

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

FAKULTA CHEMICKÉJ A POTRAVINÁRSKEJ TECHNOLOGIE

Katedra informatizácie a riadenia procesov

**RIADENIE TEPLOVZDUŠNÉHO VÝMENNÍKA
TEPLA**

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

Katedra: informatizácie a riadenia procesov

Číslo:

Vec: Zadanie semestrálneho projektu na ukončenie bakalárskeho štúdia.

- 1. Meno študenta /ky/: Martin Herceg**
- 2. (u vydatých aj rodné)**
- 3. Meno vedúceho projektu: Doc. Dr. Ing. Miroslav Fikar**
- 4. Názov projektu: Riadenie teplovzdušného výmenníka: vytvorenie matematického modelu procesu, overenie modelu na reálnom zariadení, navrhnutie vizualizačného prostredia v programe ControlDesk, návrh riadenia výmenníka**
/So všetkými podrobnosťami: formulácia úlohy, rozsahu, podmienok riešenia, harmonogramu riešenia a pod./
- 4. Termín odovzdania záverečnej práce projektu: 22. 05. 2004**
- 5. Záverečná práca projektu sa odovzdáva v 2 zviazaných exemplároch vedúcemu projektu.**

Dátum: 16. 02. 2004

Doc. Dr. Ing. Miroslav Fikar
vedúci katedry

Moje poďakovanie patrí doc. Miroslavovi Fikarovi, za odborné vedenie, cenné pripomienky a návrhy pri spracovávaní problému riadenia teplovzdušného výmenníka.

1 Obsah

2 Úvod.....	4
3 Teoretická časť.....	5
Materiálová bilancia.....	5
Entalpická bilancia.....	6
4 Popis zariadenia	9
Charakteristika systému.....	9
Celkové zapojenie	10
Konektor CP 1102	11
Prevodník.....	12
Zosilňovač	12
5 Identifikácia	13
Funkcia pch.....	16
Tabuľky identifikovaných údajov	19
6 Matematický model	24
Funkcia sfen2.c	25
7 Návrh riadenia	30
8 Vizualizácia	37
9 Záver.....	39
10 Zoznam použitých symbolov	40
11 Literatúra.....	41

2 Úvod

V chemickej a potravinárskej technológii je častá požiadavka na automatizáciu výroby. Výroby sú spravidla náročné a vyžadujú pomerne kvalitnú reguláciu. Otázku „Ako zabezpečiť automatizáciu výroby, s minimálnymi nákladmi?“, je dosť často počuť pri rozhodovaní manažmentu podniku. Prvá podmienka pri návrhu sú teda financie. Ďalšou podmienkou je spoľahlivosť. Navrhnuté zariadenia musia pracovať dlhodobo presne a s minimálnymi údržbami. Kvalita regulácie a bezpečnosť prevádzky sú samozrejmosťou. Preto pri návrhu automatizačnej techniky treba vychádzať s týchto úvah.

Dodávka vzduchu o požadovanej teplote je jedným z viacerých potrieb podniku v chemickej a potravinárskej oblasti. Patria sem činnosti úzko spojené so spracovávaním, tvarovaním a finálnou úpravou výrobkov. Ako príklad treba uviesť sušenie, pečenie, vyhrievanie zariadení na pracovnú teplotu, predohrev a rôzne iné činnosti. Pri nepretržitých výrobách je dodávka vzduchu priamo zviazaná s jeho následnou spotrebou a aj malý výpadok v dodávke môže spôsobiť veľké problémy v prevádzke. Na zabezpečenie plynulej dodávky vzduchu je potrebná regulácia, ktorá musí počítať aj s výkyvmi počasia, musí sa vysporiadať aj s rôznymi poruchami v potrubí a musí byť dostatočne pružná pri rôznych požiadavkách výroby.

Pri návrhu automatizačnej jednotky na dodávku vzduchu treba počítať so všetkými možnými alternatívami. Aby sa mohla väčšina alternatív vziať v úvahu, bude treba dodávku vzduchu namodelovať. Na modelovanie procesov sa využívajú materiálové a entalpické bilancie. Tieto bilancie sú základom pre vytvorenie algoritmu v počítačovom prostredí a jeho následnej vizualizácii. Prvým účelom tejto práce bude postup pri modelovaní procesov, vytvorení algoritmu a verifikácie matematického modelu so skutočným. Na programovanie bol použitý matematický softvér MATLAB v spolupráci s vizualizačným softvérom dSPACE. V druhej časti práci je rozobraná tematika riadenia, postup pri návrhu regulátora a výsledky riadenia.

Práca je rozdelená do jedenástich kapitol. V jednotlivých kapitolách je stručne opísaný postup práce a získané závery. V tretej kapitole sa teoreticky rozoberá problematika, v kapitole 4 je opísané zariadenie LTR 700 spolu so všetkými komponentmi. V piatej časti je spracovaná identifikácia, použitá metóda so všetkými získanými údajmi. Šiesta časť spracováva výsledky matematického modelovania. Návrh riadenia spolu s vizualizáciou je stručne spracovaný v kapitolách 7 a 8. Záver tvorí zhrnutie a nachádza sa ako samostatná časť s číslom 9.

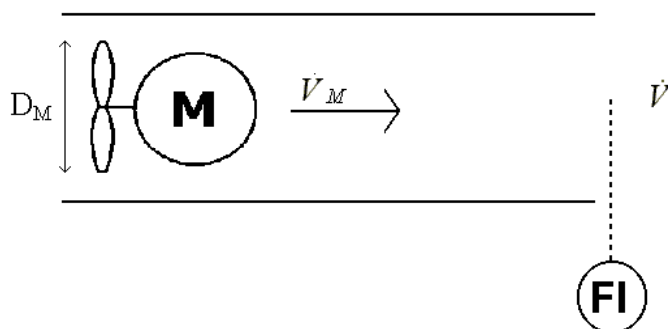
3 Teoretická časť

Návrh regulácie musí vychádzať s teoretického modelovania procesu. Modelovanie je nevyhnutné a musí zahŕňať viaceré alternatívy. Určitou nevýhodou modelovania je platnosť len v obmedzených podmienkach. Simulovaný proces sa potom využíva pri návrhu regulátora. K výhodám simulačného prostredia patria aj predstavy o energetickej náročnosti riadenia, možnosť predvídať rôzne poruchy, testovanie zariadenia a pod.

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 optimálny regulátor.

Materiálová bilancia

Prúdenie vzduchu miešadlom cez potrubie kruhového prierezu možno zobrazit' na nasledujúcom obrázku.



Obr. 3-1 K teoretickej predstave prúdenia vzduchu cez miešadlo

Predpokladáme, že potrubím prúdi vzduch o konštantnej teplote. Rozmery potrubia a jeho drsnosť nevplývajú na objemový tok cez miešadlo. Podľa [1] je objemový tok $\dot{V}_M$ cez miešadlo priamo úmerný frekvencii otáčania f .

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

k - súčiniteľ úmernosti, jeho hodnota sa určuje meraním a zvyčajne sa vyjadruje ako funkcia Reynoldsovo čísla miešadla

D_M - 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 $\dot{V} - \dot{V}_s = \Delta \dot{V}$, $f - f_s = \Delta f$, vykrátíme hustotu a vykonáme Laplaceovu transformáciu s nulovými počiatočnými podmienkami.

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

Výsledný prenos bude mať tvar

$$\frac{\Delta \dot{V}(s)}{\Delta F(s)} = \frac{k D_M^3}{s+1} = \frac{K_V}{T_V s + 1} \quad (6)$$

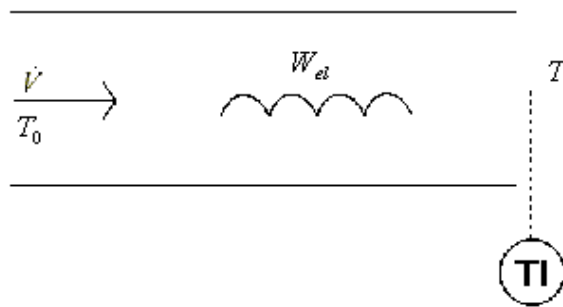
V dokumentácii k laboratórnemu zariadeniu bol identifikovaný prenos prietoku vzhľadom na frekvenciu otáčok vrtule v tvare

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

Porovnaním týchto dvoch modelov prideme k záveru, že zosilnenie systému $K_V = 0,9$ a časová konštanta $T_V = 1,3$ s.

Entalpická bilancia

Uvažujme ohrev prúdiaceho vzduchu cez elektricky vyhrievanú špirálu.



Obr. 3-2 K predstave elektrického ohrevu

Pre tepelnú bilanciú 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 - hmotnosť zohrievaného kovu (odporového drôtu)

c_{pK} - špecifická tepelná kapacita odporového kovu

T_K - teplota povrchu kovu

T_0 - teplota okolia

W_{el} - elektrický výkon

α - kombinovaný súčiniteľ prestupu tepla

F - teplovýmenný povrch kovu

Pre ustálený stav bude platiť rovnica

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

Odčítame rovnicu (9) od rovnice (8) a 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

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

Ak porovnáme výsledný prenos s prenosom uvedením v dokumentácii k zariadeniu, ktorý vyzerá nasledovne

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

prídeme k záverom, že $\alpha F = 0,95 \text{ W K}^{-1}$ a $m_K \cdot c_{pK} = 54,3 \text{ J K}^{-1}$.

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 vymení cez plochu F , spotrebuje na ohriatie vzduchu, takže člen $\dot{Q}_{str}$ môžeme zanedbať. Vyjadrime 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.

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

Ak dosadíme hodnoty v základných jednotkách do vzťahu (15), ktoré boli určené pri 50 % prietoku, 50 % výkone elektrickej špirály, strednej teplote 37,5 °C (teplota okolia 25 °C, teplota vzduchu 50 °C), normálnom tlaku, vyjde nám hodnota prietoku

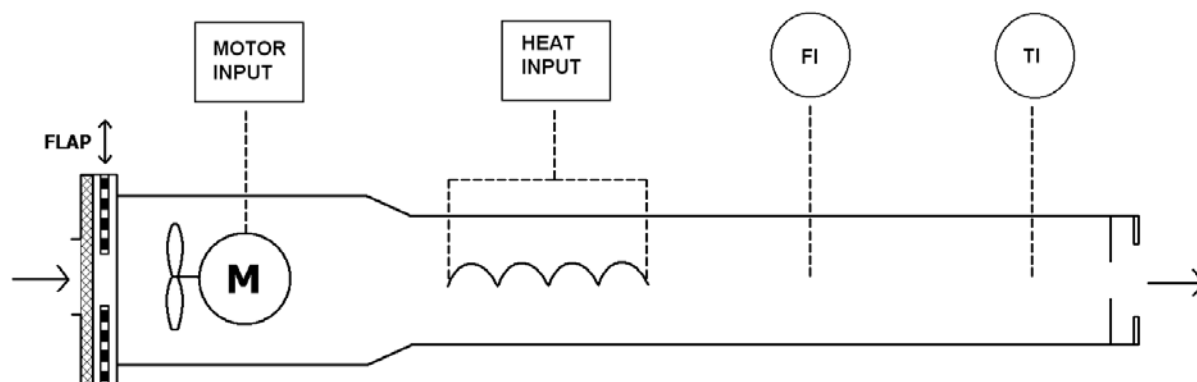
$$\dot{V} = \frac{50}{1,132 \cdot 1005 (50 - 25)} = 1,758 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 6,33 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \quad (16)$$

Pri vytváraní matematického modelu boli použité zjednodušujúce predpoklady, za ktorých sa dosiahli predchádzajúce závery. V prvom rade boli za podklady brané 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.

4 Opis zariadenia

Charakteristika systému

Laboratórne zariadenie LTR 700 vyzerá schematicky takto:



Obr. 4-1 Schéma zariadenia LTR 700

Ako vidieť zo schémy, komunikácia so zariadením prebieha štyrmi signálmi. Signály v obdĺžnikoch sú riadiace veličiny a signály v krúžkoch sú merané veličiny. Signál označený MOTOR INPUT slúži na ovládanie otáčok motora, signál HEAT INPUT reprezentuje výkon špirály. Signál FI reprezentuje prietok v m^3/h a TI je teplota v stupňoch Celzia.

Súčasťou zariadenia LTR 700 je aj klapka umiestnená v nasávacej časti (na obrázku vľavo).

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.

Ohrevná špirála je zložená z dvoch rezistorov s odpormi 75 a 100 Ω s bimetalickým spínačom, a maximálnym výkonom 100 W.

Nasávaný vzduch sa filtruje vzduchovým filtrom v blízkosti klapky, prechádza vrtulou a naráža na špirálu, kde sa ohrieva. Nasávací 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 kombinovane vedením, radiáciou ale hlavne prúdením.

Údaje o laboratórnom výmenníku tepla sú stručne zhrnuté v nasledujúcich tabuľkách.

rozmery LTR 700	hodnota	jednotka
dĺžka	450	mm
šírka	240	mm
výška	130	mm
hmotnosť	5	kg

Tab. 4-1 Údaje o zariadení LTR 700

motor	hodnota	jednotka
vstupné napätie	24	V (–)
vstupný prúd	max 1,0	A
rýchlosť prúdenia vzduchu	0 : 1,5	m/s
tlakový rozdiel	max. 50	mm H ₂ O

Tab. 4-2 Údaje o motorčeku

vyhrievacie teleso	hodnota	jednotka
rezistor I	100	Ω
rezistor II	75	Ω
vstupný prúd	90	V (~)
max. výkon	100	W

Tab. 4-3 Údaje o elektrickej špirále

odporový teplomer	hodnota	jednotka
merací rozsah	25 : 75	°C
výstupný signál	4 : 20	mA
napájacie napätie	12 : 36	V (–)
časová konštanta senzora	6	s

Tab. 4-4 Údaje o odporovom teplomeri

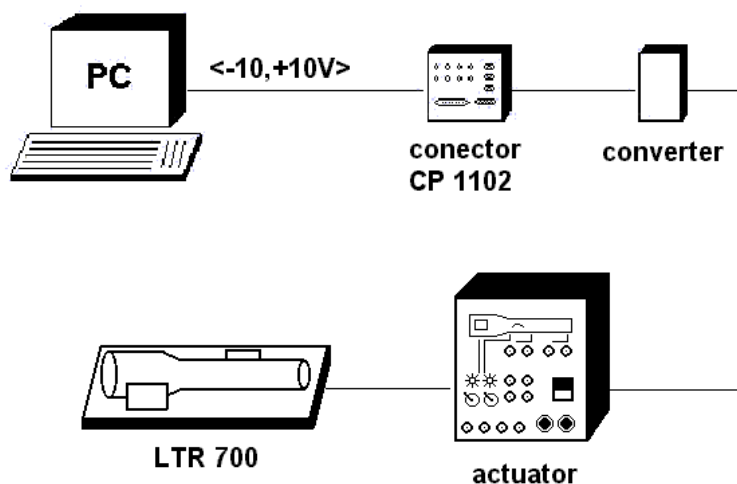
piezoelektrický prietokomer	hodnota	jednotka
merací rozsah	0 : 50	mm H ₂ O
výstupný signál	4 : 20	mA
napájacie napätie	12 : 30	V (–)
hysterézia	1,5	%

Tab. 4-5 Údaje o prietokomeri

Celkové zapojenie

Pripojenie počítača s riadiacou jednotkou znázorňuje obrázok 4-2. Ako je vidieť na obrázku, signály z počítača prechádzajú sústavou prevodníkov a vysielačov. Prvým prvkom je konektor CP 1102, za ním nasleduje prevodník a potom signály vstupujú do zosilňovača.

Práca so zariadením LTR 700 si vyžaduje najskôr manuálny štart s lokálnym ovládaním na zosilňovači. Až po nabehnutí zariadenia na prevádzkové hodnoty, sa môže spustiť regulácia. Signály prenášajú farebne označené vodiče, ktorých zapojenie je vidieť na obr. 4-4. Pre lepšie nahliadnutie zapojenia treba pozrieť dokumentáciu k zariadeniu.



Obr. 4-2 *Komunikáciu s počítačom sprostredkuje okrem samotného zariadenia LTR 700 ešte aj zosilňovač, prevodník signálov a komunikátor CP 1102.*

Vstupno-výstupná karta

V počítači sa nachádza vstupno-výstupná karta s procesorom typu DSP od firmy dSPACE.

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:

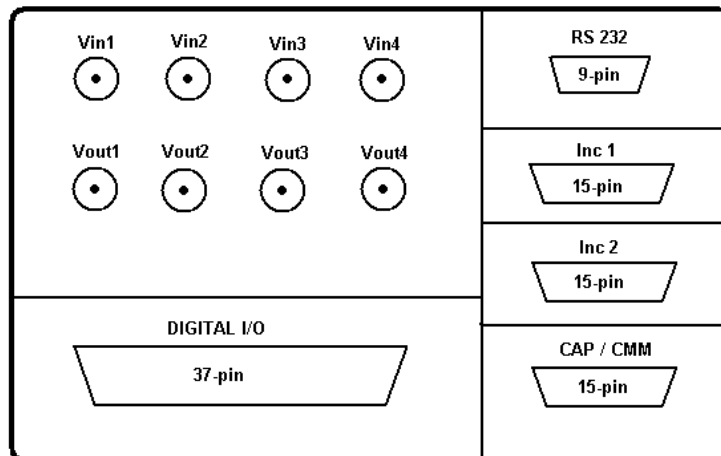
- paralelné 12 bit kanály
- μ s prechodový čas
- ± 10 V výstupy

digitálne I/O:

- programovateľný digitálny I/O podsystem založený na TI 25 MHz
- TMS320P14 DSP
- 16 digitálnych I/O vedení

Konektor CP 1102

Konektor CP 1102 je prvok vstupno-výstupnej karty počítača. Nachádzajú sa tu 4 okrúhle porty pre vstupný signál a 4 okrúhle porty pre výstupný signál.



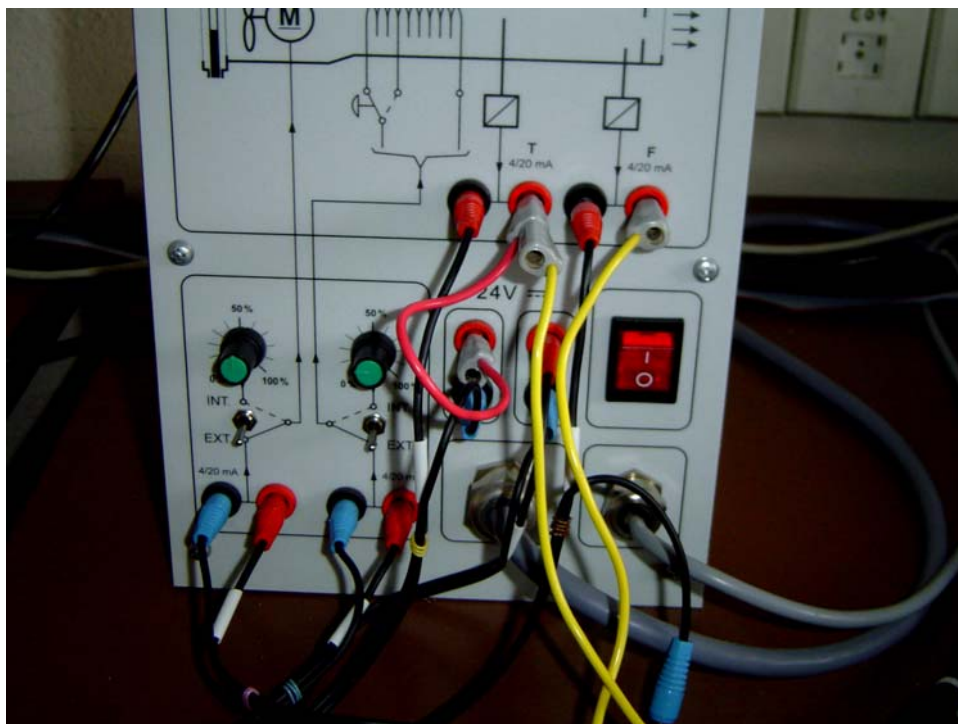
Obr. 4-3 Schéma konektora CP 1102

Prevodník

Prevodník je nevyhnutnou súčasťou zapojenia a plní úlohu transformácie výstupného napätia zo zosilňovača na rozsah $<-10, +10>$ V.

Zosilňovač

Zosilňovač má funkciu priameho napájania zariadenia LTR 700. Má tvar skrinky, na ktorej sa nachádza spínač a obsahuje interné potenciometre na ručnú reguláciu. Pri spúšťaní zariadenia je vhodné najskôr nastaviť ručnú reguláciu a keď sa zariadenie dostane do prevádzkového stavu, potom nastaviť automatickú reguláciu.



Obr. 4-4 Zapojenie vodičov so zosilňovačom

5 Identifikácia

Na prvotné zistenie dynamických vlastností systému sa často používa metóda prechodových charakteristík. Pri analýze prechodovej charakteristiky určujeme čas prietahu T_u a čas nábehu T_n .

Správanie sa laboratórneho zariadenia LTR 700 opisujú diferenciálne rovnice prvého rádu, z čoho vyplýva, že systém bude mať prechodovú charakteristiku bez inflexného bodu, ktorého prechodová funkcia bude v tvare

$$y(t - D) = K \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \quad (17)$$

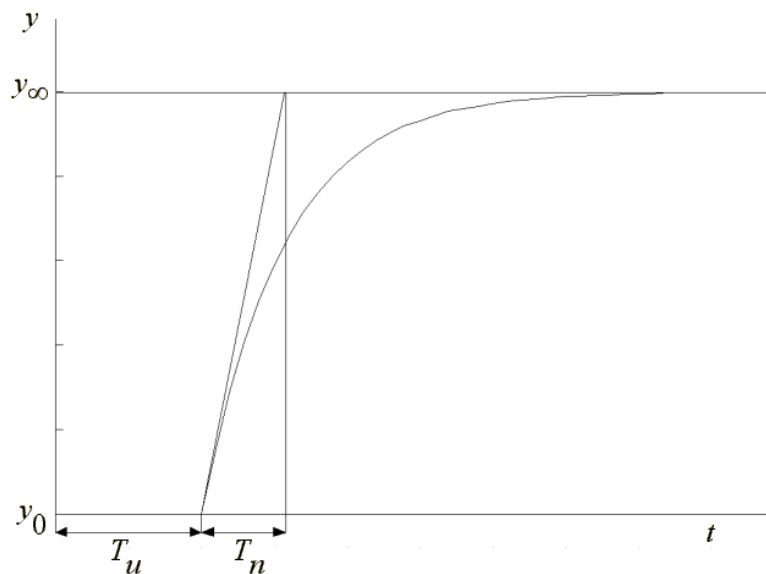
kde

D - dopravné oneskorenie

K - zosilnenie systému

T - časová konštanta

Prechodová charakteristika systému prvého rádu má priebeh zobrazený na obr. 5-1.



Obr. 5-1 Určenie času prietahu a času nábehu z prechodovej charakteristiky

Pre systém prvého rádu platí, že $T_u = D$ a $T_n = T$. Zosilnenie K sa dá vypočítať podľa nasledovného vzťahu

$$K = \frac{y_{\infty} - y_0}{u_{\infty} - u_0} \quad (18)$$

kde u označuje vstupnú veličinu. Určovanie času prietahu a času nábehu takýmto spôsobom je dosť nepresné, a preto sa používa iná metóda identifikácie [4], pri ktorej sa odčítajú sa dva body na nábehovej krivke pre dva rôzne časy a dosadia sa do prechodovej funkcie (17). Získajú sa tak dve rovnice o dvoch neznámych, ktorých riešenie nám poskytne hľadané parametre D a T . Ak sa zavedie substitúcia

$$x = \frac{\ln \frac{K - y_1}{K}}{\ln \frac{K - y_2}{K}} \quad (19)$$

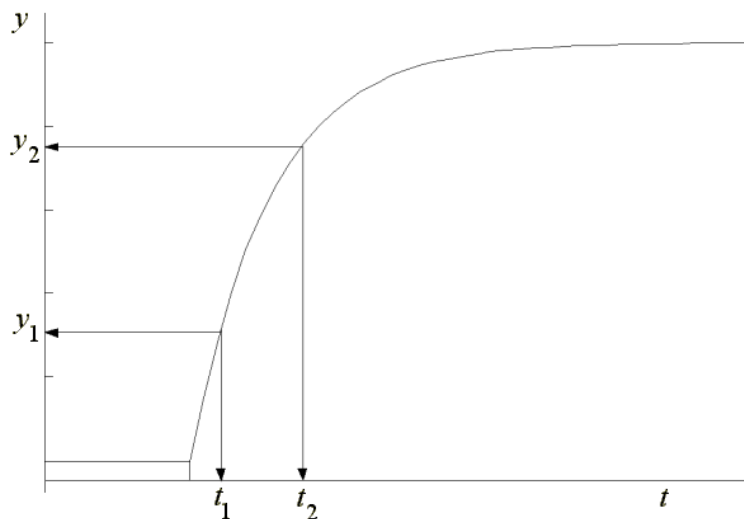
tak pre dopravné oneskorenie dostaneme

$$D = \frac{t_2 \cdot x - t_1}{x - 1} \quad (20)$$

a pre časovú konštantu

$$T = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{K - y_1}{K - y_2}} \quad (21)$$

kde y_1, y_2, t_1, t_2 odčítame z grafu podľa obrázku 5-2.



Obr. 5-2 Metóda odčítania dvoch bodov

Aby mohli byť dané parametre považované za štatistickú strednú hodnotu, treba vykonať veľa meraní a vyhodnotení. Programovanie v prostredí MATLAB poskytuje optimálne možnosti pre spracovanie takéhoto množstva prechodových charakteristík za veľmi krátky čas.

Pri ukladaní dát v prostredí dSPACE systém používa súbory typu *.mat, čo predstavuje dátovú maticu formátu štruktúry s časom. Pri spracovávaní tejto matice v prostredí MATLABu je potrebné formát štruktúry, ktorá je typu SINGLE, previesť na maticu, ktorá je typu DOUBLE.

Všetky operácie, ktoré treba vykonať do vykreslenia prechodovej charakteristiky sú zdĺhavé, a preto výhodné naprogramovať funkciu, ktorá bude obsahovať všetky príkazy potrebné k získaniu hľadaných parametrov.

Funkcia **pch** obsahuje všetky potrebné príkazy na to, aby za relatívne krátky čas sme získali parametre K , D , T . Vstupné hodnoty do funkcie **pch** musia obsahovať tri vektory rovnakej dĺžky. A to čas (time), akčnú veličinu (step) a merané dáta (data). Bližšie informácie sa dajú získať príkazom v MATLABe.

» help pch

Najlepšie je uložiť do súbora všetky tri vektory. Na to však treba vytvoriť potrebnú schému v SIMULINKu. Treba pripomenúť, že funkcia **pch** bola špeciálne vyvinutá pre spracovanie prechodovej charakteristiky prietoku. Obsahuje dva fixne stanovené body t_1, t_2 , nastavené na hodnoty 0,4 s, 1s od času skoku. Pre spracovanie prechodovej charakteristiky teploty sa použila modifikovaná funkcia **tpch** s hodnotami t_1, t_2 nastavenými na 25 s a 75 s od času vykonania skoku. Výsledok obsahuje aj grafické znázornenie prechodovej charakteristiky, ktoré je znázornené na obr. 5-3.

Program funkcie **pch** je rozdelený na viac častí s opisom každého príkazu. Medzi prvé operácie patrí konvertovanie formátu SINGLE na formát DOUBLE. Tento proces je veľmi náročný na operačnú pamäť počítača. Pred spúšťaním funkcie je lepšie zatvoriť všetky bežiacie aplikácie. Ďalším krokom je filtrovanie získaných dát a určenie času skokovej zmeny. Posledným krokom je normovanie prechodovej charakteristiky a výpis získaných parametrov.

K funkcii patrí aj grafická interpretácia meraných hodnôt. Výsledný obrázok 5-3 obsahuje tri grafy:

- 1) merané dáta
- 2) merané dáta od času skoku
- 3) normovanú prechodovú charakteristiku.

Funkcia pch

```
function [K,D,T] = pch(cas,skok,data)
%
% gets constants from step response of the first order system
%
% pch(time,step,data)
% arguments must be the same structure type
%
% Example:
% [K,D,T] = pch(file.X.Data,file.Y(1).Data,file.Y(2).Data)
%
% returns
% K = proportion
% D = time delay
% T = time constant

a = getfield(data); %gets data from data
y0 = mean(a(1:20)); %average from the first 20 values
d = length(a);
yk = mean(a((d-20):d)); %average from the last 20 values

f1 = find(a~=i); % all indices of data
B = zeros(length(f1)); % new vector

for i=1:length(f1)
    B(i) = a(i);
end

B ; % B is the vector of measured values

r = getfield(skok); % gets data from step
R = zeros(1,length(r));

for k=1:length(r)
    R(k) = r(k);
end

R; % R is the vector of step values

DR = diff(R); % search for derivative
f2 = find(DR>0.1); % index of the step
indext0 = f2(1); % index for the step time

time = getfield(cas); % gets data from time
M = zeros(1,length(time)); % new vector

for n=1:length(M)
    M(n)=time(n);
end
M; % time vector

t0 = M(indext0); % step time

flt = fir1(10,0.001);
Fdata = filtfilt(flt,1,B); % filtering the data
f3 = find(Fdata>=0.9999*yk);
% search for the first index of constant data value

tk = M(f3(1)); % end of the step

stepdata = B(indext0:f3(1));
% data from the step time to the end of the step
```

```

Fstepdata = Fdata(indext0:f3(1)); % filtered stepdata

subplot(3,1,1)
plot(cas,B,'b'), title('MEASURED DATA')
axis([M(1) M(length(M)) 0.9*y0 1.1*yk]) %plots the measured data
hold on
plot(cas,Fdata,'k'), xlabel('time [s]');
hold off

subplot(3,1,2)
plot(M(indext0:f3(1)),stepdata,'b'), title('STEP RESPONSE')
% plots the step response
hold on
plot(M(indext0:f3(1)),Fstepdata,'k'), xlabel('time [s]');
% plots filtered stepdata
hold off

sk = R(length(R))-R(1); % size of the step

y = (Fstepdata-y0)/sk;
time = M(indext0:f3(1))-t0;

subplot(3,1,3)
plot(time,y,'k'),title('NORM STEP RESPONSE'),xlabel('time [s]');

id1 = find(time<=0.4);
indext1 = id1(length(id1));%index for time 0.4 s
id2 = find(time>=1);
indext2 = id2(1); %index for time 1 s

t1 = time(indext1);
t2 = time(indext2);
y1 = y(indext1);
y2 = y(indext2);

K = y(length(y))-y(1);
x = log((K-y1)/K)/log((K-y2)/K);
D = (t2*x-t1)/(x-1);
T = (t2-t1)/log((K-y1)/(K-y2));

```

Modifikovaná funkcia tpch má iba upravené hodnoty t_1, t_2 , ktoré sa môžu zmeniť v riadkoch 14 a 12 od konca.

Výsledok v MATLABe bude vyzerat' nasledovne, ak sa zadá príkazom podobným ako v nasledujúcom riadku:

```
» [K,D,T] = pch(v20na60.X.Data,v20na60.Y(3).Data,v20na60.Y(2).Data)
```

K =

3.6341e-002

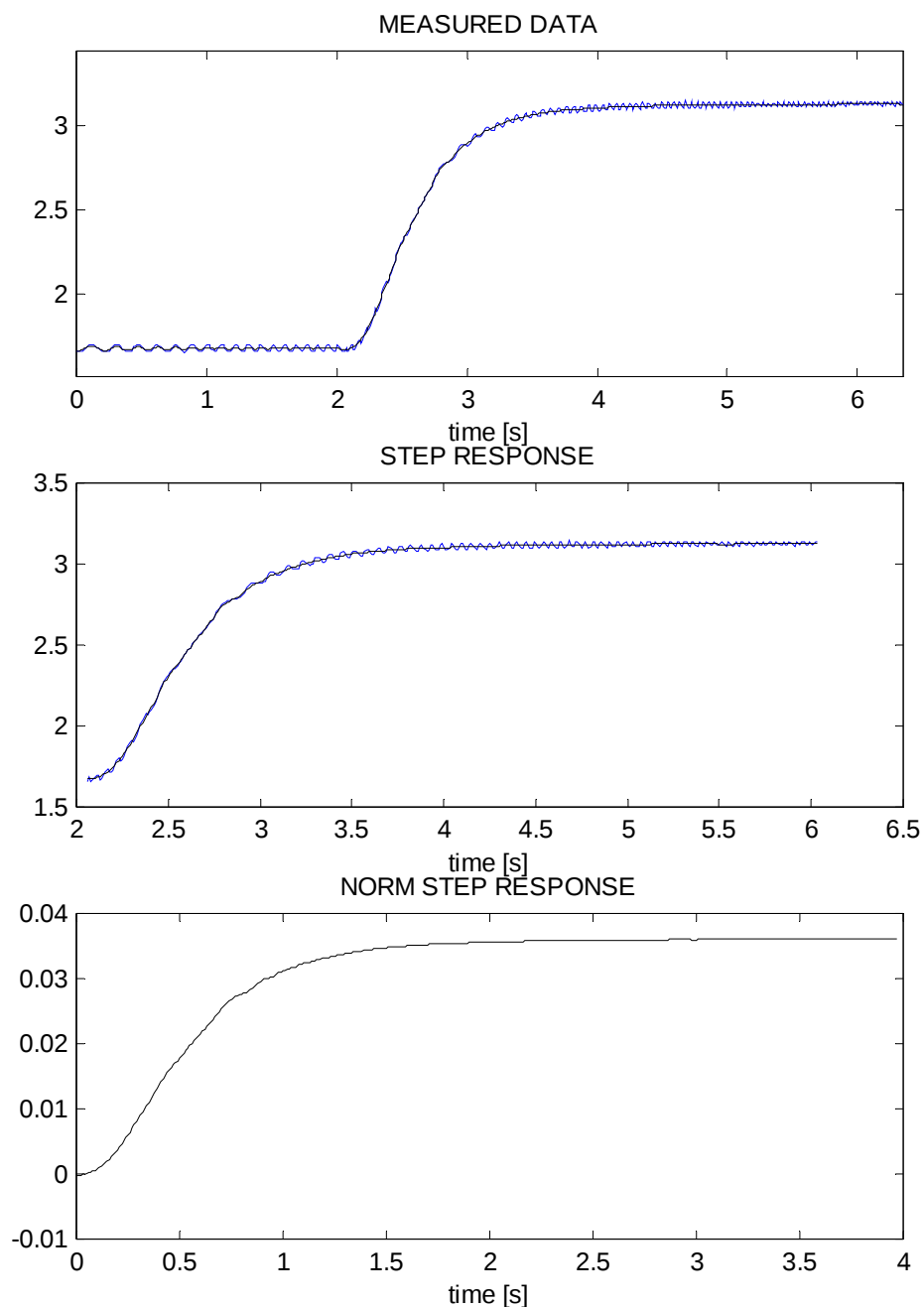
D =

2.1002e-001

T =

4.0395e-001

Grafické znázornenie výsledku:

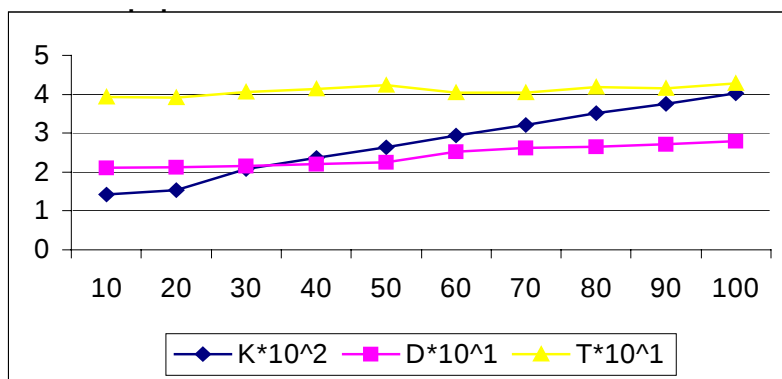


Obr. 5-3 Grafické spracovanie prechodovej charakteristiky prietoku pomocou funkcie *pch*

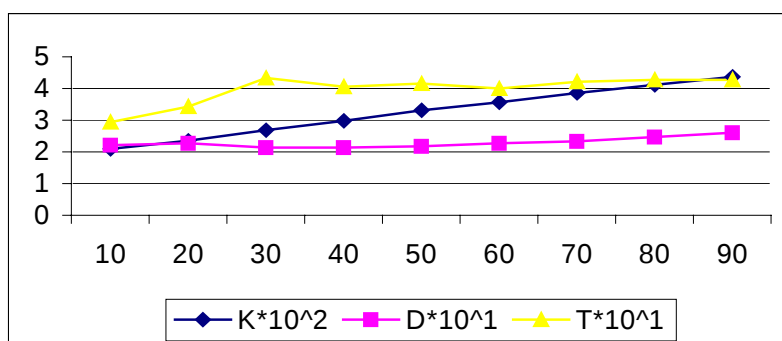
Všetky identifikované údaje sa nachádzajú spracované v tabuľkách (5-1, 5-2, 5-3). Prvý stĺpec označuje spracovávaný súbor, ktorého názov zároveň vyjadruje skokovú zmenu vstupnej veličiny. Druhý stĺpec je parametrom zosilnenia, tretí je dopravné oneskorenie a štvrtý znázorňuje časovú konštantu. V grafoch vedľa údajov sú vynesené závislosti identifikovaných údajov od veľkosti skoku. Veličiny sú v základných jednotkách, ktoré sú z priestorových dôvodov vynechané (ich zoznam je na strane 40).

Tabuľky identifikovaných údajov

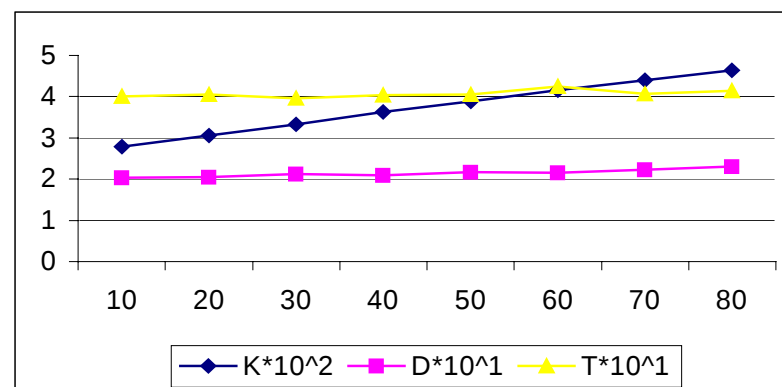
	$K \cdot 10^2$	$D \cdot 10^1$	$T \cdot 10^1$
v0na10	1,4268	2,1094	3,9325
v0na20	1,5334	2,1222	3,915
v0na30	2,0709	2,151	4,0611
v0na40	2,3568	2,2023	4,1324
v0na50	2,6346	2,2593	4,2287
v0na60	2,9412	2,5309	4,0428
v0na70	3,203	2,6119	4,0402
v0na80	3,5181	2,6544	4,189
v0na90	3,7584	2,7091	4,1476
v0na100	4,0321	2,8003	4,2773



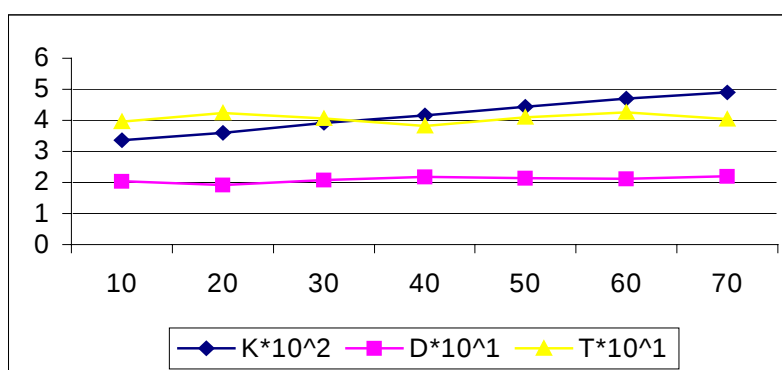
	$K \cdot 10^2$	$D \cdot 10^1$	$T \cdot 10^1$
v10na20	2,0975	2,208	2,9441
v10na30	2,347	2,2756	3,4377
v10na40	2,6945	2,1327	4,3422
v10na50	2,9834	2,1457	4,0617
v10na60	3,3169	2,175	4,1602
v10na70	3,5716	2,2749	4,0044
v10na80	3,8606	2,3401	4,2211
v10na90	4,1192	2,4692	4,2772
v10na100	4,3653	2,6118	4,2687



	$K \cdot 10^2$	$D \cdot 10^1$	$T \cdot 10^1$
v20na30	2,7869	2,0393	4,0092
v20na40	3,0521	2,0482	4,0535
v20na50	3,3341	2,1252	3,9673
v20na60	3,6341	2,1002	4,0395
v20na70	3,8828	2,1619	4,0482
v20na80	4,1594	2,1553	4,2462
v20na90	4,4005	2,2362	4,0703
v20na100	4,6377	2,3081	4,1409

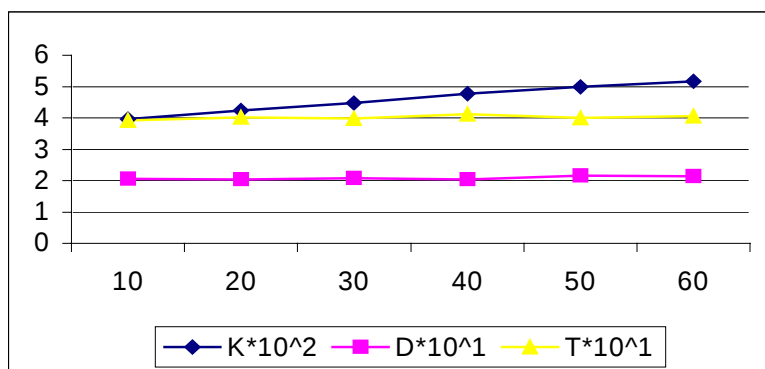


	$K \cdot 10^2$	$D \cdot 10^1$	$T \cdot 10^1$
v30na40	3,3536	2,0356	3,9546
v30na50	3,6053	1,9281	4,2467
v30na60	3,924	2,0823	4,069
v30na70	4,1541	2,1818	3,8188
v30na80	4,4493	2,1361	4,108
v30na90	4,7072	2,1206	4,251
v30na100	4,908	2,1905	4,0449

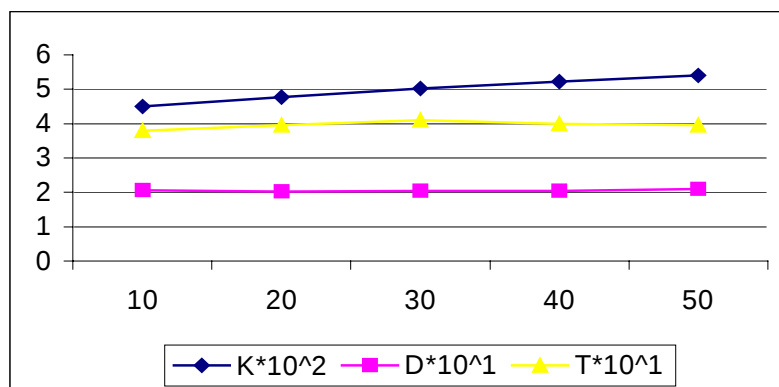


Tab. 5-1 Identifikované údaje pre prietok

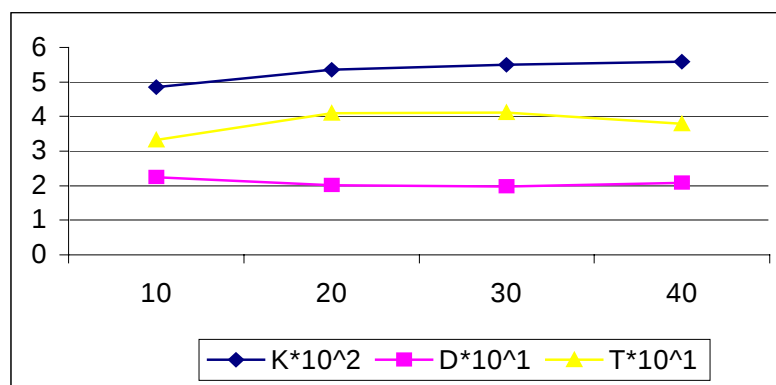
	$K \cdot 10^2$	$D \cdot 10^1$	$T \cdot 10^1$
v40na50	3,9616	2,0529	3,9228
v40na60	4,2364	2,0463	4,0206
v40na70	4,4824	2,0782	3,982
v40na80	4,7716	2,0353	4,1222
v40na90	4,9929	2,1594	3,9935
v40na100	5,174	2,1478	4,0588



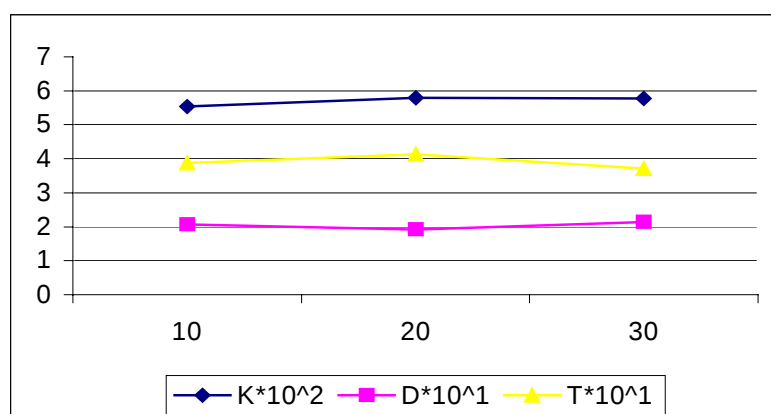
	$K \cdot 10^2$	$D \cdot 10^1$	$T \cdot 10^1$
v50na60	4,4953	2,059	3,7913
v50na70	4,7705	2,0204	3,9517
v50na80	5,0283	2,0332	4,0949
v50na90	5,2278	2,0509	3,9875
v50na100	5,3993	2,0874	3,9643



	$K \cdot 10^2$	$D \cdot 10^1$	$T \cdot 10^1$
v60na70	4,8507	2,2401	3,3144
v60na80	5,3609	2,0106	4,0877
v60na90	5,503	1,9847	4,1052
v60na100	5,5878	2,0888	3,789



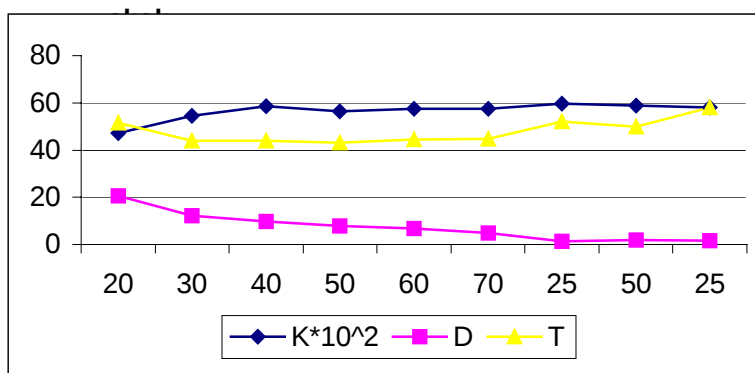
	$K \cdot 10^2$	$D \cdot 10^1$	$T \cdot 10^1$
v70na80	5,5434	2,0603	3,8699
v70na90	5,7953	1,9266	4,1382
v70na100	5,7797	2,1324	3,7121



Tab. 5-2 Pokračovanie tabuľky 5-1, identifikované údaje pre prietok

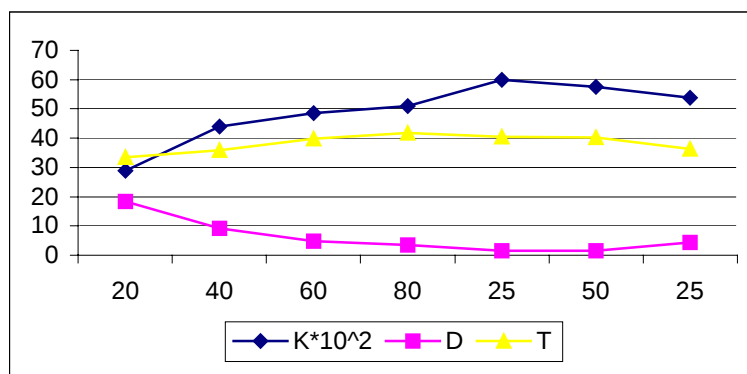
	$K \cdot 10^2$	D	T
v0t0na20	47,18	20,6535	51,569
v0t0na30	54,61	12,279	43,9057
v0t0na40	58,61	9,7257	44,0256
v0t0na50	56,47	7,9184	43,0477
v0t0na60	57,44	6,7579	44,5528
v0t0na70	57,4	4,8518	44,7481
v0t25na50	59,53	1,3944	52,181
v0t25na75	58,74	1,9937	49,922
v0t50na75	57,93	1,6813	57,8997

pre 25% vstupný signál pre prietok



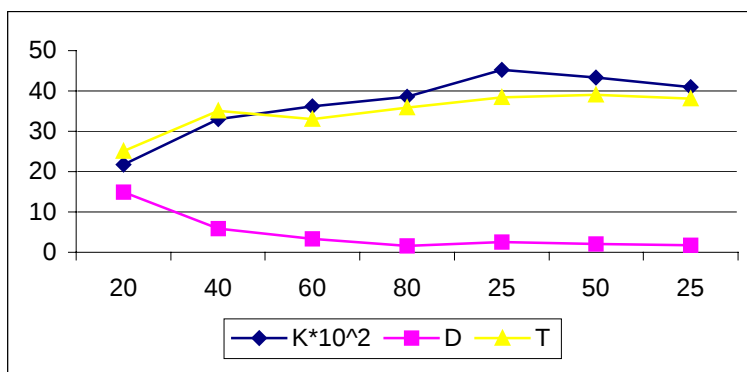
	$K \cdot 10^2$	D	T
v1t0na20	28,98	18,4228	33,5161
v1t0na40	43,96	9,0933	35,8595
v1t0na60	48,65	4,8454	39,893
v1t0na80	51,06	3,5205	41,7232
v1t25na50	60,04	1,5043	40,389
v1t25na75	57,52	1,437	40,3447
v1t50na75	53,81	4,3361	36,3187

pre 50% vstupný signál pre prietok



	$K \cdot 10^2$	D	T
v2t0na20	21,78	14,9424	25,0794
v2t0na40	33,04	5,9036	35,0384
v2t0na60	36,24	3,3304	32,988
v2t0na80	38,61	1,6264	35,893
v2t25na50	45,29	2,5888	38,3594
v2t25na75	43,4	2,1335	39,0049
v2t50na75	40,94	1,6878	38,0327

pre 75% vstupný signál pre prietok



Tab. 5-3 Identifikované hodnoty pre teplotu

Podľa grafov závislostí parametrov K_V , D_V , T_V od veľkosti skoku pre prietok je vidieť (tabuľky 5-1, 5-2), že parameter K_V závisí približne lineárne od veľkosti skoku, zatiaľ čo parametre D_V , T_V sú približne konštantné.

Z toho môžeme vypočítať parametre D_V , T_V ako aritmetický priemer všetkých všetkých hodnôt.

$$D_V = 0,21939 \pm 0,02034 \quad (22)$$

$$T_V = 0,39698 \pm 0,03287 \quad (23)$$

Pre určenie zosilnenia treba nakalibrovať prietok podľa veľkosti vstupného signálu pre motorček. Vstupný signál bude narastať po jednej desatine z maximálnej hodnoty. Meranie urobíme štyrikrát a výsledky sa spriemerujú.

u_V [%]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\dot{V}$ [m^3/h]	1,3	1,4525	1,6675	1,9575	2,295	2,7	3,1525	3,66	4,23	4,825	5,42

Tab. 5-4 Kalibrácia prietoku podľa vstupného signálu

Na určenie zosilnenia však nepotrebujeme závislosť $\dot{V} = f(u_V)$, ale

$$K_V = \frac{\Delta \dot{V}}{\Delta u_V} = \frac{\dot{V} - \dot{V}_0}{u_V - u_{V0}} = f(u_V) \quad (24)$$

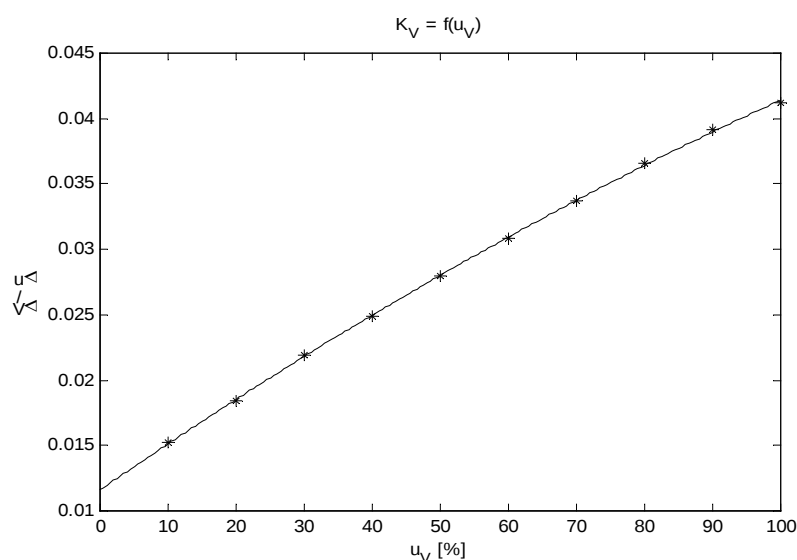
Pri meraní $\dot{V}_0 = 1,3 \text{ m}^3/h$, $u_{V0} = 0 \%$.

u_V [%]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\frac{\Delta \dot{V}}{\Delta u_V} \cdot 10^2$	1,525	1,8375	2,1917	2,4875	2,8	3,0875	3,3714	3,6625	3,9167	4,12

Tab. 5-5 Závislosť $\Delta \dot{V} / \Delta u_V = f(u_V)$

Polynomicou regresiou získame nasledujúcu závislosť pre zosilnenie

$$K_V = -6,0705 \cdot 10^{-2} u_V^2 + 3,5891 \cdot 10^{-4} u_V + 1,1597 \cdot 10^{-2} \quad (25)$$



Obr. 5-4 Zosilnenie prietoku lepšie vystihuje polynóm druhého stupňa

Na určenie parametrov K_T , D_T , T_T , pre teplotu musíme vychádzať z viacerých aspektov. Prvý charakterizuje správanie sa parametrov podľa vstupného signálu pre teplotu, druhý ukazuje na závislosť od vstupného signálu pre prietok. Ak si všimneme závislosti zosilnenia a časovej konštanty od veľkosti skoku vstupného signálu pre ohrev, zistíme, že tieto hodnoty sa pohybujú v okolí strednej hodnoty a pre ich určenie použijeme aritmetický

stred. Parameter D_T klesá so vstupným signálom pre ohrev. Pri spúšťaní ohrevu z nulového počiatočného signálu je dopravné oneskorenie výrazne vyššie. Súvisí to s akumuláciou tepla pri spúšťaní elektrického ohrevu. Ak budeme v špirále udržiavať nejaký prúd, parameter dopravného oneskorenia bude približne konštantný a môžeme ho spriemerovať. Pritom však treba vziať v úvahu, že získaný matematický model bude reprezentovať správanie sa ohrevu už počas prevádzky. Získame nasledovné hodnoty.

signál u_V [%]	K_T	D_T	T_T
25	0,5643	1,6898	46,744
50	0,5322	1,8504	39,268
75	0,3959	2,1367	36,553

Tab. 5-6 Parametre K_T , D_T , T_T pre teplotu

Z tabuľky 5-3, ak urobíme závislosti parametrov od vstupného signálu pre prietok, získame vzťahy

$$K_T = -2,196 \cdot 10^{-5} u_V^2 - 3,154 \cdot 10^{-4} u_V + 0,58 \quad (26)$$

$$T_T = -0,2478 u_V + 52,878 \quad (27)$$

$$D_T = 1,8923 \quad (28)$$

Vzťahy (26, 27, 28) opisujú správanie sa parametrov od prietoku len približne a odchýlky spôsobené pri spriemerovaní môžu mať za následok rozdiely pri verifikácii so skutočným správaním sa teploty.

Uvedené vzťahy pre parametre K , D , T budú slúžiť pri matematickom modelovaní procesu. Pri návrhu regulátora sa však použijú len stredné hodnoty týchto parametrov. Stredné hodnoty sú zhrnuté v tabuľke 5-7.

G_V	K_V	$2,7518 \cdot 10^{-2}$
	D_V	0,21934
	T_V	0,39698
G_T	K_T	0,491
	D_T	1,8923
	T_T	40,488

Tab. 5-7 Priemerné hodnoty parametrov pre návrh regulátora

6 Matematický model

Matematický model sa opiera o výsledky získané v kapitole teoretická časť, kde proces je opísaný dvoma lineárnymi diferenciálnymi rovnicami (2), (8). Pri identifikácii sa však potvrdili viaceré nelineárne závislosti. Správanie sa parametrov bolo aproximované závislosťami (25), (26), (27). Pri aplikácii týchto závislostí do programového prostredia MATLAB je nevyhnutné zvládnutie programovania S – funkcií. Pre komunikáciu so systémom dSPACE treba S – funkciu naprogramovať v jazyku C. Potom je treba z jazyka C funkciu prekompilovať do formátu MEX súboru. Až potom možno pracovať s reálnym procesom v prostredí dSPACE.

Funkcia **sfen2.c** bola napísaná v obyčajnom textovom editore. Vstupuje do nej päť signálov v poradí

- 1) vstupný signál pre ohrev
- 2) vstupný signál pre motorček
- 3) zosilnenie pre prietok
- 4) zosilnenie pre teplotu
- 5) časová konštanta pre teplotu

Výstup tvoria dva signály

- 4) teplota
- 5) prietok

Funkcia je analógiou spojitého systému s dvoma diferenciálnymi rovnicami zapísaná maticovým spôsobom

$$\frac{dx}{dt} = A x + B u \quad (29)$$

$$y = C x + D u \quad (30)$$

kde matice A , B , C , D vyzerajú nasledovne:

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{1}{T_T} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{0,39698} \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} \frac{K_T}{T_T} & 0 \\ 0 & \frac{K_V}{0,39698} \end{pmatrix} \quad (31, 32)$$

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad D = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (33, 34)$$

Pre vytvorenie formátu MEX sa používa kompilátor obsiahnutý v MATLABe, stačí použiť príkaz

» `mcc -x sfen2.c`

a v aktuálnom adresári sa zobrazí súbor **sfen2.dll**. Potom už nebude problém pri kompilovaní pre systém dSPACE.

Funkcia sfen2.c

```
#define S_FUNCTION_NAME sfen2
#define S_FUNCTION_LEVEL 2

#include "simstruc.h"

#define U(element) (*uPtrs[element]) /* Pointer to Input Port0 */

static real_T A[2][2]={ { -1      ,      0      } ,
                        {  0      , -1/0.39698 } ,
                        };

static real_T B[2][2]={ {  1      ,      0      } ,
                        {  0      ,  1/0.39698 } ,
                        };

static real_T C[2][2]={ {  1      ,  0      } ,
                        {  0      ,  1      } ,
                        };

static real_T D[2][2]={ {  0      ,  0      } ,
                        {  0      ,  0      } ,
                        };

static void mdlInitializeSizes(SimStruct *S)
{
    ssSetNumSFcnParams(S, 0); /* Number of expected parameters */
    if (ssGetNumSFcnParams(S) != ssGetSFcnParamsCount(S)) {
        return; /* Parameter mismatch will be reported by Simulink */
    }

    ssSetNumContStates(S, 2);
    ssSetNumDiscStates(S, 0);

    if (!ssSetNumInputPorts(S, 1)) return;
    ssSetInputPortWidth(S, 0, 5);
    ssSetInputPortDirectFeedThrough(S, 0, 1);

    if (!ssSetNumOutputPorts(S, 1)) return;
    ssSetOutputPortWidth(S, 0, 2);
    ssSetNumSampleTimes(S, 1);
    ssSetNumRWork(S, 0);
    ssSetNumIWork(S, 0);
    ssSetNumPWork(S, 0);
    ssSetNumModes(S, 0);
    ssSetNumNonsampledZCs(S, 0);

    ssSetOptions(S, SS_OPTION_EXCEPTION_FREE_CODE);
}

static void mdlInitializeSampleTimes(SimStruct *S)
{
    ssSetSampleTime(S, 0, CONTINUOUS_SAMPLE_TIME);
    ssSetOffsetTime(S, 0, 0.0);
}
```

```

#define MDL_INITIALIZE_CONDITIONS

static void mdlInitializeConditions(SimStruct *S)
{
    real_T *x0 = ssGetContStates(S);
    int_T lp;

    for (lp=0;lp<2;lp++) {
        *x0++=0.0;
    }
}

static void mdlOutputs(SimStruct *S, int_T tid)
{
    real_T      *y      = ssGetOutputPortRealSignal(S,0);
    real_T      *x      = ssGetContStates(S);
    InputRealPtrsType uPtrs = ssGetInputPortRealSignalPtrs(S,0);

    /* y=Cx+Du */
    y[0]=C[0][0]*x[0]+C[0][1]*x[1]+D[0][0]*U(0)+D[0][1]*U(1);
    y[1]=C[1][0]*x[0]+C[1][1]*x[1]+D[1][0]*U(0)+D[1][1]*U(1);
}

#define MDL_DERIVATIVES

static void mdlDerivatives(SimStruct *S)
{
    real_T      *dx      = ssGetdX(S);
    real_T      *x      = ssGetContStates(S);
    InputRealPtrsType uPtrs = ssGetInputPortRealSignalPtrs(S,0);

    /* xdot=Ax+Bu */

    dx[0]=A[0][0]*x[0]/U(4)+A[0][1]*x[1]+B[0][0]*U(0)*U(3)/U(4)+B[0][1]*U(1);
    dx[1]=A[1][0]*x[0]+A[1][1]*x[1]+B[1][0]*U(0)+B[1][1]*U(2)*U(1);
}

static void mdlTerminate(SimStruct *S)
{
}

#ifdef MATLAB_MEX_FILE    /* Is this file being compiled as a MEX-file? */
#include "simulink.c"      /* MEX-file interface mechanism */
#else
#include "cg_sfun.h"       /* Code generation registration function */
#endif

```

Ak je pripravený formát S – funkcie v súbore *.dll, tak môžeme vytvoriť príslušnú schému v MATLABe. Na overenie platnosti matematického modelu je vhodné do schémy zapracovať aj blok reálneho systému.

Pre zabezpečenie želaného rozsahu vstupného signálu je potrebné signál vstupujúci do zariadenia prepočítať na rozsah vystupujúci zo vstupno–výstupnej karty. Žiadaná stupnica je od 0 po 100 jednotiek, zatiaľ čo rozsah signálov vstupno–výstupnej karty je v rozmedzí od –1 po 1.

Pri kalibrovaní prepočítavacej funkcie sa však zistilo, že maximálnemu signálu prietoku zodpovedá hodnota vstupu 0,74 a od vyššej hodnoty vstupu je táto hodnota konštantná. Takisto pre signál z teploty zodpovedá max. hodnota vstupu na 0,6. Preto, vzhľadom na toto obmedzenie bol upravený prepočítavací vzťah pre vstupný signál pre motorček na

$$y_M = \frac{1,74}{100} u_V - 1 \quad (35)$$

a pre ohrev

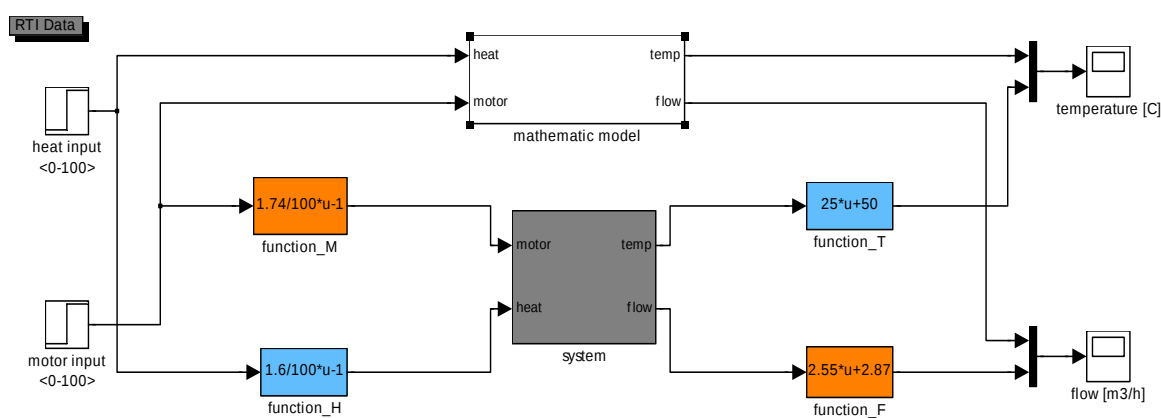
$$y_H = \frac{1,6}{100} u_T - 1 \quad (36)$$

Súčasťou schémy v MATLABe je aj prepočet výstupných signálov na hodnoty v stupňoch Celzia resp. v metroch kubických za hodinu. V tejto súvislosti treba spomenúť, že výsledné hodnoty boli zobrazené z údajov tabuľky 4-4 pre teplotu a vzťah (37) bol upravený podľa (16) spolu s korekciami (35) a je čisto empirický.

$$y_V = 2,55 x + 2,87 \quad (37)$$

$$y_T = 25 x + 50 \quad (38)$$

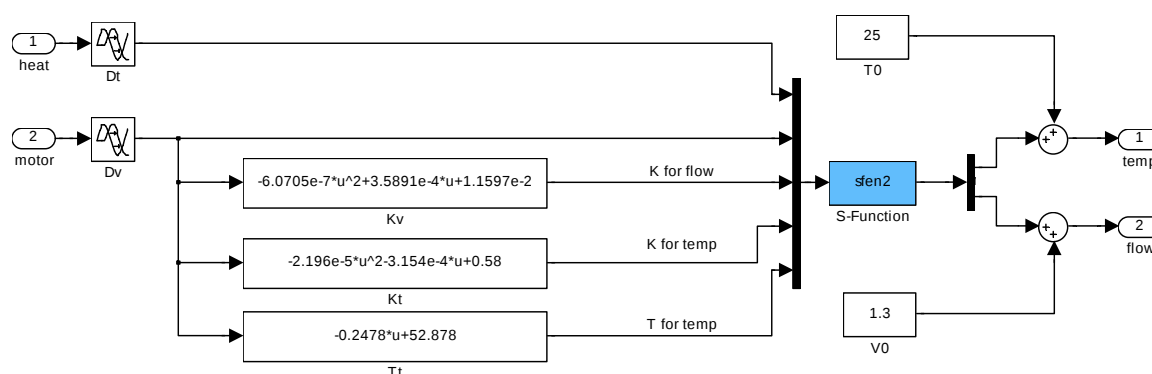
Prepočtové funkcie sú vo výslednej schéme obr. 6-1 pod označením **function_M** (35), **function_H** (36), **function_T** (38), **function_F** (37)



Obr. 6-1 Schéma na verifikáciu matematického modelu

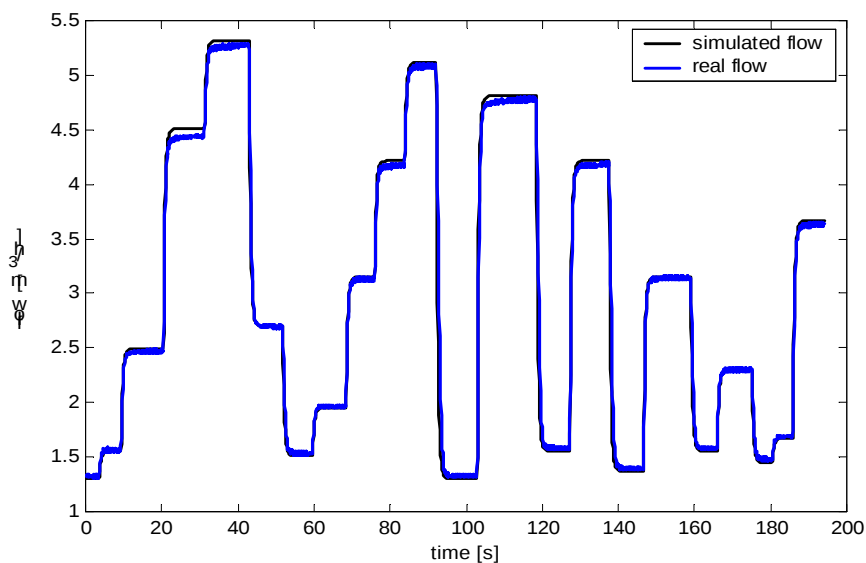
Na obrázku 6-1 je jasne vidieť objekt s matematickým modelom, pod ktorým sa nachádza blok, ktorý reprezentuje signály z laboratórneho zariadenia.

Objekt s matematickým modelom je subsystém s S – funkciou **sfen2**. V tomto subsystéme sa nachádzajú funkcie K_V (25), K_T (26), T_T (27). V ľavej časti na obr. 6-2 sa nachádzajú bloky s dopravným oneskorením. Sú označené D_T a D_V . Prislúchajú im hodnoty s tabuľky 5-7. Nad blokom S – funkcie (označenou modrou farbou) sa nachádza konštanta T_0 , ktorá zodpovedá teplote v laboratóriu a je zafixovaná na hodnotu 25 °C. Pod blokom S – funkcie sa nachádza konštanta V_0 . Táto hodnota reprezentuje minimálny prietok 1,3 m³/h.



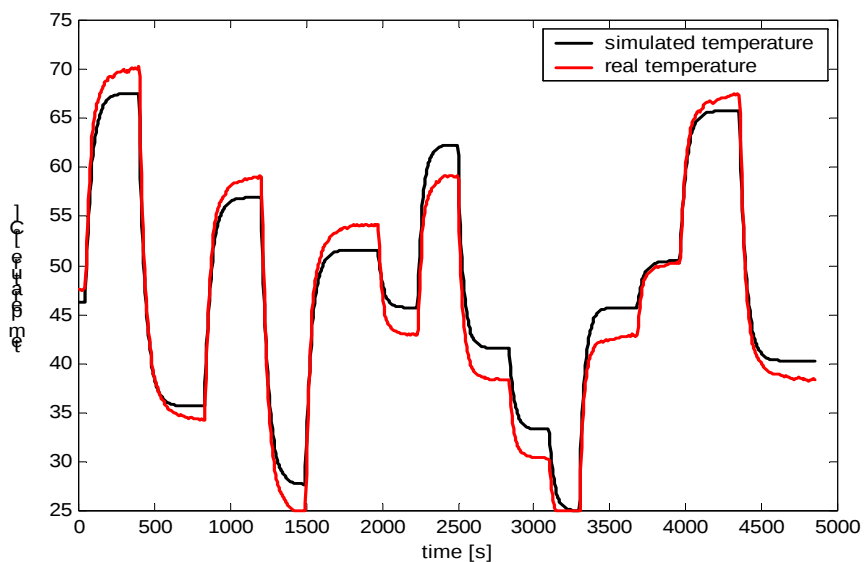
Obr. 6-2 Podrobná schéma matematického modelu

Pri verifikácii matematického modelu musíme vychádzať s takých podmienok, pre ktoré bol daný model odvodený. Pri identifikovaní parametrov prietoku od vstupného signálu bola štandardná odchýlka menej ako jedno percento zo strednej hodnoty (22, 23) a pre zosilnenie bola zostrojená polynomická závislosť druhého stupňa (25). Pri týchto predpokladoch by mal byť teoretický model v súlade s experimentálnymi hodnotami.



Obr. 6-3 Porovnanie simulovaných a experimentálne meraných hodnôt prietoku

Identifikované údaje pre teplotu od signálu pre ohrev mali charakter strednej hodnoty, ktorých štandardná odchýlka bola väčšia ako jedno percento so strednej hodnoty. Výber čísel pre určenie strednej hodnoty závisel od signálu pre ohrev, veľkosti skoku ohrevu, ako aj od prietoku. Za reprezentatívnu oblasť prietokov boli vybrané prietoky pri signáloch 25, 50 a 75 %. Takisto odhadovaná závislosť parametrov od prietoku bola zisťovaná pre tieto tri hodnoty, čo bude mať určité odozvu pri porovnávaní platnosti matematického modelu. Nakoniec treba pripomenúť platnosť matematického modelu teploty po ustálení na prevádzkové hodnoty.



Obr. 6-4 Porovnanie simulovaných a experimentálne meraných hodnôt pre teplotu

Na obrázku 6-4 si všimnime odchýlky, ktoré sa prejavujú symetrickými výchylkami pri kladnom alebo zápornom skoku signálu pre ohrev. Tieto sú dôsledkom strednej hodnoty. Graf na tomto obrázku bol meraný pri hodnote signálu pre prietok 40 % a závislosť teploty od prietoku je dobré si všimnúť v okolí času 3700, kedy sa signál pre motorček zmenil skokom z hodnoty 40 % na 50 %.

7 Návrh riadenia

Pre jednoduchý spojitý systém, ktorý predstavuje zariadenie LTR 700, pripadá najrozumnejšie a najlacnejšie späťoväzbové riadenie s PID regulátorom. Riaditeľné sú dve veličiny prietok a teplota, ktoré vytvárajú tri možnosti riadenia:

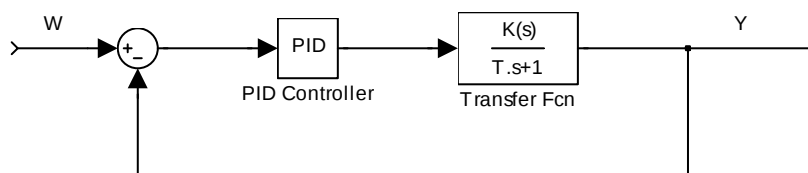
- 1) riadenie prietoku pri neriadenej teplote
- 2) riadenie teploty pri neriadenom prietoku
- 3) riadenie teploty pri riadení prietoku ako poruchovej veličiny

Z hľadiska návrhu riadenia je navhodnejší kombinovaný model riadenia teploty a prietoku, kde kvalitu riadenia môžu overiť rôzne poruchy. Pre riadenie teploty bude prietok pôsobiť ako poruchová veličina a prietok môžeme ovplyvňovať polohou regulačnej klapky.

Hlavným prvkom uzavretého regulačného obvodu je regulátor, kde sa porovnáva meraná veličina so žiadanou a podľa toho sa vyhodnocuje akčný zásah regulátora. Regulátor obsahuje tri členy a to proporcionálny, integračný a derivačný. Spoločným účinkom týchto členov sa dá doceliť žiadaná kvalita regulácie.

Na získanie konštánt regulátora bolo vyvinutých veľa empirických metód. Samotná funkcia regulátora v chápaní algebry prenosov, je vytvoriť úplne inverzný prenos ako je regulovaný proces. Ak pri návrhu regulátora budeme postupovať týmto spôsobom, získame „univerzálne“ parametre regulátora, dané samým prenosom.

Uvažujme uzavretý späťoväzbový systém s PID regulátorom, podľa schémy na obrázku 7-1. Symbol Y znamená riadenú veličinu, symbol W označuje žiadanú hodnotu.



Obr. 7-1 Späťoväzbové riadenie pomocou PID regulátora

Prenos regulátora je podľa [6] na obr. 7-1 opísaný rovnicou

$$R(s) = Z_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (39)$$

Úpravou tohto vzťahu, zavedením substitúcie $P = Z_R$, $I = \frac{Z_R}{T_I}$, $D = Z_R T_D$ získame prenos regulátora v tvare

$$R(s) = P + \frac{I}{s} + Ds \quad (40)$$

Symbole v rovnici (40) označujú proporcionálny (P), integračný (I) a derivačný (D) člen regulátora. Samotný proces opisuje prenos prvého rádu so zosilnením K a časovou konštantou T

$$G(s) = \frac{K}{T s + 1} \quad (41)$$

Výsledný prenos bude mať tvar

$$\frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{G(s) R(s)}{1 + G(s) R(s)} \quad (42)$$

po úprave

$$\frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{K D s^2 + K P s + K I}{(T + K D) s^2 + (K P + 1) s + K I} \quad (43)$$

Uvažujme teraz len proporcionálno–integračný regulátor a derivačný člen položíme rovný nule. Získame vzťah

$$\frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{K P s + K I}{T s^2 + (K P + 1) s + K I} \quad (44)$$

Upravme tento vzťah tak, aby v čitateli zostala jednotka pri s .

$$\frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{s + \frac{I}{P}}{\frac{T}{K P} s^2 + \left(\frac{K P + 1}{K P} \right) s + \frac{I}{P}} \quad (45)$$

Menovateľ v rovnici (45) upravme na súčin dvoch polynómov prvého stupňa, a zároveň zavedieme novú konštantu X .

$$\frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{s + \frac{I}{P}}{(X s + 1) \left(s + \frac{I}{P} \right)} \quad (46)$$

Roznásobením menovateľa rovnice (46) a porovnaním s menovateľom rovnice (45), prideme k záverom, že parametre regulátora budú závisieť od konštanty X .

$$P = \frac{T}{K X} \quad (47)$$

$$I = \frac{1}{K X} \quad (48)$$

Čo vlastne znamená zvoliť si konštantu X ? Pozrime sa na prenos v rovnici (46). Čitateľ a menovateľ môžeme vykrátiť polynómom $(s + \frac{I}{P})$ a získame prenos v tvare

$$\frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{1}{Xs + 1} \quad (49)$$

čo vlastne reprezentuje systém prvého rádu s časovou konštantou X a jednotkovým zosilnením. Optimálnou voľbou časovej konštanty X si môžeme priamo meniť rýchlosť riadeného regulačného obvodu. Zároveň sme redukovali počet hľadaných parametrov pre PI regulátor iba na parameter X .

Hľadanie optimálnej hodnoty časovej konštanty X je spojené hlavne s možnosťami akčného zásahu regulátora. Ak je výstup z regulátora obmedzený v určitom intervale, treba časovú konštantu voliť v rámci tohoto intervalu. To znamená, že nemôžeme voliť X veľmi malé, lebo výstup z regulátora môže kmitať medzi hranicami vstupného signálu, čo je veľmi nežiaduci efekt. Takisto nesmieme zabúdať na voľbu X v oblasti stabilných hodnôt regulačného obvodu.

Pozrime sa, ako bude časová konštantá vplývať na proces druhého rádu. Majme proces druhého rádu, ktorý môžeme napísať v tvare

$$G(s) = \frac{b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + 1} \quad (50)$$

Prenos regulátora bude mať tvar (40) a výsledný prenos regulačného obvodu podľa obr. 7-1 bude mať tvar (42), resp. po úprave

$$\frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{b_0 D s^2 + b_0 P s + b_0 I}{a_2 s^3 + (a_1 + b_0 D) s^2 + (b_0 P + 1) s + b_0 I} \quad (51)$$

Zavedieme substitúciu s konštantou X

$$\frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{b_0 D s^2 + b_0 P s + b_0 I}{(b_0 D s^2 + b_0 P s + b_0 I)(Xs + 1)} \quad (52)$$

Riešením menovateľa v rovnici (52) pre parametre regulátora získame nasledovné hodnoty

$$P = \frac{a_1}{b_0 X} \quad (53)$$

$$I = \frac{1}{b_0 X} \quad (54)$$

$$D = \frac{a_2}{b_0 X} \quad (55)$$

V rovniciach (53), (54), (55) vystupuje parameter X . Ak by sme uvažovali iba PI regulátor bez D člena, tak prenos (52) by sme upravili na tvar

$$\frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{b_0 P s + b_0 I}{(b_0 P s + b_0 I)(X s + 1)^2} \quad (56)$$

Úpravou menovateľa prenosu (56) a porovnaním koeficientov získame parametre regulátora

$$P = \frac{a_2}{b_0 X^2} \quad (57)$$

$$I = \frac{1}{2 b_0 X} \quad (58)$$

pričom parameter X sa redukuje už iba na hodnoty podľa koreňov rovnice $X^2 - 2 a_1 X + 4 a_2 = 0$. Aby sme však mohli použiť PI regulátor, musí platiť pre proces druhého rádu podmienka

$$a_1 \geq 2\sqrt{a_2} \quad (59)$$

Ak bude splená táto podmienka, tak pre X získame buď jeden, alebo dva korene. Pre voľbu X zoberieme menší z koreňov, keďže chceme mať regulačný obvod čo najrýchlejší. Parameter X získame riešením rovnice

$$X = a_1 - \sqrt{a_1^2 - 4 a_2} \quad (60)$$

Návrh regulátora postupom cez voľbu konštanty X bude základom pre vytvorenie regulačnej slučky v prostredí MATLAB – SIMULINK. Za konštanty prenosu sa zoberú priemerné hodnoty prenosov, podľa tabuľky 5-7.

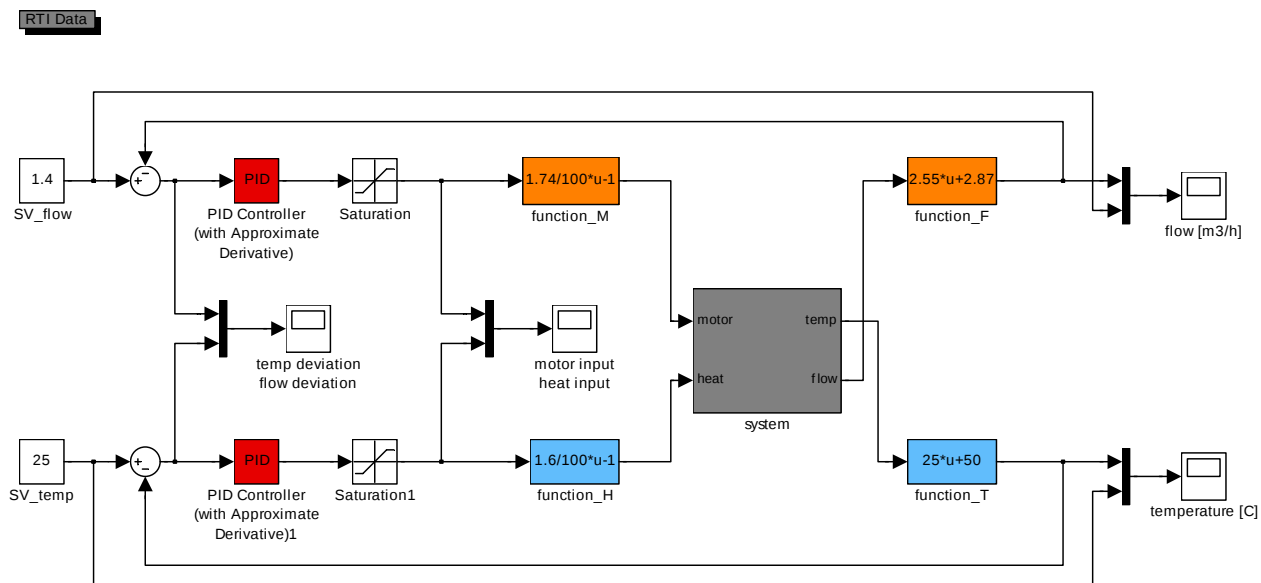
Samotná schéma v MATLABe, ako je vidieť z obr. 7-2, obsahuje dva regulačné obvody. Vstupom do týchto obvodov sú objekty SV (setpoint value). Výstup predstavujú grafy do ktorých vstupuje žiadaná hodnota spolu s riadenou veličinou. Systému zodpovedá objekt so šedým pozadím. Červenou farbou sú označené regulátory, za ktorými sa nachádza blok SATURATION. V tomto bloku sa limituje výstup z regulátora tak, aby neprekročil rozsah 0 až 100 jednotiek. V schéme sa nachádzajú ešte aj prepočtové funkcie (označené modrou a oranžovou farbou) a zodpovedajú im prepočtové vzťahy nasledovne:

$$\text{function_M} \rightarrow \quad (35)$$

$$\text{function_H} \rightarrow \quad (36)$$

$$\text{function_F} \rightarrow \quad (37)$$

$$\text{function_T} \rightarrow \quad (38)$$



Obr. 7-2 Schéma regulačnej slučky pre riadenie prietoku a tepla

Okrem riadiacich a žiadaných hodnôt sa sníma aj regulačná odchýlka, ako aj vstupný signál z regulátora.

Pri návrhu regulátora podľa schémy na obrázku 7-1, neuvažujeme parameter dopravného oneskorenia. Tento jav oneskoruje akčný zásah regulátora práve o hodnotu dopravného oneskorenia. Takisto posúva konštanty regulátora od hranice aperiodicity a môže spôsobiť preregulovanie.

Postup návrhu konštánt regulátora pre riadenie prietoku vyplýval z voľby časovej konštanty X . Za najvhodnejšiu voľbu sa použila hodnota $X = 1$ a získali sa nasledovné konštanty regulátora pre riadenie prietoku.

P	I
14,43	36,34

Tab. 7-1 Konštanty pre regulátor prietoku

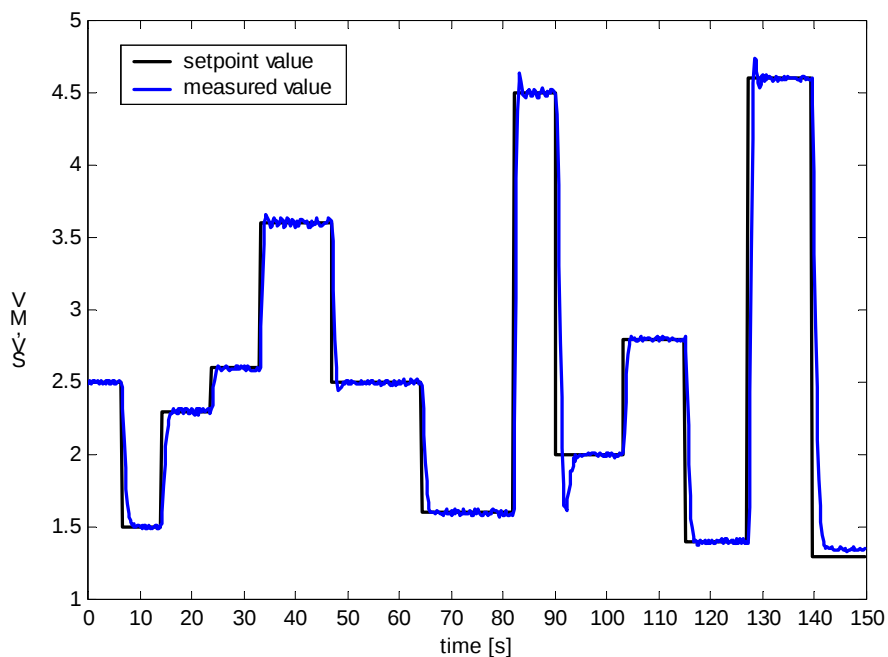
Regulátor pre teplotu navrhnutý podľa postupu z úvodu tejto kapitoly obsahuje časovú konštantu $X = 10$ a hodnoty parametrov regulátora sú uvedené v tabuľke 7-1.

P	I
8,24	0,2

Tab. 7-2 Konštanty pre regulátor teploty

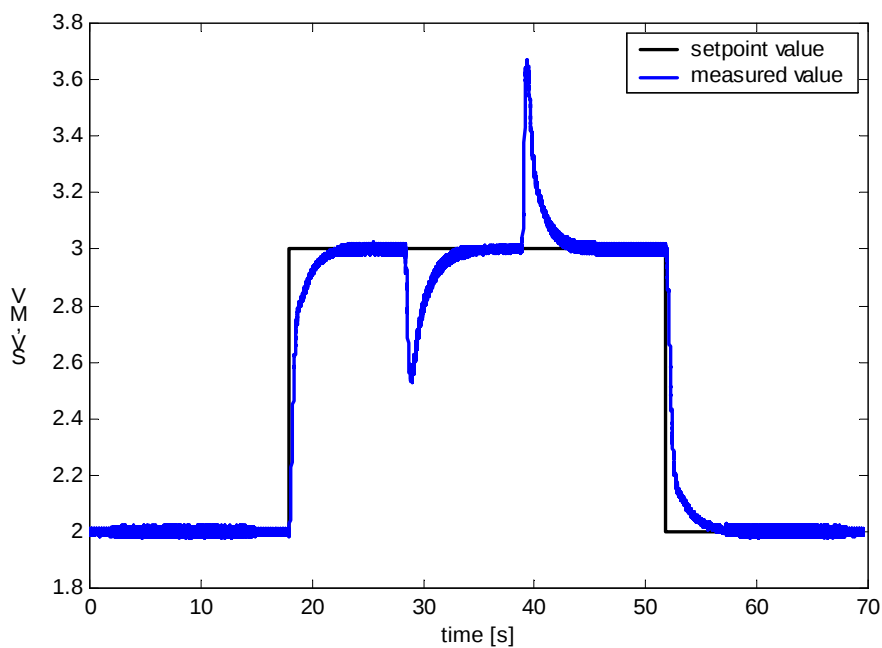
Na obr. 7-3 je zobrazené riadenie prietoku PI regulátorom. Žiadaná hodnota prietoku je zobrazená čiernou, riadená veličina modrou čiarou. Za povšimnutie stojí preregulovanie, ktoré sa vyskytuje pri väčších skokoch žiadanej hodnoty. Spôsobuje to integračný člen regulátora, ktorý generuje výstupný signál aj vtedy, keď sa

dosiahne hranica obmedzujúca výstup z regulátora. Riešením tohto problému by mohlo byť zavedenie beznárazového PI regulátora (anti-wind up), ktorý zabráňuje previnutiu regulátora.



Obr. 7-3 Riadenie prietoku PI regulátorom

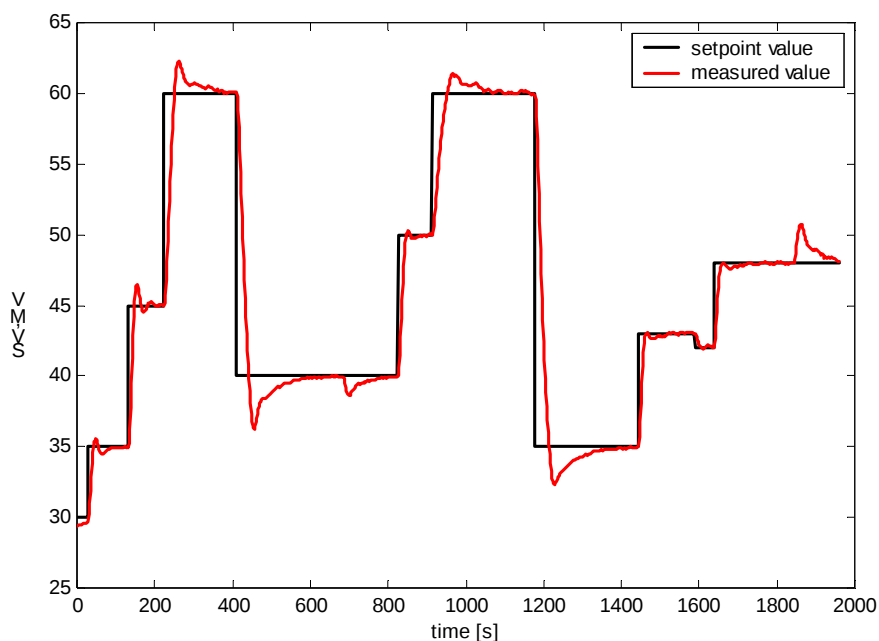
Kvalitu regulácie môžeme posudzovať, vtedy ak ju podrobíme poruchám. Na obrázku 7-4 je znázornená porucha spôsobená regulačnou klapkou. V čase okolo 30 s bola klapka náhle zatvorená a v čase 40 s bola otvorená. Regulácia tieto poruchy odstránila v priebehu 5 sekúnd.



Obr. 7-4 Regulácia s poruchovou veličinou

Riadenie teploty je spojené s riadením prietoku. Prietok pôsobí ako poruchová veličina. Na obr. 7-5 je znázornené riadenie teploty pri dvoch hodnotách prietoku. Riadenie do času ≈ 700 s bolo pri prietoku $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$, po tomto čase sa prietok zmenil na $3 \text{ m}^3/\text{h}$ a v čase ≈ 1900 s sa prietok vrátil na pôvodnú hodnotu. Zmenu prietoku na výslednom zázname riadenia si možno všimnúť ako poruchu, ktorá bola odstránená za čas ≈ 100 s.

Opäť pri riadení sa vyskytuje preregulovanie, ktoré spôsobuje previnutie regulátora. Preregulovanie je však väčšie pri menšom prietoku, pri väčšom prietoku (od času 700 s) už preregulovanie zaniká. Spôsobené je to práve výberom konštant procesu, ktoré boli spriemerované a stredná hodnota sa práve pohybovala v okolí $3 \text{ m}^3/\text{h}$ a teploty 50°C . Previnnutie by sa takisto mohlo odstrániť zavedením beznárazového PI regulátora.

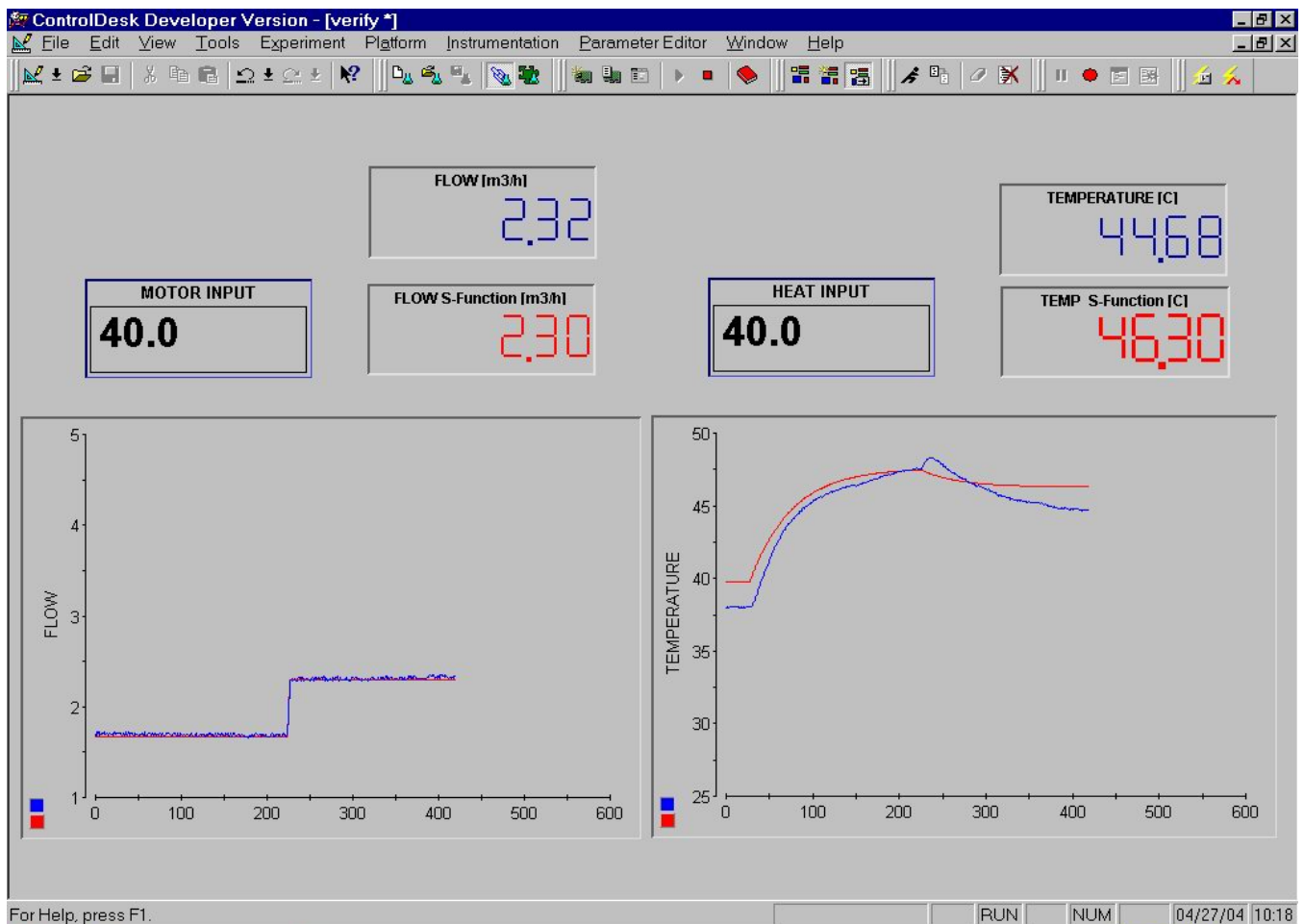


Obr. 7-5 Riadenie teploty s PI regulátorom

8 Vizualizácia

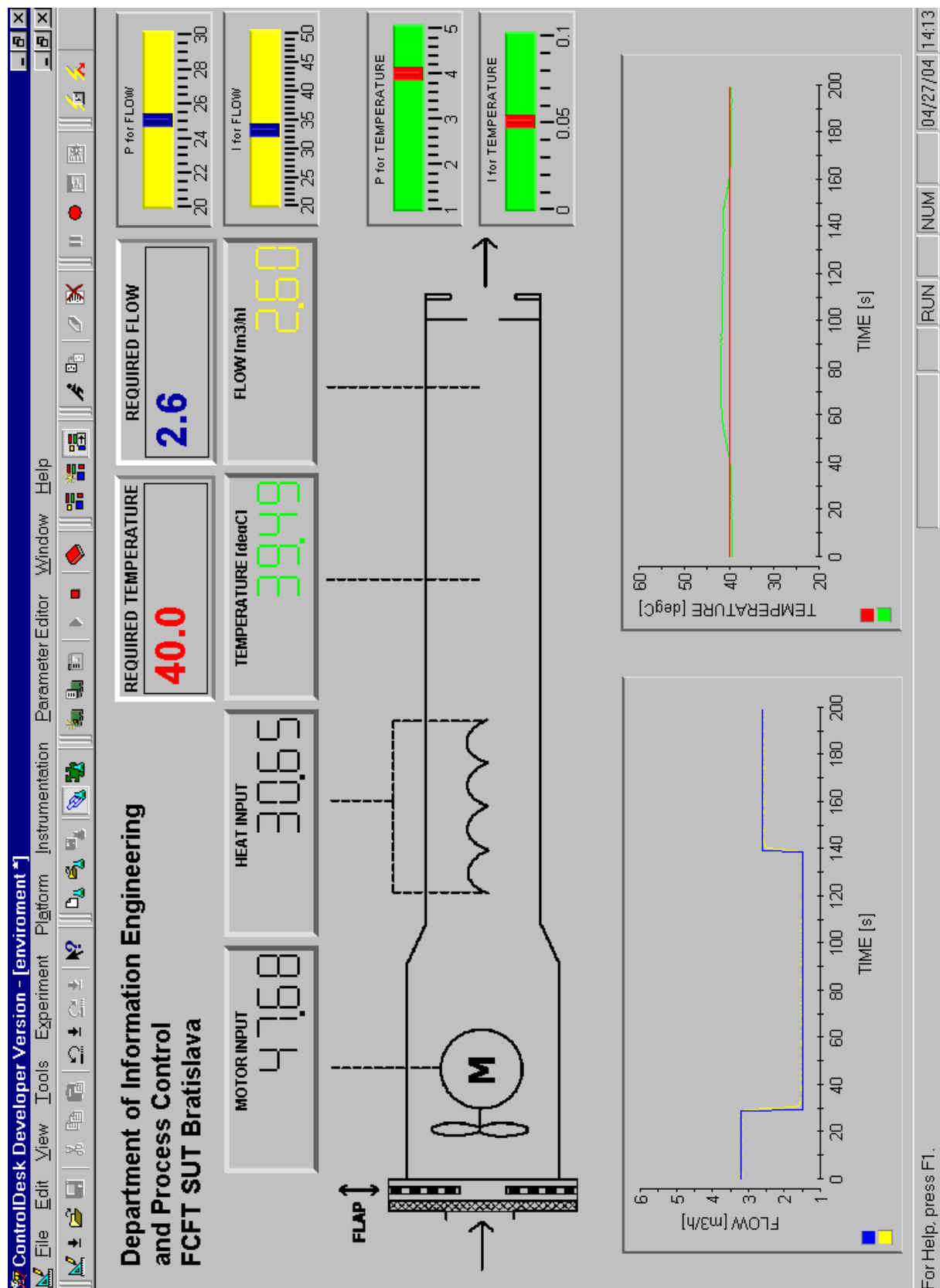
Vizualizačné prostredie je spojené s programom CONTROL DESK, od spoločnosti dSPACE. Založené je na reálnom ovládaní procesu z pohľadu operátora. Vizualizačné prostredie nemusí byť priamo napojené na proces. V tom prípade slúži ako simulátor, ktorý je akousi nadstavbou pre MATLAB. Výhodou tohto softvéru je, že vo vizualizačnom prostredí sa môžu ľahko meniť konštanty regulátora a zároveň tak ovplyvňovať kvalitu riadenia.

Na obrázku 8-1 je znázornené prostredie na verifikáciu matematického modelu, kde výsledky sú porovnávané na grafe ako aj numericky na príslušných displayoch.



Obr. 8-1 Prostredie na verifikáciu matematického modelu

Pri riadení je dôležité vedieť aké sú práve stavové veličiny v systéme. Pri veľkom množstve signálov sa už do vizualizačného prostredia kreslia jednotlivé zariadenia, na ktorých sa merajú stavové veličiny. Príkladom môže byť aj vizualizačné prostredie na obr. 8-2, kde na zariadení LTR 700 sú vyznačené miesta merania veličín. Zároveň sú na obrazovke zobrazené vstupné signály do motorčeka a el. špirály, ktoré sa môžu napr. použiť ako indikátory spustenia alarmu. Na obrazovke sú políčka, na zadávanie žiadanej teploty a prietoku. Prípadne sa kvalita regulácie môže ovplyvniť zmenením konštánt regulátora. Na obrazovke sú znázornené aj časové trendy riadiacej veličiny.



Obr. 8-2 Vizualizačné prostredie na ovládanie zariadenia LTR 700 cez počítač

9 Záver

Zariadenie LTR 700 je jednoduchý systém na demonštráciu dodávky vzduchu v laboratórnych podmienkach. Požiadavka dopravy tekutín je nevyhnutná pre priemysel, takisto ako aj regulácia teploty. Spracovávanie problematiky návrhu riadenia vychádza z matematického modelovania. Základom vytvorenia simulovaného prostredia sú bilancie energie a hmoty a ďalším krokom je transformácia získaných rovníc do programového prostredia. Získané rovnice pre daný proces sú nelineárne a pri riešení týchto rovníc sa používajú numerické metódy. Simulácia v počítačovom prostredí je založená na programe **sfen2.c**, ktorá je uvedená na strane 25. Pri výsledkoch získaných v kapitole 6 si môžeme všimnúť pre aké podmienky je daný matematický model platný. Matematický model vychádza s ustáleného stavu. Získané závislosti opisujú daný proces aj v širšom intervale, ale samotný návrh riadenia vychádza so stredných hodnôt, ktoré sa pohybujú zhruba v okolí $3\text{m}^3/\text{h}$ a $50\text{ }^\circ\text{C}$. Výsledky matematického modelovania sú doplnené experimentálnymi meraniami a verifikácia matematického modelu je uvedená na stránkach 28 a 29.

Identifikácia odhalila, že proces je opísateľný obyčajnými diferenciálnymi rovnicami až po dosiahnutí ustáleného stavu. Predpokladom pre identifikáciu boli získané rovnice, ktoré charakterizovali systém ako proces prvého rádu s dopravným oneskorením. Na tomto predpoklade bola naprogramovaná funkcia **pch**, ktorá je uvedená na strane 16. Identifikované údaje sú zhrnuté v tabuľkách 5-1, 5-2, 5-3. Tieto údaje poslúžili na získanie závislostí pre zosilnenie a časové konštanty procesu (25), (26), (27), (28).

Riadenie v okolí ustáleného stavu sa testuje poruchami. Poruchy môžu byť náhodné a regulácia si musí s nimi poradiť. Výhodou práce so zariadením LTR 700 je možnosť ovplyvňovať proces poruchami. Regulácia pozostáva z dvoch obvodov: pre riadenie prietoku a riadenie teploty. Obidva obvody na seba vplyvajú ako poruchové veličiny. Návrh regulácie vychádzal so vzájomného ovplyvňovania týmito veličinami. Výsledky riadenia zhŕňajú obrázky 7-3 a 7-5. Pri návrhu regulátora sa využíva základná vlastnosť regulátora, a to pôsobiť ako inverzný proces na dosiahnutie požadovanej regulácie. Proces syntézy regulátora je uvedený v kapitole 7, kde parametre regulátora závisia len od jedného zvoleného parametra a to časovej konštanty procesu prvého rádu s jednotkovým zosilnením. Pri použití tejto metódy je však uvedený typ regulátora ovplyvnený obmedzeniami na výstupe, a preto pri výsledkoch riadenia je pozorovať preregulovanie.

Požiadavka vizualizácie je pri riadení nevyhnutnou ako samotné merania. Umožňuje užívateľovi sledovať celý proces on-line a rozhodovať sa podľa situácie. Preto aj zariadenie LTR 700 má svoje počítačové prostredie, vytvorené v prostredí softvéru dSPACE. Nachádzajú sa tu všetky merania, vstupné a výstupné signály s časovými trendami. Vo vizualizačnom prostredí sa nachádzajú aj políčka s konštantami regulátora, na rozdiel od klasického užívateľského prostredia. Konštanty regulátora, ich rozsah a hodnoty sa môžu a priamo nimi ovplyvňovať proces. Riadenie a problematika výberu regulátora bola spracovaná podľa literatúry [5], [6]. Uvedený proces je vhodný na testovanie viacerých metód návrhu regulátora.

10 Zoznam použitých symbolov

<i>symbol</i>	<i>názov veličiny</i>	<i>jednotka</i>
$\dot{V}_M$	objemový tok cez miešadlo	$m^3 s^{-1}$
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	$m^3 s^{-1}$
m	hmotnosť	kg
c_p	špecifická tepelná kapacita	$J kg^{-1} K$
T	teplota	K
W_{el}	elektrický výkon	W
α	súčiniteľ prestupu tepla	$W m^{-2} K$
F	plocha	m^2
K	zosilnenie	bezrozmerné
D	dopravné oneskorenie	s
T	časová konštanta	s
T_u	čas prietahu	s
T_n	čas nábehu	s
Z_R	zosilnenie regulátora	bezrozmerné
T_D	derivačná konštanta regulátora	s
T_I	integračná konštanta regulátora	s^{-1}

11 Literatúra

- [1] M. Bafnec, V. Bálež, I. Langfelder, J. Longauer
Chemické inžinierstvo I
MALÉ CENTRUM 1999
- [2] Jaroslav Rákoš
Elektrické teplo a elektrické pece
Hutnícka fakulta, TU Košice 2000
- [3] Pavel Novák
Základy teórie elektrických ohrevov / Elektrické teplo
Ostravské tiskárny, Ostrava, 1991
- [4] M. Fikar, M. Bakošová, M. Karšaiová, J. Matko, A. Vasičkaninová, D. Lázničková
Metódy počítačového spracovania dát
STU, Bratislava, 1999
- [5] Jozef Petrovič, Ján Ivanič
Automatizácia v priemysle – riadenie
ALFA Bratislava, 1988
- [6] M. Bakošová, Ľ. Čirka, M. Fikar
Základy automatizácie
STU, Bratislava, 2002