

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA
V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKÉJ A POTRAVINÁRSKEJ TECHNOLOGIE

Ústav informatizácie, automatizácie a matematiky

Semestrálny projekt
Kaskádové regulácia laboratórneho výmenníka tepla

Vypracovala: Gabriela Beňová
Vedúca projektu: Doc. Ing. Monika Bakošová, CSc.

BRATISLAVA 2006

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKEJ A POTRAVINÁRSKEJ
TECHNOLÓGIE STU V BRATISLAVE**

Oddelenie informatizácie a riadenia procesov

Číslo: 1/2006

Vec: Zadanie semestrálneho projektu na ukončenie bakalárskeho štúdia.

1. Meno študenta /ky/: Gabriela Beňová

(u vydatých aj rodné)

2. Meno vedúceho projektu: doc. Ing. Monika Bakošová, CSc.

3. Názov projektu:

/So všetkými podrobnosťami: formulácia úlohy, rozsahu, podmienok riešenia, harmonogramu riešenia a pod./

Kaskádová regulácia laboratórneho výmenníka tepla

4. Termín odovzdania záverečnej práce projektu: 20. 05. 2006

5. Záverečná práca projektu sa odovzdáva v 2 zviazaných exemplároch vedúcemu projektu.



Dátum: 20. 02. 2006

**Doc. Dr. Ing. Miroslav Fikar
vedúci oddelenia**

Ďakujem svojej školiteľke Doc. Ing. Monike Bakošovej, CSc.
Za odborné vedenie a rady pri získavaní teoretických
a praktických vedomostí potrebných k napísaniu tejto práce.

Obsah

1.	Úvod.....	5
2.	Teoretická časť.....	6
	Materiálová bilancia.....	6
	Entalpická bilancia.....	7
3.	Opis zariadenia.....	9
	Laboratórne zariadenie LTR700.....	9
	Ovládacie komponenty skrinky so zdrojom.....	10
	Predný panel skrinky so zdrojom.....	10
	Konvertor signálov.....	12
	Konektor CP1102.....	12
	Vstupno – výstupná karta.....	13
	Celkové prepojenie všetkých zariadení.....	14
4.	Riadenie.....	15
	Jednoduché riadiace obvody.....	15
	Kaskádové riadiace obvody.....	16
	Identifikácia vyhodnotením prechodovej charakteristiky.....	17
5.	Riadenie LTR700 pomocou jednoduchého spätnoväzbového obvodu riadenia.....	18
	Identifikácia riadeného systému.....	18
	Riadenie pomocou jednoduchého spätnoväzbového obvodu.....	24
6.	Kaskádová regulácia – rozvetvený spätnoväzbový obvod riadenia s pomocnou riadenou veličinou.....	30
	Identifikácia pomocného riadeného systému.....	30
	Riadenie pomocného riadeného systému.....	32
	Identifikácia hlavného riadeného systému.....	35
	Riadenie LTR700 s použitím kaskádovej regulácie.....	36
7.	Porovnanie jednoduchého a kaskádového riadenia.....	39
8.	Záver.....	41
9.	Zoznam použitých symbolov.....	42
10.	Literatúra.....	43

1. Úvod

Výrobné pochody sa postupom času neustále zdokonaľujú, pričom môžeme zaznamenať značnú automatizáciu. Automatizácia je zložitým procesom, do ktorého zahŕňame jednak veľmi jednoduché riadiace úkony, vykonávané automaticky na pomerne jednoduchom zariadení alebo automatické vykonávanie jednoduchých operácií, ako aj veľmi zložité riadenie veľkých výrobných celkov.

Riadiaci systém ako celok tvoria technické zariadenia a ľudský faktor. Od riadiaceho systému sa vyžaduje: potlačenie vplyvu porúch, zaistenie stability procesov a optimálna prevádzka procesov.

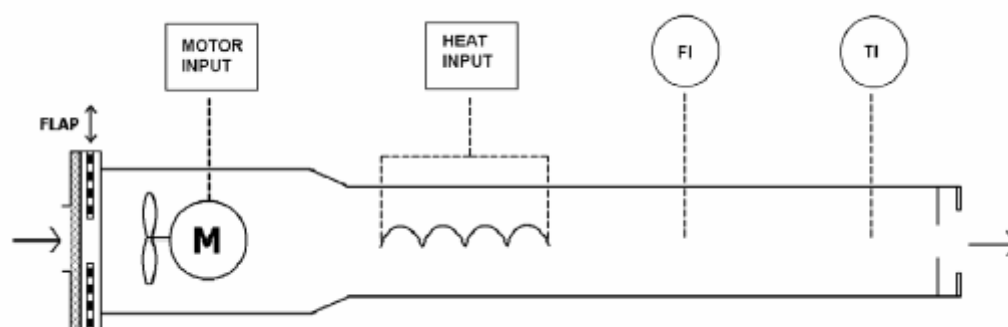
Riadenie je cieľavedomá činnosť, pri ktorej sa hodnotia a spracovávajú informácie o riadiacom procese a podľa nich sa ovládajú príslušné zariadenia tak, aby sa dosiahol určitý vytýčený cieľ.

Práca sa zaoberá riadením laboratórneho zariadenia LTR700, ktoré slúži ako teplovzdušný výmenník tepla. Riadiacou veličinou sú otáčky ventilátora a riadenou teplota na výstupe z výmenníka. V práci sú navrhnuté regulátory pomocou experimentálnych metód návrhu regulátorov a to pre jednoduché spätnoväzbové zapojenie systému a rozvetvené spätnoväzbové zapojenie s pomocnou riadenou veličinou — kaskádová regulácia. Pomocnou riadenou veličinou je prietok vzduchu vo výmenníku. Ďalej sa práca zaoberá porovnaním riadenia na žiadanú hodnotu teploty a riadenia na odstránenie poruchovej veličiny prietoku v jednoduchom riadiacom obvode a v obvode s kaskádovou reguláciou.

2. Matematický model laboratórneho zariadenia LTR 700

Návrh regulácie musí vychádzať z teoretického modelovania procesu. Teoretický model sa opiera o materiálovú a energetickú bilanciu. Bilancie slúžia na získanie diferenciálnych a diferenčných rovníc, ktoré opisujú daný proces. Podľa tvaru týchto rovníc vieme navrhnuť regulátor.

Materiálová bilancia



Obr. 1 Schéma zariadenia LTR 700

Predpokladáme, že teplota pri ktorej prúdi vzduch cez potrubie kruhového prierezu s miešadlom je konštantná. Drsnosť a rozmery potrubia nevplyvajú na objemový tok cez miešadlo. Podľa [1] je objemový tok $\dot{V}_M$ cez miešadlo priamo úmerný frekvencii otáčania f .

$$\dot{V}_M = k D_M^3 f \quad (1)$$

kde k je súčiniteľ úmernosti, ktorého hodnota sa určuje meraním a zvyčajne sa vyjadruje ako funkcia Reynoldsovho čísla miešadla, D_M je priemer miešadla.

Celkovú bilanciu opisuje rovnica

$$\frac{d}{dt}(\rho V) = \rho k D_M^3 f - \rho \dot{V} \quad (2)$$

V ustálenom stave platí

$$0 = \rho k D_M^3 f_s - \rho \dot{V}_s \quad (3)$$

Odčítaním týchto rovníc dostaneme

$$\frac{d}{dt}(\rho(V - V_s)) = \rho k D_M^3 (f - f_s) - \rho(\dot{V} - \dot{V}_s) \quad (4)$$

Urobíme substitúciu $\dot{V} - \dot{V}_s = \Delta\dot{V}$, $f - f_s = \Delta f$, celý výraz sa podelí hustotou a vykoná sa Laplaceova transformácia s nulovými počiatočnými podmienkami.

$$s\Delta\dot{V}(s) = kD_M^3 \Delta F(s) - \Delta\dot{V}(s) \quad (5)$$

Výsledný prenos bude mať tvar

$$\frac{\Delta V(s)}{\Delta F(s)} = \frac{kD_M^3}{s+1} = \frac{Z_v}{T_v s + 1} \quad (6)$$

V dokumentácii k laboratórnemu zariadeniu bol identifikovaný prenos prietoku vzhľadom na frekvenciu otáčok vrtule v tvare

$$G_v(s) = \frac{0,9}{1,3s + 1} \quad (7)$$

Entalpická bilancia

Uvažujeme ohrev prúdiaceho vzduchu cez elektricky vyhrievanú špirálu.

Pre tepelnú bilanciu elektrického odporového ohrevu podľa [2], [3] platí rovnica

$$\frac{d}{dt}(m_K c_{pK}(T_K - T_0)) = W_{el} - \alpha F(T_K - T_0) \quad (8)$$

kde m_K je hmotnosť zohrievaného kovu (odporového drôtu), c_{pK} je špecifická tepelná kapacita odporového kovu, T_K je teplota povrchu kovu, T_0 je teplota okolia, W_{el} je elektrický výkon, α je kombinovaný súčiniteľ prestupu tepla a F je teplo výmenný povrch kovu.

Pre ustálený stav bude platiť rovnica

$$0 = W_{el,s} - \alpha F(T_{K,s} - T_0) \quad (9)$$

Odčítaním rovnice (9) od rovnice (8) dostaneme

$$\frac{d}{dt}(m_K c_{pK} \Delta T_K) = \Delta W_{el} - \alpha F \Delta T_K \quad (10)$$

kde $\Delta T_K = (T_K - T_{K,s})$ a $\Delta W_{el} = W_{el} - W_{el,s}$. Po vykonaní Laplaceovej transformácie s nulovými počiatočnými podmienkami dostaneme prenos v tvare

$$\frac{\Delta T_K(s)}{\Delta W_{el}(s)} = \frac{\frac{1}{\alpha F}}{\frac{m_K c_{pK}}{\alpha F} s + 1} = \frac{Z_T}{T_T s + 1} \quad (11)$$

V dokumentácii k zariadeniu bol uvedený prenos

$$G_T(s) = \frac{1,05}{57s + 1} \quad (12)$$

Ak budeme uvažovať potrubie, v ktorom prúdi vzduch, ktorý je vyhrievaný odporovým ohrevom, tak koeficient prestupu tepla bude funkciou prietoku. Na opísanie závislosti koeficientu prestupu tepla α od objemového prietoku použijeme nasledovnú entalpickú bilanciu.

$$\alpha F(T_K - T_0) = \rho \dot{V} c_{p,vz} (T - T_0) + \dot{Q}_{str} \quad (13)$$

Pri dostatočne silnom prúdení vzduchu sa takmer všetko teplo, čo sa mení cez plochu F , spotrebuje na ohriatie vzduchu, takže člen $\dot{Q}_{str}$ môžeme zanedbať. Vyjadríme si teraz objemový prietok z rovnice (13).

$$\dot{V} = \frac{\alpha F}{\rho c_{p,vz}} \frac{T_K - T_0}{T - T_0} \quad (14)$$

Vo vzťahu (14) nepoznáme rozdiel $T_K - T_0$. Nahradíme ho preto z rovnice (9), ktorá platí pre ustálený stav. Ak dosadíme hodnoty v základných jednotkách vo vzťahu (15), ktoré boli určené pri 50% prietoku, 50% výkone elektrickej špirály, strednej teplote 33,5 °C (teplota okolia 17 °C, teplota vzduchu 50 °C), normálnom tlaku, vyjde nám hodnota prietoku

$$\dot{V} = \frac{W_{el,s}}{\rho c_{p,vz} (T_s - T_0)} \quad (15)$$

$$\dot{V} = \frac{50}{1,132 \cdot 1005 (50 - 17)} = 1,3318 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} = 4,79 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$$

Pri vytváraní matematického modelu sme použili zjednodušujúce predpoklady, za ktorých sa dosiahli predchádzajúce závery. V prvom rade sme za podklady brali merania, ktoré boli dodané v dokumentácii k zariadeniu. Všetky dodané údaje boli v percentách a chýbali im reálne priradenia fyzikálnych veličín. Jediným údajom o fyzikálnych jednotkách boli rozsahy snímačov teploty a prietoku. Rozsah teplotného snímača bol 25 až 75 °C a rozsah prietokového tlakomera bol 0 až 50 mm H₂O.

3. Opis zariadenia

Laboratórne zariadenie LTR700

Laboratórne zariadenie LTR700 (obr.2) je teplovzdušný výmenník tepla, pomocou ktorého možno overovať rozmanité algoritmy riadenia reálneho procesu. V prípade potreby je ho možné prepnúť na manuálne riadenie.

Komunikácia so zariadením prebieha štyrmi signálmi. Signály na obr. 1 v obdĺžnikoch sú riadiace veličiny a v krúžkoch sú merané veličiny. Otáčky motora sú ovládané signálom MOTOR INPUT, výkon špirály je HEAT INPUT. Signál FI reprezentuje prietok v m^3h^{-1} a TI je teplota v stupňoch Celzia.

Súčasťou zariadenia je aj klapka umiestnená v nasávacej časti. Klapkou sa inicializuje skoková porucha. Klapka je priamo prepojená s pákou, ktorá je pomocou magnetu udržiavaná vo vertikálnej pozícii. V tejto polohe je minimálny prietok vzduchu, pohyb páky do horizontálnej polohy vedie k otvoreniu klapky. Páka je ovládaná manuálne.

Meranie prietoku zabezpečuje piezoelektrický tlakový snímač, ktorého súčasťou je prevodník na elektrický prúd v rozsahu 4-20 mA. Snímanie teploty sa deje pomocou odporového teplomera, ktorý má takisto nastavený výstupný rozsah na 4-20 mA.

Skoková funkcia ohrevu sa dosiahne pomocou vypínača s polohami „0“ a „1“, ktorý sa nachádza na pripojenej skrinke. Minimálny ohrev je pri polohe „0“ ($100\ \Omega$) a maximálny pri polohe „1“, čo zodpovedá odporu $75\ \Omega$.

Nasávaný vzduch sa filtruje vzduchovým filtrom v blízkosti klapky, prechádza vrtuľou a naráža na špirálu, kde sa ohrieva. Nasávacia časť trubice má väčší prierez ako výstupná časť. Pred vstupom do priestoru špirály sa prierez zužuje a vyvoláva tak väčšie prúdenie v okolí špirály. Prestup tepla do vzduchu sa deje kombináciou prúdenia, vedenia a žiarením.



Obr. 2 Teplovzdušný výmenník tepla

Ovládacie komponenty skrinky so zdrojom

Vstupná jednotka prepojenia na sieť sa nachádza na zadnom paneli skrinky, ktorá má dve poistky v podobe sklenených trubíc ako aj vstupný filter (SCHAFFNER, FN 9260-2-06).

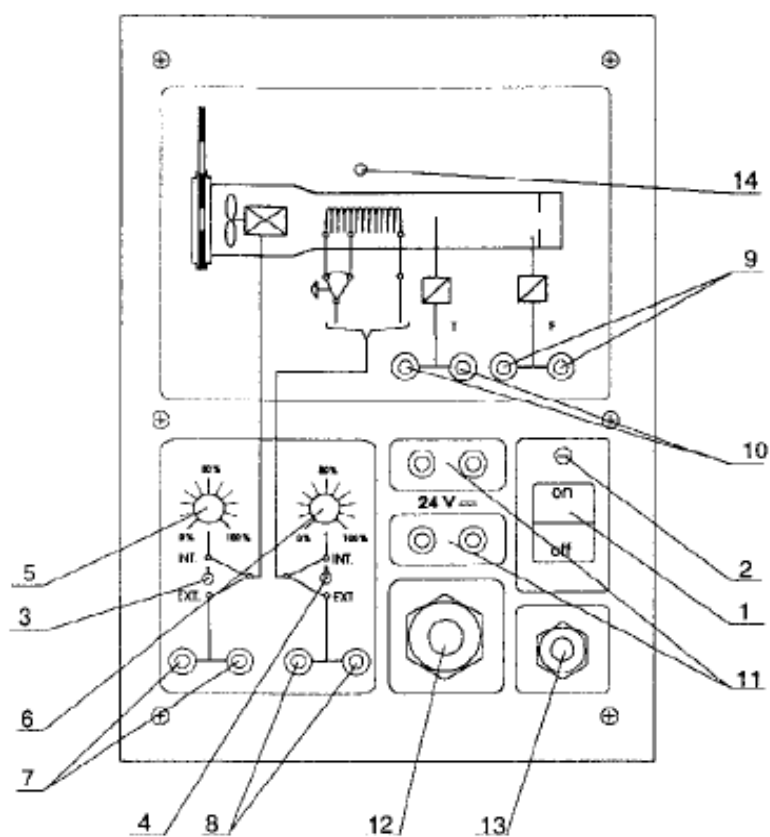
Predný panel skrinky so zdrojom

Na obr. 3 sú komponenty nachádzajúce sa na prednom paneli skrinky.

Jednotlivé označenia na obrázku znamenajú:

1. hlavný vypínač
2. svetelná kontrolka signalizujúca zapnutie zariadenia
3. prepínač (INT/EXT) na výber medzi interným a externým riadením otáčok ventilátora
4. prepínač (INT/EXT) na výber medzi interným a externým riadením ohrevu

5. potenciometer na nastavenie otáčok ventilátora pri internom riadení
6. potenciometer na nastavenie ohrevu ventilátora pri internom riadení
7. (prúdový) vstup (4 –20mA) na riadenie otáčok externe
8. vstup (4 –20mA) na riadenie ohrevu externe
9. meraný výstup (4 –20mA) zo senzora prietoku vzduchu
10. meraný výstup (4 –20mA) zo senzora teploty
11. dva elektricky izolované výstupy (2*24V DC)
12. vývod pre dátový kábel meraných signálov a riadiaceho signálu otáčok
13. vývod pre riadiaci signál ohrevu
14. svetelná kontrolka indikujúca činnosť ohrevného zariadenia



Obr. 3 Predný panel skrinky so zdrojom

Konvertor signálov

Konvertory signálov slúžia na zmenu rozsahov vstupných a výstupných napäťových signálov smerujúcich na vstupno – výstupnú kartu alebo z nej vychádzajúcich. Konvertor signálov, napojený na LTR700, transformuje signál z 4-20mA na $\pm 10V$ a v opačnom smere z $\pm 10V$ na 4-20mA.

Konektor CP1102



Obr. 4 Dátový konektor CP1102

Dátový konektor CP1102 (obr. 4) umožňuje prepojenie medzi vstupno – výstupnou kartou DS1102 a prístrojom LTR700, ktorý je k nej pripojený. Prístroje môžu byť ku konektoru pripojené a odpojené individuálne a sú zameniteľné bez spájkovania.

Vstupno – výstupná karta

Podľa údajov z [4] má vstupno – výstupná karta tieto parametre:

typ: DS 1102 DSP

technické detaily:

procesor: TMS320C31
60 MHz časový
33,3 ns (čas cyklu)
4 externé prerušenia

pamäť: 128 K*32 bit RAM
2 K*32 bit RAM

analogové vstupy:

- 2 paralelné 16 bit kanály, 4 μ s (prepočítavací čas)
- 2 paralelné 12 bit kanály, 1.25 μ s
- simultánne vzorkovanie a pozastavenie
- ± 10 V vstup (rozsah napätí)
- >80 dB (16 bit) / 65 dB (12 bit) pomer šumového signálu

analogové výstupy:

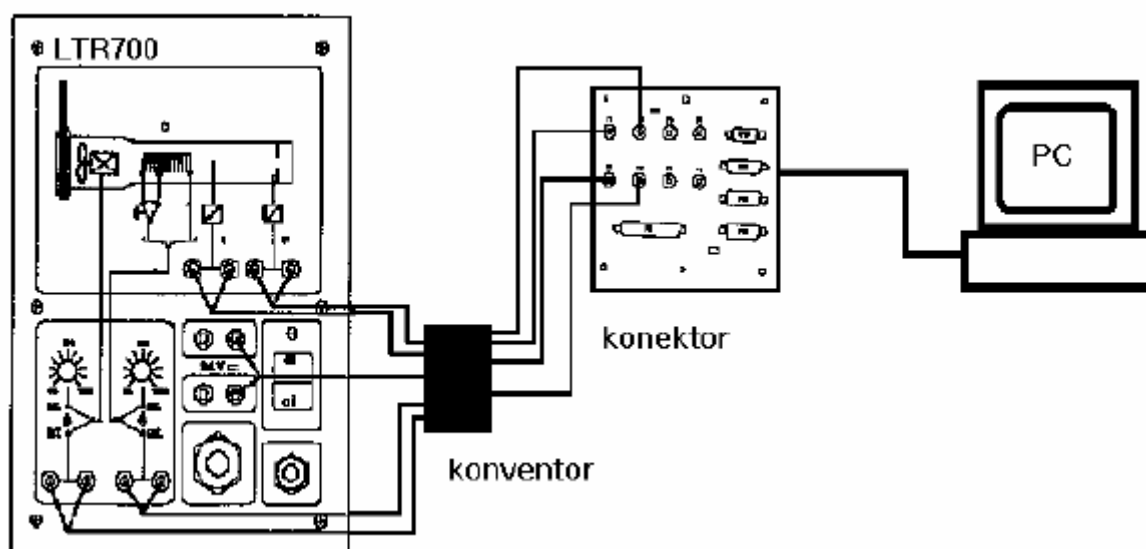
- 4 paralelné 12 bit kanály
- 4 μ s prechodový čas
- ± 10 V výstupy

digitálne I/O:

- programovateľný digitálny I/O podsystem založený na TI 25 MHz TMS320P14 DSP
- 16 digitálnych I/O vedení
- zachytávací/porovnávací jednotka s 8 kanálmi (2 dnu, 4 von, 2 dnu/von)
- PWM (vyvíjanie) na 6- tich kanáloch
- užívateľské prerušenie

Celkové prepojenie všetkých zariadení

Výsledné zapojenie laboratórneho zariadenia LTR700, konvertora signálov, konektora a osobného počítača vybaveného vstupno – výstupnou kartou DS 1102 DSP je na obrázku 5.



Obr. 5 Celkové prepojenie

4. Riadenie

Riadenie je cieľavedomé pôsobenie na riadený objekt, ktoré zabezpečuje dosiahnutie požadovaného cieľa.

Riadiaci systém je integrálnou súčasťou technológie a vyžaduje sa od neho:

- potlačenie vplyvu porúch
- zaistenie stability procesov
- optimálna prevádzka procesov

Riadenie procesu prestupu tepla v našom prípade je cieľavedomú pôsobenie na proces tak, aby sme teplotu vzduchu na výstupe z LTR700 udržali pri zmene prevádzkových podmienok procesu na žiadanej hodnote, alebo v jej okolí pomocou akčnej veličiny.

Požiadavka znalosti odozvy procesu na zmenu akčnej a poruchovej veličiny je požiadavkou na znalosť dynamických vlastností procesu, teda na znalosť procesu v neustálenom stave.

Pri riadení vychádzame z matematického modelu procesu opísaného v kapitole 2. Na riadenie LTR700 môžeme použiť jednoduché spätnoväzbové obvody riadenia alebo rozvetvený spätnoväzbový obvod riadenia s pomocnou riadenou veličinou – kaskádovú reguláciu.

Jednoduché riadiace obvody

Štandardné spätnoväzbové riadenie (obr.6) predpokladá existenciu jedinej meranej riadenej výstupnej veličiny a jedinej akčnej veličiny v jednom spätnoväzbovom obvode.

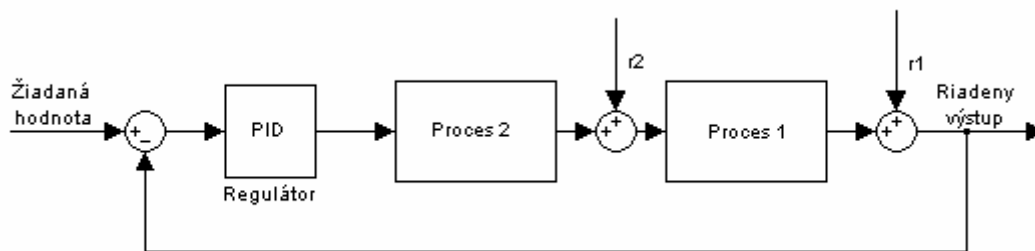
V prípade laboratórneho zariadenia LTR700 je to:

- riadenie prietoku vzduchu pri neriadenej teplote
- riadenie teploty pomocou ohrevu pri neregulovanom prietoku vzduchu
- riadenie teploty pomocou otáčok ventilátora pri neregulovanom ohreve

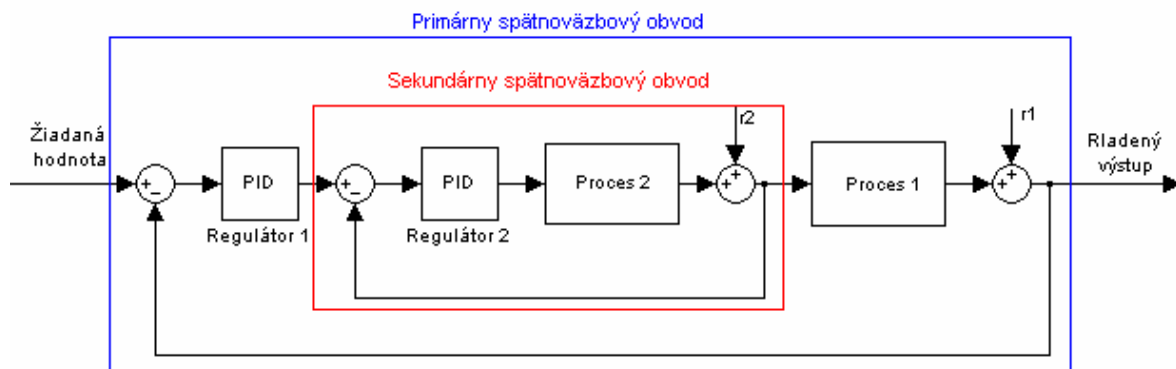
Kaskádové riadiace obvody

Pri kaskádovom riadení je k dispozícii viac ako jeden meraný výstup a len jedna akčná veličina [5]. Je známe že na zvolenú žiadanú hodnotu môže byť pomocou jednej akčnej veličiny riadený len jeden výstup. Tento riadený výstup považujeme za primárny, ďalšie merané výstupy majú pomocný charakter.

Uvažujeme riadený objekt s dvomi prebiehajúcimi procesmi, procesom 1 a procesom 2. Proces 1 považujeme za primárny, proces 2 za sekundárny. Riadeným výstupom, ktorý riadime na zvolenú žiadanú hodnotu, je meraný výstup z procesu 1. Riadiaci systém obsahuje dva spätnoväzbové obvody, primárny a sekundárny. Primárny spätnoväzbový obvod má v spätnej väzbe regulátor 1, sekundárny obvod regulátor 2. Výstup z procesu 2 je vstupom do procesu 1. Žiadanou hodnotou pre výstup z procesu 2 je výstup z regulátora 1. Riadiaci systém je znázornený na obr. 7 a je porovnaný so štandardným spätnoväzbovým obvodom na obr. 6. Veličiny r_1 , r_2 na oboch obrázkoch označujú poruchy vstupujúce do meraní.



Obr. 6 Štandardné spätnoväzbové zapojenie



Obr. 7 Kaskádové riadenie

V prípade zariadenia LTR700 je to:

- riadenie teploty ako primárnej riadenej veličiny a prietoku ako sekundárnej riadenej veličiny pomocou manipulácie s ohrevom
- riadenie teploty ako primárnej riadenej veličiny a prietoku ako sekundárnej riadenej veličiny pomocou manipulácie s otáčkami ventilátora

Identifikácia vyhodnotením prechodovej charakteristiky

Jedným z najčastejšie používaných vstupných signálov pre približné určenie dynamických vlastností regulovaného objektu, je skoková zmena jednej zo vstupných veličín pri zachovaní ostatných vstupných veličín konštantných. Pred uskutočnením skokovej zmeny je nutné, aby bol skúmaný systém v ustálenom stave. Časový priebeh výstupnej veličiny, ktorý je odozvou na skokovú zmenu jednej zo vstupných veličín, voláme reálnou prechodovou charakteristikou (PCH). Možno z nej identifikovať prenos riadeného objektu.

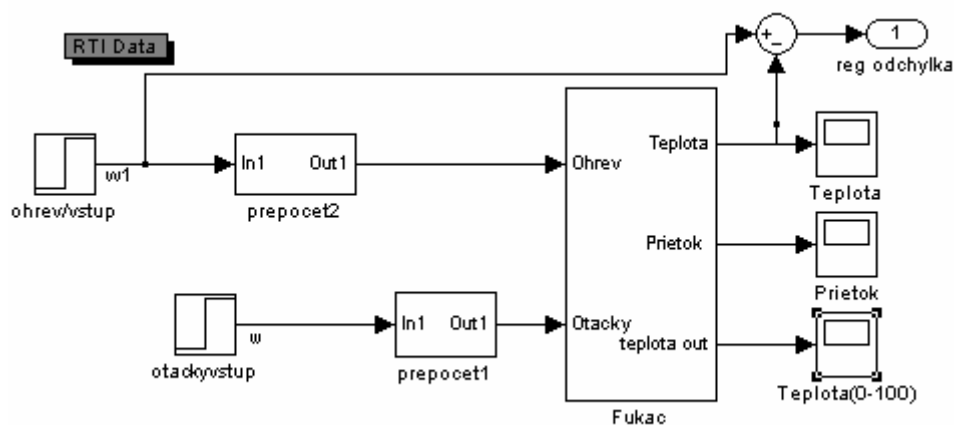
5. Riadenie LTR700 pomocou jednoduchého spätnoväzbového obvodu riadenia

Identifikácia riadeného systému

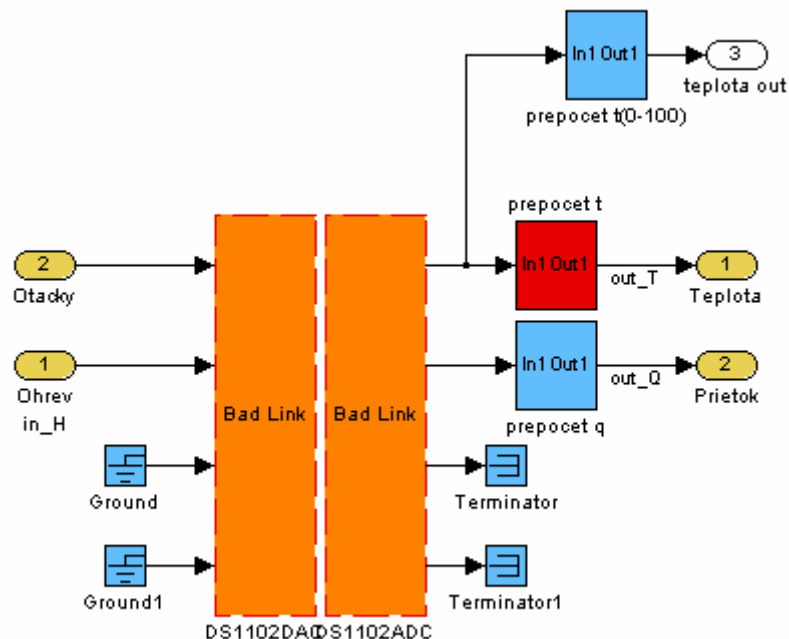
Pre návrh regulátora na riadenie teploty vzduchu na výstupe z LTR700 otáčkami ventilátora najprv treba zidentifikovať prenos riadeného systému.

Identifikácia LTR700 ako systému 1. rádu

Schéma pre odmeranie prechodovej charakteristiky LTR 700 je na obr. 8. Pričom akčná veličina sú otáčky a meraná veličina teplota v percentách rozsahu. Ohrev je konštantný. Bloková schéma laboratórneho výmenníka tepla v Simulinku je na obr. 9.



Obr. 8 Schéma pre meranie odozvy teploty na skokovú zmenu otáčok pri konštantnom ohreve



Obr. 9 Bloková schéma laboratórneho výmenníka tepla v Simulinku

Dynamické vlastnosti identifikovaného systému sme vyhodnotením prechodovej charakteristiky Strejcovou metódou [6] aproximovali pomocou náhradného prenosu v tvare:

$$G(s) = \frac{Z}{(Ts + 1)^n} e^{-Ds} \quad (16)$$

kde Z je zosilnenie, T časová konštanta, D dopravné oneskorenie systému a n rád systému.

Z prechodovej charakteristiky závislosti teploty od otáčok (Obr. 10) sme odčítali hodnoty:

$$\begin{aligned} y_0 &= 74,443 \% \text{ rozsahu} & t_0 &= 480,632 \text{ s} \\ y_\infty &= 50,560 \% \text{ rozsahu} & t_1 &= 486,249 \text{ s} \\ t_2 &= 548,158 \text{ s} \end{aligned}$$

pričom y je teplota a t je čas.

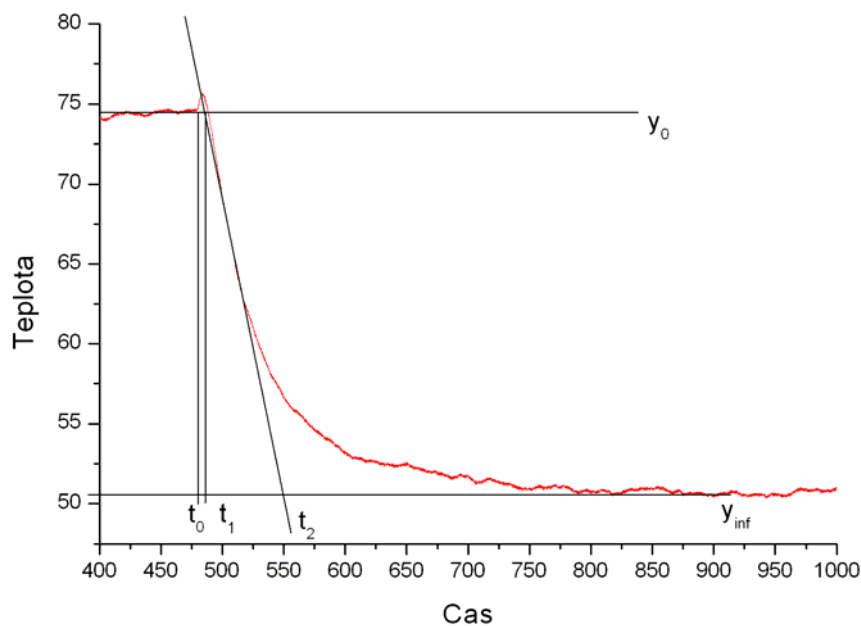
Skoková zmena otáčok:

$$\begin{aligned} u_0 &= 20 \\ u_\infty &= 60 \end{aligned}$$

Zosilnenie systému som vypočítala zo vzorca

$$Z = \frac{y_\infty - y_0}{u_\infty - u_0} \quad (17)$$

Pre zosilnenie systému platí $Z = -0,597$.



Obr.10 Identifikácia Strejcovou metódou

Čas prietahu t_u a čas nábehu t_n sme vypočítali podľa vzorcov

$$t_u = t_1 - t_0 \quad (18)$$

$$t_n = t_2 - t_1 \quad (19)$$

$t_u = 5,617s$ a $t_n = 61,909s$.

Rád systému n sme určili podľa tabuľky pre Strejcovu metódu identifikácie [6], tak aby platila podmienka:

$$f(n) \leq f_s < f(n+1) \quad (20)$$

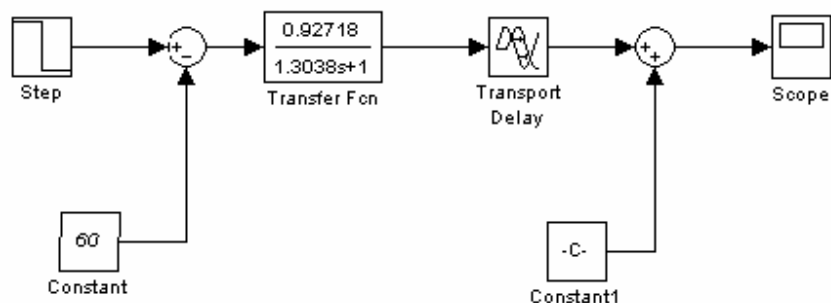
$$f(n) = \frac{t_u}{t_n} = \frac{5,617}{61,909} = 0,091 \Rightarrow n = 1 \quad (21)$$

Pre systém 1. rádu platí pre časovú konštantu $T = t_n = 61,9s$ a pre dopravné oneskorenie $D = t_u = 5,6s$.

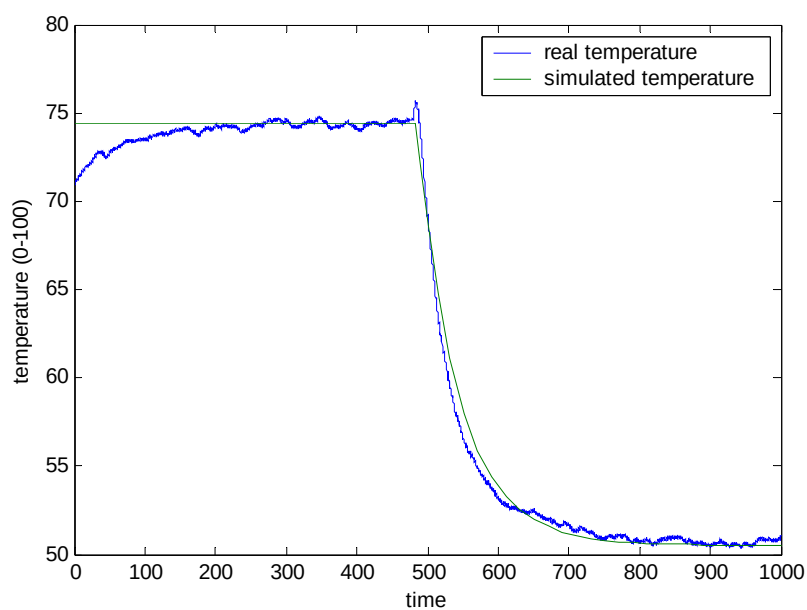
Prenos systému nadobudne tvar:

$$G(s) = \frac{-0,6098}{66,5576s + 1} e^{-5,6s} \quad (22)$$

Na obr. 11 je schéma overenia identifikovaného prenosu a porovnanie reálnej PCH a simulovanej PCH systému 1. rádu získaného identifikáciou je na obr. 12.



Obr. 11 Schéma overenia identifikovaného prenosu



Obr. 12 Porovnanie reálnej PCH a simulovanej PCH systému 1. rádu získanej identifikáciou

Identifikácia LTR700 ako systému 2. rádu

Analogický postup ako v prípade v prípade identifikácie 1. rádu s výnimkou tohože pre časovú konštantu platí

$$T = g(n) * t_n \quad (23)$$

Z prechodovej charakteristiky sme odčítali hodnoty:

$$y_0 = 74,443 \% \text{ rozsahu} \quad t_0 = 480,632s$$

$$y_\infty = 50,560 \% \text{ rozsahu} \quad t_1 = 487,373s$$

$$t_2 = 548,158s$$

pričom y je teplota a t je čas.

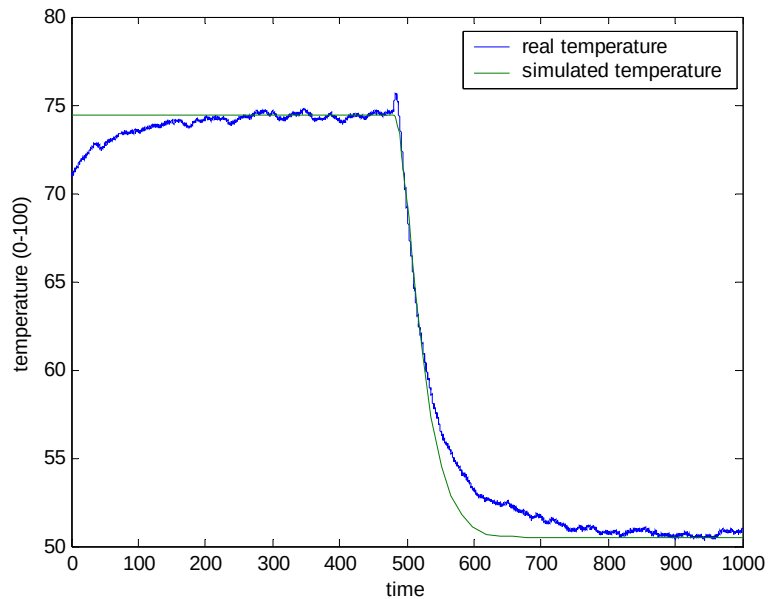
Frekvencia otáčok na vstupe bola $u_0 = 20$ a menila sa skokom na hodnotu $u_\infty = 60$
Zosilnenie systému je $Z = -0,597$ a pre hodnoty $t_u = t_1 - t_0 = 6,740s$ a $t_n = t_2 - t_1 = 60,786s$.

Rád systému n som určila podľa vzorca (21) a tabuľky pre Strejcovu metódu identifikácie [6], tak aby platila podmienka (20)

$$f(n) = \frac{6,740}{60,786} = 0,111 \Rightarrow n = 2 \quad (24)$$

V tomto prípade prenos nadobúda tvar (25) a porovnanie reálnej PCH a simulovanej PCH systému 2. rádu získaného identifikáciou je na obr. 13.

$$G(s) = \frac{-0,597}{(22,4s + 1)^2} e^{-6,7s} \quad (25)$$



Obr. 13 Porovnanie reálnej PCH a simulovanej PCH systému 2. rádu získanej identifikáciou

Identifikácia LTR700 ako systému 1. rádu pre opačnú skokovú zmenu

Pre porovnanie sme merali prechodovú charakteristiku aj s opačnou skokovou zmenou na začiatku.

Z prechodovej charakteristiky sme odčítali hodnoty:

$$y_0 = 52,082 \% \text{ rozsahu} \quad t_u = 433,556 \text{ s}$$

$$y_\infty = 76,987 \% \text{ rozsahu} \quad t_n = 71,206 \text{ s}$$

Skoková zmena otáčok:

$$u_0 = 60$$

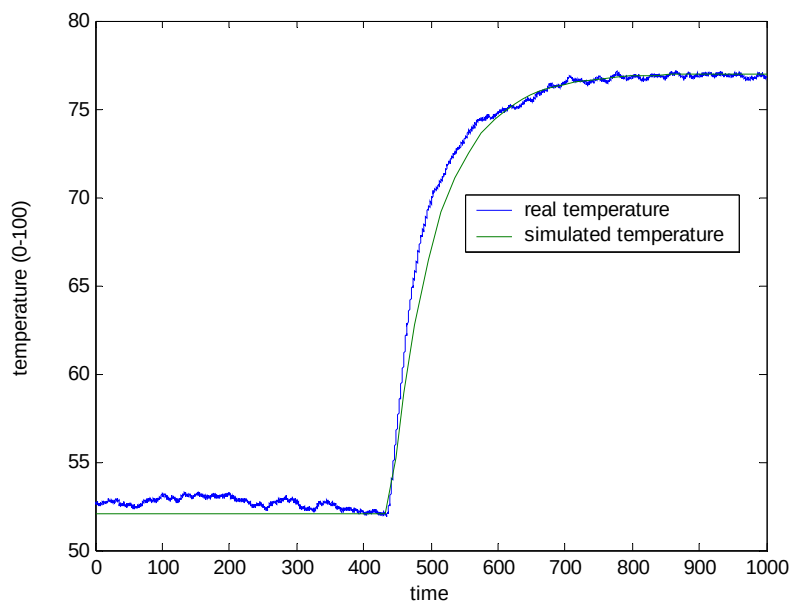
$$u_\infty = 20$$

Zosilnenie systému je $Z = 0,6226$ a časová konštantanta $T = t_n = 71,2 \text{ s}$.

Dopravné oneskorenie sme si určili rovnaké ako pre 1. rád: $D = 5,6 \text{ s}$.

Tak prenos nadobudol tvar (26). Porovnanie reálnej PCH a simulovanej PCH systému 1. rádu získaného identifikáciou je na obr. 14.

$$G(s) = \frac{-0,623}{(71,2s + 1)} e^{-5,6s} \quad (26)$$



Obr. 14 Porovnanie reálnej PCH a simulovanej PCH systému 1. rádu získaného identifikáciou

Riadenie pomocou jednoduchého spätnoväzbového obvodu

Na základe hodnôt $Z=0,6098$, $D=5,4$ s, $T=66,5576$ s a $n=1$ získaných identifikovaného prenosu (22) sme experimentálnymi metódami syntézy regulátorov vypočítali parametre regulátorov P a PI.

Experimentálne metódy návrhu parametrov regulátora

Zieglerovou-Nicholsovou metódou s využitím prechodovej charakteristiky sa určia parametre P regulátora v tvare (27) a PI regulátora v tvare (28).

$$G_R(s) = Z_r \quad (27)$$

$$G_R(s) = Z_r \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (28)$$

kde Z_r je proporcionálna zložka regulátora T_i je integračná a derivačná zložka je nulová.

Pri metóde priamej syntézy regulátora a použitím aproximovaného modelu sú určené konštanty: zosilnenie Z , doba prietahu t_u , doba nábehu t_n . Zvolí časová konštanta uzavretého regulačného obvodu (URO) menšia ako časová konštanta regulovaného systému. O URO sa predpokladá, že sa chová ako systém 1. rádu s dopravným oneskorením. Prenosy regulátorov budú mať tvary (27) a (28).

$$G_{URO}(s) = \frac{Z_{URO}}{T_{URO}s + 1} e^{-D_{URO}s} \quad (29)$$

Pre T_{URO} musí platiť:

$$T_{URO} \ll T, T_{URO} \ll t_n \quad (30)$$

Metódou Rivera – Morari sa určí prenos URO v tvare (29), pričom sú určené konštanty: zosilnenie Z , doba prietahu t_u , doba nábehu t_n . Doporučená voľba T_{URO} je v tab. 1. Prenosy regulátorov budú mať tvary (27) a (28).

Pri Cohen – Coonovej metóde sú určené konštanty: zosilnenie Z , doba prietahu t_u , doba nábehu t_n a rovnako ako pre Ziegler – Nicholsovu metódu platia vzťahy (27) a (28).

Haalmanovou metódou, metódou Chien – Hrones – Reswick a metódou Smith – Murrill sa určia prenosy v tvare (27) a (28). Pri metóde Smith – Murrill je podmienka uvedená v tab. 1.

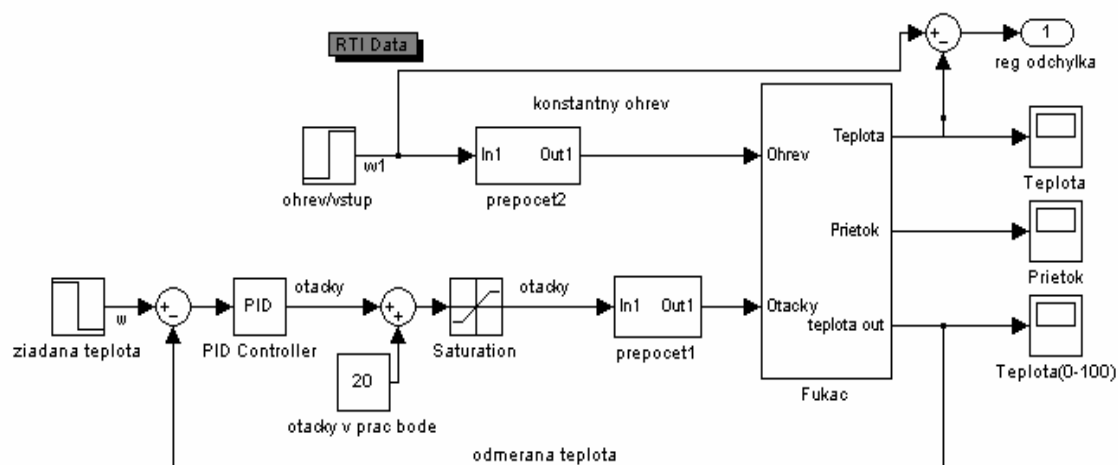
Tab. 1 Experimentálne metódy návrhu P a PI regulátorov

Metóda	Regulátor	Z_R	T_I	Podmienka
Ziegler-Nichols	P	$\frac{1}{Z} \frac{t_n}{t_u}$		
	PI	$\frac{0,9}{Z} \frac{t_n}{t_u}$	$3,33t_u$	
Metóda priamej syntézy regulátora	PI	$\frac{t_n}{Z(T_{URO} + t_u)}$	t_n	$T_{URO} < t_n$ $T_{URO} < T$
Cohen-Coon	P	$\frac{1}{Z} \frac{t_n}{t_u} \left[1 + \frac{1}{3} \frac{t_u}{t_n} \right]$		
	PI	$\frac{1}{Z} \frac{t_n}{t_u} \left[0,9 + \frac{1}{12} \frac{t_u}{t_n} \right]$	$t_u \left[\frac{30 + 3 \frac{t_u}{t_n}}{9 + 20 \frac{t_u}{t_n}} \right]$	
Rivera-Morari	PI	$\frac{2t_n + t_u}{2ZT_{URO}}$	$t_n + \frac{t_u}{2}$	$\frac{T_{URO}}{t_u} > 1,7$
Haalman	PI	$\frac{2T}{3D}$	T	
Chien-Hrones-Reswick s preregulovaním 0%	P	$0,3 \frac{T}{ZD}$		
	PI	$0,35 \frac{T}{ZD}$	$1,2T$	
Chien-Hrones-Reswick s preregulovaním 20%	P	$0,7 \frac{T}{ZD}$		
	PI	$0,6 \frac{T}{ZD}$	T	
Smith-Murrill	PI	$\frac{0,586}{Z} \left(\frac{T}{D} \right)^{0,916}$	$\frac{T}{\left[1,03 - 0,165 \frac{t_u}{t_n} \right]}$	$0,1 < \frac{D}{T} < 1$

Pri návrhu regulátora pre jednoduchý obvod sme použili metódy Ziegler – Nicholovu, Cohen – Coonovu metódu a metódu priamej syntézy regulátora s časovou konštantou uzavretého regulačného obvodu (T_{URO}) 10, 20, a 30. Parametre regulátorov sú v tab. 2. a schéma riadenia pomocou jednoduchého spätnoväzbového obvodu je na obr. 15.

Tab. 2 Parametre regulátorov pre jednoduchý obvod

Metóda syntézy regulátora	Regulátor	Parametre regulátora	
		Z_R	T_I
Ziegler-Nichols	P	20,2123	
	PI	2,021	17,9820
Metóda priamej syntézy	T_{URO}	10	
	PI	7,0894	66,5576
Metóda priamej syntézy	T_{URO}	20	
	PI	4,2971	66,5576
Metóda priamej syntézy	T_{URO}	30	
	PI	3,0832	66,5576
Cohen, Coon	P	20,7589	
	PI	18,3278	15,3742

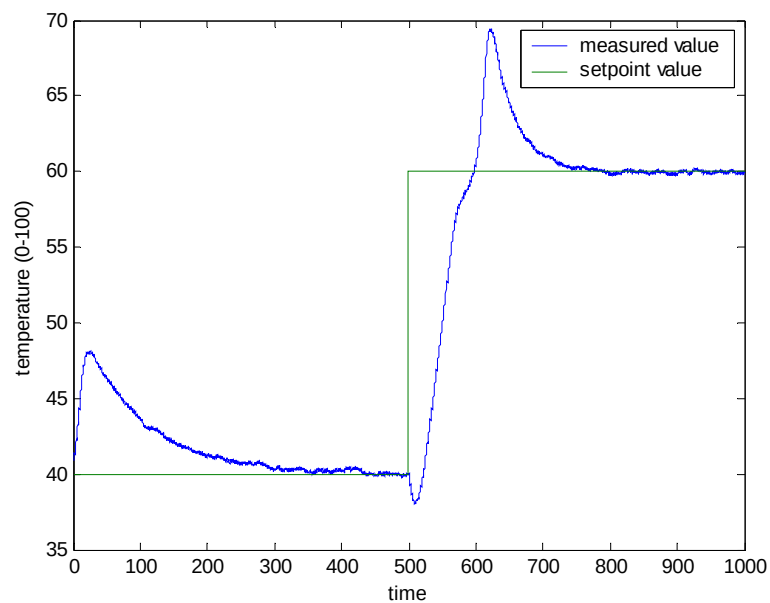


Obr. 15 Schéma riadenia pomocou jednoduchého spätnoväzbového obvodu

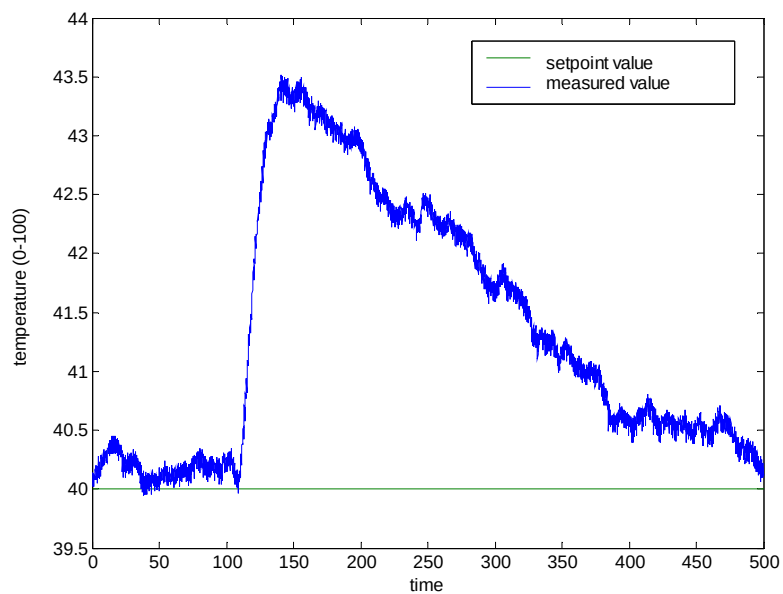
Ako prvé sme riadili na žiadanú hodnotu pri skokovej zmene žiadanej teploty zo 40 na 60 a následne sa odstraňoval vplyv poruchovej veličiny. Poruchu sme vytvorili zdvihnutím klapky do vertikálnej polohy čím sa znížil prietok vzduchu.

Z navrhnutých regulátorov jediný regulátor, ktorý ureguloval žiadanú veličinu bol regulátor navrhnutý metódou priamej syntézy s $T_{URO} = 30$ (obr. 16).

Regulácia poruchovej veličiny je na obr. 17.



Obr.16 Riadenie pomocou jednoduchého obvodu s PI regulátorom navrhnutým metódou priamej syntézy pri $sT_{URO}=30$

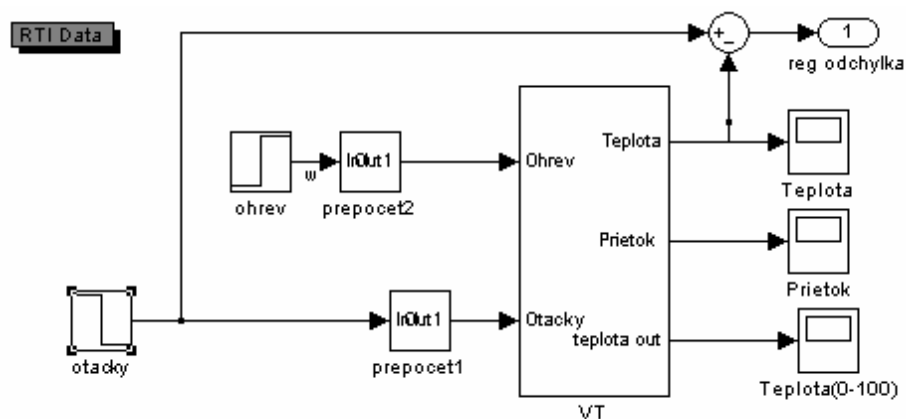


Obr.17 Regulácia poruchy pomocou jednoduchého obvodu s PI regulátorom navrhnutým metódou priamej syntézy pri $T_{URO}=30$

6. Kaskádová regulácia – rozvetvený spätnoväzbový obvod riadenia s pomocnou riadenou veličinou

Identifikácia pomocného riadeného systému

V kaskádovej regulácii je pomocnou riadenou veličinou prietok v závislosti od otáčok, preto ako prvé sme robili identifikáciu pomocného riadeného systému obr.18 Identifikovali sme Strejcovou metódou [6]



Obr. 18 Schéma pre meranie odozvy prietoku na skokovú zmenu otáčok pri konštantnom ohreve

Z prechodovej charakteristiky vyplýva:

$$y_0 = 36,646 \% \text{ rozsahu}$$

$$t_u = 0,1 \text{ s}$$

$$y_\infty = 72,671 \% \text{ rozsahu}$$

$$t_n = 1,220 \text{ s}$$

$$u_0 = 20$$

$$u_\infty = 60$$

Rád systému:

$$f(n) = \frac{t_u}{t_n} = \frac{0,1}{1,22022} = 0,082 \Rightarrow n = 1 \quad (31)$$

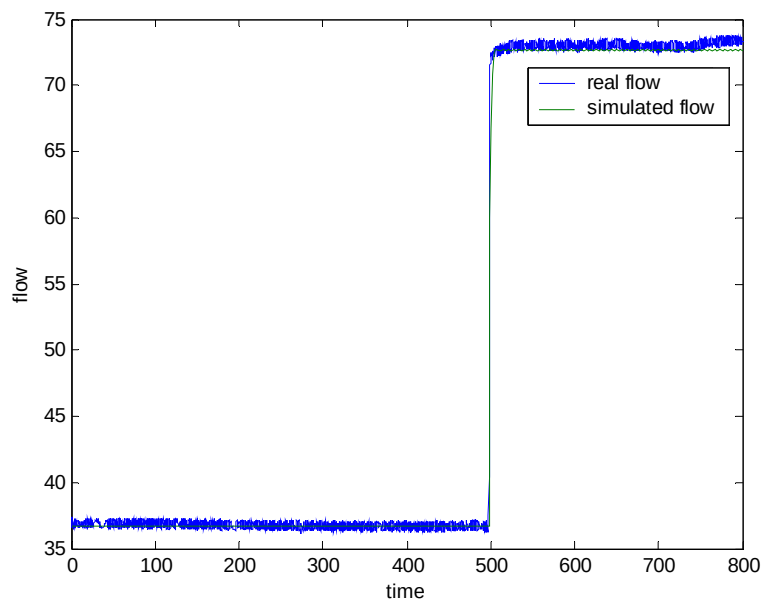
Zosilnenie systému je $Z = 0,90063$ a časová konštanta $T = t_n = 1,2202 \text{ s}$.

Dopravné oneskorenie sme si určili veľmi malé: $D = 0,1 \text{ s}$.

Tak prenos nadobudol tvar:

$$G(s) = \frac{0,90066}{(1,2202s + 1)} e^{-0,1s} \quad (32)$$

Porovnanie meranej závislosti prietoku od skokovej zmeny otáčok s identifikovanou závislosťou je na obr. 19.



Obr.19 Overenie správnosti identifikácie závislosti prietoku od otáčok

Pre porovnanie som robila aj opačnú skokovú zmenu otáčok.

Z prechodovej charakteristiky vyplýva:

$$y_0 = 73,278 \% \text{ rozsahu}$$

$$t_u = 0,1 \text{ s}$$

$$y_\infty = 36,191 \% \text{ rozsahu}$$

$$t_n = 1,304 \text{ s}$$

$$u_0 = 60$$

$$u_\infty = 20$$

Rád systému:

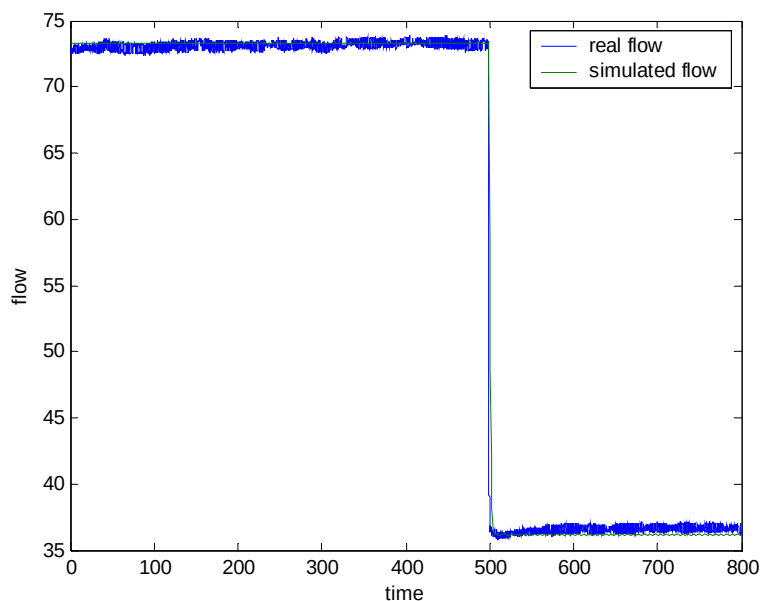
$$f(n) = \frac{t_u}{t_n} = \frac{0,1}{1,3038} = 0,0767 \Rightarrow n = 1 \quad (33)$$

Zosilnenie systému je $Z = 0,92718$ a časová konštanta $T = t_n = 1,3038 \text{ s}$.

Dopravné oneskorenie: $D = 0,1 \text{ s}$.

Prenos:

$$G(s) = \frac{0,92718}{(1,3038s + 1)} e^{-0,1s} \quad (34)$$



Obr. 20 Overenie správnosti identifikácie závislosti prietoku od otáčok

Riadenie pomocného riadeného systému

Z prenosu (32) získaných hodnôt zosilnenia $Z=0,90063$, časovej konštanty $T=1,2202s$, dopravného oneskorenia $D=0,1s$ a rádu $n=1$ sme navrhli experimentálnymi metódami návrhu regulátorov (tab.1) parametre regulátora vnútorného obvodu uvedené v tab. 3.

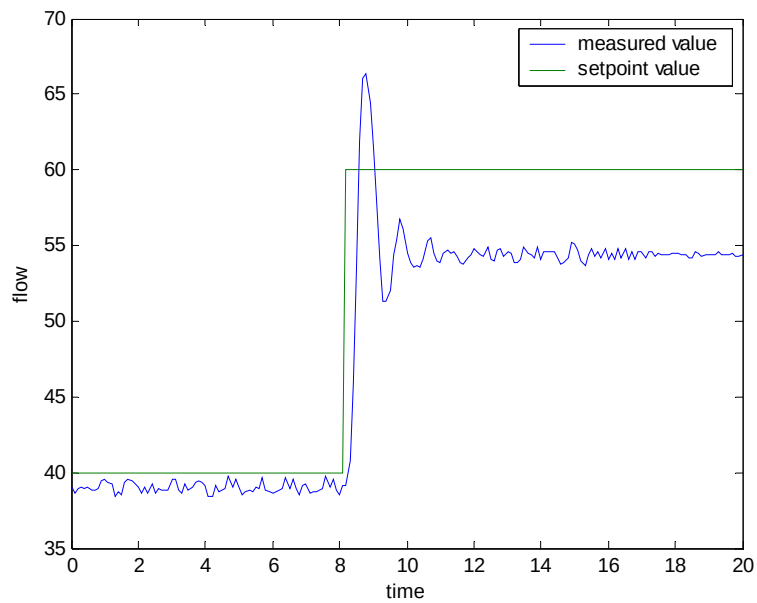
Ziegler – Nicholsovou, Strejcovou, Cohen – Coonovou, Haalmanovou a metódou Chien – Hrones – Reswick sa určia parametre P a PI regulátora v tvare rovníc (27) a (28). Metódou priamej syntézy sa určí prenos URO v tvare (29) pričom pre URO musí platiť podmienka (30).

Tab. 3 Návrh parametrov P a PI regulátora pre vnútorný obvod:

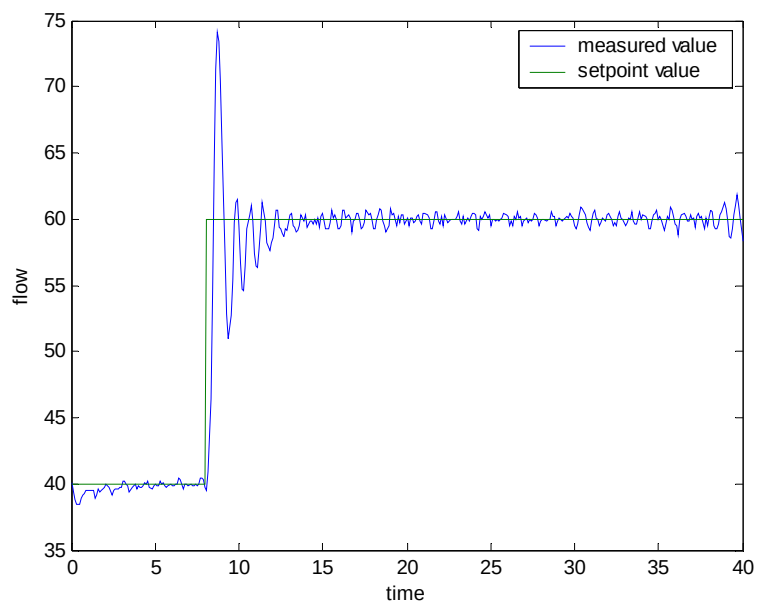
Metóda syntézy regulátora	Regulátor	Parametre regulátora		Riadenie na žiadanú hodnotu
		Z_R	T_I	
Ziegler-Nichols	P	13,5483		regulátor neureguloval
	PI	12,1935	0,333	regulátor neureguloval
Strejc	PI	0	1,2202	regulátor neureguloval
Metóda priamej syntézy	T_{URO}	1,00		regulátor neureguloval
	PI	1,2317		
Cohen, Coon	P	13,9184		regulátor neureguloval
Rivera, Morari	T_{URO}	1,00		regulátor neureguloval
	PI	1,4104	1,2702	
Haalman	PI	8,1347	1,2202	regulátor neureguloval
Chien, Hrones, Reswick prereg. 0%	P	4,0645		regulátor ureguloval
	PI	4,7419	1,4643	regulátor ureguloval
Chien, Hrones, Reswick prer. 20%	P	9,4838		regulátor neureguloval
	PI	8,1289	1,2202	regulátor neureguloval
Smith, Murrill	PI	6,4346	1,20042	regulátor neureguloval

Z tab.3 vyplýva, že regulátory navrhnuté metódou Chien – Hrones – Reswick uregulovali prietok na žiadanú hodnotu, pričom P regulátor zanecháva trvalú regulačnú odchýlku.

Riadenie pomocou P regulátora navrhnutého metódou Chen – Hrones – Reswick s preregulovaním 0 % je na obr. 21 a PI regulátor navrhnutý touto metódou je na obr. 22.



Obr.21 Riadenie pomocou P regulátora navrhnutého metódou Chien – Hrones - Reswick



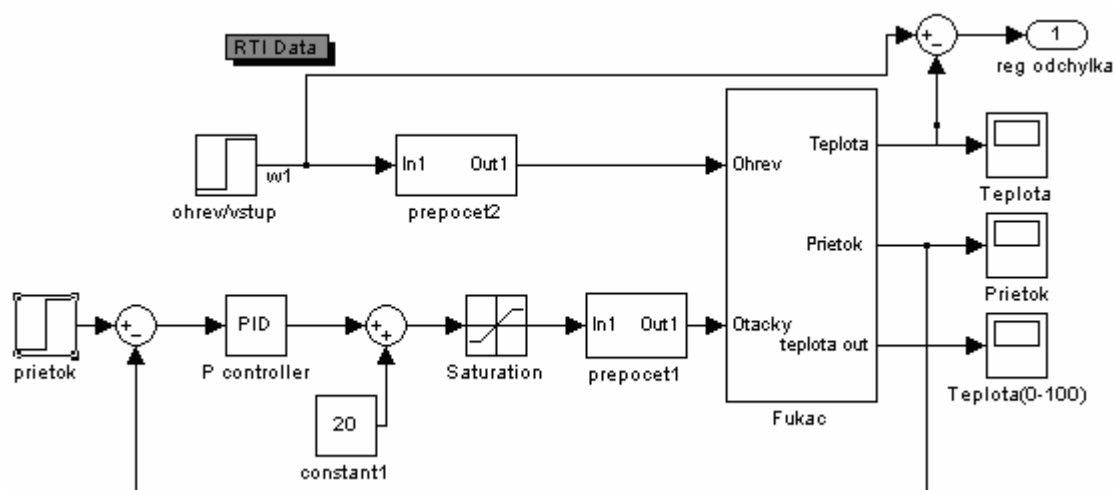
Obr.22 Riadenie pomocou PI regulátora navrhnutého metódou Chien – Hrones -Reswick

Identifikácia hlavného riadeného systému

Ako pomocný regulátor vo vnútornom obvode som použila P regulátor navrhnutý metódou Chien – Hrones – Reswick s preregulovaním 0 %, ktorý je na obr. 21.

Následne som identifikovala vnútorný obvod s použitím P regulátora.

Schéma zapojenia je na obr. 23.



Obr. 23 Schéma identifikácie hlavného riadeného systému zo zapojeným pomocným obvodom riadenia

Z prechodovej charakteristiky vyplýva:

$$y_0 = 60,9607 \% \text{ rozsahu}$$

$$t_u = 2,336 \text{ s}$$

$$y_\infty = 49,3904 \% \text{ rozsahu}$$

$$t_n = 70,706 \text{ s}$$

$$u_0 = 40$$

$$u_\infty = 60$$

Rád systému:

$$f(n) = \frac{t_u}{t_n} = \frac{2,336}{70,706} = 0,03304 \Rightarrow n = 1 \quad (31)$$

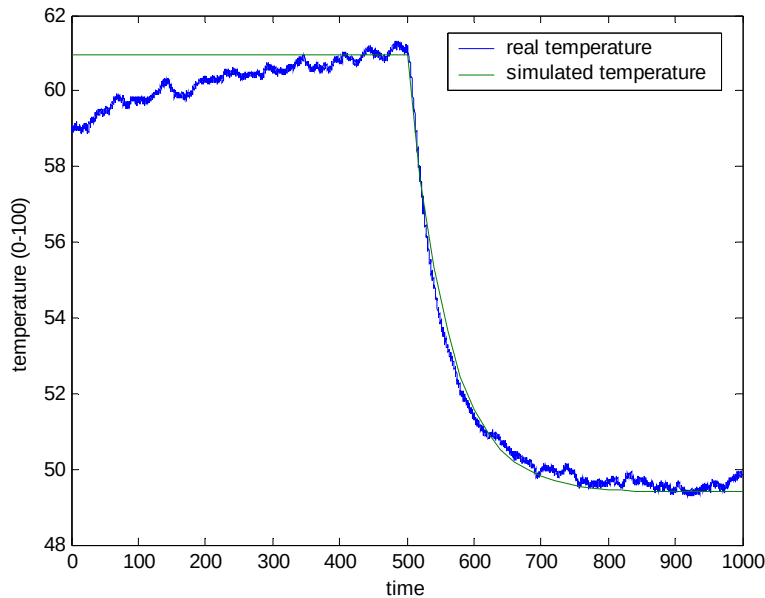
Zosilnenie systému je $Z = -0,5785$ a časová konštantanta $T = t_n = 70,7002$

Dopravné oneskorenie: $D = 2,336 \text{ s}$.

Prenos:

$$G(s) = \frac{-0,5785}{(70,7002s + 1)} e^{-2,336s} \quad (32)$$

Porovnanie nameraných a identifikovaných údajov pre prenos v tvare (32) je na obr. 24.



Obr.24 Overenie identifikácie celého obvodu s použitím P regulátora navrhnutého metódou Chien – Hrones - Reswick

Riadenie LTR700 s použitím kaskádovej regulácie

Z prenosu (32) získaných hodnôt zosilnenia $Z=-0,5785$, časovej konštanty $T=70,7002s$, dopravného oneskorenia $D=2,336s$ a rádu $n=1$ sme navrhli experimentálnymi metódami (tab 1.) parametre hlavného regulátora uvedené v tab. 4.

Ziegler – Nicholsovou, Strejcovou, Cohen – Coonovou, Haalmanovou a metódou Chien – Hrones – Reswick sa určia parametre PI regulátora v tvare rovnice (28). Metódou priamej syntézy sa určí prenos URO v tvare (29) pričom pre URO musí platiť podmienka (30)

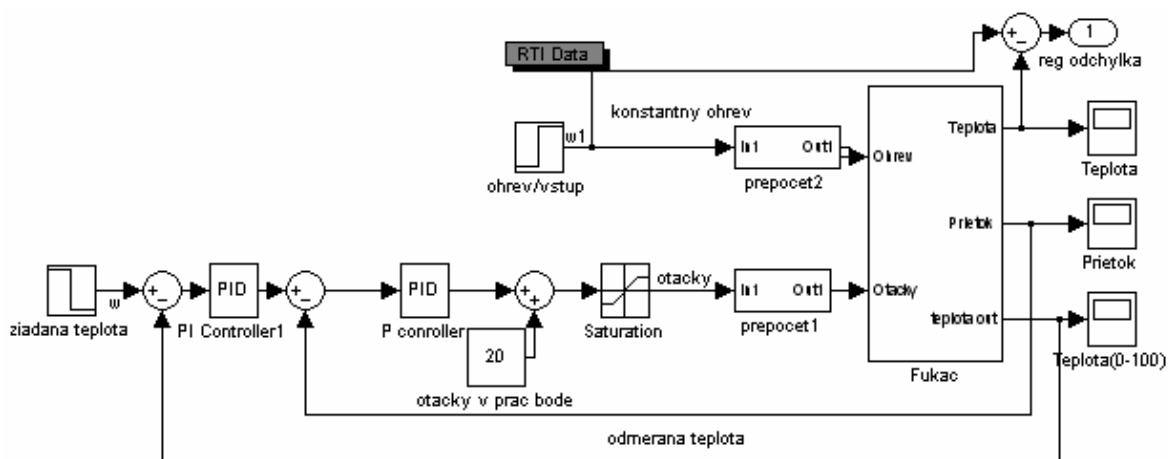
Metódou Rivera – Morari sa určí prenos v tvare (29) pričom pre URO musí platiť

$$\frac{T_{URO}}{T_U} > 1,7 \quad (33)$$

Tab. 4 Návrh parametrov PI regulátora pre hlavný obvod riadenia

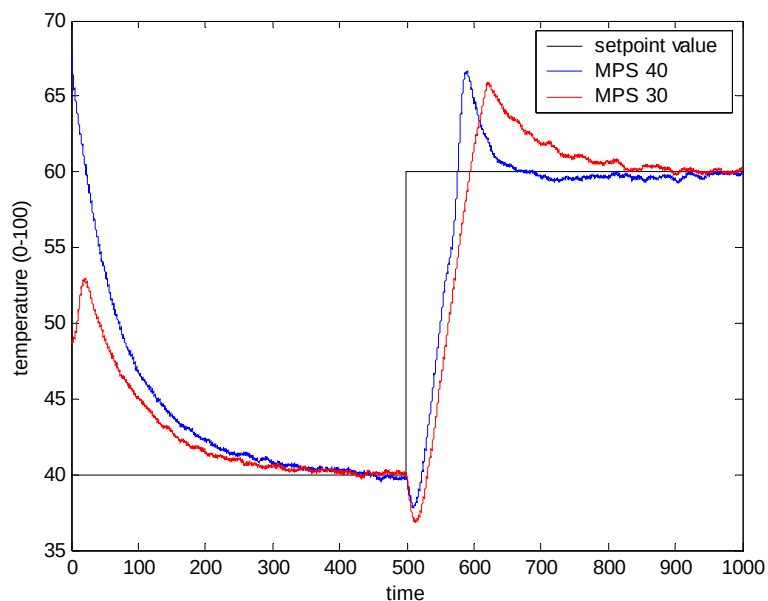
Metóda syntézy regulátora	Regulátor	Parametre regulátora		Riadenie na žiadanú hodnotu
		Z_R	T_I	
Ziegler-Nichols	PI	-62,7812	4,67196	regulátor neureguloval
Metóda priamej syntézy	T_{URO}	40		regulátor ureguloval
	PI	-2,8867	70,7002	
Metóda priamej syntézy	T_{URO}	30		regulátor neureguloval
	PI	-3,7795	70,7002	
Cohen, Coon	PI	-47,2299	7,2779	regulátor neureguloval
Rivera, Morari	T_{URO}	10		regulátor ureguloval
	PI	-6,2115	71,8682	
Haalman	PI	20,1772	70,7003	regulátor neureguloval
Chien, Hrones, Reswick prereg. 0%	PI	-18,3111	84,8403	regulátor neureguloval
Chien, Hrones, Reswick prer. 20%	PI	-31,3906	70,7003	regulátor neureguloval

Schéma kaskádového riadenia s pomocnou riadenou veličinou je na obr. 25. Riadenou veličinou je v tomto prípade teplota a riadiacou otáčky a pomocnou riadenou veličinou je prietok.



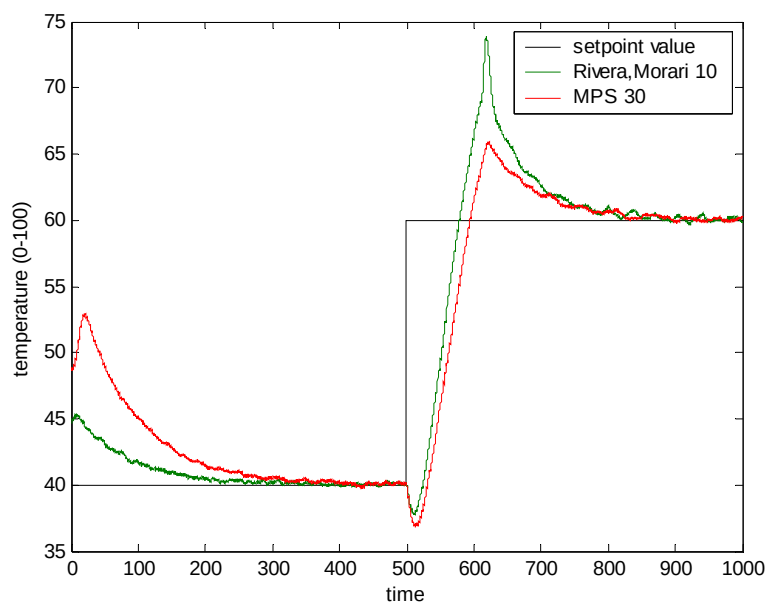
Obr.25 Schéma kaskádového riadenia

Porovnanie hlavných regulátorov navrhnutých metódou priamej syntézy regulátora s použitím aproximovaného modelu s T_{URO} 30 a 40 je na obr. 26. Ako vidno z obrázku lepší je regulátor s T_{URO} 30, t. j. regulátor s väčším záporným zosilnením.



Obr.26 Porovnanie kaskádovej regulácie s hlavnými PI regulátormi navrhnutými metódou priamej syntézy pre T_{URO} 30 a 40

Porovnanie hlavných regulátorov navrhnutých metódou priamej syntézy regulátora s použitím aproximovaného modelu s T_{URO} 30 a metódou Rivera – Morari je na obr. 27. Ako vidno z obrázku lepší je regulátor navrhnutý metódou priamej syntézy s T_{URO} 30.



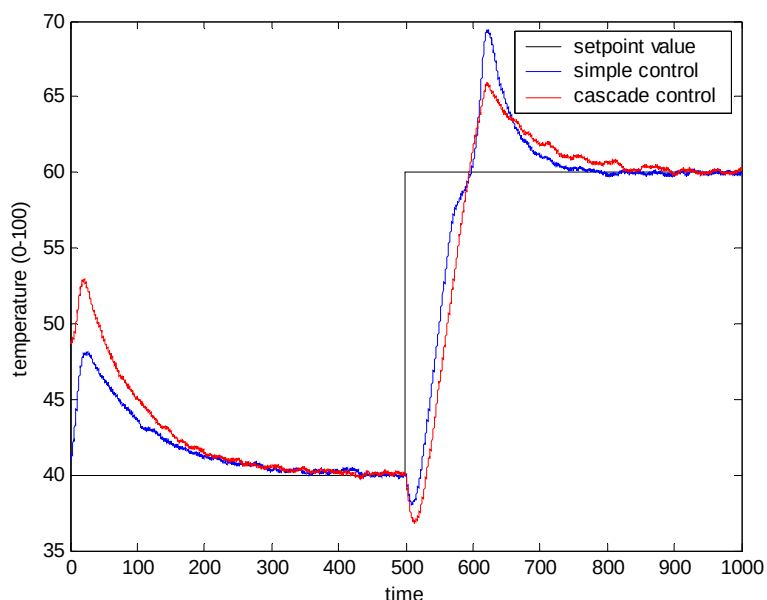
Obr.27 Porovnanie kaskádovej regulácie hlavnými PI regulátormi navrhnutými metódou priamej syntézy pre $T_{URO}=30$ a regulátora navrhnutého metódou Rivera – Morari $T_{URO}=10$

7. Porovnanie jednoduchého a kaskádového riadenia

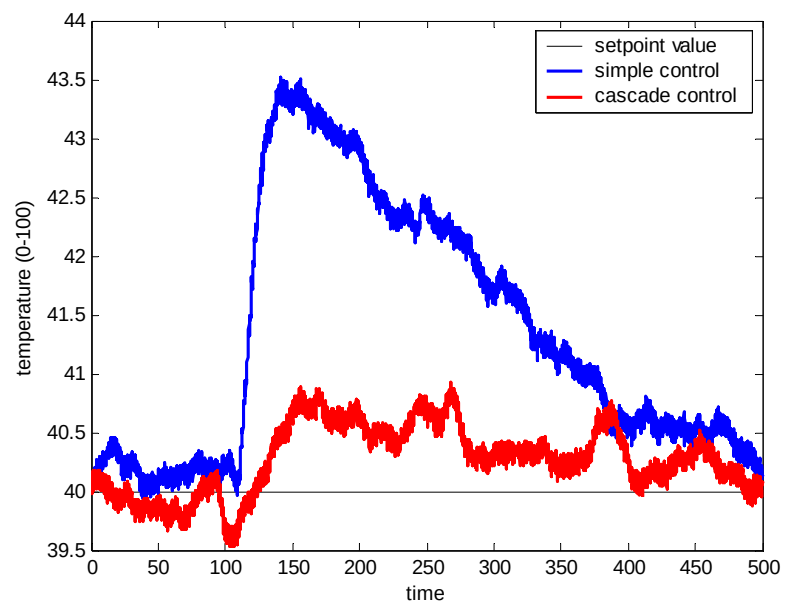
Na obr. 28 je porovnanie jednoduchého a kaskádového riadenia na žiadanú hodnotu metódou priamej syntézy regulátora s T_{URO} 30. Riadenou veličinou je teplota a riadiacou veličinou frekvencia otáčok ventilátora. Pomocnou riadenou veličinou je prietok vzduchu.

Na obr. 29 je porovnanie jednoduchého a kaskádového riadenia s účelom odstránenia poruchovej veličiny. Poruchou je v tomto prípade zníženie prietoku vygenerované klapkou.

Ako vidno z obr. 28. a obr. 29. regulátor zapojený v jednoduchom spätnoväzbovom obvode riadenia ureguloval meranú teplotu na žiadanú hodnotu rýchlejšie a poruchovú veličinu vykompenzoval rýchlejšie regulátor zapojený v kaskádovom obvode riadenia.



Obr.28 Porovnanie riadenia na žiadanú hodnotu pomocou jednoduchého a kaskádového riadenia



Obr.29 Porovnanie riadenia na odstránenie poruchovej veličiny

9. Záver

Úlohou tejto práce bolo riadenie laboratórneho výmenníka tepla pomocou kaskádovej regulácie a jeho porovnanie s riadením v jednoduchom obvode.

Výmenník tepla sme riadili regulátormi, ktoré boli navrhnuté experimentálnymi metódami syntézy regulátorov. Pri návrhu sme použili prenos vychádzajúci z prechodovej charakteristiky.

Regulátory sme testovali riadením na žiadanú hodnotu a odstránenie poruchovej veličiny.

Pre jednoduchý obvod spätnoväzbového riadenia sme použili regulátory navrhnuté Ziegler – Nicholsonovou, Cohen – Coonovou a metódou priamej syntézy regulátora s použitím aproximovaného modelu. Pre kaskádovú reguláciu sme použili pre vonkajší obvod čiže hlavný regulátory navrhnuté Ziegler – Nicholsonovou, Cohen – Coonovou, Haalmanovou metódou, metódou Rivera – Morari, metódou Chien – Hrones – Reswick a metódou priamej syntézy regulátora.

Ako najvhodnejšia sa v kaskádovej regulácii ukázala metóda priamej syntézy regulátora s použitím aproximovaného modelu s $T_{URO} = 30$. Zároveň to bola jediná metóda návrhu regulátora pre jednoduchý obvod spätnoväzbového riadenia, ktorej regulátor ureguloval proces.

Porovnaním kaskádovej regulácie s reguláciou v jednoduchom obvode riadenia na žiadanú hodnotu teploty bol rýchlejší regulátor navrhnutý v jednoduchom obvode riadenia. Porovnaním regulácie na odstránenie poruchovej veličiny sme došli k záveru že vhodnejší je regulátor zapojený v kaskádovom obvode riadenia.

9. Zoznam použitých symbolov

symbol	názov veličiny	jednotka
$\dot{V}_M$	objemový tok cez miešadlo	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
f	frekvencia	s^{-1}
k	súčiniteľ úmernosti	bezrozmerné
D_M	priemer miešadla	m
ρ	hustota	kg m^{-3}
V	objem	m^3
$\dot{V}$	objemový prietok	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
m	hmotnosť	kg
c_p	špecifická tepelná kapacita	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
T	teplota	K
W_{el}	elektrický výkon	W
α	kombinovaný súčiniteľ prestupu tepla	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
F	plocha	m^2
Z	zosilnenie	bezrozmerné
T	časová konštanta	s
t_u	čas prietahu	s
t_n	čas nábehu	s
D	dopravné oneskorenie	s
Z_R	zosilnenie regulátora	bezrozmerné
T_I	integračná konštanta regulátora	s^{-1}
T_{URO}	časová konštanta URO	s
Z_{URO}	zosilnenie URO	bezrozmerné
D_{URO}	dopravné oneskorenie URO	s

10. Literatúra

- [1] Bafnec Milan a kol., Chemické inžinierstvo I, Malé centrum 1999
- [2] Rákoš Jaroslav, Elektrické teplo a elektrické pece, Hutnícka fakulta, TU Košice 2000
- [3] Novák Pavel, Základy teórie elektrických ohrevov / Elektrické teplo, Ostrava 1991
- [4] dSPACE GmbH 2000, Solutions for Control Catalog
- [5] Mikleš Ján a kol., Riadenie technologických procesov, STU Bratislava 1994
- [6] Bakošová Monika a kol., Laboratórne cvičenia zo základov automatizácie, STU Bratislava 2003