

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
Fakulta chemickej a potravinárskej technológie

Evidenčné číslo: FCHPT-5415-61627

**Identifikácia a návrh riadenia laboratórneho
výmenníka tepla**

Bakalárska práca

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

Fakulta chemickej a potravinárskej technológie

Evidenčné číslo: FCHPT-5415-61627

Identifikácia a návrh riadenia laboratórneho výmenníka tepla

Bakalárska práca

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

Číslo študijného odboru: 2621

Názov študijného odboru: 5.2.14. automatizácia, 5.2.52. priemyselné inžinierstvo

Školiace pracovisko: Ústav informatizácie, automatizácie a matematiky

Vedúci záverečnej práce: Ing. Juraj Oravec, PhD.

Bratislava 2015

Katrin Prokeinová



ZADANIE BAKALÁRSKEJ PRÁCE

Študentka: **Katrin Prokeinová**
ID študenta: 61627
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.

Názov práce: **Identifikácia a návrh riadenia laboratórneho výmenníka tepla**

Špecifikácia zadania:

Cieľom bakalárskej práce je identifikovať matematický model laboratórneho výmenníka tepla ARMFIELD PCT23 a následne navrhnúť riadenie tohto procesu. Matematický model by mal popisovať správanie sa systému s ohľadom na meniaci sa prietok vstupného média a horúceho média. Na základe získaného modelu sa navrhne vhodný spôsob riadenia s ohľadom na celkovú kvalitu regulácie a spotrebu energie.

Rozsah práce: 30

Zoznam odbornej literatúry:

1. Mikleš, J. – Fikar, M. *Modelovanie, identifikácia a riadenie procesov 1 : Modely a dynamické charakteristiky spojitých procesov*. Bratislava: STU v Bratislave, 1999. 192 s. ISBN 80-227-1289-2.
2. Mikleš, J. – Fikar, M. *Modelovanie, identifikácia a riadenie procesov 2 : Identifikácia a optimálne riadenie*. Bratislava: STU v Bratislave SJF, 2004. 267 s. ISBN 80-227-2134-4.
3. Instruction Manual, PCT23-MkII Process Plant Trainer, Armfield, 2007.

Riešenie zadania práce od: 16. 02. 2015

Dátum odovzdania práce: 24. 05. 2015

L. S.

Katrin Prokeinová
študentka

prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
vedúci pracoviska

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

Moje úprimné poďakovanie patrí všetkým, ktorí mi akýmkoľvek spôsobom pomáhali pri vypracovaní bakalárskej práce. Osobitná vďačnosť patrí môjmu konzultantovi Ing. Jurajovi Oravcovi, PhD. za prejavení ochotu, skúsené rady, odborné vedenie a pomoc počas spracovania jednotlivých častí bakalárskej práce.

Katrin Prokeinová

Bratislava, 2015

Abstrakt

Cielom záverečnej práce bolo navrhnuť riadenie pre laboratórny výmenník tepla Armfield Process Plant Trainer PCT23. V prvej časti práce boli spracované teoretické podklady potrebné pre matematické modelovanie, identifikáciu a návrh spätnoväzbového riadenia laboratórneho výmenníka tepla. Druhá časť práce bola venovaná získaným experimentálnym výsledkom. Najskôr bol predstavený laboratórny výmenník tepla a kalibrácia jeho čerpadiel, ktoré slúžili ako akčné členy. V nasledujúcej časti bola spracovaná identifikácia procesu pomocou nameraných prechodových charakteristík. Pre identifikovaný proces bolo následne navrhnuté vhodné riadenie pomocou PID regulátorov a bola vyhodnotená kvalita riadenia s ohľadom na celkovú spotrebu výhrevného média a spotrebu energie.

Kľúčové slová:

výmenník tepla; PID regulátor; identifikácia; Armfield Process Plant Trainer PCT23.

Abstract

The aim of this thesis was to design a suitable controller for a laboratory heat exchanger Armfield Process Plant Trainer PCT23. The theoretical backgrounds of the mathematical modeling, identification, and closed-loop control were described in the chapter I of the thesis. The chapter II discussed the obtained experimental results. Described was the laboratory heat exchanger and the calibration of its pumps that served as the actuators in the feedback control. Then, the step-response-based identification was evaluated. The PID controllers were designed subjected to the obtained model in order to have a suitable control performance, and reduce the energy consumption.

Keywords:

heat exchanger; PID regulator; identification; Armfield Process Plant Trainer PCT23.

Obsah

Zoznam symbolov	1
Zoznam obrázkov	5
Zoznam tabuliek	7
Úvod	9
1 Teoretická časť	11
1.1 Výmenník tepla	11
1.2 Modelovanie riadeného systému	12
1.2.1 Identifikácia systému	13
1.3 Spätnoväzbové riadenie procesov	15
1.4 Optimalizácia	18
2 Experimentálna časť	21
2.1 Výmenník tepla Armfield Process Plant Trainer PCT23	21
2.2 Kalibrácia akčných členov	22
2.3 Pracovný bod	24
2.4 Identifikácia výmenníka tepla	27
2.5 Riadenie výmenníka tepla	29
2.6 Kvalita riadenia výmenníka tepla	36

Záver	39
Literatúra	41
Prílohy	43

Zoznam symbolov

a		smernica priamky
A	m^2	teplovýmenná plocha výmenníka tepla
b		úsek priamky
c_p	$\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$	tepelná kapacita
D		dopravné oneskorenie systému
e		kvadrát odchýlky
$E(s)$		regulačná odchýlka v Laplaceovej oblasti
E_c	J	celková spotreba energie
$G(s)$		prenos
$G_p(s)$		prenos systému
$G_{pr}(s)$		prenos poruchy
$G_r(s)$		prenos regulátora
k	$\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$	úhrnný koeficient prestupu tepla
n		řád systému
N		počet meraní

q	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	objemový prietok
Q	J	teplo
$R(s)$		poruchová veličina v Laplaceovej oblasti
s		Laplaceov operátor
t	s	čas
t_f	s	čas riadenia
t_s	s	perióda vzorkovania
t_2	$^{\circ}\text{C}$	teplota vo výhrevnom kotli
t_4	$^{\circ}\text{C}$	riadená teplota
T		časová konštanta systému
T_D		derivačná časová konštanta PID regulátora
T_I		integračná časová konštanta PID regulátora
$u(t)$		vstupná veličina v časovej oblasti
u_0		počiatočná hodnota vstupnej veličiny
u_{∞}		konečná hodnota vstupnej veličiny
$U(s)$		vstupná veličina v Laplaceovej oblasti
$\hat{U}$	V	napätie
V_c	m^3	celková spotreba výhrevného média
$W(s)$		žiadaná veličina v Laplaceovej oblasti
$y(t)$		výstupná veličina v časovej oblasti
y_0		počiatočná hodnota výstupu
y_{∞}		ustálená hodnota výstupu
$Y(s)$		výstupná veličina v Laplaceovej oblasti

Z	zosilenie systému
Z_R	proporcionálne zosilnenie PID regulátora

Grécke symboly

Δt_{LS}	K	hnacia sila prechodu tepla
ρ	kg m^{-3}	hustota

Zoznam obrázkov

1.1	Identifikácia systému Strejcovou metódou.	16
1.2	Schéma uzavretého regulačného obvodu.	17
2.1	Kalibračná krivka pre čerpadlo “PUMP W”.	25
2.2	Kalibračná krivka pre čerpadlo “PUMP F”.	26
2.3	Prechodové charakteristiky pre scenár 1.	29
2.4	Prechodové charakteristiky pre scenár 2.	30
2.5	Prechodové charakteristiky pre scenár 3.	31
2.6	Prechodové charakteristiky pre scenár 4.	32
2.7	Priebeh riadenia teploty pomocou PI regulátora.	32
2.8	Akčné zásahy navrhnuté pomocou PI regulátora.	34
2.9	Priebeh riadenia teploty pomocou PID regulátora.	35
2.10	Akčné zásahy navrhnuté pomocou PID regulátora.	35
2.11	Spotreba výhrevného média.	37
2.12	Spotreba energie na ohrev výhrevného média.	38

Zoznam tabuliek

1.1	Identifikácia systému Strejcovou metódou	15
2.1	Parametre kalibrácie akčných členov.	24
2.2	Rozsahy teplôt pre rôzne pracovné body.	26
2.3	Identifikované parametre výmenníka tepla.	28
2.4	Riadiace scenáre.	33
2.5	Navrhnuté PID regulátory.	33

Úvod

Jeden z dôvodov, prečo som si vybrala túto tému bakalárskej práce, bolo využitie výmenníkov tepla vo vykurovacích systémoch. V poslednom období som sa stretávala s riešeniami výmeny tepla pri vykurovaní rodinných domov, pričom pri diskusiách o tejto téme vzniklo viac otázok ako odpovedí. Pri súčasnom rýchlom raste cien vstupov výroby tepla a pri nevyhnutnosti efektívneho prenosu tepla má riešenie tohto problému perspektívnu budúcnosť. Preto ma zaujala možnosť študovať a riadiť výmenník tepla v praxi.

S výmenníkmi tepla sa v bežnom živote stretávame každý deň. Nájdeme ich v domácnosti, ako súčasť mnohých elektrospotrebičov, ale aj ako neodmysliteľnú súčasť priemyselnej výroby. Väčšina výmenníkov tepla je používaná na jeden z dvoch hlavných dôvodov, a to na ohrev alebo na chladenie. V chemickom priemysle sa výmenníky tepla používajú buď samostatne, a to v sušiarňach, kryštalizátoroch, odparkách, alebo sú výmenníky tepla súčasťou zložitejších procesov destilácie, rektifikácie, chemických reaktorov a podobne. Pre niektoré procesy je funkcia výmenníka tepla iba vedľajším, nežiadaným článkom. Preto je nevyhnutné venovať zvýšenú pozornosť efektívnemu návrhu riadenia výmenníkov tepla. S ohľadom na minimalizáciu ekonomických nákladov a redukcii negatívnych dopadov na životné prostredie je potrebné hľadať optimálne riešenia, ako zabezpečiť efektívny prenos tepla pri procesoch, ktoré si to vyžadujú a na druhej strane zamedziť prenosu tepla pri procesoch, kde je to nežiadúce.

Východiskom pre moju prácu je zariadenie Armfield Process Plant Trainer PCT23, ktoré slúži na vzdelávanie a pomáha skúmať rôzne problémy súvisiace s riadením výmenníkov tepla v priemyselných zariadeniach. Cieľom mojej bakalárskej práce je oboznámiť sa s laboratórnym výmenníkom tepla, identifikovať systém pomocou prechodových charakteristík a navrhnúť vhodné spätnoväzbové riadenie s ohľadom na celkovú spotrebu energie.

Kapitola 1

Teoretická časť

1.1 Výmenník tepla

Výmenník tepla je chemicko-technologické zariadenie, ktoré slúži na ohrev alebo chladenie materiálových prúdov na žiadanú teplotu. Zákonitosti fungovania výmenníka tepla skúma vedná disciplína, ktorá sa nazýva prestup tepla. Prestup tepla je dej, ktorý zohráva významnú úlohu v každodennom živote, v priemysle a je neodmysliteľnou súčasťou chemickej výroby [4].

Výmenníky tepla majú veľmi veľa možností využitia. Motory v autách, lodiach a lietadlách využívajú výmenníky na efektívnejšie pracovanie. V domácnostiach sa využívajú výmenníky tepla predovšetkým v elektrospotrebičoch, akými sú napríklad chladnička alebo klimatizácia [12]. V priemysle sa najčastejšie používajú tri typy výmenníkov, a to plášťové, rúrkové a doskové. Plášťové sa využívajú napríklad pri riadení chemických reaktorov. Rúrkové výmenníky tepla sú jednoduché zariadenia, tvorené rúrkou, ktorá odovzdáva teplo. Ich nevýhodou je nízky úhrnný tepelný odpor a teda požadujú veľkú plochu na odovzdanie malého množstva tepla. Doskové výmenníky majú až desaťnásobne vyšší úhrnný tepelný odpor, pri ktorom možno teplovýmennú plochu podľa požiadaviek zväčšiť alebo zmenšiť.

Nevýhodou doskových výmenníkov je obmedzený rozsah teplôt [11]. V chemickom priemysle sa výmenník tepla využíva nie len ako samostatné zariadenie, ale aj ako súčasť zložitejších zariadení. Využíva sa napríklad pri riadení chemických reaktorov na predohrev vstupných prúdov. V rámci optimalizácie výroby je cieľom zvýšiť výťažok a znížiť vplyv vedľajších reakcií. Výmenníky tepla sa používajú aj pri destiláciách, rektifikáciách, alebo sušiarňach. Pri jednoduchých destiláciách sa používa na ohrev vstupných prúdov do destilačného alebo rektifikačného zariadenia.

V súčasnosti poznáme tri spôsoby prestupu tepla: vedením, prúdením a žiarením. Výborným príkladom prestupu tepla vedením sú steny budov, ktoré odvádzajú teplo vedením von z domu, a preto je potrebné ich zatepľovať. Prúdenie ako prestup tepla badať v domácnosti pri vetraní a vstupe studeného, resp. teplého vzduchu, ktorý sa mieša s domácim a ochladzuje alebo ohrieva ho. Príkladom prestupu tepla žiarením je slnečné žiarenie, ktoré prostredníctvom elektromagnetickej energie zohrieva priestor [6].

Vo výmenníku tepla dochádza k výmene tepelnej energie medzi výhrevným médiom, ktoré má vyššiu teplotu a vyhrievaným médiom, ktoré má nižšiu teplotu. Základ výmeny tepla vo výmenníku vyjadruje rýchlostná rovnica prechodu tepla, v tvare

$$Q = kA\Delta t_{LS}, \quad (1.1)$$

kde Q znázorňuje intenzitu toku tepla, A je teplovýmenná plocha, k je úhrnný koeficient prechodu tepla, ktorý vyjadruje obrátenú hodnotu tepelného odporu. Parameter Δt_{LS} predstavuje hnaciu silu, ktorá vyjadruje rozdiel teplôt výhrevného a vyhrievacieho média [4].

1.2 Modelovanie riadeného systému

Matematické modelovanie slúži na opis správania sa systému. Na matematický opis dynamického správania sa systému sa väčšinou používajú diferenciálne rovnice.

Väčšina pokročilých riadiacich prístupov je založená na modele riadeného systému. Výsledná kvalita riadenia priamo závisí od kvality získaného modelu. Na druhej strane kvalita modelu zvyšuje zložitosť matematického opisu. Preto výsledný model predstavuje kompromis medzi kvalitou opisu riadeného procesu a jeho výpočtovou zložitostou.

Zostavenie matematického modelu výmenníkov tepla začína stanovením faktorov, ktoré majú byť v matematickom modeli zahrnuté. Vo fyzikálnych problémoch súvisia tieto faktory so zákonmi zachovania a rovnicami rovnováhy vo forme energetických, resp. materiálových bilancií. Rozlišujú sa tri základné prístupy k modelovaniu:

- **Teoretické modelovanie:** často sa využívajú fyzikálne a chemické princípy založené na zjednodušujúcich predpokladoch: objemové prietoky vyhrievaného aj výhrevného média sú konštantné, nedochádza k akumulácii hmoty, tlak v systéme je konštantný, zanedbáva sa tepelná kapacita vonkajších stien výmenníka, zanedbávajú sa straty tepla do okolia, parametre výmenníka sú konštantné a platí rovnaká referenčná teplota pre všetky členy bilancie.
- **Experimentálne modelovanie:** získavajú sa pomocou matematickej analýzy údajov nameraných na reálnom procese. Tento prístup bol aplikovaný v experimentálnej časti mojej práce.
- **Teoreticko-experimentálne modelovanie:** získavajú sa kombináciou teoretického a empirického prístupu pri tvorbe modelu [7].

1.2.1 Identifikácia systému

Identifikácia systému slúži na stanovenie parametrov procesu z danej triedy systémov, ku ktorým je testovaný systém na základe vstupov a výstupov ekvivalentný. Vo svojej práci som použila identifikáciu pomocou prechodovej charakteristiky systému. Prechodová charakteristika systému bola získaná pomocou nameraných

údajov z reálneho procesu. Pred uskutočnením skokovej zmeny bolo potrebné, aby bol systém v ustálenom stave. Následne sa namerané odozvy systému na skokové zmeny vstupných veličín normalizovali. Pomocou normalizácie sa namerané hodnoty výstupu prepočítajú tak, akoby bola na vstupe jednotková skoková zmena a odozva systému sa začínala v nulových počiatočných podmienkach. Pomocou normalizovaných prechodových charakteristík bola získaná nominálna prechodová charakteristika systému ako priemerná odozva procesu. Na identifikáciu stabilného aperiodického systému bola použitá Strejcova metóda [5]

Cieľom identifikácie je vypočítať parametre prenosu

$$G_p(s) = \frac{Z}{(Ts + 1)^n} e^{-Ds}, \quad (1.2)$$

kde Z je zosilnenie systému, T je časová konštanta systému, D je dopravné oneskorenie a n je rád systému. Zosilnenie systému sa vypočíta zo vzťahu

$$Z = \frac{y_\infty - y_0}{u_\infty - u_0}, \quad (1.3)$$

kde y_0 je počiatočná hodnota výstupu $y(t)$ v čase $t = 0$, y_∞ je ustálená hodnota výstupu, u_0 je počiatočná hodnota vstupnej veličiny pred skokovou zmenou a u_∞ je konečná hodnota vstupnej veličiny po skokovej zmene. Na prechodovej charakteristike nájdeme *inflexný bod*. Inflexný bod je bod, v ktorom sa funkcia mení z konvexnej na konkávnú alebo naopak. Následne sa v inflexnom bode zostrojí dotyčnica. Zostroja sa rovnobežky s časovou osou, ktoré prechádzajú hodnotami y_0 a y_∞ . Priesečníkom týchto rovnobežiek a dotyčnice zostrojenej v inflexnom bode sa získajú dva body, a to čas prietahu t_u a čas nábehu t_n , pozri obr. 1.1 [2, 5, 8].

Následne sa vypočíta podiel $f(s)$ pomocou čas prietahu t_u a čas nábehu t_n . Rád systému n sa určí pomocou Strejcovej tabuľky 1.1 tak, aby bola splnená nasledujúca podmienka

$$f(n) \leq f(s) < f(n + 1). \quad (1.4)$$

Časová konštanta T sa tiež určí pomocou Strejcovej tabuľky. Pre príslušné

$g(n)$ odčítané z tab. 1.1 sa použije nasledujúci vzťah

$$T = g(n)t_n. \quad (1.5)$$

Pri identifikácii systému prvého rádu pre časovú konštantu platí

$$T = t_n. \quad (1.6)$$

Dopravné oneskorenie D sa určí ako rozdiel medzi skutočným a fiktívnym časom nábehu t_u

$$D = (f(s) - f(n))t_n. \quad (1.7)$$

Pri identifikácii systému prvého rádu pre dopravné oneskorenie platí [2, 5, 8]

$$D = t_u. \quad (1.8)$$

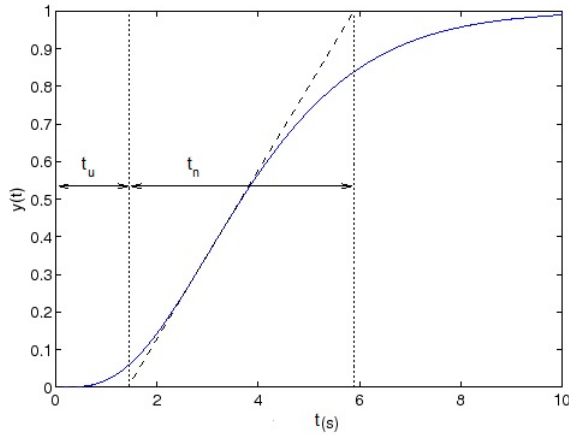
1.3 Spätnoväzbové riadenie procesov

Riadenie považujeme všeobecne ako cieľavedomé pôsobenie na riadený objekt resp. proces, ktorý zabezpečuje dosiahnutie požadovaného cieľa. V praxi pre zabezpečenie vhodnej prevádzky sú zvyčajne úlohy a problémy riadenia rozdelené do tzv. podúloh a podproblémov pre jednotlivé stupne riadenia procesov [7].

V teórii riadenia sa stretávame s pojmom *uzavretý regulačný obvod*, skrátené URO. URO je súbor technických prostriedkov, ktoré slúžia na to, aby riadený

Tabuľka 1.1: Identifikácia systému Strejcovou metódou

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

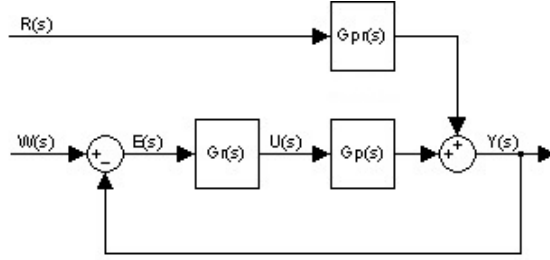


Obr. 1.1: Identifikácia systému Strejcovou metódou pomocou prechodovej charakteristiky.

proces uspokojivo pracoval v automatickom režime. Bloková schéma URO je znázornená na obr. 1.2, kde blok $G_{pr}(s)$ predstavuje prenos poruchy procesu, $G_p(s)$ je prenos riadeného systému a $G_r(s)$ je prenos regulátora procesu. URO pozostáva z piatich veličín v Laplaceovej oblasti, a to $Y(s)$, $E(s)$, $W(s)$, $R(s)$, $U(s)$. $Y(s)$ je riadená veličina, ktorá je výstupom z riadiaceho procesu. Riadiaca veličina je označená ako $U(s)$ a poruchová veličina je $R(s)$. Regulačná odchýlka označovaná ako $E(s)$ je vyjadrená ako rozdiel žiadanej veličiny $W(s)$ a riadenej veličiny $Y(s)$ [2, 7, 8].

Hlavnou časťou URO je regulovaný systém $G_p(s)$, ktorý na základe účelových zmien akčných zásahov $U(s)$ dosahuje požadované hodnoty riadenej veličiny $Y(s)$. Na hodnotu riadenej veličiny $Y(s)$ môže mať vplyv porucha $R(s)$, ktorá môže negatívne ovplyvniť výslednú kvalitu riadenia.

Regulátor je zariadenie, ktoré vyhodnocuje regulačnú odchýlku a na základe zákona riadenia generuje akčnú veličinu. Medzi najrozšírenejšie typy regulátorov v priemyselnej výrobe patria *proporcionálno-integračno-derivačné regulátory*, skrát-



Obr. 1.2: Schéma uzavretého regulačného obvodu.

tene *PID regulátory*. Medzi ich hlavné výhody patrí robustnosť a jednoduchosť ladenia. V literatúre bolo publikovaných veľké množstvo metód na návrh parametrov PID regulátora [9]. V praxi sa často používajú aj modifikácie PID regulátora, ktorými sú: proporcionálny regulátor (P), proporcionálno-integračný regulátor (PI) a proporcionálno-derivačný regulátor (PD). V experimentálnej časti mojej práce som využila tri typy PID regulátorov, a to P, PI a PID. V ďalšej časti sú podrobnejšie opísané.

Proporcionálny regulátor má nasledujúcu štruktúru:

$$G_r(s) = Z_R, \quad (1.9)$$

teda pozostáva len z proporcionálneho zosilnenia regulátora Z_R . Riadením pomocou P regulátora nie je možné úplne odstrániť trvalú regulačnú odchýlku.

Proporcionálno-integračný regulátor má štruktúru:

$$G_r(s) = Z_R + \frac{Z_R}{T_I s}, \quad (1.10)$$

kde $T_I > 0$ je integračná časová konštanta. Hlavnou úlohou PI regulátora je odstránenie trvalej regulačnej odchýlky, čo ovplyvňuje integračná časová konštanta T_I . Integračná časová konštanta určuje rýchlosť zmeny akčného zásahu. Čím je hodnota T_I menšia, tým sú väčšie zmeny v riadení a systém sa správa periodicky.

Proporcionálno-integračno-derivačný regulátor môže mať rôzne štruk-

túry, ale najpoužívanejšia forma je bez interakcie:

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

kde $T_D > 0$ je derivačná časová konštanta. Hlavnou úlohou PID regulátora je odstránenie regulačnej odchýlky, pričom sa navyše predikuje budúce správanie sa procesu pomocou derivačnej zložky. Jeho nevýhodou je citlivosť na šum merania, čo môže viesť k veľkým a častým zmenám amplitúdy riadenia [2, 7, 8].

Hodnotenie kvality regulácie v uzavretom regulačnom obvode je neoddeliteľnou súčasťou pri návrhu spätnoväzbových regulátorov. Väčšinou sa využívajú dva typy ukazovateľov kvality, a to kritéria kvality v časovej oblasti a integračné ukazovatele kvality [7]. V rámci mojej práce budem vyhodnocovať kvalitu riadenia práve pomocou ukazovateľa *ISE*. *ISE* predstavuje integrál kvadratickej regulačnej odchýlky $e(t)$

$$ISE = \int_0^\infty e(t)^2 dt, \quad (1.12)$$

pričom pri návrhu regulátora sa snažíme jeho výslednú hodnotu minimalizovať. Preto čím je hodnota ukazovateľa *ISE* menšia, tým je použitý regulátor vhodnejší pre riadený systém, lebo dôslednejšie sleduje žiadanú veličinu.

1.4 Optimalizácia

Optimalizácia kvality riadenia má za cieľ dosiahnuť čo najlepšie výsledky vzhľadom na dané podmienky. Cieľom riadenia je maximalizovať kvalitu produkcie, minimalizovať vstupné náklady a negatívne dopady na životné prostredie.

Základnou úlohou je vhodne sformulovať optimalizačný problém. Všeobecne možno optimalizačný problém zapísať nasledovne

$$J^* = \min f(x), \quad (1.13a)$$

$$\text{pre: } x \in X, \quad (1.13b)$$

kde J^* je hodnota účelovej funkcie v optime, $f(x)$ označuje samotnú účelovú funkciu a $x \in X$ znázorňuje prípustné ohraničenia optimalizačného problému.

Optimalizačný problém (1.13) býva veľmi často vo forme *lineárneho programovania* (LP), kedy je $f(x)$ v účelovej funkcii (1.13a) lineárna a ohraničenia (1.13b) sú tiež lineárne. Optimalizačný problém býva často tiež vo forme *kvadratického programovania* (QP), kedy je účelová funkcia (1.13a) kvadratická a ohraničenia (1.13b) sú lineárne. Optimalizačný problém môže byť aj v tvare *semidefinítneho programovania* (SDP), kedy je účelová funkcia (1.13a) konvexná a ohraničenia (1.13b) sú v tvare *lineárnych maticových nerovností* [3].

Optimalizačný problém je možné v programovom prostredí MATLAB efektívne formulovať pomocou toolboxu YALMIP a riešiť pomocou vhodných softvérov, akými sú napríklad GUROBI, MOSEK a iné.

V rámci mojej práce som využila optimalizáciu pri výpočte kalibračných kriviek akčných členov laboratórneho výmenníka tepla. Implementácii optimálneho riadenia na laboratórnom procese sa plánujem venovať v budúcnosti v rámci semestrálnych projektov.

Kapitola 2

Experimentálna časť

V experimentálnej časti bakalárskej práce som sa zaoberala návrhom vhodného PID regulátora pre výmenník tepla Armfield Process Plant Trainer PCT23. Najskôr bolo potrebné kalibrovať akčné členy a zistiť rozsahy teplôt výmenníka tepla. Aby bolo možné vhodne navrhnuť parametre regulátora, musela som získať kvalitný model procesu. Model riadeného systému som získala pomocou identifikácie z prechodových charakteristík. Následne som pomocou získaného modelu výmenníka tepla ladila parametre PID regulátora, ktoré som potom aplikovala na riadenie reálneho procesu Armfield Process Plant Trainer PCT23. Nakoniec som vyhodnotila kvalitu regulácie.

2.1 Výmenník tepla Armfield Process Plant Trainer PCT23

Výmenník tepla Armfield Process Plant Trainer PCT23 [1] je možné riadiť pomocou objemového prietoku výhrevného média, ktorý sa zabezpečuje pomocou čerpadla “PUMP W”, alebo pomocou prietoku vyhrievaného média, ktorý sa zabezpečuje pomocou čerpadla “PUMP F”. Riadená teplota výhrevného média sa

označuje t_4 a teplota vo výhrevnom kotli sa označuje t_2 . Cieľom riadenia je dosiahnuť požadovanú hodnotu teploty t_4 na výstupe z výmenníka tepla. Riadenie je potrebné navrhnuť vzhľadom na saturovaný akčný zásah, nakoľko vstupné napätie do čerpadla môže byť len v rozsahu hodnôt od 0 V do 5 V. Vyhrievaný prúd odoberá teplo z výhrevného prúdu, ktorý sa zohrieva vo výhrevnom kotli. Kvapalina vo výhrevnom kotli sa zohrieva pomocou elektrickej špirály, ktorej príkon je možné regulovať. Aby bolo možné riadiť teplotu t_4 , je potrebné najskôr zabezpečiť konštantnú teplotu vo výhrevnom kotli t_2 . K tomu účelu bolo potrebné navrhnuť vhodný P regulátor.

2.2 Kalibrácia akčných členov

Kalibrácia slúži na správne nastavenie rozsahu meraných parametrov na používaných meracích alebo akčných členoch. V prípade práce s výmenníkom tepla Armfield Process Plant Trainer PCT23 bolo potrebné vykonať kalibráciu akčných členov, teda čerpadla “PUMP W”, ktoré riadi prietok výhrevného média a čerpadlo “PUMP F”, ktoré riadi prietok vyhrievaného média.

V rámci kalibrácie bolo potrebné experimentálne stanoviť lineárnu závislosť napätia U od prietoku q . Cieľom kalibrácie bolo zvýšiť presnosť prepočtu prietoku kvapaliny privádzanej do výmenníka tepla. Lineárna kalibračná krivka bola zostrojená ako výsledok riešenia optimalizačného problému minimalizácie sumy štvorcov odchýliek medzi nameranými údajmi a kalibračnou krivkou.

Pomocou vytvorenej schémy pre kalibráciu akčných členov bolo nastavené konštantné napätie U privádzané do čerpadla “PUMP F”. Následne bol pomocou odmerného valca odmeraný celkový objem kvapaliny, ktorá prešla čerpadlom za určitý čas. Kvôli zvýšeniu presnosti sa každé meranie objemu kvapaliny opakovalo trikrát. Pre následné výpočty sa potom použila stredná hodnota získaných meraní. Meranie objemu bolo následne opakované pre rôzne hodnoty napätia U .

Cieľom kalibrácie bolo navrhnúť parametre kalibračnej krivky v tvare

$$U = aq + b, \quad (2.1)$$

kde a vyjadruje smernicu priamky a b vyjadruje úsek priamky.

Pre tento problém je potrebné, aby bola minimalizovaná suma štvorcov odchýliek medzi nameranými údajmi a kalibračnou krivkou. Formulácia optimalizačného problému je v nasledujúcom tvare:

$$\min_{a,b} \sum_{i=1}^N e_i, \quad (2.2a)$$

$$\text{pre: } e = (U_i - \hat{U}_i)^2, \quad (2.2b)$$

$$\hat{U}_i = aq_i + b, \quad (2.2c)$$

kde e je kvadrát odchýlky medzi nameranými údajmi a N je počet nameraných údajov.

Riešenie problému (2.2) pre prietok výhrevného média riadeného pomocou “PUMP W” je zobrazené na obr. 2.1 a bolo získané v programovom prostredí MATLAB pomocou toolboxu YALMIP. Pomocou symbolu červených hviezdíčiek sú zobrazené experimentálne namerané údaje a modrá priamka znázorňuje riešenie optimalizačného problému (2.2). Toto riešenie však nezodpovedá skutočnosti, že nulovému prietoku q má zodpovedať nulové napätie U . Preto musí mať kalibračná krivka (2.1) upravený tvar lineárnej funkcie

$$U = \tilde{a}q, \quad (2.3)$$

kde $\tilde{a}$ vyjadruje smernicu priamky. Optimalizačný problém (2.2) bol upravený do tvaru

$$\min_{\tilde{a}} \sum_{i=1}^N e_i, \quad (2.4a)$$

$$\text{pre: } e = (U_i - \hat{U}_i)^2, \quad (2.4b)$$

$$\hat{U}_i = \tilde{a}q_i. \quad (2.4c)$$

Riešenie optimalizačného problému (2.4) pre prietok výhrevného média riadeného čerpadlom “PUMP W” je zobrazené na obr. 2.1 pomocou zelenej priamky. Z obr. 2.1 je zrejmé, že zelená priamka splnila podmienku (2.3). Na druhej strane je suma štvorcov odchýliek e mierne vyššia v porovnaní s riešením optimalizačného problému (2.2).

Grafické výsledky pre kalibráciu čerpadla “PUMP F” je na obr. 2.2, kde červený symbol hviezdičky znázorňuje namerané údaje, modrá priamka predstavuje riešenie optimalizačného problému (2.2) a zelená priamka je riešením (2.4). Vypočítané hodnoty parametrov a , b a $\tilde{a}$ sú spracované v tab. 2.1.

2.3 Pracovný bod

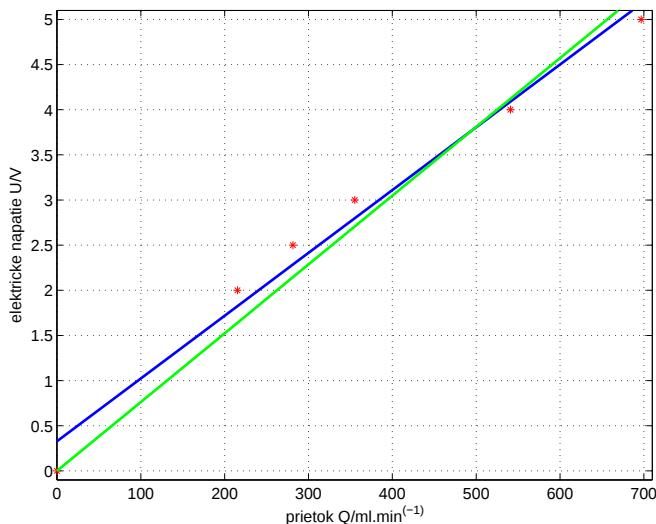
Za pracovný bod sa považujú pracovné podmienky, v ktorých je zariadenie riadené. Na určenie vhodného pracovného bodu bola aplikovaná experimentálna metóda.

Cieľom bolo zabezpečiť konštantné podmienky, aby bola zabezpečená opakovateľnosť meraní. Preto bolo najskôr potrebné dosiahnuť konštantnú teplotu výhrevného média, resp. teplotu vo výhrevnom kotli t_2 . Následne bol stanovený rozsah teplôt výhrevného média t_4 pre rôzne prietoky oboch médií.

Pre zabezpečenie konštantnej teploty vo výhrevnom kotli t_2 bolo potrebné navrhnúť vhodné riadenie príkonu do výhrevnej špirály. Preto bola riadiaca schéma upravená do tvaru uzavretého regulačného obvodu podľa obr. 1.2, kde riadenou veličinou je teplota t_2 a akčným zásahom je príkon do výhrevnej špirály. Na riadenie

Tabuľka 2.1: Parametre kalibrácie akčných členov.

čerpadlo	a	b	$\tilde{a}$
“PUMP W”	0.0070	0.3278	0.0076
“PUMP F”	0.0123	0.2215	0.0131



Obr. 2.1: Kalibračná krivka pre čerpadlo “PUMP W”; namerané údaje (červená), afinná kalibračná krivka (modrá), lineárna kalibračná krivka (zelená).

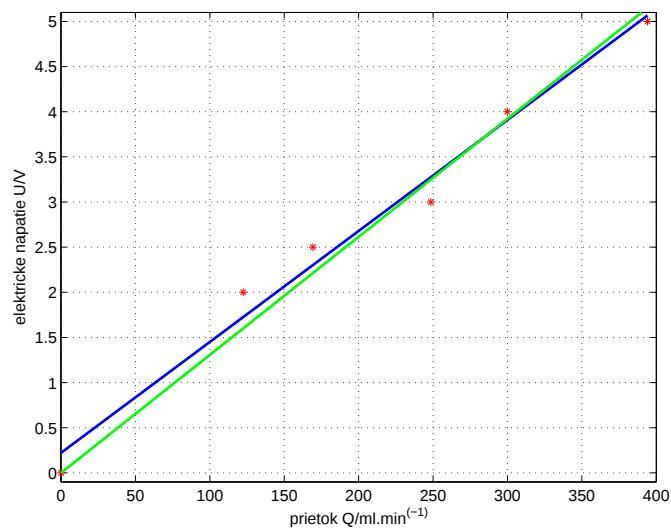
bol použitý jednoduchý P regulátor v tvare

$$G_r(s) = 0,1. \quad (2.5)$$

Žiadaná veličina bola stanovená na teplotu 60 °C. Navrhnutý P regulátor zanechával trvalú regulačnú odchýlku 2 °C, ktorá bola tolerovaná vzhľadom na použitý typ regulátora. Pozorovaním sa zistilo, že skutočná výsledná teplota na výstupe je 58 °C.

Keď bola zabezpečená konštantná teplota výhrevného média t_2 , stanovil sa rozsah teplôt vyhrievaného média na výstupe z výmenníka tepla t_4 . Menili sa hodnoty prietokov “PUMP F” a “PUMP W” v riadiacej schéme a merali sa teploty t_4 , t_2 . Namerané hodnoty sú spracované v tab. 2.2, kde “PUMP W” a “PUMP F” označujú percentuálny rozsah prietoku daným čerpadlom.

Z nameraných údajov (tab. 2.2) vyplýva, že v uvažovaných podmienkach je možné efektívne riadiť teplotu výhrevného média t_4 v rozsahu od 28 °C do 55 °C.



Obr. 2.2: Kalibračná krivka pre čerpadlo “PUMP F”; namerané údaje (červená),
afinná kalibračná krivka (modrá), lineárna kalibračná krivka (zelená).

Tabuľka 2.2: Rozsahy teplôt pre rôzne pracovné body.

“PUMP W” [%]	“PUMP F” [%]	t_2 [°C]	t_4 [°C]
100	0	59	55
50	0	59	53
0	0	56	46
100	50	58	53
50	50	58	46
0	50	57	41
100	100	55	44
50	100	52	34
0	100	58	28

2.4 Identifikácia výmenníka tepla

Cieľom identifikácie je získať matematický model výmenníka tepla, aby bolo možné navrhnúť vhodný PID regulátor. Aplikovala sa identifikácia *Strejcovou metódou* pomocou prechodových charakteristík systému [7]. Získal sa tak model v tvare prenosovej funkcie, ktorý má jeden výstup a jeden vstup, tzv. SISO systém. Na výstupe z modelu je teplota výhrevného média t_4 . Na vstupe je objemový prietok vyhrievaného média, ktorý zabezpečovalo čerpadlo “PUMP F”, alebo prietok výhrevného média zabezpečovaný čerpadlom “PUMP W”. Z fyzikálnej podstaty riadeného výmenníka tepla sa získal prenos prvého rádu v tvare 1.2 pre $n = 1$. Pri identifikácii sa postupovalo pomocou procedúry opísanej v teoretickej časti mojej práce v kapitole 1.2.1 *Identifikácia systému*.

Pomocou nameraných a upravených prechodových charakteristík bolo možné vhodne identifikovať a následne riadiť výmenník tepla Armfield Process Plant Trainer PCT23. Pri získavaní prechodových charakteristík bolo potrebné namerané hodnoty upraviť pomocou normalizácie, filtrovania prechodových charakteristík a nakoniec výpočtom upraviť do tvaru nominálnych prechodových charakteristík.

Najskôr sa identifikácia procesu Armfield Process Plant Trainer PCT23 realizovala pre zmenu prietokov čerpadla “PUMP F”, zatiaľ čo prietok cez čerpadlo “PUMP W” bol konštantný. Ďalej sa menil prietok “PUMP W” a “PUMP F” bol konštantný. Na meranie prechodových charakteristík bola upravená riadiaca schéma. Na čerpadle “PUMP W” bola nastavená konštantná hodnota prietoku výhrevného média zodpovedajúca hodnote 3,5 V a menili sa prietoky vyhrievaného média čerpadlom “PUMP F” z hodnoty 4,5 V na hodnotu 3,5 V a následne na 2,5 V (scenár 1). V druhom kroku som realizovala zmenu prietoku vyhrievaného média pre tie isté hodnoty, ale smerom nahor (scenár 2). V ďalších meraniach som nastavila prietok vyhrievaného média “PUMP F” na konštantnú hodnotu a menila som prietoky výhrevného média, teda “PUMP W”. Analogicky sa prietoky výhrevného

média menili z hodnoty 4,5 V na 3,5 V a postupne na 2,5 V (scenár 4) a pre zmenu smerom nahor (scenár 3).

V ďalšom kroku bolo potrebné normalizovať namerané údaje tak, aby začínali v nulových počiatočných podmienkach a predstavovali odozvu na jednotkovú skokovú zmenu vstupnej veličiny. Na obr. 2.3–2.6 sú graficky spracované normalizované prechodové charakteristiky pre jednotlivé uvažované scenáre 1–4 zobrazené modrou farbou. Na grafických priebehoch normalizovaných prechodových charakteristík možno pozorovať výrazný vplyv šumu merania.

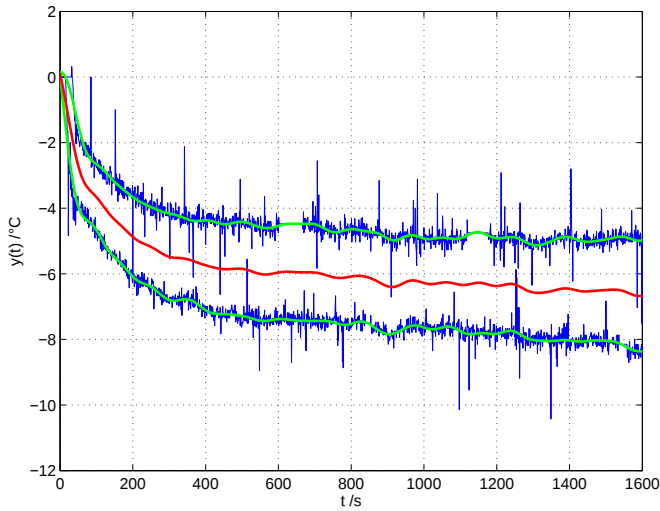
Na minimalizáciu vplyvu šumu sa použil rekurzívny dolnopriepustný *Butterworth* filter. Filtrácia sa realizovala v programovom prostredí MATLAB. Použitý filter filtroval šum z pravej strany do ľavej a späť. Výsledky filtrácie sú spracované graficky na obr. 2.3–2.6 pomocou zelených kriviek.

Z grafických priebehov normalizovaných prechodových charakteristík možno tiež pozorovať, že časový priebeh kriviek nie je rovnaký (obr. 2.3–2.6). Preto sa do úvahy zobral najmenší nameraný čas a prispôsobila sa tomu druhá charakteristika. Nominálna prechodová charakteristika sa získala ako priemerná odozva jednotlivých normalizovaných charakteristík. Nominálne prechodové charakteristiky sú graficky spracované na obr. 2.3–2.6 pomocou červených kriviek.

V pracovnom bode sa identifikovali jednotlivé nominálne charakteristiky. Na ladenie identifikácie sa použil toolbox PIDDESIGN [10]. Získali sa tak prenosy pre “PUMP W” a “PUMP F”, ktoré boli kľúčové pri návrhu PID regulátora. Celkovo sa získalo 14 prenosov pre čiastkové aj zovšeobecnené podmienky pracovného

Tabuľka 2.3: Identifikované parametre výmenníka tepla.

vstup	Z	T	D	n
“PUMP F”	-5,5595	99,4967	1,1307	1
“PUMP W”	3,7852	92,6042	3,0868	1



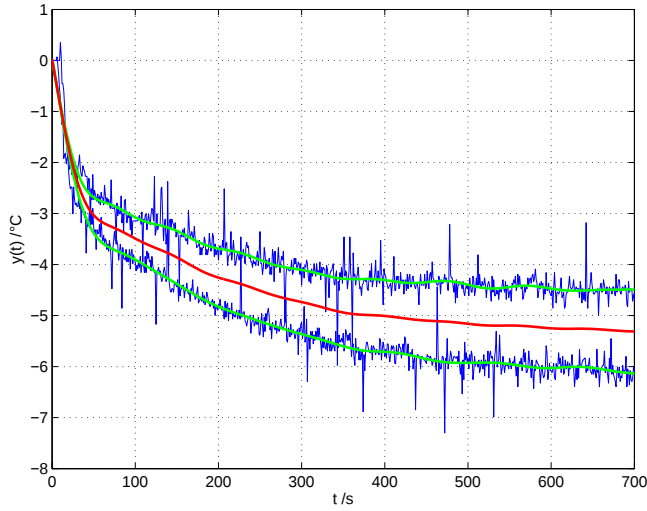
Obr. 2.3: Prechodové charakteristiky pre scenár 1: zmena prietokov “PUMP W” a konštantnej “PUMP F” z 4,5 V na 2,5 V.

bod. Výsledné parametre dvoch hlavných identifikovaných prenosov v tvare 1.2 sú uvedené v nasledujúcej tab. 2.3.

2.5 Riadenie výmenníka tepla

Hlavným cieľom mojej bakalárskej práce bolo navrhnúť vhodné riadenie pre laboratórny výmenník tepla. Následne sa vyhodnotili ukazovatele kvality riadenia, podľa ktorých sa vyhodnotil najlepší regulátor.

Riadenie výmenníka tepla Armfield Process Plant Trainer PCT23 zabezpečuje uzavretý regulačný obvod s regulátorom $G_r(s)$ (obr. 1.2), podľa ktorého bola upravená radiaca schéma. Pre zvýšenie kvality riadenia reálneho procesu je vhodné použiť regulátor, ktorý odstráni trvalú regulačnú odchýlku, resp. použiť regulátor s I zložkou. V praxi sa používa veľmi často PI regulátor. Následne sa v tejto kapitole overí vplyv na kvalitu riadenia dosiahnutého pomocou regulátora

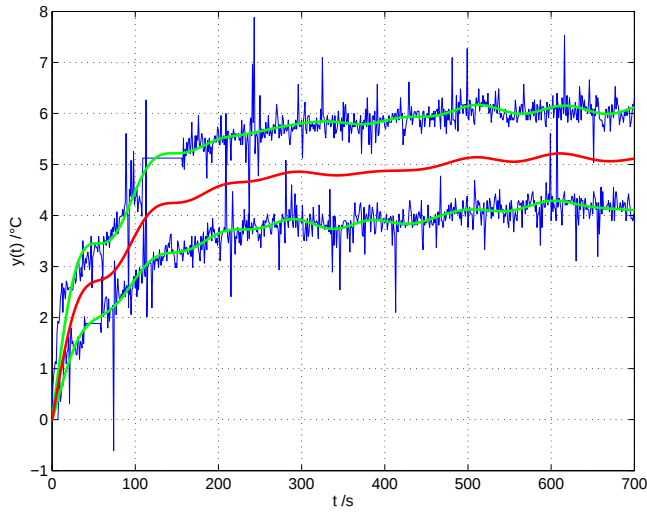


Obr. 2.4: Prechodové charakteristiky pre scenár 2: zmena prietokov “PUMP W” a konštantnej “PUMP F” z 2,5 V na 4,5 V.

s D-zložkou, teda pomocou PID regulátora.

Pri návrhu riadenia sa vychádzalo z hodnôt teploty t_4 stanovených v tab. 2.2. Analyzovalo sa 11 rôznych radiacích scenárov, ktorých parametre sú zobrazené v tab. 2.4. Jednotlivé scenáre sa vzájomne líšia akčným členom, typom regulátora, alebo pracovným bodom. Vyhodnotené boli aj výsledné hodnoty integrálneho kritéria kvality ISE (1.12), pričom diskusia o kvalite spätnoväzbového riadenia výmenníka tepla je spracovaná v kapitole 2.6 *Kvalita riadenia výmenníka tepla*.

Na počiatočné určenie parametrov PID regulátora sa použil toolbox PID-DESIGN. Navrhli sa parametre PI a PID regulátorov pre čerpadlo “PUMP W” a “PUMP F” pomocou Ziegler–Nichosovej metódy [9]. V tab. 2.5 sú vypočítané príslušné hodnoty pre regulátory PI_W , PI_F , PID_W a PID_F . Ich aplikáciou na riadenie výmenníka tepla sa však ukázalo, že tieto regulátory neboli vhodné. Nízka kvalita riadenia bola dosiahnutá hlavne kvôli nevyhnutnosti dodatočnej saturácie akčných zásahov v rozsahu od 0 V do 5 V. Preto bolo potrebné ďalšie ladenie parametrov

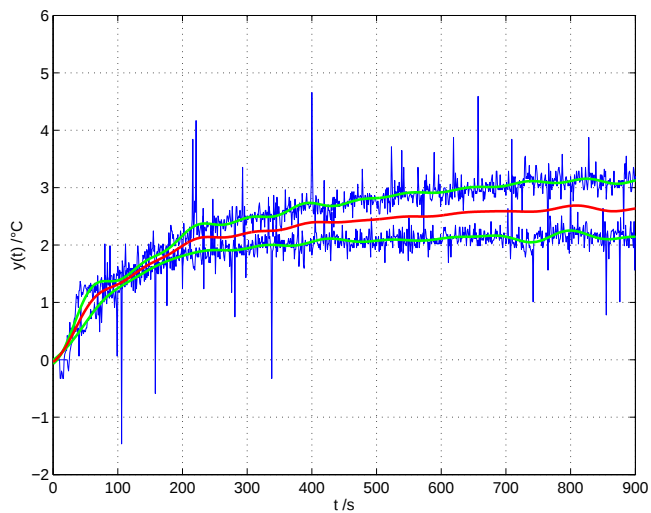


Obr. 2.5: Prechodové charakteristiky pre scenár 3: zmena prietokov “PUMP F” a konštantnej “PUMP W” z 2,5 V na 4,5 V.

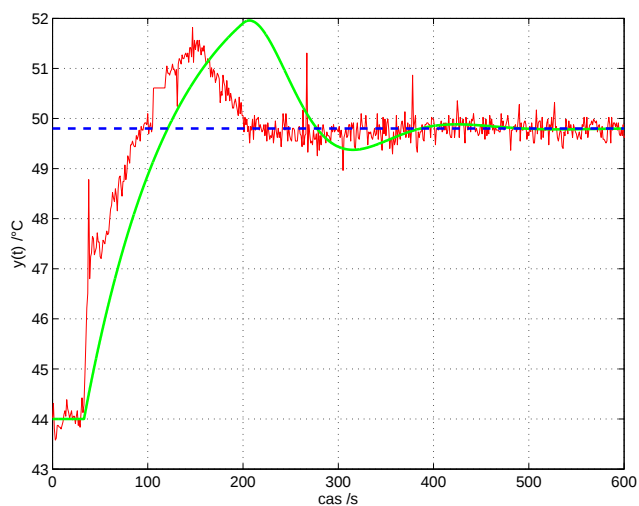
regulátorov. Získali sa tak regulátory PI_1 – PI_4 a PID_1 , PID_2 . Parametre regulátorov PI_1 a PI_3 boli ladené tak, aby sa minimalizovala hodnota kritéria *ISE* a regulátory PI_2 , PI_4 boli ladené s ohľadom na celkovú spotrebu energie. Regulátory PID_1 , PID_2 boli navrhnuté na analyzovanie vplyvu D-zložky na kvalitu riadenia.

Na obr. 2.7 je zobrazený priebeh riadenia teploty výhrevného média t_4 pomocou regulátora PI_1 pre riadiaci scenár 1. Simulačné výsledky sú zobrazené pomocou zelenej krivky a riadenie reálneho procesu predstavuje červená krivka, modrou úsečkou je znázornená žiadaná teplota výhrevného média. Z grafického priebehu je zjavné, že identifikovaný model dostatočne kvalitne opisuje reálny výmenník tepla Armfield Process Plant Trainer PCT23. Taktiež je zjavný výrazný vplyv šumu na riadenú veličinu.

Na obr. 2.8 je zobrazený priebeh akčných zásahov. Simulačné výsledky sú zobrazené pomocou fialovej krivky (pred saturáciou akčného zásahu) a zelenej krivky (po saturácii akčného zásahu). Riadenie reálneho procesu zobrazuje čierna



Obr. 2.6: Prechodové charakteristiky pre scenár 4: zmena prietokov “PUMP F” a konštantnej “PUMP W” z 4,5 V na 2,5 V.



Obr. 2.7: Pribeh riadenia teploty t_4 pomocou PI regulátora.

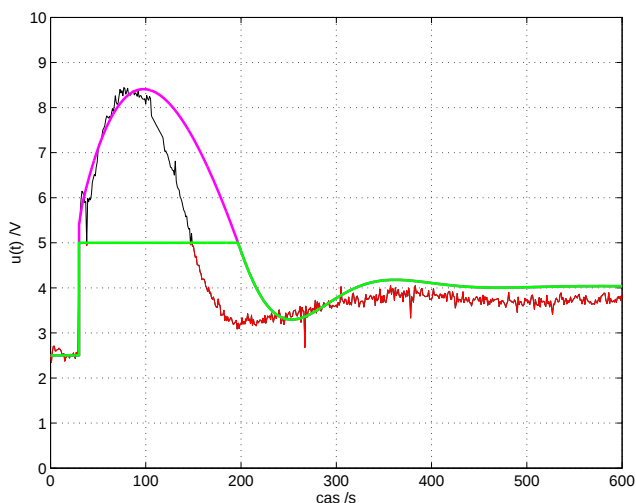
Tabuľka 2.4: Riadiace scenáre.

riadiaci scenár	akčný člen	regulátor	t_4 [°C]	ISE
1	“PUMP W”	PI ₁	44 → 50	2024
2	“PUMP W”	PI ₁	50 → 44	1270
3	“PUMP W”	PI ₂	44 → 50	1661
4	“PUMP W”	PI ₂	50 → 44	1428
5	“PUMP W”	PID ₁	44 → 48	508
6	“PUMP W”	PID ₁	49 → 43	1585
7	“PUMP F”	PI ₃	44 → 38	2439
8	“PUMP F”	PI ₃	38 → 44	2494
9	“PUMP F”	PI ₄	44 → 36	5588
10	“PUMP F”	PI ₄	36 → 45	5743
11	“PUMP F”	PID ₂	38 → 44	2210

Tabuľka 2.5: Navrhnuté PID regulátory.

regulátor	Z_R	T_I	T_D
PI _W	7, 1330	10,2796	0
PI _F	−14, 2455	3, 7651	0
PID _W	19, 6207	3, 0868	0, 5700
PID _F	−19, 0581	2, 2608	0, 4100
PI ₁	0, 5000	10, 2881	0
PI ₂	0, 5000	40, 2791	0
PI ₃	−0, 1000	37, 6510	0
PI ₄	−0, 1000	50, 6510	0
PID ₁	0, 5000	10, 2881	0, 5100
PID ₂	−0, 1000	37, 6510	0, 4100

krivka (pred saturáciou akčného zásahu) a červená krivka (po saturácii akčného zásahu).



Obr. 2.8: Akčné zásahy pre “PUMP W” navrhnuté pomocou PI regulátora.

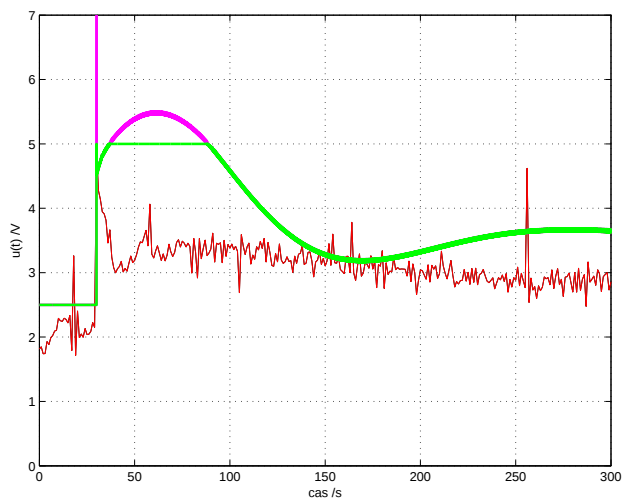
Analogický výsledky boli získané aj pre riadiaci scenár 2.

Na obr. 2.9 je grafické znázornenie priebehu riadenia teploty výhrevného média t_4 pomocou PID_1 regulátora pre riadiaci scenár 5. Simulačné výsledky sú opäť zobrazené zelenou krivkou a riadenie reálneho procesu vyjadruje červená krivka. Z grafického priebehu je zjavné, že D-zložka PID regulátora pozitívne ovplyvnila kvalitu riadenia a zrýchlila dosiahnutie žiadanej veličiny, ktorá je znázornená modrou priamkou, v porovnaní s regulátormi PI_1 a PI_2 . Na druhej strane je výraznejší vplyv šumu na riadenú veličinu.

Na obr. 2.10 je zobrazený priebeh akčných zásahov. Simulačné výsledky sú opäť zobrazené fialovou krivkou (pred saturáciou), zelenou krivkou (po saturácii) a reálny proces čiernou (pred saturáciou) a červenou (po saturácii) krivkou. Na základe grafického priebehu riadenia pomocou PID regulátora možno pozorovať vplyv D-zložky, ktorá je zjavná v rámci jej impulznej odozvy po uplynutí 30 se-

Obr. 2.9: Priebeh riadenia teploty t_4 pomocou PID regulátora.

kúnd od začiatku regulácie. Taktiež je možné pozorovať, že pri reálnom procese k takémuto prípadu nedošlo.



Obr. 2.10: Akčné zásahy pre “PUMP W” navrhnuté pomocou PID regulátora.

Kvôli obmedzenému rozsahu práce nie sú uvedené grafické priebehy pre ostatné zvažované regulátory a riadiace scenáre (tab. 2.4). Všetky výsledky možno nájsť v prílohe tejto práce.

2.6 Kvalita riadenia výmenníka tepla

Kvalitu riadenia v uzavretom regulačnom obvode možno vyhodnotiť podľa mnohých ukazovateľov. V mojej práci je kvalita riadenia vyhodnotená s ohľadom na riadené výstupy, teplotu výstupného prúdu z výmenníka tepla t_4 , pomocou integrálneho kritéria *ISE* (1.12). Nakoľko výmenníky tepla predstavujú procesy náročné na energetickú spotrebu, väčší dôraz bol kladený na vyhodnotenie kvality s ohľadom na riadiace vstupy, teda objemový prietok výhrevného média $q_w(t)$ a na celkovú energiu E_c , ktorú bolo potrebné dodať do výhrevného kotla na zabezpečenie teploty t_2 počas riadenia.

Vypočítané hodnoty integrálneho ukazovateľa kvality *ISE* pre všetky navrhnuté PID regulátory a pre všetky uvažované riadiace scenáre sú spracované v tab 2.4.

Vzhľadom na získané hodnoty *ISE* a rýchlosť regulácie teploty na výstupe z výmenníka tepla t_4 možno konštatovať, že na riadenie výmenníka tepla Armfield Process Plant Trainer PCT23 v daných podmienkach je najvýhodnejšie použiť navrhnutý PID regulátor. Kvôli obmedzenému rozsahu nie sú všetky grafické priebehy zobrazené, ale možno ich nájsť v prílohe tejto práce.

Cieľom je zvoliť si vhodný regulátor na základe analýzy dosiahnutých výsledkov tak, aby bola celková spotreba vstupných energií minimálna.

Najskôr bola vyhodnotená celková spotreba výhrevného média

$$V_c = \int_0^{t_f} q_w(t) dt \approx t_s \sum_{k=0}^{t_f/t_s} q_w(k), \quad (2.6)$$

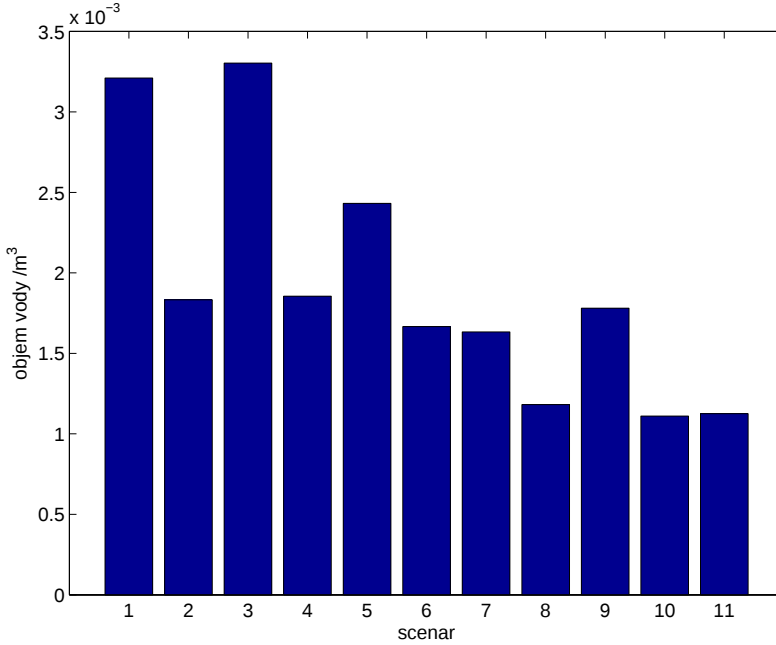
kde $t_s = 1$ s je perióda vzorkovania pri meraní na reálnom laboratórnom procese, $t_f = 370$ s je celkový čas riadenia zohľadnený pri výpočte kritérií kvality a $q_w(t)$ je

objemový prietok výhrevného média prechádzajúci cez čerpadlo “PUMP W” počas riadenia. Prepočet napätia privádzaného do čerpadla na objemový prietok bol realizovaný pomocou kalibračných kriviek (tab. 2.1, obr. 2.1, 2.2). Vypočítané hodnoty sú graficky spracované na obr. 2.11.

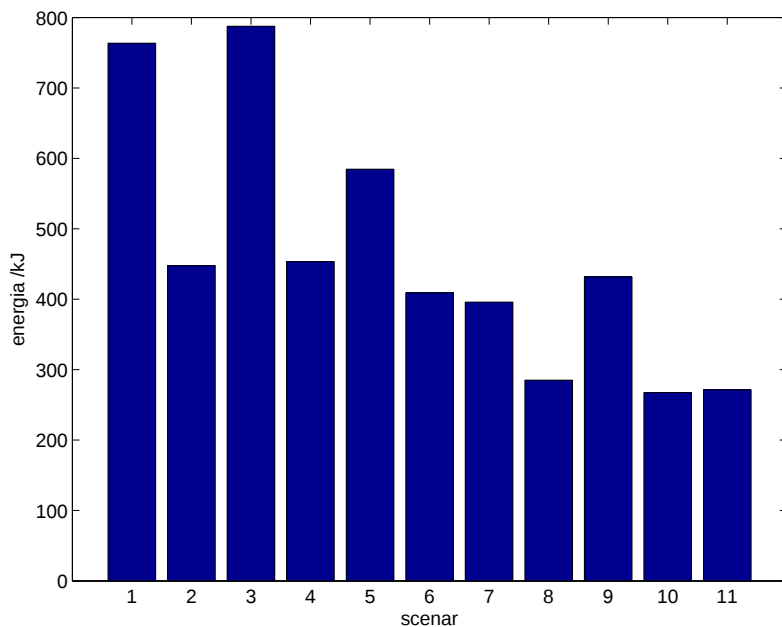
Následne bola vyhodnotená kvalita riadenia s ohľadom na celkovú spotrebu energie, ktorú bolo potrebné dodať do elektrickej výhrevnej špirály vo výhrevnom kotli pri riadení teploty v kotli t_2

$$E_c = \int_0^{t_f} \rho q_w(t) c_p t_4(t) dt \approx t_s \rho c_p \sum_{k=0}^{t_f/t_s} q_w(k) t_4(k), \quad (2.7)$$

kde $\rho = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ je hustota výhrevného média, $q_w(t)$ je prietok výhrevného média a $c_p = 4,2 \text{ kJ K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ je merná tepelná kapacita výhrevného média. Vypočítané hodnoty sú spracované na obr. 2.12.



Obr. 2.11: Spotreba výhrevného média pre jednotlivé scenáre riadenia.



Obr. 2.12: Spotreba energie na ohrev výhrevného média pre jednotlivé scenáre riadenia.

Na základe analýzy vypočítaných hodnôt ukazovateľov kvality spätnoväzbového riadenia (obr. 2.11, 2.12) možno konštatovať, že v daných podmienkach je najvhodnejšie použiť na riadenie výmenníka tepla Armfield Process Plant Trainer PCT23 navrhnutý PID regulátor.

Záver

Cieľom mojej bakalárskej práce bolo identifikovať a navrhnúť riadenie pre laboratórny výmenník tepla Armfield Process Plant Trainer PCT23.

V teoretickej časti mojej práce som stručne spracovala problematiku modelovania a riadenia výmenníkov tepla.

Následne som v experimentálnej časti prakticky spracovala problematiku identifikácie a návrhu riadenia pre laboratórny výmenník tepla.

Najskôr som vykonala kalibráciu akčných členov, teda čerpadiel riadiacich prietok výhrevného a vyhrievaného média.

Experimentálne som stanovila pracovné podmienky pre riadenie výmenníka tepla, ktoré som získala meraním výstupných teplôt v závislosti od rôznych prietokov čerpadiel.

Namerané charakteristiky výmenníka tepla som upravila na tvar vhodný na identifikáciu. Pomocou metódy identifikácie založenej na prechodových charakteristikách som vypočítala viaceré matematické modely výmenníka tepla s ohľadom na rôzne pracovné podmienky a vzhľadom na obidve čerpadlá.

Následne som pre vypočítané modely navrhla PID regulátory. V rámci mojej práce som použila 3 typy regulátorov, a to P, PI a PID regulátor. Jeden P regulátor som použila na udržanie konštantnej teploty výhrevného média v kotli. Štyri rôzne PI regulátory a dva rôzne PID regulátory som navrhla na riadenie teploty výhrevného média na výstupe z výmenníka tepla. Kvalita riadenia bola vyhodno-

tená pomocou simulácie regulácie, aj riadením na reálnom laboratórnom procese Armfield Process Plant Trainer PCT23. Validácia simulačných výsledkov pomocou výsledkov nameraných na reálnom procese potvrdila, že matematický model bol identifikovaný s dostatočnou presnosťou. Kvalita riadenia bola vyhodnotená s ohľadom na riadené výstupy aj akčné zásahy pomocou integrálneho ukazovateľa kvality, pomocou celkovej spotreby výhrevného média a celkovej spotreby energie. Na základe analýzy získaných výsledkov odporúčam použiť na riadenie laboratórneho výmenníka tepla navrhnutý PID regulátor, nakoľko dosiahol vysokú presnosť riadenia a nízku spotrebu energie.

V programovom prostredí MATLAB/Simulink som vytvorila vlastné simulačné schémy, funkcie a iné podporné súbory, ktoré umožňujú vykonať efektívnu kalibráciu akčných členov, identifikáciu pomocou prechodových charakteristík, aplikovať spätnoväzbové riadenie a vyhodnotiť kvalitu regulácie. Vytvorené súbory sú dostupné na CD v prílohe, aj v e-learningovom systéme Moodle v module *Laboratórium procesov*, kde som vytvorila podpornú stránku v anglickom jazyku: <http://www.kirp.chtf.stuba.sk/moodle/mod/page/view.php?id=27979> na prácu s laboratórnym procesom Armfield Process Plant Trainer PCT23.

Do budúcnosti sa plánuje implementovanie viacerých pokročilých prístupov optimálneho spätnoväzbového riadenia, akými sú LQR riadenie, prediktívne riadenie založené na modele a robustné prediktívne riadenie.

Literatúra

- [1] ARMFIELD. *PCT 23Process Plnat Trainer*. manuál, 2007.
- [2] BAKOŠOVÁ, M. – FIKAR, M. *Riadenie procesov*. Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2012.
- [3] BOYD, S. – VANDENBERHE, L. *Convex Optimization*. Cambridge University Press, 2004.
- [4] DOJČANSKÉHOŠ, J. – LONGAUERA, J. *Chemické Inžinierstvo 1*. Malé centrum, 1999.
- [5] FIKAR, M. – MIKLEŠ, J. *Identifikácia systémov*. Slovenská technická univerzita v Bratislave, 1999.
- [6] LOWES, *How Insulation Prevents Heat Transfer*. [online], [cit.2015.04.21.] Dostupné na internete: <http://www.lowes.com/cd_Understand+Heat+Transfer+and+Insulation_974680410_>.
- [7] MIKLEŠ, J. – FIKAR, M. *Modelovanie, identifikácia a riadenie procesov I*. Slovenská technická univerzita v Bratislave, 1999.
- [8] MIKLEŠ, J. – FIKAR, M. *Modelovanie, identifikácia a riadenie procesov II*. Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2013.
- [9] O'DWYER, A. *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*. Imperial College Press, 2009.

- [10] ORAVEC, J. – BAKOŠOVÁ, M. *PIDDESIGN - Software for PID Control Education*. V *IFAC Conference on Advances in PID Control*, Brescia, Italy, 2012.
- [11] REGULUS-TECHNIK, s r.o. *Výmenníky tepla*. [online], [cit.2015.04.21.] Dostupné na internete: <<http://www.regulus.sk/sk/vymenniky-tepla>>.
- [12] WOODFORD, C. *Heat Exchangers*. [online] 2014. [cit.2015.05.12.] Dostupné na internete: <<http://www.explainthatstuff.com>>.

Prílohy

K mojej bakalárskej práci prikladám CD s podpornými súbormi, ktoré som vytvorila v programovom prostredí MATLAB/Simulink. Vytvorené súbory umožňujú efektívne pracovať s laboratórnym procesom Armfield Process Plant Trainer PCT23, namerať potrebné údaje pre identifikáciu procesu, implementovať spätnoväzbové riadenie a vyhodnotiť výslednú kvalitu riadenia. V prílohe sú tiež všetky namerané výsledky a je možné vygenerovať si grafické priebehy, ktoré kvôli obmedzenému rozsahu neboli uvedené v tejto práci. Príloha obsahuje štyri adresáre. V adresári `d1_calibration` sa nachádzajú súbory, pomocou ktorých je možné vypočítať kalibračné krivky pre akčné členy výmenníka tepla. V adresári `d2_identification` sa nachádzajú namerané prechodové charakteristiky, ktoré možno hromadne spracovať pomocou súboru `identification.m`. V adresári `d3_control` sa nachádzajú namerané priebehy riadenia a vyhodnotenie kvality, ktoré možno hromadne spracovať pomocou súboru `init_control.m`. V adresári `d4_simulation_schemes` sa nachádzajú schémy vytvorené v prostredí MATLAB/Simulink. Pre ich správne fungovanie je potrebné byť pripojený k zariadeniu Armfield Process Plant Trainer PCT23. Vytvorené podporné súbory sú dostupné aj v e-learningovom systéme Moodle v module *Laboratórium procesov*, kde som vytvorila podpornú stránku v anglickom jazyku: <http://www.kirp.chtf.stuba.sk/moodle/mod/page/view.php?id=27979> na prácu s laboratórnym procesom Armfield Process Plant Trainer PCT23.