

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKEJ A POTRAVINÁRSKEJ TECHNOLOGIE

**RIADENIE LABORATÓRNEHO TEPLOVZDUŠNÉHO
PROCESU**

BAKALÁRSKA PRÁCA

FCHPT-5415-40525

2010

Róbert Tomčík

Súhrn

Cieľom práce je navrhnúť a otestovať vhodný regulátor zabezpečujúci uriadenie teploty na požadovanú hodnotu pre laboratórny výmenník tepla. Súčasťou práce je aj oboznámenie sa s riadiacim systémom dSPACE, odmeranie prechodovej charakteristiky a vytvorenie modelu výmenníka tepla vhodného pre návrh regulátora. Navrhnutý regulátor sa následne testuje v prostredí MATLAB-Simulink a na reálnom procese. Práca obsahuje päť kapitol. Prvé dve kapitoly zahrňujú teoretické poznatky potrebné k realizácii práce, tretia kapitola opisuje používané zariadenie – laboratórny výmenník tepla, vo štvrtej kapitole je popísaná problematika práce s riadiacim systémom dSPACE a záverečná kapitola je venovaná spracovaniu nameraných údajov a výberu najlepších regulátorov z hľadiska zvolených ukazovateľov kvality riadenia – IAE a času regulácie.

Kľúčové slová: prechodová charakteristika, PID regulátor, dSPACE, laboratórny výmenník tepla, ContolDesk, uzavretý regulačný obvod

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to design a suitable controller ensuring control of temperature to required value for laboratory heat exchanger. The part of this thesis is also acquaintance with control system called dSPACE, identifying of step response and creation of model of heat exchanger suitable for controller design. Thereafter the designed controller is tested in MATLAB-Simulink program and on real process too. The thesis consists of five chapters. The first two chapters include theoretical knowledge required for execution of this work, third section describes used device – laboratory heat exchanger, in fourth chapter the control system dSPACE is described and the final chapter is dedicated to processing of measured data and selection of the best controllers from the aspect of selected indicators of quality control – IAE and time of regulation.

Key words: step response, PID controller, dSPACE, laboratory heat exchanger, ControlDesk, feedback control loop

Obsah

Zoznam symbolov, skratiek a značiek.....	8
Zoznam obrázkov	11
Zoznam tabuliek	13
Úvod	14
1 Spätnoväzbové riadenie procesov	15
1.1 Uzavretý regulačný obvod	16
1.1.1 Definícia problému spätnoväzbového riadenia	20
1.2 Typy regulátorov	20
1.2.1 Proporcionálny regulátor	20
1.2.2 Integračný regulátor	21
1.2.3 Derivačný regulátor.....	22
1.2.4 Štruktúry PID regulátora	22
1.3 Stabilita uzavretého regulačného obvodu	23
1.4 Kvalita riadenia	24
1.4.1 Časová oblasť	24
1.4.2 Integrálne ukazovatele kvality	25
2 Nastavovanie parametrov regulátorov.....	26
2.1 Analytické metódy	26
2.2 Experimentálne metódy	26
2.2.1 Spracovanie prechodovej charakteristiky	26
2.2.2 Strejcova metóda identifikácie systému	28
2.2.3 Strejcova metóda nastavenia regulátorov	29
2.2.4 Iné metódy nastavenia regulátorov	30
3 Opis zariadenia	31
3.1 Opis mechanickej zostavy.....	31
3.2 Opis skrinky so zdrojom	32
3.3 Konvertor signálov	34
3.4 Konektor CP1102.....	34
3.5 Vstupno-výstupná karta	34
3.6 Prepojenie zariadení	35
4 Riadiaci systém dSPACE	36
4.1 Real-Time Interface.....	36
4.1.1 Práca s modelom	36
4.1.2 Parametre simulácie a kompilácia RTA	38
4.2 ControlDesk	41
4.2.1 Tvorba nového experimentu	41
4.2.2 Úprava vlastností experimentu	42
4.2.3 Prístrojový panel	42
4.2.3.1 Vytváranie panelov prístrojov	43
4.2.3.2 Tvorba Layout Window	43

4.2.3.3	Instrument Selector.....	43
4.2.3.4	Vytvorenie prístrojov.....	44
4.2.3.5	Prepojenie prístrojov so signálmi	46
4.2.4	Zavedenie RTA na RTP	46
4.2.5	Ukladanie údajov do dátového súboru	47
4.2.6	Ovládanie RTA na RTP	48
4.2.7	Riadenie procesu.....	49
5	Riadenie laboratórneho teplovzdušného procesu.....	52
5.1	Odmeranie a spracovanie prechodovej charakteristiky.....	53
5.1.1	Meranie prechodovej charakteristiky	53
5.1.2	Určenie prenosu a jeho overenie.....	54
5.1.3	Overenie identifikovaného prenosu	57
5.2	Riadenie systému	60
5.2.1	Syntéza regulátorov a ich testovanie.....	60
5.2.1.1	Simulačné testovanie regulátorov.....	61
5.2.1.2	Riadenie reálneho procesu	63
5.2.2	Výber najlepšieho regulátora.....	64
5.2.3	Nevyhovujúce regulátory	65
	Záver	69
	Zoznam použitej literatúry.....	71
	Príloha	72

Zoznam symbolov, skratiek a značiek

- δ , deltad	spodná hranica zvoleného δ -okolia žiadanej veličiny
+ δ , deltah	vrchná hranica zvoleného δ -okolia žiadanej veličiny
ADC	A nalog- t o- D igital C onverter
AT	A dvanced T echnology
BIBO	B ounded I nput – B ounded O utput (ohraničený vstup – ohraničený výstup)
D	derivačná zložka regulátora, derivačný regulátor; dopravné oneskorenie systému
DAC	D igital- t o- A nalog C onverter
DC	D irect C urrent
DSP	D igital S ignal P rocessor, D igital S ignal P rocessing
e	regulačná odchýlka
e(t)	regulačná odchýlka ako funkcia času
f_s	podiel času priet'ahu a času nábehu
$G(s)$	prenos riadeného systému
$G_A(s)$	prenos akčného člena
$G_m(s)$	prenos meracieho člena
$G_P(s)$	prenos riadeného procesu
$G_{pr}(s)$	prenosová funkcia poruchy
$G_R(s)$	prenos regulátora
$G_{yr}(s)$	prenos uzavretého regulačného obvodu vzhľadom na poruchu
$G_{yw}(s)$	prenos uzavretého regulačného obvodu vzhľadom na žiadanú veličinu
I	integračná zložka regulátora, integračný regulátor
I/O	I nput/ O utput (vstup/výstup)
IAE	integrál absolútnej hodnoty regulačnej odchýlky
ISA	I ndustry S tandard A rchitecture
ISE	integrál štvorca regulačnej odchýlky
M-file	súbor pracujúci v prostredí MATLAB, skript

P	proporcionálna zložka regulátora, proporcionálny regulátor
PC	P ersonal C omputer
PCH	P rechodová C harakteristika
P_p	pásmo proporcionality
PWM	P ulse- W idth M odulation
r	poruchová veličina
$R(s)$	obraz Laplaceovej transformácie poruchovej veličiny
RAM	R andom A ccess M emory (pamäť s priamym prístupom)
RTA	R eal- T ime A pplication
RTI	R eal- T ime I nterface
RTP	R eal- T ime P rocessor
RTW	R eal- T ime W orkshop
s	argument Laplaceovej transformácie
SDF	S ystem D escription F ile
t	čas
T	časová konštanta systému
t_0	čas indikujúci skokovú zmenu vstupnej veličiny
t_1	čas určujúci priesečník y_0 a dotyčnice k PCH
t_2	čas určujúci priesečník y_∞ a dotyčnice k PCH
T_D	derivačná konštanta
T_I	integračná konštanta
TI	T exas I nstrument
t_n	čas nábehu
t_{reg}	čas regulácie
TRO, $e(\infty)$	T rvalá R egulačná O dchýlka
t_u	čas priet'ahu
T_{URO}	časová konštanta uzavretého regulačného obvodu
t_δ	čas maximálneho preregulovania
u	riadiaca (akčná) veličina

$u(t)$	riadiaca veličina ako funkcia času
u_0	hodnota žiadanej veličiny v čase 0
u_∞	hodnota žiadanej veličiny v nekonečne
u_{\max}	maximálna hodnota riadiacej veličiny
u_{\min}	minimálna hodnota riadiacej veličiny
URO	U zavretý R egulačný O bvod
w	žiadaná veličina
$W(s)$	obraz Laplaceovej transformácie žiadanej veličiny
w_∞	hodnota žiadanej veličiny v nekonečne
y	riadená (výstupná) veličina
$Y(s)$	obraz Laplaceovej transformácie výstupnej veličiny
y_0	hodnota riadenej veličiny v čase 0
y_∞	hodnota riadenej veličiny v nekonečne
y_m	meraná výstupná veličina
y_{\max}	maximálna hodnota riadenej veličiny
Z	zosilnenie systému
Z_R	zosilnenie regulátora
δ	zvolené okolie žiadanej veličiny
δ_{\max}	maximálny prekmit (preregulovanie)
σ	relatívne preregulovanie

Zoznam obrázkov

Obr. 1 Detailná a zjednodušená bloková schéma URO [1].....	16
Obr. 2 Detailná a zjednodušená bloková schéma URO pomocou prenosových funkcií [1].....	18
Obr. 3 Prechodová charakteristika URO	24
Obr. 4 Všeobecná prechodová charakteristika [1].....	27
Obr. 5 Prechodová charakteristika systému prvého rádu s dopravným oneskorením [1]	28
Obr. 6 Laboratórne zariadenie LTR700 [5]	31
Obr. 7 Predný panel skrinky so zdrojom	32
Obr. 8 Popis predného panelu skrinky so zdrojom [5]	33
Obr. 9 Schematické zapojenie zariadení [5]	35
Obr. 10 Schéma na meranie prechodovej charakteristiky.....	37
Obr. 11 Model Real-Time Application (RTA) [5]	37
Obr. 12 Údaje bloku „ohrev/vstup“	38
Obr. 13 Údaje bloku „otackyvstup“	39
Obr. 14 Parametre simulácie – Solver	40
Obr. 15 Parametre simulácie – Real-Time Workshop	40
Obr. 16 ControlDesk	42
Obr. 17 Módy panelov prístrojov	43
Obr. 18 Layout Window.....	44
Obr. 19 Instrument Selector – Data Acquisition, Virtual Instruments.....	44
Obr. 20 Prístroj „Plotter“	45
Obr. 21 Prístroj „Capture Settings“	45
Obr. 22 Tool Window	46
Obr. 23 Okno dSPACE CaptureSettings Control – vlastnosti, záložka Capture	47
Obr. 24 Okno dSPACE CaptureSettings Control – vlastnosti, záložka Acquisition	48
Obr. 25 Platform Manager Toolbar – štart/stop RTA.....	48
Obr. 26 Schéma na riadenie laboratórneho teplovzdušného procesu	49
Obr. 27 Nastavenie prístroja Capture Settings pre riadenie procesu	50
Obr. 28 Vzorový grafický priebeh riadenia – ControlDesk	51
Obr. 29 Vzorový priebeh IAE – ControlDesk	51
Obr. 30 Prechodová charakteristika systému	53
Obr. 31 Spracovanie prechodovej charakteristiky.....	55
Obr. 32 Grafický priebeh skokovej zmeny ohrevu.....	56
Obr. 33 Schéma na overenie identifikovaného prenosu	58

Obr. 34 Údaje bloku „Ohrev“	58
Obr. 35 Údaje bloku „Prenos“	59
Obr. 36 Údaje bloku „Dopravne oneskorenie“	59
Obr. 37 Graf porovnania PCH reálneho procesu a PCH identifikovaného prenosu	60
Obr. 38 Schéma na testovanie navrhnutých regulátorov	61
Obr. 39 Grafický priebeh regulácie s PID regulátorom navrhnutým metódou Chien-Hrones-Reswick - simulácia ..	62
Obr. 40 Grafický priebeh regulácie s PID regulátorom navrhnutým metódou Smith-Murrill – simulácia	63
Obr. 41 Grafický priebeh regulácie s PID regulátorom navrhnutým metódou Chien-Hrones-Reswick ...	68
Obr. 42 Grafický priebeh regulácie s PID regulátorom navrhnutým metódou Smith-Murrill	68

Zoznam tabuliek

Tab. 1	Tabuľka pre Strejcovu metódu identifikácie [2].....	28
Tab. 2	Nastavenie regulátora podľa Strejca [2].....	29
Tab. 3	Údaje odčítané z PCH a vypočítané údaje Strejcovej identifikácie systému.....	57
Tab. 4	Tabuľka výsledkov.....	66

Úvod

V dnešnej dobe sa neustále zlepšuje výpočtová technika, ktorá sa používa aj na riadenie systémov vo výrobe a priemysle. Neustále dokonalejšie zariadenia vyžadujú aj lepšie operačné systémy a programy, ktoré v konečnom dôsledku neslúžia len na samotné riadenie, ale zabezpečujú aj jednoduchšie ovládanie a kompatibilitu s inými – podpornými programami. Na návrh či už týchto programov samotných alebo modelov systémov a zariadení regulujúcich výstupnú veličinu na požadovanú hodnotu v podmienkach výroby treba získať veľa teoretických poznatkov a skúseností v danom odbore.

Na oboznámenie sa s princípom fungovania priemyselných a výrobných zariadení, ale aj ich riadiacimi systémami zabezpečujúcimi ich chod a funkčnosť presne podľa podmienok nutných k získaniu požadovaných výsledkov, slúžia rôzne laboratórne zariadenia.

Predmetom tejto práce je oboznámenie sa s riadiacim systémom dSPACE a jeho následné využitie na vytvorenie modelu výmenníka tepla vhodného pre návrh regulátora. Navrhnutý regulátor možno testovať v prostredí MATLAB-Simulink a následne v reálnom procese. Reálny systém predstavuje laboratórny výmenník tepla LTR700. Samotné zariadenie sa skladá z trubice so špirálou zabezpečujúcou ohrev vzduchu prúdiaceho výmenníkom, z ventilátora, ktorý umožňuje nútené prúdenie tekutiny (vzduchu) trubicou a skrinky so zdrojom. Je možné riadiť teplotu vzduchu prechádzajúceho výmenníkom pomocou ohrevu a/alebo pomocou prietoku a sledovať jej hodnotu na výstupe z výmenníka. Teplotu možno vyjadriť v stupňoch Celzia a aj v percentuálnom rozsahu.

Pomocou programu dSPACE sa zabezpečí prepojenie modelu výmenníka s počítačom. Program je kompatibilný s prostredím MATLAB-Simulink. Návrh celého systému pozostáva z vytvorenia aplikácie Real-Time Application (RTA) pomocou knižnice RTI1102, následnej kompilácie a zavedenia do procesora a vizualizácie a ovládania v programe ControlDesk, ktorý je súčasťou dSPACE. Keďže aj ControlDesk spolupracuje s programom MATLAB, je možné jednoduchšie a prehľadne spracovávať získané výsledky vo forme grafov a na základe rôznych zvolených ukazovateľov kvality riadenia vybrať najvhodnejší regulátor, ktorý zabezpečí čo najplynulejší resp. najkratší regulačný pochod.

1 Spätnoväzbové riadenie procesov

V bežnej praxi sa veľakrát riešia problémy, ktorých výsledkom väčšinou býva získať výstup zo systému s požadovanými parametrami. Výstupom možno rozumieť rôzne fyzikálne vlastnosti média, výšku hladiny média v prípade zásobníkov, teplotu tekutiny opúšťajúcu výmenník tepla, koncentrácie jednotlivých zložiek zmesí po výstupe z chemického reaktora a pod.

Predpokladajme, že máme výmenník tepla, cez ktorý prúdi vzduch z atmosféry. Tok vzduchu zabezpečuje ventilátor, ktorý je súčasťou zariadenia. Úlohou tohoto výmenníka je ohriať vzduch na žiadanú hodnotu (**žiadaná veličina**) ohrevnou špirálou s určitým príkonom, pri konštantnej hodnote otáčok ventilátora. **Objektom riadenia** je teda **proces prestupu tepla** spolu so **zariadením**.

Riadenie procesu prestupu tepla je také cieľavedomé pôsobenie na proces, aby sa teplota výstupného prúdu z výmenníka udržala pri zmene prevádzkových podmienok procesu na žiadanej hodnote alebo v jej požadovanom okolí. Pôsobenie na proces sa realizuje prostredníctvom zmeny tepelného príkonu ohrevnej špirály (**akčná veličina**). Ak vznikne odchýlka od žiadanej veličiny, treba prostredníctvom akčnej veličiny zabezpečiť jej zmenšenie alebo odstránenie. Kvôli zisteniu skutočnej hodnoty teploty na výstupe z výmenníka, musí byť na jeho konci umiestnené zariadenie na meranie teploty.

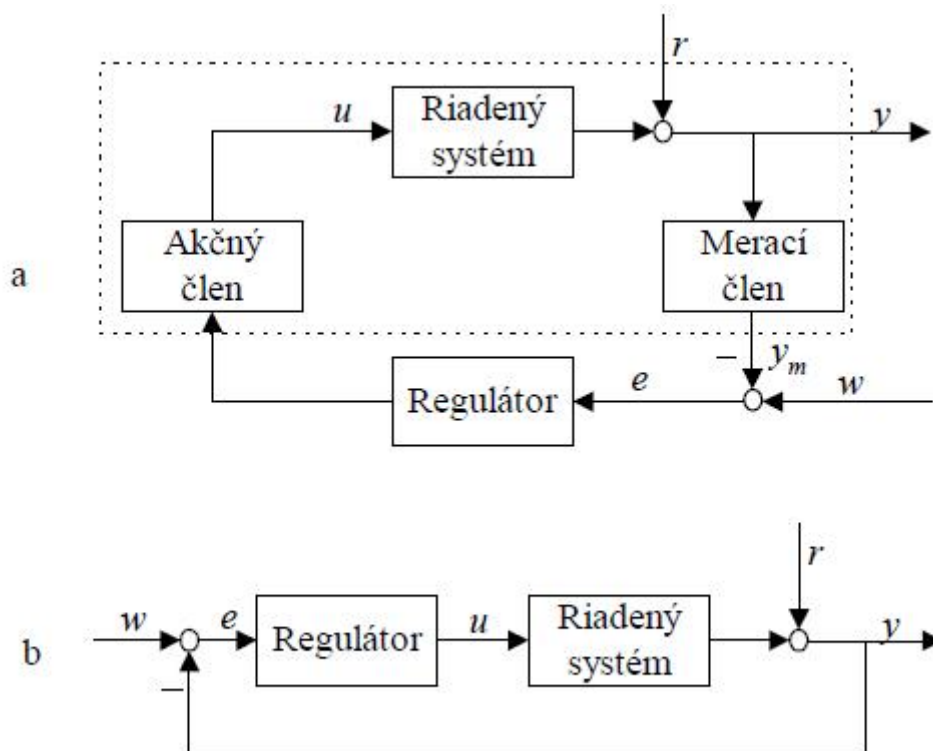
Zmenu akčnej veličiny môže na základe merania teploty na výstupe zariadenia vykonávať buď človek (**ručné riadenie procesu**) alebo technické zariadenie (**automatické riadenie**). Človek však nie je vždy schopný vykonávať zmenu akčnej veličiny kvalitne, a preto pri automatickom riadení jeho úlohu preberá **riadiaci člen**, ktorý však riadi narozdiel od človeka exaktne podľa určeného **zákona riadenia**. Riadiaci člen pri riadení procesu prestupu tepla využije informáciu o skutočnej teplote (odmeranej teplote na výstupe) a o žiadanej teplote na nastavenie tepelného príkonu podľa vopred určeného matematického zákona riadenia. Rozdiel medzi žiadanou a skutočnou teplotou sa nazýva **odchýlka riadenia** alebo **regulačná odchýlka**. Riadením treba zabezpečiť aby bola táto odchýlka čo najmenšia. Úlohou je teda určiť zákon riadenia tak, aby sa odstránila, resp. zmenšila odchýlka riadenia optimálnym spôsobom podľa určitých kritérií. Zákon riadenia určuje štruktúru riadiaceho člena, ako aj jeho vlastnosti v rámci danej štruktúry.

Jednou z možností návrhu riadiaceho člena je navrhnúť ho tak, aby menil tepelný príkon úmerne k odchýlke riadenia. Odchýlenie sa nameranej teploty od žiadanej

hodnoty spôsobí vznik nenulovej odchýlky a regulátor zmení tepelný príkon úmerne – proporcionálne k tejto odchýlke. Takýto regulátor sa nazýva proporcionálny. Ak meraná teplota stúpne nad žiadanú, proporcionálny regulátor hodnotu tepelného príkonu zmenší. Ak teplota, naopak, poklesne pod žiadanú hodnotu, tepelný príkon sa zväčší. Ide teda o **zápornú spätnú väzbu**. Odmeranie výstupnej veličiny procesu poskytne riadiacemu členu informáciu o procese. Táto informácia sa prostredníctvom riadiaceho člena dostane späť na vstup procesu. Opísaný spôsob riadenia sa nazýva **spätnoväzbové riadenie**. [1]

1.1 Uzavretý regulačný obvod

Uzavretý regulačný obvod je vo všeobecnosti súbor technických prostriedkov, ktoré slúžia na to, aby vybrané zariadenie (**proces**) uspokojivo pracovalo v automatickom režime. Tvorí ho proces, ktorý riadime a ďalšie prístrojové prvky zabezpečujúce automatické riadenie. Abstrakciou uzavretého regulačného obvodu (URO) je jeho všeobecná bloková schéma, zobrazená na Obr. 1. Pozostáva zo 4 základných súčastí, ktorými sú regulátor, akčný člen, riadený systém a merací člen.



Obr. 1 Detailná a zjednodušená bloková schéma URO [1]

Riadený systém je naša predstava o riadenom procese zo systémového hľadiska. Záleží nám na **riadenej veličine** y , ktorá je výstupom z riadeného procesu a ktorú dokážeme ovplyvňovať riadiacou (alebo akčnou) veličinou u . Riadenú veličinu však často ovplyvňujú aj iné veličiny, ktoré nedokážeme meniť – poruchové veličiny, označované premennou r .

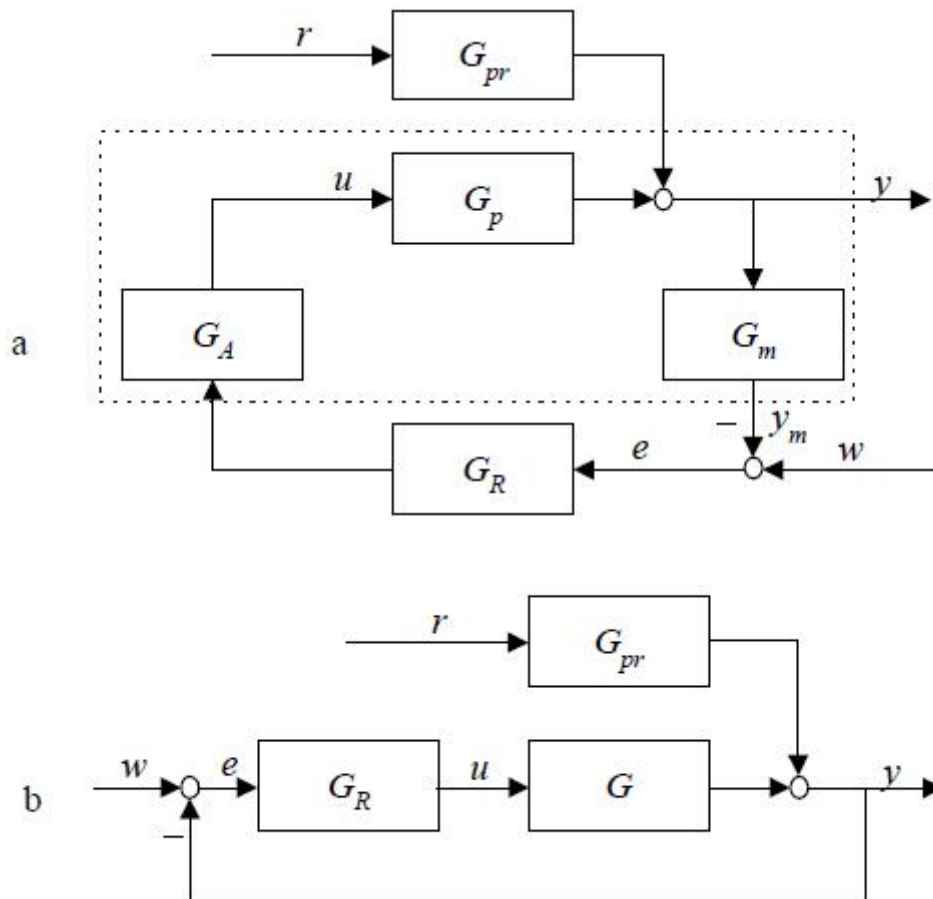
Aby sme mohli riadenú veličinu y riadiť, musíme ju najprv odmerať. Na to slúži merací člen. Na jeho výstupe sa meria hodnota výstupu y_m .

Regulátor je zariadenie, ktoré vyhodnocuje regulačnú odchýlku a na základe zákona riadenia generuje akčnú veličinu. Táto je použitá akčným členom, ktorý akčnú veličinu zrealizuje (otvorí ventil, spustí pohon atď.).

Kvôli zjednodušeniu skúmania spätnoväzbových obvodov riadenia sa bloková schéma často zjednodušuje. V **zjednodušenej blokovej schéme** sú len dva bloky (Obr. 1b). Prvý blok predstavuje riadiaci člen a druhý blok riadený objekt. Každý blok podrobnej blokovej schémy musí byť zahrnutý do niektorého z týchto dvoch blokov. Najčastejšie sa v zjednodušenej blokovej schéme riadiacim členom myslí len tá časť spätnoväzbového obvodu, ktorá realizuje zákon riadenia. Pri zjednodušení schémy sa teda akčný a merací člen zaraďujú k riadenému procesu.

Každé zo zariadení, ktoré tvoria uzavretý regulačný obvod, reprezentuje dynamický systém a možno ho opísať diferenciálnou rovnicou alebo prenosom. Takže blokové schémy z Obr. 1 môžeme prekresliť pomocou Obr. 2, kde pôsobia signály w – žiadaná veličina, e – regulačná odchýlka, u – akčná veličina, r – porucha, y – riadená (výstupná) veličina a y_m – meraná výstupná veličina. Vplyv poruchovej veličiny na riadený proces je opísaný diferenciálnou rovnicou zodpovedajúcou prenosovej funkcii $G_{pr}(s)$. Ďalšie prenosy sú $G_R(s)$ – prenos regulátora, $G_A(s)$ – prenos akčného člena, $G_m(s)$ – prenos meracieho člena, $G_P(s)$ – prenos riadeného procesu.

Pri opisovaní dynamických vlastností URO rozlišujeme medzi reakciou na žiadanú a poruchovú veličinu. Tieto dve veličiny totiž reprezentujú dve vstupné veličiny celého URO.



Obr. 2 Detailná a zjednodušená bloková schéma URO pomocou prenosových funkcií [1]

Z Obr. 2a vyplýva na základne algebry prenosov vzťah pre výstupnú veličinu

$$Y(s) = G_{pr}(s)R(s) + G_P(s)G_A(s)G_R(s)[W(s) - G_m(s)Y(s)] \quad (1)$$

a po úprave

$$Y(s) = \frac{G_{pr}}{1 + G_P(s)G_A(s)G_R(s)G_m(s)}R(s) + \frac{G_P(s)G_A(s)G_R(s)}{1 + G_P(s)G_A(s)G_R(s)G_m(s)}W(s) \quad (2)$$

Z tohoto vzťahu sa dajú odvodiť dva prenosy.

- Pre $R(s) = 0$ získame prenos žiadanej veličiny (prenos riadenia) v tvare

$$G_{yw}(s) = \frac{G_P(s)G_A(s)G_R(s)}{1 + G_P(s)G_A(s)G_R(s)G_m(s)} \quad (3)$$

- $W(s) = 0$ získame prenos poruchy v tvare

$$G_{yr}(s) = \frac{G_{pr}}{1 + G_P(s)G_A(s)G_R(s)G_m(s)} \quad (4)$$

Oba prenasy majú spoločný menovateľ, ktorý určuje dynamické vlastnosti URO a ktorý sa nazýva **charakteristický polynóm**. Ak ho položíme rovný nule, získame **charakteristickú rovnicu** URO v tvare

$$1 + G_P(s)G_A(s)G_R(s)G_m(s) = 0 \quad (5)$$

Ak budeme uvažovať zjednodušenú verziu blokovej schémy, pri ktorej riadený systém $G(s)$ zahŕňa riadený proces, merací a akčný člen, t. j. $G(s) = G_P(s)G_A(s)G_m(s)$, potom z Obr. 2b vyplýva na základe algebry prenosov vzťah pre výstupnú veličinu

$$Y(s) = G_{pr}(s)R(s) + G(s)G_R(s)[W(s) - Y(s)] \quad (6)$$

a po úprave

$$Y(s) = \frac{G_{pr}}{1 + G(s)G_R(s)}R(s) + \frac{G(s)G_R(s)}{1 + G(s)G_R(s)}W(s) \quad (7)$$

Prenosové funkcie URO vzhľadom na poruchu a žiadanú veličinu majú tvar

$$G_{yw}(s) = \frac{G(s)G_R(s)}{1 + G(s)G_R(s)} \quad (8)$$

$$G_{yr}(s) = \frac{G_{pr}}{1 + G(s)G_R(s)} \quad (9)$$

a charakteristická rovnica URO má tvar

$$1 + G(s)G_R(s) = 0 \quad (10)$$

1.1.1 Definícia problému spätnoväzbového riadenia

Na uzavretý regulačný obvod sa kladú rôzne požiadavky. Medzi najdôležitejšie patria:

stabilita – URO musí byť stabilný.

URO musí byť schopný zabezpečiť riešenie viacerých úloh. Dve z nich sú

regulácia – URO musí zabezpečiť minimalizáciu vplyvu porúch na riadený proces,

sledovanie – URO musí zabezpečiť aby riadená veličina sledovala žiadanú veličinu čo najrýchlejšie a najpresnejšie.

Ak URO zabezpečí vyriešenie aj úlohy regulácie aj úlohy sledovania, tak matematicky v ideálnom prípade platia pre prenosy URO podmienky

$$G_{yr}(s) = 0 \quad (11)$$

$$G_{yw}(s) = 1 \quad (12)$$

1.2 Typy regulátorov

1.2.1 Proporcionálny regulátor

Vhodným vylepšením dvojpohového regulátora je zavedenie pásma proporcionality riadenia pre malé regulačné odchýlky – ak bude regulačná odchýlka malá, bude aj malý akčný zásah. Matematickým vyjadrením myšlienky proporcionality je zákon riadenia alebo prenos

$$u(t) = Z_R e(t), \quad G_R(s) = Z_R \quad (13)$$

Regulátor, ktorý pracuje na základe tohto zákona riadenia, sa nazýva **proporcionálny** (P regulátor) a Z_R je zosilnenie regulátora.

Z praktického hľadiska môže regulátor pracovať proporcionálne iba v určitom rozsahu vstupných hodnôt, pretože akčná veličina vždy môže byť iba v rozsahu medzi u_{min} a u_{max} . Proporcionálnosť regulátora tak môže byť charakterizovaná alebo jeho

zosilnením Z_R , alebo pásmom, kedy je regulátor lineárny – tzv. **pásmo proporcionality** P_p . Vzťah medzi nimi je

$$u_{max} - u_{min} = Z_R P_p \quad (14)$$

Ak uvažujeme, že maximálny rozsah vstupných veličín je normovaný, t. j. $u_{max} - u_{min} = 100\%$, potom dostaneme

$$Z_R = \frac{100}{P_p} \quad (15)$$

Ak je však regulačná odchýlka príliš veľká (v absolútnej hodnote), proporcionálny regulátor sa správa ako dvojpohový regulátor, pretože riadiaca veličina u je obmedzená svojimi hraničnými hodnotami.

Oproti dvojpohovému regulátoru má proporcionálny výhodu, pretože v ustálenom stave riadená veličina nekmitá. Avšak tento regulátor nedokáže úplne odstrániť trvalú regulačnú odchýlku. Preto sa zvyčajne dopĺňa na výstupe prídavnou zložkou, ktorá sa nazýva **offset**. Väčšinou ju nastavuje obsluha ručne.

1.2.2 Integračný regulátor

Na automatické odstránenie trvalej regulačnej odchýlky je potrebné zaviesť integrátor – akčný zásah sa bude meniť dovtedy, kým nebude regulačná odchýlka nulová. Matematicky sa dá táto požiadavka zapísať zákonom riadenia alebo prenosom

$$u(t) = \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt, \quad G_R(s) = \frac{1}{T_I s} \quad (16)$$

kde T_I sa nazýva integračná konštanta a určuje rýchlosť zmeny akčného zásahu v prípade jednotkovej regulačnej odchýlky. Čím bude veľkosť T_I menšia, tým väčšie zmeny riadenia budú generované. Takýto regulátor nazývame **integračný (I)**.

1.2.3 Derivačný regulátor

Derivačná zložka zlepšuje stabilitu uzatvoreného regulačného obvodu. Dôvod na jej zavedenie tkvie v tom, že účinok proporčionálnej (P) a integračnej (I) zložky na riadený proces nie je okamžitý, ale sa prejaví až po určitom čase. Naproti tomu **derivačný** (D) regulátor, ktorý je opísaný zákonom riadenia alebo prenosom

$$u(t) = T_D \frac{de(t)}{dt}, \quad G_R(s) = T_D s \quad (17)$$

kde T_D je derivačná konštanta, svojou akciou predpovedá vývoj regulačnej odchýlky.

Ideálny D regulátor je citlivý na prítomnosť šumu v riadenej veličine, pretože derivácia nepresného signálu môže viesť k veľkým a častým zmenám amplitúdy riadenia. Okrem toho, ideálny derivačný člen je nerealizovateľný, pretože stupeň čitateľa jeho prenosu je väčší ako stupeň menovateľa.

Z týchto dôvodov sa zavádza filtrovaný D regulátor s prenosom

$$G_R(s) = \frac{T_D s}{1 + \frac{T_D}{N} s} \quad (18)$$

čo nie je nič iné, ako ideálny D regulátor zapojený v sérii so systémom prvého rádu s malou časovou konštantou T_D/N . Typické hodnoty N sú medzi 5 a 20.

1.2.4 Štruktúry PID regulátora

Spojením P, I, a D regulátora vzniká PID regulátor. Obsahuje teda tri zložky: proporčionálnu, integračnú a derivačnú. Konkrétna realizácia môže byť rôzna a závisí napr. od spôsobu implementácie (elektromechanický, pneumatický, elektronický atď.).

Najčastejšie sa využívajú nasledovné štruktúry ideálneho PID regulátora:

- bez interakcie

$$G_R(s) = Z_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (19)$$

- s interakciou (sériová)

$$G_R(s) = Z_R \left(1 + \frac{1}{T_{IS}}\right) (1 + T_{DS}) \quad (20)$$

- paralelná

$$G_R(s) = Z_R + \frac{1}{T_{IS}} + T_{DS} \quad (21)$$

Je veľmi dôležité si uvedomiť, že konštanty regulátora sú úzko zviazané s konkrétnou štruktúrou regulátora, pre ktorú boli navrhnuté, a nie je ich možné použiť bez vhodného prepočtu pre niektorú z alternatívnych štruktúr. [1]

1.3 Stabilita uzavretého regulačného obvodu

Základnou požiadavkou kladenou na uzavretý regulačný obvod je jeho stabilita. Tá závisí od menovateľov prenosov URO – **charakteristického polynómu**. Ak ho položíme rovný nule, dostaneme **charakteristickú rovnicu** (rovnica (5) a (10)).

Systém je BIBO stabilný (z angl. bounded input – bounded output), ak ohraničený vstup dáva ohraničený výstup.

Nutná a postačujúca podmienka stability – korene charakteristickej rovnice (charakteristického polynómu) majú záporné reálne časti, t. j. ležia v ľavej polovine komplexnej roviny.

Kritériá stability sa používajú na určenie stability inak ako vyčíslením koreňov charakteristickej rovnice. Poznáme napr. Hurwitzovo kritérium stability alebo Routhovo–Schurovo kritérium stability. Slúžia na posúdenie stability pomocou koeficientov charakteristickej rovnice.

Routhovo–Schurovo kritérium stability – systém je stabilný, ak sú všetky koeficienty charakteristickej rovnice kladné (ak majú všetky koeficienty charakteristickej rovnice rovnaké znamienko) a ak sa v Routhovom–Schurovom algoritme nevyskytne koeficient rovný nule ani záporný koeficient.

Podmienka kladnosti koeficientov charakteristickej rovnice je nutnou ale nie postačujúcou podmienkou stability pre systém n-tého rádu.

Podmienka kladnosti koeficientov charakteristickej rovnice je nutnou a aj postačujúcou podmienkou stability pre systém 2. a 1. rádu.

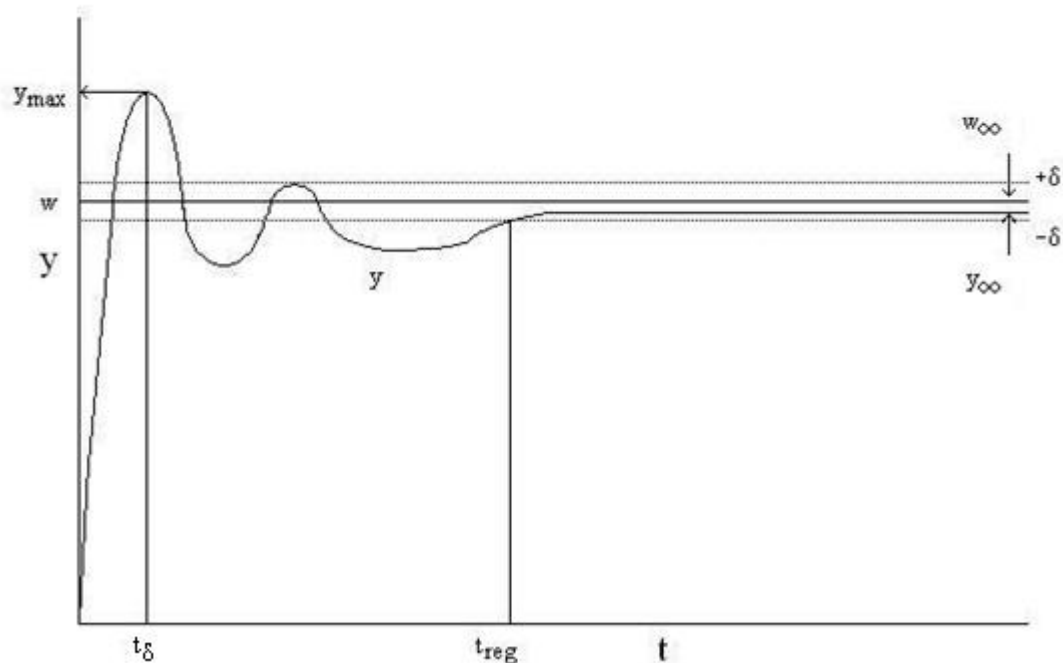
Kritické hodnoty parametrov regulátora – hodnoty parametrov Z_R , T_I alebo T_D regulátora, pri ktorých je URO na hranici stability. [2]

1.4 Kvalita riadenia

Jedna z úloh uzavretého regulačného obvodu je zabezpečiť, aby riadená veličina sledovala čo najpresnejšie žiadanú veličinu. Pre kvantifikáciu tejto požiadavky používame rozličné kritériá.

1.4.1 Časová oblasť

Pri vyhodnotení kvality riadenia v časovej oblasti je vhodné vybrať si nejaký štandardný priebeh vstupnej veličiny do uzavretého regulačného obvodu a vyhodnotiť priebeh riadenej veličiny. Za týmto účelom sa najčastejšie študuje reakcia uzavretého regulačného obvodu na jednotkovú skokovú zmenu žiadanej veličiny. Typická trajektória výstupu je zobrazená na Obr. 3.



Obr. 3 Prechodová charakteristika URO

V časovej oblasti je definovaných niekoľko ukazovateľov kvality riadenia:

- **Maximálny prekmit (preregulovanie)** δ_{max} udáva v percentách normovanú veľkosť maximálnej odchýlky výstupnej veličiny od jej ustálenej hodnoty. Matematicky sa dá zapísať vzt'ahom

$$\delta_{max} = \frac{y_{max} - y_{\infty}}{y_{\infty} - y_0} \cdot 100 \% \quad (22)$$

Pre aperiodické deje bez prekmitu platí $\delta_{max} = 0$. Vo väčšine prípadov sa však odporúča hodnota prekmitu menšia ako 25 %. [1]

- **Čas regulácie** t_{reg} – čas, od ktorého sa riadená veličina dostane natrvalo do δ -okolía žiadanej veličiny.
- **Čas maximálneho preregulovania** t_{δ} – čas, v ktorom nastane maximálne preregulovanie. [2]
- **Trvalá regulačná odchýlka (TRO)** $e(\infty)$ je definovaná ako rozdiel medzi žiadanou veličinou w a riadeným výstupom v novom ustálenom stave. Je nenulová v prípade použitia regulátora bez integračnej zložky.

Kým časové údaje vypovedajú o rýchlosti regulácie, ostatné charakteristiky sú vyjadrením kvality regulácie. [1]

1.4.2 Integrálne ukazovatele kvality

Medzi najlepšie integrálne ukazovatele kvality riadenia patria podľa [3]:

- Integrál absolútnej regulačnej odchýlky IAE

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (23)$$

- Integrál štvorca regulačnej odchýlky ISE

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (24)$$

2 Nastavovanie parametrov regulátorov

Pre nastavovanie parametrov regulátorov sa používa veľké množstvo metód, ktoré pracujú alebo s prenosovou funkciou riadeného procesu – analytické metódy alebo s nameranými charakteristikami (prechodová charakteristika, kritické zosilnenie atď.) – experimentálne metódy.

V každej z týchto metód ide o dosiahnutie niektorého z ukazovateľov kvality riadenia.

2.1 Analytické metódy

Pri analytických metódach nastavenia regulátora sa predpokladá znalosť prenosu riadeného systému. Medzi tieto metódy patrí napr. Naslinova metóda a metóda umiestnenia pólov, ktoré využívajú charakteristickú rovnicu URO, obsahujúcu aj neznáme parametre regulátora, ktorý treba nastaviť. Na základe špeciálnych tvarov charakteristickej rovnice sa potom získavajú rovnice na výpočet parametrov regulátora.

2.2 Experimentálne metódy

Všetky analytické metódy predpokladajú znalosť prenosu riadeného systému. Keďže ho obyčajne nepoznáme presne, využívame tieto metódy skôr na prvotný odhad parametrov regulátora, ktorý potom treba ešte doladiť priamo experimentovaním na procese.

Tieto nedostatky sú čiastočne eliminované použitím praktických metód, ktoré pre určenie parametrov regulátora skúmajú priamo dynamické vlastnosti riadeného procesu. Budeme teda uvažovať, že nepoznáme dynamický model (prenosovú funkciu) riadeného procesu, ale iba jeho správanie sa v čase.

2.2.1 Spracovanie prechodovej charakteristiky

Najčastejšie používaným vstupným signálom na identifikáciu systému potrebnú na návrh regulátora, prípadne 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 potrebné, aby bol skúmaný systém v ustálenom stave. Časový priebeh výstupnej veličiny, ktorý je

reakciou na skokovú zmenu jednej zo vstupných veličín, voláme reálnou prechodovou charakteristikou (PCH).

Uvažujme nameranú prechodovú charakteristiku podľa Obr. 4. Predpokladáme, že vstupná veličina sa zmenila skokom v čase $t = t_0$ (do času $t = t_0$ posunieme os y) z hodnoty u_0 na hodnotu u_∞ . Na PCH určíme inflexný bod, preložíme ním dotyčnicu k PCH, ktorá na rovnobežkách s časovou osou prechádzajúcimi hodnotami y_0, y_∞ vymedzí dva časové údaje: čas prietahu t_u a čas nábehu t_n . Okrem toho môžeme z PCH určiť hodnotu zosilnenia systému daného pomerom zmien výstupu a vstupu pomocou vzťahu

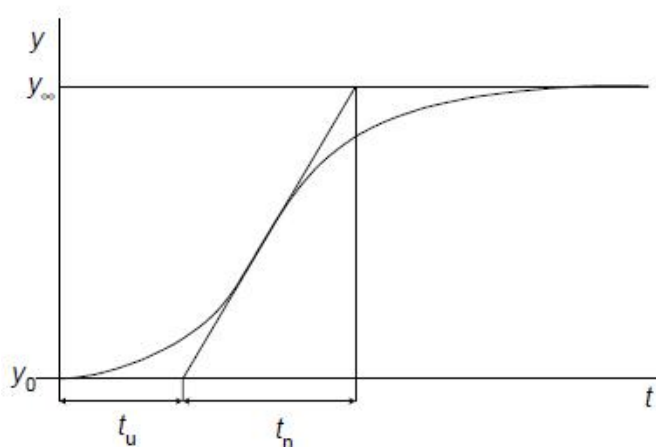
$$Z = \frac{y_\infty - y_0}{u_\infty - u_0} \quad (25)$$

V prípade jednotkového skoku na vstupe a nulových začiatkových podmienok sa tento vzťah zjednoduší na $Z = y_\infty$.

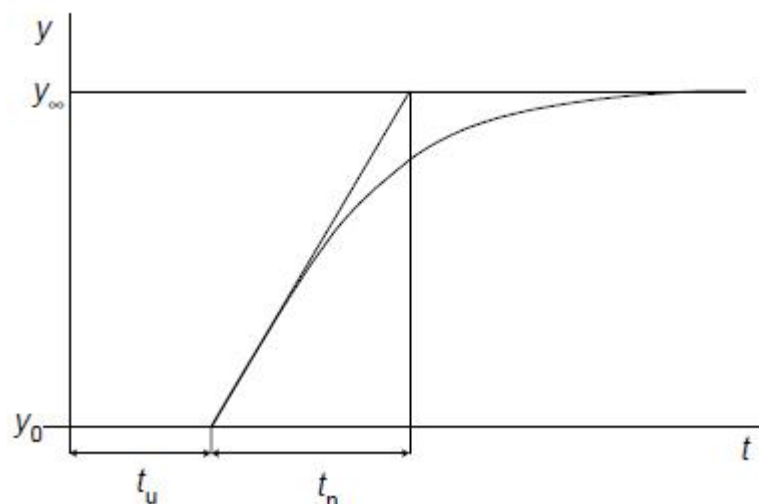
Poznámky:

- Dotyčnicu v inflexnom bode určíme najjednoduchšie ako priamku minimálneho sklonu, ktorá ešte nepretne PCH v troch bodoch.
- V prípade, že nameriame PCH, ktorá nemá inflexný bod, prekladáme dotyčnicu miestom s najväčším sklonom spôsobom znázorneným na Obr. 5.

Pre približný prenos identifikovaného systému potom môžeme použiť Strejcovu metódu identifikácie z prechodovej charakteristiky. [1]



Obr. 4 Všeobecná prechodová charakteristika [1]



Obr. 5 Prechodová charakteristika systému prvého rádu s dopravným oneskorením [1]

2.2.2 Strejcová metóda identifikácie systému

Dynamiccké vlastnosti identifikovaného systému aproximujeme pomocou náhradného prenosu v tvare

$$G(s) = \frac{Z}{(Ts + 1)^n} e^{-Ds} \quad (26)$$

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

Postup pri identifikácii je nasledovný:

- Z nameranej PCH určiť hodnoty Z , t_u , t_n .
- Určiť podiel $f_s = t_u/t_n$.
- V Tab. 1 vybrať rád systému n tak, aby platilo

$$f(n) \leq f_s < f(n + 1) \quad (27)$$

Tab. 1 Tabuľka pre Strejcovu metódu identifikácie [2]

n	1	2	3	4	5	6
$f(n) = t_u/t_n$	0,000	0,104	0,218	0,319	0,410	0,493
$g(n) = T/t_n$	1,000	0,368	0,271	0,224	0,195	0,161

V prípade, že vypočítaná hodnota f_s je väčšia, ako maximálna možná uvedená v tabuľke, t_u sa zmenší na prijateľnú mieru (výsledná hodnota t_u musí byť taká, aby sa hodnota podielu t_u/t_n rovnala tabuľkovému) o hodnotu, ktorá sa potom v ďalšom kroku pripočíta k vypočítanej hodnote dopravného oneskorenia. [2]

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

$$D = [f_s - f(n)] t_n \quad (28)$$

- Časová konštanta T sa určí pomocou hodnôt z riadku funkcie $g(n)$ pre príslušné n . Odčíta sa $g(n)$ a T sa určí ako

$$T = g(n) t_n \quad (29)$$

2.2.3 Strejcová metóda nastavenia regulátorov

Na určenie parametrov PID regulátora v tvare podľa rovnice (19) pomocou Strejcovej metódy uvažujeme prenos riadeného systému v tvare podľa rovnice (26).

Na nastavenie parametrov regulátora podľa Strejca sa používa Tab. 2.

Vyberieme si vhodnú štruktúru regulátora a z príslušného riadku odčítame jeho parametre. Ak volíme štruktúru PID regulátora, potom musí byť riadený prenos minimálne tretieho rádu, pre P a PI regulátor je nutný prenos minimálne druhého rádu. Vyplýva to zo vzorca pre výpočet Z_R v Tab. 2. [1]

Tab. 2 Nastavenie regulátora podľa Strejca [2]

Regulátor	Z_R	T_I	T_D
P	$\frac{1}{Z} \frac{1}{n-1}$	-	-
PI	$\frac{1}{Z} \frac{n+2}{4(n-1)}$	$T \frac{n+2}{3}$	-
PID	$\frac{1}{Z} \frac{7n+16}{16(n-2)}$	$T \frac{7n+16}{15}$	$T \frac{(n+1)(n+3)}{7n+16}$

2.2.4 Iné metódy nastavenia regulátorov

Medzi metódy syntézy regulátorov, založené na identifikácii Strejcovou metódou, možno okrem Strejcovej metódy zaradiť tieto:

- **Zieglerova – Nicholsova metóda**
- **Cohenova – Coonova metóda:** vhodná na návrh PD regulátora
- **Metóda požadovaného modelu:** voľba koeficientu β od relatívneho preregovania σ , návrh iba PI regulátora

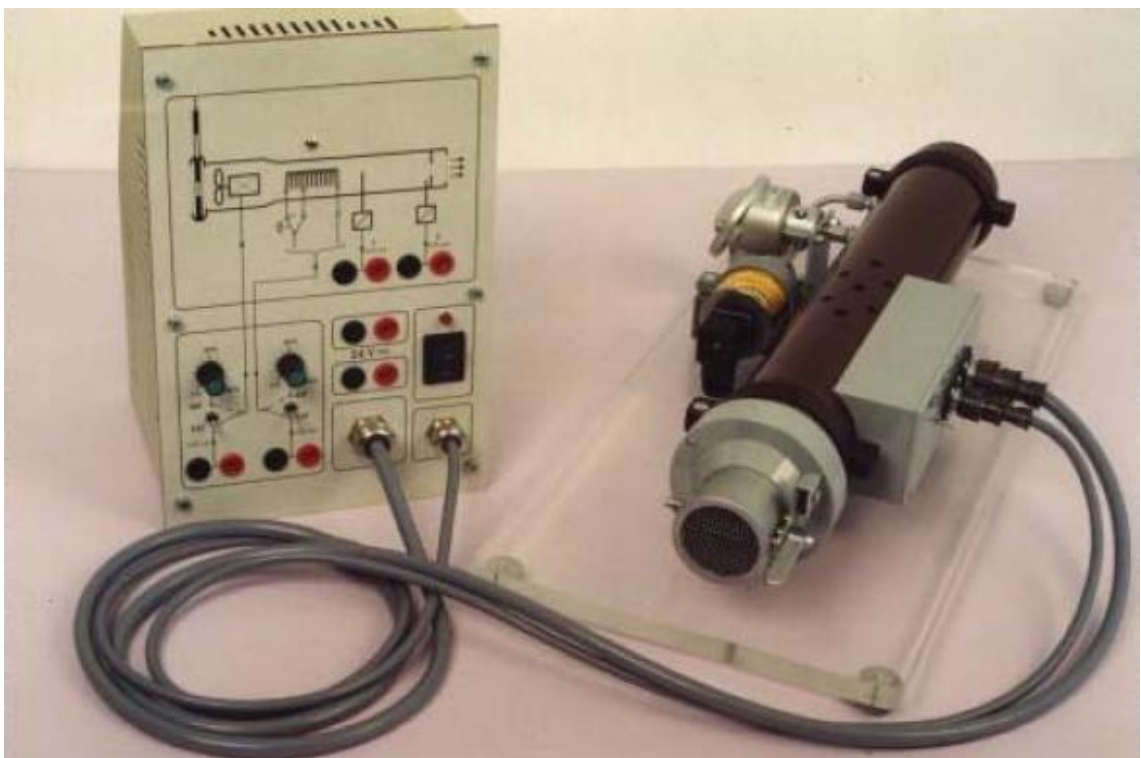
Medzi metódy založené na identifikácii 1. rádu s dopravným oneskorením patria tieto metódy:

- **Haalmanova metóda:** návrh iba PI regulátora
- **Chien – Hrones – Reswickova metóda:** riadenie na žiadanú hodnotu a odstránenie vplyvu poruchy, obe pre povolené preregovanie 0 % a 20 %
- **Metóda priamej syntézy s použitím aproximovaného modelu URO:** volí sa časová konštanta URO: $T_{URO} < T$, návrh PI, PID regulátora
- **Riverova – Morariho metóda:** volí sa časová konštanta URO: $T_{URO} < T$
- **Smithova – Murrillova metóda:** mala by byť splnená podmienka $0,1 < \frac{t_u}{t_n} < 1$, riadenie na žiadanú hodnotu (návrh PI, PID regulátora) alebo odstránenie vplyvu poruchy [4]

3 Opis zariadenia

Pomocou laboratórneho zariadenia LTR700 (Obr. 6) možno meniť teplotu a prietok vzduchu. Slúži na tréning riadenia reálneho procesu. Okrem automatického riadenia umožňuje aj riadenie manuálne. Samotné zariadenie sa skladá z dvoch základných častí:

- z **mechanickej zostavy** (trubice), ktorá obsahuje ventilátor a ohrevnú špirálu, diferenciálny tlakový snímač a snímač teploty
- zo **skrinky so zdrojom**, ktorá má dve fixné prepojenia na mechanickú zostavu



Obr. 6 Laboratórne zariadenie LTR700 [5]

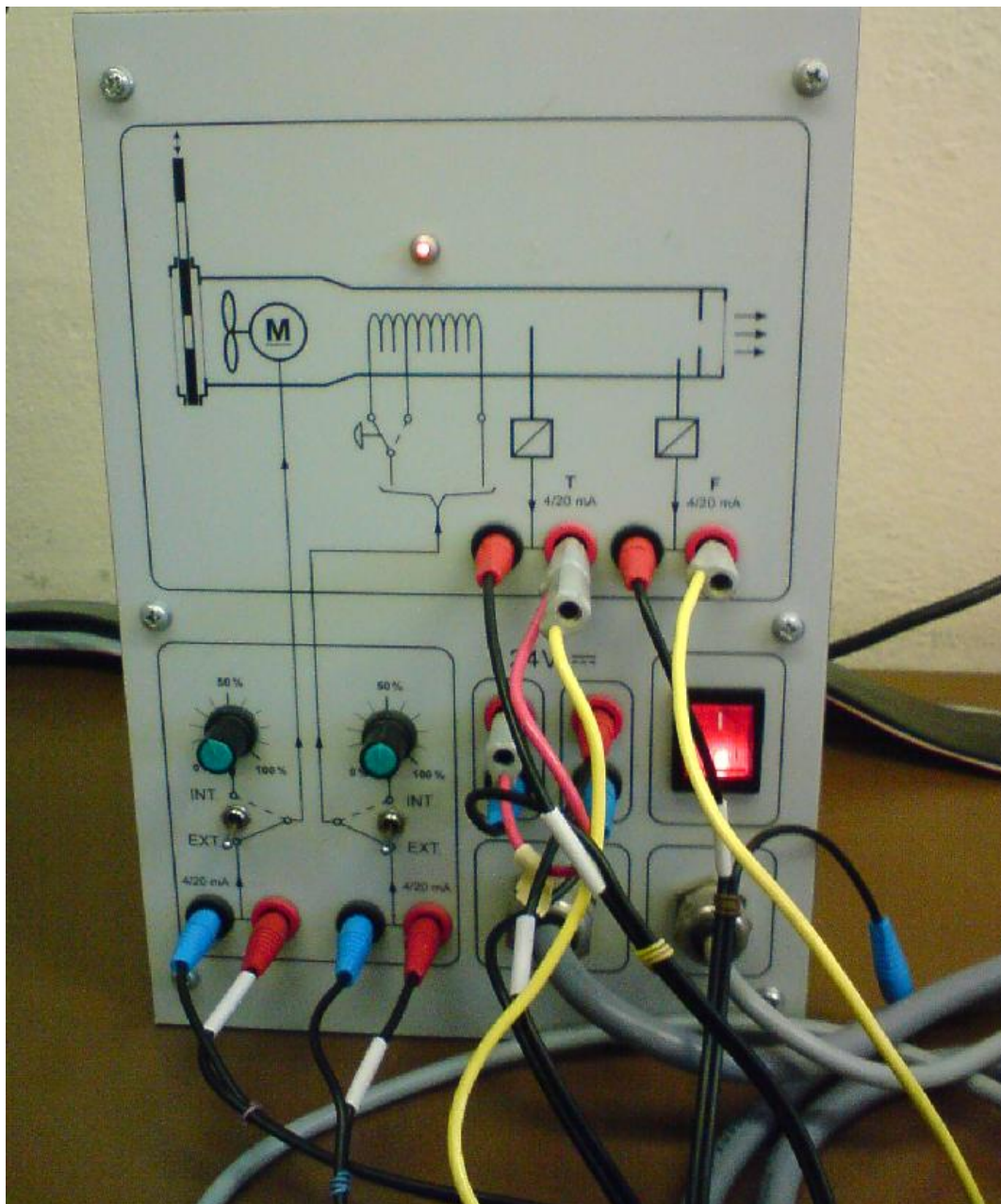
3.1 Opis mechanickej zostavy

Na mechanickej zostave možno realizovať **skokovú poruchu prietoku vzduchu** pomocou regulačnej klapky. Táto klapka je prepojená s pákou, ktorá je pomocou magnetu udržiavaná vo vertikálnej polohe, čo znamená minimálny prietok vzduchu. Zmena polohy páky do horizontálnej polohy, znamená zmenu prietoku vzduchu k maximálnej hodnote. Príčinou je otvorenie klapky. Páku je nutné prepínať manuálne. **Skokovú funkciu ohrevu** možno dosiahnuť nastavením vypínača s polohami „0“ a „1“.

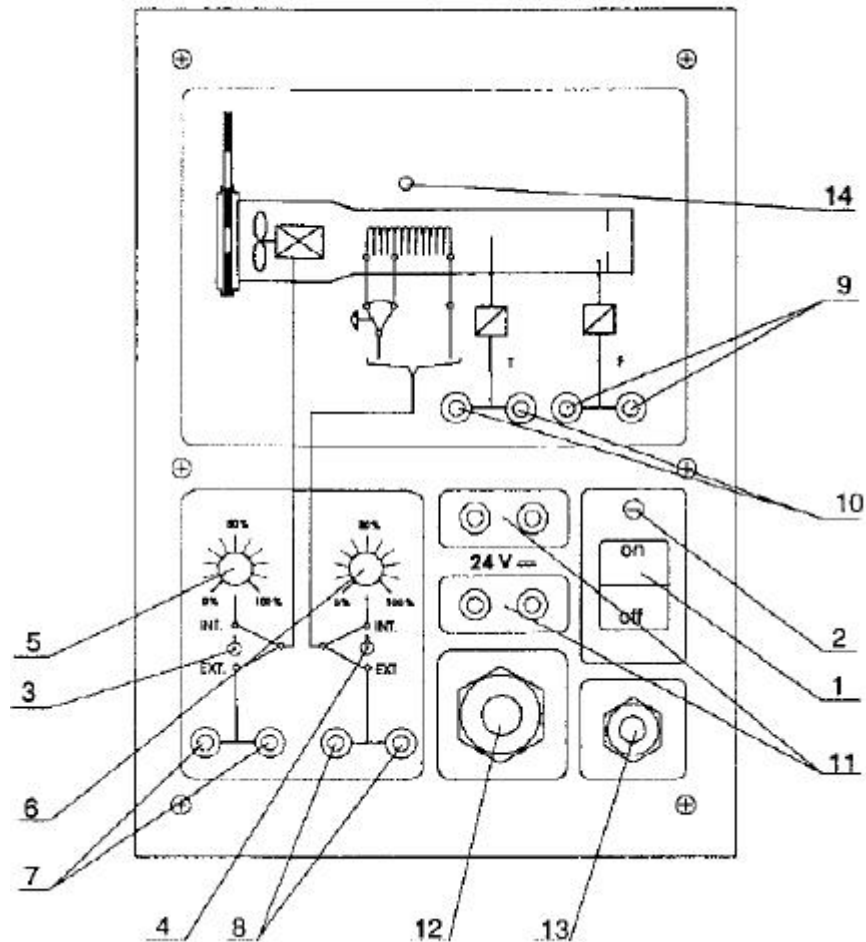
Pri polohe „0“ je ohrev minimálny ($100\ \Omega$), poloha „1“ zodpovedá maximálnemu ohrevu ($75\ \Omega$). Tento vypínač sa nachádza na skrinke so zdrojom.

3.2 Opis skrinky so zdrojom

Pripojenie 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) [5]. Predný (ovládací) panel skrinky so zdrojom je vyobrazený na Obr. 7. Na Obr. 8 je popis jeho ovládacích častí.



Obr. 7 Predný panel skrinky so zdrojom



Obr. 8 Popis predného panelu skrinky so zdrojom [5]

Jednotlivé body na Obr. 8 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 (4-20 mA) na riadenie otáčok externe
8. vstup (4-20 mA) na riadenie ohrevu externe
9. meraný výstup (4-20 mA) zo senzora prietoku vzduchu
10. meraný výstup (4-20 mA) zo senzora teploty

11. dva elektricky izolované výstupy (2*24 V 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 [5]

3.3 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 4-20 mA na ± 10 a v opačnom smere z ± 10 na 4-20 mA. [5]

3.4 Konektor CP1102

Dátový konektor CP1102 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. [5]

3.5 Vstupno-výstupná karta

Vstupno-výstupná karta má nasledujúce parametre:

typ: DS1102 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:

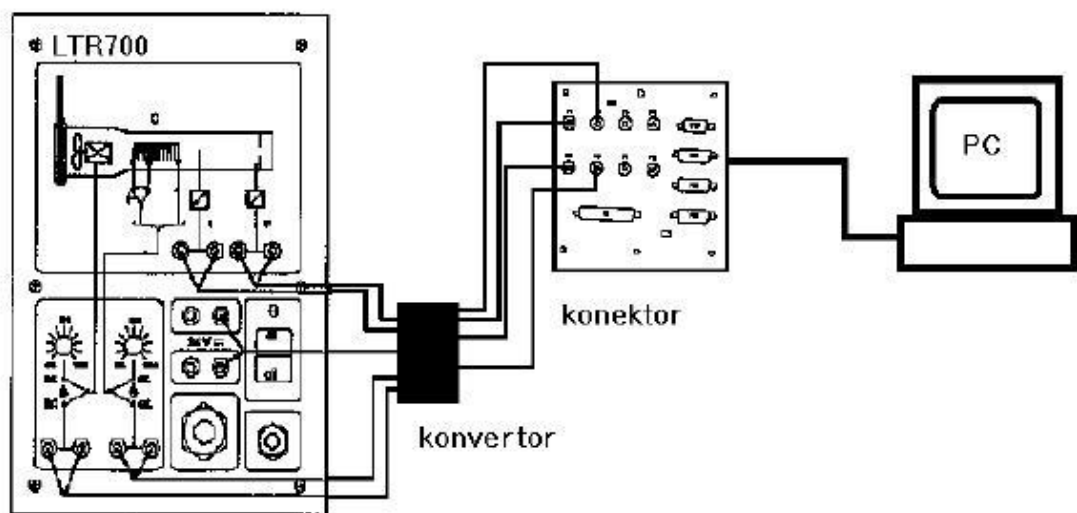
- 4 paralelné 12 bit kanály
- 4 μ s prechodový čas
- ± 10 V výstupy

digitálne I/O:

- programovateľný digitálny I/O podsystém založený na TI 25MHz TMS320P14 DSP
- 16 digitálnych I/O vedení
- zachytávacia/porovnávacia jednotka s 8 kanálmi (2 dnu, 4 von, 2 dnu/von)
- PWM (vyvíjanie) na 6-tich kanáloch
- užívateľské prerušenie [5]

3.6 Prepojenie zariadení

Schematické zapojenie zariadenia LTR700, konvertora signálov, počítača so vstupno-výstupnou kartou DS1102 DSP a konektora je na Obr. 9. Samotné prepojenie jednotlivých prvkov sa realizuje použitím vodičov. [5]



Obr. 9 Schematické zapojenie zariadení [5]

4 Riadiaci systém dSPACE

Riadiaca doska (DS1102 DSP Controller Board) je navrhnutá pre vývoj vysokorýchlostných digitálnych regulátorov a simulácii v reálnom čase. Jedná sa o riadiaci systém založený na procesore Texas Instrument TMS320C31. DSP1102 DSP Controller Board je štandardná PC/AT karta (ISA slot).

Návrh celého systému (model, riadenie, vizualizácia, ...) prebieha v troch krokoch:

- Vytvorenie aplikácie – **Real-Time Application (RTA)** v Simulinku. Pre tento účel sa môžu využiť bloky poskytnuté toolboxom **dSPACE Real-Time Interface 1102 (RTI)**.
- Kompilácia a zavedenie RTA do procesora – **dSPACE Real-Time Processor (RTP)**.
- Vizualizácia a ovládanie RTA v **ControlDesku**.

4.1 Real-Time Interface

Real-Time Interface (RTI) sa môže použiť za predpokladu, že MATLAB, Simulink, Real-Time Workshop a Real-Time Inteface pre DS1102 DSP Controller Board (RTI1102) sú správne nainštalované.

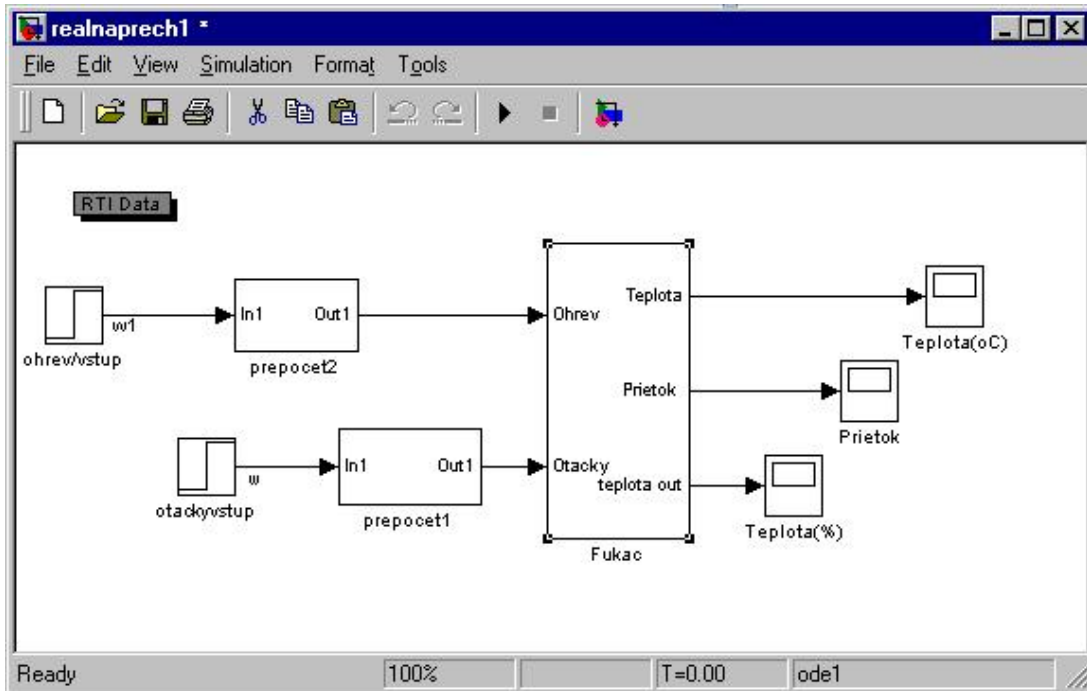
Otvorenie knižnice dSPACE RTI1102:

- Spustí sa program MATLAB.
 - Spustí sa program Simulink.
V okne **Simulink Library Browser** sa nachádza knižnica dSPACE RTI1102.
 - Alebo v príkazovom riadku MATLABu sa zadá príkaz **rti1102**.
- Knižnica DS1102 (v RTI1102) obsahuje okrem iného aj bloky **DS1102DAC** a **DS1102ADC**, ktoré sa budú používať. [6]

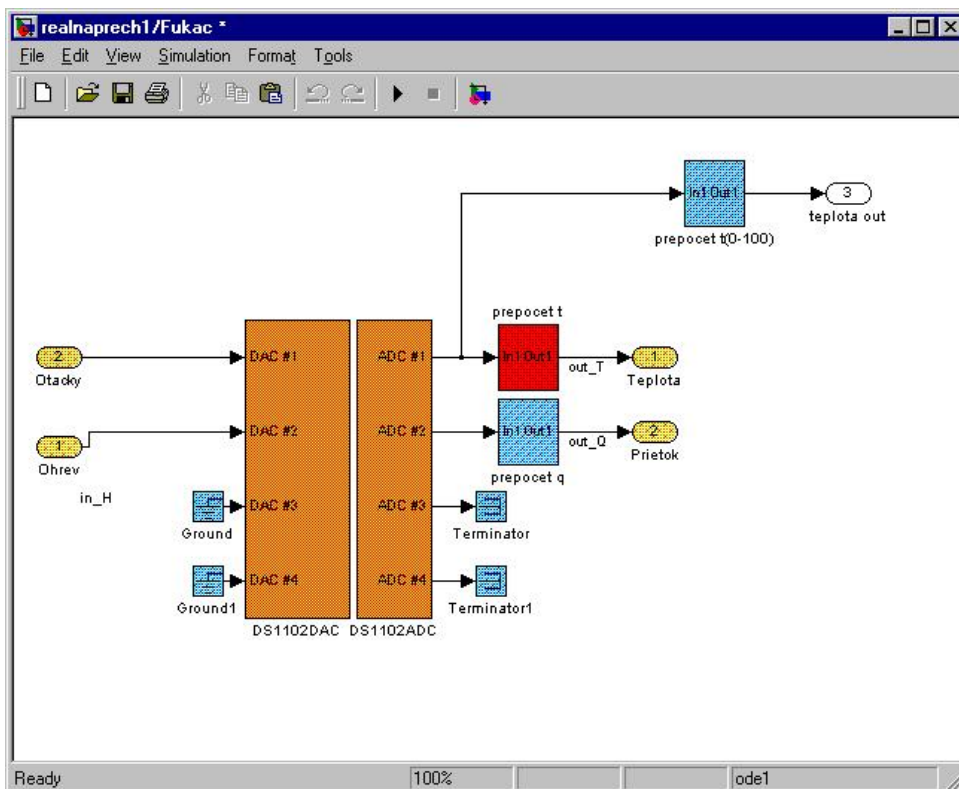
4.1.1 Práca s modelom

Na zmeranie prechodovej charakteristiky (PCH) laboratórneho teplovzdušného procesu možno použiť schému zobrazenú na Obr. 10. Na Obr. 11 vidno schému bloku

„Fukac“ (model RTA) vytvorenú pomocou knižnice RTI1102, ktorá reprezentuje uvedený objekt ako systém s dvoma vstupmi a tromi výstupmi.



Obr. 10 Schéma na meranie prechodovej charakteristiky

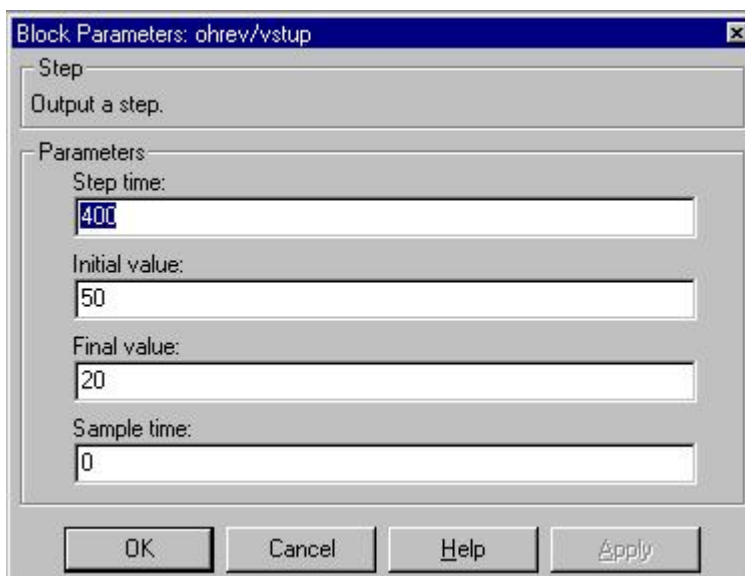


Obr. 11 Model Real-Time Application (RTA) [5]

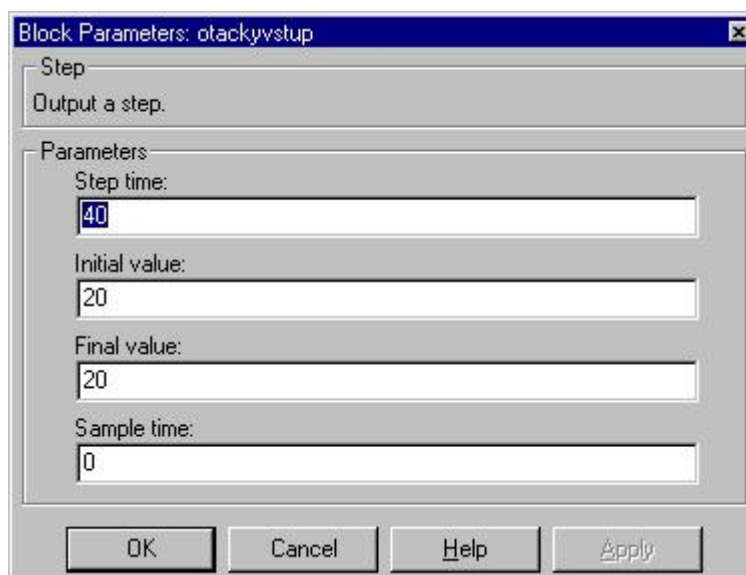
Je dôležité, aby sa jednotlivým blokom a signálom priradili správne názvy. Názvy signálov sa vytvoria tak, že sa dvakrát klikne na čiaru, ktorá zodpovedá danému signálu. Potom sa do prázdneho okna vloží názov signálu. Bloky **DS1102ADC** a **DS1102DAC** predstavujú analógovo-digitálny a digitálno-analógový prevodník, prostredníctvom ktorých DS1102 komunikuje s reálnym zariadením (tepelným systémom). Nepripojené vstupy a výstupy z blokov musia byť pripojené k blokom **Ground** (zem), resp. **Terminator** (ukončenie). [6]

4.1.2 Parametre simulácie a kompilácia RTA

V schéme uvedenej na Obr. 10 sa v blokoch „ohrev/vstup“ a „otackyvstup“ nastaví požadované hodnoty v jednotlivých riadkoch. Pre riadenie teploty vzduchu pomocou ohrevu pri konštantnej hodnote otáčok, možno použiť pre jednotlivé bloky hodnoty uvedené na Obr. 12 a Obr. 13. Z Obr. 12 vidno, že v čase **400 s** nastane skoková zmena a ohrev sa zníži z hodnoty **50 %** rozsahu na hodnotu **20 %**. Na Obr. 13 možno pozorovať, že hodnota otáčok je počas celého procesu konštantná.



Obr. 12 Údaje bloku „ohrev/vstup“



Obr. 13 Údaje bloku „otackyvstup“

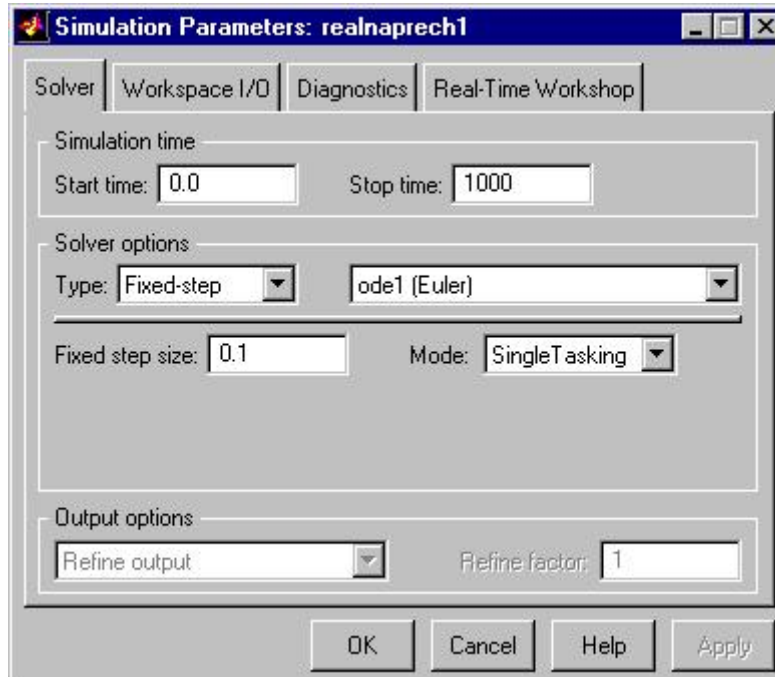
Na pracovnej lište nad schémou sa potom klikne na **Simulation** a vyberie možnosť **Parameters**, alebo na lište sa klikne na **Tools** a vyberie sa **RTW Options**. Otvorí sa dialógové okno **Simulation Parameters**.

V okne **Solver** sa nastaví:

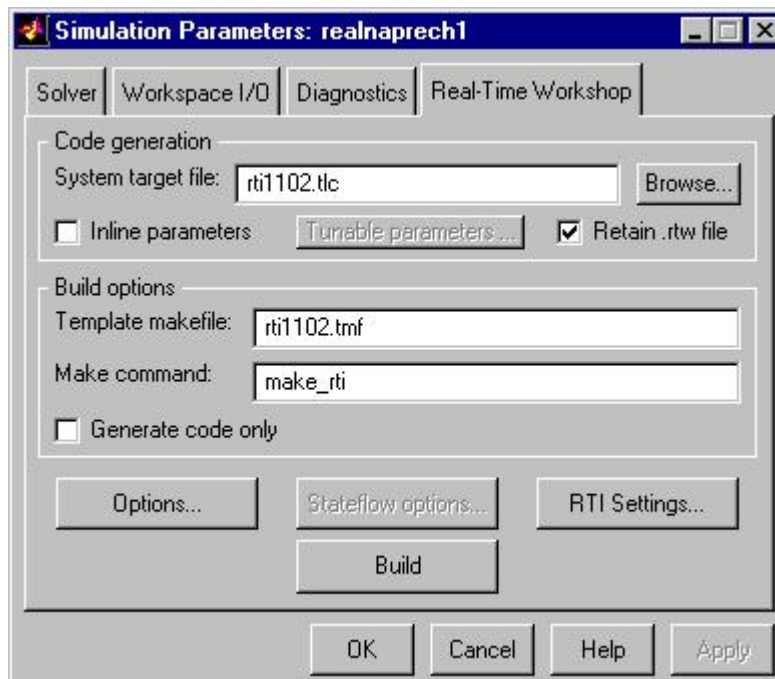
- **Start time**: musí byť vždy 0.0
- **Stop time**
- **Type**: musí byť vždy **Fixed-step** a vyberie sa metóda
- **Fixed step size**: nenulová hodnota (závisí od typu RTA)

V časti **Real-Time Workshop** sa skontrolujú nastavenia, ktoré by mali byť zhodné s nastaveniami na Obr. 15. Potom sa klikne na ikonu **Build**, ktorá spustí kompiláciu modelu. Kompiláciou sa vytvorí niekoľko súborov (v pracovnom adresári). Z nich je dôležitý súbor **názov.sdf** (SDF – System Description File), kde „názov“ je zhodný z názvom modelu. Ďalej sa vytvorí kompilovaný program (RTA) **názov.obj**. Tento program je automaticky načítaný do DS1102 a následne spustený.

Na zastavenie a reštartovanie RTA na RTP sa použije **ControlDesk**. Ak je RTA zastavená a súčasná alebo novšia RTA uložená v pracovnom adresári, potom môže byť načítaná do DS1102 použitím **názov.obj** súboru v ControlDesku. [6]



Obr. 14 Parametre simulácie – Solver



Obr. 15 Parametre simulácie – Real-Time Workshop

4.2 ControlDesk

Po inštalácii programového balíka dSPACE je program ControlDesk (na vizualizáciu a ovládanie) prístupný vo Windows **Štart** menu:

Programy – dSPACE Tools – ControlDesk

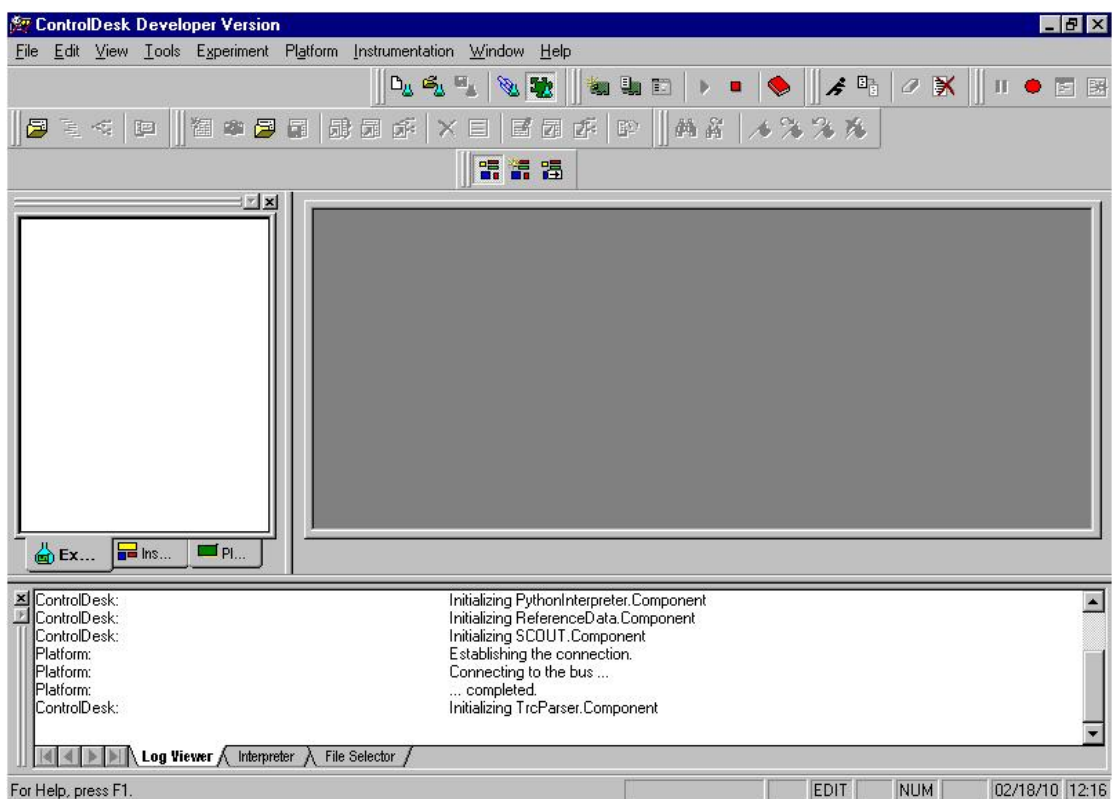
Po spustení ControlDesku prebieha inicializácia, ktorú vidno v spodnej časti programu v záložke **Log Viewer** (Obr. 16).

4.2.1 Tvorba nového experimentu

Pri vytváraní nového experimentu sa musí špecifikovať jeho názov a pracovný adresár. Do pracovného adresára ControlDesk ukladá súbor s názvom experimentu (CDX), ktorý obsahuje všetky informácie o experimente. V tomto adresári je možné vytvárať aj podadresáre. Po uložení experimentu na disk, už názov experimentu a pracovný adresár nemožno meniť.

Postup pri vyváraaní nového experimentu zahŕňa tieto kroky:

- V bar menu sa vyberie položka **File – New Experiment**, ktorá otvorí okno **New Experiment**.
- V riadku **Experiment Name** sa zadáva názov experimentu. Pracovný adresár sa zadáva v riadku **Working Root**.
- Experiment sa uloží kliknutím na ikonu **OK**. Pri ukončení programu ControlDesk otvorí okno s otázkou: „Do you want to add all open files to the experiment“, ktorú treba akceptovať.



Obr. 16 ControlDesk

4.2.2 Úprava vlastností experimentu

Pri úprave vlastností experimentu sa postupuje nasledovne:

- V bar menu sa vyberie položka **File – Open Experiment**, ktorá otvorí okno **Open Experiment**. Po nastavení sa do adresára s uloženým experimentom (prípadne viacerými), sa označí požadovaný a otvorí sa.
- V bar menu sa vyberie položka **Experiment – Configure Settings**, ktorá otvorí okno **Configure Experiment Settings**. V okne sa upraví potrebné údaje a klikne sa na ikonu **OK**.

4.2.3 Prístrojový panel

Na vytvorenie nového **Instrument Panel** (prístrojový panel), sa musí najskôr vytvoriť nové **Layout Window**, kde sa potom umiestnia prístroje.



Obr. 17 Módy panelov prístrojov

4.2.3.1 Vytváranie panelov prístrojov

Pomocou panelov nástrojov sa môže ovládať RTA a/alebo monitorovať rôzne signály a ukladať údaje do súboru. Prístroje možno umiestniť ľubovoľne v jednom alebo vo viacerých oknách. Tieto okná sa nazývajú **Layout Windows**. Skupina prístrojov umiestnených v **Layout Window**, ktoré sú prepojené zo zodpovedajúcimi signálmi sa nazýva **Virtual Instrument Panel**. Vytvorenie panelu prebieha v dvoch krokoch:

- Voľba a rozmiestnenie prístrojov.
- Prepojenie prístrojov so signálmi.

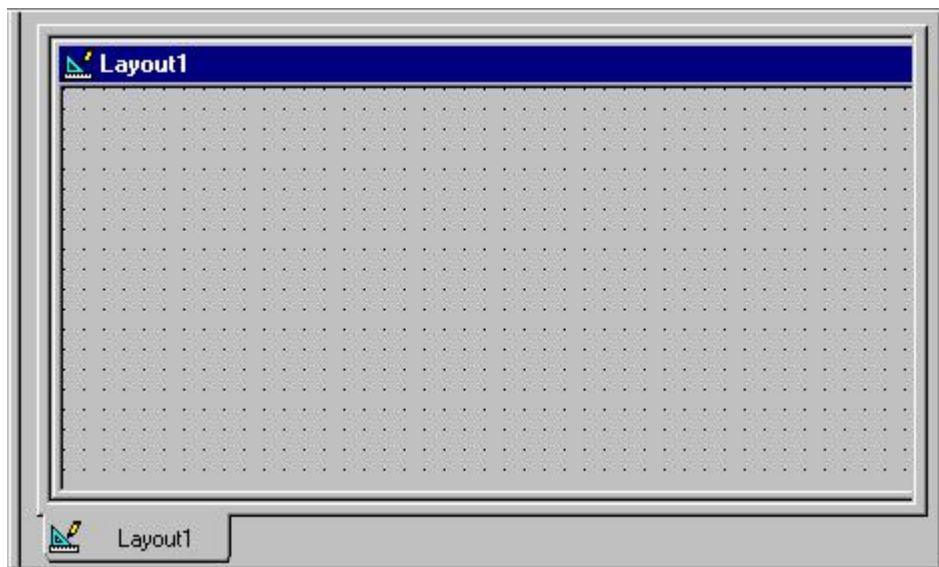
4.2.3.2 Tvorba Layout Window

- V bar menu sa vyberie **File – New**, kde sa zvolí **Layout**. Možno použiť aj klávesovú skratku Ctrl+Shift+L.
- Zobrazí sa nové **Layout Window** - Obr. 18 (Instrument Panel) a **Instrument Selector** (Obr. 19).

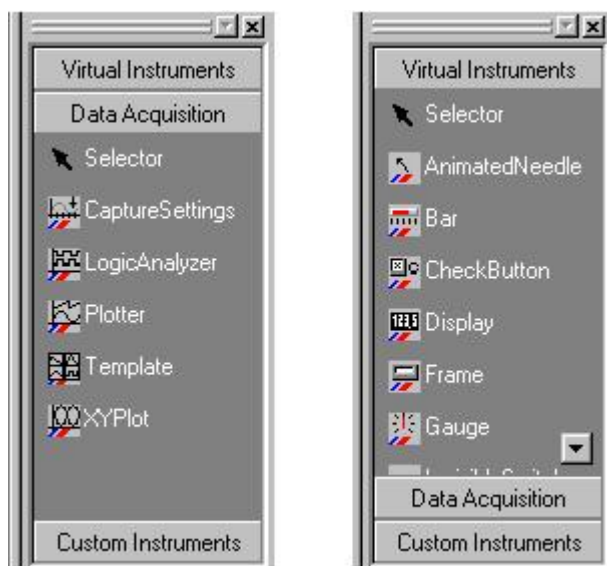
4.2.3.3 Instrument Selector

ControlDesk ponúka základnú sadu prístrojov rozdelených do nasledujúcich skupín:

- **Virtual Instruments**
- **Data Acquisition**
- **Custom Instruments**



Obr. 18 Layout Window

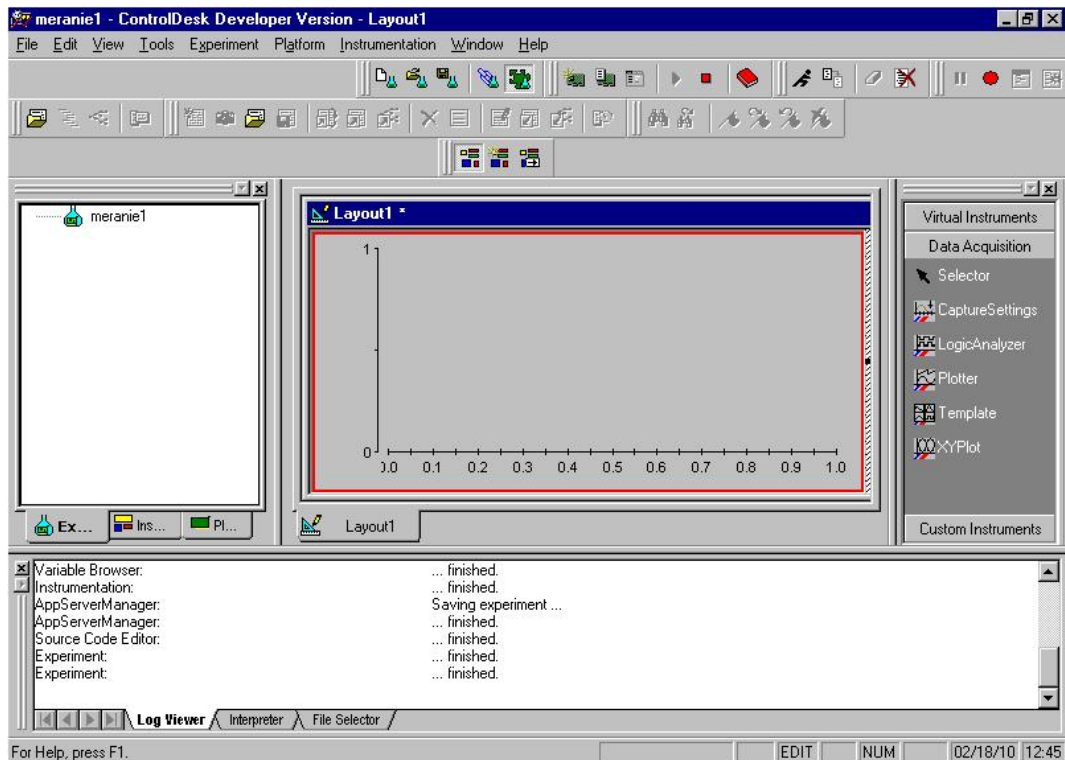


Obr. 19 Instrument Selector – Data Acquisition, Virtual Instruments

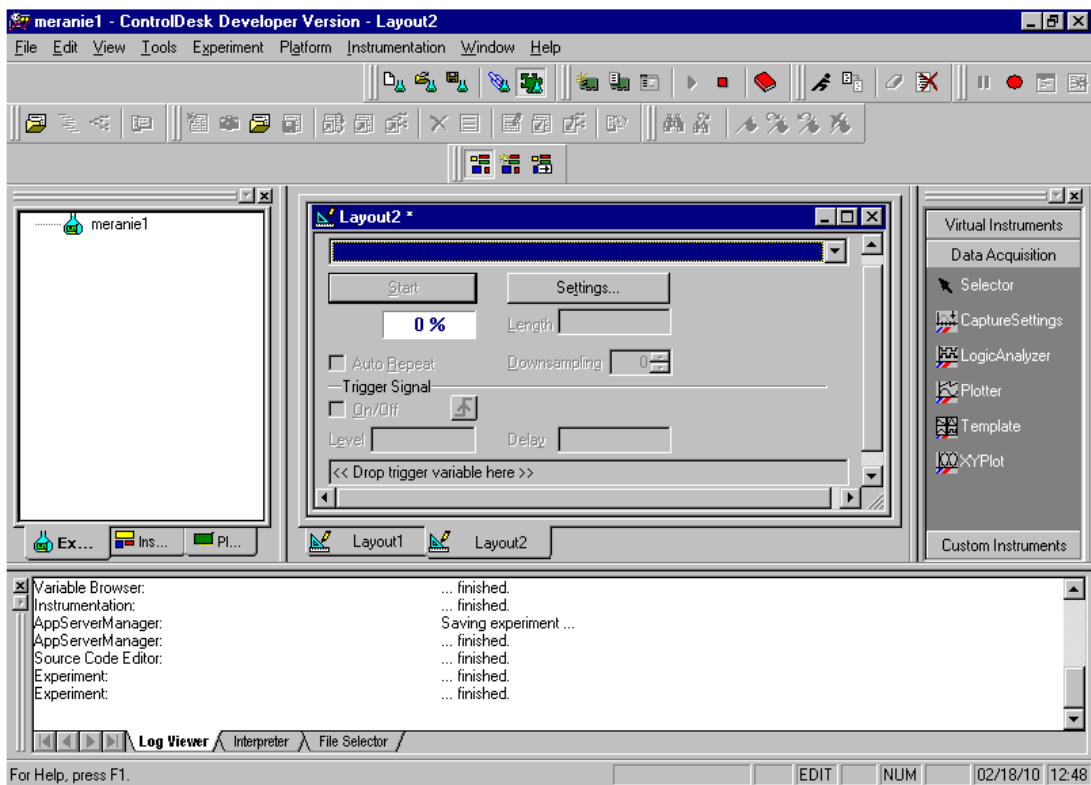
4.2.3.4 Vytvorenie prístrojov

Na zmeranie prechodovej charakteristiky laboratórneho teplovzdušného zariadenia sa vyberie v **Instrument Selector** zo skupiny **Data Acquisition** prístroj **Plotter** a označí sa jeho ikona. Potom sa pomocou myši vytvorí v **Layout Window** obdĺžnik, ktorý zodpovedá veľkosti prístroja (Obr. 20). Podľa kapitoly 4.2.3.2 sa vytvorí druhý **Layout Window** a zo skupiny **Data Acquisition** vyberie prístroj **Capture Settings** na zachytávanie údajov a rovnakým spôsobom, ako pri prístroji **Plotter**, sa nanesie do druhého **Layout Window** (Obr. 21).

Červený rámik okolo prístroja znamená, že nebolo vytvorené prepojenie so signálom.



Obr. 20 Prístroj „Plotter“

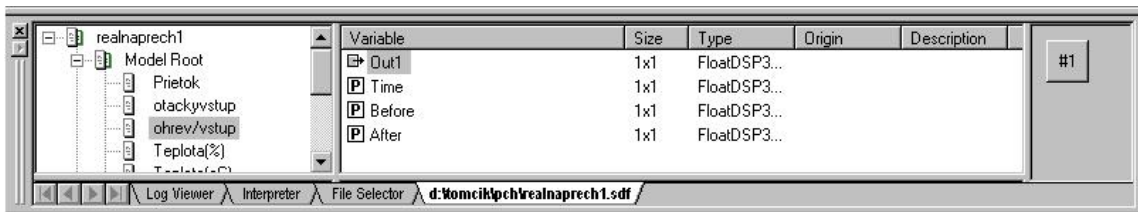


Obr. 21 Prístroj „Capture Settings“

4.2.3.5 Prepojenie prístrojov so signálmi

Jednotlivé prístroje možno prepojiť s príslušnými signálmi nasledujúcim spôsobom:

- V bar menu sa klikne na **File** a vyberie možnosť **Open Variable File...** (Ctrl+T).
- Nastaví sa do adresára, kde sa nachádza súbor s koncovkou **.sdf** (a názvom zhodným s názvom schémy (Obr. 10)), potrebný na odmeranie prechodovej charakteristiky, vyberie sa a otvorí.
- V **Tool Window** sa objaví nová záložka (Obr. 22).



Obr. 22 Tool Window

- V ľavej časti **Tool Window** sa vyhľadá pracovný adresár a v ňom sa klikne na podadresár **Model Root**, v ktorom sa nachádza zoznam všetkých blokov z Obr. 11. [6]
- V zozname sa klikne na **ohrev/vstup** a v pravej časti sa vyberie údaj, ktorý zodpovedá výstupu z bloku **ohrev/vstup – Out1**.
- Zvolený údaj sa pomocou myši preniesie do prístroja **Plotter** na os *y*.
- Rovnakým postupom sa vyhľadajú a prenású údaje **Teplota(%)** a **Teplota(oC)** do prístroja **Plotter** na os *y*.
- V ľavej dolnej časti prístroja **Plotter** v **Layout Window**, po umiestnení všetkých troch údajov, sa zobrazia 3 farebné štvorce. V animačnom móde (Obr. 17) možno priložením kurzoru na daný štvorec zistiť, ktorý údaj predstavuje.

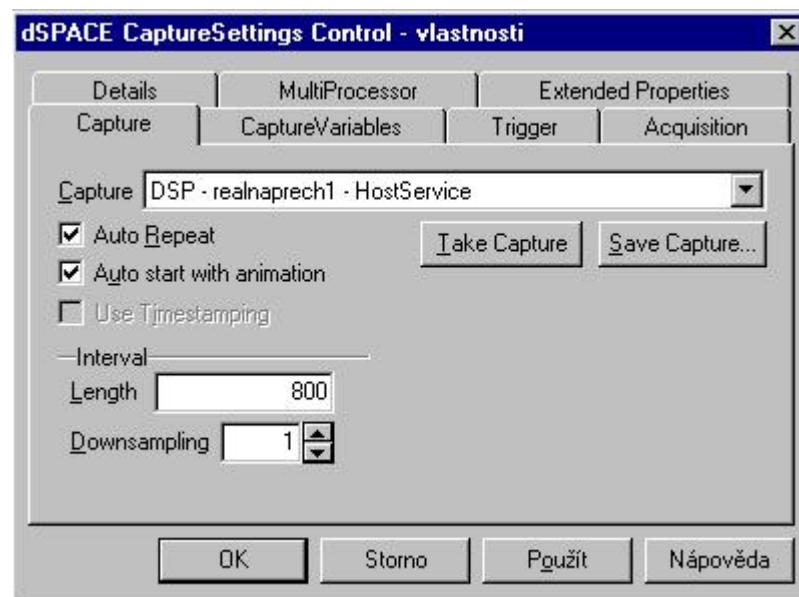
4.2.4 Zavedenie RTA na RTP

Pre zavedenie RTA sa klikne v bar menu na **Platform – Application – Load Application**. Z okna **Load Application or Model** sa vyberie opäť súbor určený na

vykreslenie prechodovej charakteristiky. ControlDesk zobrazí otázku či má zastaviť už bežiaci program na RTP. Vyberie sa **Áno**.

4.2.5 Ukladanie údajov do dátového súboru

- V okne Capture Settings v druhom Layout Window sa vyberie možnosť **Settings...** čo zobrazí okno **dSPACE CaptureSettings Control – vlastnosti**.
- V záložke **Capture** sa vyberie z rolety možnosť s názvom **DSP – nazov – HostService**, kde „nazov“ reprezentuje názov schémy určenej na meranie prechodovej charakteristiky (Obr. 23).
- V časti **Interval** sa prepíše dĺžka intervalu na zvolenú hodnotu. Hodnota dĺžky intervalu (Length) by mala byť dostatočne dlhá nato, aby sa proces ustálil pred zvolenou skokovou zmenou a takisto po nej. Pre daný prípad je vhodné zvoliť čas od 800 s. Ostatné údaje sa nastaví tak, aby boli v zhode s údajmi na Obr. 23.



Obr. 23 Okno dSPACE CaptureSettings Control – vlastnosti, záložka Capture

- Hodnota údaje dĺžky intervalu znamená koľko sekúnd bude program ukladať údaje do jedného dátového súboru. Po uplnutí nastavenej hodnoty vznikne v pracovnom adresári súbor s koncovkou .mat, ktorý možno následne spracovať v programe MATLAB. Potom začne program ukladať údaje do ďalšieho súboru po zvolenú dobu atď.

- V záložke **Acquisition** sa označí položka **Autoname**, vyberie pracovný adresár a nazve sa súbor (Obr. 24).
- Zvolené nastavenia sa potvrdia tlačidlom **OK**.

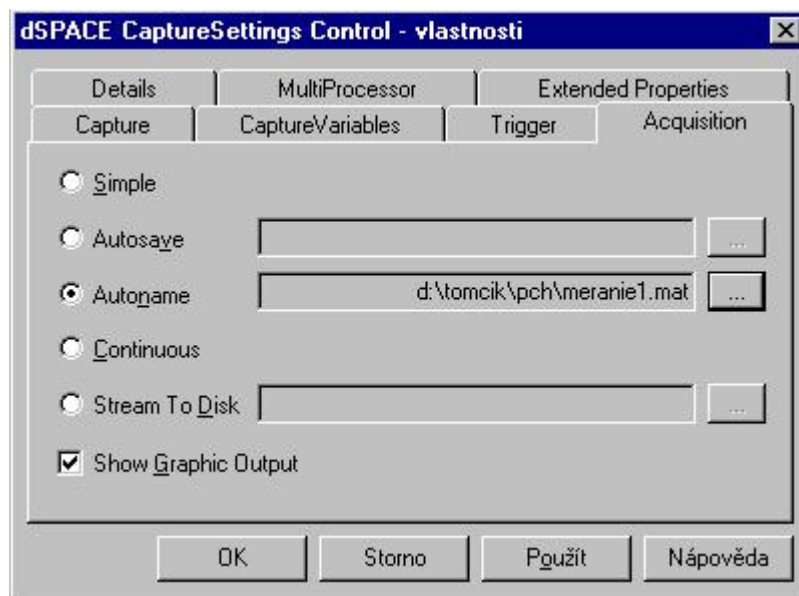
4.2.6 Ovládanie RTA na RTP

Štart RTA:

RTA sa spustí kliknutím na zelený trojuholník v **Platform Manager Toolbar** (Obr. 25) a následne stlačením ikony animačného módu (Obr. 17).

Zastavenie RTA:

RTA sa zastaví kliknutím na ikonu editovacieho módu (Obr. 17) a červeného štvorca (Obr. 25) v **Platform Manager Toolbar**.



Obr. 24 Okno dSPACE CaptureSettings Control – vlastnosti, záložka Acquisition

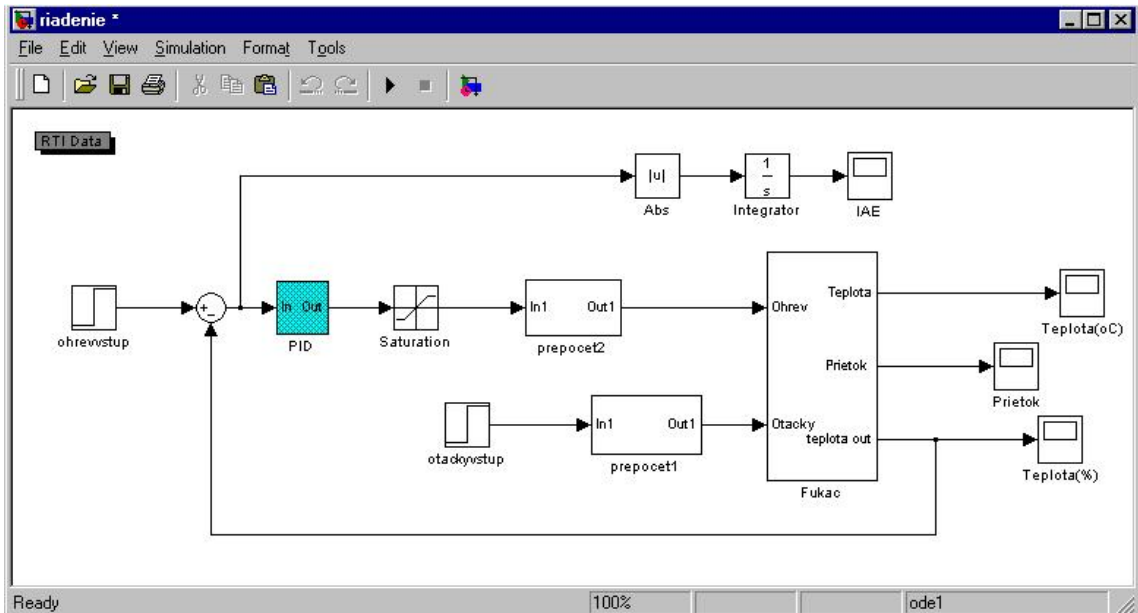


Obr. 25 Platform Manager Toolbar – štart/stop RTA

4.2.7 Riadenie procesu

Riadenie laboratórneho teplotovzdušného procesu pomocou navrhnutých regulátorov prebieha v týchto krokoch:

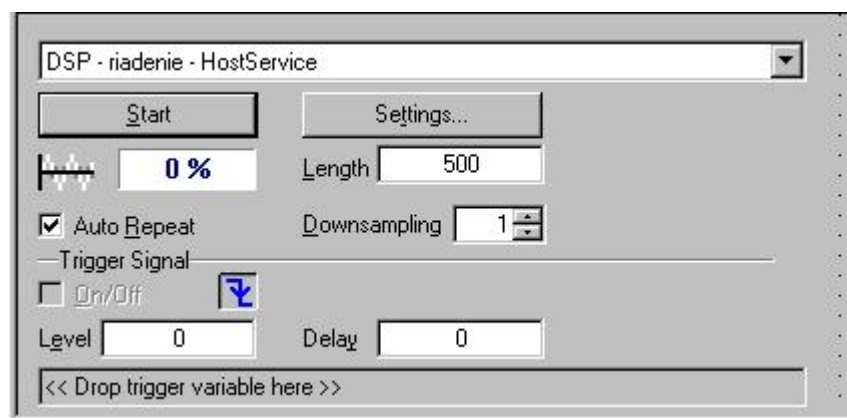
- Vytvorenie schémy na riadenie reálneho procesu v Simulinku (Obr. 26).



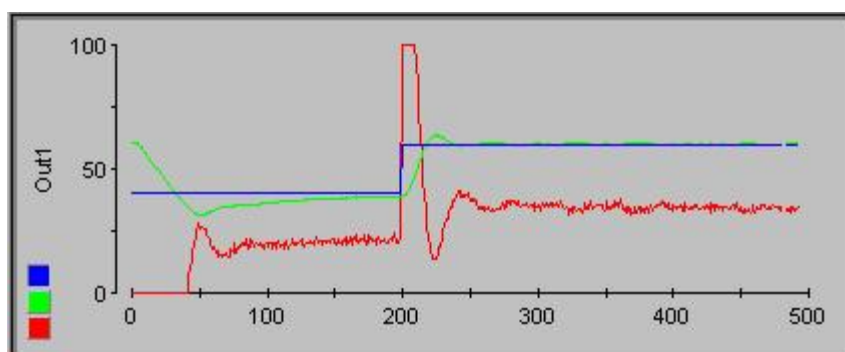
Obr. 26 Schéma na riadenie laboratórneho teplotovzdušného procesu

- Nastavenie údajov v schéme:
 - V bloku **ohrevvstup** sa nastavujú požadované hodnoty. Pre daný proces je vhodné zvoliť nasledujúce hodnoty:
 - Step time: **200**
 - Initial value: **40**
 - Final value: **60**
 - Sample time: **0**
 - Údaje bloku **otackyvstup** sú zhodné s Obr. 13.
 - V bloku **Saturation** vyjadrujúcom obmedzenie teploty v rozsahu od 0 % do 100 %, sa nastaví vrchný limit (Upper limit) na hodnotu **100** a spodný limit (Lower limit) na hodnotu **0**.
 - Blok **Fukac** zodpovedá Obr. 11.
 - V bloku **PID** sa nastavujú hodnoty zložiek jednotlivých regulátorov v tvare Z_R pre blok **P**, Z_R/T_I pre blok **I** a $Z_R.T_D$ pre blok **D**.

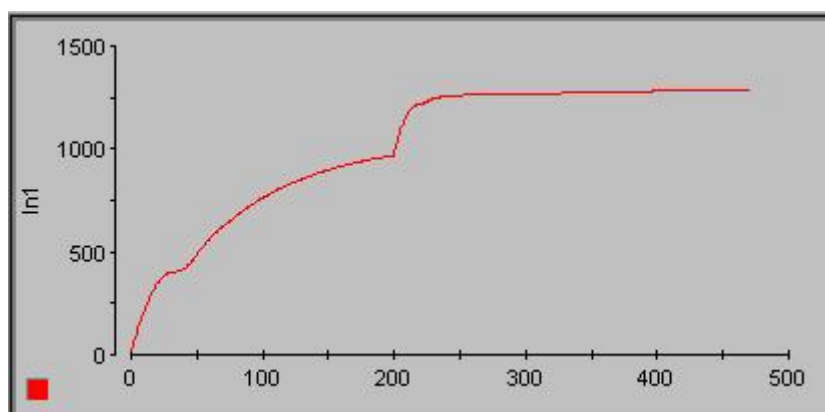
- V menu schémy sa vyberie **Simulation – Simulation Parameters** a nastaví sa údaje podľa Obr. 14 a Obr. 15. Hodnota **Fixed step size** v záložke **Solver** sa prepíše na hodnotu **1** a pokračuje sa kompiláciou stlačením tlačidla **Build** v záložke **Real-Time Workshop** (Obr. 15).
- Kompiláciu treba vykonávať po každej zmene hodnôt regulátora, teda pre každý regulátor zvlášť.
- Spustí sa program **ControlDesk** postupom popísaným v kapitole 4.2.
- Podľa postupu v kapitole 4.2.1 sa vytvorí nový experiment.
- Podľa postupu v kapitolách 4.2.3.1, 4.2.3.2 a 4.2.3.4 sa vytvorí 3 **Layout Windows**, z toho dva pre **Plotter** a jeden pre **Capture Settings**.
- Podľa kapitoly 4.2.3.5 sa vyberie schéma určená na riadenie (koncovka .sdf) a otvorí sa. Ďalej sa prepoja signály s jednotlivými prístrojmi, a to tak, aby jeden z prístrojov **Plotter** obsahoval signál pre **IAE** a druhý signály z blokov **ohrevvstup**, **Teplota(%)** a **Saturation**. Tento krok je realizovaný kvôli prehľadnosti.
- Pre zavedenie RTA na RTP sa postupuje podľa kapitoly 4.2.4 a vyberie sa súbor s rovnakým menom ako má schéma určená na riadenie (koncovka „.sdf“).
- Podľa postupu v kapitole 4.2.5 sa nastaví údaje prístroja Capture Settings. Pre interval a jeho dĺžku (**Length**) postačí hodnota **500**. Výsledné nastavenie by malo zodpovedať Obr. 27.
- V záložke **Acquisition** sa označí **Autoname**, vyberie pracovný adresár a pre každý testovaný regulátor sa vytvorí nový súbor, ktorý posluží na spracovanie dát v MATLabe a vyhodnotenie najlepšieho regulátora.
- Ovládanie RTA je popísané v kapitole 4.2.6.



Obr. 27 Nastavenie prístroja Capture Settings pre riadenie procesu



Obr. 28 Vzorový grafický priebeh riadenia – ControlDesk



Obr. 29 Vzorový priebeh IAE – ControlDesk

5 Riadenie laboratórneho teplovzdušného procesu

Laboratórne teplovzdušné zariadenie umožňuje riadiť teplotu vzduchu ohrevom a otáčkami ventilátora. Úlohou je určiť teplotu vzduchu ohrevom, na požadovanú hodnotu, pri konštantnej hodnote otáčok. Postup pri riešení daného problému zahŕňa tieto kroky:

- Odmeranie prechodovej charakteristiky a určenie prenosu systému.
 - Vytvorenie schémy na odmeranie prechodovej charakteristiky a jej nastavenie.
 - Vytvorenie modelu RTA pomocou knižnice RTI1102, ktorý je bezprostrednou súčasťou schémy.
 - Kompilácia RTA.
 - Pomocou programu ControlDesk odmerať PCH reálneho systému a vytvoriť dátový súbor s údajmi na grafické spracovanie prechodovej charakteristiky reálneho systému.
 - Grafické spracovanie prechodovej charakteristiky v programe MATLAB.
 - Spracovanie prechodovej charakteristiky Strejcovou metódou identifikácie systému – určenie prenosu systému.
 - Vytvorenie schémy na overenie identifikovaného prenosu a jeho overenie.
- Riadenie systému.
 - Syntéza rôznych typov regulátorov viacerými metódami.
 - Testovanie navrhnutých regulátorov v prostredí MATLAB-Simulink.
 - Vytvorenie schémy v Simulinku na riadenie procesu za použitia jednotlivých navrhnutých regulátorov a jej nastavenie.
 - Kompilácia RTA.
 - Pomocou programu ControlDesk sa realizuje testovanie regulátorov a vytvorí sa dátový súbor s údajmi o vplyve regulátorov na reálny systém.
 - Grafické spracovanie dátového súboru v programe MATLAB.
 - Na základe zvolených ukazovateľov kvality regulácie sa zrealizuje výber najlepšieho regulátora.

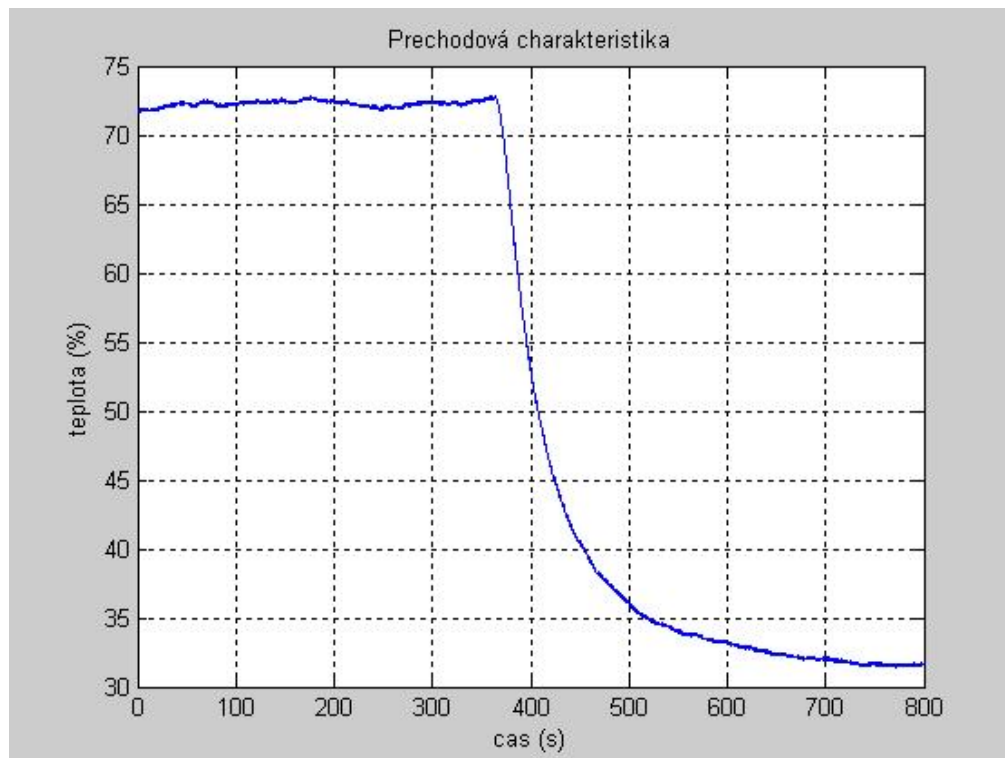
5.1 Odmeranie a spracovanie prechodovej charakteristiky

5.1.1 Meranie prechodovej charakteristiky

Pomocou Simulinku sa vytvorí schéma (realnaprech1.mdl), pomocou ktorej sa bude merať PCH systému. Vytvorená schéma je uvedená v kapitole 4.1.1 na Obr. 10. Súčasťou schémy je aj vytvorenie modelu RTA pomocou knižnice RTI1102 (kapitola 4.1.1, Obr. 11). Nastavenie schémy je popísané a ilustorované v kapitole 4.1.2. Následne sa vykoná kompilácia RTA postupom opísaným v kapitole 4.1.2.

Pomocou programu ControlDesk, ktorý okrem vizualizácie a ovládania sledovaného procesu umožňuje aj zachytenie údajov potrebných na spracovanie PCH v podobe dátového súboru, sa tento súbor vytvorí. Celý postup je popísaný v kapitolách 4.2.1 – 4.2.6. Tento súbor s koncovkou „mat“ (pch1123001.mat), sa nachádza v pracovnom adresári a obsahuje údaje o PCH.

Vytvorený súbor možno graficky spracovať v programe MATLAB. Výsledkom je graf zobrazený na Obr. 30. Na vytvorenie grafov z dátového súboru možno použiť M-file s názvom pch.m.



Obr. 30 Prechodová charakteristika systému

Pri vytváraní grafu z dátového súboru treba najprv získať číselné hodnoty premenných, ktoré obsahuje súbor. To sa realizuje za pomoci programu MATLAB. V príkazovom riadku MATLABu sa postupne zadajú nasledovné príkazy:

- **load názov**, kde „názov“ predstavuje názov MAT-súboru (súboru, ktorý sa získa z programu ControlDesk – konkrétne **pch1123001.mat**).
- **x=názov.X.Data** (konkrétne **cas=pch1123001.X.Data** – „cas“ predstavuje nezávisle premennú).
- **y1=názov.Y(1).Data** (konkrétne **y1=pch1123001.Y(1).Data** – „y1“ predstavuje prvú závisle premennú – teplotu v % rozsahu zariadenia).
- **y2=názov.Y(2).Data** (konkrétne **y12=pch1123001.Y(2).Data** – „y12“ predstavuje druhú závisle premennú – teplotu v stupňoch Celzia).
- **y3=názov.Y(3).Data** (konkrétne **y13=pch1123001.Y(3).Data** – „y13“ predstavuje tretiu závisle premennú – skokovú zmenu ohrevu v % zariadenia).
- Pomocou príkazu **plot(cas,y1,cas,y12,cas,y13)** sa získa výsledný graf. Obr. 30 možno vykresliť príkazom **plot(cas,y1)**.

5.1.2 Určenie prenosu a jeho overenie

Na určenie prenosu sa postupuje Strejcovou metódou identifikácie systému. Prechodová charakteristika sa spracuje ako PCH prvého rádu s dopravným oneskorením, pretože na syntézu regulátora sa vyžaduje poznať hodnotu času nábehu t_n a času priet'ahu t_u . Spracovanú prechodovú charakteristiku možno vidieť na Obr. 31, kde červená čiara predstavuje dotyčnicu k PCH prechádzajúcu inflexným bodom. Z takto spracovanej prechodovej charakteristiky možno získať údaje potrebné na určenie prenosu:

$y_0 = 72,6 \%$ (y_0 predstavuje ustálenú hodnotu teploty vzduchu v percentách rozsahu pred skokovou zmenou)

$y_\infty = 31,5 \%$ (y_∞ predstavuje ustálenú hodnotu teploty vzduchu v percentách rozsahu po skokovej zmene)

$t_0 = 366 \text{ s}$ (t_0 predstavuje čas v sekundách, v ktorom sa začína veličina y meniť v dôsledku skokovej zmeny ohrevu)

$t_l = 370 \text{ s}$ (t_l predstavuje čas v sekundách určený ako priesečník y_0 a dotyčnice k PCH prechádzajúcou inflexným bodom)

$t_2 = 424 \text{ s}$ (t_2 predstavuje čas v sekundách určený ako priesečník y_∞ a dotyčnice k PCH prechádzajúcou inflexným bodom)

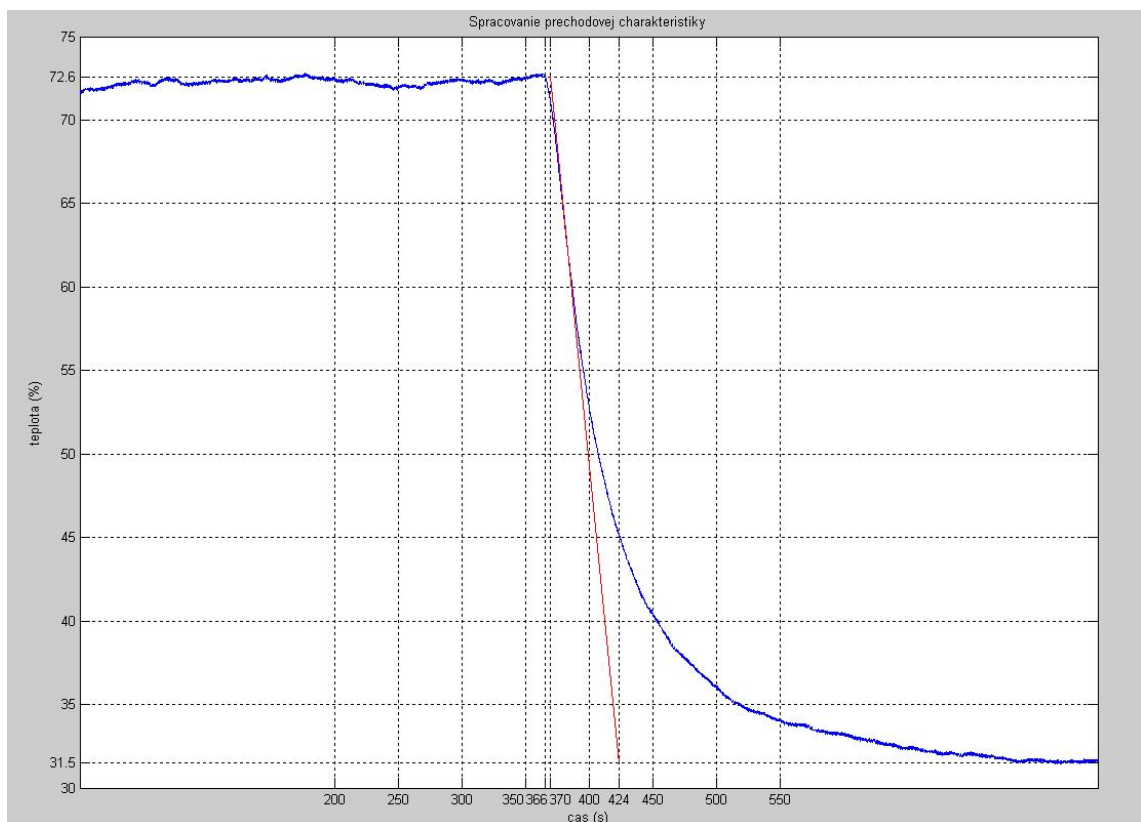
Hodnoty veličín u_0 a u_∞ predstavujú percentuálnu hodnotu veličiny ohrev pred a po skokovej zmene. Grafický priebeh vstupnej veličiny meniacej sa skokovo možno vidieť na Obr. 32.

$u_0 = 50 \%$ (u_0 predstavuje hodnotu vstupnej veličiny pred skokovou zmenou)

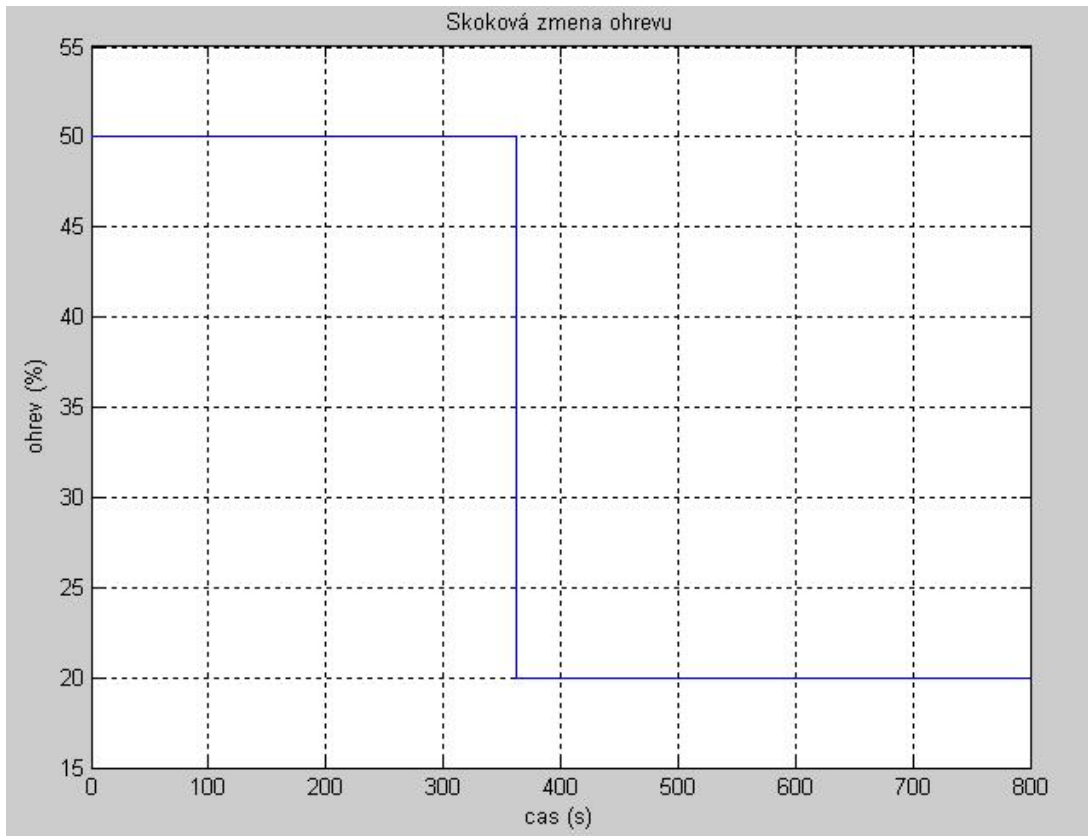
$u_\infty = 20 \%$ (u_∞ predstavuje hodnotu vstupnej veličiny po skokovej zmene)

Zosilnenie systému sa vypočíta podľa vzťahu (25) uvedeného v kapitole 2.2.1

$$Z = \frac{y_\infty - y_0}{u_\infty - u_0} = \frac{31,5 - 72,6}{20 - 50} = 1,37$$



Obr. 31 Spracovanie prechodovej charakteristiky



Obr. 32 Grafický priebeh skokovej zmeny ohrevu

Hodnoty času priet'ahu t_u a času nábehu t_n sa vypočítajú z nasledujúcich vzťahov

$$t_u = t_1 - t_0 \quad (30)$$

$$t_n = t_2 - t_1 \quad (31)$$

teda

$$t_u = t_1 - t_0 = 370 - 366 = 4 \text{ s}$$

$$t_n = t_2 - t_1 = 424 - 370 = 54 \text{ s}$$

Určí sa hodnota f_s ako podiel času priet'ahu a času nábehu

$$f_s = t_u/t_n = 4/54 \doteq 0,0741$$

Z Tab. 1 uvedenej v kapitole 2.2.2 sa vyberie rád systému tak, aby bola splnená podmienka (27). Pre daný systém zodpovedá rád $n = 1$.

Dopravné oneskorenie sa určí podľa vzťahu (28) a časová konštanta, za pomoci Tab. 1, podľa vzťahu (29).

$$D = [f_s - f(n)]t_n = [(4/54) - 0] \cdot 54 = 4 \text{ s}$$

Z Tab. 1 sa odčíta hodnota $g(n)$ zodpovedajúca $n = 1$. Táto hodnota je $g(n) = 1$. Časová konštanta T sa vypočíta zo vzťahu (29).

$$T = g(n)t_n = 1 \cdot 54 = 54 \text{ s}$$

Výsledný prenos v tvare rovnice (26) je potom

$$G(s) = \frac{Z}{(Ts + 1)^n} e^{-Ds} = \frac{1,37}{54s + 1} e^{-4s}$$

Všetky údaje odčítané z PCH a vypočítané údaje sú prehľadne uvedené v Tab. 3.

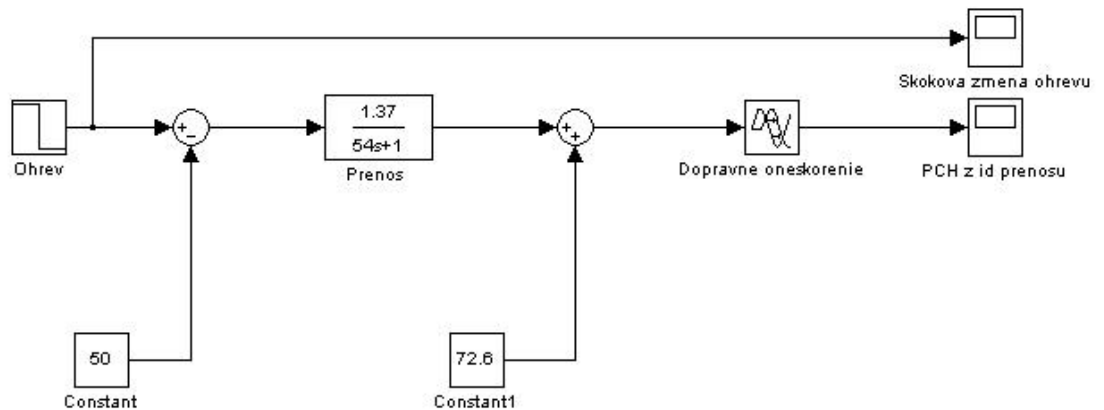
Tab. 3 Údaje odčítané z PCH a vypočítané údaje Strejcovej identifikácie systému

$y_0 = 72,6 \%$	$y_\infty = 31,5 \%$	$u_0 = 50 \%$	$u_\infty = 20 \%$
$t_0 = 366 \text{ s}$	$t_1 = 370 \text{ s}$	$t_2 = 424 \text{ s}$	
$t_u = 4 \text{ s}$	$t_n = 54 \text{ s}$	$f_s \doteq 0,0741$	
$n = 1$	$T = 54 \text{ s}$	$D = 4 \text{ s}$	$Z = 1,37$
$G(s) = \frac{1,37}{54s + 1} e^{-4s}$			

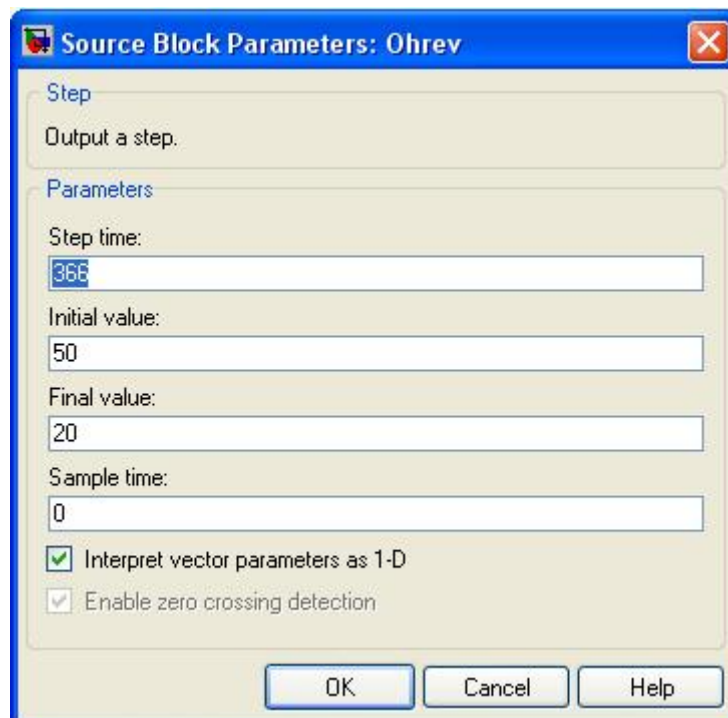
5.1.3 Overenie identifikovaného prenosu

Vhodná schéma na overenie identifikovaného prenosu je zobrazená na Obr. 33. Schéma je dostupná pod názvom overenieprenosu1.mdl. Nastavenie hodnôt schémy na overenie identifikovaného prenosu je ilustrované na Obr. 34 - Obr. 36 resp. priamo na obrázku schémy. Vzhľadom na to, že skoková zmena v skutočnosti nastala v čase **366**

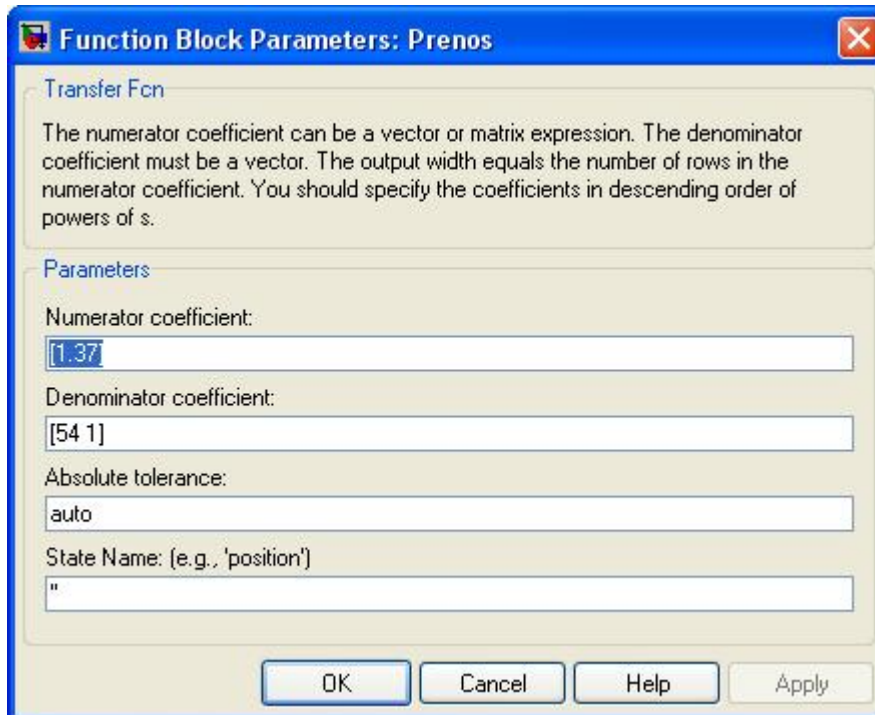
sekúnd miesto zvolených 400 s, tak sa naďalej bude používať táto nová hodnota. Dĺžku simulácie je vhodné zvoliť **800 s**. Po vyplnení schémy a jej spustení sa nahrajú údaje do súboru overenieprenosu1.m.m, ktorý po otvorení v MATLABe vykreslí graf, ktorý porovnáva PCH získanú ako výstup z reálneho procesu (modrá čiara) a PCH získanú ako výstup z identifikovaného prenosu (červená čiara). Tento graf je zobrazený na Obr. 37.



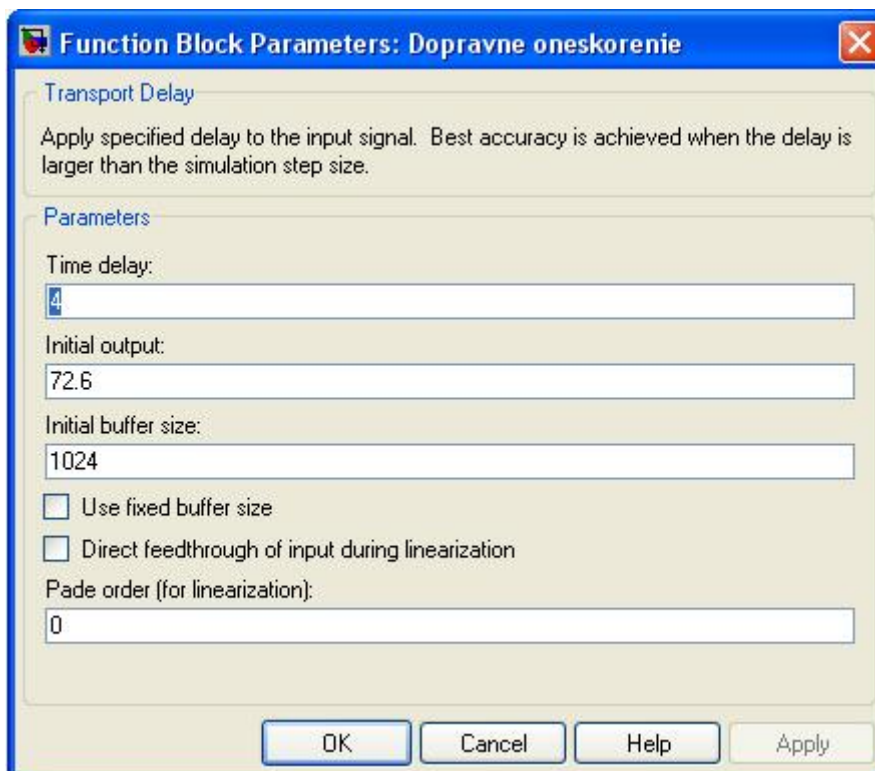
Obr. 33 Schéma na overenie identifikovaného prenosu



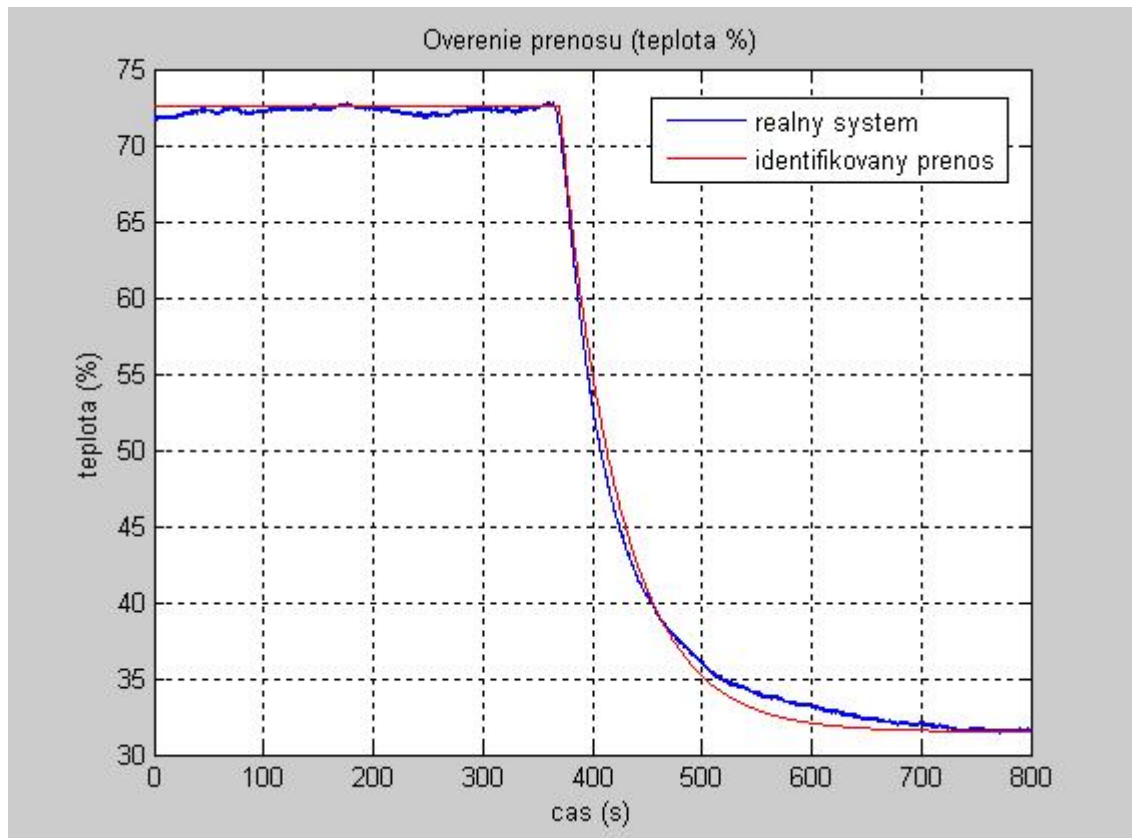
Obr. 34 Údaje bloku „Ohrev“



Obr. 35 Údaje bloku „Prenos“



Obr. 36 Údaje bloku „Dopravne oneskorenie“



Obr. 37 Graf porovnania PCH reálneho procesu a PCH identifikovaného prenosu

Podľa Obr. 37 možno považovať identifikovaný prenos za vhodný.

5.2 Riadenie systému

Úlohou je navrhnúť pomocou známych metód P, PI, PD, PID regulátory a po ich otestovaní vybrať, na základe zvolených ukazovateľov kvality riadenia (IAE a času regulácie) regulátor, ktorý v najkratšom čase a za najnižšej hodnoty IAE dosiahne požadovanú hodnotu teploty vzduchu, resp. teplotu v povolenom okolí žiadanej veličiny, pričom požadovaná hodnota teploty vzduchu je **60 %** rozsahu zariadenia. Teplota vzduchu sa riadi ohrevom pri konštantných otáčkach ventilátora.

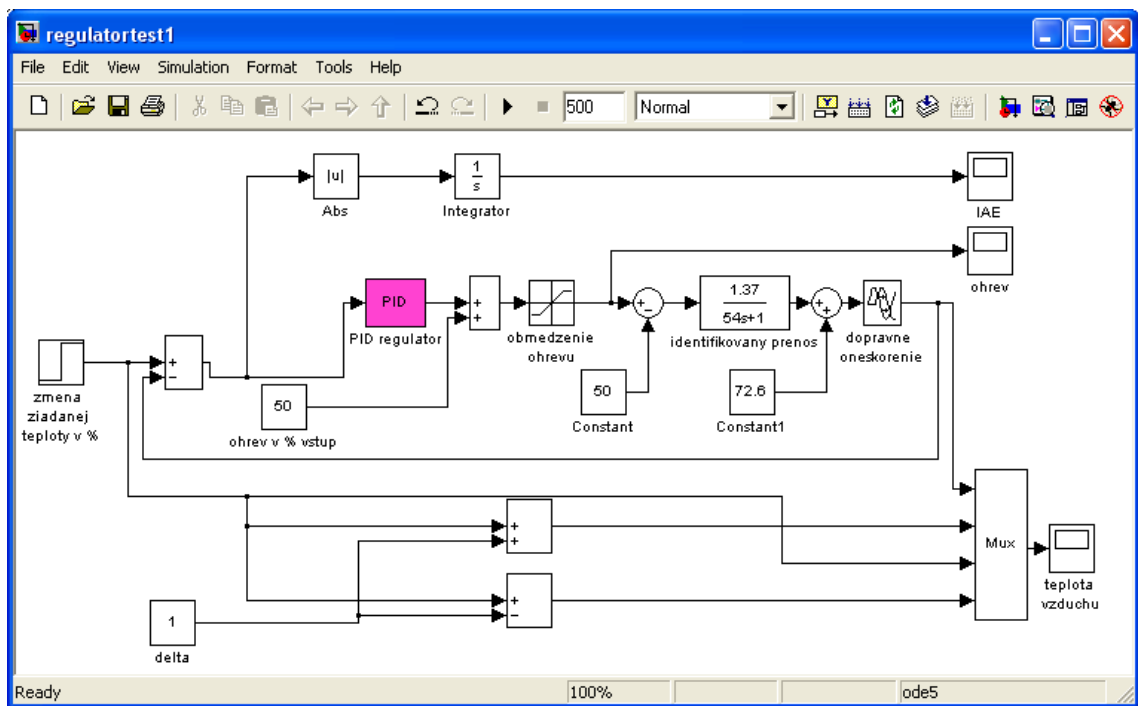
5.2.1 Syntéza regulátorov a ich testovanie

Podľa metód uvedených v kapitole 2.2.4 a za použitia údajov z Tab. 3, sa určia rôzne typy (P, PI, PD, PID) regulátorov. Jednotlivé regulátory sa navrhujú pomocou

programu pre syntézu regulátorov podľa [7]. Prenosy jednotlivých regulátorov sú uvedené v Tab. 4.

5.2.1.1 Simulačné testovanie regulátorov

V Simulinku sa vytvorí schéma na otestovanie navrhnutých regulátorov. Schéma vhodná na použitie je vyobrazená na Obr. 38 a nachádza sa aj na priloženom CD (regulatortest1.mdl).

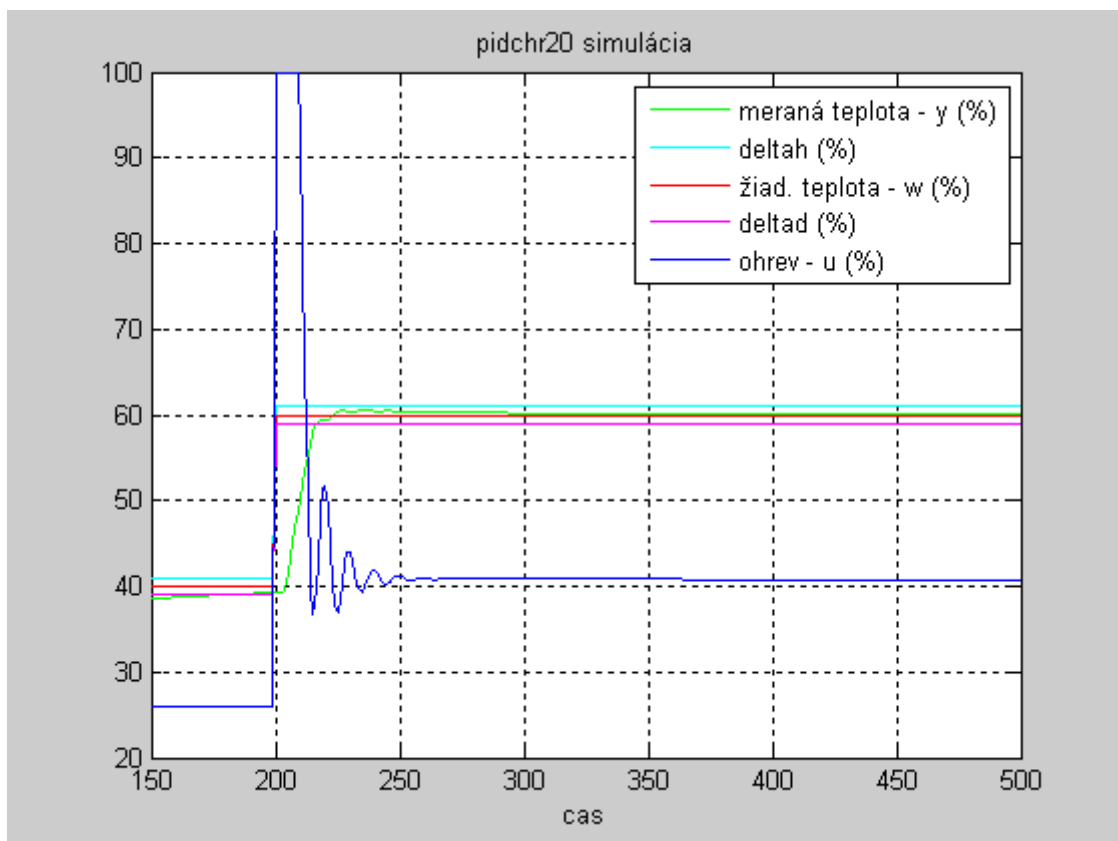


Obr. 38 Schéma na testovanie navrhnutých regulátorov

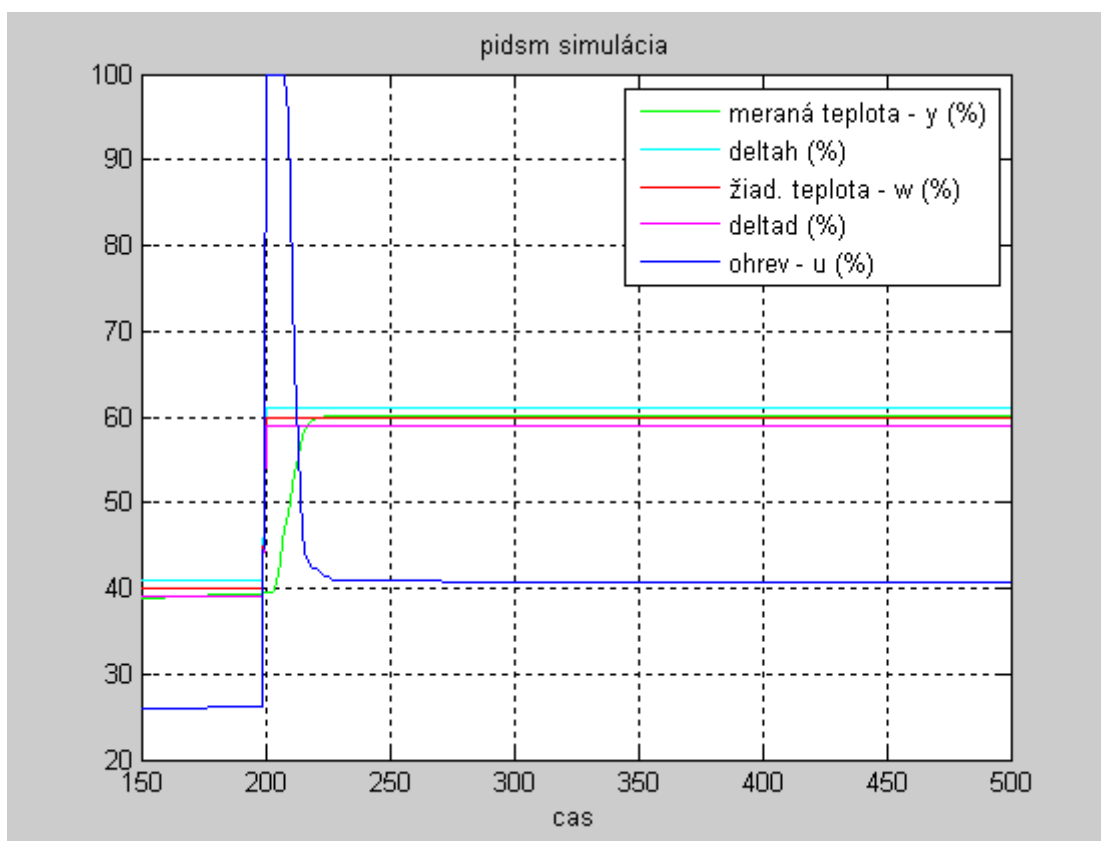
Parametre schémy vyobrazenej na Obr. 38 možno odčítať priamo z obrázka. Výnimku tvoria niektoré bloky. V bloku „zmena ziadanej teploty v %“, sa nastaví „Step time“ na hodnotu **200**, „Initial value“ na hodnotu **40** a „Final value“ na hodnotu **60**. Znamená to, že v čase 200 s sa hodnota žiadanej veličiny zmení skokom z hodnoty 40 % na 60 %. V bloku „obmedzenie ohrevu“ sa nastaví vrchný limit na hodnotu **100** a spodný na hodnotu **0**. V bloku „dopravne oneskorenie“ sa nastaví „Time delay“ na hodnotu **4**, „Initial output“ na hodnotu **72,6**. Parametre bloku „PID regulator“ sa menia podľa práve zvoleného regulátora, pričom prenosy regulátorov sú uvedené v Tab. 4. Po spustení schémy možno sledovať vplyv zvoleného regulátora na riadenú veličinu

(teplotu v % rozsahu zariadenia) v bloku „teplota vzduchu“, zmenu ohrevu, ktorým sa riadi teplota v bloku „ohrev“ a hodnotu IAE v bloku „IAE“.

Po odsimulovaní procesu za použitia jednotlivých regulátorov sa zistilo, že najvýhodnejším regulátorom z hľadiska času regulácie je PID regulátor navrhnutý metódou Chien-Hrones-Reswick, kde **čas regulácie** dosahuje najnižšiu hodnotu, a to **16,6 s**. Z hľadiska integrálneho ukazovateľa kvality riadenia IAE je najvýhodnejším PID regulátor navrhnutý metódou Smith-Murrill, kde sa zaznamenala najnižšia hodnota **IAE**, a to **221**. Grafické priebehy regulácii s oboma uvedenými regulátormi sú zobrazené na Obr. 39 a Obr. 40. Na vykreslenie jednotlivých grafov za použitia navrhnutých regulátorov možno použiť M-file s názvom testreg.m.



Obr. 39 Grafický priebeh regulácie s PID regulátorom navrhnutým metódou Chien-Hrones-Reswick - simulácia



Obr. 40 Grafický priebeh regulácie s PID regulátorom navrhnutým metódou Smith-Murrill – simulácia

5.2.1.2 Riadenie reálneho procesu

V Simulinku sa vytvorí schéma na riadenie reálneho procesu. Vhodnou schémou je schéma na Obr. 26 (riadenie.mdl). Vyplnenie schémy je uvedené v kapitole 4.2.7.

Po vyplnení schémy nasleduje kompilácia RTA. Postup je popísaný taktiež v kapitole 4.2.7. Treba však dbať na to, aby bola kompilácia aktualizovaná pre každý regulátor, t. j. zakaždým, keď sa do bloku „PID“ uvedú nové hodnoty parametrov P, I, D.

Pomocou programu ControlDesk sa po otestovaní regulátora vytvorí dátový súbor pre zadaný regulátor. Postup je opísaný v kapitole 4.2.7. Po realizácii uvedeného postupu sa v pracovnom adresári vytvorí nový súbor obsahujúci informácie o vplyve regulátora na riadený proces.

V MATLABe sa z dátového súboru vytvoreného pomocou programu ControlDesk vytvorí graf, potrebný na spracovanie regulačného pochodu. Pri spracovaní údajov zo

súboru, sa postupuje nasledovne (v príkazovom riadku MATLABu sa zadávajú tieto údaje):

- **load nazov**, kde „nazov“ predstavuje názov MAT-súboru.
- **x=nazov.X.Data** (konkrétne **cas=nazov.X.Data** – „cas“ predstavuje nezávisle premennú).
- **y1=nazov.Y(1).Data** (konkrétne **IAE=nazov.Y(1).Data** – „IAE“ predstavuje prvú závisle premennú – hodnotu IAE).
- **plot(x,y1)** (konkrétne **plot(cas,IAE)**) – vykreslí závislosť hodnoty IAE od času.
- **y2=nazov.Y(2).Data** („y2“ predstavuje hodnotu druhej závisle premennej – ohrevu v % rozsahu zariadenia).
- **y3=nazov.Y(3).Data** („y3“ predstavuje hodnotu tretej závisle premennej – meranej teploty v % rozsahu zariadenia).
- **y4=nazov.Y(4).Data** („y4“ predstavuje hodnotu štvrtej závisle premennej – žiadanej teploty v % rozsahu zariadenia).
- Pomocou príkazu **plot(x,y2,x,y3,x,y4)** (resp. **plot(cas,y2,cas,y3,cas,y4)**) sa vykreslí graf zachytávajúci regulačný pochod. Za použitia súborov **pidchr20.m** a **pidsm.m** sa získajú grafy uvedené na Obr. 41 a Obr. 42. Tieto grafy sa líšia od grafov získaných postupom uvedeným vyššie tým, že zachytávajú regulačný pochod od zvoleného času (od realizácie skokovej zmeny žiadanej teploty) a vyznačením δ -okolía žiadanej veličiny.

Súbory na grafické spracovanie pre jednotlivé regulátory sú uvedené v Tab. 4 a uložené na priloženom CD.

5.2.2 Výber najlepšieho regulátora

Najlepší regulátor sa vyberie na základe najmensej hodnoty času regulácie a IAE. Oba tieto ukazovatele, aj s údajom o maximálnom preregulovaní a časom maximálneho preregulovania, sú pre jednotlivé regulátory uvedené v Tab. 4, z ktorej vyplýva, že najlepším regulátorom, pre daný proces a zadané podmienky, je **PID regulátor** navrhnutý **metódou Smith-Murrill** z dôvodu najnižšej hodnoty IAE a **PID regulátor** navrhnutý **metódou Chien-Hrones-Reswick** z dôvodu najnižšej hodnoty času regulácie. Oba tieto regulátory aj s vyhodnotenými ukazovateľmi kvality riadenia sú v Tab. 4 označené zelenou farbou. Grafické priebehy riadenia výmenníka tepla navrhnutými regulátormi sú uvedené na Obr. 41 a Obr. 42.

5.2.3 Nevyhovujúce regulátory

Za nevyhovujúce regulátory možno považovať P regulátory navrhnuté metódami Ziegler-Nichols, Cohen-Coon a Chien-Hrones-Reswick a PD regulátor navrhnutý metódou Cohen-Coon, pretože sa riadená veličina nedostane do požadovaného okolia žiadanej veličiny. Toto okolie je ± 1 % z hodnoty žiadanej veličiny, ktorá je 60 %. Z dôvodu kmitania riadenej veličiny možno považovať za nevyhovujúce aj PI regulátory navrhnuté metódami Ziegler-Nichols a Cohen-Coon.

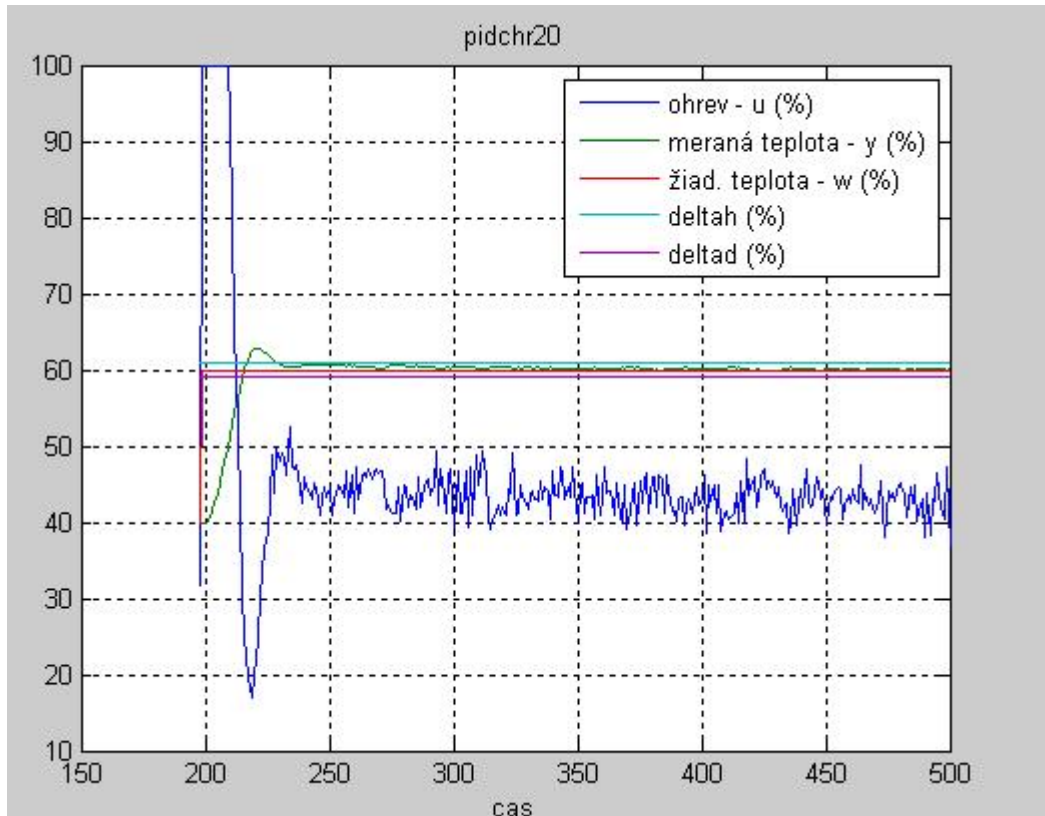
Tab. 4 Tabuľka výsledkov

Typ regula-tora	Metóda návrhu regula-tora	Prenos regula-tora	IAE	Čas regula-cie	Trvalá regulačná odchýlka	Maximálne prerégulova-nie	Čas max. prerég.	Poznámka	Súbor
P	Ziegler-Nichols	$G_R(s) = 9,85$	1296,5	-	3,65	29,65 %	220	N	pzn.m
P	Cohen-Coon	$G_R(s) = 10,1$	1267,1	-	3,46	30,27 %	220	N	pcc.m
P	Chien-Hrones-Reswick	$G_R(s) = 2,96$	3783,4	-	11,97	10 %	226	0 % preg., N	pchr0.m
P	Chien-Hrones-Reswick	$G_R(s) = 6,9$	1906,9	-	5,86	27,73 %	221	20 % preg., N	pchr20.m
PD	Cohen-Coon	$G_R(s) = 12,44(1 + 14,22s)$	1266,2	-	2,97	-	-	N	pdcc.m
PI	Ziegler-Nichols	$G_R(s) = 8,87 \left(1 + \frac{1}{13,32s}\right)$	874,9	236,6	-	87 %	226	N	pizn.m
PI	Cohen-Coon	$G_R(s) = 8,93 \left(1 + \frac{1}{11,53s}\right)$	1276,6	-	-	-	224	N	picc.m
PI	Metóda priamej syntézy	$G_R(s) = 0,9 \left(1 + \frac{1}{54s}\right)$	1011,9	157	-	0 %	-	Turo = 40, V	pips.m
PI	Haalman	$G_R(s) = 6,57 \left(1 + \frac{1}{54s}\right)$	347,2	62,7	-	27,03 %	224	V	pih.m
PI	Chien-Hrones-Reswick	$G_R(s) = 6,57 \left(1 + \frac{1}{54s}\right)$	347,2	62,7	-	27,03 %	224	0 % preg., V	pichr0.m
PI	Chien-Hrones-Reswick	$G_R(s) = 5,91 \left(1 + \frac{1}{54s}\right)$	334	62,4	-	28,28 %	223	20 % preg., V	pichr20.m
PI	Smith-Murrill	$G_R(s) = 4,64 \left(1 + \frac{1}{53,06s}\right)$	316,6	53,9	-	20,85 %	224	V	pism.m
PI	Rivera-Morari	$G_R(s) = 2,04 \left(1 + \frac{1}{56s}\right)$	473,7	89,4	-	0 %	-	Turo = 20, V	pirm.m
PI	Metóda požad. modelu	$G_R(s) = 3,63 \left(1 + \frac{1}{54s}\right)$	317,5	57,1	-	11,33 %	227	0 % preg., V	pimpm.m
PID	Ziegler-Nichols	$G_R(s) = 11,82 \left(1 + \frac{1}{8s} + 2s\right)$	1015,9	154,9	-	92,96 %	229	V	pidzn.m
PID	Cohen-Coon	$G_R(s) = 13,32 \left(1 + \frac{1}{9,55s} + 1,44s\right)$	832,9	150,8	-	84,77 %	227	V	pidcc.m

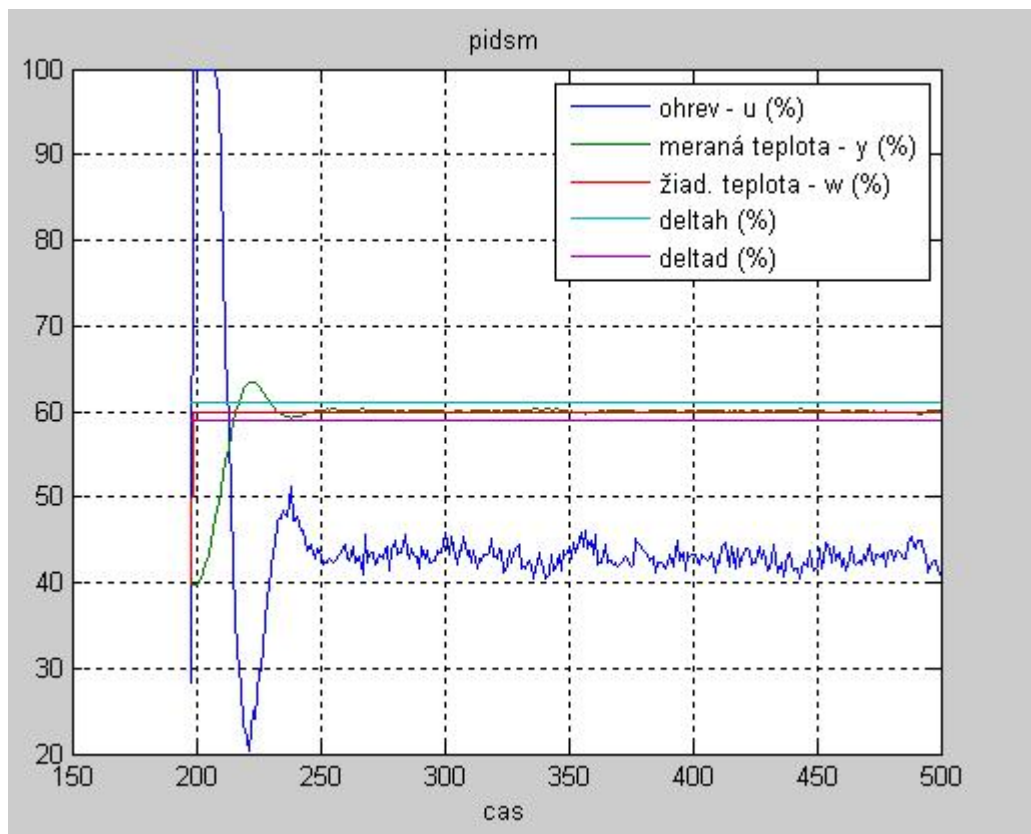
Tab. 4 Tabuľka výsledkov - pokračovanie

Typ regulátora	Metóda návrhu regulátora	Prenos regulátora	IAE	Čas regulácie	Trvaná regulačná odchýlka	Maximálne prerégulovanie	Čas max. prerég.	Poznámka	Súbor
PID	Metóda priamej syntézy	$G_R(s) = 0,93 \left(1 + \frac{1}{56s} + 1,82s \right)$	1044,8	172,7	-	0 %	-	$T_{URO} = 40, V$	pidps.m
PID	Chien-Hrones-Reswick	$G_R(s) = 5,91 \left(1 + \frac{1}{54s} + 2s \right)$	307,6	36	-	16,62 %	223	0 % preg., V	pidchr0.m
PID	Chien-Hrones-Reswick	$G_R(s) = 9,36 \left(1 + \frac{1}{73,44s} + 2,56s \right)$	301,5	30,6	-	14,15 %	221	20 % preg., V	pidchr20.m
PID	Smith-Murrill	$G_R(s) = 6,52 \left(1 + \frac{1}{68,78s} + 1,48s \right)$	282,7	32,1	-	16,95 %	222	V	pidsm.m
PID	Rivera-Morari	$G_R(s) = 1,7 \left(1 + \frac{1}{56s} + 1,93s \right)$	550,1	102,6	-	0 %	-	$T_{URO} = 20, V$	pidrm.m

N – nevyhovuje, V – vyhovuje, preg. – prerégulovanie



Obr. 41 Grafický priebeh regulácie s PID regulátorom navrhnutým metódou Chien-Hrones-Reswick



Obr. 42 Grafický priebeh regulácie s PID regulátorom navrhnutým metódou Smith-Murrill

Záver

Úlohou práce bolo zvládnuť riadenie teploty vzduchu na požadovanú hodnotu, resp. hodnotu neprekračujúcu zvolené okolie žiadanej veličiny (teploty v % rozsahu zariadenia), pomocou vybraných (najlepších) regulátorov (z hľadiska zvolených ukazovateľov kvality riadenia) implementovaných do riadiaceho systému dSPACE. Zariadenie LTR700 a v ňom teplota prúdiaceho vzduchu sa riadila ohrevom pri konštantných otáčkach ventilátora. Po zadaní údajov do schémy určenej na odmeranie prechodovej charakteristiky reálneho systému sa vykoná kompilácia modelu. Pomocou programu ControlDesk, ktorý je súčasťou systému dSPACE, sa navrhne prostredie na vizualizáciu a zachytia sa údaje týkajúce sa prechodovej charakteristiky.

Po spracovaní prechodovej charakteristiky v programe MATLAB a určenia prenosu systému, sa navrhnú štyri P regulátory, jeden PD regulátor, deväť PI a sedem PID regulátorov metódami uvedenými v kapitole 2.2.4. Jednotlivé regulátory sa postupne testujú v programovom prostredí MATLAB-Simulink a pomocou programu ControlDesk v reálnom procese. Po spracovaní dátových súborov sa určí, či daný regulátor je vhodný na riadenie a vyhodnotia sa postupne ukazovatele kvality riadenia, a to IAE, čas regulácie, trvalá regulačná odchýlka (v prípade regulátorov bez I zložky), maximálne prerogulovanie a čas maximálneho prerogulovania.

Najlepšie regulátory na riadenie reálneho procesu (regulátory typu PID navrhnuté metódami Chien-Hrones-Reswick a Smith-Murrill) pre zvolené ukazovatele kvality riadenia – čas regulácie a IAE – sú uvedené v poslednej kapitole práce v prehľadnej tabuľke, kde sú označené zelenou farbou. Tab. 4 obsahuje taktiež ostatné vyhovujúce (podľa vyšších hodnôt zvolených ukazovateľov kvality riadenia nie však najlepšie) a aj nevyhovujúce regulátory. V prípade nevyhovujúcich regulátorov je regulačný pochod rozkmitaný, neustaluje sa do zvoleného času (500 s) alebo sa riadená veličina nedostane do požadovaného okolia žiadanej veličiny (teploty v % rozsahu zariadenia). Toto okolie je ± 1 % od žiadanej hodnoty 60 %. Medzi nevyhovujúce regulátory patria P regulátory navrhnuté metódami Ziegler-Nichols, Cohen-Coon a Chien-Hrones-Reswick a PD regulátor navrhnutý metódou Cohen-Coon, kde sa riadená veličina nedostane do požadovaného okolia žiadanej veličiny. Takisto dva PI regulátory (metóda Ziegler-Nichols a Cohen-Coon) sú nevyhovujúce, pretože sa riadená veličina počas 500 sekúnd neustaluje a kmitá. V práci sú takisto zobrazené aj grafické priebehy vplyvu PID regulátorov navrhnutých metódami Chien-Hrones-Reswick a Smith-Murrill.

Všetky súbory, potrebné na získanie výsledkov, sú uložené na CD, ktoré je priložené k práci.

Zoznam použitej literatúry

- [1] BAKOŠOVÁ, M. – FIKAR, M. 2008. *Riadenie procesov*. Bratislava: STU, 2008. 193 s. ISBN 978-80-227-2841-6.
- [2] BAKOŠOVÁ, M. – FIKAR, M. – ČIRKA, Ľ. 2003. *Základy automatizácie: Laboratórne cvičenia zo základov automatizácie*. 1. vyd. Bratislava: STU, 2003. 153 s. ISBN 80-227-1831-9.
- [3] ASTRÖM, K. J. – HÄGGLUND, T. 1995. *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*. b.m.: Instrument Society of America, 1995. 343 s. ISBN 1-55617-516-7.
- [4] RAY, W. H. – OGUNNAIKE, B. A. 1994. *Process dynamics, modeling, and control*. New York: Oxford University Press, 1994. 1260 s. ISBN 0-19-509119-1.
- [5] SVETÍKOVÁ, M. 2002. *Návrh užívateľského prostredia pre laboratórne zariadenie LTR 700*: diplomová práca. Bratislava: STU FCHPT, 2002. 46 s.
- [6] ČIRKA, Ľ. 2001. *dSPACE: Príručka*. Bratislava: STU FCHPT, 2001. 16 s.
- [7] ORAVEC, J. 2008. *Tvorba softvéru pre syntézu regulátorov*: bakalárska práca. Bratislava: STU FCHPT, 2008.

Príloha

Súčasťou práce je aj CD obsahujúce súbory potrebné na získanie výsledkov. Na prácu s týmito súbormi je vhodné využiť nasledujúci postup, nakoľko niektoré zo súborov využívajú údaje (nahrané do pamäte MATLABu) z predchádzajúcich súborov:

1. Po spustení programu MATLAB a nastavení sa do pracovného adresára obsahujúceho priložené súbory, sa spustí M-file s názvom **pch.m**, na zobrazenie prechodových charakteristík (teplota v %, teplota v °C).
2. Na overenie identifikovaného prenosu pre teplotu v % sa spustí schéma s názvom **overenieprenosu1.mdl** a analogicky pre overenie prenosu pre teplotu v °C sa použije schéma s názvom **overenieprenosu2.mdl**. Spustením schém sa nahrajú údaje do súborov v kroku 3.
3. Na grafické porovnanie prechodovej charakteristiky z identifikovaného prenosu s prechodovou charakteristikou v % (°C) z reálneho procesu, sa spustí M-file s názvom **overenieprenosu1m.m** (**overenieprenosu2m.m**).
4. Na otestovanie navrhnutých regulátorov (pre riadenie teploty v % resp. °C) v prostredí MATLAB-Simulink sa otvorí schéma s názvom **regulatortest1.mdl** (**regulatortest2.mdl**). V bloku „PID regulator“ sa nastaví parametre regulátora (pre teplotu v % možno použiť údaje z navrhnutých regulátorov z Tab. 4) P, I, D a spustí sa schéma. Po spustení schémy sa nahrajú údaje do MATLABu a pomocou súboru **testreg.m** možno vykresliť grafický priebeh simulácie.
5. Na grafické priebehy vplyvu jednotlivých regulátorov (pre teplotu v percentuálnom rozsahu) na riadenú veličinu možno použiť súbory s príslušnými názvami v Tab. 4. Tu už ide o riadenie reálneho procesu. V príkazovom riadku MATLABu sa zadá názov zvoleného súboru (pre regulačný pochod, ktorý sa bude sledovať). Zobrazia sa dva grafy, a to samotný regulačný pochod a graf závislosti IAE od času.
6. Schéma **realnaprech1.mdl** slúži na zmeranie prechodovej charakteristiky reálneho systému, schéma **riadenie.mdl** na riadenie reálneho systému za použitia navrhnutých regulátorov (resp. na ich testovanie v reálnom systéme). Práca s týmito schémami sa realizuje na počítači, kde je zapojený laboratórny výmenník tepla LTR700 a naitalovaný riadiaci systém dSPACE so všetkými komponentami.