

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKEJ A POTRAVINÁSKEJ TECHNOLOGIE
STU V BRATISLAVE**

Katedra: **informatizácie a riadenia procesov**

Číslo: 5/2004

Vec: **Zadanie semestrálneho projektu na ukončenie bakalárskeho štúdia**

Meno a priezvisko študenta: **Ľubomír Šály**

Meno a priezvisko vedúceho: **Doc. Ing. Monika Bakošová, CSc.**

Názov projektu:

Riadenie laboratórneho výmenníka tepla

Termín odovzdania: **22. mája 2004**

Bratislava **16. februára 2004**

Doc. Dr. Ing. Miroslav Fikar
vedúci katedry

ÚVOD

Riadenie priemyselných procesov naráža na mnohé problémy. V chemickom priemysle ide najmä o problémy súvisiace so silnou nelineárnosťou riadených procesov, ich citlivosťou na poruchy, neznalosťou exaktných matematických modelov alebo niektorých ich parametrov.

Koncepcia λ - sledovania je jednou z koncepcií riadenia s veľkým zosilnením. Regulátor navrhnutý metódou λ – sledovania je jednoduchý adaptívny regulátor. Jeho syntéza je univerzálna v tom zmysle, že nevyžaduje znalosť modelu procesu, ani špeciálne merania na procese, stačí merať výstupné veličiny. Pri syntéze λ – regulátora sa nepoužíva žiadna identifikačná procedúra. Koncepcia λ – sledovania je založená na tom, že výstup sa neriadi na žiadanú veličinu, ale do okolia žiadanej veličiny, tzv. λ – okolia.

V tejto práci by som chcel poukázať na vhodnosť použitia adaptívneho λ – sledovania na reálnom laboratórnom zariadení. Neoddeliteľnou súčasťou laboratórnych experimentov sú riadiace systémy. Systém dSPACE patrí medzi takéto riadiace systémy. Umožňuje realizáciu kompletného riadenia procesov výroby, spolupracuje s prostredím MATLAB – Simulink. Riadiaca doska je navrhnutá pre realizáciu vysokorýchlostných digitálnych regulátorov a simulácií v reálnom čase. Prostredníctvom systému dSPACE sa zabezpečuje komunikácia medzi laboratórnym zariadením LTR700, ktoré slúži ako teplovzdušný výmenník tepla – vzduchový fén, a počítačom, čo umožňuje užívateľovi v programovom prostredí MATLAB – Simulink ovládať zariadenie a spracovávať dáta.

1. OPIS ZARIADENIA PRE REALIZÁCIU λ – sledovania

1.1 Laboratórne zariadenie LTR700

Laboratórne zariadenie LTR700, ktoré je teplovzdušným výmenníkom tepla, zabezpečuje dodávanie vzduchu o žiadanom prietoku a teplote. Pomocou neho možno overovať rozmanité algoritmy riadenia reálneho procesu. V prípade potreby je možné prepnúť ho aj na manuálne riadenie.

LTR700 sa skladá z dvoch základných častí:

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

1.2. Ovládacie komponenty mechanickej zostavy

Skoková funkcia prietoku vzduchu sa inicializuje pomocou regulačnej klapky. Klapka je priamo prepojená s pákou, ktorá je pomocou magnetu udržiavaná vo vertikálnej polohe. V tejto pozícii je minimálny prietok vzduchu. Pohyb páky do horizontálnej polohy vedie k otvoreniu klapky, čo spôsobí maximálny prietok vzduchu. Táto páka sa ovláda manuálne.

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

2. MATEMATICKÝ MODEL PRIADENÉHO PROCESU

2.1 Možnosti riadenia a merateľné signály

Laboratórne zariadenie LTR700 má dva merateľné výstupné signály (teplota, prietok vzduchu), dva vstupné riadiace signály (otáčky ventilátora, ohrev) a tri vstupné poruchové signály (chod ohrevu, regulačnú klapku a teplotu okolia). Práve preto sa používa na odskúšanie dynamických vlastností riadiaceho systému, pričom teplota a prietok vzduchu sú riadené veličiny, pri rôznych štruktúrach riadenia.

Jednoduché riadiace obvody

- riadenie prietoku otáčkami ventilátora pri neriadenej teplote
- riadenie teploty ohrevom pri neregulovanom prietoku vzduchu
- riadenie teploty otáčkami ventilátora pri neregulovanom ohreve

Kaskádové riadiace obvody

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

Metódu λ – sledovania som testoval pomocou jednoduchých riadiacich obvodov.

2.2 Identifikácia modelu

Najčastejšie používaným vstupným signálom pre 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 nutné, aby bol skúmaný systém v ustálenom stave. Časový priebeh výstupnej veličiny, ktorý je odozvou na skokovú zmenu jednej zo vstupných veličín, voláme reálnou prechodovou charakteristikou. Z prechodovej charakteristiky možno vypočítať zosilnenie a prenos systému.

$$Z = \frac{y_{\infty} - y_0}{u_{\infty} - u_0} \quad (1.1)$$

a prenos

$$G(s) = \frac{Z}{T_s + 1} \quad (1.2)$$

kde $T = t_1 - t_0$

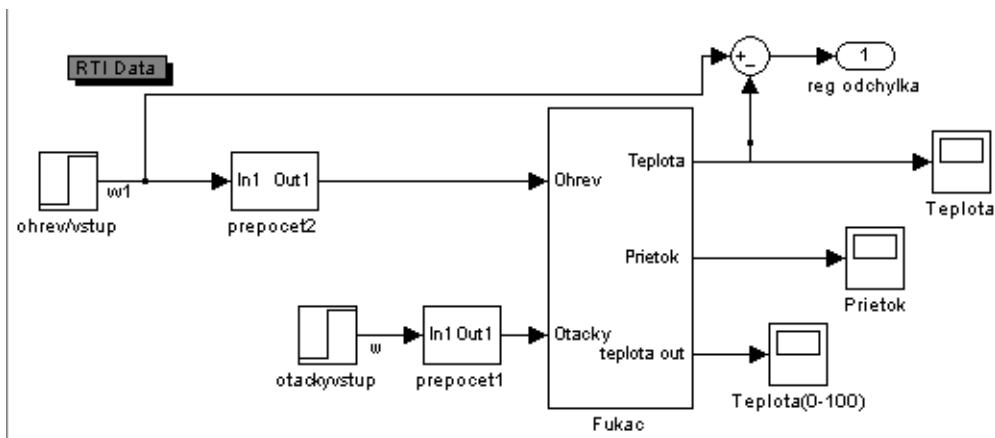
2.3 Vypracovanie modelov reálnych procesov v Simulinku a porovnanie modelov s reálnym procesom

Matematický model reálneho procesu potrebujem na simulačné overenie λ - regulátorov a pre návrh proporcionálnych regulátorov.

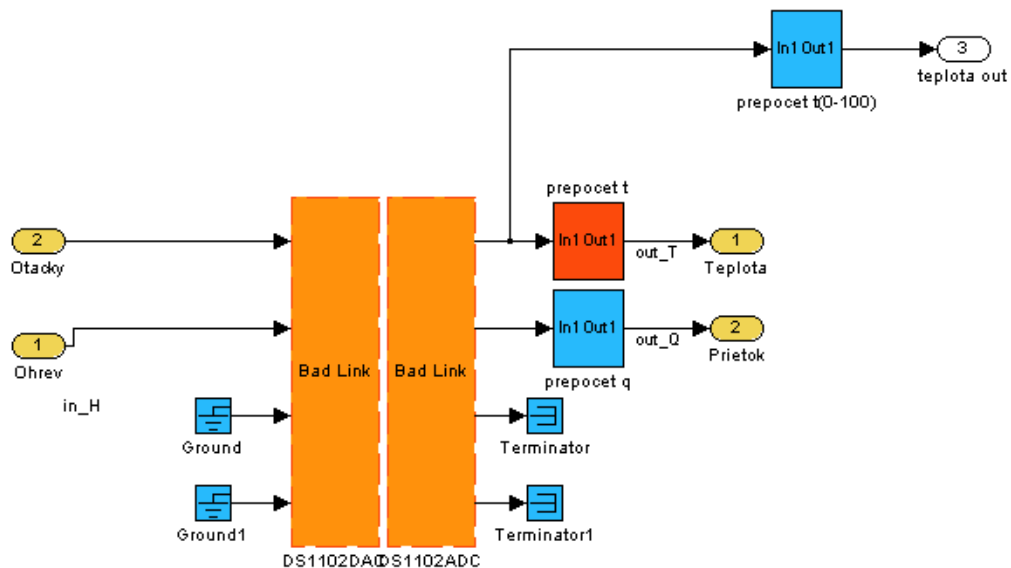
2.3.1 Odozva teploty na skokovú zmenu ohrevu

Podľa blokovej schémy na obrázku 1 bol vytvorený model daného procesu v prostredí Simulinku.

Najvhodnejší spôsob, ako porovnať model procesu so samotným reálnym procesom je porovnanie ich prechodových charakteristík pri rovnakých podmienkach.

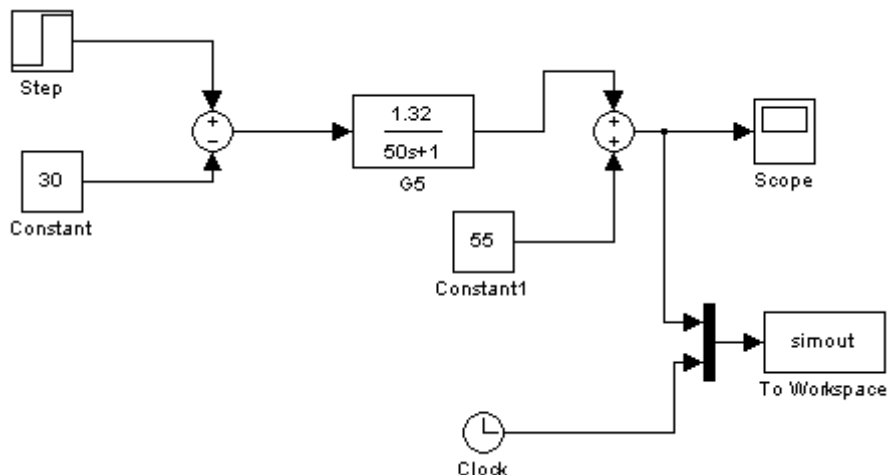


Obr.1 Bloková schéma na meranie prechodovej charakteristiky ako odozvy systému na ohrev v reálnom procese.



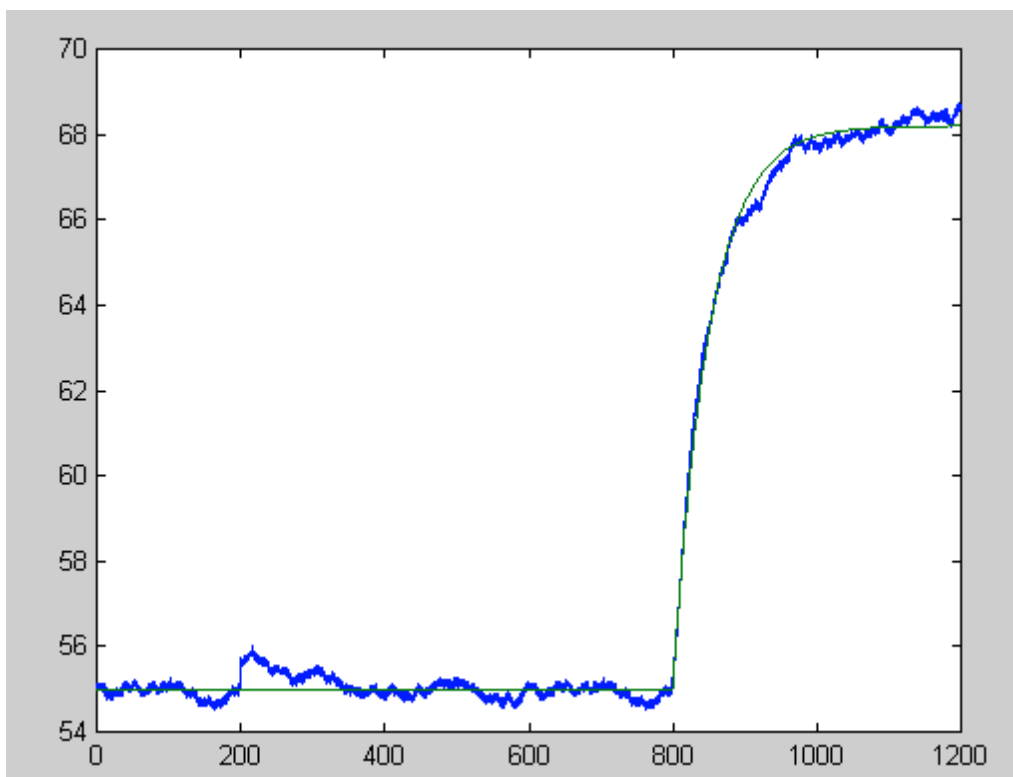
Obr.2 Simulinková schéma bloku „fukac“ na meranie prechodovej charakteristiky v reálnom procese

Obrázok 2 znázorňuje schému bloku „Fukac“, ktorá sa nachádza v bloku Subsystem modelu reálneho procesu.



Obr.3 Bloková schéma na simuláciu prechodovej charakteristiky v prostredí Simulink.

Prechodové charakteristiky boli získané pri teplote laboratória 21 °C a skokovej zmene ohrevu z 30% na 40% v čase 800s, pričom otáčky ventilátora boli nastavené na 20% výkonu, regulačná klapka bola otvorená a ohrev bol v polohe 1, t.j. zapnutý.



Obr.4 Porovnanie prechodových charakteristík simulovaný model – zelená čiara, reálny proces – modrá čiara

Na obrázku číslo 4 sú porovnané prechodové charakteristiky získané simuláciou v Simulinku pomocou modelu vytvoreného podľa obrázku 3 (zelená čiara) a realizáciou reálneho procesu (modrá čiara).

Ako sa dá vidieť, priebehy prechodových charakteristík na obrázku číslo 4 sú podobné, a teda matematický model možno použiť na návrh proporcionálneho regulátora.

3. RIADENIE REÁLNEHO PROCESU P – REGULÁTOROM A λ - REGULÁTOROM

3.1 Návrh klasického P – regulátora

Regulátor je časť regulačného obvodu, v ktorej sa porovnáva skutočná hodnota meranej veličiny so žiadanou hodnotou a v závislosti od ich rozdielu, t.j. v závislosti od regulačnej odchýlky, pôsobí akčným členom na regulovanú sústavu tak, aby regulačná odchýlka bola minimálna. Regulačný proces a kvalita regulácie závisí predovšetkým od vlastností regulovanej sústavy. Pretože vo väčšine prípadov dynamické vlastnosti regulovanej sústavy nemožno meniť, regulátor musí mať možnosť prispôbovania pre rôzne typy regulovaných sústav.

Podľa pôsobenia regulátorov na regulovanú sústavu možno regulátory rozdeliť na spojité a nespojité.

Pod pojmom spojitý regulátor rozumieme regulátor, pri ktorom sa všetky vstupné a výstupné veličiny menia v závislosti od času spojito. Najjednoduchším spojitým regulátorom je proporcionálny regulátor. Proporcionálnym regulátorom alebo P – regulátorom sa nazýva regulátor, pri ktorom okamžitá hodnota akčnej veličiny je priamo úmerná hodnote regulačnej odchýlky. Matematický opis akčnej veličiny je:

$$u_p(t) = Z_R \cdot e(t) \quad (1.3)$$

kde Z_R je proporcionálne zosilnenie. Prenos P – člena je:

$$G_R(s) = \frac{U_P(s)}{E(s)} = Z_R \quad (1.4)$$

Charakteristickou vlastnosťou P – regulátora je, že pri regulácii zanecháva tzv. trvalú regulačnú odchýlku, ktorá je definovaná ako:

Charakteristickou vlastnosťou P – regulátora je, že pri regulácii zanecháva tzv. trvalú regulačnú odchýlku, ktorá je definovaná ako:

$$e = \lim_{s \rightarrow \infty} [w(t) - y(t)] \quad (1.5)$$

kde $w(t)$ označuje žiadanú hodnotu.

Snažil som sa získať jednotlivé hodnoty zosilnení Z_R tak, aby trvalá regulačná odchýlka bola menšia ako požadovaná hodnota. Využil som na výpočet vzťah (1.5) a požiadavka v trvalej regulačnej odchýlke viedla k požiadavke na hodnotu $y(\infty)$. Tá sa pre uzavretý regulačný obvod s prenosom a regulátorom pri úlohe sledovania dá určiť zo vzťahu (1.6), kde neznámou je Z_R , ktoré sa získa riešením nerovnosti. Postup je názorne ukázaný v nasledujúcom príklade.

$$y(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{G_P \cdot G_R}{1 + G_P \cdot G_R} \quad (1.6)$$

kde G_P je prenos procesu

G_R je prenos regulátora, v tomto prípade $G_R = Z_R$

W je žiadaná hodnota výstupnej veličiny

Príklad:

Pri riadení teploty na výstupe ohrevom bola požadovaná maximálna regulačná odchýlka $0,5^{\circ}\text{C}$ a žiadaná hodnota 5.

$$e = w(\infty) - y(\infty), e(\infty) < 0.5$$

$$w(\infty) - y(\infty) < 0.5$$

$$5 - y(\infty) < 0.5$$

$$y(\infty) > 4.5$$

a teda

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \frac{G_P \cdot G_R}{1 + G_P \cdot G_R} \frac{W}{s} > 4.5$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{1.32 Z_R \cdot 5}{1 + 1.32 Z_R} > 4.5$$

$$\frac{1.32 Z_R \cdot 5}{1 + 1.32 Z_R} > 4.5$$

$$4.5 + 5.94 Z_R < 6.6 Z_R$$

$$Z_R > 6.82$$

Týmto spôsobom som vypočítal hodnoty zosilnenia P – regulátora pre úlohy riadenia teploty vzduchu ohrevom.

Všeobecne platí, že uzavretý regulačný obvod je tým stabilnejší, čím menšie je zosilnenie regulátora, pričom hodnota trvalej regulačnej odchýlky je väčšia. Opačne, pri väčšom zosilnení je trvalá regulačná odchýlka menšia. Avšak v tomto prípade sa uzavretý regulačný obvod môže dostať na hranicu stability, alebo sa môže stať nestabilným. Úlohu riadenia reálneho procesu som riadil pomocou P – regulátora a pomocou λ – regulátora. Všetky nastaviteľné hodnoty konštánt a skokových zmien boli rovnaké.

3.2 Metóda adaptívneho λ - sledovania

3.2.1 Metóda adaptívneho λ – sledovania pre SISO systémy

Problémy riadenia SISO systémov, t.j. systémov s jednou vstupnou a jednou výstupnou veličinou, sa dajú zhruba rozdeliť do dvoch kategórií. Do prvej kategórie patria problémy riadenia vyžadujúce zložité regulátory pre splnenie požadovaných zložitých úloh riadenia. Patria sem napríklad problémy riadenia procesov s náročnými požiadavkami na dosahovanú kvalitu riadenia. Odhaduje sa že do prvej kategórie patrí menej ako 5% všetkých problémov riadenia priemyselných procesov. Druhú kategóriu problémov riadenia priemyselných procesov, tzv. klasických problémov riadenia, charakterizuje skutočnosť, že jednoduché regulátory, P, PI – alebo PID – regulátory, sú postačujúce na dosiahnutie požadovanej kvality riadenia. Do tejto triedy patria hlavne regulátory výšky hladiny, prietoku a niekedy aj teploty. Hlavným cieľom je zväčša stabilizácia procesu a riadenie na žiadanú hodnotu. V prevádzkach sa v takýchto prípadoch veľmi často vyskytujú stovky uzavretých slučiek regulačného obvodu, a to aj pri riadení relatívne jednoduchých zariadení.

Metódy návrhu zložitých algoritmov riadenia a regulátorov sa sústreďujú v prvej kategórii problémov riadenia. V tomto prípade je obvyčajne samotný návrh riadenia založený na vhodnom modeli procesu a vysokom stupni teoretickej expertízy riadenia. Súčasne je potrebné na návrh a realizáciu týchto typov regulátorov urobiť experiment. Realizácia týchto spätnoväzbových stratégií je často veľmi komplikovaná, čo vyžaduje drahé programové i technické zabezpečenie, ako i veľké náklady na obsluhu. Tieto skutočnosti z finančného hľadiska výrazne limitujú počet slučiek riadenia.

Pre druhý typ problémov riadenia nemusí byť k dispozícii žiadny model procesu a odhad parametrov regulátorov robia inžinieri pomocou nastavovacích pravidiel a experimentov. Pri zmenách prevádzkových podmienok alebo pri zmenách častí zariadení potrebujú regulátory opätovné vyladenie, pretože kvalita riadenia môže byť

nevyhovujúca a zle nastavené parametre regulátora môžu spôsobiť nestabilitu systému riadenia. Rozhodne tu nie je záruka, že uzavretý obvod riadenia bude stabilný, preto sa pri nastavovaní parametrov regulátora vychádza zo skúseností získaných pri experimentoch na riadenom procese, alebo získaných pri riešení podobných problémov riadenia.

Adaptívny λ – regulátor kombinuje jednoduchý návrh a realizáciu riadenia s novými teoretickými metódami riešenia, ktoré môžu zaručiť stabilitu a kvalitu robustným spôsobom. Táto kombinácia spôsobuje, že metóda riadenia je obzvlášť vhodná pre druhú kategóriu priemyselných problémov riadenia.

Koncepcia λ – sledovania sa líši len trochu od klasickej definície sledovania. Výstup nie je už viac riadený na žiadanú hodnotu $w(t)$, ale od λ – okolia konštantnej žiadanej veličiny alebo trajektórie žiadanej veličiny. $\lambda > 0$ je ľubovoľne malá, ale pevne stanovená povolená trvalá regulačná odchýlka.

Má nasledovné výhody:

- Žiadaný cieľ riadenia sa dosiahne pomocou veľmi jednoduchej štruktúry adaptívneho riadenia.
- Použitie λ – sledovania je veľmi robustné pre širokú triedu nelineárnych procesov.
- Nie je potrebný žiadny model procesu.
- Nie je potrebné preladovanie parametrov regulátora pri zmene pracovných podmienok.

Adaptívny λ – regulátor je v podstate jednoduchý P – regulátor s časovopremenným zosilnením $k(t)$. Jeho zákon riadenia má tvar:

$$u(t) = \beta \cdot k(t) [w(t) - y(t)] + \delta \quad (1.7)$$

$$\frac{dk(t)}{dt} = \begin{cases} \gamma \cdot (w(t) - y(t))^2, & \text{ak } |w(t) - y(t)| \geq \lambda \\ 0, & \text{ak } |w(t) - y(t)| < \lambda \end{cases} \quad (1.8)$$

Zosilnenie $k(t)$ je striktne monotónne rastúce dovtedy, kým je rozdiel medzi žiadanou veličinou $w(t)$ a výstupom $y(t)$ väčší ako dané λ . Ak tento rozdiel vstúpi do žiadaného λ – okolia, adaptácia sa vypína a zosilnenie $k(t)$ zostáva konštantné.

Parameter β nadobúda hodnotu plus jeden, ak je zosilnenie riadeného systému kladné, alebo mínus jeden, ak je zosilnenie systému záporné.

Pomocou nastavovaných parametrov λ , β , γ a δ sa upravuje spätná väzba pre konkrétnu aplikáciu. Parameter λ jasne súvisí so žiadanou kvalitou v tom, že špecifikuje maximálnu dovolenú odchýlku od žiadanej hodnoty. Parameter γ nastavuje rýchlosť adaptácie a je vhodné voliť ho približne ako prevrátenú hodnotu zosilnenia riadeného systému. Parameter δ , ako vyplýva zo zákona riadenia, predstavuje vstupnú hodnotu akčnej veličiny v ustálenom stave v hlavnom operačnom bode.

3.2.2 Teoretické základy metódy spojitého adaptívneho λ - sledovania

Teoretické základy metódy spojitého adaptívneho λ – sledovania sú detailne rozpracované v [3.2].

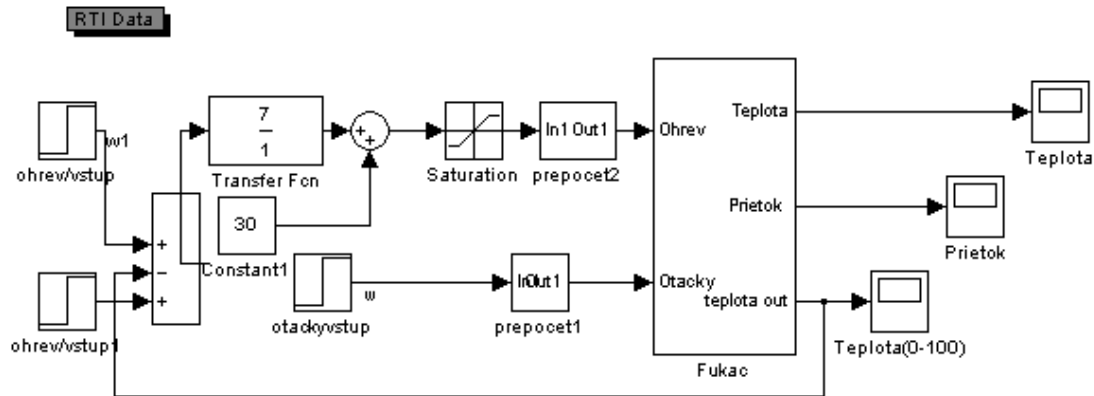
Predpokladáme, že nelineárny SISO systém sa dá opísať nasledovne:

$$\begin{aligned}\frac{dy}{dt} &= f(y, z) + g(y, z).u \\ z &= h(y, z)\end{aligned}\quad (1.9)$$

pričom platí $z \in R^{n-1}$, $u \in R$, $y \in R$, u je akčná veličina a y je meraný a riadený výstup. Rozmer vektora stavových veličín n nemusíme poznať a nepotrebuje žiadne špeciálne predpoklady platné pre rovnovážny stav. Ten sa získa riešením rovnice (1.9) za predpokladu, že $dy/dt=0$.

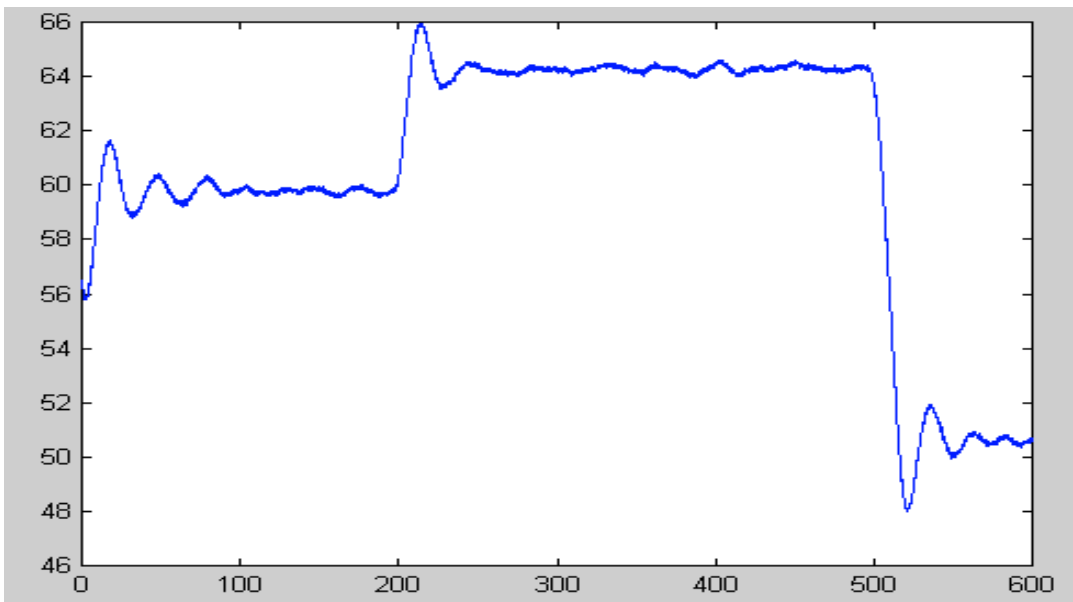
3.2 Riadenie teploty ohrevom

Pri riadení teploty vzduchu ohrevom pomocou P – regulátora je žiadanou veličinou teplota vzduchu, ktorej skoková zmena nastala v čase 200s zo 60 °C na 65 °C a v čase 500s zo 65 °C na 50 °C. Povolená regulačná odchýlka je 0,5 °C.



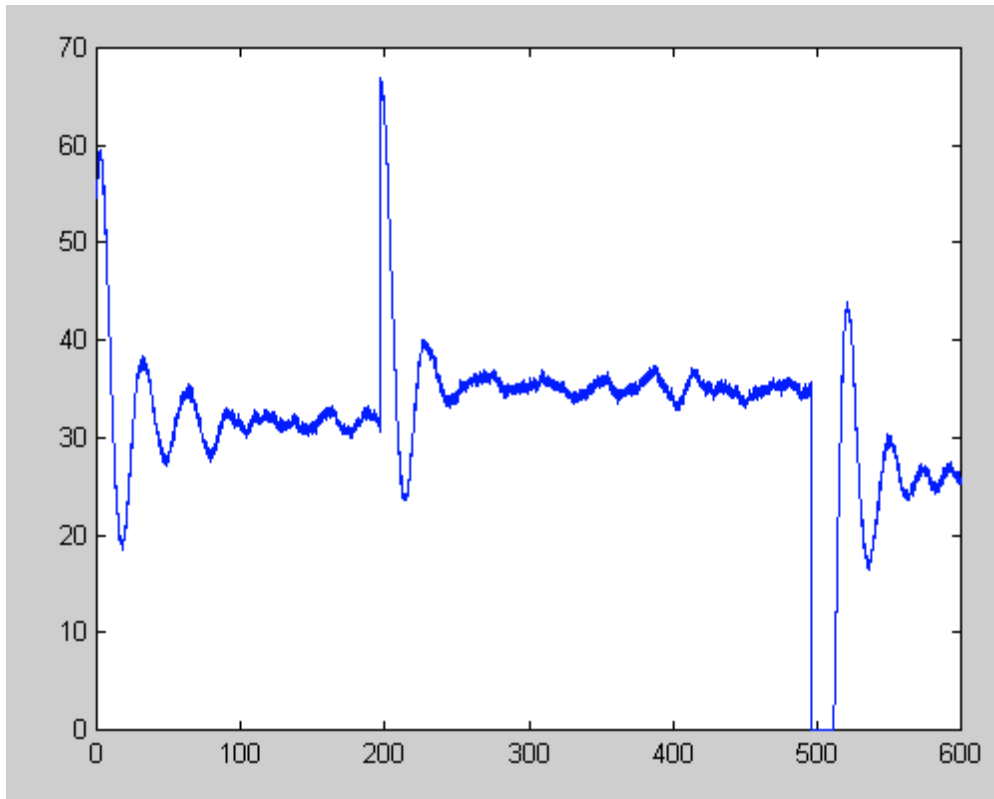
Obr. 5 Bloková schéma reálneho procesu pre riadenie teploty pomocou P – regulátora.

Grafické znázornenie regulácie riadenej veličiny teploty pomocou P – regulátora je na obrázku číslo 5, ktorou je teplota vzduchu. Žiadaná maximálna regulačná odchýlka je 0.5 °C.



Obr. 6 Priebeh regulácie reálneho procesu pomocou P – regulátora.

P – regulátor nedokázal uradiť λ – okolie v reálnom procese. Na obrázku 7 je zaznamenaná reakcia regulátora na skokové zmeny.

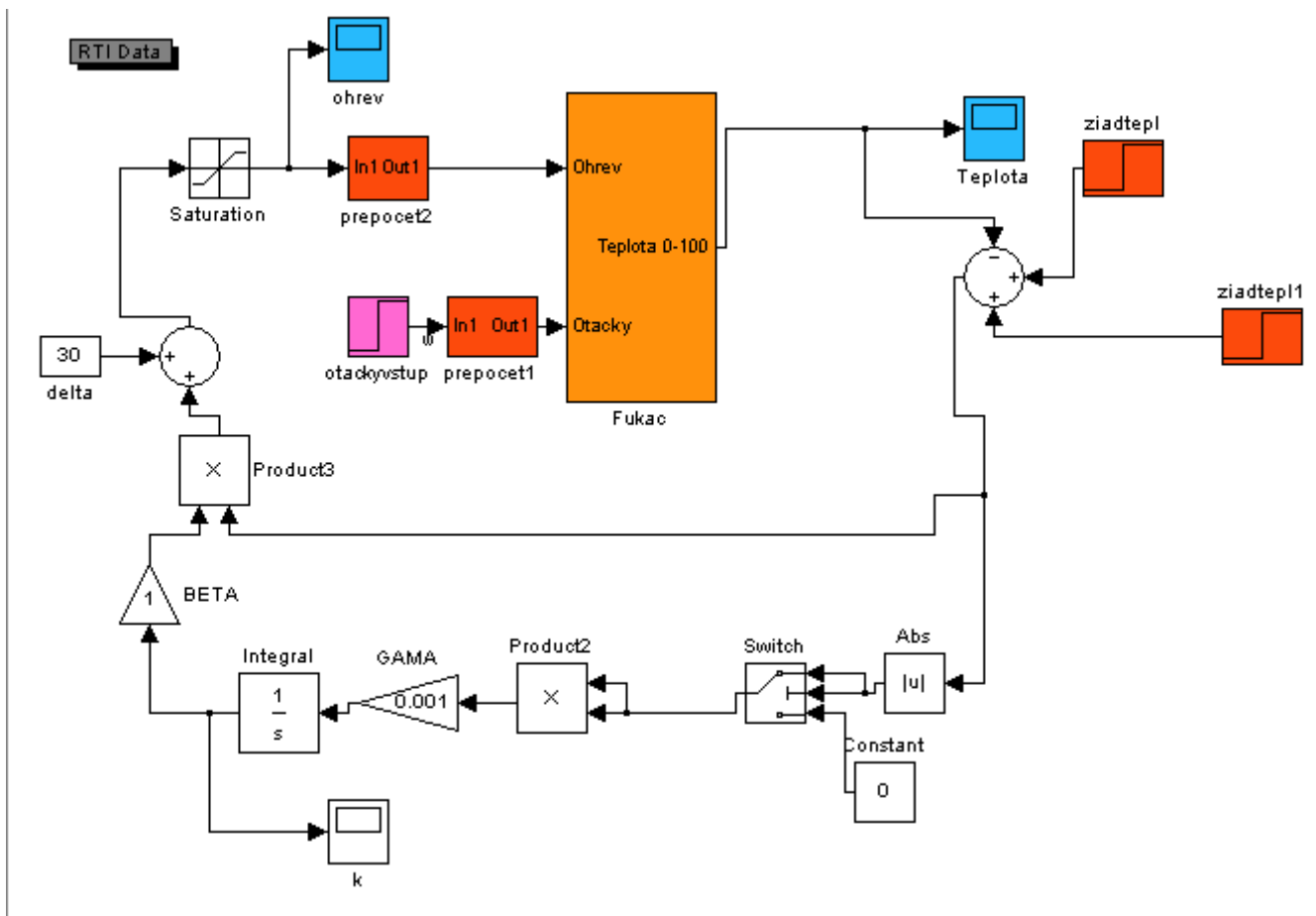


Obr.7 Graf znázorňujúci reakciu regulátora na skokovú zmenu.

Ako možno z grafu vidieť v čase 200s sme mali prvú skokovú zmenu kedy sa teplota menila zo 60 °C na 65 °C a druhýkrát v čase 500s kedy sa teplota menila zo 65 °C na 50 °C.

Pri riadení tohto systému pomocou λ – regulátora boli nastavené tie isté podmienky pre reguláciu, t.j. skoková zmena žiadanej veličiny nastala v čase 200s zo 60 °C na 65 °C a v čase 500s zo 65 °C na 50 °C. λ – okolie bolo zadané v hodnote 0.5 °C, koeficient γ

mal hodnotu 0,001.

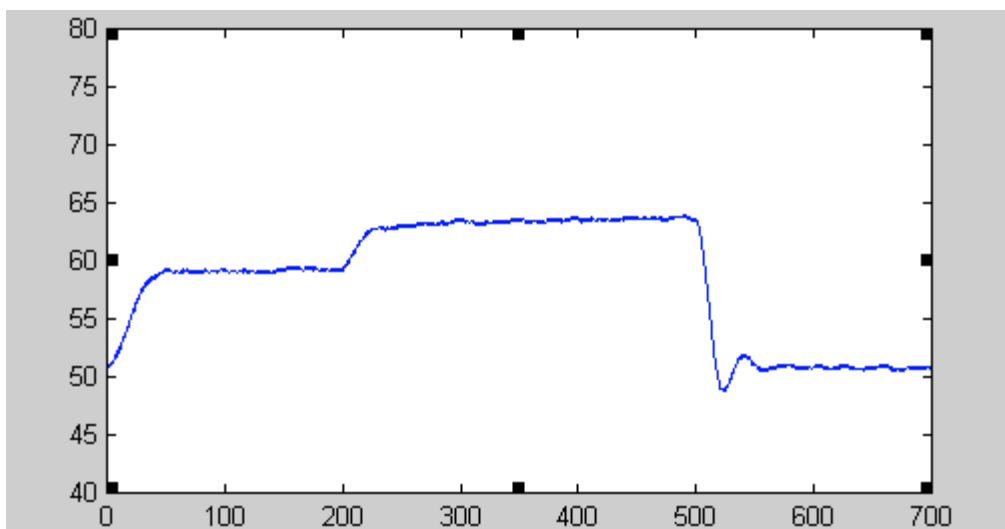


Obr. 8 Bloková schéma na riadenie teploty vzduchu ohrevom pomocou λ – regulátora.

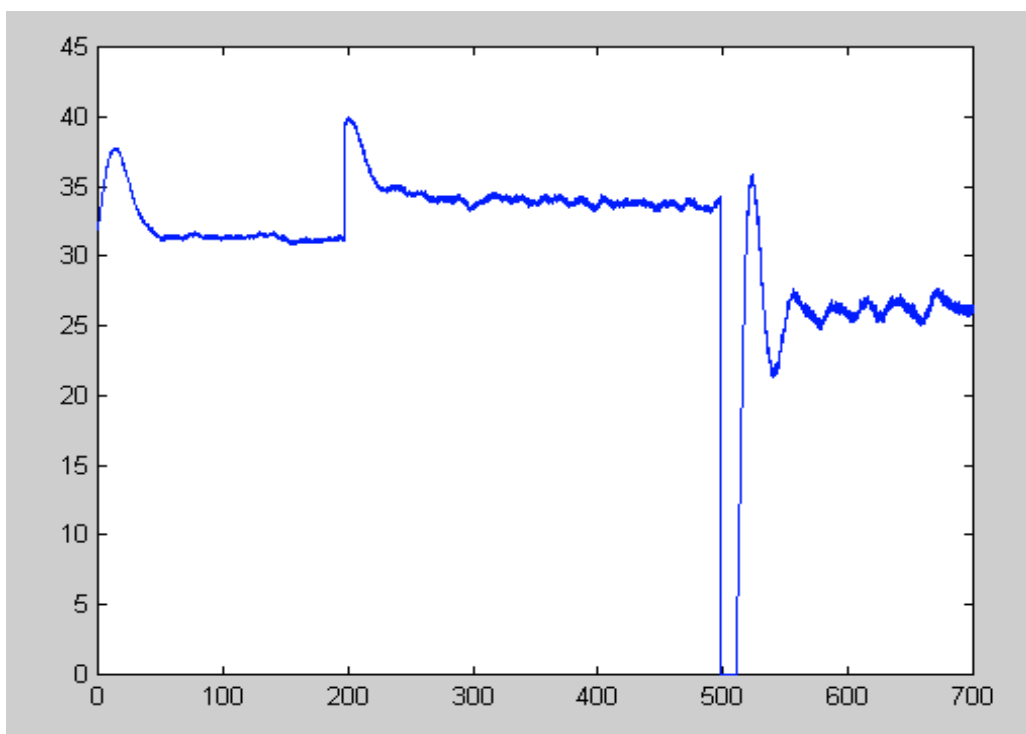
Na obrázku 9 je grafické znázornenie teploty vzduchu riadeného ohrevom. Ako môžeme vidieť tu bolo dosiahnuté λ – okolie.

Na obrázku 10 je znázornený regulátor a jeho zmeny v čase 200s a 500s, kedy sa nám menila teplota.

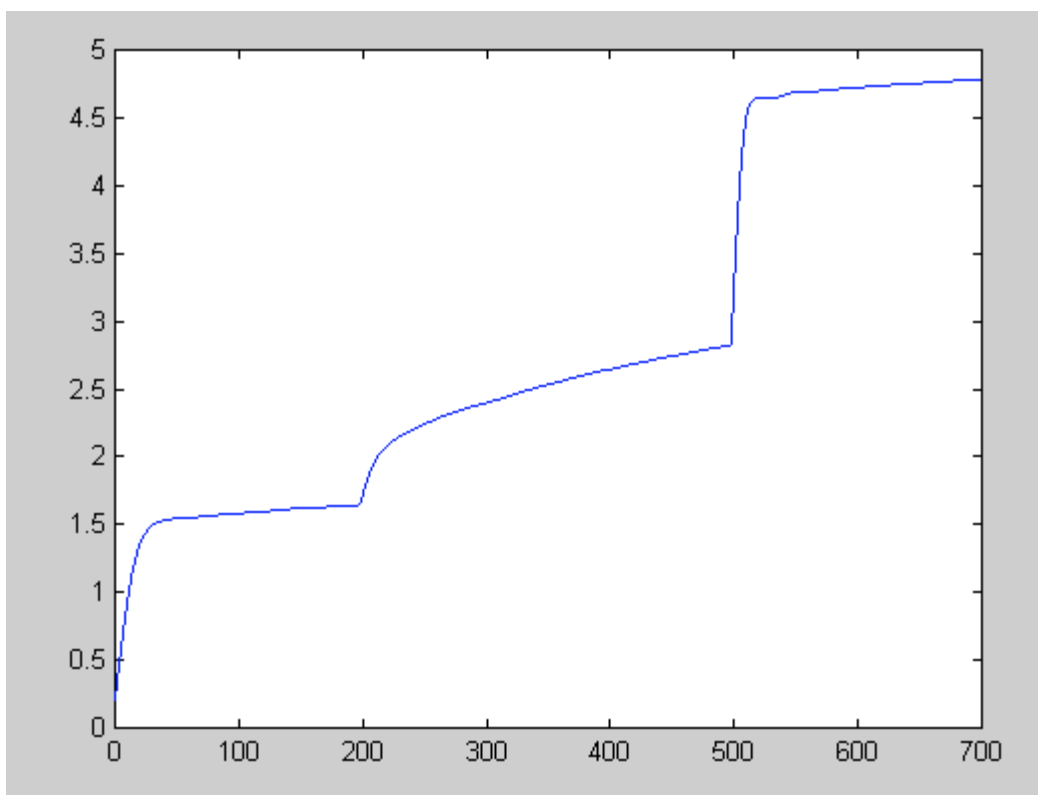
Na obrázku 11 je znázornený koeficient k a jeho zmena podľa skokovej funkcie.



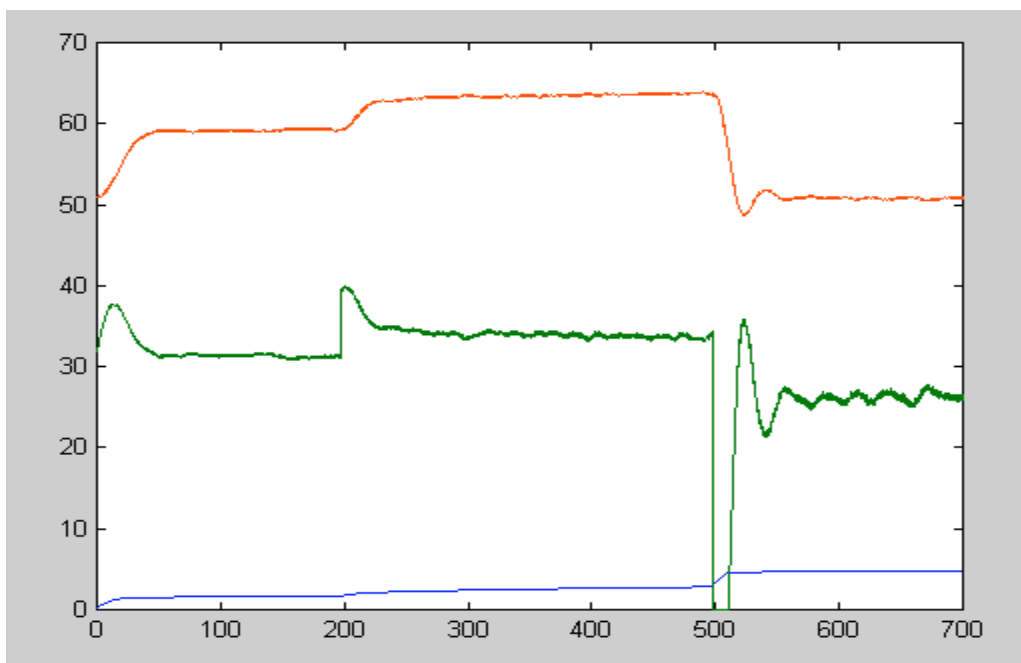
Obr.9 Grafické znázornenie teploty vzduchu pri λ – regulátore.



Obr. 10 Znázornenie regulátora podľa skokovej funkcie.



Obr. 11 Znáozornenie priebehu adaptívneho parametra k .



Obr. 12 Grafické znázornenie riadenia teploty vzduchu pomocou λ – regulátora. Teplota-červená farba, regulátor - zelená čiara, adptívny koeficient k – modrá farba.

ZÁVER

Adaptívne λ – sledovanie je veľmi vhodné pre veľkú triedu priemyselných procesov. λ – regulátor kombinuje dva výhodné aspekty: Regulátor má veľmi jednoduchú štruktúru, nepotrebuje prakticky žiadne nastavovanie, je ľahko realizovateľný a vykazuje pozoruhodné robustné vlastnosti.

Je samozrejmé, že λ – regulátor nemožno použiť pre každý problém riadenia. Poznáme veľa problémov riadenia, pre ktoré tento prístup nie je vhodný. Obzvlášť,

- ak predpoklady nie sú splnené
- ak sa vyskytuje silný šum merania
- ak sú veľmi vysoké nároky na kvalitu riadenia
- ak nie je k dispozícii vhodný a presný model pre návrh regulátor

Avšak tento prístup je veľmi vhodný,

- ak nie je dostupný žiadny model procesu alebo vhodný model pre návrh regulátora založenom na modeli
- ak je popis procesu vysoko neurčitý alebo vysoko nelineárny
- ak hlavným cieľom riadenia je udržať niektoré veličiny vnútri daných ohraničení
- ak rýchle časové konštanty, alebo obmedzenia riadenia procesu zabraňujú použitiu zložitých regulátorov.

V tejto práci som sa snažil poukázať na vhodnosť použitia λ – sledovania pre reálne procesy, ako aj porovnať kvalitu regulácie λ – regulátora a P – regulátora. Pre λ – sledovanie na základe výsledkov riadení môžem konštatovať:

1. Metódou adaptívneho λ – sledovania sa podarilo splniť predpísanú kvalitu riadenia.
2. Parameter γ ovplyvňuje rýchlosť adaptácie a so zvyšujúcou sa hodnotou γ sa zväčšuje kmitanie riadenej veličiny.
3. Adaptívne zosilnenie $k(t)$ je monotónne rastúce ak riadená veličina nie je v požadovanom λ – okolí a stáva sa konštantné, ak sa riadená veličina dostane do požadovaného λ – okolia.
4. Adaptívny λ – regulátor je vhodnejší na riadenie týchto reálnych procesov ako navrhnutý P – regulátor.

