



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Identifikace a řízení tepelného výměníku

Bakalářská práce

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy
Autor práce: **Daniel Boš**
Vedoucí práce: Ing. Lukáš Hubka, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Daniel Boš**
Osobní číslo: **M13000030**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronické informační a řídicí systémy**
Název tématu: **Identifikace a řízení tepelného výměníku**
Zadávací katedra: **Ústav mechatroniky a technické informatiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Sestavte matematický popis k reálnému laboratornímu modelu tepelného výměníku. Využijte takový matematický aparát, aby byl zachycen děj šíření tepla v trubce ve směru proudění.
2. Parametrizujte matematický model pomocí měření. Identifikujte případné neměřitelné parametry. Verifikujte matematický model pomocí simulací.
3. Navrhněte řízení teploty vzduchu ve zvoleném bodě tepelného výměníku.

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: cca 30–40 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

- [1] ZIMA, W. Mathematical model of transient processes in steam superheaters. *Forschung im Ingenieurwesen* [online]. 2003-7-1, 68(1): 51-59 [cit. 2015-10-06]. DOI: 10.1007/s10010-003-0106-7. ISSN 0015-7899. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10010-003-0106-7>
- [2] JOHN H. LIENHARD, John H.IV and John H. A heat transfer textbook. 3rd ed. Cambridge, Mass: Phlogiston Press, 2008. ISBN 09-713-8353-7.
- [3] BIRD, R, Warren E STEWART a Edwin N LIGHTFOOT. Přenosové jevy: sdílení hybnosti, energie a hmoty. 1. vyd. Praha: Academia, 1968, 799 s.
- [4] MODRLÁK, Osvald a Lukáš HUBKA. Automatické řízení: učební text. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012, 292 s. ISBN 978-80-7372-850-2.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Lukáš Hubka, Ph.D.
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání bakalářské práce: 10. října 2015
Termín odevzdání bakalářské práce: 16. května 2016


prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.
děkan




doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 10. října 2015

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum: 16. 5. 2016

Podpis: Daniel Bös

Abstrakt

Tato práce se zabývá identifikací a řízením fyzikálního modelu trubkového výměníku umístěného v laboratoři automatického řízení na FM TUL. V práci je sestaven zjednodušený matematický popis systému, který je dále simulován a porovnán s naměřenými daty na reálném systému. Řízení bylo navrženo a realizováno pomocí PI a PID regulátoru v prostředí MATLAB Simulink.

Klíčová slova

Identifikace, tepelný výměník, laboratorní úloha, regulace, automatické řízení, matematický model, simulace

Abstract

This work deals with system identification and control of a physical model of tube heat exchanger placed in a laboratory of automatic control at FM TUL. Mathematic simplified model of the heat exchanger is assembled in the work. The model is simulated and compared with measured data. Control of the process was designed and implemented as PI and PID control at MATLAB Simulink.

Key words

System identification, heat exchanger, lab station, automatic control, regulation, mathematical model, simulation

Poděkování

Rád bych poděkoval mému vedoucímu práce panu Ing. Lukáši Hubkovi, PhD za jeho cenné rady a podporu při tvorbě této práce. Také bych chtěl poděkovat své rodině za podporu v průběhu celého studia.

Obsah

Úvod.....	9
1 Seznámení s laboratorní úlohou.....	10
1.1 Popis úlohy.....	10
1.2 Konstrukční nedostatky.....	11
1.3 Statická charakteristika	12
1.4 Volba pracovního bodu	14
1.5 Model z experimentální identifikace.....	15
2 Matematický model výměníku	21
2.1 Sestavení matematického modelu	21
3 Simulace matematického modelu	25
3.1 Simulace v Simulinku	25
3.2 Kalibrace senzorů.....	27
3.3 Parametrizace modelu	28
3.4 Verifikace modelu.....	32
4 Návrh řízení	33
4.1 PI regulace.....	34
4.2 PI regulace – kompenzace měřené poruchy	38
4.3 Numerická optimalizace parametrů regulátoru	40
4.4 PID – regulace poruchy.....	41
5 Závěr	44
Seznam použité literatury.....	45
Příloha A: Přiložené CD.....	46

Seznam obrázků

Obrázek 1: Umístění senzorů teploty v trubce	10
Obrázek 2: Drift od procházejícího proudu	11
Obrázek 3: Statická charakteristika pro senzor č. 4	12
Obrázek 4: Statická charakteristika pro $U_Z = \text{konst.}$	13
Obrázek 5: Umístění pracovního bodu na statické charakteristice	14
Obrázek 6: Struktura identifikovaného modelu	15
Obrázek 7: Identifikační data pro určení F_Z	16
Obrázek 8: Identifikační data pro určení F_V	17
Obrázek 9: Porovnání topení a chlazení	18
Obrázek 10: Shoda F_Z s naměřenými daty pro senzor č. 4	19
Obrázek 11: Shoda F_V s naměřenými daty pro senzor č. 4	20
Obrázek 12: Zjednodušené schéma tepelného výměníku	21
Obrázek 13: Energetická bilance elementu média uvnitř trubky	22
Obrázek 14: Energetická bilance elementu stěny trubky	23
Obrázek 15: Rozdělení trubky na n částí	25
Obrázek 16: Simulační schéma	26
Obrázek 17: Převodní charakteristika senzoru č. 4	28
Obrázek 18: Shoda modelu a měřených dat	31
Obrázek 19: Shoda modelu a měřených dat	32
Obrázek 20: Schéma zapojení modelu do regulačního obvodu	34
Obrázek 21: PI regulace na modelu – sledování žádané hodnoty	35
Obrázek 22: PI regulace na modelu – odezva na poruchu	36
Obrázek 23: PI regulace – sledování žádané hodnoty	37
Obrázek 24: PI regulace – odezva na poruchu	37
Obrázek 25: Schéma PI regulátoru s měřenou poruchou	38
Obrázek 26: PI regulace – kompenzace měřené poruchy	39
Obrázek 27: PI regulace – kompenzace měřené poruchy	40
Obrázek 28: Porovnání optimalizovaného PID regulátoru s PI regulátorem	42
Obrázek 29: PID regulace – odezva na poruchu	43

Seznam tabulek

Tabulka 1: Skoky na vstupech k určení $F_{\dot{z}}$	15
Tabulka 2: Skoky na vstupech k určení $F_{\dot{v}}$	16
Tabulka 3: Přenosy $F_{\dot{z}}$	18
Tabulka 4: Přenos $F_{\dot{v}}$	19
Tabulka 5: Vztahy aproximující převodní charakteristiku	28
Tabulka 6: Parametry trubky	30
Tabulka 7: Fyzikální parametry	30
Tabulka 8: Vstupy do systému.....	30
Tabulka 9: Změny řídicího napětí ventilátoru a žárovek při měření dat	30
Tabulka 10: Změny vstupního tepla při porovnání s naměřenými daty	31
Tabulka 11: Změny řídicího napětí ventilátoru a žárovek na verifikačních datech	32
Tabulka 12: Změny vstupního tepla v modelu při porovnání s verifikačními daty	32

Seznam zkratk

FIR	– filtr s konečnou impulzní odezvou
FM	– fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií
NTC	– termistor s negativním teplotním koeficientem
MIMO	– systém s více vstupy a více výstupy
PWM	– pulzně šířková modulace
PTC	– termistor s pozitivním teplotním koeficientem
PI	– proporcionálně integrační regulátor
PID	– proporcionálně integračně derivační regulátor
PMMA	– polymethylmethakrylát
SISO	– systém s jedním vstupem a jedním výstupem
TUL	– Technická Univerzita v Liberci

Úvod

Bakalářská práce se zabývá identifikací a řízením fyzikálního modelu tepelného výměníku. Ten vznikl v rámci jiné bakalářské práce jako výuková laboratorní úloha pro laboratoř automatického řízení na FM TUL. Práce navazuje na bakalářský projekt, ve kterém jsem provedl experimentální identifikaci úlohy. Jako další rozšíření se nabízelo nalezení matematického popisu úlohy na základě matematicko-fyzikální analýzy.

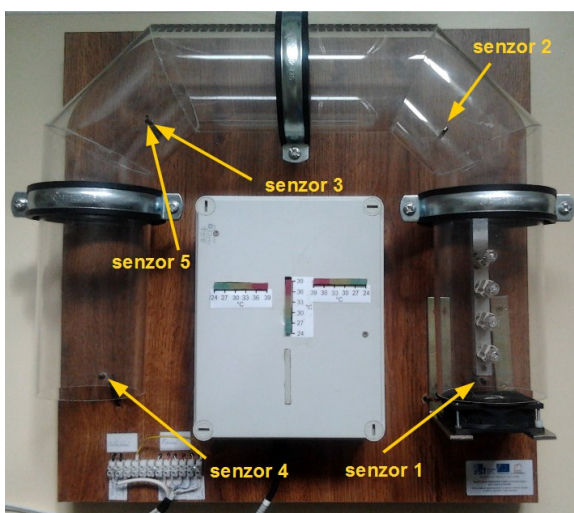
V práci si kladu za cíl sestavit základní matematický popis identifikované soustavy, tak aby byl zachycen přenos tepla v podélném směru trubky. Také se zabývám simulací matematického popisu v prostředí MATLAB Simulink a určením obtížně měřitelných parametrů. Dále pak porovnávám výsledky simulace s daty naměřenými na reálném systému. V poslední kapitole popisují návrh a realizaci PI a PID regulace, kde se také zabývám regulací s měřením poruchy. V úvodní kapitole práce prezentuji výsledky experimentální identifikace, na které v práci navazuji. Jedná se o statickou charakteristiku, zvolený pracovní bod a identifikované obrazové přenosy systému.

1 Seznámení s laboratorní úlohou

1.1 Popis úlohy

Laboratorní model tepelného výměníku se skládá ze zahnuté plexisklové trubky připevněné ke dřevotřískové desce. Trubka je zahnuta do písmene „U“ tak, aby se na desku vešla. Na vstupu do trubky je umístěn ventilátor vhánějící okolní vzduch, který zde plní úlohu média přenášejícího teplo. Za ventilátorem jsou umístěny čtyři halogenové žárovky, od kterých se médium zahřívá. Podél trubky jsou v různých vzdálenostech od vstupu umístěny senzory teploty, díky nimž lze sledovat teplotu v různých místech trubky. Uprostřed úlohy je umístěna elektroinstalační krabice obsahující elektroniku ovládající otáčky ventilátoru a výkon žárovek. Je zde také elektronika upravující signál z teplotních senzorů.

Autor laboratorní úlohy ve své práci [8] popisuje měřicí a řídicí elektroniku úlohy. Ovládání otáček ventilátoru je realizováno pomocí tranzistoru v lineárním režimu. Výkon žárovek je ovládán pomocí PWM. Je tak možno nastavovat jejich výkon od 0 do 100 %. Otáčky ventilátoru i výkon žárovek se nastavují pomocí řídicích signálů v rozmezí 0 – 5 V. Jako senzory teploty byly použity čtyři PTC senzory KTY 81-120. V jednom místě se nachází ještě nelineární NTC senzor NTCM-HP-22K. Měřicí elektronika je tvořena měřicím můstkem a zesilovačem upravujícím signál na rozsah 0 – 10 V. Úloha je koncipována tak, aby ji bylo možné ovládat a zpracovávat z prostředí MATLAB Simulink za pomoci reálných bloků a měřicí karty Advantech PCI-1711. Dále v práci dodržuji očíslování senzorů podle obrázku 1.

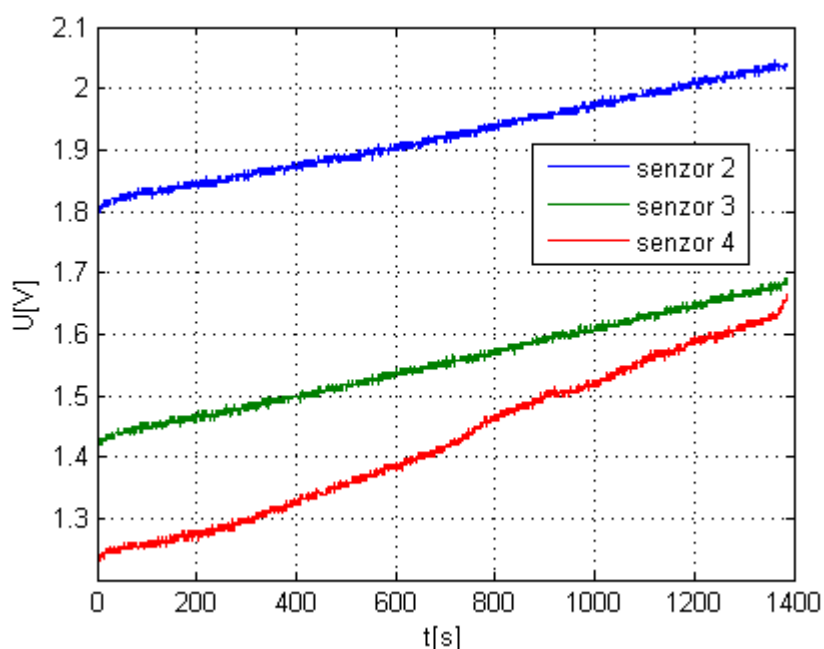


Obrázek 1: Umístění senzorů teploty v trubce

1.2 Konstrukční nedostatky

V průběhu práce s laboratorní úlohou jsem narazil na několik konstrukčních nedostatků systému. Jedním z nich je, že po zapnutí napájení systému se měřené napětí na senzorech zvyšuje i přes to, že žárovky jsou zhasnuté a teplota v trubce se nezvyšuje. Tento děj je způsoben pravděpodobně zahříváním senzorů vlivem procházejícího proudu. V práci s úlohou nás tento fakt výrazněji neomezuje, protože lze předpokládat, že po určité době se oteplení senzorů od procházejícího proudu ustálí a napětí už dál neporoste.

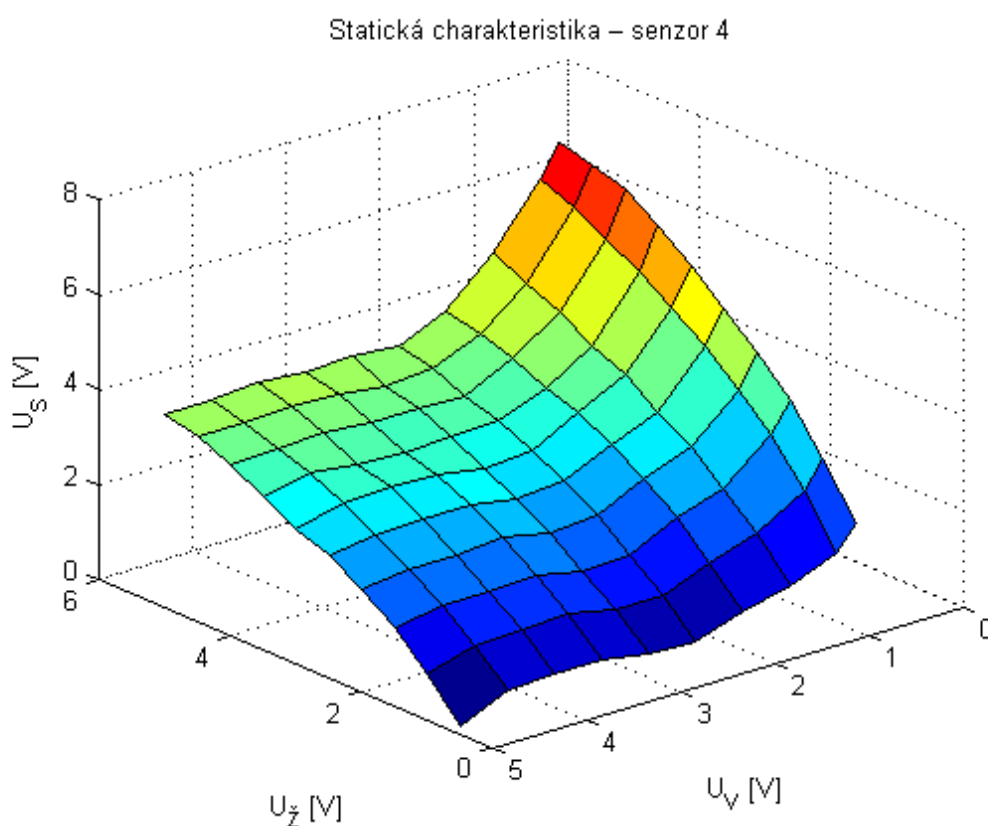
Dalším konstrukčním nedostatkem je oteplování výměníku v důsledku zahřívání elektroinstalační krabice. Po delší době provozu systému se krabice zahřeje od některých prvků elektroniky uvnitř. Nedostatek je nepříjemný zejména proto, že je obtížnější celý systém vychladit. Při vypnutých žárovkách a běžícím ventilátoru, je teplo z trubky vyfukováno ven do okolí. Krabice s elektroinstalací je pak významným zdrojem tepla, který nám brání vychladit celý systém na teplotu okolí. Nedostatek by bylo možné částečně odstranit přidáním ventilátoru do krabice, který by zajišťoval odvod tepla do okolí. Bylo by vhodné, aby ventilátor nesměřoval na samotnou trubku. Významnějším nedostatkem je také to, že trubka je v některých místech špatně slepená, a tak je možné, že tudy uniká médium do okolí. Otvory by bylo vhodné „ucpat“ například tmelem.



Obrázek 2: Drift od procházejícího proudu

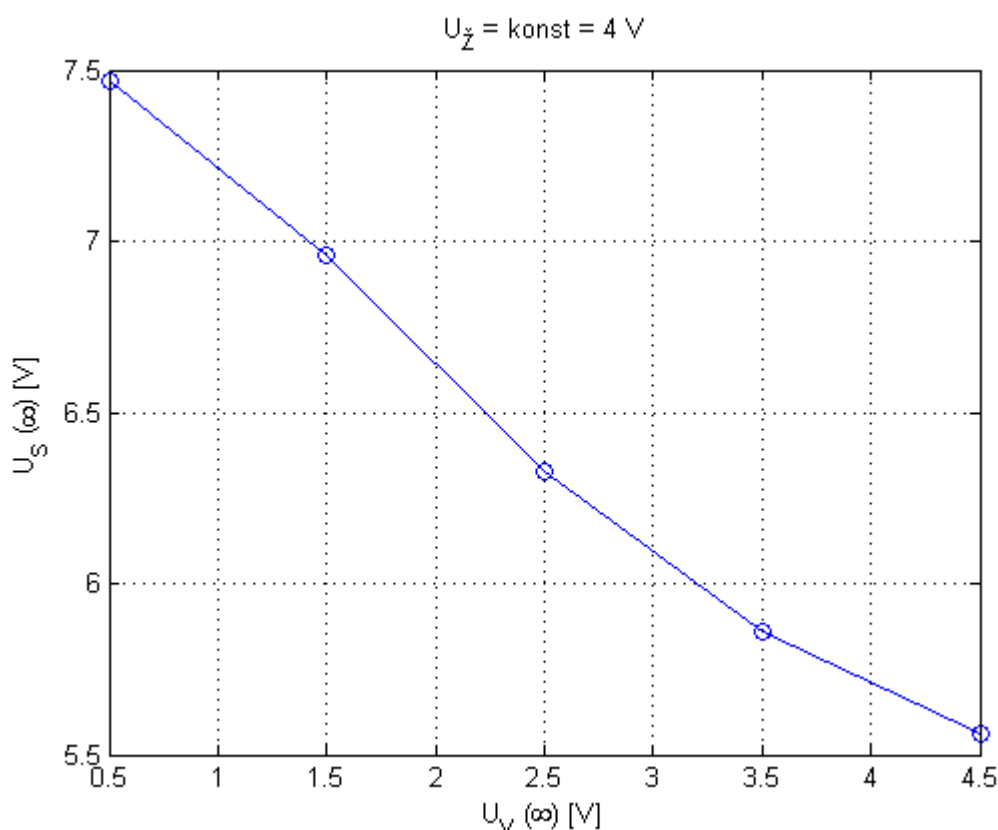
1.3 Statická charakteristika

V rámci bakalářského projektu, na který tato práce navazuje, jsem provedl měření statických vlastností systému. Zjištěna byla statická charakteristika, která posloužila k volbě pracovního bodu pro řízení, jímž se zabývám dále v této práci. Měření proběhlo tak, že jsem na ventilátoru nastavil konstantní otáčky a na žárovkách jsem prováděl skoky od 0,5 do 5 V po půl voltu. Další skok jsem realizoval vždy poté, co se výstup ustálil. Výstup systému vykazuje značný drift, proto byl skok realizován vždy o něco dříve, než se systém úplně ustálil. Celé měření jsem opakoval pro otáčky ventilátoru od 0,8 do 5 V. Mezi jednotlivými měřeními bylo potřeba systém vychladit. Vychlazení proběhlo tak, že jsem nastavil na ventilátoru maximální otáčky a počkal, než se systém dostal přibližně do stavu, ve kterém byl před zahájením měření. Výslednou statickou charakteristiku jsem obdržel tím, že jsem vykreslil závislost výstupního napětí U_S od senzorů na řídicím napětí ventilátoru U_V a žárovek U_Z . Pro každý senzor jsem získal jednu charakteristiku. Pro ilustraci uvádím statickou charakteristiku příslušnou k senzoru č. 4.



Obrázek 3: Statická charakteristika pro senzor č. 4

Z charakteristiky je zřejmé, že pro nižší otáčky se systém více zahřál, protože méně tepla bylo vyfukováno do okolí. Lze si také všimnout, že pro vyšší otáčky ventilátoru měla změna otáček pouze malý vliv na ustálené hodnoty výstupu. Při nižších otáčkách je změna otáček nezanedbatelná. Abych získal větší představu o vlivu otáček ventilátoru na ustálenou hodnotu napětí na senzorech, změřil jsem závislost ustálených hodnot napětí na senzorech na ustálených otáčkách při konstantním výkonu na žárovkách. Při měření jsem otáčky snižoval, protože jejich zvyšování nemá na napětí U_S takový vliv.



Obrázek 4: Statická charakteristika pro $U_Z = \text{konst}$.

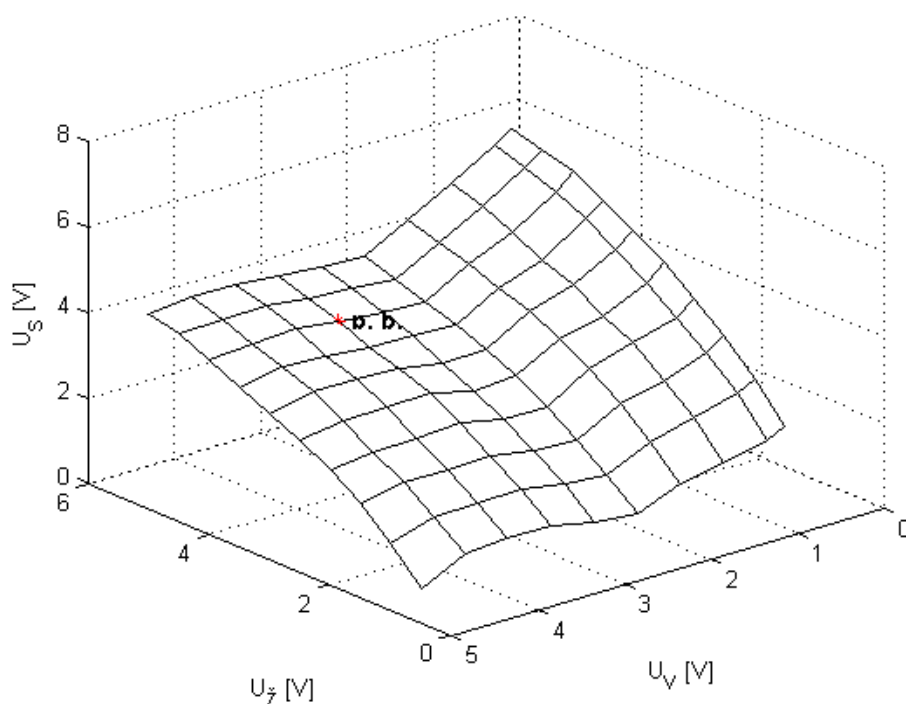
Z průběhu je zřejmé, že statické zesílení mezi U_V a U_S se výrazně mění. Z tohoto důvodu není použití ventilátoru jako vstupu do systému příliš vhodné a při návrhu řízení ho budu uvažovat pouze jako poruchu.

Statická charakteristika je závislá na teplotě místnosti, ve které byla měřena. Při vyšších teplotách v místnosti, se teplota uvnitř trubky ustaluje na vyšších hodnotách. Z tohoto důvodu je závislost na obrázku 4 posunuta do vyšších hodnot, než v jakých je úplná statická charakteristika.

1.4 Volba pracovního bodu

Ze statické charakteristiky je zřejmé, že systém je značně nelineární. Vzhledem k tomu, že v práci se zabývám sestavením lineárního modelu a návrhem řízení podle lineární teorie, je vhodné určit pracovní bod ležící v co nejlineárnější části statické charakteristiky. Lze předpokládat, že chování systému se bude nejvíce blížit lineárnímu systému právě okolo určeného bodu. Matematický model bude srovnáván s reálným systémem v pracovním bodě. Rovněž řízení bude navrženo pro pracovní bod. Obrázek 5 zobrazuje umístění zvoleného pracovního bodu.

$$B_p = [U_{V0} \ U_{\dot{z}0} \ U_{S0}] = [3,5 \ 4 \ 4,1] \quad (1.1)$$

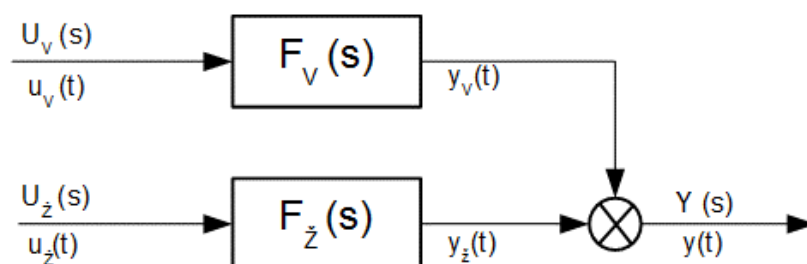


Obrázek 5: Umístění pracovního bodu na statické charakteristice

Z důvodu závislosti statické charakteristiky na teplotě okolí je pracovní bod určen pouze orientačně. Při vyšší teplotě okolí se hodnoty napětí na senzorech ustálí na vyšších hodnotách. Napětí U_{S0} příslušné k U_{V0} a $U_{\dot{z}0}$ má pak jinou hodnotu.

1.5 Model z experimentální identifikace

V rámci bakalářského projektu jsem provedl experimentální identifikaci. Tu jsem provedl na základě porovnání modelu zvolené struktury s naměřenými daty. Zvolil jsem strukturu zobrazenou na obrázku 6.



Obrázek 6: Struktura identifikovaného modelu

Přenos F_V i F_Z jsem aproximoval přenosem prvního a druhého řádu, kde K je statické zesílení a T , T_1 , T_2 jsou časové konstanty. První řád jsem použil tam, kde jsem obdržel jednu z časových menší, než byla vzorkovací perioda.

$$F(s) = \frac{K}{Ts + 1} \quad (1.2)$$

$$F(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} = \frac{K}{a_1s^2 + a_2s + 1}, \quad (1.3)$$

Identifikační data pro určení přenosu F_Z jsem změřil tak, že jsem nastavil konstantní otáčky na ventilátoru a v okolí pracovního bodu prováděl skoky na žárovkách.

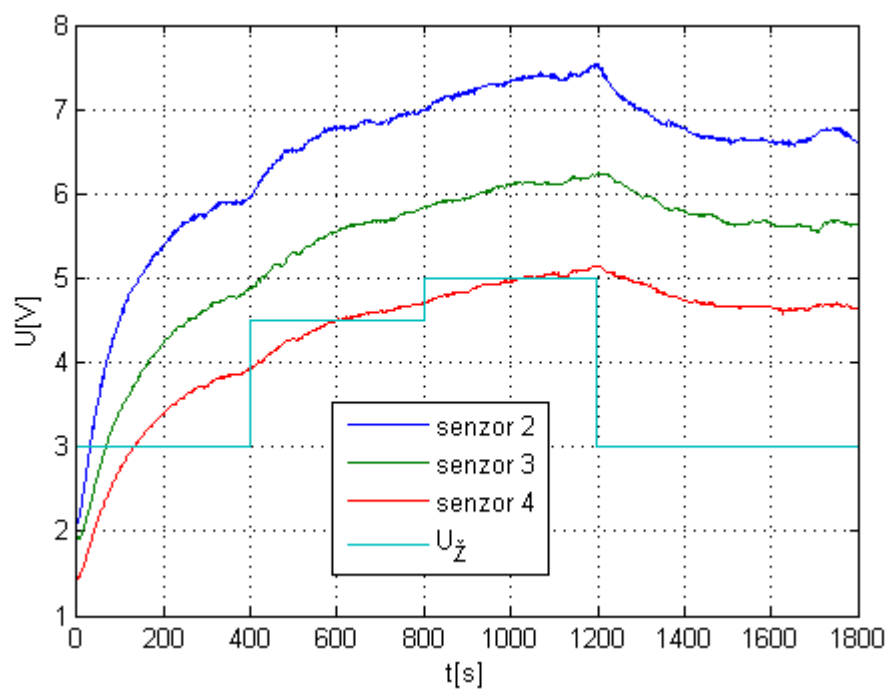
Tabulka 1: Skoky na vstupech k určení F_Z

	1. skok	2. skok	3. skok	4. skok
$U_V[\text{V}]$	3,5			
$U_Z[\text{V}]$	3	4,5	5	3

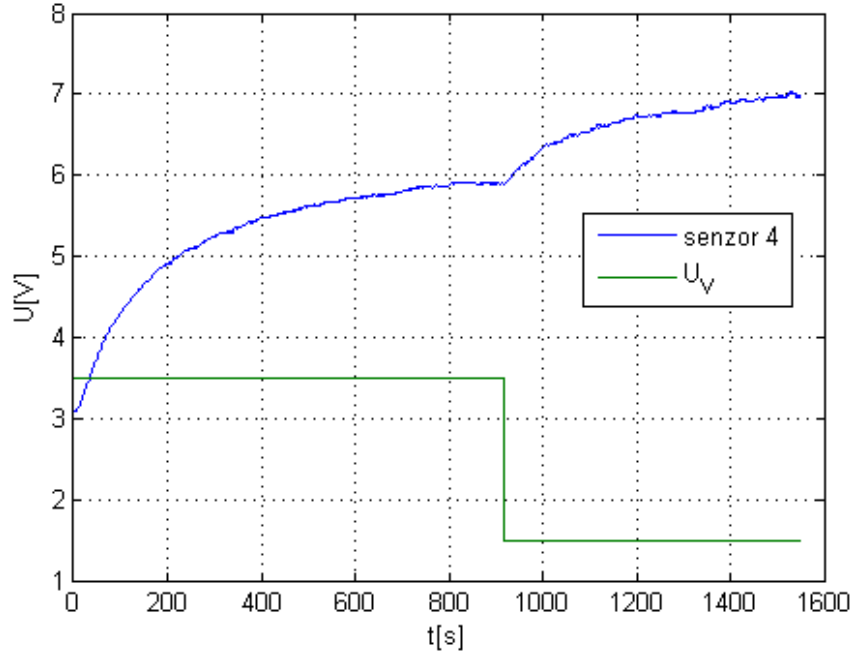
Naopak při měření identifikačních dat pro určení F_V jsem nastavil konstantní výkon žárovek a prováděl skoky na ventilátoru. Otáčky ventilátoru jsem snižoval, protože při jejich zvýšení není dynamický děj tolik patrný.

Tabulka 2: Skoky na vstupech k určení F_V

	1. skok	2. skok
$U_V[V]$	3,5	1.5
$U_Z[V]$	4	



Obrázek 7: Identifikační data pro určení F_Z



Obrázek 8: Identifikační data pro určení F_v

Prvním skokem se systém dostává do pracovního bodu, proto pro identifikaci uvažuji data až po prvním skoku. Aby bylo možné porovnat model s naměřenými daty, je potřeba přenést naměřená data do pracovního bodu. V identifikaci pracuji s přírůstky Δu a Δy .

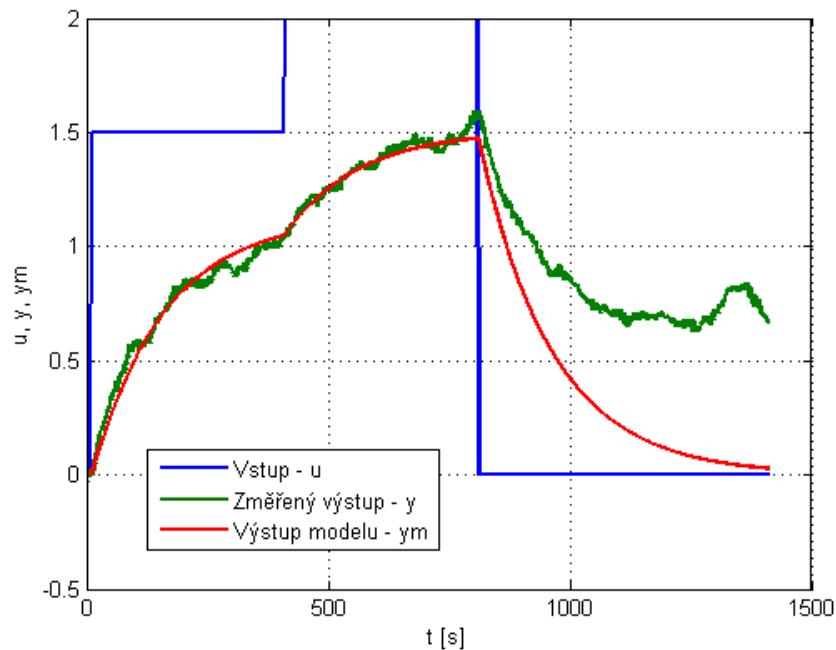
$$\Delta u(i) = u_i - u_0 \quad (1.4)$$

$$\Delta y(i) = y_i - y_0 \quad (1.5)$$

Identifikaci jsem provedl podle [4], porovnáváním zvoleného modelu s naměřenými identifikačními daty. Shodu výstupů modelu a reálného systému určovalo kritérium J .

$$J = J(X) = \int_0^T [y(t) - y_M(t, X)]^2 dt, \quad (1.6)$$

kde $y(t)$ je výstup z reálné soustavy, y_M je výstup z modelu a X je vektor parametrů modelu, hledaný při identifikaci. T je celkový čas naměřených dat. Při identifikaci byl hledán takový vektor X , představující parametry modelu, aby hodnota kritéria byla co nejmenší. Realizace proběhla v prostředí MATLAB, kde k nalezení minima lze použít funkci *fminsearch*.



Obrázek 9: Porovnání topení a chlazení

Z obrázku 9 je zřejmé, že při provedení skoku z vyšší hodnoty na nižší se výstup reálného systému ustaluje na vyšší hodnotě, než model. Určil jsem tedy jeden přenos pro proces topení (systém je zahříván) a chlazení (systém samovolně chladne). Také jsem určil přenosy pro každý senzor zvlášť.

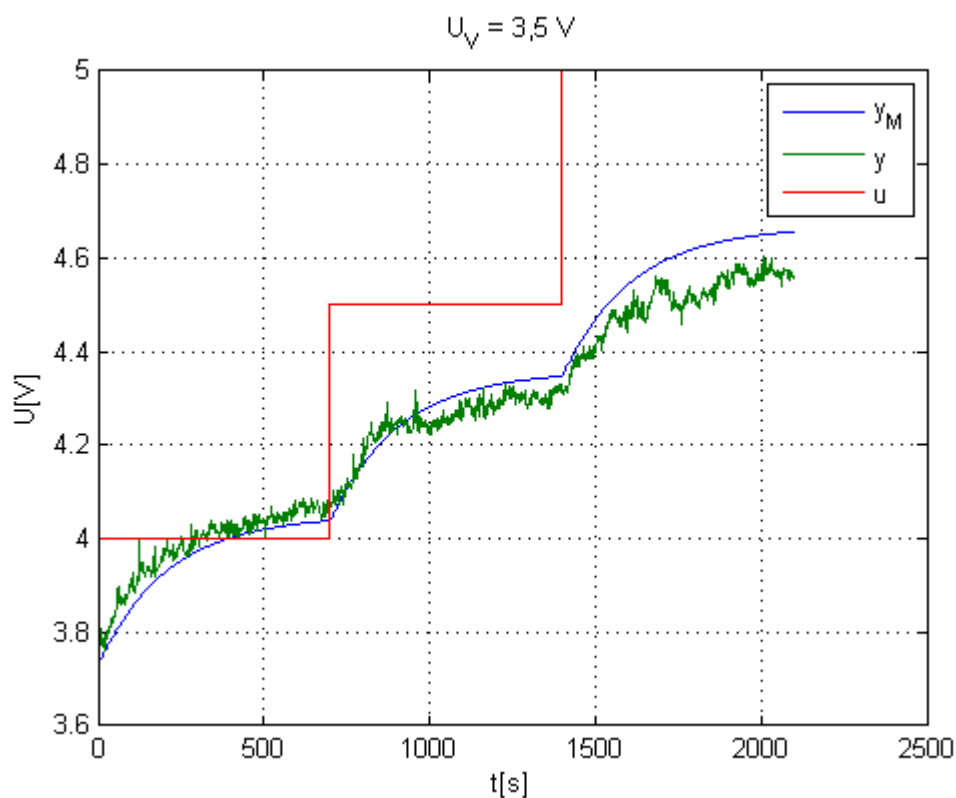
Tabulka 3: Přenosy Fž

Fž		
	topení	chlazení
Senzor 2	$\frac{1,754}{151,7s + 1}$	$\frac{0,4377}{419s^2 + 99,72s + 1}$
Senzor 3	$\frac{0,6922}{258,9s^2 + 186,1s + 1}$	$\frac{0,2923}{6529s^2 + 149s + 1}$
Senzor 4	$\frac{0,6184}{212,3s + 1}$	$\frac{0,2399}{5398s^2 + 127,9s + 1}$
Senzor 5	$\frac{0,5622}{168,6s + 1}$	$\frac{0,3044}{2583s^2 + 131,1s + 1}$

Tabulka 4: Přenos F_V

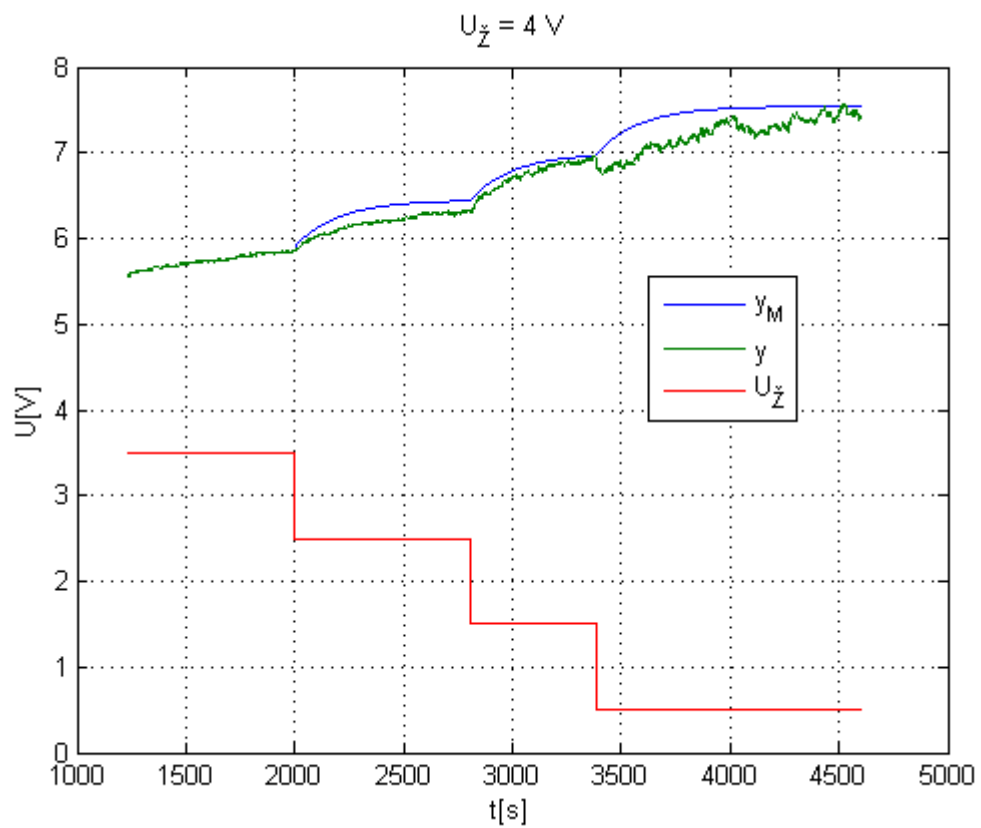
F_V	
Senzor 4	$\frac{-0,5429}{199,2s + 1}$

Přenosy pro čtvrtý senzor používám dále v kapitole o řízení. Na obrázcích 10 a 11 uvádím porovnání modelu s jinými než identifikačními daty.



Obrázek 10: Shoda F_Z s naměřenými daty pro senzor č. 4

Z obrázku 10 je zřejmé, že určený obrazový přenos aproximuje naměřená data poměrně dobře. Nejlepší shoda je v okolí pracovního bodu. Proces chlazení demonstruje obrázek 9.



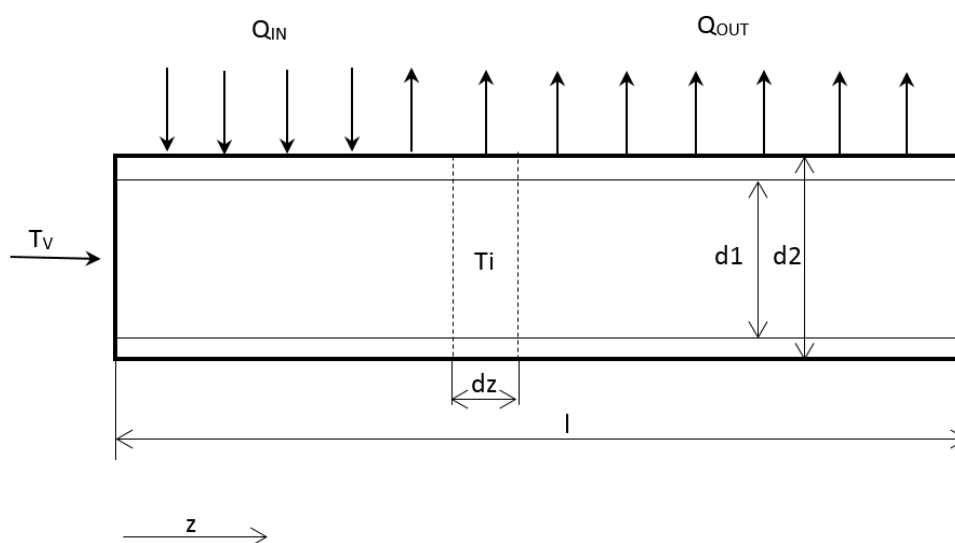
Obrázek 11: Shoda F_V s naměřenými daty pro senzor č. 4

Přenos F_V se nejvíce shoduje s naměřenými daty při změně U_V z 3,5 V na 2,5 V a změně z 2,5 V na 1,5 V. Je tedy vhodné pracovat s ventilátorem v dané oblasti. Při snížení otáček na 0,5 V se dynamický pochod ztrácí v šumu.

2 Matematický model výměníku

2.1 Sestavení matematického modelu

Matematický popis k laboratornímu modelu výměníku jsem sestavil na základě modelu prezentovaného v [2]. Popis vychází z nutných zjednodušení. Výměník je zjednodušen na rovnou trubku s délkou odpovídající délce skutečného výměníku. Proudění média považuji za laminární, a tedy, že uvnitř trubky nevznikají víry. Dále uvažuji, že médium proudí konstantní rychlostí $v[m \cdot s^{-1}]$ a má konstantní hustotu $\rho[kg \cdot m^{-3}]$ po celé délce trubky. Za konstantní považuji i měrná tepla $c_p[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$ a součinitel přestupu tepla $\alpha[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$. Zjednodušení nám umožní sestavit lineární matematický popis. Reálný laboratorní model není lineární zejména proto, že tyto koeficienty jsou teplotně závislé.

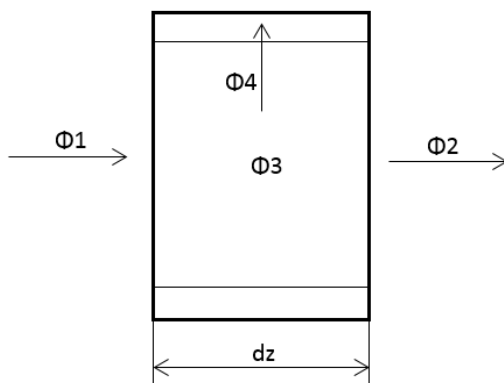


Obrázek 12: Zjednodušené schéma tepelného výměníku

Na obrázku 12 T_v představuje teplotu vstupujícího vzduchu. Přepokládám, že teplota okolí se nemění, proto T_v rovněž považuji za konstantní. Q_{IN} představuje teplo vyprodukované žárovkami vstupující do systému. Q_{OUT} je teplo, které odchází z trubky do okolí. $d_1 [m]$ je vnitřní průměr trubky, $d_2 [m]$ je vnější průměr trubky a $l[m]$ je délka trubky. Stavovou veličinou je teplota $T(z, t)$ uvnitř trubky, která se mění nejen v závislosti na čase, ale i v závislosti na místě v podélném směru trubky. Matematický

popis nepostihuje změnu teploty v radiálním směru. Při sestavování matematického popisu vycházím z energetické bilance v objemovém elementu trubky.

Ve zjednodušeném modelu uvažuji i tepelnou kapacitu stěny trubky. Sestavil jsem tedy jednu bilanční rovnici pro médium a jednu pro stěnu trubky. Nejprve uvažuji element trubky bez stěny.



Obrázek 13: Energetická bilance elementu média uvnitř trubky

Teplo $\theta_1 [J \cdot s^{-1}]$ odpovídá teplu vstupujícímu do elementu. θ_2 je teplo vystupující. θ_3 je teplo v elementu akumulované a θ_4 je teplo přestupující do stěny trubky. Uvažuji vždy teplo, které se přemístí nebo akumuluje za jednotku času. Bilanční rovnice má tvar:

$$\theta_1 = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \quad (2.1)$$

Tepelná energie proudu vzduchu vstupujícího do elementu je rovna:

$$\theta_1 = \rho \cdot c_p \cdot T \cdot q_v, \quad (2.2)$$

kde $q_v [m^3 s^{-1}]$ je objemový průtok, $T[K]$ je absolutní teplota a $c_p [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$ je měrné teplo při konstantním tlaku. Tepelná energie vystupující z elementu je rovna:

$$\theta_2 = \rho \cdot c_p \cdot q_v \cdot \left(T + \frac{\partial T}{\partial z} dz \right) \quad (2.3)$$

Množství akumulované tepelné energie je rovno:

$$\theta_3 = \rho \cdot c_p \cdot dV \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.4)$$

Tepelný tok tepla, které přejde do stěny trubky lze vyjádřit:

$$\theta_4 = \alpha \cdot dS \cdot (T_T - T) \quad (2.5)$$

kde $\alpha [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$ je součinitel přestupu tepla, dS je plocha kolmá ke směru toku θ_4 . T je teplota média v daném místě trubky a T_T je teplota stěny trubky v daném místě. Dosazením do bilanční rovnice obdržíme následující rovnici:

$$\rho c_p T q_v = \rho c_p q_v \left(T + \frac{\partial T}{\partial z} dz \right) + \alpha dS (T_T - T) + \rho c_p dV \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.6)$$

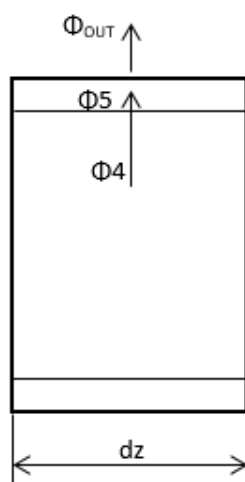
Element plochy dS kolmé na směr šíření tepla do stěny lze vyjádřit jako $\pi d_1 dz$. Element objemu dV jsem zapsal jako $\pi \frac{d^2}{4} dz$. Po vydělení rovnice dz a $\rho c_p \pi \frac{d^2}{4}$ jsem ji obdržel ve tvaru:

$$\frac{q_v}{\pi \frac{d^2}{4}} \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{-4\alpha}{\rho c_p d} (T_T - T) \quad (2.7)$$

Výraz $\frac{q_v}{\pi \frac{d^2}{4}}$ před parciální derivací teploty podle prostorové proměnné z odpovídá rychlosti v proudění vzduchu. Výraz na pravé straně $\frac{-4\alpha}{\rho c_p d}$ jsem zahrnul pro zjednodušení zápisu pod jednu konstantu a . Výsledná parciální diferenciální rovnice popisující přenos tepla médiem má tvar:

$$v \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial T}{\partial t} = a (T_T - T) \quad (2.8)$$

Počáteční podmínkou je ustálený teplotní profil $T(z, 0)$ uvnitř trubky v čase $t = 0$. Okrajová podmínka odpovídá teplotě vstupujícího vzduchu $T(0, t)$ v závislosti na čase. Rovnici popisující dynamiku stěny trubky odvodím také na základě bilance tepelné energie.



Obrázek 14: Energetická bilance elementu stěny trubky

Pro zjednodušení uvažuji, že teplo se ve stěně trubky nešíří v axiálním směru, tedy elementy stěny si mezi sebou teplo nepředávají. Bilanční rovnice pro stěnu trubky má tedy následující tvar:

$$\theta_5 = \theta_4 - \theta_{OUT} \quad (2.9)$$

Teplo přestupující z média do stěny trubky je dáno vztahem:

$$\theta_4 = \alpha \cdot dS \cdot (T - T_T) \quad (2.10)$$

Teplo v elementu stěny akumulované lze vyjádřit obdobně, jako v případě tepla akumulovaného v elementu média:

$$\theta_5 = \rho_T \cdot c_{pT} \cdot dV_T \cdot \frac{\partial T_T}{\partial t} \quad (2.11)$$

Element objemu stěny trubky dV_T lze vyjádřit takto:

$$dV_T = \frac{1}{4} (d_2^2 - d_1^2) \pi dz$$

Po dosazení do bilanční rovnice jsem obdržel diferenciální rovnici popisující dynamiku stěny.

$$\rho_T c_{pT} dV_T \frac{\partial T_T}{\partial t} = \alpha dS (T - T_T) - Q_{OUT} \quad (2.12)$$

Pro zjednodušení zápisu jsem vydělil rovnici výrazem $\rho_T c_{pT} dV_T$ a zavedl konstanty:

$$b = \frac{\alpha dS}{\rho_T c_{pT} dV_T} = \frac{4\alpha d_1}{\rho_T c_{pT} (d_2^2 - d_1^2)} \quad (2.13)$$

$$d = \frac{4}{\rho_T c_{pT} (d_2^2 - d_1^2) \pi dz} \quad (2.14)$$

Výsledná rovnice má pak tvar:

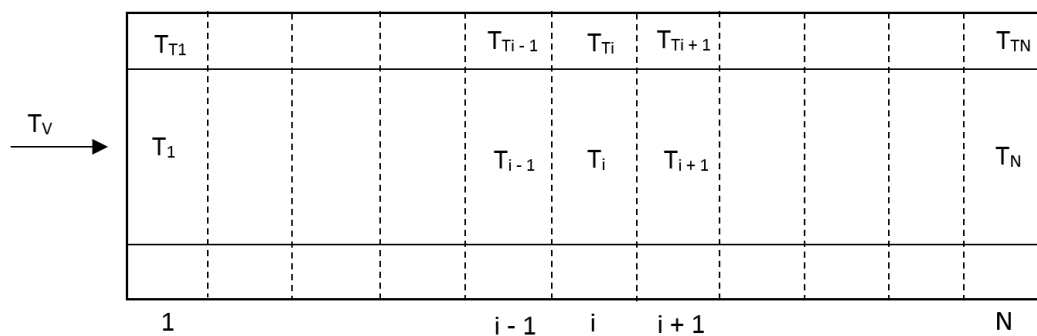
$$\frac{\partial T_T}{\partial t} = b(T - T_T) - d \cdot Q_{OUT} \quad (2.15)$$

Teplo přecházející do okolí Q_{OUT} by šlo vyjádřit na základě rozdílu teplot mezi stěnou trubky a okolím. Předpokládám, že se kolem trubky vytvoří teplotní profil, který je neznámý, ponechám tedy teplo přecházející do okolí nevyjádřené. Rovnice popisující dynamiku stěny trubky má počáteční podmínku $T_T(0)$ odpovídající teplotě stěny trubky v čase $t = 0$. Zjednodušený model tepelného výměníku je popsán diferenciálními rovnicemi (2.8 a (2.12 s dvěma počátečními a jednou okrajovou podmínkou.

3 Simulace matematického modelu

3.1 Simulace v Simulinku

Matematický model jsem se rozhodl simulovat v MATLAB Simulinku, který sám o sobě parciální diferenciální rovnice neřeší. Bylo tedy nutné převést parciální diferenciální rovnici na soustavu n obyčejných diferenciálních rovnic. Trubku jsem tak „rozřezal“ na n částí, ve kterých uvažuji konstantní parametry. Části si pak předávají teplo mezi sebou konvekci.



Obrázek 15: Rozdělení trubky na n částí

Teplota v podélném směru výměníku bude tedy diskrétní. V jednotlivých částech bude mít médium teplotu $T_i(t)$ pro $i = 0 \dots n$, kdy

$$T_0 = T_v. \quad (3.1)$$

Stěna trubky bude mít v daném místě teplotu $T_{Ti}(t)$ pro $i = 1 \dots n$. Soustavu diferenciálních rovnic, popisujících šíření tepla v médiu, jsem získal náhradou derivace podle prostorové proměnné za zpětnou diferenci:

$$\frac{\partial T}{\partial z} \approx \frac{T_i - T_{i-1}}{h}, \quad (3.2)$$

kde h odpovídá délce jedné z n částí:

$$h = \frac{l}{n} \quad (3.3)$$

Také nahradím teplotu T závisící na čase a prostorové proměnné teplotou T_i , udávající teplotu v daném místě trubky v závislosti na čase. Z parciální derivace se tedy stane pouze obyčejná derivace. Rovněž teplotu T_T nahradím teplotou v daném místě T_{Ti} . Soustava obyčejných rovnic popisující šíření tepla v médiu má tedy tvar:

$$\frac{dT_i}{dt} + v \frac{T_i - T_{i-1}}{h} = a(T_{Ti} - T_i), \quad i = 1 \dots n \quad (3.4)$$

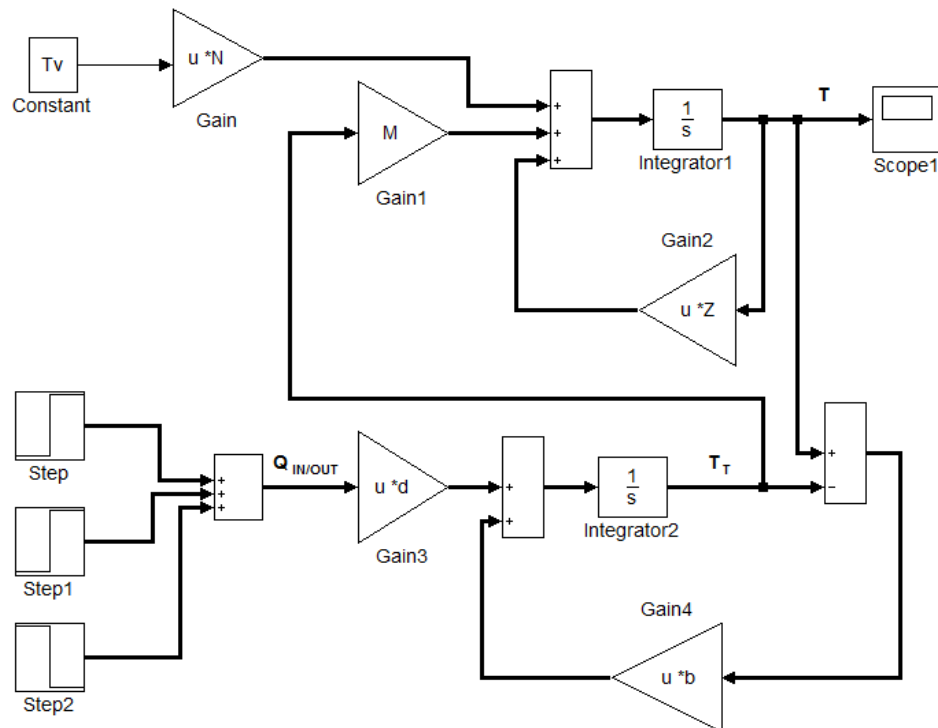
Soustavu popisující dynamiku stěny trubky obdržím tím, že nahradím teplotu závislou $T_T(z, t)$ na čase i místě teplotou v daném konečném elementu T_{Ti} závislou pouze na čase. Stejně nahradím i teplotu $T(z, t)$. Soustava popisující dynamiku stěny trubky má tvar:

$$\frac{dT_{Ti}}{dt} = b(T_i - T_{Ti}) - d \cdot Q_{OUT} \quad (3.5)$$

Schéma v Simulinku jsem sestavil za pomoci metody snižování řádu derivace, kdy jsem si upravil soustavy tak, abych měl na levé straně samostatnou derivaci. První soustavu rovnic jsem obdržel v následujícím tvaru. Druhá soustava již potřebný tvar má.

$$\frac{dT_i}{dt} = \left(-\frac{v}{h} - a\right) T_i + \frac{v}{h} T_{i-1} + a T_{Ti} \quad (3.6)$$

Simulační schéma jsem sestavil stejně, jako kdyby soustavy byly rovnice, s tím rozdílem, že některé signály jsou vektory. Není tedy nutné dané simulační schéma kreslit pro každou rovnici zvlášť, ale stačí nám pouze jedno pro celou soustavu. Tlustá signálová čára značí vícerozměrový signál. Ve schématu jsem vyznačil vektor teplot uvnitř trubky $T = [T_1 \ T_2 \ \dots \ T_n]$, vektor teplot ve stěně $T_T = [T_{T1} \ T_{T2} \ \dots \ T_{Tn}]$ a vektor tepla vstupujícího a vystupujícího ze systému $Q_{IN/OUT} = [Q_1 \ Q_2 \ \dots \ Q_n]$.



Obrázek 16: Simulační schéma

Z důvodu, že signály jsou vektory, zavedl jsem ve schématu matici Z a vektory $\mathbf{M}$ a $\mathbf{N}$. Koeficienty b a d jsou pouze skaláry.

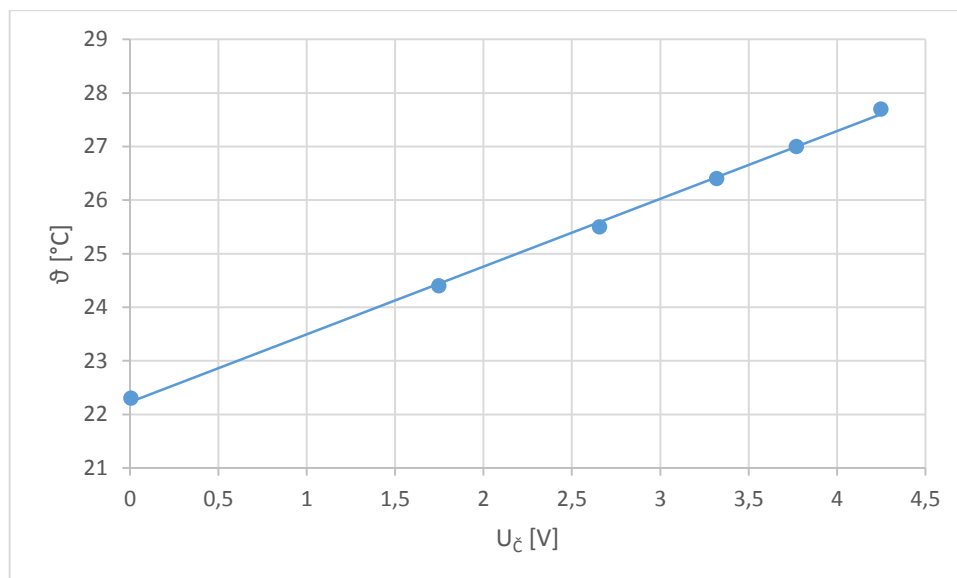
$$\mathbb{Z}^{n \times n} = \begin{pmatrix} \frac{-v}{h} - a & & & & \\ & \frac{v}{h} & \ddots & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & \ddots & \frac{v}{h} \\ & & & & \frac{-v}{h} - a \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

$$\mathbf{M} = (a \dots a), \mathbf{M} \in \mathbb{R}^n \quad (3.8)$$

$$\mathbf{N} = \frac{v}{h} \cdot (1 \ 0 \ \dots \ 0), \mathbf{N} \in \mathbb{R}^n \quad (3.9)$$

3.2 Kalibrace senzorů

Výstupem simulačního modelu je teplota v Kelvinech. Aby bylo možné porovnat výstup simulačního modelu s naměřenými daty, bylo potřeba provést kalibraci senzorů. Měřicí karta nám snímá napětí, které odpovídá teplotě v místech, kde jsou jednotlivé senzory umístěny. Snažil jsem se tedy určit funkci, která by popsala závislost mezi teplotou v trubce a napětím, které je měřeno. Závislost jsem získal tak, že jsem měřil v jednotlivých místech teplotu ještě jiným senzorem PT 100, který byl již kalibrován. Data jsem vynesl do grafu a pomocí regrese určil funkci popisující danou závislost. V trubce jsou instalovány senzory PTC 81-120, které mají charakteristiku, která se většinou aproximuje polynomem druhého řádu. Avšak vzhledem k tomu, že v pracovním rozsahu tepelného výměníku (přibližně 20°C až 40°C) je charakteristika téměř lineární, rozhodl jsem se aproximovat naměřenou převodní charakteristiku pouze lineární funkcí. I přesto, že jsou v různých místech trubky použity stejné senzory i měřicí elektronika, jsou na výstupním napětí offsety. To znamená, že při stejné teplotě jsou výstupní napětí rozdílná. Z tohoto důvodu bylo nutné provést kalibrační měření pro každý senzor zvlášť. Pro ilustraci uvádím převodní charakteristiku senzoru č. 4. Převodní charakteristiky senzoru 1 jsem neměřil, protože je umístěn nevhodně za ventilátorem, a naměřená data z něj dále nepoužívám. Senzor č. 5 je ve stejném místě jako senzor č. 3, a navíc je výrazně nelineární. Data z něj tedy také nepoužívám.



Obrázek 17: Převodní charakteristika senzoru č. 4

Tabulka 5: Vztahy aproximující převodní charakteristiku

Senzor 2	Senzor 3	Senzor 4
$\vartheta = 1,6U + 21,1$	$\vartheta = 1,7U + 21,2$	$\vartheta = 1,3U + 22,2$

3.3 Parametrizace modelu

Po převedení matematického modelu na simulační model v Simulinku bylo potřeba model parametrizovat tak, aby odpovídal danému laboratornímu modelu tepelného výměníku. Část parametrů bylo možné jednoduše určit měřením. Určit však některé parametry měřením by bylo velmi obtížné až možná nemožné. Ty jsem odhadl na základě tabulkových údajů nebo srovnáním výstupu modelu s naměřenými daty. Nejsnáze se mi podařilo získat rozměrové parametry trubkového výměníku. Informace o tom, jaký má trubka vnitřní a vnější průměr a jak je přibližně dlouhá, pokud by byla rozvinuta do roviny, jsem dohledal v bakalářské práci [8], v rámci které laboratorní model vznikl. Fyzikální parametry, jako jsou hustota a měrná tepelná kapacita média (vzduchu) a materiálu PMMA, ze kterého je samotná trubka vyrobena, jsem našel v tabulkách [9] a [6]. Dané parametry jsou uvažovány za předpokladu barometrického tlaku a pokojové teploty 20 °C. V případě reálného modelu je zřejmé, že parametry se mohou měnit. Parametr, který je možné změřit, je rychlost proudění vzduchu trubkou. V matematickém modelu uvažuji stejnou rychlost proudění po celé délce trubky. V praxi toto

pravděpodobně nebude platit z důvodu, že vzduch je stlačitelný, a proto rovnice kontinuity bezezbytku neplatí. Trubka je také v některých místech špatně slepená, a tak zde lze předpokládat únik média z trubky. Tím, že není povrch trubky dokonale hladký, vzniká v reálném modelu také tření mezi stěnou a médiem. Rychlost proudění jsem z důvodu obtížného přístupu měřil pouze na konci trubky. K měření jsem použil vrtulkovou anemometrickou sondu propojenou s měřicím systémem Almemo, která měří rychlosti od $0,5 \text{ ms}^{-1}$. Rychlosti na konci trubky jsou malé a pohybují se v rozmezí od $0 - 1 \text{ ms}^{-1}$. Vzhledem k malým rychlostem by bylo vhodné použít termoanemometrické čidlo, které jsem neměl k dispozici. Další parametr – koeficient přestupu tepla – se většinou určuje empiricky. Jeho určení měřením by bylo poměrně obtížné. Odhadl jsem tedy jeho hodnotu na základě srovnání výstupu simulačního modelu s naměřenými daty.

Dále bylo potřeba určit vstupy do systému. Teplotu média vstupujícího do výměníku a teplo vstupující a vystupující ze systému. Teplo vstupující je dodáváno na začátku výměníku žárovkami. Žárovky přeměňují elektrickou energii na teplo. Část energie vyžáří ve formě radiace a část v podobě tepla. Teplo, které předají do systému, bude tedy menší než elektrická energie, kterou jsou napájeny. Teplo, které skrze stěnu přechází do okolí, je velice obtížně měřitelné, bylo tedy nutné provést odhad. Dá se předpokládat, že v místech, kde je větší rozdíl mezi teplotou okolí a teplotou stěny trubky, přejde do okolí více tepla. Teplotu média vstupujícího do systému považuji za konstantní, protože předpokládám, že teplota v místnosti s laboratorním modelem se příliš nemění.

Odhadnuté parametry, jsem doladil tak, že jsem měnil jednotlivé parametry modelu a srovnával jeho výstup s naměřenými daty. Koeficient α ovlivňuje rychlost dynamiky teploty. Čím je jeho hodnota vyšší, tím je dynamika rychlejší. Rychlost proudění v ovlivňuje ustálené hodnoty teploty a také určuje rozdíly teploty mezi jednotlivými místy v trubce. Při vyšších hodnotách se teploty ustalují na nižších teplotách a jsou mezi nimi menší rozdíly. Vstupní teplota T_v ovlivňuje ustálené hodnoty teploty. Při vyšší vstupní teplotě se průběhy teploty posunou do vyšších hodnot.

Vstupní teplo Q_{IN} dodávám do systému do prvních čtyř elementů.

$$Q_{IN}[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ ... \ 0] \quad (3.10)$$

Odhad jsem provedl na základě uvážení maximálního výkonu žárovek $P_{\dot{Z}MAX}$, který je v [8] určen na 250 W . $U_{\dot{Z}MAX}$ je maximální řídicí napětí žárovek.

$$Q_{IN} \approx P_{\dot{Z}} \frac{U_{\dot{Z}}}{4 \cdot U_{\dot{Z}MAX}} [\text{J} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3.11)$$

Na teplo se přemění pouze část výkonu, proto je Q_{IN} menší. Vstupní teplo má vliv na hodnoty ustálení teploty. Teplo výstupní Q_{OUT} odebírám ze všech elementů. Pro jednoduchost ze všech elementů stejně.

$$Q_{OUT}[1 \ 1 \ ... \ 1] \quad (3.12)$$

Výstupní teplo má vliv na hodnoty ustálených teplot a na rozložení teplot v trubce. Určil jsem následující parametry systému.

Tabulka 6: Parametry trubky

$l \ [m]$	0,8
$d_1 \ [m]$	0,104
$d_2 \ [m]$	0,11

Tabulka 7: Fyzikální parametry

$\alpha \ [Wm^{-2}K]$	50
$\rho \ [kgm^{-3}]$	1,188
$c_p \ [Jkg^{-1}K^{-1}]$	1006
$\rho_T \ [kgm^{-3}]$	1182
$c_{pT} \ [Jkg^{-1}K^{-1}]$	1450

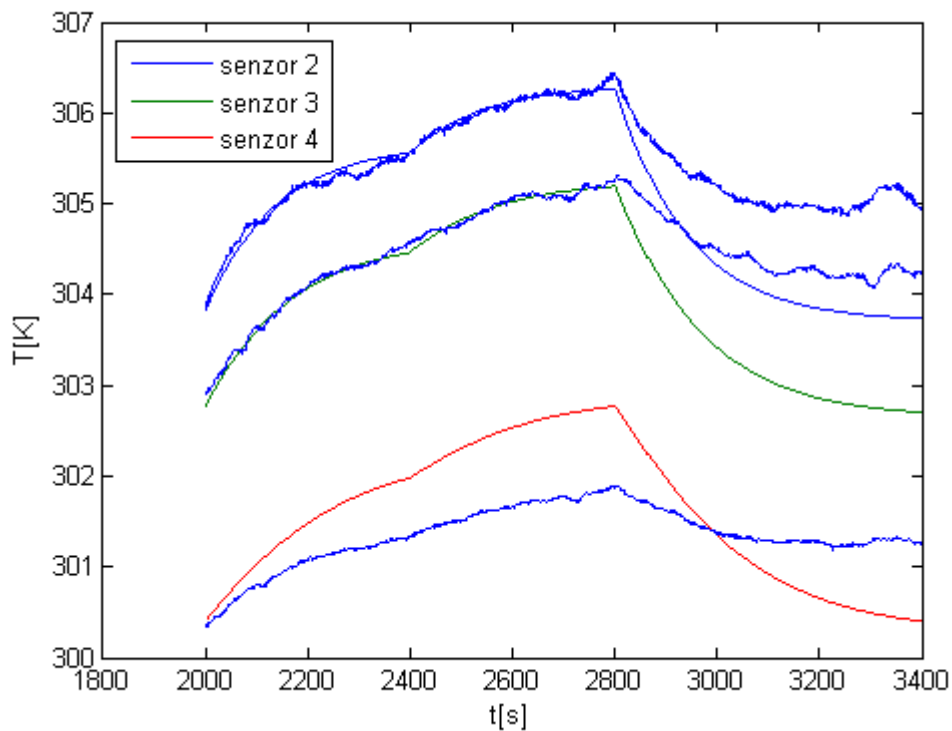
Tabulka 8: Vstupy do systému

$v \ [ms^{-1}]$	1,2
$Q_{IN} \ [Js^{-1}]$	26,4
$Q_{OUT} \ [Js^{-1}]$	-3,2
$T_V \ [K]$	297

Obrázek 18 zobrazuje shodu modelu s naměřenými daty pro parametry v tabulkách 6 – 8. Data byla naměřena pro následující hodnoty U_V a U_Z .

Tabulka 9: Změny řídicího napětí ventilátoru a žárovek při měření dat

$U_V \ [V]$	3,5			
$U_Z \ [V]$	3	4,5	5	3



Obrázek 18: Shoda modelu a měřených dat

Teplo Q_{IN} odpovídá teplu dodávanému do systému při $U_z = 3$. Při prvním skoku je potřeba zvýšit Q_{IN} o $5,5 J$. Jednotkový skok v okolí pracovního bodu tedy odpovídá změně vstupního tepla o $3,7 J$. Vstupní teplo jsem měnil následovně:

Tabulka 10: Změny vstupního tepla při porovnání s naměřenými daty

$Q_{IN}[J s^{-1}]$	26,4	31,9	33,7	26,4
--------------------	------	------	------	------

Z obrázku 18 je zřejmé, že model nesedí s naměřenými daty na čtvrtém senzoru. Bohužel model neumožňuje seřadit parametry lépe. Abych zajistil schodu i tam musel bych sestavit složitější model. Domnívám se, že by mohlo pomoci uvažovat v modelu i tlakové ztráty uvnitř trubky. Model s naměřenými daty také nesedí při procesu chlazení, kdy byl snížen výkon na žárovkách. Model je lineární, proto při snížení výkonu na stejnou hodnotu, jako na začátku, výstup klesne také na původní hodnotu. Nedostatek modelu lze částečně kompenzovat snížením teplotních ztrát při procesu chlazení.

3.4 Verifikace modelu

Model jsem verifikoval porovnáním výstupu modelu s naměřenými daty. Porovnání jsem provedl s jinými daty, které jsem měl k dispozici. Data byla naměřena pro následující hodnoty U_V a U_Z .

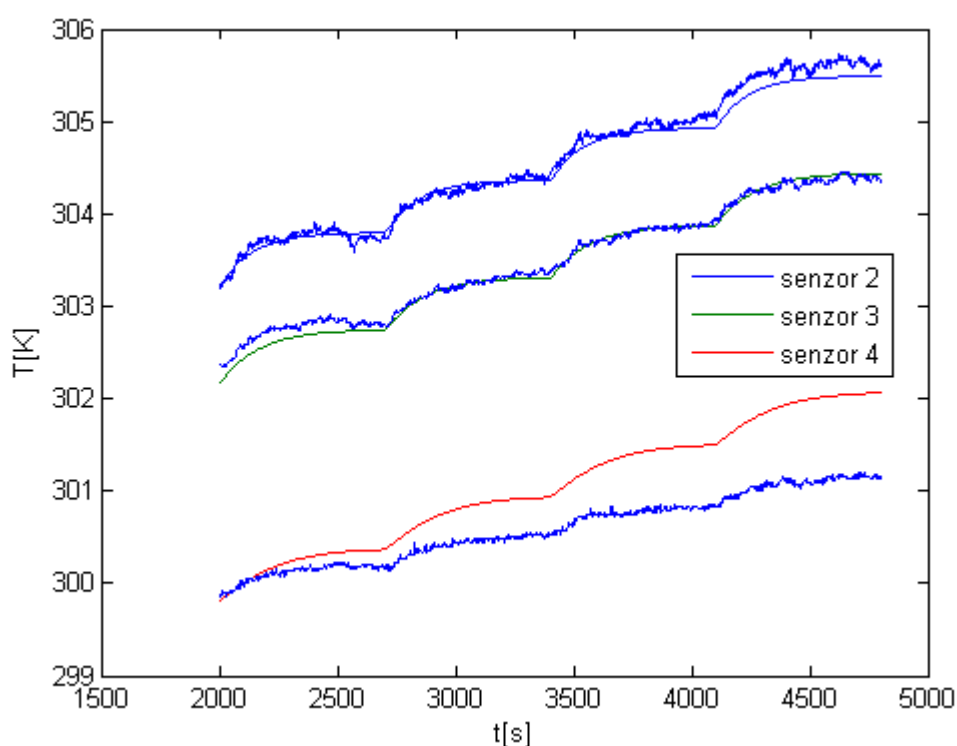
Tabulka 11: Změny řídicího napětí ventilátoru a žárovek na verifikačních datech

U_V [V]	3,5				
U_Z [V]	2,5	3	3,5	4	4,5

Na základě výpočtu z předchozí kapitoly jsem určil vstupní teplo příslušné jednotlivým skokům na žárovkách.

Tabulka 12: Změny vstupního tepla v modelu při porovnání s verifikačními daty

$Q_{IN}[Js^{-1}]$	24,6	26,4	28,2	30,1	31,9
-------------------	------	------	------	------	------



Obrázek 19: Shoda modelu a měřených dat

Model aproximuje data naměřená na senzoru 2 a 3 poměrně dobře. Na senzoru 4 je výraznější odchylka, která je způsobena tím, že model nerespektuje snížení statického zesílení v místech vzdálenějších od zdroje tepla.

4 Návrh řízení

Laboratorní model výměníku má dva akční členy – ventilátor a žárovky, které jsou vstupem do systému. Zároveň umožňuje měřit teplotu na více místech. Systém lze považovat za MIMO systém, avšak ze statické charakteristiky vyplývá, že ventilátor má výraznější vliv na teplotu pouze v malém rozsahu. Navíc jeho statické zesílení se pro různé hodnoty řídicího napětí výrazně mění. Rozhodl jsem se tedy přistupovat k systému jako SISO. Jako hlavní vstup do systému uvažuji žárovky, za předpokladu, že ventilátor zajišťuje nucené proudění média trubicou a zároveň vstupuje do systému jako porucha. Za těchto předpokladů lze řídit teplotu pouze v jednom místě, kde jsou umístěny senzory teploty. Z naměřených dat vyplývá, že nejlépe by se regulovala teplota na senzoru 2, protože na něm má systém největší zesílení a zároveň je zde minimální dopravní zpoždění. Nicméně v případě regulování reálného tepelného výměníku by nás pravděpodobně zajímala teplota na jeho výstupu. Rozhodl jsem se tedy regulovat teplotu na senzoru č. 4, který je umístěn na konci trubky.

Vzhledem k tomu, že řízený systém je velmi pomalý, je vhodné provést návrh řízení na simulačním modelu. Na reálném modelu by byly některé přístupy seřízení regulátoru zbytečně zdlouhavé. Rozhodl jsem se použít model systému určený experimentální identifikací v pracovním bodě, který aproximuje dynamiku systému lépe. Model je blíže popsán v kapitole 1.5. K regulaci používám pouze přenosy odpovídající procesu topení s tím, že při reálné regulaci by systém vychládal pomaleji. Výsledné přenosy pro zvolený pracovní bod mají tvar:

$$F_z = \frac{0,6184}{212,3s + 1}, \quad (4.1)$$

$$F_V = \frac{-0.5429}{199,2s + 1}. \quad (4.2)$$

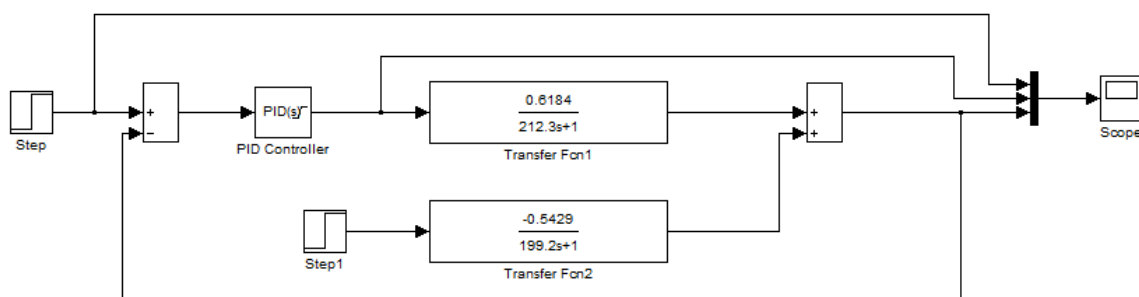
Regulovaný systém je nelineární, proto uvedené přenosy popisují systém nejlépe okolo pracovního bodu. Navržený regulátor by měl také pracovat nejlépe v této oblasti.

Regulaci na simulačním modelu i na reálném systému jsem realizoval v MATLAB Simulinku za pomoci předem připraveného bloku PID, který má v sobě implementovanou ochranu proti wind-up efektu i možnost nastavení saturace akční veličiny. Nevýhoda předpřipraveného bloku je, že nám neumožní vykreslit jednotlivé složky regulátoru.

Regulátor umožňuje nastavit buď ideální, nebo paralelní strukturu regulátoru. Zvolil jsem paralelní ve tvaru:

$$R(s) = P + I \frac{1}{s} + D \frac{Ns}{s + N} \quad (4.3)$$

Simulační model, na kterém jsem prováděl návrh, nám umožní provést teoreticky nekonečné akční zásahy, avšak každý reálný systém umožňuje provádět akční zásahy pouze v omezeném rozsahu. Výkon žárovek, které vstupují do systému jako akční člen, lze ovládat řídicím napětím v rozsahu 0 – 5 V. Pokud regulátor vypočte větší nebo menší zásah, bude regulační veličina v saturaci. Při návrhu regulátoru je tedy nutné s tím počítat a nastavit regulátor tak, aby se do saturace nejlépe nedostal, protože saturace zanechá do regulačního pochodu další nelinearitu. Model jsem nepřenesl do pracovního bodu, proto bych měl nastavit horní hranici saturace na $5 - u_0$ a dolní hranici saturace na $0 - u_0$, kde (u_0, y_0) je pracovní bod. Avšak v případě reálného systému se akční veličina v regulačním obvodu ustálí na nižší hodnotě. Důvodem je, že se nabijí tepelné kapacity a do systému není nutné dodávat tolik tepla. Při nastavení saturace jsem tedy uvažoval u_0 menší. Od žádané hodnoty bylo nutné odečíst y_0 .

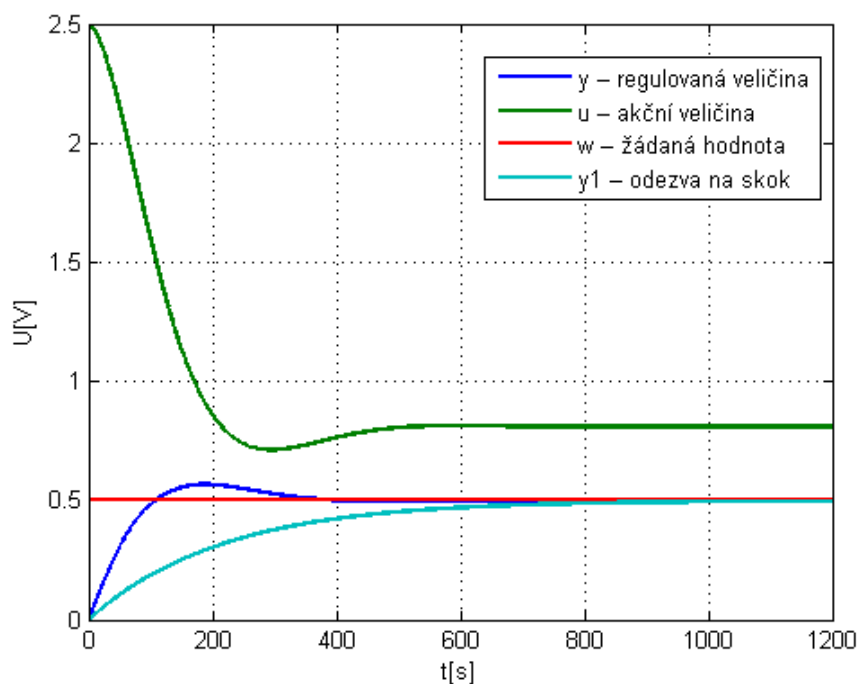


Obrázek 20: Schéma zapojení modelu do regulačního obvodu

4.1 PI regulace

Seřízení PI regulátoru jsem pro jednoduchost provedl experimentální metodou, popsanou v [4]. Snažil jsem se, aby regulační pochod výrazně nepřekmitával, protože například při řízení teploty v místnosti bychom nechtěli, aby teplota v místnosti výrazně překročila nastavenou teplotu. Zároveň jsem se snažil, aby dynamika byla dostatečně rychlá a poskytla dobré vyregulování poruch. Splnit oba požadavky ideálně není z principu možné, jednalo se tedy o nalezení kompromisu. Parametry jsem nastavoval

opatrně, abych se alespoň při změnách žádané hodnoty okolo pracovního bodu nedostával do saturace. Nastavil jsem tedy regulační pochod s mírným překmitem.

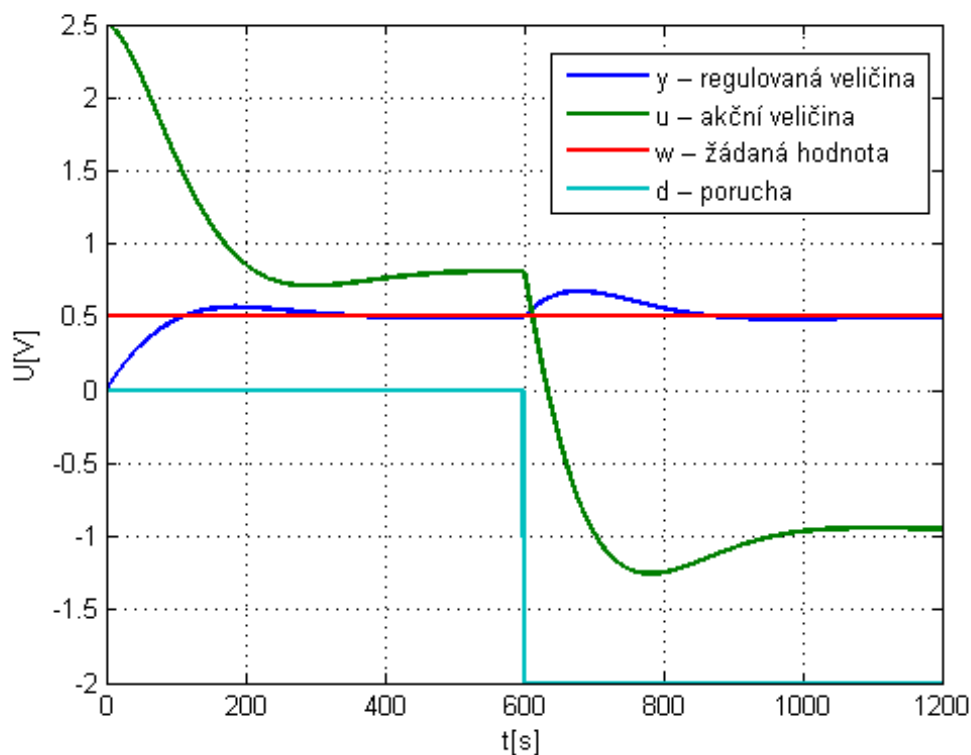


Obrázek 21: PI regulace na modelu – sledování žádané hodnoty

Z grafu je zřejmé, že řízený simulační model má výrazně rychlejší náběh a kratší dobu ustálení než odezva modelu na skok. Regulovaná veličina má 13% překmit, žádanou hodnotu dosáhne za 107 s a úplně se na ní ustálí za přibližně 405 s. Nastavené parametry PI regulátoru jsou:

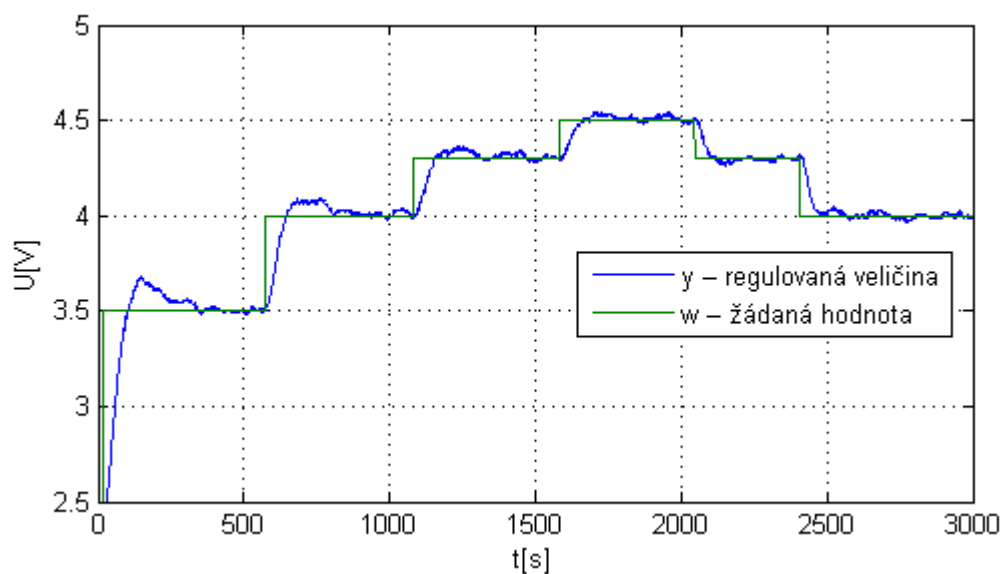
$$P = 5, I = 0,07 \quad (4.4)$$

Na poruchu reagoval regulační obvod následovně. Přenos od ventilátoru má záporné zesílení, provedl jsem tedy skok z 0 na -2 . To by mělo odpovídat změně řídicího napětí na ventilátoru z pracovního řídicího napětí 3,5 V na napětí 1,5 V. Porucha byla při daném nastavení PI regulátoru vyregulována přibližně za 250 s.

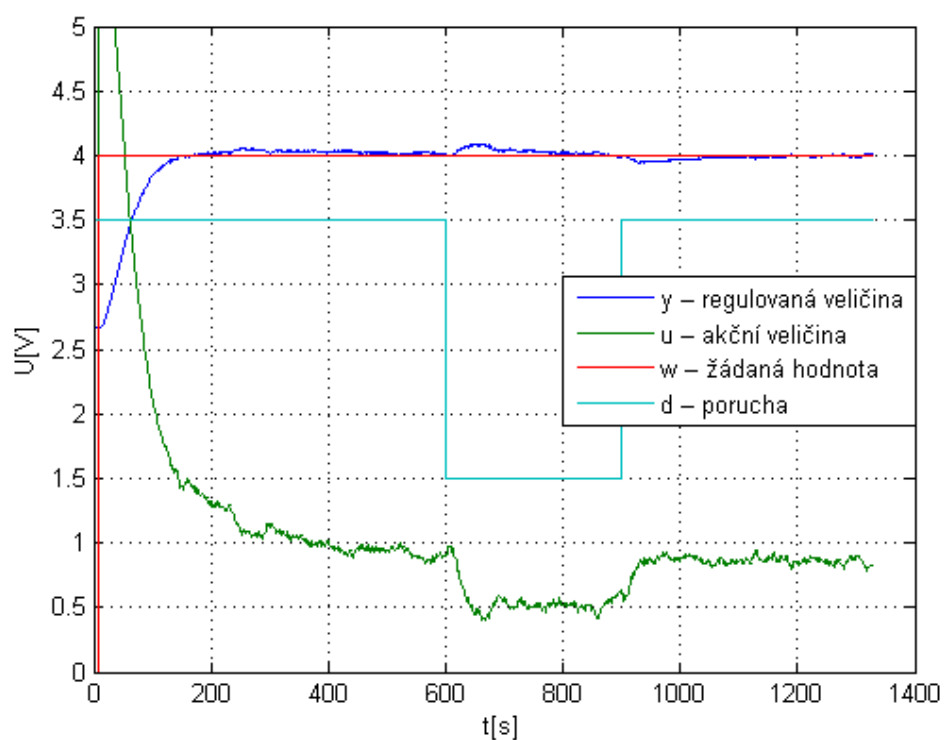


Obrázek 22: PI regulace na modelu – odezva na poruchu

Po navržení regulátoru pro simulační model jsem otestoval navržený PI regulátor také na reálném systému. Regulátor jsem otestoval na sledování žádané hodnoty i na vyregulování poruchy. Žádanou hodnotu jsem nastavoval v okolí pracovního bodu s různým přírůstkem, jak zobrazuje obrázek 23. Regulační pochod je aperiodický s překmitem. Pro větší změnu žádané hodnoty je překmit větší. První regulační pochod má výrazný překmit z důvodu, že systém je nelineární, a má tedy v tomto rozsahu jiné vlastnosti. Parametry regulačního pochodu jsem určil až na třetím regulačním pochodu, kdy se žádaná hodnota mění ze 4 na 4,3. V případě regulace na reálném systému je nutné určit pásmo regulace. Tedy pásmo, ve kterém považuji regulovanou veličinu za ustálenou na žádané hodnotě. Regulační pásmo jsem určil na $\pm 0,04 \text{ V}$. To odpovídá změně teploty asi o $\pm 0,05 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Relativní překmit vztažený ke změně žádané hodnoty je 20 %. Žádaná hodnota je dosažena za cca 73 s a k ustálení dojde za cca 238 s.



Obrázek 23: PI regulace – sledování žádané hodnoty



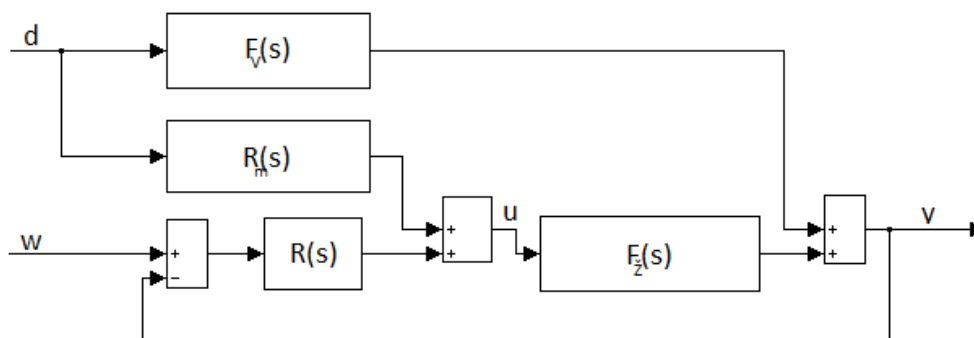
Obrázek 24: PI regulace – odezva na poruchu

Systém jsem testoval na poruchu změnou otáček ventilátoru. Snížení otáček má na regulovanou veličinu větší vliv než jejich zvýšení. Zároveň statické zesílení ventilátoru je malé a není v celém rozsahu stejné. Změnil jsem tedy napětí řídící otáčky z 3,5 V na 1,5 V, aby se porucha na regulované veličině projevila co možná nejvýrazněji. Porucha

způsobila zvýšení regulované veličiny $0,08\text{ V}$ oproti žádané hodnotě. Navržený regulátor poruchu vyreguloval za přibližně 98 s . Po opětovném zvýšení otáček na původní hodnotu se regulovaná veličina odchýlila od žádané o $0,05\text{ V}$ a k vyregulování došlo za 58 s . Poruchu považuji za vyregulovanou ve chvíli, kdy se regulovaná veličina vrátí zpět do regulačního pásma $\pm 0,04\text{ V}$ kolem žádané hodnoty. Lze si také všimnout, že při nižších otáčkách se akční veličina ustálí na nižší hodnotě. To odpovídá situaci, kdy je do okolí je „vyfukováno“ méně tepla a není nutné proudící vzduch tolik zahřívat, abychom na výstupu udrželi požadovanou teplotu.

4.2 PI regulace – kompenzace měřené poruchy

Možností jak zlepšit regulační pochod reagující na poruchu je měřit poruchovou veličinu a přidat do zpětnovazebního regulačního obvodu kompenzátor měřené poruchy. Daný regulační obvod je popsán v [4] a [3]. Porucha není přímo neměřena, ale k dispozici je obrazový přenos popisující poruchu a vstup do obrazového přenosu je také znám. Schéma regulačního obvodu kompenzujícího měřenou poruchu je následující:



Obrázek 25: Schéma PI regulátoru s měřenou poruchou

Přenos mezi výstupem a poruchou je následující:

$$F_{yd} = \frac{F_d + R_m F_z}{1 + R F_z} \quad (4.5)$$

Aby byl dynamický vliv poruchy nulový, musí být čítec přenosu roven nule. Kompenzátor má pak přenos roven:

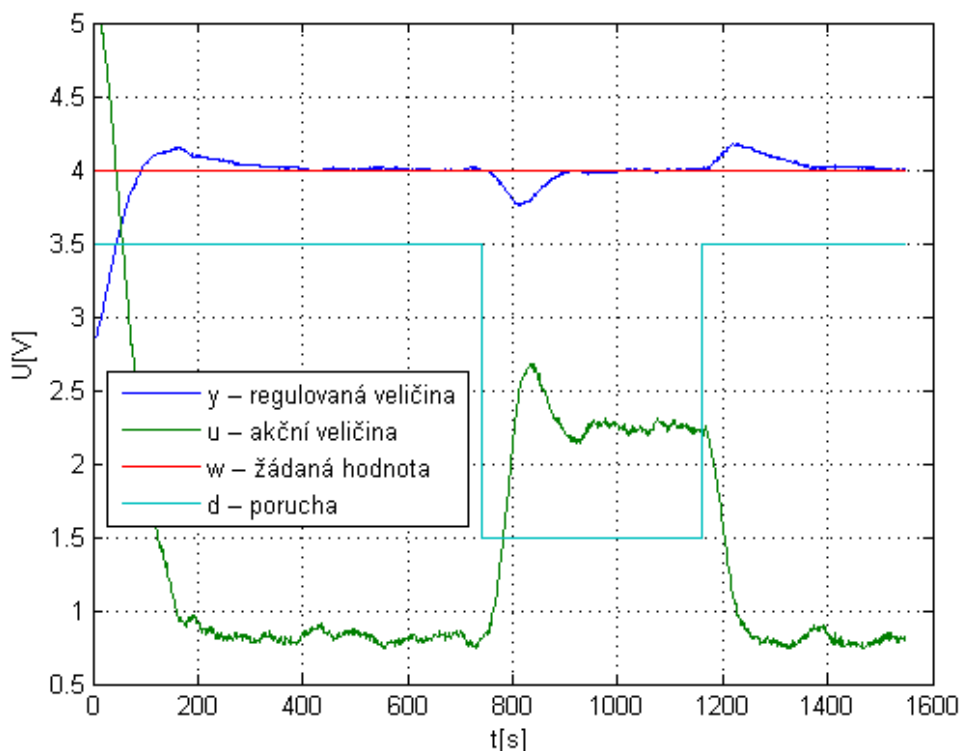
$$R_m(s) = -\frac{F_d(s)}{F_z(s)} \quad (4.6)$$

V uvedeném tvaru ho lze použít pouze v případě, pokud je fyzikálně realizovatelný. Pokud tomu tak není, lze použít místo přenosů F_d a F_z pouze jejich statická zesílení.

Přenosy popisující tepelný výměník jsou oba prvního řádu, použil jsem tedy pouze jejich statická zesílení.

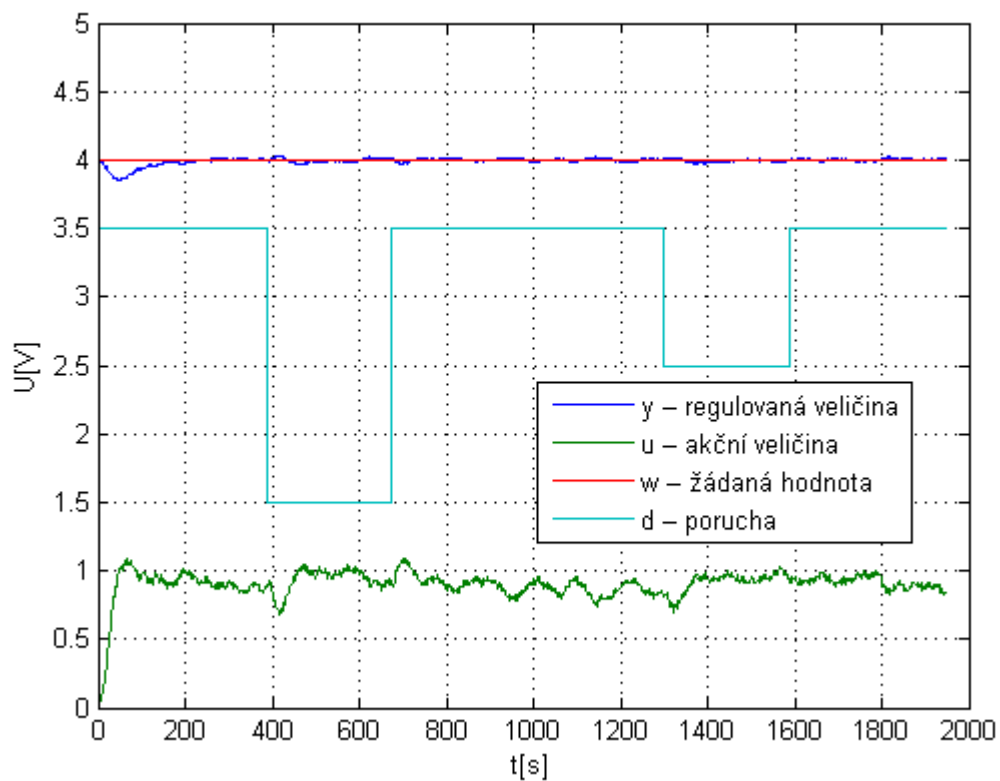
$$R_m(s) = \frac{0,5429}{0,6184s} \quad (4.7)$$

Regulátor tedy díky dopředné vazbě dokáže reagovat na poruchu dříve, než když by kompenzoval poruchu pouze pomocí zpětné vazby. Při daném nastavení kompenzátoru jsem obdržel horší regulační pochod, než je regulační pochod bez měření poruchy.



Obrázek 26: PI regulace – kompenzace měřené poruchy

Z obrázku 26 je zřejmé, že regulovaná veličina se od žádané hodnoty odchýlila na opačnou stranu, než v případě regulace bez měření poruchy. Důvodem může být, že systém reaguje na poruchu se zpožděním, zatímco kompenzátor zasahuje do regulačního obvodu v okamžiku příchodu poruchového signálu. Nicméně zařazením dopravního zpoždění za kompenzátor se regulační pochod příliš nezlepšil. Ke zlepšení došlo až po snížení statického zesílení kompenzátoru. Zesílení jsem snížil pětkrát, kdy byl regulační pochod výrazně lepší než regulační pochod bez měření poruchy. Porucha se při tomto nastavení na poruchové veličině prakticky neprojeví a regulovaná veličina se nedostane mimo regulační pásmo.



Obrázek 27: PI regulace – kompenzace měřené poruchy

4.3 Numerická optimalizace parametrů regulátoru

K návrhu regulátoru jsem se pokusil využít také metodu numerické optimalizace, která může být v dnešní době zajímavou alternativou, za předpokladu, že máme k dispozici model regulovaného systému. Metoda je blíže popsána v [4]. Metoda hledá parametry PID regulátoru takové, aby regulační pochod byl optimální z hlediska zvoleného kritéria kvality regulace. Zvolil jsem integrální kritérium kvadratické regulační plochy, které má tvar:

$$J = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt \quad (4.8)$$

Seřízení regulátoru je z hlediska kritéria optimální, když má kritérium minimální hodnotu. Optimalizace je realizována v Matlabu pomocí funkce „fminsearch“, která hledá iterační metodou minimum kritériální funkce se vstupním vektorem $x = [P \ I \ D]$. Kritériální funkce spouští simulaci regulace s daným nastavením PID regulátoru a vrací hodnotu vypočteného integrálního kritéria. Optimální nastavení regulátoru podle daného

kritéria nemusí být realizovatelné na reálném systému, nebo je realizovatelné, avšak akční veličina je výrazně v saturaci. Je tedy vhodné regulační pochod sledovat a nastavit počet iterací při výpočtu funkce „fminsearch“ tak, aby byl regulační pochod realizovatelný na reálném systému. Optimalizované parametry regulátoru jsou také závislé na zvoleném počátečním nastavení regulátoru.

4.4 PID – regulace poruchy

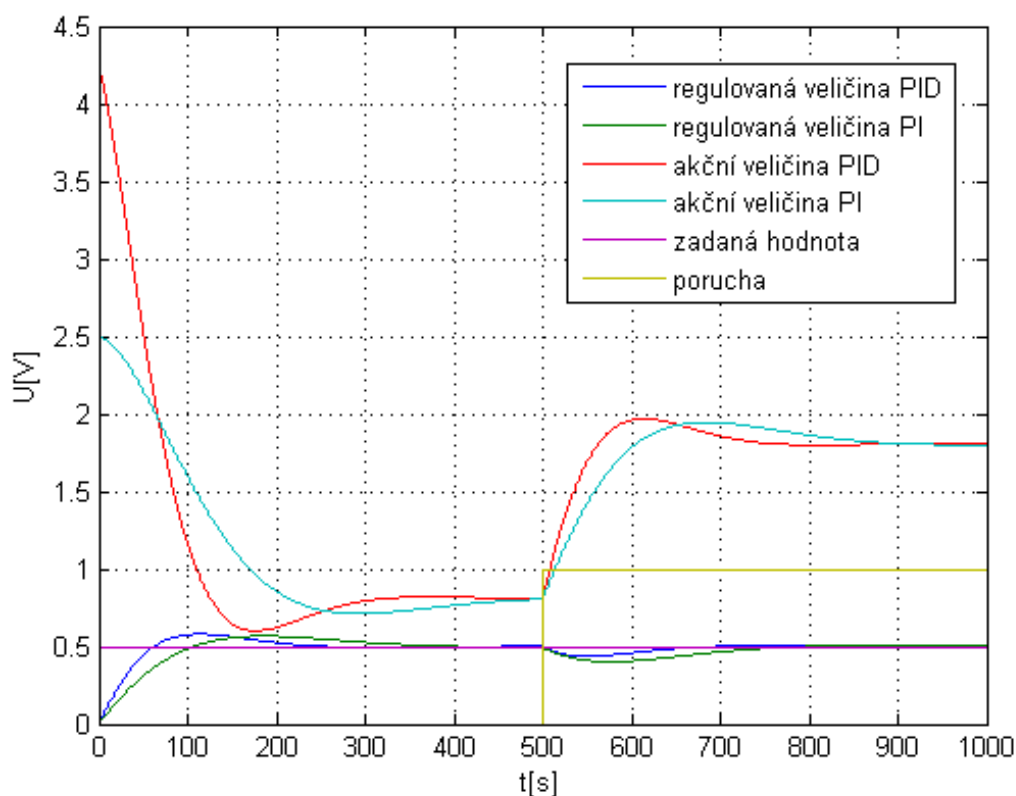
Pomocí metody numerické optimalizace jsem se pokusil nastavit PID regulátor, tak aby zajistil optimální regulaci poruchy. Jako podstatné se ukázalo počáteční nastavení parametrů regulátoru. Zkoušel jsem různé počáteční parametry. Protože jsem chtěl, aby optimalizovaný regulační pochod příliš nekmital, zvolil jsem počáteční parametry nekmitavého regulačního pochodu.

$$P_0 = 5, \quad I_0 = 0,1, \quad D_0 = 0,01 \quad (4.9)$$

Výpočet jsem ukončil po šestnácti iteracích, kdy jsem dosáhl výrazného zlepšení regulačního pochodu reagujícího na poruchu oproti regulačnímu pochodu navrženého PI regulátoru experimentální metodou. Po více iteracích je porucha na simulačním modelu sice vyregulována rychleji, ale při regulaci na reálném systému je akční veličina často v saturaci a kmitá, pravděpodobně kvůli příliš velké derivační složce. Navíc akční veličina je z důvodu vyšších hodnot parametrů regulátoru více v saturaci. Optimalizovaný PID regulátor má tyto parametry:

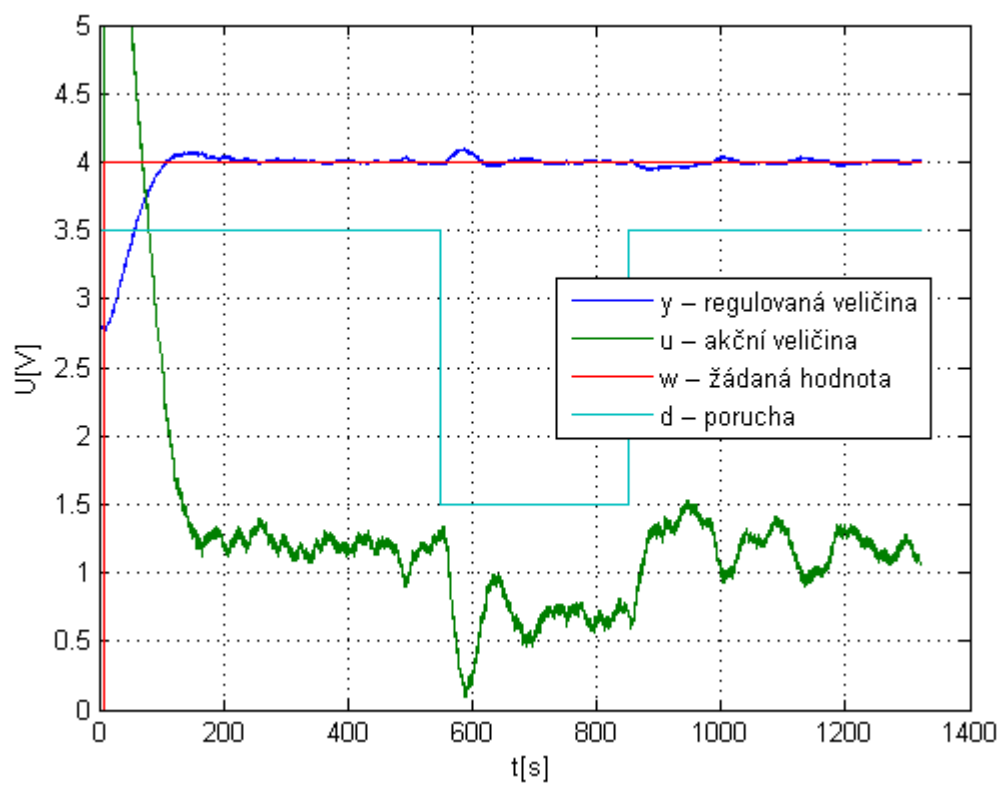
$$P = 8,5, \quad I = 0,1633, \quad D = 0,0075 \quad (4.10)$$

Porucha je na simulačním modelu při daném nastavení vyregulována za 180 s. To je o přibližně 70 s rychlejší než v případě PI řízení. Od žádané hodnoty se regulovaná veličina odchýlí o 0,06, tedy o asi 0,03 méně. Regulační pochod také rychleji dosáhne žádanou hodnotu, ale má o trochu větší překmit. Na žádané hodnotě se ustálí rychleji.



Obrázek 28: Porovnání optimalizovaného PID regulátoru s PI regulátorem

Při realizaci PID řízení na reálném systému bylo potřeba nastavit kvůli derivační složce vyšší vzorkovací frekvenci. Při vzorkovací periodě 0,5 s akční veličina kmitala mezi minimální a maximální hodnotou. Při zvýšení vzorkovací periody na 0,1 s, byl problém odstraněn. Při zařazení derivační složky je také vhodné filtrovat regulovanou veličinu ve zpětné vazbě. Použil jsem filtr FIR třetího řádu. Regulační pochod na reálném systému zobrazuje obrázek 29. PID regulátor vyreguloval poruchu na reálném systému za 55 s, to je o 43 s lepší než v případě PI regulace. Zvolené regulační pásmo regulovaná veličina překročila o 0,05, tedy přibližně o stejnou hodnotu jako v případě PI regulace. Při počátečním náběhu regulované veličiny na žádanou hodnotu se akční veličina dostává do saturace. Ta nám do regulačního pochodu zanáší nelinearitu. Regulátor lze v saturaci provozovat za předpokladu, že v regulátoru je implementována ochrana proti wind-up efektu.



Obrázek 29: PID regulace – odezva na poruchu

5 Závěr

V práci jsem se zabýval třemi hlavními tématy. Prvním bylo sestavení zjednodušeného matematického popisu systému. Druhým byla simulace matematického modelu, určení jeho parametrů a porovnání výsledků s naměřenými daty. Třetím tématem byl návrh a realizace řízení.

Matematický popis systému jsem sestavil na základě tepelné bilance v jednotlivých elementech média a ve stěně výměníku. Jako podstatné se ukázalo nezanedbání dynamiky stěny trubky, která byla v modelu, ze kterého jsem vycházel, zanedbána. Dynamika stěny má totiž výrazný vliv na rychlost změny teploty uvnitř trubky.

Simulaci jsem realizoval na základě odvozených parciálních diferenciálních rovnic v prostředí MATLAB Simulink. Aby bylo možné sestavit simulační obvod, převedl jsem rovnice na n diferenciálních rovnic. Simulační model jsem dále parametrizoval. Obtížně měřitelné parametry jsem odhadl na základě srovnání výstupu modelu s naměřenými daty. Aby bylo možné naměřená data se simulačními porovnávat, provedl jsem kalibraci senzorů teploty. V práci také diskutuji vliv odhadnutých parametrů na výstup simulačního modelu. Výstup z parametrizovaného modelu se shoduje s výstupy ze senzorů 2 a 3. Aby byla zajištěna shoda také na senzoru 4, bylo by potřeba sestavit složitější model, který by uvažoval také tlakové ztráty uvnitř trubky. Model se neshoduje s naměřenými daty při procesu chlazení, kdy systém samovolně vychládá, protože systém do okolí odevzdává méně tepla, než by odpovídalo reálnému úbytku dodaného tepla na vstupu. Daný jev může být také částečně způsoben teplotním driftem na senzorech.

Návrh řízení jsem provedl nejprve na simulačním modelu. Použil jsem model určený experimentální identifikací, který je přesnější než model určený na základě matematicko-fyzikální analýzy. PI regulátor jsem seřídil, tak aby umožňoval relativně dobré sledování žádané hodnoty i vyregulování poruchy. Lepší odezvu na poruchu měl regulační obvod s kompenzací měřené poruchy, kdy se porucha na regulované veličině téměř neprojevila. O něco lepší regulaci poruchy poskytl také PID regulátor seřizený pomocí numerické optimalizace.

Výsledky práce by měly usnadnit práci s úlohou při výuce. Systém je velmi pomalý, a proto rozsáhlejší měření jsou při výuce z časových důvodů nerealizovatelná. Jako možné další rozšíření práce se nabízí realizace řízení za pomoci programovatelného automatu nebo zpřesnění modelu uvažováním tlakových ztrát uvnitř trubky.

Seznam použité literatury

- [1] BLAHA, Petr a Petr VAVŘÍN. *Řízení a regulace I: Elektronické skriptum VUT* [online]. [cit. 2016-04-3]. Dostupné z:
www.uamt.feec.vutbr.cz/~richter/vyuka/0809_BRR1/texty/brr1.pdf
- [2] Dostál, P., Gazdoš, F.: *Řízení technologických procesů. Učební texty vysokých škol. FAI UTB ve Zlíně*, 2006. ISBN 80-7318-465-6, 98p.
- [3] KLÁN, Petr. Metody zlepšení PI regulace. *AUTOMA* [online]. 2001(12), 4 – 10 [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://automa.cz/download/au120104.pdf>
- [4] MODRLÁK, Osvald a Lukáš HUBKA. 2012. *Automatické řízení: učební text*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 292 s. ISBN 978-80-7372-850-2.
- [5] NOSKIEVIČ, Petr. *Modelování a identifikace systémů*. Ostrava: Montanex, 1999. ISBN 80-7225-030-2.
- [6] PETŘÍKOVÁ, Markéta a Pavel KRYŠTŮFEK. *Tabulky a diagramy pro termodynamiku*. Vyd. 5. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2013. ISBN 978-80-7372-945-5.
- [7] *PID Controller, Discrete PID Controller* [online]. 2016 [cit. 2016-04-15]. Dostupné z:
<http://www.mathworks.com/help/simulink/slref/pidcontroller.html>
- [8] VÍT, Martin. *Návrh a realizace pracoviště "teplota v trubce"*. Liberec, 2014. Bakalářská práce.
- [9] VOHLÍDAL, Jiří, Karel ŠTULÍK a Alois JULÁK. *Chemické a analytické tabulky*. 1. vyd. Praha: Grada, 1999. ISBN 978-80-7169-855-5.

Příloha A: Přiložené CD

CD obsahuje:

- Tuto práci v elektronické podobě
 - Bakalářská_práce_Boš_2016.docx
 - Bakalářská_práce_Boš_2016.pdf
 - Kopie_zadání_práce.pdf
- Simulační model
 - Porovnávány s parametrizačními daty
 - Porovnávány s verifikačními daty
- Data dokumentující drift senzorů
- Identifikační data
- Data k regulaci
 - Data z regulace na reálném systému
 - Skript optimalizující parametry PID regulace
 - Simulační model PI regulace
- Data ke statické charakteristice
- Převodní charakteristiky senzorů
 - Převodní charakteristiky senzorů.xlsx