Pri riadení je požiadavkou, aby optiamlizačný problém mal iba jedno optimálne riešenie. Optimálnym riešením je akčný zásah, ktorý chceme aplikovať do riadeného systému. Aby bola táto požiadavka splnená, matica P musí byť pozitívne definitná. Keď $P > 0$, máme konvexný optimalizačný problém, ktorý má vždy iba jedno optimálne riešenie.

6.3 Formulácia prediktívneho riadenia

6.3.1 Štandardná formulácia MPC - úloha regulácie

Regulácia stavu

Uvažujeme lineárny model v tvare stavového opisu v diskrétnom čase. Lineárny model je reprezentovaný maticou systému $A \in \mathbb{R}^{n_x \times n_x}$ udáva počet stavov a maticou riadenia $B \in \mathbb{R}^{n_x \times n_u}$, kde n_u je počet vstupov. Ak poznamáme

hodnotu stavu x a vstupu u v čase k , dokážeme vypočítať hodnotu stavu x v čase $k + 1$ pomocou nasledujúcej rovnice:

$$x_{k+1} = A_d x_k + B_d u_k \quad (6.3)$$

kde $x_k \in R^{n_x}$ reprezentuje stavy systému, $u_k \in R^{n_u}$ reprezentuje akčné zásahy aplikované do systému.

Formulácia MPC:

$$\min \quad \sum_{k=0}^{N-1} \left(x_k^T Q_x x_k + u_k^T Q_u u_k \right) \quad (6.4a)$$

$$\text{s. t.} \quad x_{k+1} = A_d x_k + B_d u_k, \quad (6.4b)$$

$$x(0) = x_0, \quad (6.4c)$$

$$u_{min} \leq u_k \leq u_{max}, \quad (6.4d)$$

$$x_{min} \leq x_k \leq x_{max}, \quad (6.4e)$$

$$k = 1, \dots, N \quad (6.4f)$$

kde N je predikčný horizont, matice A_d , B_d , C_d , D_d sú matice diskretného stavového opisu. Matice Q_x , Q_u sú váhové matice účelovej funkcie. Obe matice sú pozitívne definitné. Predikčný model, na základe čoho prediktívny regulátor počíta akčné zásahy, je tvorený ohraňčeniami optimalizačného problému.

Túto formuláciu MPC používame, ak chceme vyriešiť úlohu regulácie. Snažíme sa systém udržať v jeho počiatku (v nule). V účelovej funkcii minimalizujeme sumu vzdialenosti stavu od referencie (od nuly) a sumu akčných zásahov cez celý predikčný horizont N . Chceme, aby vzdialenosť stavu v ľubovoľnom kroku predikcie bola čo najmenšia od referenčnej úrovne a chceme na to použiť akčný zásah, ktorý je čo najmenší.

Keď dokážeme uregulovať lineárny systém, ktorý sme dostali linearizáciou pôvodného nelineárneho systému do počiatku, to znamená, že pôvodný neli-

neárny systém dokážeme udržať v ustálenom stave, z ktorého sme vychádzali pri linearizácii. Lineárny model je platný iba v okolí linearizačného bodu - ustáleného stavu.

Regulácia výstupu

Optimalizačný problém je podobný ako pri regulácii stavu. Rozdielom je, že predikčný model rozšírime o rovnicu výstupu, a získame tak stavový opis lineárneho modelu:

$$x_{k+1} = A_d x_k + B_d u_k, \quad (6.5a)$$

$$y_k = C_d x_k + D_d u_k \quad (6.5b)$$

Model je reprezentovaný maticami diskrétného stavového opisu: $A_d \in R^{n_x \times n_x}$, $B_d \in R^{n_u \times n_u}$, $C_d \in R^{n_y \times n_y}$, $D_d \in R^{n_y \times n_u}$. n_y udáva počet výstupov zo systému.

Formulácia MPC:

$$\min \quad \sum_{k=0}^{N-1} \left(y_k^T Q_y y_k + u_k^T Q_u u_k \right) \quad (6.6a)$$

$$\text{s. t.} \quad x_{k+1} = A_d x_k + B_d u_k, \quad (6.6b)$$

$$x(0) = x_0, \quad (6.6c)$$

$$u_{min} \leq u_k \leq u_{max}, \quad (6.6d)$$

$$x_{min} \leq x_k \leq x_{max}, \quad (6.6e)$$

$$k = 1, \dots, N - 1 \quad (6.6f)$$

Matice Q_y , Q_u sú váhové matice účelovej funkcie. Obe matice sú pozitívne definitné. V účelovej funkcii minimalizujeme sumu vzdialenosti výstupu zo systému od referencie (od nuly) a sumu akčných zásahov cez predikčný horizont.

6.3.2 MPC so sledovaním referencie

Keď chceme, aby stav systému alebo výstup zo systému sledoval nenulovú referenciu, potrebujeme modifikovať účelovú funkciu optimalizačného problému. Existuje niekoľko rôznych foriem úlohy sledovania a pre každý z nich rôzna formulácia účelovej funkcie. V prípade úlohy sledovania chceme dosiahnuť, aby stav alebo výstup zo systému sa dostal do nejakého ustáleného stavu, ktorý je nenulový. Aby sme to dosiahli, akčný zásah aplikovaný do systému musí byť tiež nenulový a zodpovedá ustálenej hodnote x_s . Dosadením takého akčného zásahu u_s do účelovej funkcie dostaneme nulovú regulačnú odchýlku - stav bude na žiadanej hodnote x_s .

$$\min \quad \sum_{k=0}^{N-1} \left((x_k - x^s)^T Q_x (x_k - x^s) + (u_k - u_s)^T Q_u (u_k - u_s) \right) \quad (6.7a)$$

$$\text{s. t.} \quad x_{k+1} = A_d x_k + B_d u_k, \quad (6.7b)$$

$$x(0) = x_0, \quad (6.7c)$$

$$u_{min} \leq u_k \leq u_{max}, \quad (6.7d)$$

$$x_{min} \leq x_k \leq x_{max}, \quad (6.7e)$$

$$k = 1, \dots, N - 1 \quad (6.7f)$$

V účelovej funkcii penalizujeme rozdiel medzi žiadanou ustálenou hodnotou stavu systému a jej aktuálnou hodnotou. Častejšie sa používa formulácia MPC, kde v účelovej funkcii je penalizovaný rozdiel medzi žiadanou hodnotou výstupu zo systému a jej aktuálnou hodnotou:

$$\min \quad \sum_{k=0}^{N-1} \left((y_k - y^s)^T Q_y (y_k - y^s) + (u_k - u_s)^T Q_u (u_k - u_s) \right) \quad (6.8a)$$

$$\text{s. t.} \quad x_{k+1} = A_d x_k + B_d u_k, \quad (6.8b)$$

$$y_k = C_d x_k + D_d u_k, \quad (6.8c)$$

$$x(0) = x_0, \quad (6.8d)$$

$$u_{min} \leq u_k \leq u_{max}, \quad (6.8e)$$

$$x_{min} \leq x_k \leq x_{max}, \quad (6.8f)$$

$$y_{min} \leq y_k \leq y_{max}, \quad (6.8g)$$

$$k = 1, \dots, N - 1 \quad (6.8h)$$

Hodnotu ustáleného stavu x_s a vstupu u_s získame pomocou stavového opisu riadeného systému v ustálenom stave:

$$x_s = A_d x_s + B_d u_s, \quad (6.9a)$$

$$y_s = C_d x_s + D_d u_s \quad (6.9b)$$

po pretransformovaní do nasledujúceho tvaru:

$$\begin{bmatrix} A_d - I_{nx} & B_d \\ C_d & D_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ u_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ d_s \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

$$Mz = m \quad (6.11)$$

Hodnotu referencie y_s poznáme, hodnotu u_s a x_s získame vyriešením sústavy rovníc (41). Dosadením hodnoty u_s do účelovej funkcie dostaneme nulovú regulačnú odchýlku - výstup bude na žiadanej hodnote y_s . Aby sme získali

hodnoty u_s a x_s , potrebujeme maticu M invertovať. Matica M je invertovateľná, ak má plnú hodnotnosť - všetky jej riadky a stĺpce sú lineárne nezávislé.

V prípade, že matica M nie je invertovateľná, táto formulácia optimalizačného problému nezaručuje riadenie bez regulačnej odchýlky. Ak chceme dosiahnuť, aby regulačná odchýlka bola nulová, potrebujeme modifikovať optimalizačný problém:

6.3.3 MPC s integračnou zložkou

V účelovej funkcii penalizujeme rozdiel medzi žiadanou hodnotou a aktuálnou hodnotou výstupu, a namiesto akčného zásahu penalizujeme jeho zmenu Δu . Zmenu akčného zásahu vypočítame ako rozdiel medzi jeho aktuálnou hodnotou a jeho hodnotou v predchádzajúcom kroku:

$$\Delta u_k = u_k - u_{k-1} \quad (6.12)$$

Formulácia MPC:

$$\min \quad \sum_{k=0}^{N-1} \left((y_k - r)^T Q_y (y_k - r) + \Delta u_k^T Q_u \Delta u_k \right) \quad (6.13a)$$

$$\text{s. t.} \quad x_{k+1} = A_d x_k + B_d u_k, \quad (6.13b)$$

$$y_k = C_d x_k + D_d u_k, \quad (6.13c)$$

$$x(0) = x_0, \quad (6.13d)$$

$$u_{min} \leq u_k \leq u_{max}, \quad (6.13e)$$

$$y_{min} \leq y_k \leq y_{max}, \quad (6.13f)$$

$$x_{min} \leq x_k \leq x_{max}, \quad (6.13g)$$

$$\Delta u_k = u_k - u_{k-1}, \quad (6.13h)$$

$$k = 1, \dots, N - 1 \quad (6.13i)$$

Keď výstup dosiahne referenciu, systém je v ustálenom stave, akčný zásah sa nemení: $\Delta u = 0$. Hodnota účelovej funkcie je nulová.

Regulačnú odchýlku dokážeme odstrániť pomocou tejto formulácie MPC iba v prípade, keď predikčný model je totožný s riadeným systémom.

6.3.4 Disturbance modeling

Keď sa systém nezhoduje s predikčným modelom, pri riadení nelineárneho modelu reaktora vzniká nenulová regulačná odchýlka. Na odstránenie nenulovej regulačnej odchýlky používame disturbance modeling.

Ku výstupu identifikovaného modelu pripočítame konštantnú poruchu d . Predikčný model pre MPC je potom v tvare:

$$x_{k+1} = A_d x_k + B_d u_k, \quad (6.14a)$$

$$y_k = C_d x_k + D_d u_k + F d_k \quad (6.14b)$$

$$d_{k+1} = d_k \quad (6.14c)$$

Riadenie pomocou MPC vyžaduje, aby sme poznali stavy riadeného systému a aj poruchy, ktoré na neho pôsobia. Stavy systému ani poruchy nedokážeme odmerať, ale vieme ich odhadnúť.

Na odhad stavov a porúch bol navrhnutý Luenbergerov pozorovač v tvare:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_{k+1} \\ \hat{d}_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_d & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_k \\ \hat{d}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_d \\ 0 \end{bmatrix} u_k + L(\hat{y}_k - y_k), \quad (6.15a)$$

$$\hat{y}_k = \begin{bmatrix} C_d & F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_k \\ \hat{d}_k \end{bmatrix} + D_d u_k \quad (6.15b)$$

kde matice A_d , B_d , C_d , D_d sú matice diskrétného stavového opisu identifikovaného systému, $\hat{x}_k$ je vektor odhadnutých stavov, $\hat{y}_k$ je vektor odhadnutých

výstupov, y_k je vektor vypočítaných výstupov, $\hat{d}_k$ je vektor odhadnutých porúch. Matica F je jednotková matica, L je matica zosilnení. Odhadnuté stavy sú použité prediktívnym regulátorom v každej perióde vzorkovania ako začiatkové podmienky. Optimalizačný problém je formulovaný nasledovne:

$$\min \quad \sum_{k=0}^{N-1} \left((y_k - r)^T Q_y (y_k - r) + \Delta u_k^T Q_u \Delta u_k \right) \quad (6.16a)$$

$$\text{s. t.} \quad x_{k+1} = A_d x_k + B_d u_k, \quad (6.16b)$$

$$y_k = C_d x_k + D_d u_k + F d_k, \quad (6.16c)$$

$$\hat{x}(0) = x_0, \quad (6.16d)$$

$$u_{min} \leq u_k \leq u_{max}, \quad (6.16e)$$

$$y_{min} \leq y_k \leq y_{max}, \quad (6.16f)$$

$$\Delta u_k = u_k - u_{k-1}, \quad (6.16g)$$

$$k = 1, \dots, N - 1 \quad (6.16h)$$

kde N je predikčný horizont, matice A_d , B_d , C_d , D_d sú matice diskrétného stavového opisu otvoreného regulačného obvodu. Matice Q_y , Q_u a Q_s sú váhové matice účelovej funkcie.

6.4 Matematické modely pre návrh MPC

Matematické modely opisujú správanie sa procesov v realite, používame ich na predikciu správania sa procesov v budúcnosti. Ako predikčné modely môžeme v MPC použiť matematické modely: - lineárne - nelineárne - hybridné Najčastejšie sa ako predikčné modely používajú lineárne matematické modely.

Získame ich linearizáciou nelineárnych modelov. Môžu byť vyjadrené v tvare stavového opisu alebo v tvare prenosovej funkcie. Majú jednoduchú štruktúru, ale menšiu presnosť oproti nelineárnym modelom. Návrh riadenia je najjednoduchší využitím lineárnych modelov. Optimalizačný problém vo väčšine prípadov dokážeme vyriešiť za jednu periódu vzorkovania.

Pri riešení optimalizačného problému sa vždy rozhodujeme medzi kvalitou riadenia a zložitostou optimalizačného problému. Lineárne modely sú jednoduché, ale nepresné. Sú platné iba v okolí linearizačného bodu. Nelineárne modely sú oveľa zložitejšie oproti lineárnym, ale veľmi presne opisujú reálne správanie sa systémov. Návrh riadenia je pri ich použití zložitejší. Používame ich ako predikčné modely, keď požadujeme veľkú presnosť riadenia. Optimalizačný problém potrebujeme vyriešiť za jednu periódu vzorkovania. Ak použijeme nelineárny model ako predikčný model v MPC, dostaneme nekonvexný optimalizačný problém. Môže sa stať, že sa nedostaneme do globálneho minima a dostaneme suboptimálne riešenie.

6.5 Návrh prediktívneho riadenia pre nelineárny model chemického reaktora

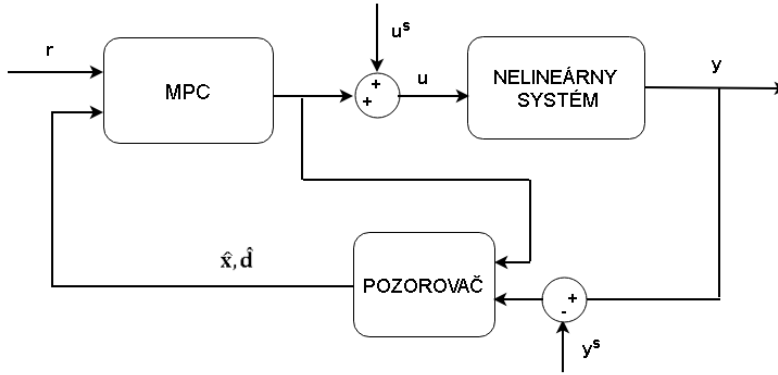
Ako predikčný model pre prediktívny regulátor sme použili identifikovaný lineárny model chemického reaktora. Predikčný model sa nezhoduje s nelineárnym modelom reaktora, ktorý je definovaný v tvare diferenciálnych rovníc. Preto sme na riadenie pH v chemickom reaktore navrhli MPC v tvare (6.17).

Uvažujeme ohraničenia na zmenu akčného zásahu a na zmenu výstupu z riadeného systému. Na odhad stavov a porúch pre regulátor sme použili Luenbergerov pozorovač v tvare (6.15).

Optimalizačný problém bol riešený po predikčnom horizonte $N = 15$. Perióda

vzorkovania $T_s = 10$ s.

Riadiaca schéma s prediktívnym regulátorom a pozorovačom:



Obr. 6.2: Schéma riadenia pomocou MPC

Vstupom do MPC je zmena referencie r , ďalej odhadnuté stavy $\hat{x}_k$, odhadnuté poruchy $\hat{d}_k$ a zmena akčného zásahu z predchádzajúceho kroku simulácie Δu_{k-1} . Regulátor vypočíta zmenu akčného zásahu ako optimálne riešenie optimalizačného problému Δu_k . Ako aj pri PID riadení, aj tomto prípade potrebujeme k zmene akčného zásahu pripočítať jej ustálenú hodnotu u_s pred jeho vstupom do riadeného systému. Ako výstup z riadeného systému získame hodnotu pH. Vstupom do pozorovača je zmena akčného zásahu a zmena výstupu zo systému v danom kroku simulácie. Výstupom z neho sú odhadnuté hodnoty stavov a porúch, ktoré sú vstupom do regulátora v ďalšom kroku simulácie.

Optimalizačný problém sme formulovali pomocou YALMIPu. Riešili sme ho pomocou objektu OPTIMIZER, využitím solvera QUADPROG.

Kapitola 7

Výsledky riadenia

Chceli sme navrhnúť riadenie pH na intervale 3.15 - 12.22. pH sme riadili prietokom zásady F_B . Závislosť medzi pH a prietokom zásady je nelineárna, čo vidíme na titračnej krivke (Obr. 2.2). Aby sme dosiahli požadovanú kvalitu riadenia, potrebovali sme rozdeliť titračnú krivku na niekoľko intervalov na základe dynamiky. Pre každý z intervalov sme navrhli samostatný regulátor. Na intervale 3.15 - 12.22 sme potom riadili pH prepínaním týchto regulátorov. Aktívny interval sme zistili na základe hodnoty pH v danom kroku simulácie a použil sa na jeho riadenie regulátor, ktorý sme pre príslušný interval navrhli. Pri riadení sme vychádzali z ustáleného stavu, ktorý je reprezentovaný ustálenými hodnotami $y_s = 3.12$ a $u_s = 0$. Hodnoty y_s , u_s prislúchajú ustálenému stavu systému na prvom zvolenom intervale.

7.1 Výsledky získané pomocou PID regulátora

V tabuľke vidíme rozdelenie intervalu $F_B = 0 - 10$ ml/min pri riadení PID regulátormi. u_s reprezentuje ustálenú hodnotu prietoku F_B , y_s reprezentuje

Tabuľka 7.1: Rozdelenie intervalu F_B

	Interval								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
u_s	1.25	3.10	3.80	4.50	4.86	5.00	5.04	5.42	7.24
u_{min}	0.00	2.50	3.58	4.39	4.80	4.98	5.01	5.17	6.12
u_{max}	2.50	3.58	4.39	4.80	4.98	5.01	5.17	6.12	10.00
y_s	4.52	5.21	5.50	5.95	6.54	8.70	10.30	11.30	11.96
y_{min}	3.15	5.00	5.40	5.85	6.38	7.39	9.70	10.92	11.70
y_{max}	5.00	5.40	5.86	6.38	7.39	9.70	10.92	11.70	12.22

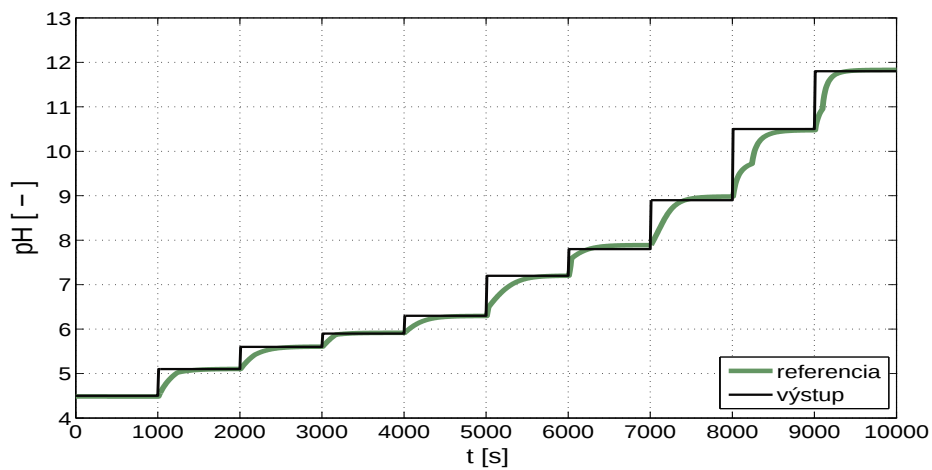
ustálenú hodnotu prietoku pH na príslušnom intervale. u_{min} a u_{max} sú hranice intervalu F_B , ktorým prislúchajú hodnoty pH od y_{min} po y_{max} .

Tabuľka 7.2: Navrhnuté PID regulátory na riadenie pH

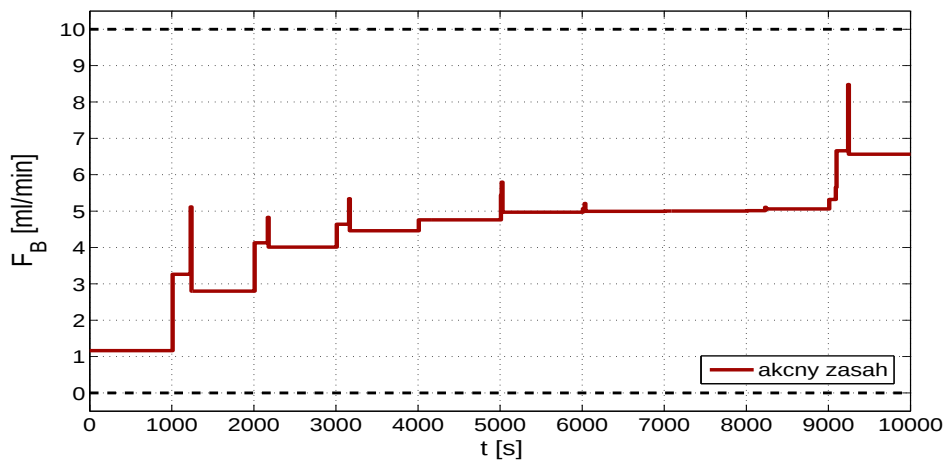
	Interval								
	0.7	2	3	4	5	6	7	8	9
K_p	3.5000	2.6500	2.1000	0.7500	0.1650	0.0070	0.2000	2.5000	4.0000
K_i	0.0006	0.0213	0.0184	0.0064	0.0035	0.0002	0.0017	0.0100	0.1359

V tabuľke vidíme nastavené parametre regulátorov na jednotlivých intervaloch. Pri menších prietokoch F_B je dynamika procesu pomalšia, preto sme na riadenie pH navrhli PID regulátory s väčším zosilnením. Najmenšie zosilnenie má regulátor, ktorým riadime pH na intervale 7.39 - 9.70.

Riadenie pH na intervale 3.12 - 12.22:



Obr. 7.1: Pribeh pH



Obr. 7.2: Použité akčné zásahy

7.2 Výsledky získané pomocou prediktívneho riadenia

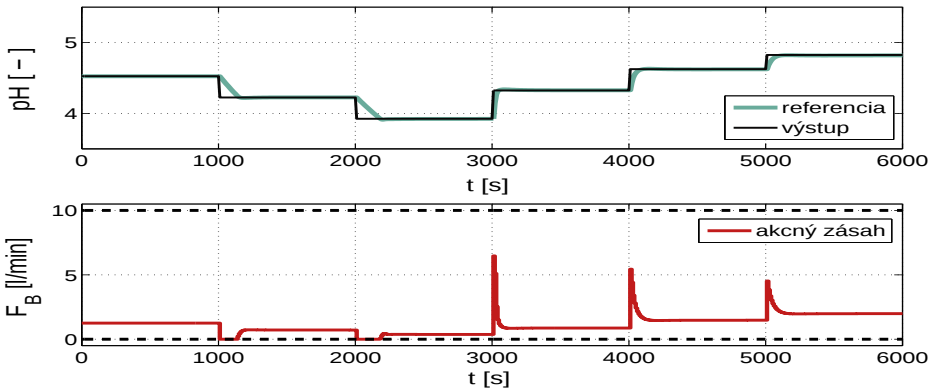
7.2.1 Riadenie pH

Interval $F_B = 0 - 10 \text{ ml/min}$ sme rozdelili, ako pri riadení pH PID regulátormi. Ako predikčné modely pre jednotlivé prediktívne regulátory sme použili lineárne modely, ktoré sme získali identifikáciou na príslušných intervaloch.

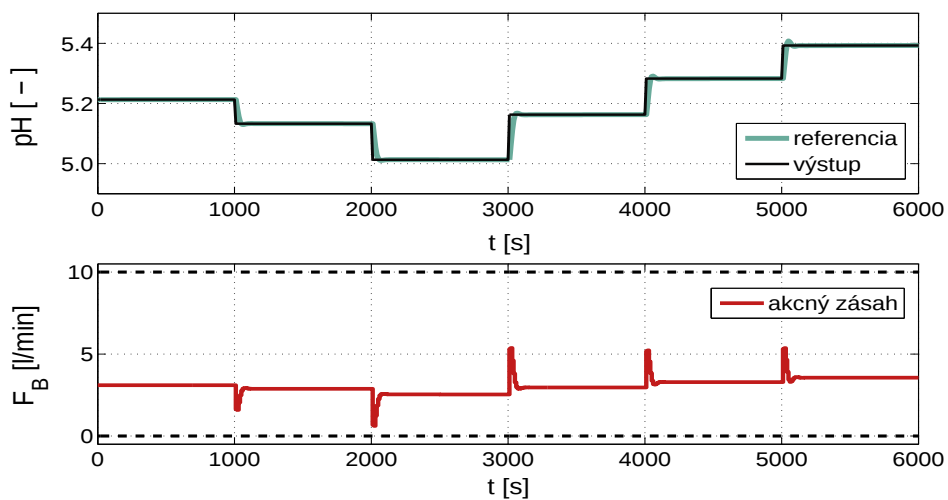
Tabuľka 7.3: Navrhnuté prediktívne regulátory na riadenie pH

	Interval								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Q_u	10^3	10^{-1}	10^{-1}	10^{-1}	10^{-1}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-2}	10^0
Q_y	10^4	10^2	10^0	10^{-1}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-4}	10^{-2}	10^0

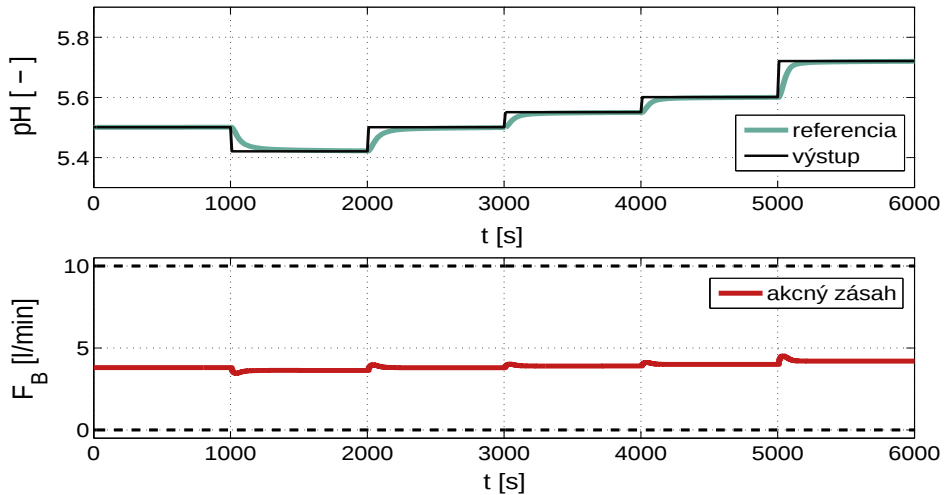
V tabuľke vidíme nastavené parametre prediktívnych regulátorov Q_u a Q_y . Riadenie pH na jednotlivých intervaloch F_B :



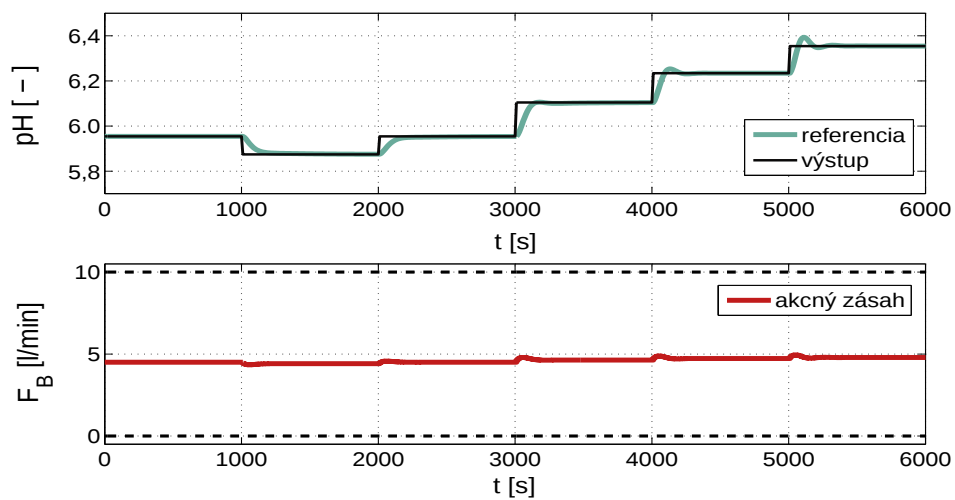
Obr. 7.3: Riadenie pH na 1. intervale



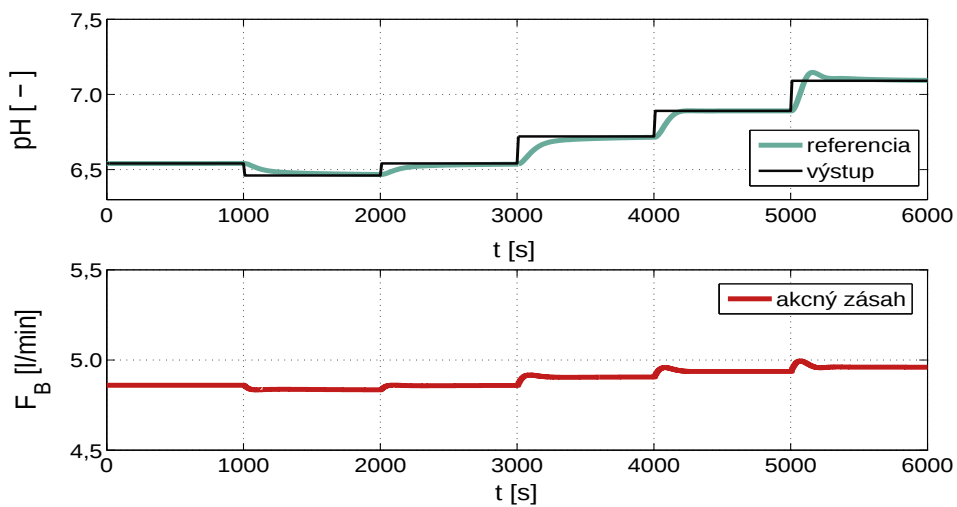
Obr. 7.4: Riadenie pH na 2. intervale



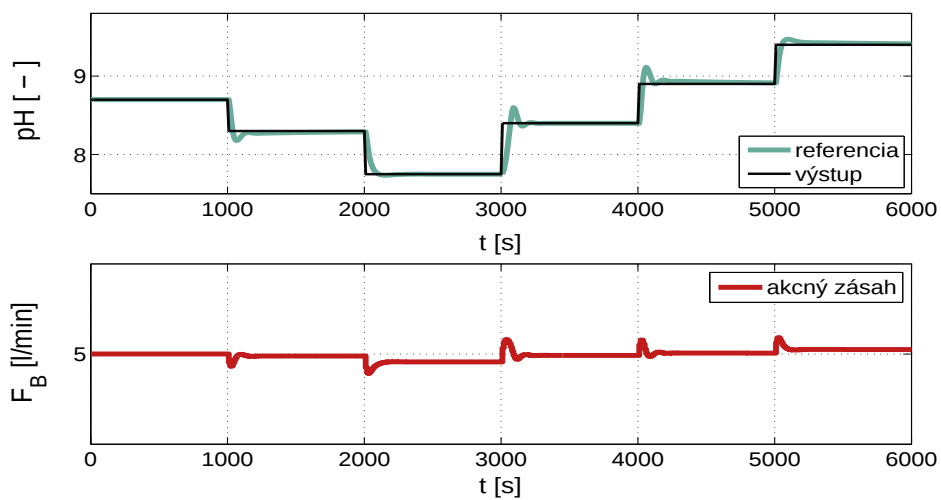
Obr. 7.5: Riadenie pH na 3. intervale



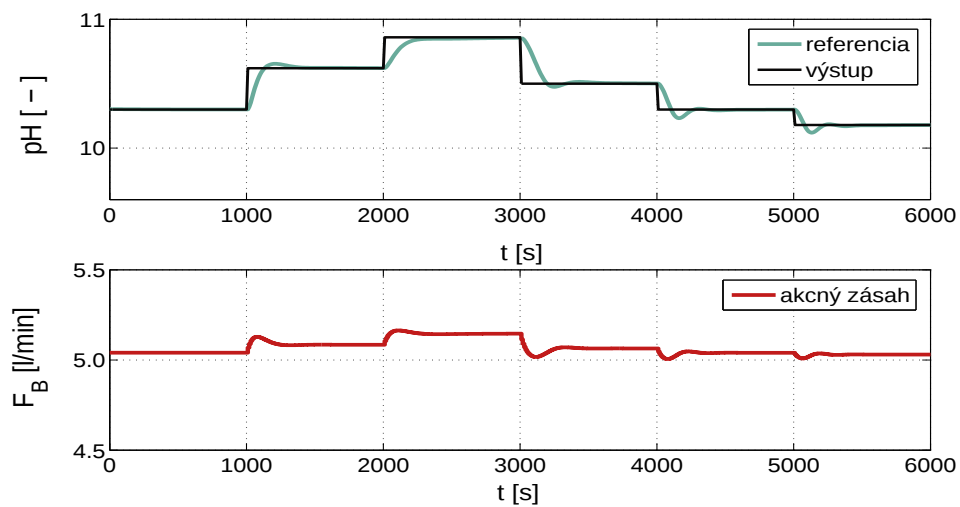
Obr. 7.6: Riadenie pH na 4. intervale



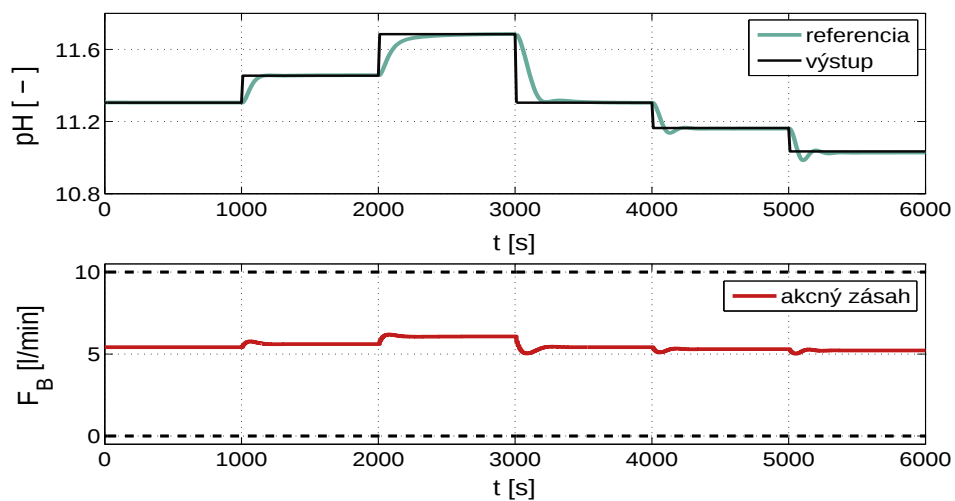
Obr. 7.7: Riadenie pH na 5. intervale



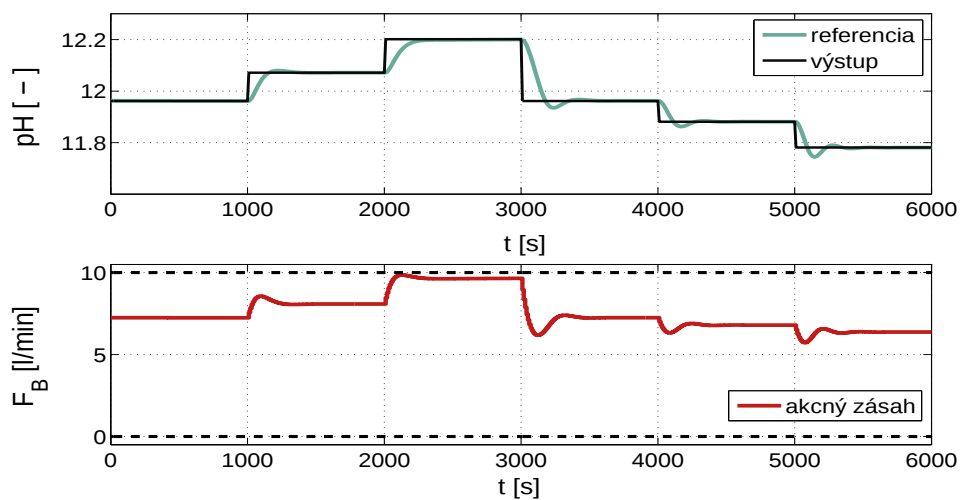
Obr. 7.8: Riadenie pH na 6. intervale



Obr. 7.9: Riadenie pH na 7. intervale



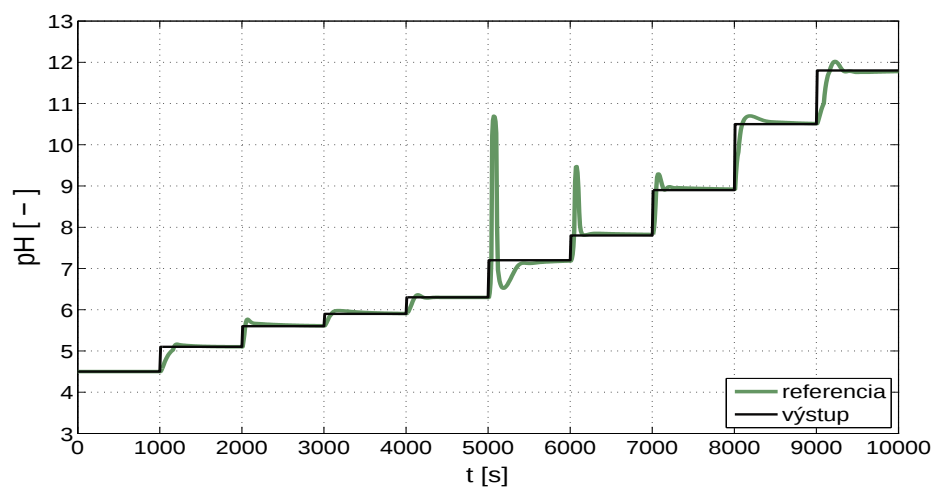
Obr. 7.10: Riadenie pH na 8. intervale



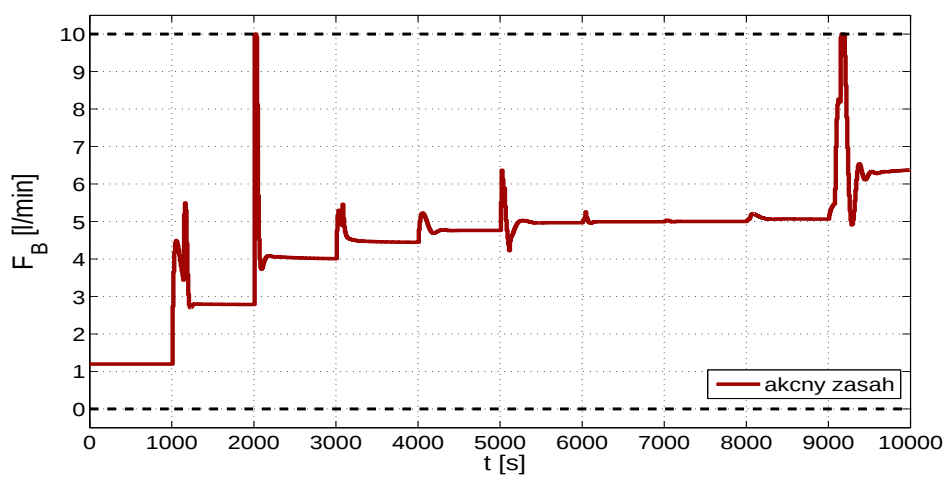
Obr. 7.11: Riadenie pH na 9. intervale

Po dosiahnutí požadovanej kvality riadenia na všetkých intervaloch sme

prepínaním regulátorov dokázali pH riadiť na celom intervale 3.15 - 12.22:



Obr. 7.12: Pribeh pH



Obr. 7.13: Použité akčné zásahy

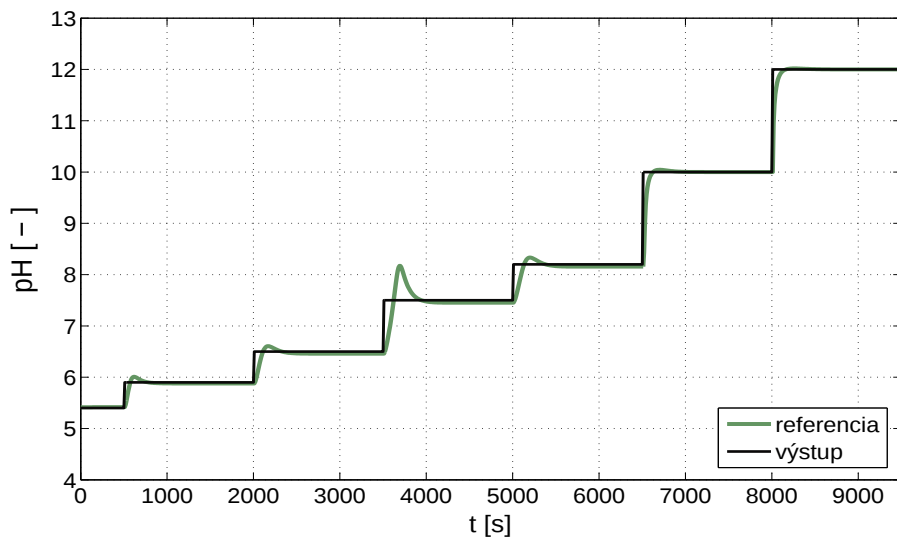
7.2.2 Riadenie pH pomocou procesnej veličiny

Tabuľka 7.4: Rozdelenie intervalu F_B

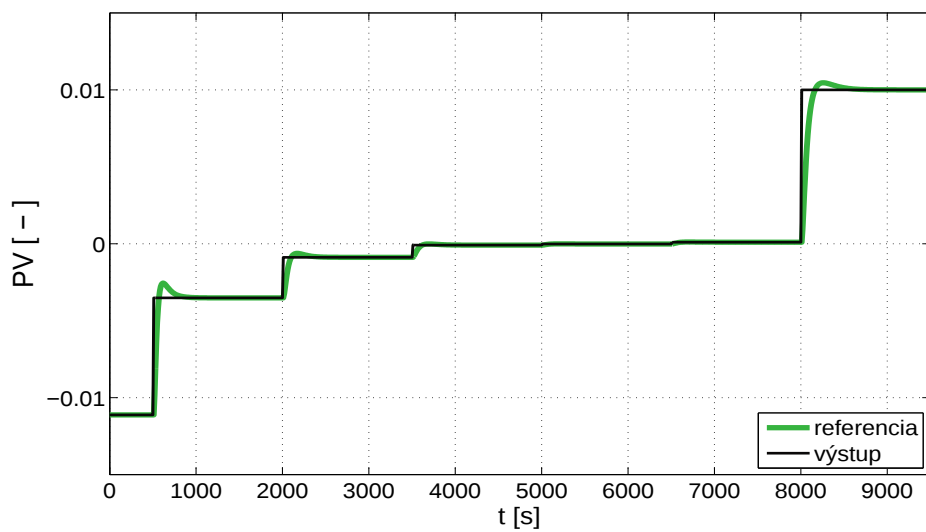
	Interval						
	1	2	3	4	5	6	7
u_s	0.0250	0.0800	0.2200	0.5000	0.7000	1.9500	3.9500
u_{min}	0.0000	0.0500	0.1000	0.3000	0.6400	1.5000	2.4500
u_{max}	0.0500	0.1000	0.3000	0.6400	1.5000	2.4500	10.0000
y_s	-2.8067	-1.9826	-0.9465	-0.4003	-0.2663	-0.0562	-0.0074
y_{min}	-3.5053	-2.4312	-1.7465	-0.6994	-0.2978	-0.0895	-0.0349
y_{max}	-2.4312	-1.7465	-0.6994	-0.2978	-0.0895	-0.0349	0.0167

Tabuľka 7.5: Navrhnuté prediktívne regulátory na riadenie pH pomocou procesnej veličiny

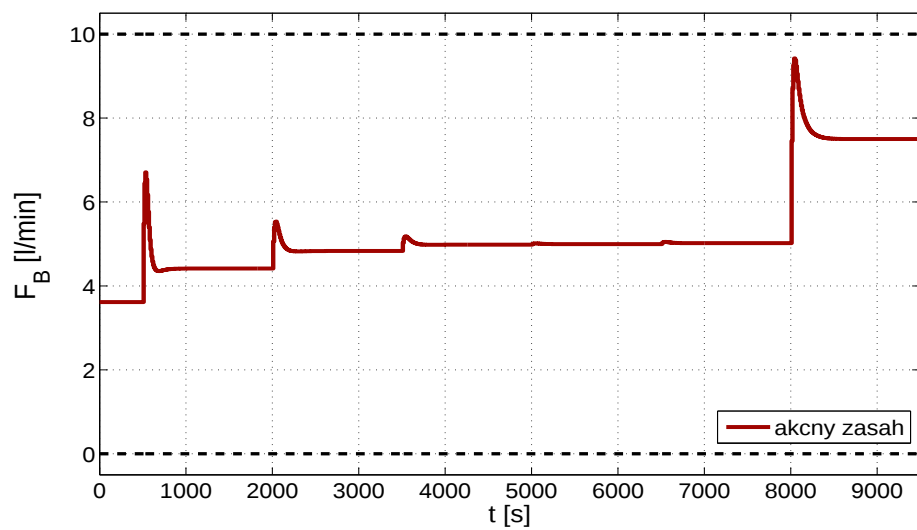
	Interval						
	1	2	3	4	5	6	7
Q_u	10^0	10^0	10^0	10^0	10^0	10^0	10^0
Q_y	10^1	10^2	10^2	10^2	10^3	10^4	10^5



Obr. 7.14: Pribeh pH



Obr. 7.15: Pribeh procesnej veličiny (PV)



Obr. 7.16: Použité akčné zásahy

Kapitola 8

Hodnotenie výsledkov

Porovnali sme si priebehy riadenia, ktoré sme získali pomocou navrhnutých PID regulátorov a prediktívnych regulátorov.

Kvalitu riadenia sme si vyhodnotili na základe ukazovateľov kvality riadenia ako maximálne preregulovanie, maximálne podregulovanie, čas regulácie, integrál absolútnej regulačnej odchýlky a integrál štvorca regulačnej odchýlky.

Maximálne preregulovanie (resp. podregulovanie) udáva v percentách normovanú veľkosť maximálnej odchýlky výstupnej veličiny od jej ustálenej hodnoty. Maximálne preregulovanie

$$\sigma_{max} = \frac{y_{max} - y_{\infty}}{y_{\infty} - y_0} 100\% \quad (8.1)$$

Maximálne podregulovanie

$$\sigma_{min} = \frac{y_{min} - y_{\infty}}{y_{\infty} - y_0} 100\% \quad (8.2)$$

Čas regulácie t_{reg} vyjadruje, za aký čas sa výstup z riadeného systému ustáli po skokovej zmene referencie.

Integrál absolútnej regulačnej odchýlky

$$IAE = \int_0^t |e(t)| dt \quad (8.3)$$

Integrál štvorca regulačnej odchýlky

$$ISE = \int_0^t e^2(t) dt \quad (8.4)$$

Tabuľka 8.1: Vyhodnotenie kvality riadenia nelineárneho modelu

	PID	MPC	
		pH	PV
IAE	130.01	110.77	61.37
ISE	73.14	118.97	29.72
t_{reg} [s]	300	300	100
σ_{max} [%]	-	388	67
σ_{min} [%]	-	-	-

Porovnaním ukazovateľov kvality riadenia vidíme, že čas regulácie bol rovnaký pri riadení modelu reaktora PID regulátorom a prediktívnym regulátorom. Odozva regulačného obvodu bola najrýchlejšia prediktívnym regulátorom, ktorý sme navrhli na riadenie pH pomocou procesnej veličiny. Po skokovej zmene referencie sa výstup ustáli za 100s. Integrál absolútnej regulačnej odchýlky (IAE) má menšiu hodnotu pri riadení systému prediktívnym regulátorom ako pri riadení PID regulátorom.

Na základe hodnôt ukazovateľov kvality riadenia môžeme povedať, že pridaním prediktívneho regulátora do uzavretého regulačného obvodu sa nám podarilo zlepšiť kvalitu riadenia.

Kapitola 9

Záver

Naším cieľom bolo navrhnúť riadenie pre nelineárny model chemického reaktora, ktorý sme vyjadrili pomocou diferenciálnych rovníc. Riadenou veličinou bola hodnota pH na výstupe z reaktora a riadiacou veličinou prietok zásady na vstupe do reaktora. Ku konštantnému prietoku roztoku kyseliny sme postupne pridávali roztok zásady tak, aby sme dosiahli požadovanú hodnotu pH zarobeného roztoku. Závislosť medzi prietokom zásady a pH je nelineárny, preto sme pri identifikácii interval prietoku rozdelili na niekoľko častí. Identifikáciou nelineárneho modelu reaktora sme získali lineárny model 2. rádu v tvare diskrétného stavového opisu. Identifikáciu sme spravili pre všetky zvolené intervaly prietoku. Na riadenie získaných modelov sme navrhli PID regulátory a prediktívne regulátory. Riadili sme pH pomocou nich na zvolených intervaloch prietoku. Potom sme ich použili na riadenie pH v rozsahu 3.15 - 12.22, čo zodpovedá rozsahu prietoku zásady 0 - 10 ml/min.

Kvalitu riadenia navrhnutými regulátormi sme si vyhodnotili pomocou ukazovateľov kvality riadenia.

Literatúra

- [1] Ton J.J. van den Boom & Ton C.P.M. Backx: *Model Predictive Control*, 2003
- [2] Gabriele Pannocchia, James B. Rawlings: *Disturbance models for offset-free model-predictive control*, 2003
- [3] Eduardo F. Camacho, Carlos Bordons: *Model Predictive Control*, 2007
- [4] Jan Marian Maciejowski: *Predictive Control: With Constraints*, 2003
- [5] S. Boyd, L. Vandenberghe: *Convex Optimization*, 2004
- [6] JM. Kvasnica: *Habilatačná práca, Rýchle a pamäťovo efektívne prediktívne riadenie hybridných systémov*, 2011
- [7] M. King: *Process Control: A Practical Approach*, 2010