

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKEJ A POTRAVINÁRSKEJ TECHNOLOGIE

Riadenie pomocou priemyselného riadiaceho systému Simatic
Bakalárska práca

FCHPT-5415-50949

Bratislava 2011

Milan Šugár

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKÉJ A POTRAVINÁRSKEJ TECHNOLOGIE

Riadenie pomocou priemyselného riadiaceho systému Simatic
Bakalárska práca

FCHPT-5415-50949

Študijný program: Automatizácia, informatizácia a manažment v chémii a potravinárstve

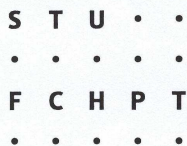
Číslo a názov študijného odboru: 5.2.14 automatizácia, 5.2.52 priemyselné inžinierstvo

Školiace pracovisko: Oddelenie informatizácie a riadenia procesov
 Ústav informatizácie, automatizácie a matematiky
 Radlinského 9, 812 37 Bratislava

Vedúci záverečnej práce/školiteľ: Ing. Katarína Matejičková, Ing. Richard Valo

Bratislava 2011

Milan Šugár



ZADANIE BAKALÁRSKEJ PRÁCE

Študent: **Milan Šugár**
ID študenta: 50949
Študijný program: automatizácia, informatizácia a manažment v chémii a potravinárstve
Kombinácia študijných odborov: 5.2.14 automatizácia, 5.2.52 priemyselné inžinierstvo
Vedúci práce: Ing. Richard Valo
Konzultant: Ing. Katarína Matejičková

Názov práce: **Riadenie pomocou priemyselného riadiaceho systému Simatic**

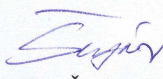
Špecifikácia zadania:

Využitie priemyselného systému Simatic S7 300 pre riadenie procesu vo forme elektronického modelu. Definovanie siete, konfigurácia vstupno-výstupných modulov. Programovanie blokov, vytvorenie programu v Step 7. Vytvorenie vizualizačného rozhrania a riadenie pomocou PI regulátorov.

Rozsah práce: 30

Riešenie zadania práce od: 14. 02. 2011

Dátum odovzdania práce: 21. 05. 2011


Milan Šugár
Študent




prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
Vedúci pracoviska


prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
Garant študijného programu

Pod'akovanie

Ďakujem pani Ing. Kataríne Matejičkovej a Ing. Richardovi Valovi za odborné vedenie a cenné rady.

Abstrakt

Úlohou bakalárskej práce bolo využitie riadiaceho systému Simatic S-7 300 na riadenie elektronického modelu. Práca sa zaoberá tvorbou riadiaceho programu v programe STEP7 a vytvorením grafického rozhrania v programe WinCC, ktoré je prepojené pomocou pracovnej stanice SIMATIC na elektronický model. Ďalšími úlohami práce boli identifikácia riadeného elektronického modelu, návrh robustných PI regulátorov a testovanie na reálnom zariadení. V konečnej fáze je porovnanie priebehov riadenia vybraných regulátorov.

Kľúčové slová: riadiaci systém SIMATIC, WinCC, robustné riadenie, PI regulátor,

Abstract

The task of my thesis was the use of control system Simatic S-7300 to controll the electronic model. The paper deals with the production control program in the STEP7 program and creating a graphical user interface in WinCC program, which is linked by a workstation SIMATIC with electronic model. Other tasks of the work was an identification of electronic model, design of robust PI controllers and testing on real devices. The final stage is a comparison of waveform control selected regulators.

Keywords: control system SIMATIC, WinCC, robust control , PI controller

Obsah

ÚVOD	8
1. RIADIACI SYSTÉM SIEMENS SIMATIC S7-300	9
1.1. Základné kroky pri vytváraní kompaktného riadiaceho projektu	10
2. ZÁKLADY PRÁCE SO SYSTÉMOM	11
2.1. Konfigurácia siete.....	11
2.2. Konfigurácia I/O modulov	11
2.3. Programovanie logických blokov a konfigurácia premenných	12
3. VIZUALIZAČNÝ SOFTWARE WINCC	15
3.1. Vytvorenie projektu a práca s tagmi.....	15
3.2. Vytvorenie vizualizačnej obrazovky a ovládacích prvkov	16
3.3. Tvorba trendov a aktivácia projektu.....	17
4. ELEKTRONICKÝ MODEL	19
4.1. Identifikácia modelu.....	20
5. ROBUSTNÉ RIADENIE.....	24
5.1. Teória syntézy robustného PI regulátora a metóda umiestnenia pólov	24
5.2. Syntéza robustného PI regulátora	25
5.2.1 Lineárne metódy aproximácie dopravného oneskorenia	26
5.2.2 Kvadratické metódy aproximácie	32
6. ZÁVER	40
LITERATÚRA	41

Úvod

Pracovná stanica SIMATIC S7 – 300 predstavuje modulárne rozšíriteľné PLC používané na riadenie nespojitých výrobných procesov v reálnom čase. Od bežných počítačov sa rozlišuje tým, že program spracováva cyklicky a periférie má prispôsobené na priame napojenie na technologické procesy. V mojej práci som sa zaoberal riadením procesu elektronického modelu s využitím priemyselného riadiaceho systému SIMATIC S7 – 300. Práca pozostáva z niekoľkých na seba nadväzujúcich častí. V prvej časti som sa venoval stručnému opisu riadiaceho systému Siemens Simatic S7-300 v ktorom som zadefinoval jeho základné časti a spomenul základné kroky potrebné k vytvoreniu funkčného projektu. V druhej časti som sa venoval základom práce so systémom ako je definovanie siete, konfigurácia vstupno-výstupných modulov, programovaniu blokov a samotnému vytvoreniu programu v STEP7. V ďalšej časti som sa venoval vytvoreniu užívateľského rozhrania.

Hlavnou úlohou mojej práce bolo riadenie elektronického modelu reálneho systému pomocou PI regulátorov. Aby som mohol navrhnuť regulátory musel som najprv daný model identifikovať, čomu sa venuje ďalšia časť práce. Po identifikácii som sa venoval syntéze PI regulátorov metódu syntézy robustného regulátora a následnému testovaniu vybraných regulátorov na reálnom procese. V poslednej časti sú spracované a vyhodnotené výsledky riadenia.

1. Riadiaci systém Siemens Simatic S7-300

Priemyselný riadiaci systém Simatic S7-300 je v praxi značne rozšírený a využívaný v širokom spektre priemyselných aplikácií. Obsahuje programátorský balík Step7 a program WinCC na tvorbu vizualizačného prostredia. Súčasť programového vybavenia riadiaceho systému Simatic je taktiež podrobný manuál, ktorý opisuje všetky komponenty hardwar-ového a softwar-ového vybavenia systému.

Celý riadiaci systém tvoria 4 hlavné časti:

- **Priemyselný Rack PC 830** je flexibilne priemyselné PC optimalizované predovšetkým na riešenie meracích a skúšobných úloh. Postavený je na báze technológie od Intelu čo ho predurčuje k používaniu v priemyselnom prostredí, ktoré má zvýšené požiadavky na odolnosť voči teplotám, nárazom , vibráciám atď.
- **Pracovná stanica SIMATIC S7 – 300** predstavuje modulárne rozšíriteľné PLC s ťažiskovým použitím na riadenie nespojitých výrobných procesov a rozsahovo menších aplikácií spojitého riadenia.

Pracovná stanica obsahuje:

1. *Napájací modul PS 307 5A*
 2. *CPU 315 – 2 DP* je centrálna procesorová jednotka
 3. *Modul rozhrania IM 360* umožňuje komunikáciu a prenos dát
 4. *Zásuvné vstupno – výstupné I/O moduly (na jednu pracovnú stanicu prislúcha maximálne 8 modulov)*
- **Prepojenie PC a pracovnej stanice SIMATIC** sa uskutočňuje pomocou MPI rozhrania, PROFIBUS-u, INDUSTRIAL ETHERNET-u resp. PTP. Jednotlivé spôsoby je možné aj kombinovať.
 - **STEP7 a WinCC** tvoria softwarový balík pričom STEP7 slúži k programovaniu PLC a WinCC je nástroj slúžiaci na vizualizáciu technologického procesu ako aj sprístupňovanie dát užívateľovi a monitoring.

1.1. Základné kroky pri vytváraní kompaktného riadiaceho projektu

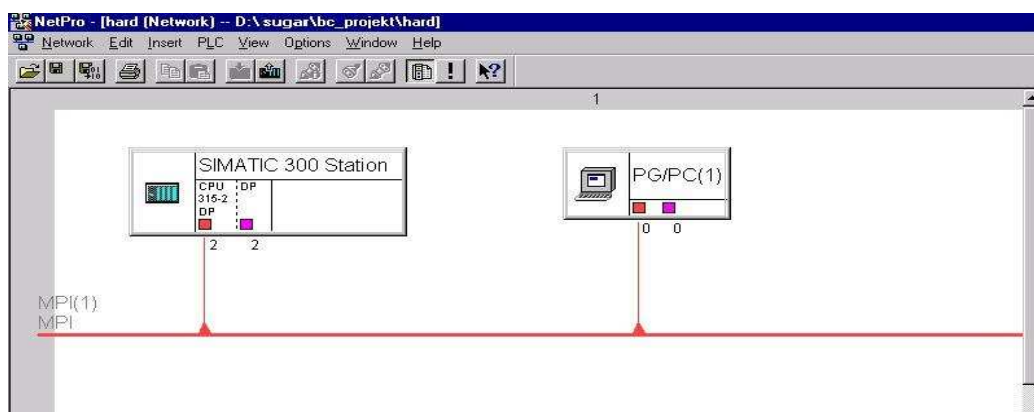
Základné kroky k vytvoreniu kompaktného riadiaceho systému, ktorý spĺňa požadované ciele a kritériá sú nasledovné:

- **Vytvorenie nového projektu v programe STEP7** vytvorí projekt pozostávajúci z objektov a ich kontajnerov. Štruktúra projektu je viditeľná v ľavej polovici okna, ktoré *Simatic Manager* vytvoril pre daný projekt.
- **Konfigurácia siete** vytvára komunikačnú sieť medzi PC a príslušnými pracovnými stanicami. V našom prípade sa použilo prepojenie pomocou MPI rozhrania.
- **Konfigurácia I/O modulov** vytvára prepojenie medzi PLC a reálnym procesom.
- **Konfigurácia premenných** umožňuje užívateľovi definovať a modifikovať vlastné premenne potrebné k chodu jeho programu.
- **Napísanie riadiaceho programu:** pomocou jazyka STEP7 sa napíše riadiaci program, ktorý bude optimálne riadiť náš proces, pričom si môžeme vybrať z troch rovnocenných jazykov (programovanie pomocou príkazov, pomocou schematického zapojenia a pomocou blokovej schémy), prípadne ich kombináciu. Program možno testovať aj diagnostikovať po nakopírovaní do pamäte RAM CPU aj bez zapojenia reálneho procesu.
- **Vytvorenie vizualizačného prostredia:** užívateľ si definuje vlastné vizualizačné prostredie tak, aby bolo prehľadné a mohol daný riadiaci proces sledovať a aktívne ho ovplyvňovať. Ako nástroj slúži program WinCC, ktorého súčasťou je aj grafický editor.
- **Prepojenie riadiaceho programu a vizualizačného prostredia:** aby vizualizačné prostredie fungovalo je potrebné ho prepojiť s riadiacim programom. Toto prepojenie sa uskutočňuje pomocou virtuálnych dátových kanálov- Tagov. Tag je na jednej strane napojený na danú pamäťovú adresu, ktorá slúži ako zásobník dát, a na druhej strane sprístupňuje dáta užívateľovi.

2. Základy práce so systémom

2.1.Konfigurácia siete

Pomocou konfigurácie siete sa vytvára komunikačná sieť medzi PC a príslušnými pracovnými stanicami. V našom prípade sa použilo prepojenie pomocou MPI rozhrania (obr.1).



obr. 1 Nakonfigurovaná sieť

Pravidlá pri konfigurácii siete

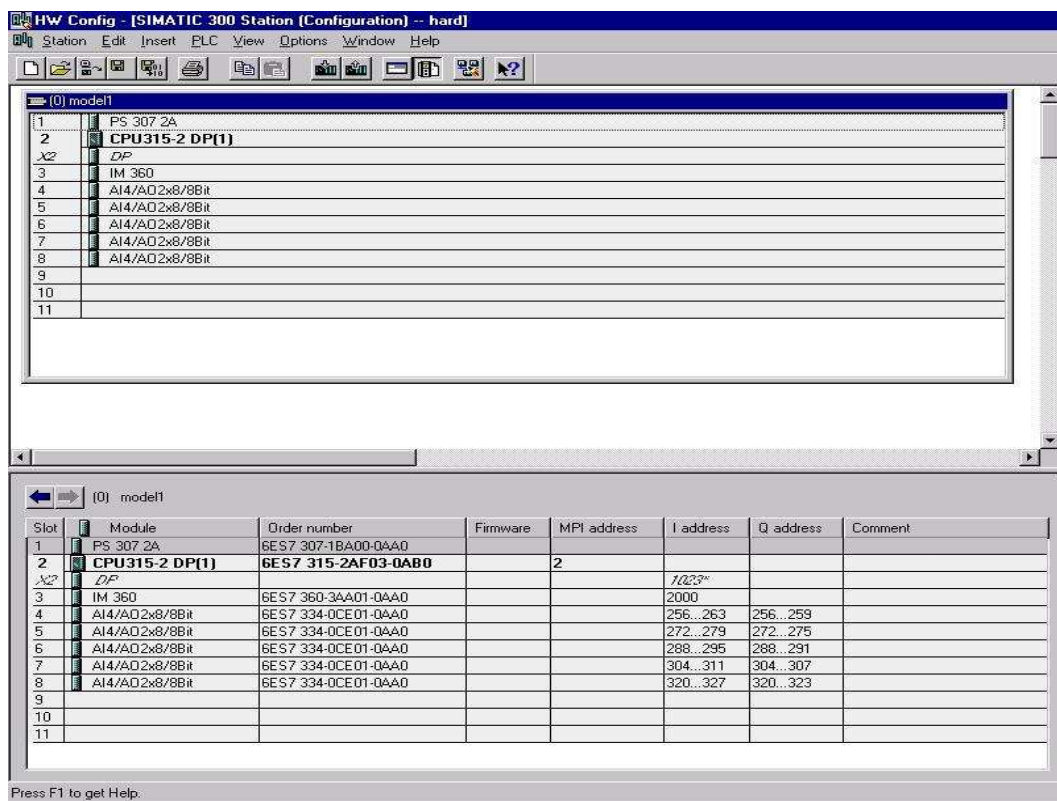
1. každý objekt musí mať rozdielny NOD.
2. CPU má rezervovaný NOD 2.
3. PG/PC má rezervovaný NOD 0.

2.2.Konfigurácia I/O modulov

Do riadiacej stanice SIMATIC S7-300 sú zapojené zásuvné vstupno-výstupné I/O moduly, čím sa zabezpečuje prepojenie medzi snímačmi a akčnými členmi. K jednotlivým modulom sa pripájajú jednotlivé zariadenia, ktoré sa majú monitorovať ovládať a riadiť.

Na obrázku 2 je zobrazené konfiguračné okno hardwaru, kde je možné vidieť obsadenie slotov daného *railu*. *Rail* predstavuje celú pracovnú stanicu a jeho riadky jednotlivé sloty, v ktorých sú definované jednotlivé moduly. Prvé tri sloty sú rezervované. Prvý pre napájací modul PS, druhý pre CPU a tretí pre IM. Ak IM modul chýba, ostáva tretí slot neobsadený. Zvyšných osem slotov možno použiť pre I/O moduly. Zariadenia sú

pripojené k I/O modulu nachádzajúcom sa na siedmom slotu *railu*. Zariadenie sa na I/O modul pripojí tak, že sa mu priradí špecifická adresa. Maximálny počet použitých *railov* je 4.



obr. 2 Konfiguračné okno hardwaru

2.3. Programovanie logických blokov a konfigurácia premenných

Programovanie možno vykonávať tromi možnými spôsobmi:

- LAD – Ladder logic - rebríkové schémy.
- FBD – Function block diagram - programovanie pomocou schém podobných schémam logických obvodov.
- STL – Statment list - jazyk podobný assembleru (efektívny kód)

Všetky vymenované jazyky sú si rovnocenné a možno ich kombinovať.

Zložky programu

Samotný program sa spravidla skladá z viacerých objektov, ktoré obsahujú kód (program) a údaje (organizačné bloky, funkčné bloky, funkcie), resp. len údaje (údajové bloky).

OB - Organizačný blok. Hlavný modul, ktorý udáva štruktúru užívateľského programu. Pomocou neho je možné vyvolať bloky a funkcie. Pre rôzne typy úloh existujú špecifické organizačné bloky. Blok OB35 je hlavný vykonávaný program pracujúci v cyklickom režime 100 ms.

FB - Funkčný blok (FB). Je samostatne programovateľný blok s vlastnou pamäťou do ktorej sa ukladajú lokálne premenné daného bloku. Predstavuje procedúru v jazyku Pascal a vykonáva sa nezávisle od ostatných blokov, avšak môže mať aj niekoľko vstupných alebo výstupných údajov, ktoré sú zviazané s určitým ďalším údajovým blokom.

FC - *Function* (FC). Funkcie môžu mať niekoľko vstupov. Predstavujú najčastejšie používané funkcie a na výstupe vracajú hodnotu.

DB - *Data Block* (DB). Predstavuje oblasť v pamäti PLC, ktorá je asociovaná k príslušnému funkčnému bloku. V tejto pamäti sú uložené hodnoty premenných:

- vstupné premenné funkčného bloku
- výstupné premenné funkčného bloku
- statické premenné funkčného bloku

SFB, SFC – predstavujú systémové funkčné bloky a funkcie integrované priamo v procesore CPU. Je potrebné s nimi manipulovať s veľkou opatrnosťou.

Použitím predchádzajúcich blokov je možné zostaviť kompletný program ktorý potrebujeme na riadenie daného reálneho procesu. V prípade potreby zdieľania premenných viacerými funkčnými blokmi je možné dáta ukladať do spoločných dátových blokov čo môže v konečnom dôsledku aj zmenšiť nároky na systémovú pamäť CPU

Pomocou nástroja *Symbols editor* je možné priradiť danému typu bloku symbolický názov.

hard\SIMATIC 300 Station\CPU315-2 ...\Symbols				
	Symbol	Address	Data type	Comment
1	akcna	MD 24	REAL	akcna velicina
2	CONT_C	FB 41	FB 41	Continuous Control
3	Cyclic Interrupt 5	OB 35	OB 35	
4	D_zap	Q 0.4	BOOL	D zapnuta
5	Dat_P	DB 1	DB 1	
6	DBPID	DB 3	FB 41	Continuous Control
7	ERROR	MD 10	REAL	error signal
8	I_zap	Q 0.3	BOOL	I zapnuta
9	IN	PIW 320	WORD	
10	LMN_D	MD 20	REAL	output D
11	LMN_I	MD 30	REAL	output I
12	LMN_P	MD 40	REAL	output P
13	MAN_ON	Q 0.0	BOOL	manualna hodnota zapnuta
14	MANUAL	MD 50	REAL	akcna velicina
15	OUT	PQW 320	WORD	
16	P	MD 60	REAL	hodnota zosilenia regulatota
17	P_zap	Q 0.2	BOOL	P zapnuta
18	PERIF	Q 0.1	BOOL	periferne riadenie zapnute
19	PROC_VAR	MD 90	REAL	process variable
20	PV_INT	MD 100	REAL	zobrazenie meranej veliciny
21	SP_INT	MD 110	REAL	vstup ziadanej veliciny
22	TD	MD 80	TIME	hodnota integracnej derivacnej casovej konstanty
23	TI	MD 70	TIME	hodnota integracnej casovej konstanty
24				

obr. 3 symbolická tabuľka

3. Vizualizačný software WinCC

WinCC predstavuje nástroj na vizualizáciu technologického procesu, ktorý slúži užívateľovi na sprístupnenie dát, monitoring a ponúka možnosť na prípadný aktívny zásah. Software je pripojený na STEP7 odkiaľ čerpá potrebné dáta prostredníctvom tagov.

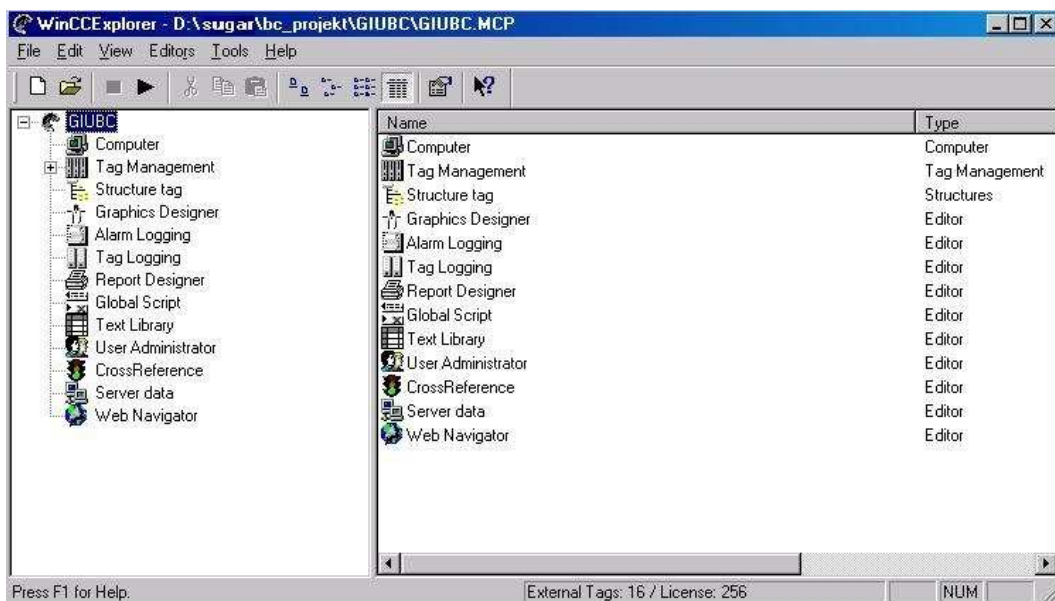
3.1. Vytvorenie projektu a práca s tagmi

Ako prvé po zapnutí WinCCExplorer (obr.4) je potrebné vytvoriť nový projekt a to voľbou *File – New – Single-User Projekt*. Potom je potrebné nadefinovať názov projektu ako aj rozhranie pomocou, ktorého bude projekt komunikovať s PLC. Po zadaní potrebných údajov WinCC automaticky vygeneruje projekt spolu s jednotlivými modulmi a položkami.

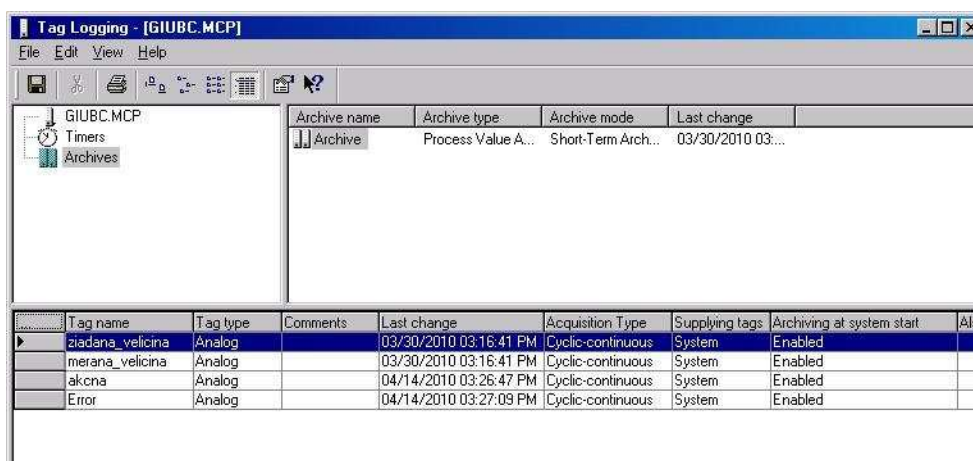
Najpoužívanejšie moduly potrebné na vytvorenie vizualizácie môjho projektu:

- *Tag Management* – je nástroj ktorý slúži na definovanie a správu tagov.
- *Graphics Designer* – predstavuje grafický editor slúžiaci na vizualizáciu technologického procesu. Je to súbor ovládacích prvkov a okien, ktoré si užívateľ vyberie z knižnice prvkov alebo si zadefinuje vlastné.
- *Tag Logging* – nástroj pomocou ktorého sa vytvárajú archívy, do ktorých sa ukladajú dáta, ktoré chceme zobrazovať alebo uchovávať na neskoršiu analýzu. Na ich zobrazovanie sa používajú trendové okná vytvorené v *Graphics Designer-i*. Grafické oko je zobrazené na obr.5.

Aby sme dokázali prepojiť WinnCC s riadiacim programom(STEP7) je potrebné ich prepojiť prostredníctvom Tagov. Tag predstavuje virtuálny dátový kanál, ktorý umožňuje komunikáciu tým, že sa napojí z jednej strany na určitú pamäťovú adresu v STEP7 pričom druhá strana túto adresu sprístupňuje užívateľskému rozhraniu.



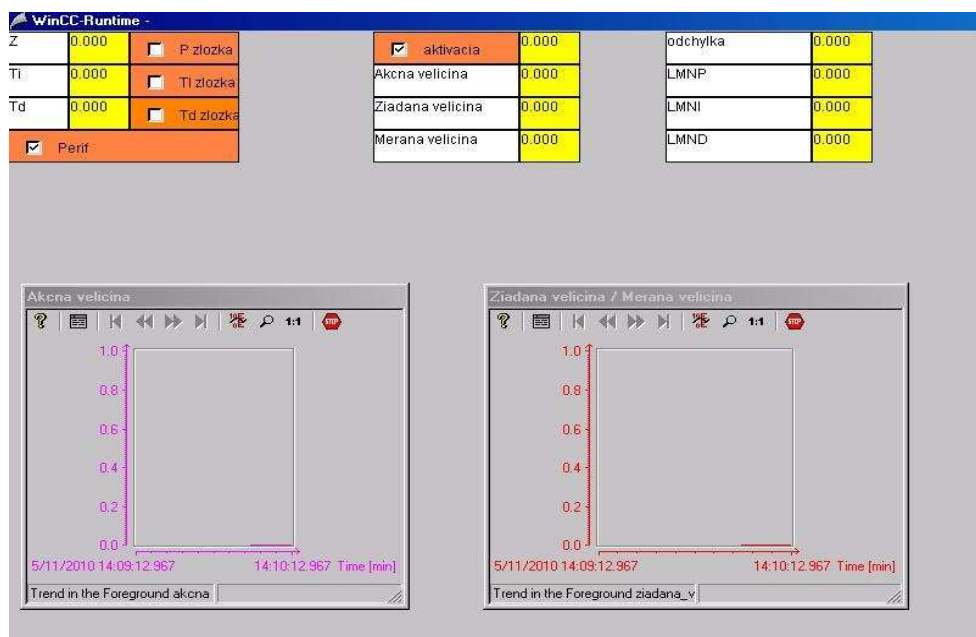
obr. 4 WinCC s otvoreným neaktívnym projektom



obr. 5 Externé tagy v Tag Logging-u

3.2. Vytvorenie vizualizačnej obrazovky a ovládacích prvkov

Na vytvorenie grafického rozhrania je potrebné použiť nástroj *Graphics Designer*. Po vytvorení nového projektu sa objaví nové okno s ovládacími prvkami pomocou ktorých si môže užívateľ vytvoriť grafické rozhranie podľa vlastných predstáv a požiadaviek. Do pripraveného okna sa dajú vkladať objekty nachádzajúce sa v knižnici prípadne objekty vytvorené užívateľom.



obr. 6 Vizualizačná obrazovka pre elektrický model

Aby užívateľ mohol monitorovať riadiaci proces a aktívne zasahovať je potrebné do grafického okna vložiť ovládacie prvky, ktoré patria medzi dynamické objekty. Nachádzajú sa na palete *Smart-Objects*. Najjednoduchším a najčastejšie používaným objektom je *I/O Field*. Vstupno-výstupné pole je objekt vo forme textového okna. Jeho hodnota je závislá na hodnote pripojeného tagu. Nastavením možno získať tri odlišne sa chovajúce polia:

- Vstupné (Input) pole, do ktorého je možné len zapisovať novú hodnotu, ktorá sa uloží do príslušného tagu.
- Výstupné (Output) pole, ktoré zobrazuje aktuálnu hodnotu príslušného tagu.
- Kombinované (Both) pole, ktoré umožňuje užívateľovi do neho zapisovať novú hodnotu, ako aj sledovať jeho aktuálnu hodnotu.

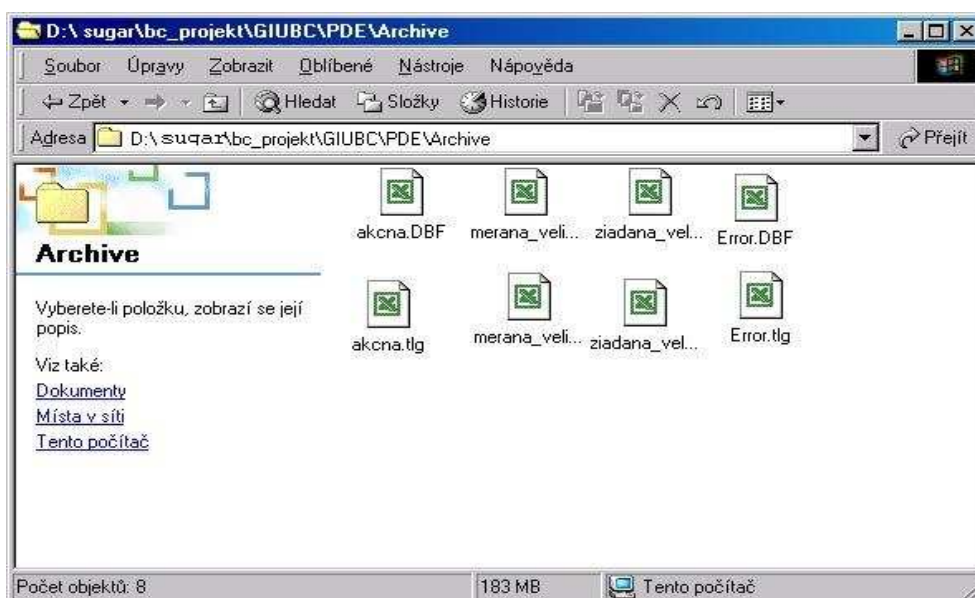
Je vhodné aby všetky I/O polia mali nastavenú jednotnú frekvenciu obnovovania dát.

3.3.Tvorba trendov a aktivácia projektu

Trendy predstavujú grafické zobrazenie za určitý časový limit. Ich funkcia je vizualizácia minulých a aktuálnych hodnôt procesných veličín. Aby sa dalo s trendmi vôbec pracovať je potrebné najprv vytvoriť archív. Samotný archív (obr.7) predstavuje súbor uložený na pevnom disku vo formáte DBF, do ktorého sa permanentne ukladajú namerané dáta, ktoré sa dajú neskôr spracovať pomocou jednoduchých tabuľkových editorov. Pred použitím archívu je potrebné ho aktivovať a zabezpečiť dostatok miesta na

pevnom disku. Ako nástroj pre prácu s archívami slúži nástroj Tag Logging, v ktorom sa určia tagy, ktoré majú byť archivované, interval ukladania hodnôt a počet meraní.

Pred spustením projektu sa musí program skompilovať a aktivovať, čo nám zabezpečí komunikáciu medzi WinCC a PLC. Taktiež je dôležité nastavenie parametrov výsledného modulu, ktoré sa nastavujú v hlavnom okne *WinCCExplorer* vo vetve *Computer*. V tejto vetve je potrebné nastaviť v záložke Startup, moduly ktoré sa majú spustiť pri štarte projektu. Musia byť zaškrtnuté moduly Graphics Runtime a Tag logging Runtime, ktoré slúžia na obsluhu grafického rozhrania a správu trendových archívov. Po aktivácii všetkých potrebných súčastí je program pripravený na samotné spustenie, po ktorom bude užívateľ môcť monitorovať a aktívne zasahovať do bežiaceho reálneho procesu.



obr. 7 položka *Process Value Archive*

4. Elektronický model

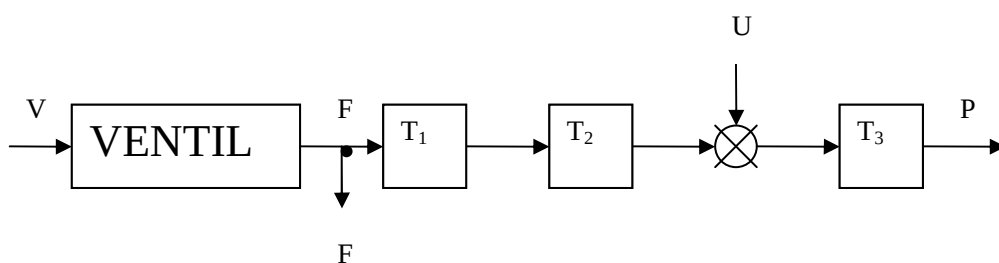
Elektronický model predstavuje nelineárny model systému tretieho rádu. Systém je zložený z troch systémov prvého rádu (obr. 18) s premenlivou časovou konštantou $T=5$ až 20 sekúnd. Elektronický model systému s nelineárnym vstupom je realizovaný spojitými analógovými obvodmi. Nelineárna charakteristika vstupného ventilu (obr.8) je realizovaná sériovou kombináciou zenerovej diódy a obyčajnej diódy zapojených v spätnej väzbe operačného zosilňovača.

Technické parametre

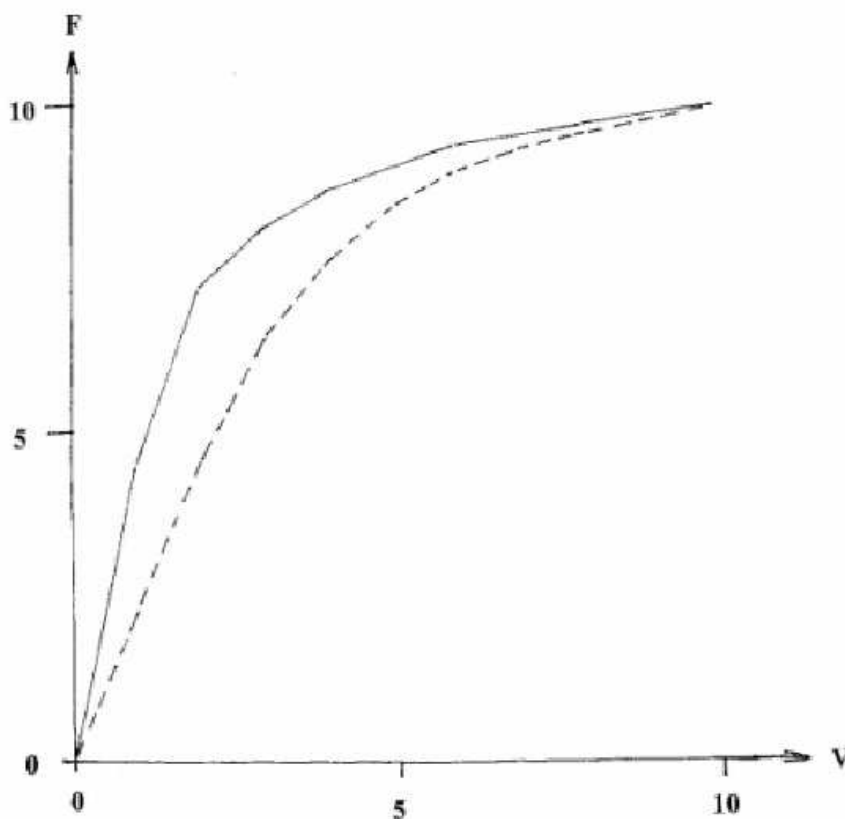
Napájanie je realizované z vonkajšieho zdroja $\pm 15V$.

Vstupno-výstupné veličiny:

- V - riadenie otvorenia ventilu (0 -10V)
- U – Porucha (0 -10V)
- F - otvorenie ventilu – prietok(závislosť P a V)
- P - Výstup sústavy (0 -10V)



Obr. 9 bloková schéma modelu



obr. 8 prechodová charakteristika nelineárneho ventilu (závislosť medzi F a V)

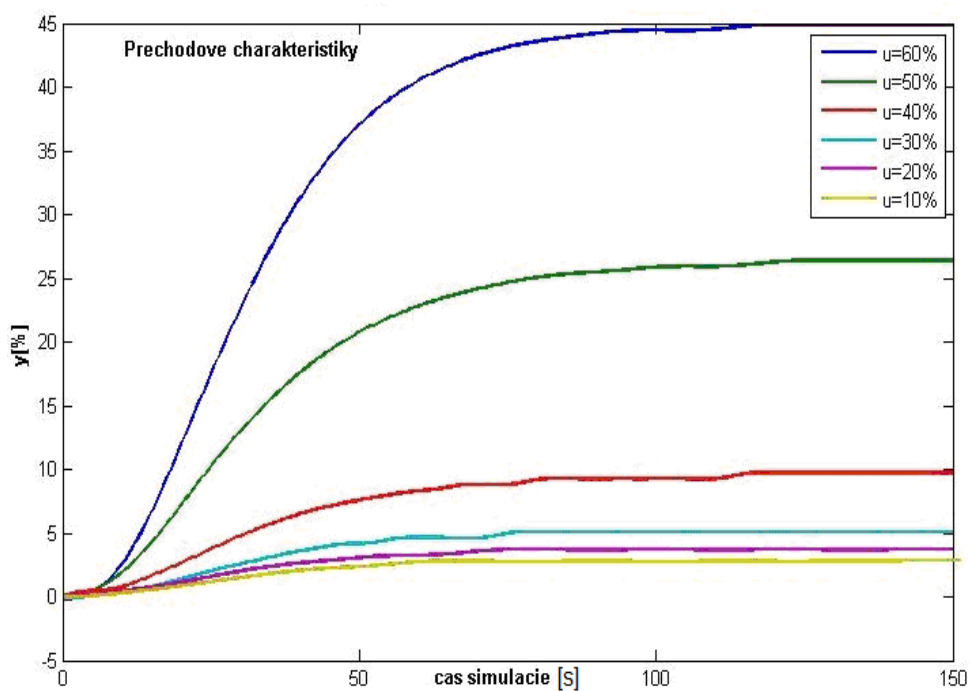
4.1. Identifikácia modelu

Identifikáciu som robil Strejcovou metódou z údajov, ktoré som nameral na modeli so zapnutým manuálnym riadením. Celkovo som uskutočnil 6 meraní pri rôznych stupňoch otvorenia ventilu a to v rozsahu od 10 do 60 % s krokom 10%. (obr.10).

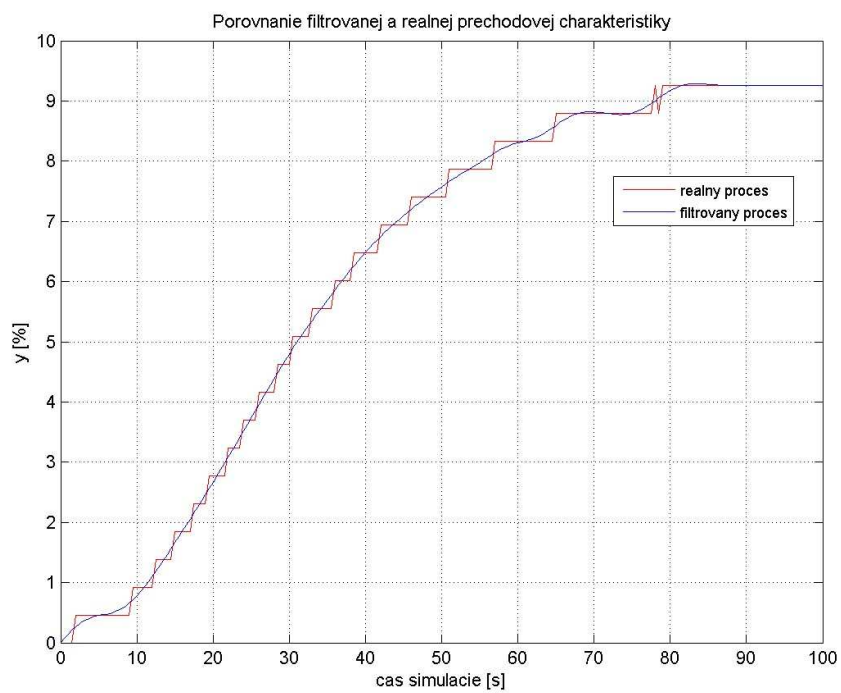
Pred použitím dát z archívov reálneho procesu bolo potrebné tieto dáta upraviť a prefiltrovať čo som robil v matlabe pomocou funkcie *butter* (obr.11) .

Tabuľka 4.1 výsledné hodnoty konštánt z identifikácie regulátora

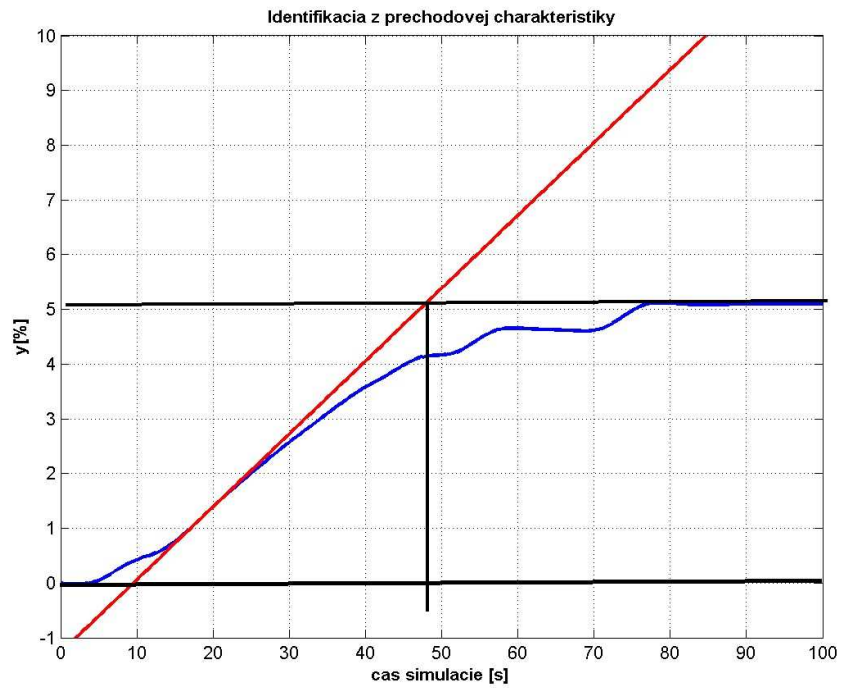
Číslo merania	Z	$T[s]$	$D[s]$	n
1	4,5090	16,557	1,0318	2
2	2,6504	15,8424	1,0230	2
3	0,9717	16,3199	1,0193	2
4	0,5103	14,1054	1,0430	2
5	0,3706	15,2722	0,5218	2
6	0,2794	15,0767	1,0208	2



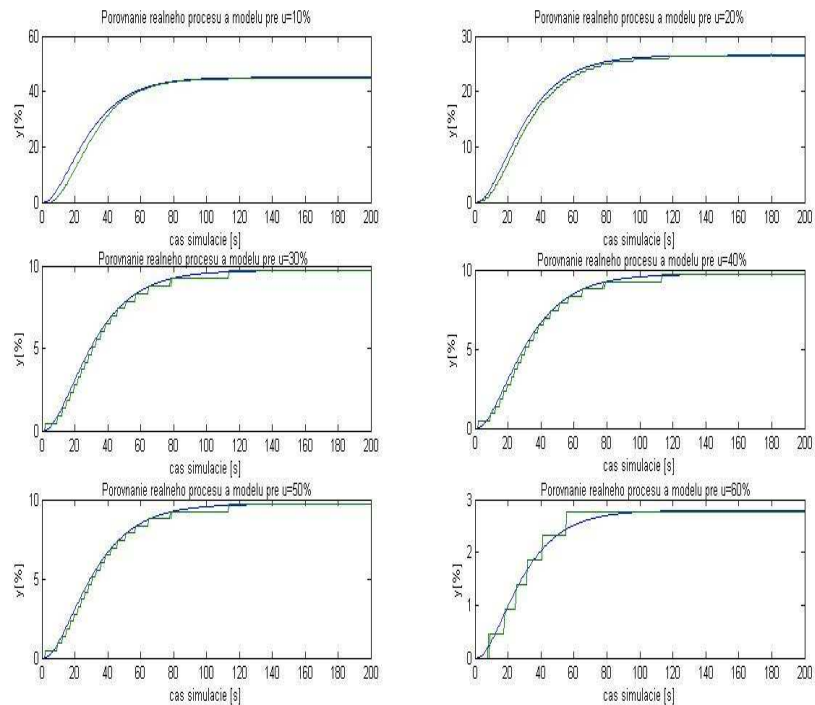
obr. 10 Zobrazenie výsledných prechodových charakteristík



obr. 11 Porovnanie filtrovanej a reálnej prechodovej charakteristiky pre tretie meranie.



obr. 11 identifikácia prechodovej charakteristiky pre 3 meranie



obr. 12 Porovnanie prechodových funkcií identifikovaných modelov s reálnym procesom

V rovnici (1) je všeobecný predpis identifikovaného prenosu, kde Z je zosilnenie systému, T je časová konštanta, D je dopravné oneskorenie a n je rád systému a n je rád systému.

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

$$Z = \frac{y_\infty - y_0}{u_\infty - u_0} e^{-Ds} \quad (2)$$

V rovnici (2) u_∞ a u_0 reprezentujú skokovú zmenu z $u_0 = 0$ $u_\infty = 10$ a y_∞ a y_0 reprezentujú koncovú a počiatočnú ustálenú hodnotu meranej veličiny.

Strejcová metóda identifikácie spočíva v tom že sa určia priesečníky dotyčnice prechodovej charakteristiky a 2 priamok, ktoré sa vedú rovnobežne s časovou osou (obr. 11) a prechádzajú cez body y_∞ a y_0 . V mieste týchto priesečníkov sa odčítajú x-ové súradnice na časovej osi, ktoré reprezentujú čas nábehu t_n a čas prietahu t_u .

Po identifikácií jednotlivých prechodových charakteristík je zjavné, že ide o nelineárny systém druhého rádu.

Na základe identifikovaných údajov je možné uviesť prenosovú funkciu procesu nelineárneho spojitého systému v nasledujúcom tvare:

$$G_s(s) = \frac{[Z^-, Z^+]}{[(T^-)^2, (T^+)^2]s^2 + [2T^-, 2T^+]s + 1} e^{-[D^-, D^+]s} \quad (3)$$

Pričom jednotlivé funkcie čitateľa aj menovateľa sú uvedené v intervalovom tvare.

$$G_s(s) = \frac{[0,2794;4.590]}{[(14,1054)^2, (16,557)^2]s^2 + [2 * 14,1054; 2 * 16,557]s + 1} e^{-[0,5218;1,0430]s} \quad (4)$$

Rovnica (4) reprezentuje prenosovú funkciu identifikovaného procesu.

5. Robustné riadenie

Robustné riadenie berie do úvahy rozdiely medzi matematickým modelom a reálnym procesom počas návrhu regulátora. Spätnoväzbový regulátor je robustný, ak je schopný zabezpečiť riadenie pre celú oblasť prípustných neurčitostí a pritom si zachováva svoje základné kvalitatívne vlastnosti ako sú na príklad stabilita, kvalita, atď. Robustné riadenie má oproti iným druhom riadenia výhodu v tom že jeho štruktúra sa dá navrhovať v režime off-line. Modelovanie, syntéza a analýza vlastností objektu sa uskutočňuje pomocou neúplného a nepresného opisu procesu.

5.1. Teória syntézy robustného PI regulátora a metóda umiestnenia pólov

Základom metódy syntézy robustného PI regulátora je nájdenie hraníc stability v (k_p, k_i) rovine a následnom určení stabilizujúcich PI regulátorov. Nájdene hranice stability rozdelia rovinu na stabilné a nestabilné oblasti pre vhodný rozsah frekvencie ω .

Aby sme určili výslednú stabilnú oblasť musíme nájsť prienik všetkých stabilných oblastí. Parametre regulátora k_i a k_p je potom možné vybrať z uvedeného prieniku stabilných oblastí.

Metóda umiestnenia pólov

Pomocou metódy umiestnenia pólov môžeme ovplyvňovať dynamické správanie uzavretého regulačného obvodu. Výberom určitého pólu dokážeme ovplyvniť vlastnosti ako napríklad stabilitu, periodicitu atď.

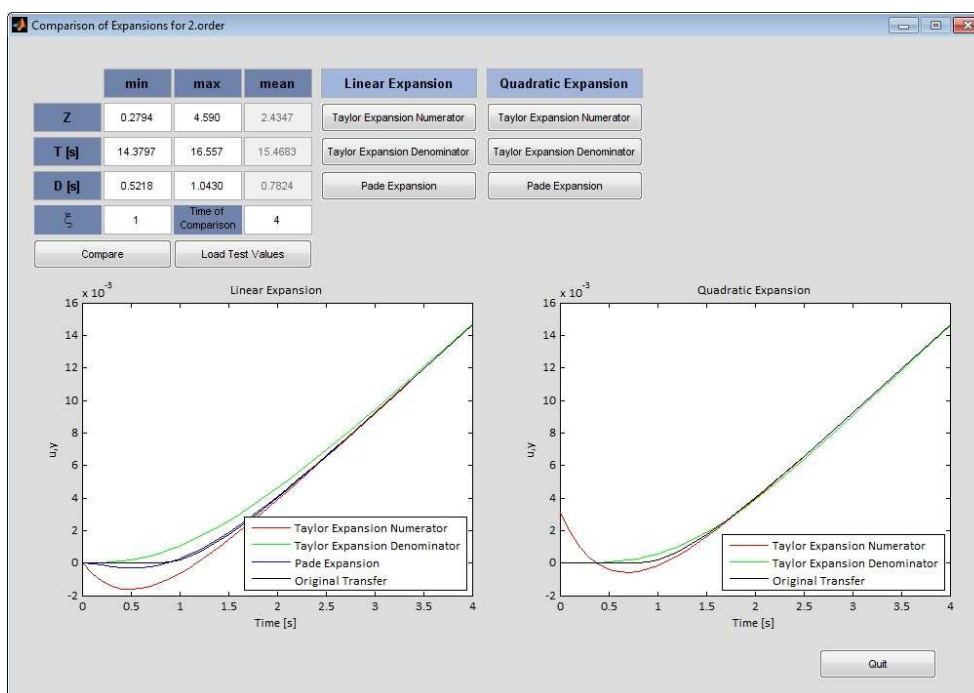
Na vykreslenie čiar, ktoré reprezentujú naše robustné PI regulátory splňujúce požadované podmienky kvality riadenia, sa používa práve táto metóda. Pomocou výberu koeficienta tlmenia uzavretého regulačného obvodu ξ_{cl} sa vypočítajú póly a vykreslia sa potrebné krivky. Body kriviek nachádzajúce sa v prieniku všetkých stabilných oblastí reprezentujú práve naše PI regulátory spĺňajúce požadované podmienky kvality riadenia.

Pre systém prvého alebo druhého rádu môže mať charakteristická rovnica uzavretého regulačného obvodu tvar (5), kde ξ_{cl} je už spomenutý koeficient tlmenia uzavretého regulačného obvodu, ω_0 je vlastná frekvencia a α pól URO.

$$(s + \alpha)(s^2 + 2\xi_{cl}\omega_0 s + \omega_0^2) = 0 \quad (5)$$

5.2.Syntéza robustného PI regulátora

V tejto podkapitole budem testovať program na syntézu robustných PI regulátorov. Program pracuje na teoretickom princípe opísanom v kapitole 5.1. pričom využíva tri lineárne metódy aproximácie a tri kvadratické metódy aproximácie dopravného oneskorenia. Pre oba druhy aproximácie sú to Taylorov rozvoj do čitateľa, Taylorov rozvoj do menovateľa a Padého rozvoj.



obr. 14 okno pre porovnanie aproximácií softwarového balíka s vyplnenými hodnotami pre môj proces

Do programu (obr. 14) je potrebné zadať dané intervaly identifikovaných hodnôt identifikovaného procesu a to konkrétne minimálnu a maximálnu hodnotu z daného intervalu z tabuľky 4.1.

Vstupné údaje do systému sú:

- Z – zosilnenie systému
- T – časová konštanta systému
- D – dopravné oneskorenie systému
- ξ – identifikovaný koeficient tlmenia pre systém druhého rádu

Na základe týchto hodnôt sa porovnajú všetky aproximácie s modelom identifikovaného procesu. Z grafu vyplýva, že všetky aproximácie sa dobre zhodujú s modelom identifikovaného procesu. Menšie odchýlky sa vyskytujú len v krátkom okamihu na začiatku procesu a do 4 sekundy od začiatku zmiznú čo môžeme považovať za uspokojivé.

Aby sme mohli určiť parametre robustného regulátora je potrebné pre každú metódu vykresliť stabilné oblasti parametrov PI regulátora. Hľadaný robustný regulátor sa musí nachádzať v prieniku všetkých oblastí a musí mať kladné hodnoty. Potom je potrebné zvoliť pre danú aproximáciu koeficient tlmenia uzavretého regulačného obvodu ξ_{cl} a vykresliť pre daný koeficient krivku, ktorá zodpovedá príslušným PI regulátorom. Časť krivky, ktorá sa nachádza v spomínanom prieniku a v kladnej oblasti potom reprezentuje každým svojim bodom jeden PI regulátor spĺňajúci všetky požadované podmienky kvality riadenia.

Ako boli zvolené kritéria pre porovnávanie regulátorov:

- Čas regulácie t_{reg} [s] predstavuje čas kedy sa riadená veličina natrvalo ustáli v δ - okolí žiadanej veličiny. V tomto prípade pôjde vždy o 5% zo žiadanej veličiny.
- Maximálne preregulovanie σ_{max} [%]

$$\delta_{max} = \frac{y_{max} - y(\infty)}{y(\infty)} \cdot 100\% \quad (8)$$

- Čas maximálneho preregulovania $t_{\delta max}$ [s] reprezentuje čas, v ktorom nastane maximálne preregulovanie.

5.2.1 Lineárne metódy aproximácie dopravného oneskorenia

Pre lineárne metódy aproximácie dopravného oneskorenia boli použité nasledovné aproximácie: Taylorov rozvoj do čitateľa (9), Taylorov rozvoj do menovateľa (10) a Padého rozvoj (11).

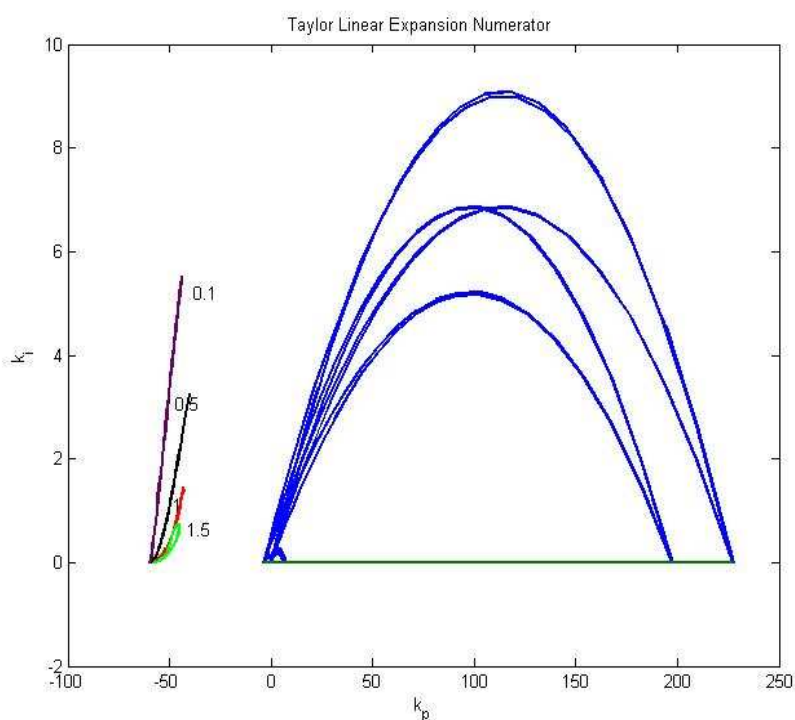
V ktorých

- Z – je maximálne zosilnenie systému
- T – maximálna časová konštanta systému
- D – maximálne dopravné oneskorenie systému
- ξ – koeficient tlmenia uzavretého regulačného obvodu

Lineárny Taylorov rozvoj do čitateľa:

$$G = \frac{-Z \cdot D \cdot s + Z}{T^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot s + 1} \quad (9)$$

Pre Taylorov lineárny rozvoj do čitateľa vieme vykresliť stabilné oblasti aj nájsť ich prienik, avšak pre dané aproximácie nevieme nájsť vhodný regulátor, ktorý by spĺňal podmienky kvality riadenia ako je vidieť z grafu Obr. 15. Z obrázku je zjavné, že krivky reprezentujúce PI regulátory pri rôznych koeficientoch tlmenia neprechádzajú cez našu oblasť kladného prieniku a teda nespĺňajú podmienky pre kvalitu riadenia.

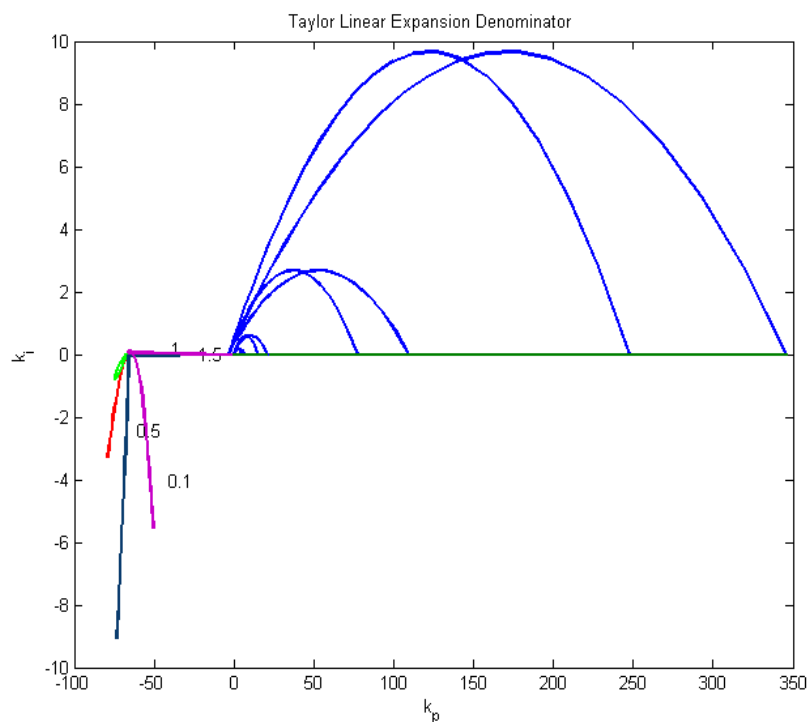


obr. 15 Vykreslenie stabilných oblastí pre Taylorov lineárny rozvoj do čitateľa

Lineárny Taylorov rozvoj do menovateľa:

$$G_s(s) = \frac{Z}{T^2 \cdot D \cdot s^3 + (T^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot D) \cdot s^2 + (2 \cdot \xi \cdot T + D) \cdot s + 1} \quad (10)$$

Takisto ako v predchádzajúcom prípade vieme vykresliť stabilné oblasti (Obr. 16), ale krivky reprezentujúce PI regulátory pri rôznych koeficientoch tlmenia neprechádzajú cez našu oblasť kladného prieniku a teda nespĺňajú podmienky kvality riadenia.



obr. 16 vykreslenie stabilných oblastí pre Taylorov lineárny rozvoj do menovateľa

Padého lineárny rozvoj:

$$G = \frac{-Z \frac{D}{2} s + Z}{T \frac{D}{2} s^3 + (T^2 + \xi \cdot T \cdot D) s^2 + (2 \cdot \xi \cdot T + \frac{D}{2}) \cdot s + 1} \quad (11)$$

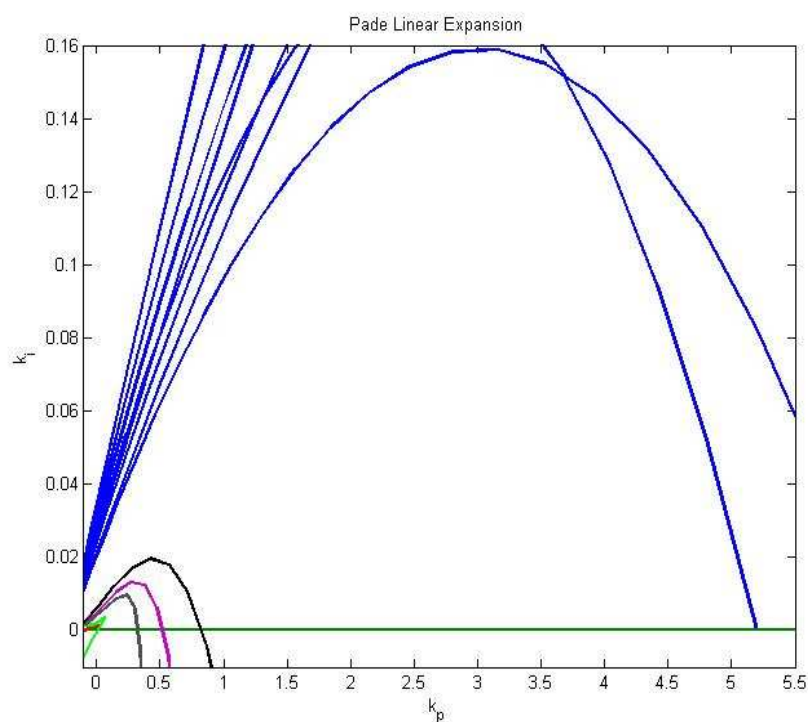
Pre Padého lineárny rozvoj Obr. 17 je možné nájsť krivky pre rôzne koeficienty tlmenia regulátora. Pre moje merania som zvolil ich hodnoty $\xi_{cl} = 0,6$, $\xi_{cl} = 0,5$ a $\xi_{cl} = 0,4$ a pre každý z nich som zvolil jeden vhodný regulátor, ktorý som si overil pomocou simulácie v danom prostredí. Hodnoty ξ_{cl} som zvolil kmitavé, pretože pomocou nekmitavých sa nedal navrhnuť regulátor splňujúci žiadané podmienky kvality riadenia. Najvhodnejší regulátor som vyberal podľa odhadnutého času regulácie v simulácii a kmitavosti regulátora. Výsledné regulátory boli odskúšané na reálnom zariadení. Výsledky sú uvedené v tabuľkách 5.1, 5.2 a 5.3. Simulácie pre žiadanú veličinu $w = 10\%$, $w = 40\%$ a $w = 60\%$ sú na obrázkoch 18, 19 a 20.

Podľa kritérií uvedených v týchto tabuľkách sa ako najlepší regulátor javí regulátor s koeficientom tlmenia $\xi_{cl} = 0,6$, ktorý má najlepší čas regulácie a najmenšiu hodnotu maximálneho preregulovania. Ako druhý najlepší je regulátor s koeficientom tlmenia

$\xi_{cl} = 0,5$ a tretí s tlmenia $\xi_{cl} = 0,4$. Všetky regulátory sú schopné uradiť proces v plnom rozsahu žiadanej veličiny.

Pre všetky grafy reprezentujúce priebeh riadenia pre Padého lineárny rozvoj (obrázky 18, 19 a 20) platí, že:

- Zelená farba – reprezentuje regulátor s koeficientom tlmenia $\xi_{cl} = 0,6$
- Červená farba – reprezentuje regulátor s koeficientom tlmenia $\xi_{cl} = 0,5$
- Modrá farba – reprezentuje regulátor s koeficientom tlmenia $\xi_{cl} = 0,4$
- Čierna farba – reprezentuje žiadanú veličinu w
- Bodkovaná čiara – reprezentuje δ okolie žiadanej veličiny $\delta = \pm 0,05.w$



Obr. 17 Vykreslenie prieniku stabilných oblastí pre Padého lineárny rozvoj

Tabuľka 5.1 Kritéria kvality pre Padého lineárny rozvoj $w = 10\%$

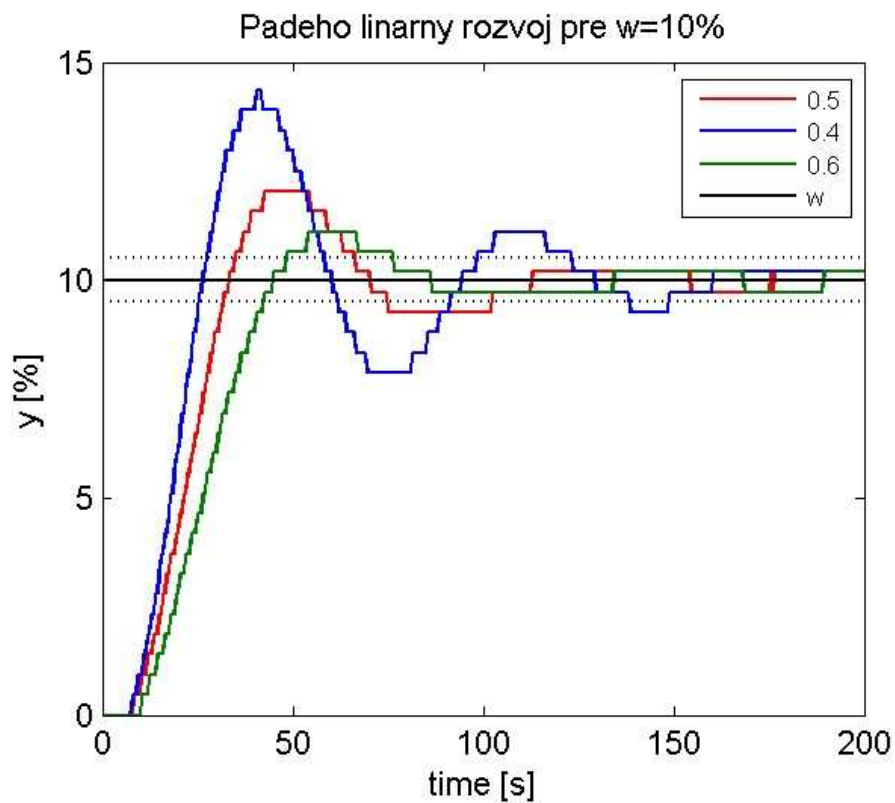
Padého lineárny rozvoj pre $w = 10\%$					
Zr	Ti [s]	ξ_{cl}	t_{reg} [s]	δ_{max} [%]	$t_{\delta_{max}}$ [s]
0,3151	25,0079	0,5	102,26	20,37	48
0,4451	23,5503	0,4	148,76	43,5	41
0,2117	23,0109	0,6	76,16	11,1	60

Tabuľka 5. Kritéria kvality pre Padého lineárny rozvoj $w = 40\%$

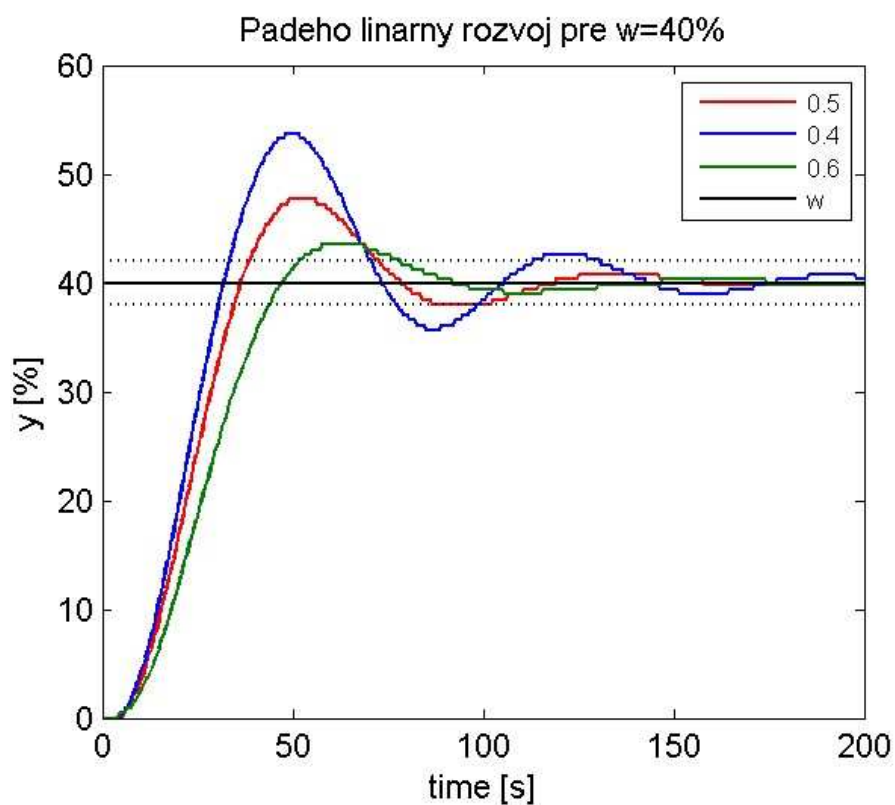
Padého lineárny rozvoj pre $w = 40\%$					
Zr	Ti [s]	ξ_{cl}	t_{reg} [s]	δ_{max} [%]	$t_{\delta_{max}}$ [s]
0,3151	25,0079	0,5	86,50	19,21	53
0,4451	23,5503	0,4	130,64	34,25	50
0,2117	23,0109	0,6	78,14	8,8	64

Tabuľka 5.3 Kritéria kvality pre Padého lineárny rozvoj $w = 60\%$

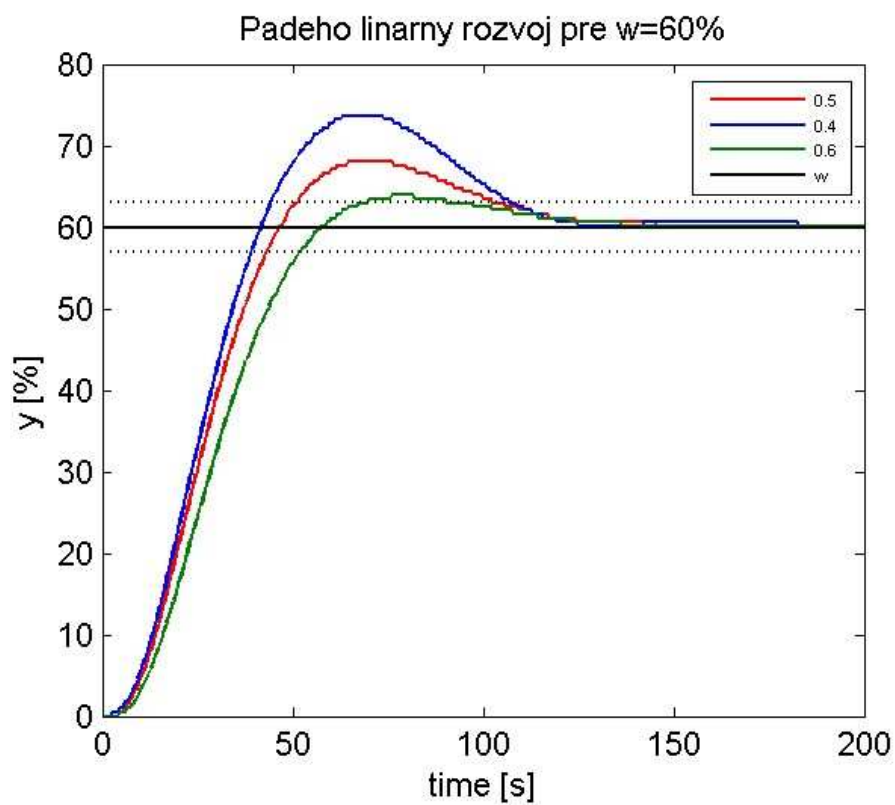
Padého lineárny rozvoj pre $w = 60\%$					
Zr	Ti [s]	ξ_{cl}	t_{reg} [s]	δ_{max} [%]	$t_{\delta_{max}}$ [s]
0,3151	25,0079	0,5	102,46	14,25	70
0,4451	23,5503	0,4	106,96	22,68	68
0,2117	23,0109	0,6	90,46	6,4	79



obr. 18 Pribeh riadenia pre Padého lineárny rozvoj $w = 10\%$



obr. 19 Priebeh riadenia pre Padého lineárny rozvoj $w = 40\%$



obr. 20 Priebeh riadenia pre Padého lineárny rozvoj $w = 60\%$

5.2.2 Kvadratické metody aproximácie

Pre kvadratické metódy aproximácie dopravného oneskorenia boli použité nasledovné aproximácie: Taylorov rozvoj do čitateľa (12), Taylorov rozvoj do menovateľa (13) a Padého rozvoj (14).

V ktorých

- Z – je maximálne zosilnenie systému
- T – maximálna časová konštanta systému
- D – maximálne dopravné oneskorenie systému
- ξ – koeficient tlmenia uzavretého regulačného obvodu

Taylorov kvadratický rozvoj do čitateľa

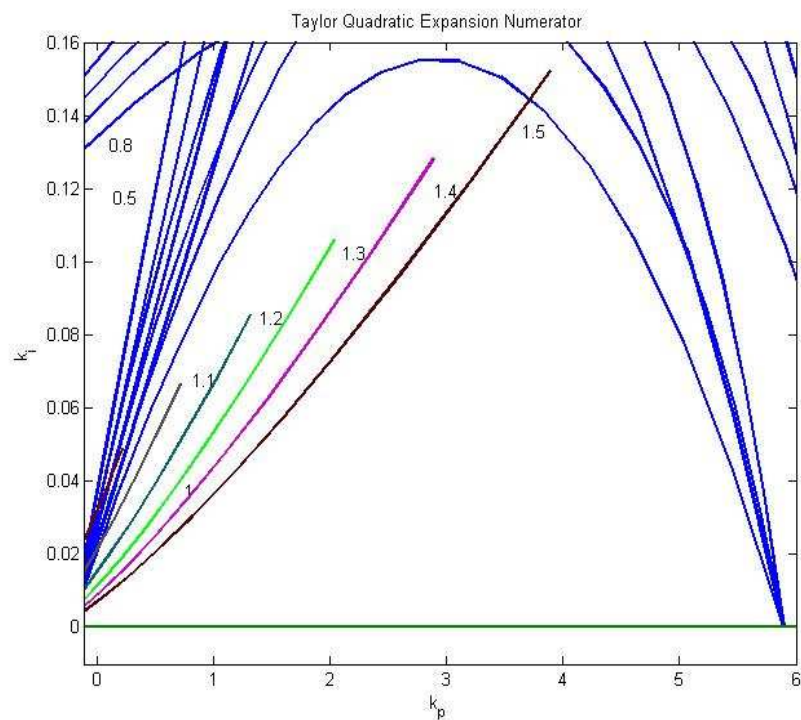
$$G = \frac{Z \frac{D^2}{2} s^2 - Z.D.s + Z}{T^2.s^2 + 2.\xi.T.s + 1} \quad (12)$$

Pre Taylorov kvadratický rozvoj do čitateľa obr.21 sa v spomínanom prieniku nachádzajú krivky PI regulátorov pre rôzne koeficienty tlmenia. Pre simuláciu som vybral tri regulátory s koeficientom tlmenia $\xi_{cl} = 1,5$ podľa výsledkov simulácií. Hodnoty regulátorov ktoré som neskôr overil na reálnom zariadení sa nachádzajú v tabuľkách 5.4, 5.5 a 5.6. Simulácie pre žiadanú veličinu $w = 10\%$, $w = 40\%$ a $w = 60\%$ sú na obrázkoch obr.22 , obr.23 a obr.24.

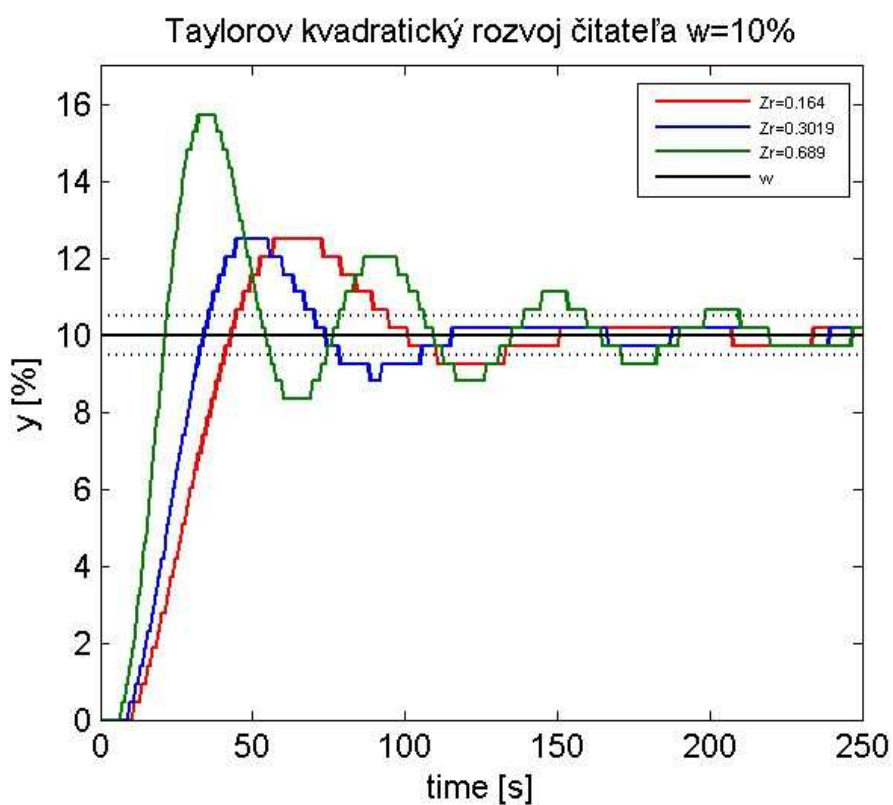
Z výsledkov vyplýva, že najväčšie maximálne preregulovanie má regulátor so zosilnením $Z = 0,6989$, ktorý však pri žiadanej hodnote $w=60\%$ dosahuje najlepší čas regulácie. Pri žiadanej veličine $w=60\%$ ma najmenší čas regulácie regulátor so zosilnením $Z = 0,3019$. Pri žiadanej veličine $w = 40\%$ ma najmenší čas regulácie regulátor so zosilnením $Z = 0,164$. Všetky regulátory sú však schopné uradiť proces v plnom rozsahu žiadanej veličiny.

Pre všetky grafy reprezentujúce priebeh riadenia pre Taylorov kvadraticky rozvoj do čitateľa (obrázky 22, 23 a 24) platí, že:

- Zelená farba – reprezentuje regulátor so zosilnením $Z = 0,3019$
- Červená farba – reprezentuje regulátor s zosilnením $Z = 0,164$
- Modrá farba – reprezentuje regulátor s zosilnením $Z = 0,6989$
- Čierna farba – reprezentuje žiadanú veličinu w
- Bodkovaná čiara reprezentuje δ okolie žiadanej veličiny $\delta = \pm 0,05.w$



Obr. 21 Vykreslenie prieniku stabilných oblastí pre Taylorov kvadraticky rozvoj do čitateľa



obr. 22 Priebeh riadenia pre Taylorov kvadraticky rozvoj do čitateľa $w = 10\%$

Tabuľka 5.4 Kritéria kvality pre Taylorov kvadratický rozvoj do čitateľa $w = 10\%$

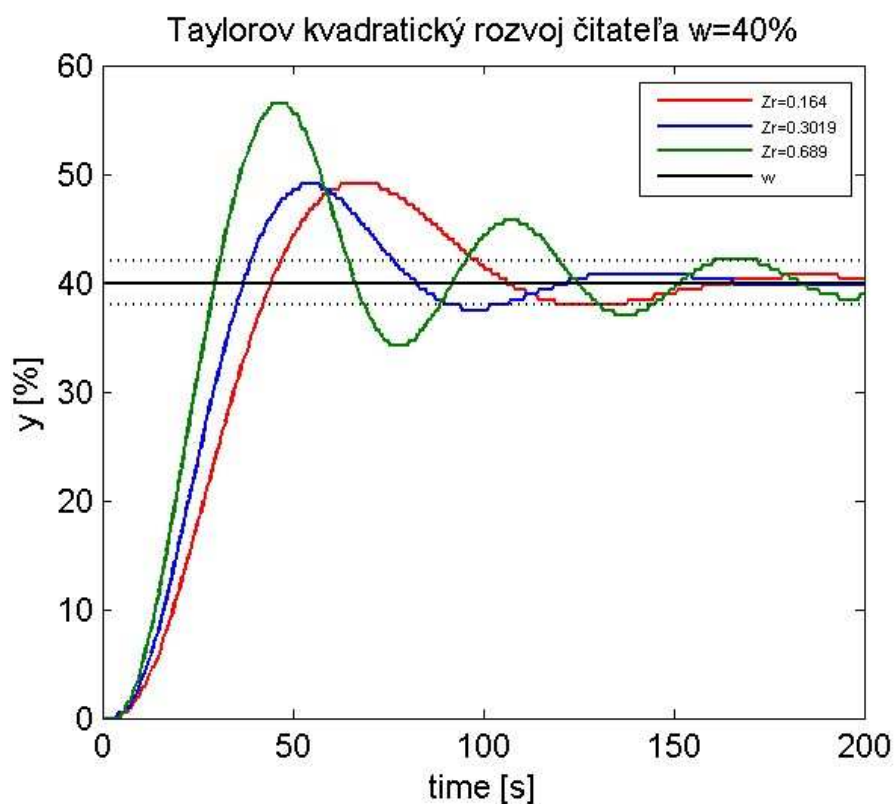
Taylorov kvadratický rozvoj čitateľa $w = 10\%$					
Zr	Ti [s]	ξ_{cl}	t_{reg} [s]	δ_{max} [%]	$t_{\delta_{max}}$ [s]
0,164	14,313	1,5	132,76	25,00	65
0,3019	22,3603	1,5	105,26	25,00	50
0,6989	27,4078	1,5	183,00	57,40	34

Tabuľka 5.5 Kritéria kvality pre Taylorov kvadratický rozvoj do čitateľa $w = 40\%$

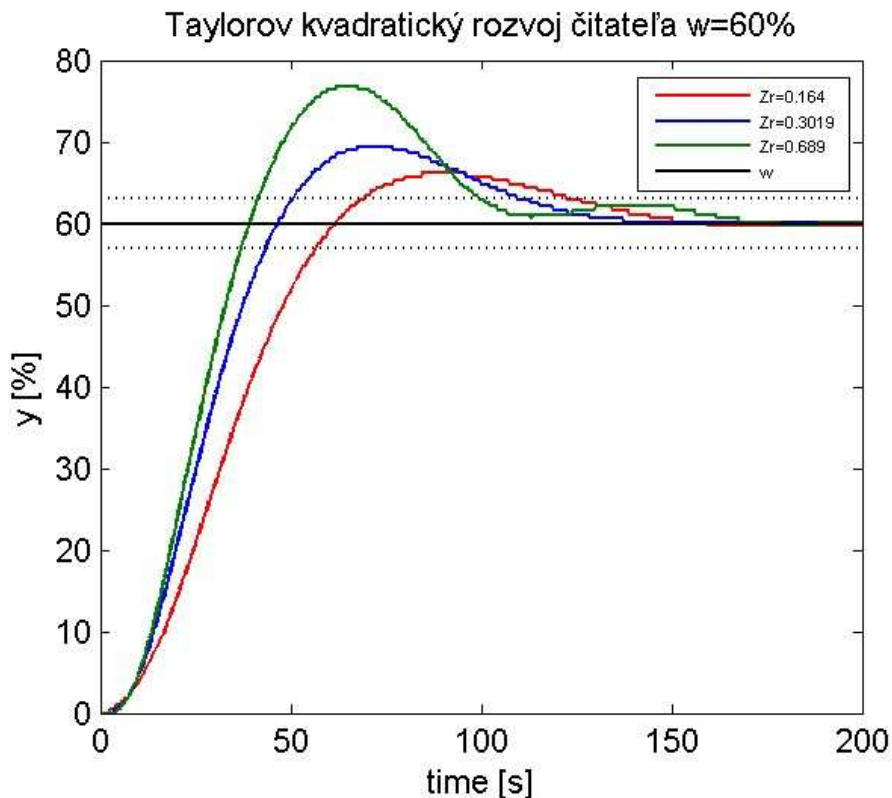
Taylorov kvadratický rozvoj čitateľa $w = 40\%$					
Zr	Ti [s]	ξ_{cl}	t_{reg} [s]	δ_{max} [%]	$t_{\delta_{max}}$ [s]
0,164	14,313	1,5	98,64	22,68	67,0
0,3019	22,3603	1,5	106,50	22,68	54,5
0,6989	27,4078	1,5	145,00	41,20	46,5

Tabuľka 5.6 Kritéria kvality pre Taylorov kvadratický rozvoj do čitateľa $w = 60\%$

Taylorov kvadratický rozvoj čitateľa $w = 60\%$					
Zr	Ti [s]	ξ_{cl}	t_{reg} [s]	δ_{max} [%]	$t_{\delta_{max}}$ [s]
0,164	14,313	1,5	122,46	10,33	100
0,3019	22,3603	1,5	109,46	15,73	72
0,6989	27,4078	1,5	99,46	28,01	64,5



obr. 23 Priebeh riadenia pre Taylorov kvadratický rozvoj do čitateľa $w = 40\%$



obr. Priebeh riadenia pre Taylorov kvadratický rozvoj do čitateľa $w = 60\%$

Hodnoty ξ_{cl} všetky nekmitavé a rovnaké aby som mohol porovnať ako vplýva výber regulátora pri danom koeficiente tlmenia ξ_{cl} na kvalitu riadenia. Pri kmitavých koeficientoch tlmenia sa nedal navrhnuť regulátor splňujúci žiadané podmienky kvality riadenia.

Taylorov kvadratický rozvoj do menovateľa:

$$G = \frac{Z}{T^2 \frac{D^2}{2} s^4 + (T^2 \cdot D + \xi \cdot T \cdot D^2) s^3 + (T^2 + \frac{D^2}{2} + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot D) s^2 + (2 \cdot \xi \cdot T + D) s + 1} \quad (13)$$

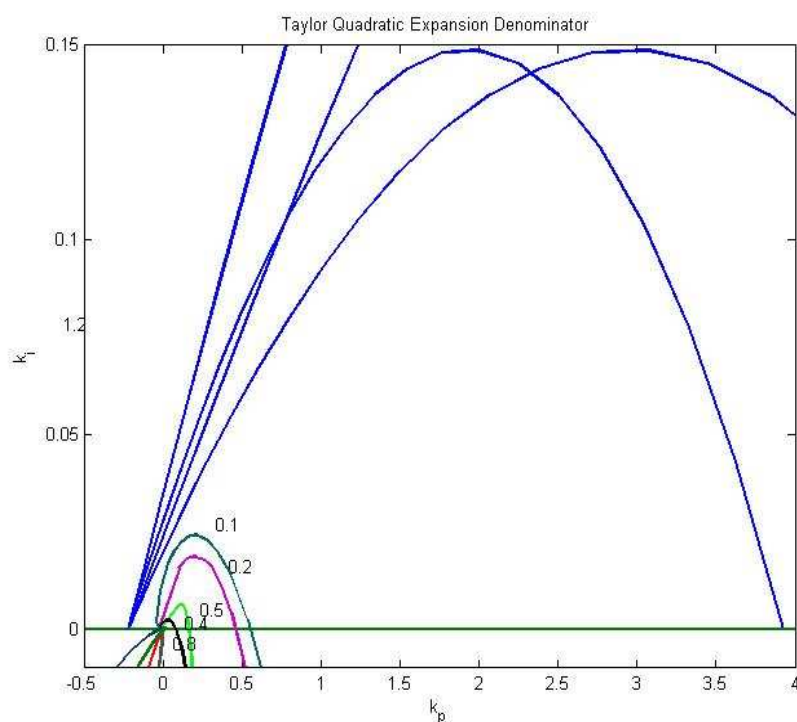
Pre Taylorov kvadratický rozvoj menovateľa (obr. 25) sa v spomínanom prieniku nachádzajú pri krivky pre rôzne koeficienty tlmenia. Pre simuláciu som vybral 3 regulátory s koeficientom tlmenia $\xi_{cl} = 0,5$, $\xi_{cl} = 0,2$ a $\xi_{cl} = 0,1$. Hodnoty regulátorov ktoré som neskôr overil na reálnom zariadení sa nachádzajú v tabuľkách 5.7, 5.8 a 5.9. Simulácie pre žiadanú veličinu $w = 10\%$, $w = 40\%$ a $w = 60\%$ sú na obrázkoch obr.26, obr.27 a obr.28.

Hodnoty ξ_{cl} som zvolil kmitavé, pretože pomocou nekmitavých sa nedal navrhnuť regulátor splňujúci žiadané podmienky kvality riadenia.

Ako najlepší z regulátorov môžeme určiť regulátor s $\xi_{cl} = 0,5$, ktorý má najlepší čas regulácie v dvoch prípadoch. Popritom však nemal žiadne maximálne preregulovanie. Zvyšné dva regulátory sa správali približne rovnako menšie rozdiely boli v časoch regulácie. Regulátor s $\xi_{cl} = 0,2$ mal najväčšie maximálne preregulovanie vo všetkých prípadoch. Všetky regulátory sú schopné uradiť proces v plnom rozsahu žiadanej veličiny.

Pre všetky grafy reprezentujúce priebeh riadenia pre Padého lineárny rozvoj (obrázky 26, 27 a 28) platí, že:

- Zelená farba – reprezentuje regulátor s koeficientom tlmenia $\xi_{cl} = 0,1$
- Červená farba – reprezentuje regulátor s koeficientom tlmenia $\xi_{cl} = 0,5$
- Modrá farba – reprezentuje regulátor s koeficientom tlmenia $\xi_{cl} = 0,2$
- Čierna farba – reprezentuje žiadanú veličinu w
- Bodkovaná čiara reprezentuje δ okolie žiadanej veličiny $\delta = \pm 0,05.w$



obr. 25 Vykreslenie prieniku stabilných oblastí pre Taylorov kvadraticky rozvoj do menovateľa

Tabuľka 5.7 Kritéria kvality pre Taylorov kvadratický rozvoj do menovateľa $w = 10\%$

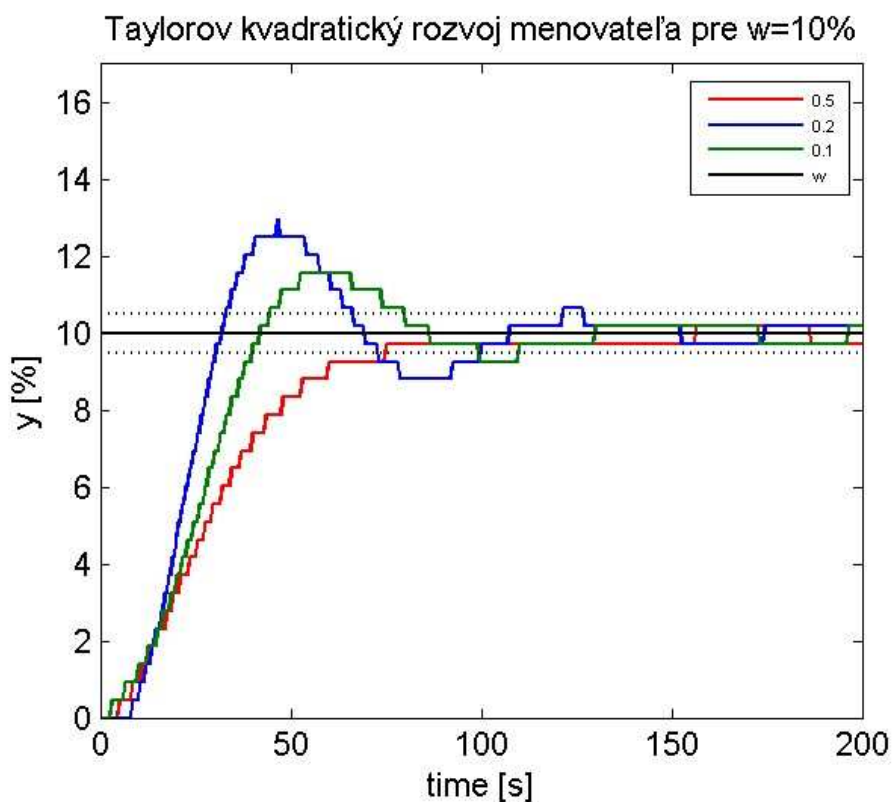
Taylorov kvadratický rozvoj menovateľa $w = 10\%$					
Zr	Ti [s]	ξ_{cl}	t_{reg} [s]	δ_{max} [%]	$t_{\delta_{max}}$ [s]
0,1322	23,6071	0,5	74,76	-	-
0,3393	24,0000	0,2	126,66	29,63	46,5
0,236	18,88	0,1	107,26	15,74	56

Tabuľka 5.8 Kritéria kvality pre Taylorov kvadratický rozvoj do menovateľa $w = 40\%$

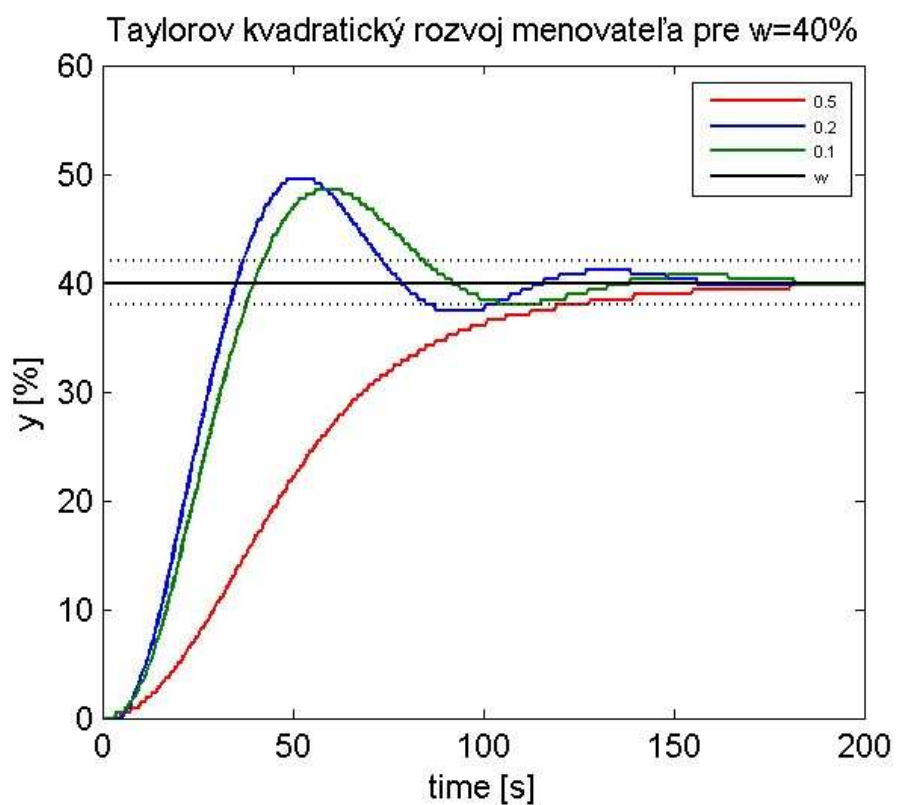
Taylorov kvadratický rozvoj menovateľa $w = 40\%$					
Zr	Ti [s]	ξ_{cl}	t_{reg} [s]	δ_{max} [%]	$t_{\delta_{max}}$ [s]
0,1322	23,6071	0,5	127,54	-	-
0,3393	24,0000	0,2	103,5	23,75	52
0,236	18,88	0,1	91,8	21,52	60

Tabuľka 5.9 Kritéria kvality pre Taylorov kvadratický rozvoj do menovateľa $w = 60\%$

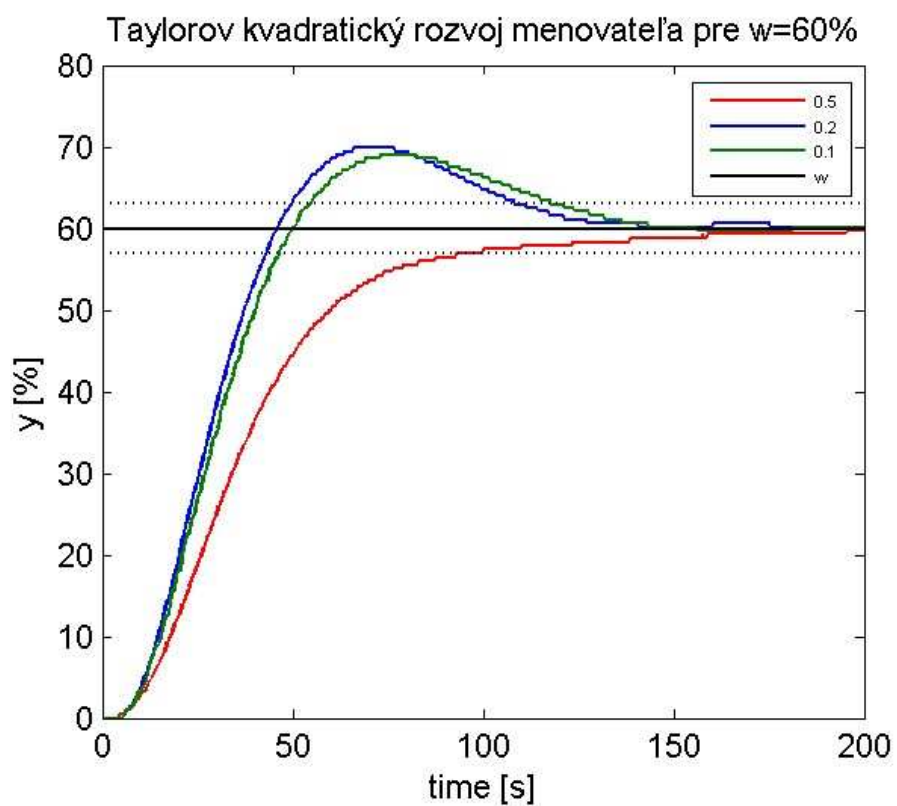
Taylorov kvadratický rozvoj menovateľa $w = 60\%$					
Zr	Ti [s]	ξ_{cl}	t_{reg} [s]	δ_{max} [%]	$t_{\delta_{max}}$ [s]
0,1322	23,6071	0,5	99,5	-	-
0,3393	24,0000	0,2	108,46	16,5	72
0,236	18,88	0,1	117,96	14,96	77



obr. 26 Priebeh riadenia pre Taylorov kvadratický rozvoj do menovateľa $w = 10\%$



obr. 26 Priebeh riadenia pre Taylorov kvadratický rozvoj do menovateľa $w = 40\%$

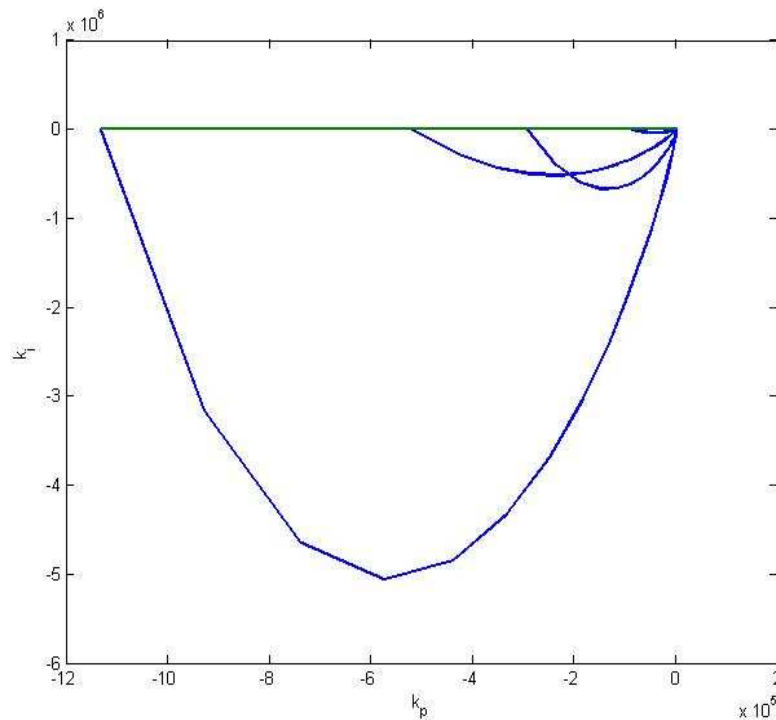


obr. 26 Regulácia pre Taylorov kvadratický rozvoj do menovateľa $w = 60\%$

Padého kvadratický rozvoj:

$$G = \frac{Z \frac{D^2}{12} s^2 - Z \frac{D}{2} s + Z}{T^2 \frac{D^2}{12} s^4 + (T^2 \cdot \frac{D}{2} + \xi \cdot T \cdot \frac{D^2}{6}) s^3 + (T^2 + \frac{D^2}{12} + \xi \cdot T \cdot D) s^2 + (2 \cdot \xi \cdot T + \frac{D}{2}) s + 1} \quad (14)$$

Z obrázku 27 je zjavné, že pre Padého kvadratický rozvoj neviem nájsť vhodné krivky PI regulátorov a preto preň ani neviem určiť vhodné regulátory spĺňajúce podmienky robustného riadenia.



obr. 27 Vykreslenie stabilných oblastí pre Padého kvadratický rozvoj

6. Záver

V práci som sa venoval riadiacemu systému SIMATIC S7 300 pomocou, ktorého som riadil elektronický model. Postupne som vytvoril programovú časť projektu, ktorá v sebe zahŕňovala: konfiguráciu siete a vstupno – výstupných modulov, programovanie blokov a vytvorenie programu v STEP7, ako aj grafické rozhranie vytvorené v programe WinCC. Cez grafické rozhranie som potom bol schopný riadiť elektrický model.

Hlavnou úlohou mojej práce bolo riadiť daný elektronický systém v plnom rozsahu žiadanej hodnoty pomocou navrhnutých PI regulátorov. Aby som vôbec mohol navrhnúť regulátory musel som najprv daný model identifikovať. Po vykreslení jednotlivých prechodových charakteristík je zjavné že ide o nelineárny systém pričom časová konštanta a dopravné oneskorenie sa výrazne nemenia. Pre návrh regulátorov som potom použil metódu syntézy robustného regulátora. Program mi poskytol lineárne a kvadratické metódy aproximácie dopravného oneskorenia. Pre oba druhy aproximácií sú to Taylorov rozvoj čitateľa, Taylorov rozvoj menovateľa a Padého rozvoj. Regulátory sa mi podarilo navrhnúť len podľa lineárneho Padého rozvoja, Taylorovho kvadratického rozvoja čitateľa a menovateľa. Z každého typu aproximácií som vybral tri PI regulátory, ktoré som navzájom porovnal na základe maximálneho preregulovania $\delta_{\max}$, času maximálneho preregulovania $t_{\delta\max}$ a času regulácie t_{reg} [s]. Najlepšie výsledky ukazoval regulátor navrhnutý na základe Padého lineárneho rozvoja s koeficientom tlmenia $\xi_{\text{cl}} = 0,6$. Avšak na základe toho nie je možné porovnávať jednotlivé metódy aproximácie, ale iba vybrané konkrétne regulátory. Všetky navrhnuté regulátory boli schopné uradiť elektronický model v plnom rozsahu, čo potvrdzujú simulácie.

Literatúra

- [1] Kožka Š., Kvasnica M.: Programovanie PLC SIMATIC 300 (Základná príručka), KIRP, Bratislava 2001
- [2] Bakošová M., Fikar M., Čirka Ľ. :Základy automatizácie, STU, Bratislava 2003
- [3] Puna D.: Robustné riadenie chemických reaktorov: dizertačná práca. 2009
- [4] Katarína V. : Návrh robustných regulátorov pre riadenie chemickotechnologických procesov: Písomná práca k dizertačnej skúške. STU, Bratislava 2008
- [5] Paulen R., Riadenie systémov s dopravným oneskorením: Bakalárska práca. KIRP, Bratislava 2006
- [6] Vaneková K., Bakošová M., Závacká J.: Robust PI controllers for systems with transport delay. International Conference Cybernetics and Informatic, Vyšná Boca (Slovakia) 2010.
- [7] Vaneková K.: Riadenie pomocou priemyselného riadiaceho systému SIMATIC, Diplomová práca. KIRP, Bratislava 2006.
- [8] Klaučo M.: Tvorba GUI pre syntézu robustných PI regulátorov, Bakalárska práca. KIRP, Bratislava 2010.