

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Fakulta chemickej a potravinárskej technológie

Evidenčné číslo: FCHPT-113709-82049

Návrh robustného riadenia pre laboratórny výmenník tepla

Bakalárska práca

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Fakulta chemickej a potravinárskej technológie

Evidenčné číslo: FCHPT-113709-82049

Návrh robustného riadenia pre laboratórny výmenník tepla

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

Lenka Galčíková



ZADANIE BAKALÁRSKEJ PRÁCE

Študentka: **Lenka Galčíková**
ID študenta: 82049
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 výmenník tepla**

Jazyk, v ktorom sa práca vypracuje: slovenský jazyk

Špecifikácia zadania:

Cieľom bakalárskej práce je identifikovať parametre modelu laboratórneho doskového výmenníka tepla ARMFIELD PCT23 a navrhnuť pre tento systém robustné riadenie. Matematický model výmenníka tepla má byť experimentálne identifikovaný ako systém s intervalovými neurčitostami. Cieľom práce je navrhnuť a implementovať robustné riadenie na základe riešenia problému konvexnej optimalizácie. Dosiahnutá kvalita riadenia sa vyhodnotí s ohľadom na možnosti redukcie energetickej náročnosti riadenia.

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. B. G. Lipták, *Instrument Engineers' Handbook, (Heat Exchanger Control and Optimization)*, 4th Edition, 2005, 2464 s. ISBN-13:978-0849310812.
3. *Introduction Manual, PCT23-MkII Process Plant Trainer, Armfield*, 2007.

Riešenie zadania práce od: 12. 02. 2018

Dátum odovzdania práce: 06. 05. 2018

Lenka Galčíková
študentka

prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
vedúci pracoviska

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

Na tomto mieste by som sa chcela poďakovať v prvom rade vedúcemu práce, Ing. Jurajovi Oravcovi, PhD. za všetku pomoc pri Teoretickej i Experimentálnej časti tejto práce, za ochotu pomôcť kedykoľvek, za každú spätnú väzbu a cenné rady. Taktiež chcem poďakovať za veľkú podporu mojej rodine a priateľom.

Lenka Galčíková

Bratislava, 2018

Abstrakt

Bakalárska práca sa zameriava na identifikáciu systému výmenníka tepla, návrh a implementáciu pokročilého robustného riadenia založeného na optimalizácii akčných zásahov. Práca sa skladá z dvoch hlavných častí. V teoretickej časti je vysvetlená problematika prestupu tepla a princípy fungovania výmenníka tepla, Strejcova metóda identifikácie systému, princíp uzavretého regulačného obvodu a nakoniec podstata prediktívneho a robustného prediktívneho riadenia založenom na modeli. V experimentálnej časti je najskôr spracovaná kalibrácia čerpadiel a pomocné riadenie výhrevného kotla, ktoré boli potrebné na samotnú identifikáciu neurčitého modelu doskového výmenníka tepla. Na základe vypočítaného modelu bolo navrhnuté a implementované robustné prediktívne riadenie. Boli analyzované možnosti kompenzovania nelineárneho správania sa výmenníka tepla pomocou ekvipercentnej charakteristiky akčného člena. Kvalita riadenia bola vyhodnotená pomocou viacerých ukazovateľov kvality.

Kľúčové slová:

Doskový výmenník tepla; identifikácia; ekvipercentná charakteristika; robustné prediktívne riadenie; kritériá kvality.

Abstract

The bachelor thesis focuses on the experimental identification of the heat exchanger system, on the design and implementation of the advanced robust model predictive control based on the optimization of control action. The thesis consists of two main parts. In the Theoretical part, where the problem of the heat transfer and the principles of operation of the heat exchanger, the Strejc method of system identification, the principle of the feedback control, and finally, the essence of predictive and robust model predictive control are introduced. In the Experimental part, the pump calibration and the control of the boiler are first processed. These steps were necessary to the identification of the investigated plate heat exchanger. Based on the evaluated model, the robust model predictive control was designed and implemented. The possibilities of compensating the nonlinear behavior of the heat exchanger were analyzed by means of the equal-percentage characteristics of the actuator. The quality of the control was judged using a number of quality criteria.

Keywords:

Plate heat exchanger; identification; equal-percentage characteristics; robust model predictive control; control performance.

Obsah

Zoznam obrázkov	2
Zoznam tabuliek	3
Úvod	5
1 Teoretická časť	7
1.1 Výmenník tepla	7
1.2 Identifikácia systému	9
1.2.1 Strejcova metóda identifikácie systému	10
1.2.2 Identifikácia systému prvého rádu	11
1.3 Riadenie výmenníka tepla	12
1.3.1 Charakterizácia kvality riadenia	13
1.3.2 PID regulátor	14
1.3.3 Prediktívne riadenie založené na modeli	15
1.3.4 Robustné prediktívne riadenie	17
2 Experimentálna časť	21
2.1 Výmenník tepla	22
2.2 Kalibrácia čerpadiel	23
2.3 Ekvipercentná charakteristika	26

2.4	Riadenie kotla	27
2.5	Identifikácia systému	30
2.6	Riadenie výmenníka tepla	40
Záver		49
Literatúra		51

Zoznam obrázkov

1.1	Príklad prechodovej charakteristiky.	10
1.2	Prechodová charakteristika systému prvého rádu.	12
1.3	Uzavretý regulačný obvod.	12
1.4	Princíp MPC.	16
2.1	Výmenník tepla Armfield Process Plant Trainer PCT23	22
2.2	Čerpadlo privádzajúce horúce médium W.	23
2.3	Kalibračné krivky čerpadiel.	25
2.4	Ekvippercentná charakteristika čerpadla.	27
2.5	Výhrevný kotol.	28
2.6	Riadenie teploty horúceho média v kotle.	29
2.7	Výkon špirály v kotle.	30
2.8	Prevodová charakteristika pri skokových zmenách smerom nahor. . .	32
2.9	Prevodová charakteristika pri skokových zmenách smerom nadol. . .	33
2.10	Nominálna krivka	34
2.11	Prechodové charakteristiky pre všetky odozvy systémov.	35
2.12	Porovnanie prechodových funkcií.	36
2.13	Prechodová charakteristika pre skokovú zmenu z 1,5 V na 4,8 V. . .	36
2.14	Prechodová charakteristika pre skokovú zmenu z 8,2 V na 11,5 V. . .	37
2.15	Prechodová charakteristika pre skokovú zmenu z 11,5 V na 8,2 V. . .	37
2.16	Prechodová charakteristika pre skokovú zmenu z 8,2 V na 4,8 V. . .	38

2.17	Prechodová charakteristika pre skokovú zmenu z 4,8 V na 1,3 V. . .	38
2.18	Robustná obálka systému.	41
2.19	Priebeh riadenia teploty $30^{\circ}\text{C} \rightarrow 40^{\circ}\text{C}$	44
2.20	Akčné zásahy počas riadenia teploty $30^{\circ}\text{C} \rightarrow 40^{\circ}\text{C}$	44
2.21	Priebeh riadenia teploty $40^{\circ}\text{C} \rightarrow 35^{\circ}\text{C}$	45
2.22	Akčné zásahy počas riadenia teploty $40^{\circ}\text{C} \rightarrow 35^{\circ}\text{C}$	45

Zoznam tabuliek

1.1	Parametre pre Strejcovu metódu identifikácie systémov.	11
2.1	Závislosť objemových prietokov od napätia na čerpadle W.	24
2.2	Závislosť objemových prietokov od napätia na čerpadle F.	24
2.3	Ustálené teploty vo výmenníku tepla pri skokových zmenách prietoku smerom nahor a nadol.	31
2.4	Tabuľka zosilnení, časových konštánt a dopravných oneskorení pre namerané prechodové charakteristiky.	35
2.5	Ukazovatele kvality riadenia teploty $30^{\circ}\text{C} \rightarrow 40^{\circ}\text{C}$	46
2.6	Ukazovatele kvality riadenia teploty $40^{\circ}\text{C} \rightarrow 35^{\circ}\text{C}$	46

Úvod

Prestup tepla je jeden z najdôležitejších procesov v prírode, ktorý sa dá zužitkovať na mnohé účely. So zariadeniami určenými na využívanie prestupu tepla, výmenníkmi tepla, sa stretávame každý deň. Nachádzajú sa v domácnostiach, ako súčasti elektrospotrebičov, ale sú aj významná zložka priemyslu. V chemickom priemysle sa výmenníky tepla používajú napríklad v odparkách, sušiarňach alebo ako súčasti procesov, ktoré sú oveľa zložitejšie, ako je destilácia, chemický reaktor a podobne. Pri týchto procesoch je potrebné brať ohľad na redukciu negatívneho dopadu na životné prostredie a tiež ekonomických nákladov, a preto je nutné riešiť, ako zabezpečiť efektívny prestup tepla tam, kde je to potrebné, ale tiež zamedziť prestupu tepla pri procesoch, kde je to nežiaduce.

Cieľom bakalárskej práce je navrhnúť a implementovať pokročilé robustné riadenie založené na optimalizácii akčných zásahov a porovnať ho pre použitie lineárnej a ekvippercentnej charakteristiky čerpania kvapaliny.

Predtým je dôležité poznať daný proces a na základe skúmania odozvy na skokovú zmenu vstupnej veličiny vykonať identifikáciu, ktorá je potrebná na to, aby bolo možné proces riadiť, teda zabezpečiť spomínanú efektívnosť prestupu tepla.

Kapitola 1

Teoretická časť

V Teoretickej časti svojej práce sa zaoberám prestupom tepla a výmenníkmi tepla. Nasleduje Strejcova metóda identifikácie systémov. Zaoberám sa tiež uzavretým regulačným obvodom a charakterizáciou kvality regulácie, ktorá je potrebná pre zhodnotenie navrhnutého riadenia. Následne sa zaoberám podstatou prediktívneho a robustného prediktívneho riadenia založenom na modeli.

1.1 Výmenník tepla

Výmenník tepla je zariadenie, ktoré slúži na chladenie alebo ohrev materiálových prúdov tak, aby sa dosiahla požadovaná teplota. Hovoríme, že dochádza k prestupu tepla. Tento dej zohráva dôležitú úlohu v priemysle, aj v každodennom živote [1].

Teplo môže prestupovať tromi spôsobmi: vedením, prúdením, alebo žiarením. *Vedenie tepla* je taký prestup tepla, ktorý sa uplatňuje v tuhých telesách, prípadne vo veľmi malých objemoch alebo tenkých vrstvách tekutín. Príkladom tohto prestupu tepla sú steny budov, ktoré vedú teplo von, a preto sa zateplujú. *Prúdenie tepla* je mechanizmus príznačný pre tekutiny, ktorý nastáva v dôsledku odlišnej hustoty častí tekutiny s rôznou teplotou. *Prestup tepla* žiarením nastáva

napríklad ohrievaním priestoru slnečným žiarením prostredníctvom elektromagnetickej energie. Treba však poznamenať, že žiarenie je emitované každým telesom pri akejkoľvek teplote [2].

Prestup tepla v priemysle možno rozdeliť podľa toho, aké skupenstvá si teplo vymieňajú, a to nasledovne: sústava *kvapalina – kvapalina* alebo sústava *plyn – plyn*, ak ide o rovnaké fázy. Taktiež môže teplo prestupovať aj medzi rôznymi skupenstvami v sústave *kvapalina – plyn*. Vtedy sa mení skupenstvo buď na strane ohrevného média (ohrevná para kondenzuje) alebo na strane procesu (kondenzátory, odparky) [3].

Toto rozdelenie je dôležité na to, aby sme si vedeli správne zapísať rovnicu vyplývajúcu z prvého termodynamického zákona - *Zákon zachovania energie*. Táto rovnica je smerodajná pre určenie počtov stupňov voľnosti a teda v otázke možnostiach návrhu riadenia výmenníka tepla. *Maximálny stupeň voľnosti* definuje maximálny počet regulačných obvodov, ktoré môžeme použiť na riadenie výmenníka tepla, resp. počet premenných, ktoré môžeme nezávisle riadiť. Počet stupňov voľnosti je závislý od počtu rovníc definujúcich systém a od počtu premenných [3]:

$$\text{počet stupňov voľnosti} = \text{počet premenných} - \text{počet rovníc}. \quad (1.1)$$

V mojom prípade mám za úlohu riadiť výmenník typu: *kvapalina – kvapalina*, preto zákon zachovania energie je zapísaný v tvare:

$$c_{p,h}\dot{m}_h(T_{h1} - T_{h2}) = c_{p,c}\dot{m}_c(T_{c1} - T_{c2}), \quad (1.2)$$

$$c_{p,h}\dot{m}_h\Delta T_h = c_{p,c}\dot{m}_c\Delta T_c, \quad (1.3)$$

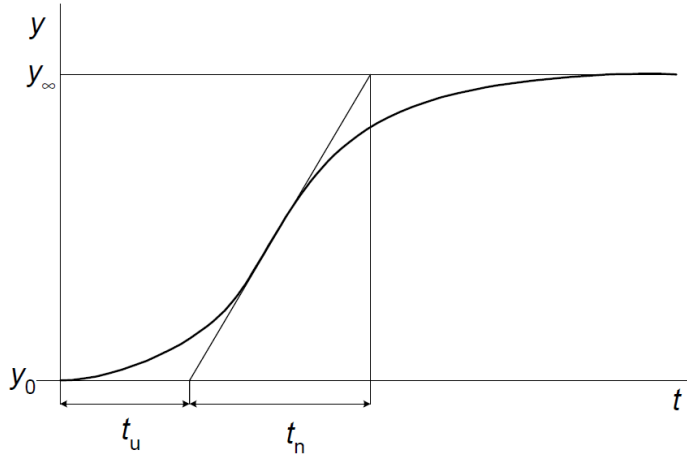
kde c_p je špecifická tepelná kapacita, $\dot{m}$ je hmotnostný prietok a člen $\Delta T = (T_1 - T_2)$ vyjadruje hnaciu silu prestupu tepla ako rozdiel teplôt, pričom dolný index h označuje horúce médium a index c studené médium. V tomto prípade máme jednu rovnicu a štyri premenné, z čoho podľa rovnice (1.1) vyplýva, že máme tri stupne voľnosti. V praxi to znamená, že do procesu možno umiestniť až tri regulátory. Vo

väčšine prípadov sa ale používa menej regulátorov, ako je stupňov voľnosti, pretože môže dôjsť k preurčeniu procesu [3].

Existujú tri základné typy výmenníkov tepla, ktoré sa vzájomne líšia svojou konštrukciou, základnými parametrami a použitím, a to: plášťové, rúrkové a doskové výmenníky tepla. Plášťové výmenníky sa používajú napríklad pri riadení chemických reaktorov. Rúrkové výmenníky sú tvorené rúrkou, ktorá odovzdáva alebo prijíma teplo. Nevýhodou je, že majú nízky prestupný koeficient, čo znamená, že už na prestup malého množstva tepla potrebujú veľkú prestupnú plochu. Doskové výmenníky majú zasa oveľa vyšší prestupný koeficient a navyše, teplovýmennú plochu možno podľa požiadavky zmeniť [4].

1.2 Identifikácia systému

Experimentálna identifikácia systému sa môže vykonávať tak, že sa zrealizuje skoková zmena jednej zo vstupných veličín, pričom sa zachovávajú ostatné vstupné veličiny konštantné. Pred samotným uskutočnením skokovej zmeny je ale nutné, aby bol systém v ustálenom stave. Časový priebeh výstupnej veličiny, ktorý opisuje odozvu na skokovú zmenu vstupnej veličiny pri nulových začiatočných podmienkach, nazývame *prechodová funkcia*. Grafické znázornenie prechodovej funkcie je *prechodová charakteristika*. Príklad prechodovej charakteristiky môžeme vidieť na Obr. 1.1. Pri predpoklade, že vstupná veličina sa zmenila v čase t_0 z hodnoty u_0 na u_∞ , vidíme skokovú zmenu na výstupe z hodnoty y_0 na y_∞ . Preložíme dotyčnicu inflexným bodom prechodovej charakteristiky, ktorej priesečník s rovnobežkami prechádzajúcich hodnotami y_0 a y_∞ , vymedzí dva dôležité body na časovej osi, a to *čas prietahu* t_u a *čas nábehu* t_n [5].



Obr. 1.1: Príklad prechodovej charakteristiky [5].

1.2.1 Strejcova metóda identifikácie systému

Strejcova metóda identifikácie systému aproximuje dynamické vlastnosti systému pomocou prenosu v tvare [5]:

$$G(s) = \frac{Z}{(Ts + 1)^n} e^{-Ds}, \quad (1.4)$$

kde Z je zosilnenie, T časová konštanta, n rád systému a D dopravné oneskorenie systému, ktoré je potrebné určiť. Priamo z prechodovej charakteristiky sa dá určiť zosilnenie systému na základe vzťahu

$$Z = \frac{y_\infty - y_0}{u_\infty - u_0}. \quad (1.5)$$

Pomocou ďalších údajov z prechodovej charakteristiky, času prietahu t_u a času nábehu t_n , možno určiť rád systému n podľa Tab. 1.1, a to nasledovne: určíme podiel $f_s = t_u/t_n$ a na základe neho vyberieme takú hodnotu n , aby platilo [5]

$$f(n) \leq f_s < f(n+1). \quad (1.6)$$

Časová konštanta T sa určí z Tab. 1.1 pomocou hodnoty $g(n)$ pre príslušné n podľa vzťahu [5]:

$$T = g(n)t_n. \quad (1.7)$$

Dopravné oneskorenie D sa určuje ako rozdiel medzi skutočným a fiktívnym časom prieťahu t_u [5]:

$$D = (f_s - f(n))t_n. \quad (1.8)$$

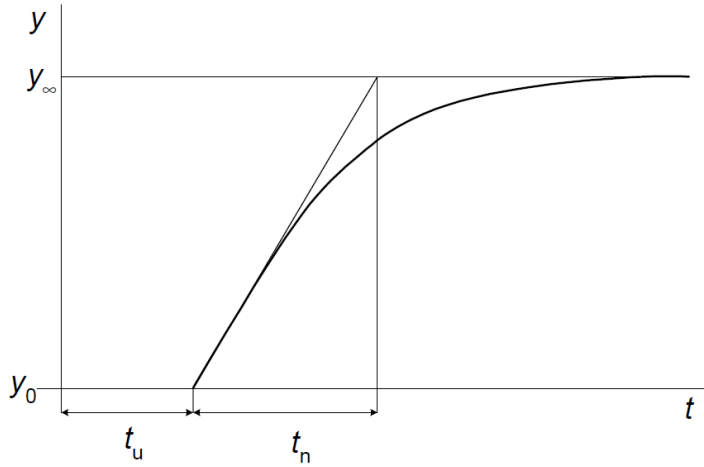
Tabuľka 1.1: Parametre pre Strejcovu metódu identifikácie systémov.

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

1.2.2 Identifikácia systému prvého rádu

Prechodovú charakteristiku systému prvého rádu môžeme vidieť na Obr. 1.2. Ako vidíme, v tomto prípade ide o proces s dopravným oneskorením, keďže odozva na skokovú zmenu na vstupe sa neprejaví v čase t_0 , ale v čase prieťahu t_u . V prípade systému prvého rádu možno taktiež použiť na jeho identifikáciu Strejcovu metódu identifikácie systému. Rozdiel je iba v tom, že prechodová charakteristika nemá inflexný bod, takže dotyčnica má miesto dotyku na časovej osi v mieste času prieťahu t_u .

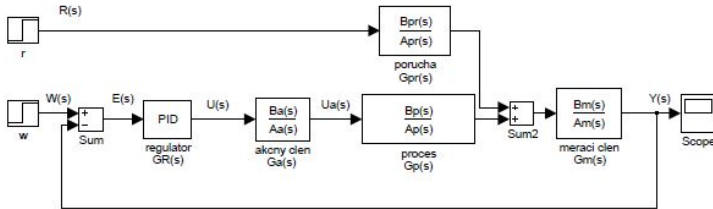
Druhým spôsobom, ako identifikovať systém prvého rádu, je využiť postup určenia zosilnenia Z a dopravného oneskorenia D zo Strejцovej metódy identifikácie systému. Rozdiel je teda v určení časovej konštanty T . Pre systém prvého rádu totiž platí, že časová konštanta zodpovedá času, kedy výstupná veličina nadobudne hodnotu rovnajúcu sa 63 % zo svojej ustálenej hodnoty [5].



Obr. 1.2: Prechodová charakteristika systému prvého rádu [5].

1.3 Riadenie výmenníka tepla

Riadenie procesu znamená úmyselne doň zasahovať za účelom dosiahnutia určitého cieľa. V procese výmenníka tepla to znamená dosiahnuť požadovanú teplotu výstupného prúdu ochladzovaného alebo ohrievaného média. Najrozšírenejším spôsobom riadenia procesov je *spätnoväzbové riadenie*. Zodpovedajúca schéma uzavretého regulačného obvodu sa nachádza na Obr. 1.3.



Obr. 1.3: Schéma zavretého regulačného obvodu [5].

V uzavretom regulačnom obvode $G_{pr}(s)$ predstavuje prenos poruchy, $G_R(s)$

prenos regulátora, $G_a(s)$ prenos akčného člena, $G_p(s)$ prenos riadeného procesu a $G_m(s)$ prenos meracieho člena. Na začiatku do obvodu vstupuje obraz žiadanej hodnoty $W(s)$, od ktorého sa odčíta obraz výstupnej veličiny $Y(s)$ vystupujúcej z procesu. Podľa tejto spätnej väzby sa nazýva tento druh riadenia. Odčítaním získame regulačnú odchýlku $E(s)$, ktorá vstupuje do regulátora, ktorý na základe tejto informácie vypočíta potrebný akčný zásah $U(s)$. Pôsobenie poruchy je naznačené prostredníctvom obrazu poruchovej veličiny $R(s)$ [5].

V prípade výmenníka tepla je výstupnou veličinou teplota ohrievaného alebo ochladzovaného média výstupného prúdu. Jej odčítaním od žiadanej hodnoty teploty sa vypočíta *regulačná odchýlka*, ktorá vstupuje do regulátora a ten určí veľkosť akčného zásahu, objemového prietoku ohrevného alebo chladiaceho média vstupujúceho do výmenníka tepla. Akčným členom môže byť ventil na potrubí alebo, ako v mojom prípade, čerpadlo. Meracím členom je teplomer. Príkladom vstupujúcej poruchovej veličiny môže byť kolísavý tlak v potrubí v dôsledku používania pár na ohrev alebo chladenie.

1.3.1 Charakterizácia kvality riadenia

Medzi prvoradá požiadavky na kvalitu riadenia patrí *stabilita* uzavretého regulačného obvodu. Pri riadení sa neuspokojíme len so stabilitou, ale snažíme sa o dosiahnutie kvality aj z ďalších uhlov pohľadu. Na objektívne stanovenie riadenia slúžia rôzne kritériá kvality, ktoré možno rozdeliť na *ukazovatele v časovej oblasti* a *integrálne kritériá kvality*. Z prvej skupiny je potrebné spomenúť hlavne maximálne preregulovanie $\sigma_{\max}$ a čas regulácie t_{reg} , zo skupiny integrálnych ukazovateľov je dôležitý najmä integrál kvadrátu regulačnej odchýlky ISE. Cieľom riadenia je minimalizovať hodnoty všetkých spomínaných kritérií.

Maximálne preregulovanie [6]: $\sigma_{\max}$ podáva informáciu o veľkosti maximálnej regulačnej odchýlky po prvom presiahnutí žiadanej veličiny a je definované:

$$\sigma_{\max} = \frac{y_{\max} - y_{\infty}}{y_{\infty} - y(0)} \times 100\%. \quad (1.9)$$

Čas regulácie [6]: t_{reg} je čas, kedy sa riadená veličina natrvalo dostane do δ -okolía žiadanej veličiny.

Integrál kvadrátu regulačnej odchýlky ISE je plocha kvadrátu odchýliek medzi žiadanou a riadenou veličinou. Je možné vypočítať aj plochu absolútnej hodnoty týchto odchýliek, známu ako IAE. Pre dosiahnutie vyššej kvality riadenia je potrebné túto hodnotu minimalizovať, čo znamená, že toto kritérium je súčasťou mnohých optimalizačných problémov. Keďže absolútna hodnota nie je spojitely derivovateľná práve v bode svojho optima, na minimalizáciu sa používa ISE:

$$\text{ISE} = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt, \quad (1.10)$$

ktorého hodnotu sa snažíme minimalizovať.

1.3.2 PID regulátor

Medzi často používané regulátory patria PID regulátory, ktoré sa nazývajú podľa toho, akú zložku obsahuje ich prenos. P označuje proporcionálnu zložku, I označuje integračnú zložku a D označuje derivačnú zložku regulátora. Prenos PID regulátora je definovaný v tvare [5]:

$$G_r(s) = Z_R + \frac{Z_R}{T_I s} + Z_R T_D s, \quad (1.11)$$

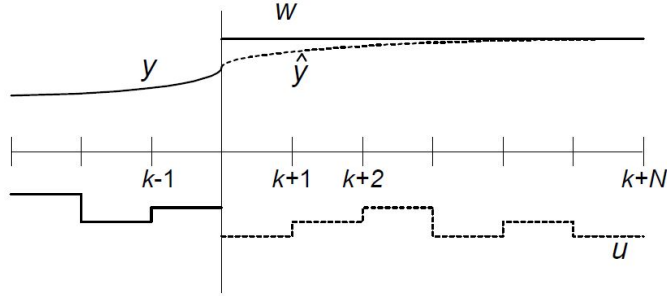
kde Z_R je proporcionálne zosilnenie regulátora, T_I je integračná časová konštanta a T_D je derivačná časová konštanta. Prvým členom tohto súčtu je teda zložka proporcionálna, druhým je integračná zložka a tretím je derivačná zložka regulátora. Podľa toho, ktoré zložky regulátor obsahuje, rozoznávame regulátory P, PI, PD a PID. Forma regulátora sa volí podľa toho, čo je pri riadení dôležité. Ak stačí dosiahnuť konštantnú hodnotu riadenej veličiny v okolí žiadanej hodnoty, tak stačí iba regulátor s P zložkou. Takéto riadenie, ale neodstraňuje trvalú regulačnú odchýlku. Na jej odstránenie slúži I zložka regulátora. D zložka regulátora vďaka derivácii môže predikovať budúce správanie sa procesu a tým skrátiť čas regulácie.

1.3.3 Prediktívne riadenie založené na modeli

V posledných rokoch si získalo veľkú popularitu tzv. *prediktívne riadenie* (skrátene MPC z angl.: *Model Predictive Control*). Pod týmto pojmom rozumieme metódy riadenia, ktoré sú založené na optimalizácii akčných zásahov prostredníctvom predikcie budúceho správania sa systému. Tento prístup k riadeniu umožňuje dosiahnuť výrazné zvýšenie bezpečnosti výrobnnej prevádzky, kvality riadenia a minimalizáciu nákladov, resp. negatívnych dopadov na životné prostredie [6].

Kvalita riadenia je vďaka využívaniu optimalizácie spravidla vyššia ako u PID regulátorov, nakoľko sa predikuje odozva systému pre celý *predikčný horizont*, teda na N krokov dopredu. Ďalšou dôležitou vlastnosťou MPC je možnosť zahrnúť do návrhu regulátora aj ohraničenia vstupných a výstupných veličín. Navyše, algoritmy tohto typu riadenia sa vyznačujú mnohostrannou použiteľnosťou, napríklad pre neurčité modely systému [6]. Tá viedla k významnému rozšíreniu MPC v priemyselnej výrobe, pričom vzniklo tzv. *robustné prediktívne riadenie*, ktoré má nasledujúce vlastnosti [7]:

- predikcie modelu sú vypočítané v diskretnom čase,
- riešenie optimalizačného problému sa realizuje vždy v zvolenom časovom úseku – v perióde vzorkovania t_s ,
- hoci je v každom kroku vypočítaná celá trajektória akčných zásahov na N krokov dopredu, v riadení sa realizuje iba prvý akčný zásah a v ďalšej perióde vzorkovania sa celý postup výpočtu zopakuje (Obr.1.4).
- možnosť riadenia mnohorozmerných systémov,
- schopnosť zahrnúť ohraničenia riadených a riadiacich veličín,
- kompenzácia vplyvu poruchy.



Obr. 1.4: Princíp MPC. [6]

Nominálne prediktívne riadenie založené na modeli má nasledujúcu formulu optimalizačného problému v tvare kvadratického programovania [8]:

$$\min_{u_0, u_1, \dots, u_{N-1}} \sum_{k=0}^{N-1} (x(k)^\top Q x(k) + u(k)^\top R u(k)), \quad (1.12)$$

$$\text{s.t.: } x(k+1) = Ax(k) + Bu(k), \quad (1.13)$$

$$y(k) = Cx(k), \quad (1.14)$$

$$y_{\min} \leq y(k) \leq y_{\max}, \quad (1.15)$$

$$u_{\min} \leq u(k) \leq u_{\max}, \quad (1.16)$$

$$x(k) = x_0, \quad (1.17)$$

kde N je počet krokov predikčného horizontu, x je vektor stavov systému, u vektor vstupov systému a y vektor výstupov systému. A je matica stavov, B matica vstupov a C je matica výstupov. Vektory $u_{\min}$, $u_{\max}$, $y_{\min}$, $y_{\max}$ sú obmedzeniami na riadiace a riadené veličiny systému. Matica Q penalizuje kvadrát odchýlky stavov systému a matica R penalizuje akčné zásahy.

Podstata tohto problému je dosahovať nielen stabilitu systému, ale aj kvalitu riadenia. Túto kvalitu dosiahneme minimalizáciou kvadrátu odchýliek stavov, čo zabezpečuje dosiahnutie žiadanej veličiny, a tiež vstupov, čo predstavuje v praxi znižovanie nákladov na riadenie procesu. V prípade môjho systému výmenníka

tepla ide o znižovanie nákladov na ohrev horúceho média.

Z hľadiska optimalizácie je dôležité nielen navrhnúť vhodné váhové matice, ale mať aj dobrý model systému, ktorý vidíme v ohraničeniach (1.13) a (1.14). Obmedzenia systému nachádzajúce sa v (1.15) a (1.16) sú určené technickými parametrami zariadenia alebo aj požiadavkami na reguláciu. Posledným ohraničením vystupujúcim v optimalizačnom probléme je nastavenie momentálneho stavu $x(k)$ ako nových počiatočných podmienok v každom kroku optimalizačného výpočtu (1.17).

1.3.4 Robustné prediktívne riadenie

Optimalizačný problém, ktorý je znázornený v rovniciach (1.12)–(1.17), predikuje budúce správanie sa riadeného procesu len s ohľadom na nominálny stavový model systému. To predstavuje nevýhodu prediktívneho riadenia, pretože sa nedokáže vysporiadať s neurčitostami systému. Robustné prediktívne riadenie je schopné zohľadniť aj neurčitosti. V prípade intervalových neurčitostí sa optimalizačný problém v tvare kvadratického programovania premietne do nového, rozšíreného optimalizačného problému v tvare semidefinitného programovania (SDP, z angl.: *Semidefinite Programming*) [8]:

$$\min \gamma, \quad (1.18)$$

$$\text{s.t.:} \quad \begin{bmatrix} X & (A_v X + B_v Y)^\top & (Q^{1/2} X)^\top & (R^{1/2} Y)^\top \\ A_v X + B_v Y & X & 0 & 0 \\ Q^{1/2} X & 0 & \gamma I & 0 \\ R^{1/2} Y & 0 & 0 & \gamma I \end{bmatrix} \geq 0, \quad (1.19)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & x(k)^\top \\ x(k) & X \end{bmatrix} \geq 0, \quad (1.20)$$

$$\begin{bmatrix} u_{\max}^2 & Y \\ Y^\top & X \end{bmatrix} \geq 0, \quad (1.21)$$

$$\begin{bmatrix} X & C(AX + BY)^\top \\ C(AX + BY) & y_{\max}^2 I \end{bmatrix} \geq 0, \quad (1.22)$$

kde A_v , B_v sú matice vrcholov systému s intervalovými neurčitostami. γ je koeficient zmrštenia robustnej invariantnej množiny, ktorá má tvar elipsoidu. X je inverzná váhovaná matica k Ljapunovovej matici $P = P^\top > 0$. Ljapunovova funkcia zabezpečuje robustnú stabilitu systému. Matica Y je ladiaci parameter pre návrh matice stavového regulátora K , pre ktorý platí vzťah [8]:

$$K = YX^{-1} = \gamma YP. \quad (1.23)$$

Stavový zákon riadenia má potom tvar:

$$u(k) = K x(k). \quad (1.24)$$

V lineárnej účelovej funkcii tohto optimalizačného problému ide o minimalizáciu koeficientu zmrštenia γ . Jeho minimalizácia zabezpečuje to, že systém konverguje do okolia žiadaného ustáleného stavu.

Ohraničenia semidefinitného programovania majú tvar lineárnych maticových nerovností (LMI, z angl.: *Linear Matrix Inequality*). Ide o ohraničenia v tvare symetrických matíc, ktorých vlastné čísla majú obmedzenú hodnotu.

Prvé z ohraničení opísané pomocou LMI (1.19) vychádza z podmienky [8]:

$$\Delta V(x(k)) \leq -(x(k)^\top Q x(k) + u(k)^\top R u(k)) \leq 0, \quad (1.25)$$

kde $V(x(k))$ je kvadratická Ljapunovová funkcia a predstavuje odozvu systému na jeho stav, čo si možno predstaviť ako nejakú formu energie systému. Ohraničenie (1.25) hovorí o tom, že v každom kroku riadenia má byť odozva systému na zmenu stavu menšia ako je požadovaná hodnota kvadratického kritéria kvality (angl.: *Stage Cost*). Zároveň platí, že musí byť záporná, pretože pri riadení sa

predpokladá, že systém sa dostáva do ustáleného stavu, kedy je energia a odozva na stav systému nulová.

Ďalšia LMI (1.20) hovorí o podmienke, v rámci ktorej vstupuje aktuálne meranie stavov systému do optimalizačného problému. Vychádza z nerovnosti [8]:

$$x(k)^\top P x(k) \leq \gamma, \quad (1.26)$$

ktorá nám definuje elipsoid. Keďže matica $P = P^\top > 0$, ktorej vlastné čísla určujú rozmery elipsoidu, je súčasne matica kvadratickej Ljapunovovej funkcie, tak vzniknutý elipsoid predstavuje robustnú invariantnú množinu s ohľadom na systém s intervalovou neurčitostou.

Posledné dve ohraničenia v tvare LMI (1.21)–(1.22) zahŕňajú obmedzenia na riadiacu a riadenú veličinu, podobne ako pri nominálnom MPC. Vychádzajú z podmienok symetrických obmedzení v tvare kvadrátu noriem [8]:

$$\|u(k)\|_2^2 \leq \|u_{\max}\|_2^2, \quad (1.27)$$

$$\|y(k)\|_2^2 \leq \|y_{\max}\|_2^2. \quad (1.28)$$

Obmedzenia na vstupy (1.27) a výstupy (1.28) sú v tvare normy preto, aby bolo možné formulovať tieto obmedzenia v tvare LMI a zachovať tak štruktúru optimalizačného problému vhodnú pre návrh robustného MPC ako konvexného optimalizačného problému. Kvadrát normy je možné uvažovať preto, lebo z pohľadu optimalizácie bude výsledok rovnaký.

Kapitola 2

Experimentálna časť

V Experimentálnej časti svojej práce sa zaoberám riadením doskového výmenníka tepla. Aby som mohla navrhnúť pokročilé riadenie založené na optimalizácii akčných zásahov, musela som najskôr systém výmenníka tepla identifikovať. Keďže výmenník tepla je nelineárny a nesymetrický systém, skúmala som jeho správanie aj pri zmene z vyššieho prietoku ohrevného média na nižší, aj naopak. Zhotovila som prechodové charakteristiky, ktoré som identifikovala a následne som vytvorila jeden výsledný prenos, ktorý sa skladal z intervalov zosilnenia, časovej konštanty a dopravného oneskorenia. Z tohto prenosu som vytvorila vrcholové matice stavového systému v diskrétnej časovej oblasti, ktoré vstupovali do optimalizačného problému robustného prediktívneho riadenia. Následne som ladila váhové matice stavov a vstupnej veličiny, pričom som použila lineárnu aj ekvippercentnú charakteristiku čerpania kvapaliny. V závere Experimentálnej časti porovnávam tieto dve metódy a vyhodnocujem kvalitu navrhnutého riadenia.

2.1 Výmenník tepla

Pri experimentálnej časti mojej práce som pracovala s výmenníkom tepla Armfield Process Plant Trainer PCT23 (Obr. 2.1). Ide o typ doskového výmenníka kvapalina – kvapalina. Teplota na výstupe z výmenníka sa riadi pomocou vstupných prietokov teplého a studeného média. Tieto prietoky je možné riadiť čerpadlami, ktoré privádzajú do výmenníka teplú vodu z výhrevného kotla (čerpadlo W) a druhým čerpadlom, ktoré privádza studenú vodu zo zásobníka suroviny (čerpadlo F). Nastavenie vstupov, teda akčných zásahov, spočíva v nastavovaní príkonu na čerpadlá v rozsahu od 0 do 100%, pričom 100 % zodpovedá hodnote 5 V. Horúce médium sa v kotli ohrieva elektrickou špirálou, ktorej príkon možno nastavovať taktiež akčnými zásahmi v rozsahu od 0 do 100 %. O aktuálnych hodnotách teploty podávajú informáciu meracie členy, teda teplomery umiestnené v kotli, v zásobníku studeného média a na výstupe z výmenníka tepla [9].



Obr. 2.1: Výmenník tepla Armfield Process Plant Trainer PCT23: čerpadlo na studené médium F (1), čerpadlo na horúce médium W (2), zásobníky studeného média (3), ohrevný kotol pre horúce médium (4), doskový výmenník tepla (5).

2.2 Kalibrácia čerpadiel

Čerpadlá predstavujú akčné členy, pomocou ktorých je možné riadiť teplotu studeného média na výstupe z výmenníku tepla.

Pri regulácii výmenníka tepla je možné riadiť pomocou dvoch čerpadiel. Čerpadlo W privádza horúce médium a čerpadlo F riadi prietok studeného média. Prietok kvapaliny závisí od napätia, ktorým sú jednotlivé čerpadlá napájané. Aby bolo možné riadiť výmenník tepla s požadovanou presnosťou, je potrebné, aby som vedela, akému prietoku zodpovedá príslušné napätie na čerpadle. Na stanovenie tejto závislosti slúži kalibrácia čerpadiel.



Obr. 2.2: Čerpadlo privádzajúce horúce médium W.

Potrebovala som zostrojiť kalibračné krivky vyjadrujúce závislosť medzi prietokom a napätím.

Prietoky som stanovila tak, že som nechala čerpať vodu do odmerného valca po dobu 30 sekúnd. Vydelením nameraného objemu tridsiatimi som získala prietok

v mililitroch za sekundu. Postupne som napätie na čerpadle zvyšovala, pričom som mohla vidieť, že objemový prietok s napätím rastie. Tento postup som opakovala pre obidve čerpadlá a zostrojila som kalibračné závislosti prietoku od napätia. Namerané údaje pre čerpadlo riadiace prietok výhrevného média (čerpadlo W) sú zobrazené v Tab. 2.1 a údaje pre čerpadlo riadiace prietok studeného média (čerpadlo F) sú zhrnuté v Tab. 2.2.

Tabuľka 2.1: Závislosť objemových prietokov od napätia na čerpadle W.

U_W [%]	$\dot{V}_W$ [ml s ⁻¹]
20	0,7
40	3,4
60	6,3
80	9,0
100	11,3

Tabuľka 2.2: Závislosť objemových prietokov od napätia na čerpadle F.

U_F [%]	$\dot{V}_F$ [ml s ⁻¹]
30	1,3
40	2,7
60	5,8
80	8,8
100	12,0

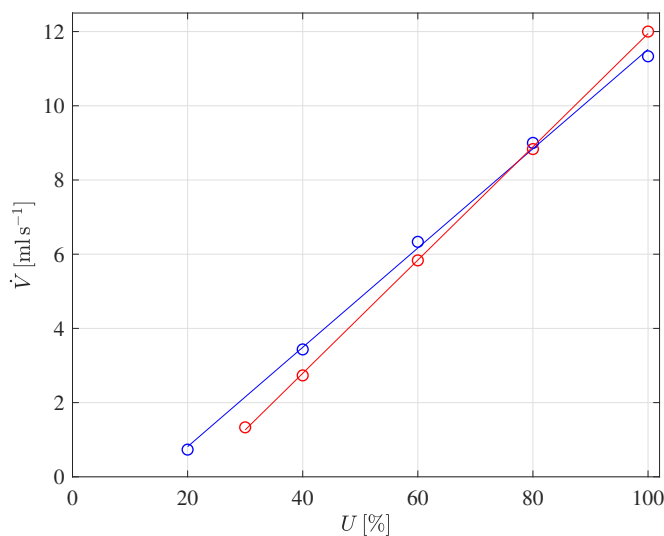
Spracovaním nameraných údajov pomocou lineárnej regresie založenej na metóde najmenších štvorcov som dostala kalibračné závislosti pre čerpadlo riadiace prietok výhrevného média (čerpadlo W):

$$\dot{V}_W = 0,1338 U_W - 1,8633, \quad (2.1)$$

a pre čerpadlo riadiace prietok studeného média (čerpadlo F):

$$\dot{V}_F = 0,1526 U_F - 3,3146, \quad (2.2)$$

kde V je objemový prietok v mililitroch za sekundu a U je napätie na čerpadlách v rozsahu od 0 V do 5 V, pričom 5 V zodpovedá 100 % rozsahu napätia. Kalibračné čiary môžeme vidieť na Obr. 2.3. Tieto závislosti mi poslúžia na to, aby som vedela, aké napätie na čerpadlách treba nastaviť, ak budem potrebovať určitú žiadanú hodnotu prietoku, keďže čerpadlá sú akčným členom. Kalibračné krivky tiež využijem na to, aby som vypočítala celkovú spotrebu ohrevného média na zohriatie studenej kvapaliny na požadované teplotu.



Obr. 2.3: Kalibračné krivky čerpadiel: čerpadlo W (modrá), čerpadlo F (červená), namerané hodnoty ($\circ$).

2.3 Ekvipercentná charakteristika

Keďže správanie výmenníka tepla je nelineárne, z pohľadu riadenia procesu je možné uskutočňovať aj iný spôsob čerpania kvapaliny, ako bolo opísané v kapitole 2.2 tejto práce. Aby bolo možné kompenzovať nelineárne správanie sa priebehu teploty, budem uvažovať návrh tzv. *ekvipercentnej charakteristiky*, ktorá, ako už z názvu vyplýva, zabezpečí, že sa pri skokovej zmene na vstupe vždy čerpá o rovnaké percento objemového prietoku kvapaliny viac alebo menej [10].

Pri lineárnej charakteristike čerpadla (Obr. 2.3) dochádza k tomu, že ak sa vykoná skoková zmena na vstupe, napr. z 20 na 40 % z napätia, objemový prietok síce narastie o rovnakú hodnotu ako pri skokovej zmene zo 40 na 60 %, ale nie je to percentuálne ekvivalentné oproti predošlej hodnote, nakoľko sa zmenila hodnota základu, z ktorého sa podiel vypočíta. Pri ekvipercentnej charakteristike čerpadla (Obr. 2.4) je dodržané to, že pri rovnakej skokovej zmene na vstupe sa prietok zvýši o rovnaké percento oproti predošlej hodnote. To znamená, že závislosť, už nie je lineárna, ale je exponenciálna v tvare [10]:

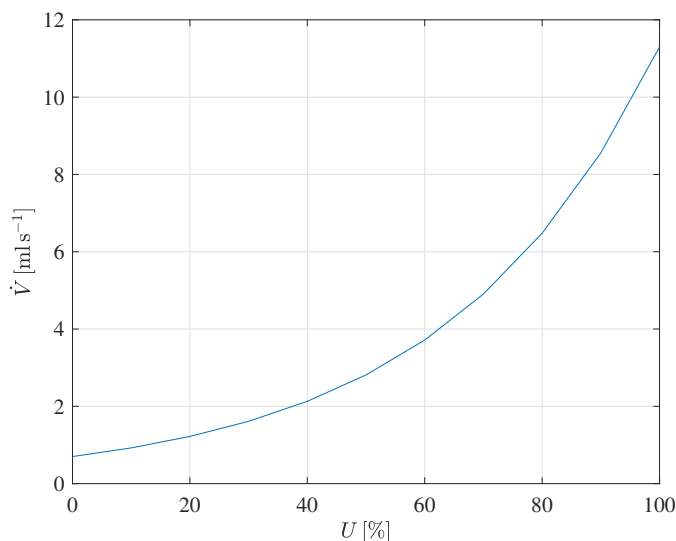
$$\dot{V} = \frac{e^x}{\tau \dot{V}_{\max}}, \quad (2.3)$$

kde $\dot{V}_{\max} = 11,3 \text{ ml s}^{-1}$ je maximálny objemový prietok, $\tau = 16,14$ je pomer maximálneho objemového prietoku $\dot{V}_{\max}$ a minimálneho objemového prietoku $\dot{V}_{\min}$ a pre x platí [10]:

$$x = H \log(\tau), \quad (2.4)$$

kde H predstavuje príkon na čerpadlo v možnom rozsahu od 0 do 1, pričom 1 zodpovedá 100 % výkonu.

Pri riadení je výhodné meniť prietok o rovnaké percento oproti základu, ako o rovnakú hodnotu oproti základu. Takáto závislosť sa potom využije na to, aby bolo možné vypočítať, o koľko je potrebné zvýšiť napätie, ak chcem urobiť ekvipercentnú skokovú zmenu na vstupe oproti predošlej.



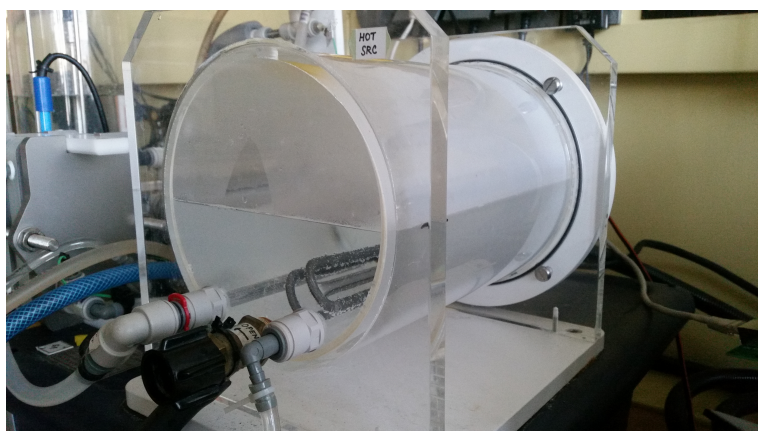
Obr. 2.4: Ekvipercentná charakteristika čerpadla.

Ak sa napríklad vykoná skoková zmena prietoku 10 % z počiatočnej hodnoty 20 ml s^{-1} , potom sa prietok ustáli na novej hodnote 22 ml s^{-1} . Zmena prietoku je 2 ml s^{-1} . Pri ďalšej skokovej zmene opäť o 10 % sa výsledná hodnota skokovej zmeny vypočíta z nového základu 22 ml s^{-1} . Nová hodnota prietoku preto bude $24,2 \text{ ml s}^{-1}$. Ale zmena prietoku je $2,4 \text{ ml s}^{-1}$. Z tohto príkladu vidíme, že pri rovnakej hodnote skokovej zmeny v percentách hodnoty objemových prietokov nebudú meniť lineárne.

2.4 Riadenie kotla

Cieľom riadenia je zabezpečiť požadovanú teplotu studeného média na výstupe z výmenníka tepla. Táto teplota sa riadi pomocou prietoku horúceho média. Preto je pre výslednú presnosť a kvalitu riadenia potrebné najskôr zabezpečiť konštantnú teplotu horúceho média.

Studené médium je do výmenníka tepla privádzané zo zásobníka kvapaliny. Teplotu studeného média budeme považovať za konštantnú. Prípadné odchýlky teploty budú z pohľadu riadenia predstavovať poruchy, ktoré odstráni dobre nalaďený regulátor výmenníka tepla. Na druhej strane, horúce médium je privádzané do výmenníka tepla z výhrevného kotla. Vo výhrevnom kotli (Obr. 2.5) sa horúce médium ohrieva pomocou elektrickej špirály. Príkon na špirále je možné meniť a tým ovplyvňovať teplotu vo výhrevnom kotli. Aby som zabezpečila konštantnú teplotu horúceho média, implementovala som riadenie s využitím pomocného uzavretého regulačného obvodu [9].

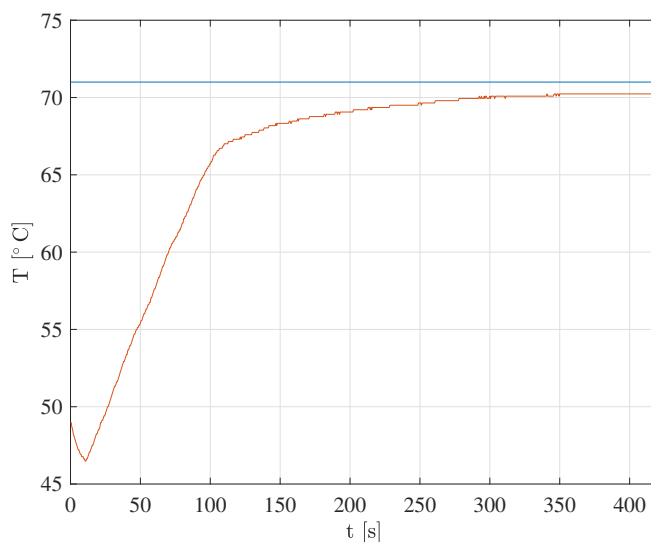


Obr. 2.5: Kotel s ohrevnou špirálou na predohrev horúceho média.

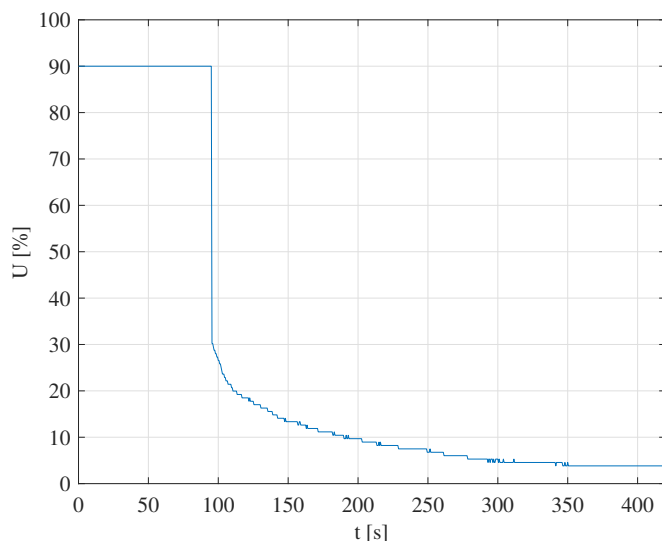
Zabezpečenie žiadanej hodnoty teploty vo výhrevnom kotli $T_2 = 70^\circ\text{C}$ je uskutočňované elektrickou špirálou, ktorá predstavuje v pomocnom uzavretom regulačnom obvode akčný člen. Riadenie sa realizuje pomocou P regulátora, ktorý vypočíta, aký výkon je potrebný na ohrev horúceho média. Riadenie elektrickej špirály nie je jednoduché, nakoľko má nelineárne a nesymetrické správanie sa. Rozdiel v dynamike zohrievania a ochladnutia spôsoboval veľké oscilácie pri riadení pomocou regulátora s integračnou zložkou. Preto som sa rozhodla použiť P regulátor. Riadenie pomocou navrhnutého regulátora bolo pomalé, tak v prvej fáze, kým sa

voda zohrial na teplotu približne $T_2 = 60^\circ\text{C}$, som nastavila ohrev špirály na konštantný príkon 90 %, čo zodpovedá príkonu $P_2 = 1,8 \text{ kW}$. Až po dosiahnutí teploty $T_2 = 60^\circ\text{C}$ som riadila ohrev špirály pomocou P regulátora. Na návrh hodnoty proporcionálnej zložky regulátora je potrebné zohľadniť, že sa riadi teplota horúceho média v kotle v rozsahu od 0 do približne 70°C , zatiaľ čo výkon možno nastavovať od 0 do 100 %. To znamená, že ide o rádovo rovnaké čísla, a preto zosilnenie a P zložku netreba nastavovať na rôzne násobky desiatich. Systematickým ladením som nastavila hodnotu pomocného P regulátora na $Z_{R,P} = 5$.

Grafický priebeh riadenia teploty T_2 vo výhrevnom kotle je zobrazený na Obr. 2.6) a príslušné hodnoty akčných zásahov sú zobrazené na Obr. 2.7).



Obr. 2.6: Riadenie teploty horúceho média v kotle: T_2 (červená) a žiadaná teplota (modrá)



Obr. 2.7: Výkon špirály vo výhrevnom kotle.

2.5 Identifikácia systému

Na návrh pokročilého riadenia je potrebné poznať správanie sa riadeného systému. Na získanie matematického modelu opisujúceho správanie sa výmenníka tepla v celom rozsahu pracovných bodov som použila experimentálnu identifikáciu.

Vstupno-výstupný model v tvare prenosovej funkcie som získala na základe série nameraných prechodových charakteristík.

Sledovaným výstupom bola teplota studeného média na výstupe z výmenníka tepla T_4 . Skokové zmeny na vstupe som vyvolávala zmenou prietoku ohrevného média pomocou čerpadla W, zatiaľ čo prietok studeného média, realizovaný prostredníctvom čerpadla F, zostával konštantný. Cieľom identifikácie bolo zistiť, ako systém reaguje na skokové zmeny na vstupe pri nulových začiatkových podmienkach. Na to bolo potrebné namerať údaje pre prechodové charakteristiky. Jedna prechodová charakteristika by nestačila na získanie kvalitného opisu sys-

tému, preto bolo potrebné vykonať viacero skokových zmien.

Výmenník tepla nie je jednoduchý systém s lineárnym a symetrickým správaním, pretože sa ohreje za kratší čas ako vychladne. Preto som skúmala reakciu teploty vo výmenníku aj na skokovú zmenu z menšieho prietoku na väčší aj naopak, teda skokovú zmenu nahor aj nadol. Systém som najskôr dostala do ustáleného stavu, čo v odchyľkovom tvare predstavovalo nulové počiatočné podmienky a postupne som nastavovala zmenu výkonu čerpadla W , ktoré zvyšovalo alebo znižovalo objemový prietok horúceho média.

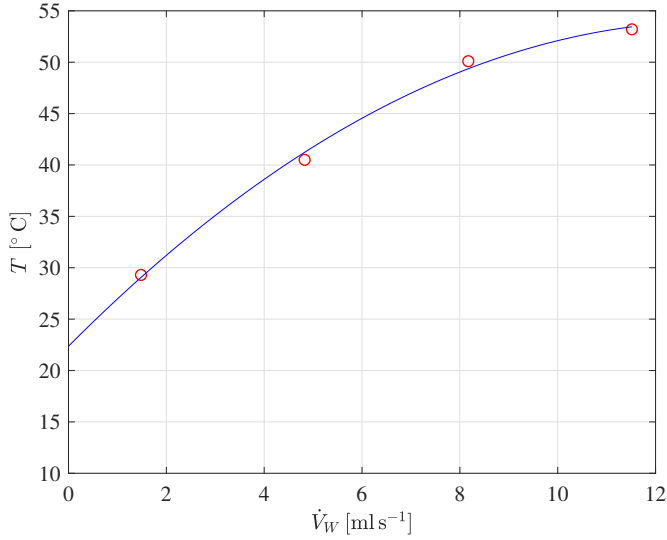
Správanie systému som skúmala po dobu 20 minút, ktorá pre všetky realizované skokové zmeny stačila na to, aby sa systém opäť dostal do nového ustáleného stavu.

Pred samotnou identifikáciou systému som skúmala správanie sa systému v rôznych pracovných bodoch. Namerané údaje (Tab. 2.3) som spracovala vo forme prevodovej charakteristiky, ktorá predstavuje závislosť ustálených hodnôt teploty vo výmenníku tepla od zmeny prietoku výhrevného média. Vyhodnotila som prevodové charakteristiky zvlášť pre skokové zmeny vstupnej veličiny smerom nahor (Obr. 2.8) aj nadol (Obr. 2.9).

Tabuľka 2.3: Ustálené teploty vo výmenníku tepla pri skokových zmenách prietoku smerom nahor a nadol.

$\dot{V}_W [\text{ml s}^{-1}]$	$T_4 [^{\circ}\text{C}]$	$\dot{V}_W [\text{ml s}^{-1}]$	$T_4 [^{\circ}\text{C}]$
1,5	29,3	11,5	53,2
4,8	40,5	8,2	43,1
8,2	50,1	4,8	43,1
11,5	53,2	1,3	31,1

Na grafoch možno vidieť, že závislosti nie sú lineárne. Preto som aproximovala správanie sa výmenníka tepla pomocou polynómu druhého rádu. Táto krivka bola nájdená tak, aby minimalizovala sumu štvorcov odchyľiek od nameraných



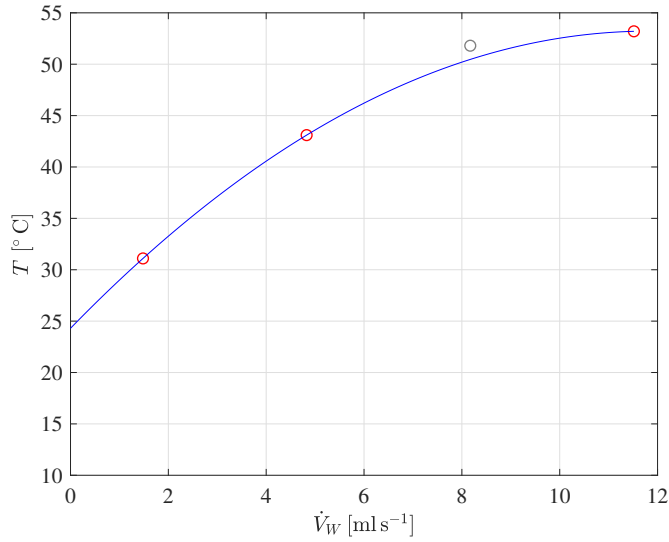
Obr. 2.8: Prevodová charakteristika pri skokových zmenách prietoku smerom nahor.

hodnôt:

$$\min \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 = \min \sum_{i=1}^n ((a_2 x_i^2 + a_1 x_i + a_0) - y_i)^2 \quad (2.5)$$

V tejto formulácii optimalizačného problému predstavujú hodnoty y_i namerané hodnoty teploty, hodnoty x sú objemové prietoky a parametre a predstavujú koeficienty aproximovaných polynómov druhého rádu. Tretí bod v poradí pre skokové zmeny smerom nadol (Tab. 2.9) som pri návrhu kvadratickej aproximácie vylúčila z množiny uvažovaných hodnôt. Tento bod bol vynechaný preto, lebo v jeho okolí dochádzalo pri kvadratickej aproximácii k fyzikálne nerealizovateľnému javu, kedy so stúpajúcim prietokom horúceho média teplota mierne klesala. Túto nepresnosť mohol spôsobiť šum merania vylúčeného bodu.

Výsledná aproximovaná prevodová charakteristika pre skokové zmeny na



Obr. 2.9: Prevodová charakteristika pri skokových zmenách prietoku smerom nadol.

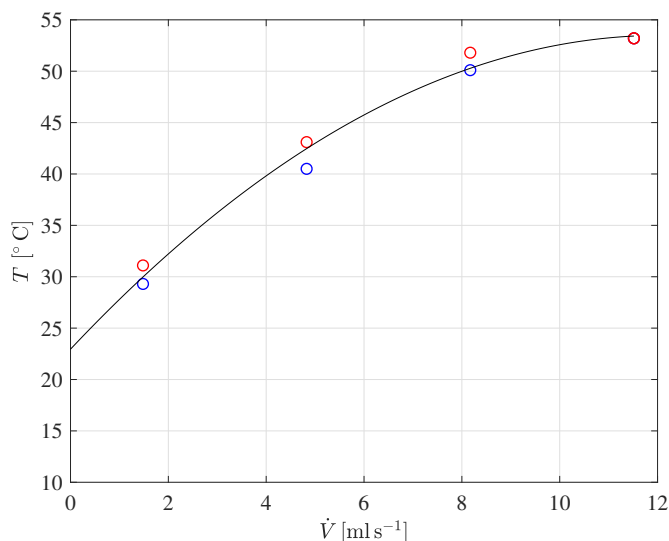
vstupe smerom nahor je

$$\hat{y} = -0.1810 x^2 + 4.7830 x + 22.3654 \quad (2.6)$$

a pre skokové zmeny smerom nadol

$$\hat{y} = -0.2070 x^2 + 4.8936 x + 24.3037 \quad (2.7)$$

Zároveň som zhotovila aj nominálnu prevodovú charakteristiku, ktorá súčasne aproximuje body skokovej zmeny nahor aj nadol (Obr. 2.10). Nominálna krivka predstavuje priemerné správanie sa systému bez ohľadu na smer skoku a tiež je na nej vidieť rozsah reálnych výstupov, ktoré pri skokových zmenách vstupu je možné dostať. Poskytuje tak dôležité informácie o možnom rozsahu riadenia v rôznych pracovných bodoch.

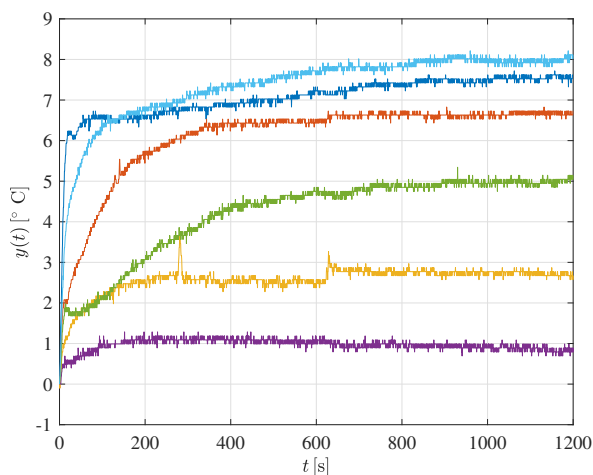


Obr. 2.10: Odozvy systému na skokové zmeny nahor aj nadol: nominálna krivka (čierna), skokové zmeny nahor (modrá), skokové zmeny nadol (červená).

Časové odozvy systému na zmenu na vstupe, ktoré boli namerané, nepredstavujú ešte prechodovú charakteristiku, keďže nešlo o jednotkovú skokovú zmenu na vstupe pri nulových začiatočných podmienkach. V tomto prípade je potrebná tzv. normalizácia nameraných údajov. Jednotková skoková zmena v mojom prípade znamená, že prietok znížim alebo zvýšim o 1 ml s^{-1} . Preto je potrebné vydeliť hodnoty nameraných výstupných veličín hodnotou skokovej zmeny, ktorú som vykonávala. V mojom prípade to bolo 25 % z maximálneho príkonu na čerpadlo, teda približne $3,3 \text{ V}$. Taktiež bolo potrebné zaistiť, aby časové závislosti, ktoré som namerala, predstavovali údaje pri nulových začiatočných podmienkach, keďže ustálený stav, z ktorého sa vychádzalo, nikdy nepredstavoval 0°C . Dosiahla som to tak, že som od všetkých výstupných údajov odčítala teplotu, pri ktorej som merala odozvy na skokové zmeny na vstupe. Odčítaním som teda dosiahla posunutie celej závislosti na osi závislej premennej do bodu nula, čo predstavuje normalizované

údaje. Výsledné prechodové charakteristiky možno vidieť na Obr. 2.11.

Namerané prechodové charakteristiky som vyhodnocovala pomocou Strejcovovej metódy identifikácie systémov opísanej v kapitole 1.2.1. Na určenie hodnôt zosilnenia, časovej konštanty a dopravného oneskorenia som použila toolbox PID-DESIGN, ktoré môžeme vidieť v tabuľke č. 2.4.



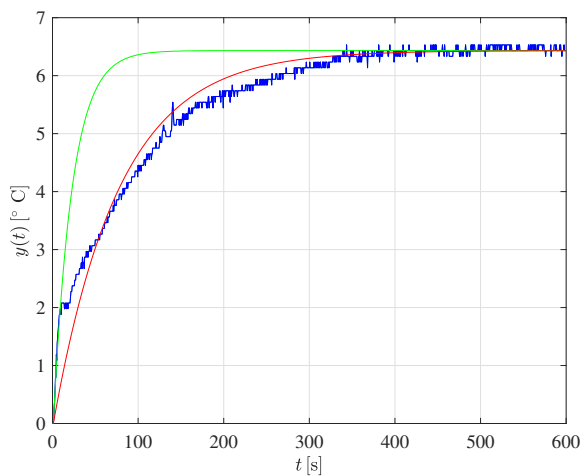
Obr. 2.11: Namerané prechodové charakteristiky pre všetky odozvy systémov.

Tabuľka 2.4: Tabuľka zosilnení, časových konštánt a dopravných oneskorení pre namerané prechodové charakteristiky.

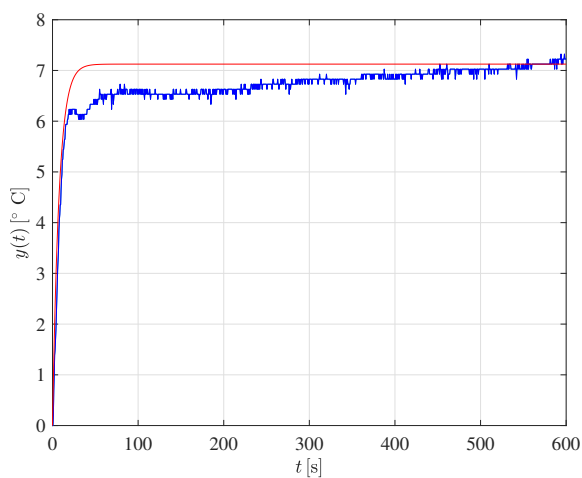
ΔU [V]	1,5 $\rightarrow$ 4,8	4,8 $\rightarrow$ 8,2	8,2 $\rightarrow$ 11,5	11,5 $\rightarrow$ 8,2	8,2 $\rightarrow$ 4,8	4,8 $\rightarrow$ 1,3
$Z[^\circ C]$	7,1	6,4	2,6	1,1	4,6	7,7
$T[s]$	7,6	22,0	13,5	12,5	17,4	12,7
$D[s]$	0,5	1,0	2,0	3,0	0,0	0,0

Tieto prenosy som spracovala vo forme grafov, pričom dve prenosové funkcie pre skokovú zmenu na vstupe zo 4,8 V na 8,2 V možno vidieť na Obr. 2.12.

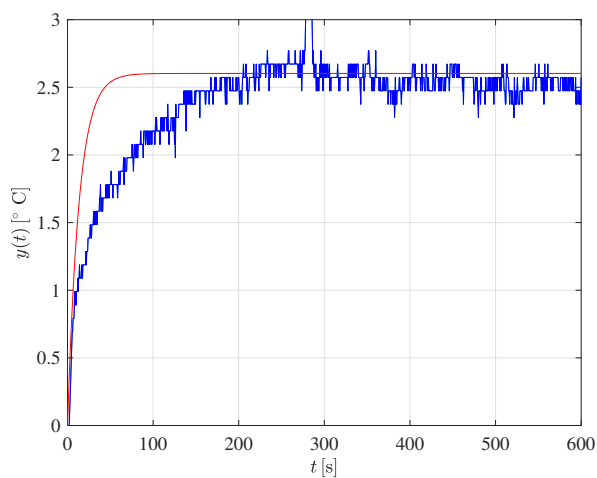
Na Obr. 2.12 možno vidieť porovnanie dvoch identifikovaných prechodových



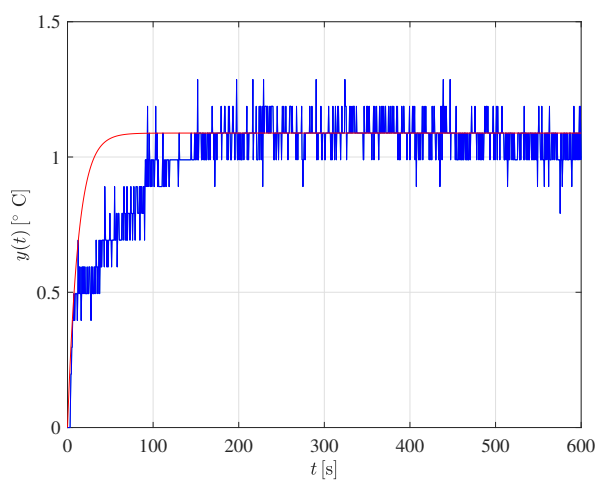
Obr. 2.12: Prechodové charakteristiky: nameraná (modrá), identifikovaná s ohľadom na celý priebeh (červená) a s ohľadom na počiatočnú dynamiku (zelená)



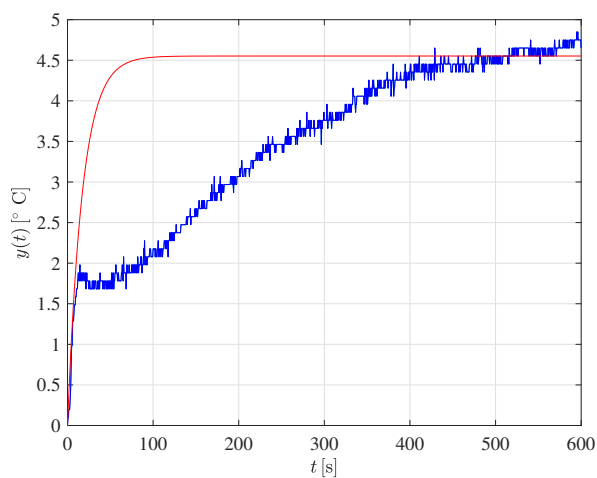
Obr. 2.13: Prechodová charakteristika pre skokovú zmenu z 1,5 V na 4,8 V (červená) a prechodová charakteristika (modrá)



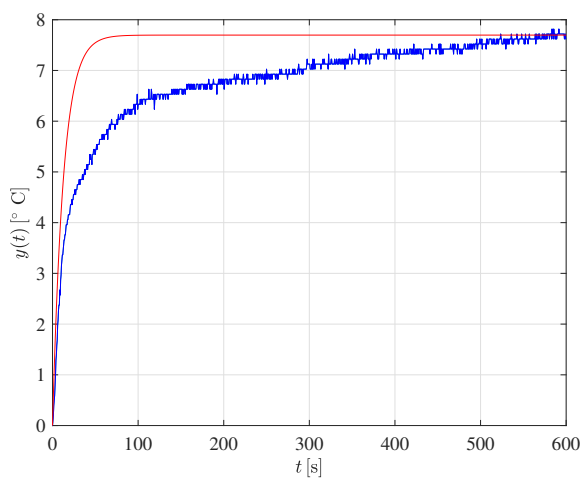
Obr. 2.14: Prechodová charakteristika pre skokovú zmenu z 8,2 V na 11,5 V a prechodová charakteristika (modrá)



Obr. 2.15: Prechodová charakteristika pre skokovú zmenu z 11,5 V na 8,2 V a prechodová charakteristika (modrá)



Obr. 2.16: Prechodová charakteristika pre skokovú zmenu z 8,2 V na 4,8 V a prechodová charakteristika (modrá)



Obr. 2.17: Prechodová charakteristika pre skokovú zmenu z 4,8 V na 1,3 V a prechodová charakteristika (modrá)

funkcií. Červená krivka predstavuje odozvu systému identifikovaného s ohľadom na presnosť popisu nameraných údajov. Tento systém má vysokú časovú konštantu, čo by mohlo viesť k pomalému a málo efektívnemu riadeniu. Pre návrh regulátora je preto potrebné, aby prenosová funkcia mala čo najnižšiu časovú konštantu, aj napriek tomu, že horšie kopíruje priebeh prechodovej charakteristiky. Zelená krivka predstavuje odozvu systému identifikovaného s ohľadom na presnosť popisu počiatkovej dynamiky systému. Tento prístup sa prejaví zvýšenou hodnotou sumy štvorcov odchýliek medzi nameranou a identifikovanou prechodovou charakteristikou. Podobným spôsobom som spracovala aj ostatné prechodové charakteristiky.

Nakoľko je správanie výmenníka tepla nesymetrické a nelineárne, tak na jeho kvalitný matematický opis nám nestačí len jedna prenosová funkcia. Preto som na základe všetkých identifikovaných prenosových funkcií zostavila výsledný neurčitý model systému. Ide o nájdenie tzv. *robustnej obálky*, ktorá zabezpečí odolnosť regulátora voči vplyvu intervalovej neurčitosti systému. Výsledný prenos tvoria intervaly časovej konštanty, zosilnenia a dopravného oneskorenia. Našla som teda ich minimá a maximá a výsledný prenos je v tvare:

$$G(s) = \frac{\langle 1, 1; 7, 7 \rangle}{\langle 7, 6; 22, 0 \rangle s + 1} e^{-\langle 0; 3 \rangle s}. \quad (2.8)$$

Keďže dopravné oneskorenia boli nízke s ohľadom na časovú konštantu, pri hľadaní robustnej obálky som ich zanedbala. Z maximálnych a minimálnych hodnôt časovej konštanty a zosilnenia teda vznikli štyri kombinácie prenosových funkcií:

$$G_{\min, \min}(s) = \frac{1, 1}{(7, 6s + 1)}, \quad (2.9)$$

$$G_{\max, \max}(s) = \frac{7, 7}{(22s + 1)}, \quad (2.10)$$

$$G_{\min, \max}(s) = \frac{1, 1}{(22s + 1)}, \quad (2.11)$$

$$G_{\max, \min}(s) = \frac{7, 7}{(7, 6s + 1)}, \quad (2.12)$$

Pre návrh regulátora sú v oblasti hornej hranice prechodových charakteristik dôležité maximálne zosilnenia a minimálne časové konštanty. V dolnej oblasti obálky budú smerodajné zasa zosilnenia, ktoré sú minimálne a časové konštanty, ktoré sú maximálne. Na Obr. 2.18 môžeme ale vidieť, že spodná prechodová charakteristika nie je dostatočne dobre ohraničená, čo je spôsobené tým, že som sa snažila o nájdenie rýchleho regulátora s nízkou časovou konštantou. Robustná obálka ale musí zahrnúť každé správanie sa systému, a preto som ladením časovej konštanty dostala správnu dolnú hranicu obálky. Výsledný identifikovaný prenos sa teda trochu pozmení v intervale časovej konštanty:

$$G(s) = \frac{\langle 1, 1; 7, 7 \rangle}{\langle 7, 6; 60, 0 \rangle s + 1} e^{-(0;3)s}. \quad (2.13)$$

2.6 Riadenie výmenníka tepla

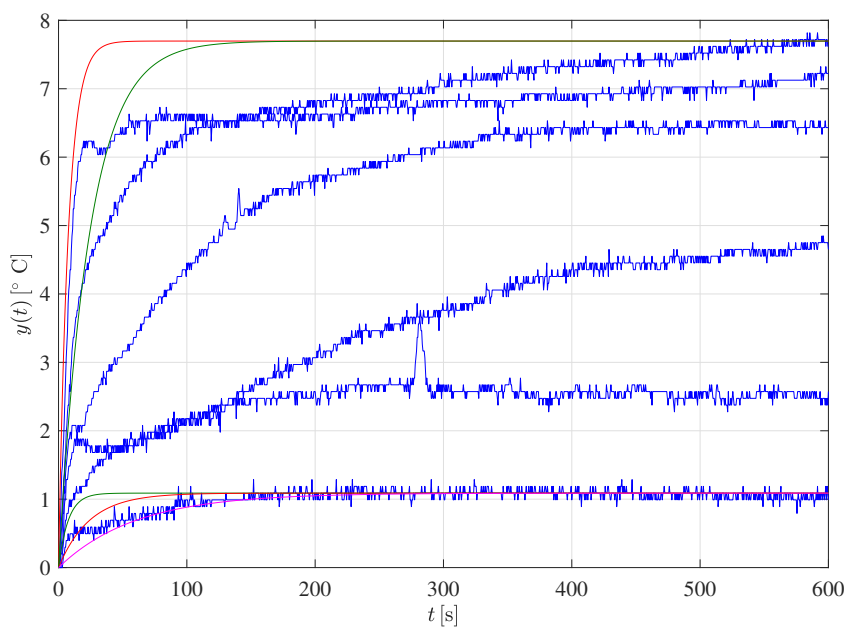
Ako bolo uvedené v kapitole 1.3.4, systém s intervalovými neurčitostami je vhodné riadiť pomocou robustného prediktívneho riadenia založenom na modeli.

Jedným z prvých krokov bolo správne zvoliť periódu vzorkovania pre daný systém. Je dôležité si pritom uvedomiť, že nemôže byť príliš veľká, aby nebolo riadenie pomalé a aby tak nedochádzalo k častým preregulovaniám. Taktiež táto perióda nesmie byť primalá, aby robustný regulátor stíhal vypočítať veľkosti optimalizovaných premenných a tak určiť potrebný akčný zásah. Perióda vzorkovania počas môjho riadenia bola 5 sekúnd.

Pomocou identifikácie som našla prenosy, ktoré opisujú hraničné správanie sa systému. Tie bolo treba následne previesť do stavového opisu systému v diskretnom čase:

$$x(k+1) = A x(k) + Bu(k), \quad x(0) = x_0, \quad (2.14)$$

$$y(k) = Cx(k), \quad (2.15)$$



Obr. 2.18: Robustná obálka prechodových charakteristík, prechodové charakteristiky (modrá), vhodné prenosové funkcie (červená), nevhodné prenosové funkcie (zelená) a doplnená prenosová funkcia (fialová).

ktorý bol následne pre rozšírený vektor stavov $\tilde{x}(k0) = [x(k)^\top, \sum_{i=0}^k x_i^\top]^\top$ prevedený do rozšíreného stavového opisu s integračnou zložkou:

$$\tilde{x}(k+1) = \tilde{A}\tilde{x}(k) + \tilde{B}\tilde{u}(k), \quad \tilde{x}(0) = \tilde{x}_0, \quad (2.16)$$

$$y(k) = \tilde{C}\tilde{x}(k), \quad (2.17)$$

Tento tvar je vhodný na to, aby som mohla použiť konvexnú optimalizáciu, ktorá je podstatou návrhu robustného MPC. Matice diskrétného stavového opisu (2.14) sú:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -t_s C & I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,665 \pm 0,147 & 0 \\ 2,648 \pm 2,418 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.18)$$

$$\tilde{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4,089 \pm 0,425 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.19)$$

$$\tilde{C} = \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,530 \pm 0,484 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.20)$$

Na riadenie laboratórneho výmenníka tepla som použila robustné MPC navrhnuté v prostredí MATLAB/Simulink. Zostavila som si vlastné schémy na riadenie procesu. Komunikácia medzi procesom a mojím počítačom prebiehala cez lokálnu WiFi sieť pomocou *eLab Manager*. Pri analýze riadení som sa zamerala na úlohu sledovania. Keďže výmenník je nelineárny a nesymetrický proces, tak riadená veličina, teda teplota na výstupe z výmenníka tepla, sledovala skokovú zmenu smerom nahor z 30°C na 40°C a smerom nadol zo 40°C na 35°C.

Následne som určovala veľkosti váhových matíc Q a R (1.12). Tieto matice možno rozložiť na súčiny:

$$Q = Q_V Q_J, \quad (2.21)$$

$$R = R_V R_J, \quad (2.22)$$

kde Q_V , R_V sú matice váhové a Q_J , R_J sú matice jednotkové, ktoré vyrovnávajú rády jednotiek stavových a vstupných veličín. Keďže napríklad teplota sa pohybuje

rádovo v desiatkách, matica Q_J by mala mať hodnotu 10^{-1} , no keďže matica je násobená kvadrátom stavov, bude mať hodnotu 10^{-2} . Týmto spôsobom som nastavila P a I zložky váhovej matice robustného regulátora a tiež aj jednotkovú zložku matice R , ktorá vyrovnávala rád vstupnej veličiny, teda objemového prietoku. Nasledovalo systematické ladenie váhových zložiek týchto matíc, pričom som skúšala riadiť teplotu smerom nahor aj nadol. Výsledné nastavenie váhových matíc bolo:

$$Q_P = 7 \times 10^{-1}, \quad (2.23)$$

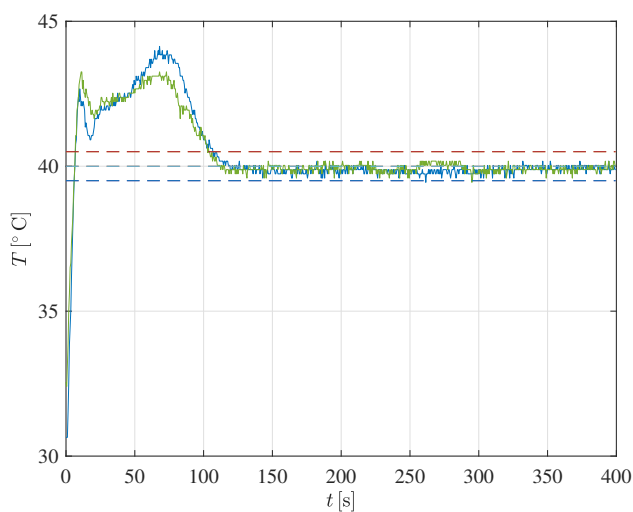
$$Q_I = 3 \times 10^{-5}, \quad (2.24)$$

$$R = 30. \quad (2.25)$$

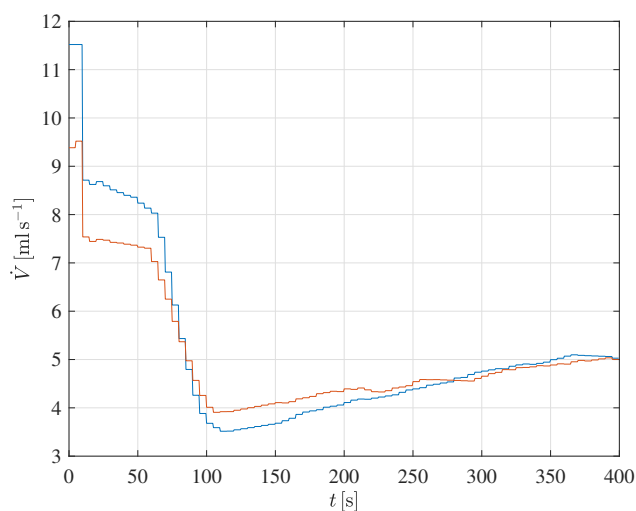
Na riadenie doskového výmenníka tepla som po absolvovaní týchto krokov aplikovala robustné prediktívne riadenie. Získané priebehy riadenia sú zobrazené na Obr. 2.19–2.22. Vo svojej práci som skúmala možnosti kompenzácie nelineárneho správania sa výmenníka tepla (Obr. 2.8–2.9), preto som aplikovala navrhnuté robustné MPC s použitím lineárnej aj ekvipercentnej charakteristiky čerpadla. Ako možno z grafov vidieť, tak priebehy riadenia teploty sa s použitím jednotlivých charakteristík líšia. Dosiahnutie žiadanej veličiny je viditeľne rýchlejšie v prípade ekvipercentnej charakteristiky pri regulácii teploty smerom nadol. Pri riadení smerom nahor si zas môžeme všimnúť nižšie preregulovanie ako s použitím lineárnej charakteristiky. Pri oboch smeroch riadenia si však môžeme všimnúť, že takmer celý priebeh akčných zásahov, teda objemových prietokov horúceho média, bol v prípade lineárnej charakteristiky nad priebehom tej ekvipercentnej. To znamená, že riadenie s použitím lineárnej charakteristiky spotrebovalo viac ohrevného média.

Riadenie som vyhodnocovala aj po kvalitatívnej stránke, pričom som sa zamerala na určenie preregulovania $\sigma_{\max}$, času regulácie t_{reg} , integrálu kvadrátu regulačnej odchýlky ISE , integrálu kvadrátu vstupnej veličiny ISU , objemu použitého ohrevného média V_W vypočítaného podľa rovnice:

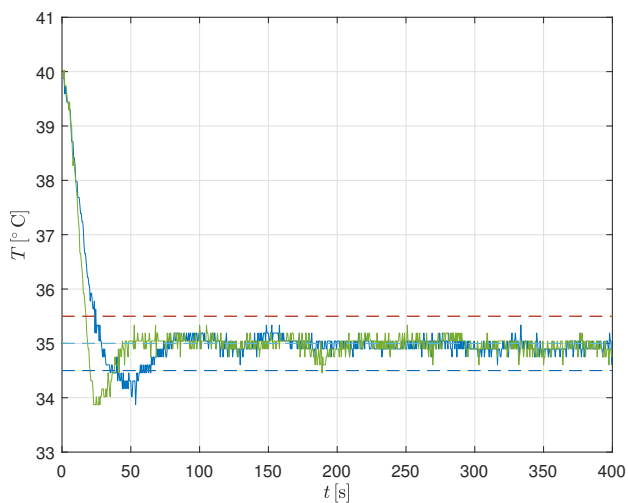
$$V_W = \int_0^\infty \dot{V}_W dt \approx \sum_{k=0}^N \dot{V}_W t_s, \quad (2.26)$$



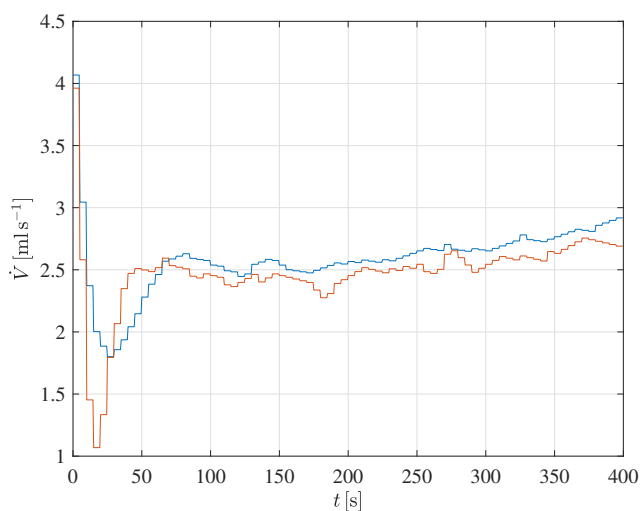
Obr. 2.19: Pribeh riadenia teploty $30^{\circ}\text{C} \rightarrow 40^{\circ}\text{C}$, použitie lineárnej charakteristiky (modrá), použitie ekvippercentnej charakteristiky (zelená).



Obr. 2.20: Akčné zásahy počas riadenia teploty $30^{\circ}\text{C} \rightarrow 40^{\circ}\text{C}$, použitie lineárnej charakteristiky (modrá), použitie ekvippercentnej charakteristiky (oranžová).



Obr. 2.21: Pribeh riadenia teploty $40^{\circ}\text{C} \rightarrow 35^{\circ}\text{C}$, použitie lineárnej charakteristiky (modrá), použitie ekvippercentnej charakteristiky (zelená).



Obr. 2.22: Akčné zásahy počas riadenia teploty $40^{\circ}\text{C} \rightarrow 35^{\circ}\text{C}$, použitie lineárnej charakteristiky (modrá), použitie ekvippercentnej charakteristiky (oranžová).

kde t_s je perióda vzorkovania a $\dot{V}_W$ je objemový prietok horúceho média.

Posledným kritériom kvality riadenia je energia spotrebovaná na ohrev horúceho média E vypočítaná podľa vzťahu:

$$E = m_W c_p \Delta T = \rho_W V_W c_p \Delta T, \quad (2.27)$$

kde m_W je hmotnosť horúceho média, c_p je špecifická tepelná kapacita vody, ρ_W je hustota horúceho média a ΔT je rozdiel teplôt horúceho média ($T_W = 70^\circ\text{C}$) a laboratórnej teploty ($T_{\text{lab}} = 20^\circ\text{C}$).

Súhrn vyššie uvedených ukazovateľov kvality riadenia pre skokovú zmenu smerom nahor je uvedený v Tab. 2.5 a pre skokovú zmenu smerom nadol je uvedený v Tab. 2.6.

Tabuľka 2.5: Ukazovatele kvality riadenia teploty $30^\circ\text{C} \rightarrow 40^\circ\text{C}$.

charakteristika	$\sigma_{\max} [\%]$	$t_{\text{reg}} [s]$	$ISE [^\circ\text{C}^2]$	$ISU [\text{ml}^2]$	$V_W [\text{ml}]$	$E [\text{J}]$
lineárna	44,2	107	1163	12166	2082	428
ekvippercentná	43,7	104	845	11015	2036	418

Tabuľka 2.6: Ukazovatele kvality riadenia teploty $40^\circ\text{C} \rightarrow 35^\circ\text{C}$.

charakteristika	$\sigma_{\max} [\%]$	$t_{\text{reg}} [s]$	$ISE [^\circ\text{C}^2]$	$ISU [\text{ml}^2]$	$V_W [\text{ml}]$	$E [\text{J}]$
lineárna	22,6	65	303	2706	1034	212
ekvippercentná	22,6	38	286	2492	990	203

Ako možno vidieť v Tab. 2.5–2.6, riadenie s použitím ekvippercentnej charakteristiky čerpadla kvapaliny je výhodnejšie z pohľadu takmer všetkých kritérií kvality. Jej použitím som dosiahla nižší čas regulácie t_{reg} , ktorý je viditeľný najmä pri riadení z vyššej teploty na nižšiu. Podobne je nižší aj integrál kvadrátu regulačnej odchýlky ISE , čo tiež hovorí o vyššej kvalite riadenia. Dôležitým faktorom je zníženie integrálu kvadrátu vstupnej veličiny ISU a aj objemu použitého ohrevného

média V_W , čo znamená, že použitie ekviperventnej charakteristiky nie je výhodné len po kvalitatívnej stránke riadenia, keďže kompenzuje nelineárne správanie sa systému. Táto charakteristika je výhodnejšia aj po stránke kvantitatívnej, lebo dokáže šetriť objem riadiaceho horúceho média, a navyše, aj s tým spojenú energiu E vynaloženú na ohrev tejto kvapaliny. Samozrejme, v prípade laboratórneho výmenníka tepla rozdiely medzi týmito dvoma typmi čerpania nie sú veľmi veľké, no v priemysle, kde sa riadi teplota vo výmenníkoch v oveľa väčšom množstve a rozsahu, môže ísť o významné šetrenie nákladov.

Záver

Hlavným cieľom mojej bakalárskej práce bol návrh a implementácia pokročilého robustného riadenia výmenníka tepla. Pred riadením bolo nevyhnutné tento proces identifikovať, pričom pre identifikáciu bolo potrebné experimentálne získať údaje skúmaním správania sa daného procesu.

Aby bolo možné riadiť výmenník tepla s požadovanou presnosťou, bolo potrebné vedieť, akému prietoku zodpovedá príslušné napätie na čerpadle. Preto prvým krokom experimentálnej časti mojej práce bola kalibrácia čerpadiel, ktoré predstavujú akčné členy. Túto závislosť som skúmala postupným zvyšovaním napätia a zaznamenávaním prietokov, ktoré mu zodpovedali, pre obe čerpadlá. Tieto závislosti slúžia na to, aby som vedela nastaviť napätie na čerpadlách, ak som potrebovala určitú žiadanú hodnotu prietoku studeného alebo horúceho média.

Keďže z pohľadu riadenia procesu je možné uskutočňovať aj efektívnejší spôsob čerpania kvapaliny, zhotovila som ekvippercentnú charakteristiku čerpadla, ktorá dokáže zabezpečiť, že pri rovnakej skokovej zmene napätia sa vždy prietok zvýši o rovnaké percento oproti predošlej hodnote. Týmto prístupom sa kompenzuje nelineárne správanie sa výmenníka tepla.

Ďalším cieľom mojej práce bolo zabezpečenie konštantnej teploty ohrevného média. Preto som vytvorila pomocné riadenie výhrevného kotla s využitím uzavretého regulačného obvodu. Riadenie sa realizovalo pomocou P regulátora, ktorý riadil výkon potrebný na ohrev horúceho média.

Výmenník tepla nie je jednoduchý systém s lineárnym a symetrickým správaním, preto bolo treba skúmať jeho správanie aj pri skokových zmenách vstupnej veličiny smerom nadol aj nahor. Pre zmeny objemového prietoku na vstupe som namerala odozvy systému, z ktorých som normalizáciou údajov dostala prechodové charakteristiky. Strejcovou metódou identifikácie systémov aplikovanej na všetky prechodové charakteristiky som získala tri dôležité konštanty pre prenosové funkcie, a to zosilnenie, časovú konštantu a dopravné oneskorenie.

Na základe týchto prenosových funkcií som zostavila výsledný neurčitý model systému. Výsledný prenos tvoria intervaly časovej konštanty a zosilnenia, čo viedlo k štyrom rôznym kombináciám prenosových funkcií, ktoré môžu tvoriť robustnú obálku. S ohľadom na to, že pre návrh regulátora sú v oblasti hornej hranice robustnej tuby dôležité maximálne zosilnenia a minimálne konštanty, a naopak, pre dolnú hranicu sú smerodajné minimálne zosilnenia a maximálne časové konštanty, vytvorila som touto kombináciou robustnú obálku.

Výsledky identifikácie bolo potrebné previesť do diskrétného stavového opisu systému, aby mohli byť použité ako súčasť ohraničení pre optimalizačný problém, ktorý je podstatou robustného prediktívneho riadenia. Taktiež som musela systematickým ladením nájsť vhodné hodnoty váhových matíc stavov a vstupnej veličiny. Skúmala som regulačné pochody riadenia s použitím lineárnej aj ekvipercenťnej charakteristiky čerpania a následne som vyhodnocovala kvalitu regulácie a množstvo použitej vody na riadenie teploty vo výmenníku, či energie spotrebovanej na ohrev. Z vypočítaných ukazovateľov kvality vyplýva, že ekvipercenťná charakteristika zlepšila výslednú kvalitu riadenia.

Literatúra

- [1] J. Longauer a J. Dojčanskéhoš. Chemické inžinierstvo I. Malé Centrum, 1999.
- [2] M. Bafrnec, V. Bálež, I. Langfelder a J. Longauer. Chemické inžinierstvo I. Malé Centrum, 1999.
- [3] Bela G. Liptak. Instrument Engineers' Handbook, zv. 2: Process Control and Optimization. CRC Press, London, 4 edition, 2005.
- [4] Výmenníky tepla. on-line: <https://www.regulus.sk/sk/vymenniky-tepla>.
- [5] M. Bakošová, M. Fikar a L. Čírka. Základy automatizácie. STU v Bratislave, 2003.
- [6] J. Mikleš a M. Fikar. Process Modelling, Identification, and Control. Springer, 2007.
- [7] M. Kvasnica. Introduction to model predictive control. on-line: http://kirp.chtf.stuba.sk/~kvasnica/mpc/01_mpc_introduction.pdf.
- [8] M. V. Kothare, V. Balakrishnan a M. Morari. Robust Constrained Model Predictive Control Using Linear Matrix Inequalities. Automatica, 32:1361–1379, 1996.
- [9] Introduction Manual, PCT23-MkII Process Plant Trainer. Armfield, 2007.

- [10] Control Valve Characteristics. on-line: <http://www.spiraxsarco.com/Resources/Pages/Steam-Engineering-Tutorials/control-hardware-el-pn-actuation/control-valve-characteristics.aspx>.