

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKÉJ A POTRAVINÁRSKEJ TECHNOLOGIE
ÚSTAV INFORMATIZÁCIE, AUTOMATIZÁCIE A MATEMATIKY

**RIADENIE SYSTÉMU S DOPRAVNÝM ONESKORENÍM POMOCOU
PRIEMYSELNÉHO RIADIACEHO SYSTÉMU SIMATIC**

BAKALÁRSKA PRÁCA

FCHPT -5415-50943

Bratislava 2010

Ján Rusnák

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKÉJ A POTRAVINÁRSKEJ TECHNOLOGIE
ÚSTAV INFORMATIZÁCIE, AUTOMATIZÁCIE A MATEMATIKY

**RIADENIE SYSTÉMU S DOPRAVNÝM ONESKORENÍM POMOCOU
PRIEMYSELNÉHO RIADIACEHO SYSTÉMU SIMATIC**

BAKALÁRSKA PRÁCA

FCHPT -5415-50943

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

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

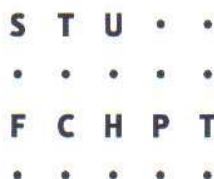
Školiace pracovisko: Oddelenie informatizácie a riadenia procesov

Ústav informatizácie, automatizácie a matematiky

Vedúci záverečnej práce/školiteľ: Ing. Katarína Matejičková

Bratislava 2010

Ján Rusnák



ZADANIE BAKALÁRSKEJ PRÁCE

Študent: **Ján Rusnák**
ID študenta: **50943**
Študijný program: **automatizácia, informatizácia a manažment v chémii a potravinárstve**
Kombinácia študijných odborov: **5.2.14 automatizácia, 5.2.52 priemyselné inžinierstvo**
Vedica práce: **Ing. Katarína Vaneková**
Miesto vypracovania: **Bratislava**

Názov práce: **Riadenie systému s dopravným oneskorením pomocou priemyselného riadiaceho systému SIMATIC**

Špecifikácia zadania:

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

Rozsah práce: **45**

Riešenie zadania práce od: **15. 02. 2010**
Dátum odovzdania práce: **22. 05. 2010**


Ján Rusnák
Študent




prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
Vedúci pracoviska


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

Touto cestou si dovoľujem poďakovať vedúcej bakalárskej práce Ing. Matejičkovej za odborné vedenie, cenné rady, ústretovosť a ochotu pri vypracovaní bakalárskej práce.

ABSTRAKT

Voľba parametrov regulátora ovplyvňuje vlastnosti riadeného procesu. Vhodným zvolením parametrov je možné zabezpečiť optimálne riadenie, čo je v praxi často spojené s úsporou nákladov. Cieľom tejto bakalárskej práce bolo vytvoriť riadiaci program pre elektronický model s dopravným oneskorením s využitím priemyselného riadiaceho systému *SIMATIC*. Zahŕňa to tvorbu riadiaceho programu v *STEP7* a vytvorenie obrazovky vo *WinCC*. Na syntézu regulátora je potrebné vykonať identifikáciu prenosu elektronického modelu. Po splnení tejto podmienky možno pristúpiť k syntéze regulátora pomocou programu na syntézu robustných PI regulátorov. Porovnaním ukazovateľov kvality riadenia viacerých regulátorov sa určí najvhodnejší z nich.

ABSTRACT

Control process attributes are influenced by right choice of controller parameters. By appropriate parameters it is possible to ensure optimal control. In practice it may be connected with costs saving. Aim of this bachelor thesis was to propose controlling program for electronic model with transport delay using industrial controlling system *SIMATIC*. It contains creating of controlling program in *STEP7* and screen in *WinCC*. It is necessary to identify transfer function of electronic model for controller synthesis. After that there is possible to propose controller by program for robust PI controllers' synthesis. Comparison of quality coefficients will show the most appropriate controller.

OBSAH

Úvod	8
1 Riadiaci systém SIMATIC S7-300	9
1.1 Programovací a konfiguračný software STEP7	9
1.1.1 Vytvorenie projektu	9
1.1.2 Konfigurácia siete	10
1.1.3 Konfigurácia INPUT/OUTPUT modelov	10
1.1.4 Konfigurácia premenných, logické bloky a ich programovanie	12
1.1.5 Logické bloky a ich programovanie	13
1.1.6 Spustenie programu a jeho testovanie.....	14
1.2 Vizualizačný software WinCC	14
1.2.1 Vytvorenie projektu, tagy	15
1.2.2 Vytvorenie vizualizačného rozhrania	15
1.2.3 Vytvorenie trendov a správa archívov	16
1.2.4 Aktivácia projektu.....	18
2 Elektronický model	19
3 Syntéza regulátora	21
3.1 Identifikácia prenosu elektrického modelu	21
3.2 Syntéza robustného PI regulátora, metóda umiestnenia pólov	24
3.3 Návrh regulátorov	24
3.4 Riadenie navrhnutými regulátormi.....	30
Záver	35
Literatúra	36

ÚVOD

Úlohou práce je navrhnuť riadiaci program prostredníctvom priemyselného riadiaceho systému *SIMATIC* pre elektronický model druhého rádu s dopravným oneskorením a otestovať regulátory navrhnuté programom pre syntézu robustných PI regulátorov. Jednou z hlavných častí bolo vytvorenie riadiaceho programu v *STEP7*, kde sa konfiguruje hardware, sieť, premenné a naprogramuje funkčný blok. Potom sa vo *WinCC* vytvorí grafické okno, prostredníctvom ktorého sa dá proces sledovať a v prípade potreby doň možno aj zasiahnuť. K návrhu regulátorov je najprv potrebné vykonať identifikáciu prenosu zariadenia. Samotný návrh regulátorov je realizovaný pomocou programu, ktorý kombinuje metódu syntézy robustných regulátorov s metódou umiestnenia pólov. Funkčnosť regulátorov sa testuje priamo na elektronickom modeli. V poslednej časti sú vyhodnotené priebehy regulácii na základe ukazovateľov kvality.

1 RIADIACI SYSTÉM SIMATIC S7-300

Riadiaci systém *SIMATIC S7-300* je zložený zo štyroch hlavných častí tvoriacich jeden kompaktný celok:

- Priemyselný Rack PC 830 patrí do triedy PC vhodných na použitie v priemysle.
- Pracovná stanica *SIMATIC S7-300* je univerzálny PLC použiteľný v širokom rozsahu priemyselnej automatizácie. Skladá sa z častí:
 - Napájací modul PS 307 5A
 - Centrálna procesorová jednotka CPU 315- 2 DP
 - Modul rozhrania IM 360
 - Vstupno-výstupné Input/Output (I/O) moduly
- Prepojenie medzi PC a pracovnou stanicou *SIMATIC* je realizované prostredníctvom *multipoint interface* (MPI) kábla
- *STEP7* a *WinCC* je programátorský a vizualizačný softvér, ktorý umožňuje programovanie PLC, sprístupňuje používateľovi dáta a je ním možné prehľadne monitorovať a riadiť reálne procesy

1.1 Programovací a konfiguračný software *STEP7*

STEP7 je štandardný programovací software slúžiaci na tvorbu logických riadiacich programov. Funguje na princípe troch rovnocenných programovacích jazykov a umožňuje riešiť široké spektrum úloh v rôznych oblastiach priemyselného riadenia.

1.1.1 Vytvorenie projektu

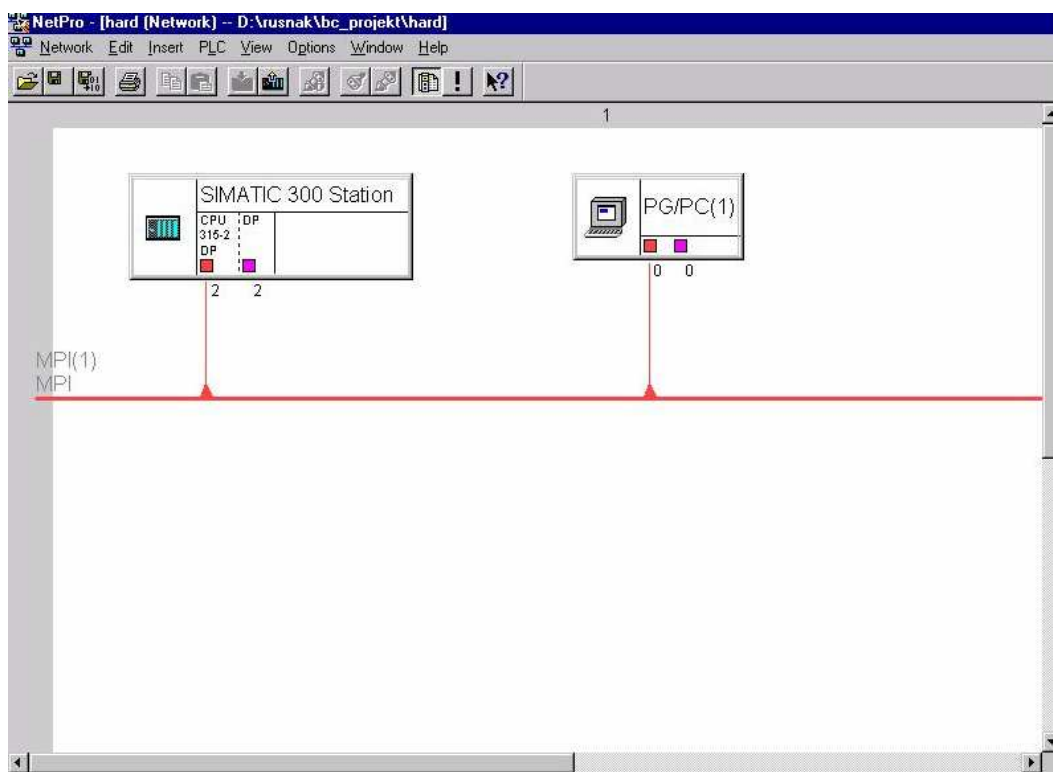
Pomocou projektového manažéra sa vytvára projekt, v ktorom sú automaticky vytvorené jednotlivé podzložky. Tieto je možné ďalej ľubovoľne upravovať a dopĺňať do nich ďalšie informácie. Všetko je prehľadne usporiadané v stromovej štruktúre, kde sa najvyššie nachádza projekt, pod ním je pracovná stanica, ďalej použitý typ CPU a nakoniec jednotlivé programy.

1.1.2 Konfigurácia siete

Konfigurácia komunikačnej siete predstavuje ďalší krok potrebný k tvorbe funkčného riadiaceho programu v *STEP7*. Umožňuje komunikáciu medzi PC a príslušnými pracovnými stanicami. V tomto prípade (obr. 1) je prepojenie PC a pracovnej stanice realizované prostredníctvom MPI kábla. Adresy, ktoré sú priradené každému objektu pripojenému či už MPI alebo PROFIBUS spojením, sa nazývajú NOD-y [1].

Platia pre ne určité pravidlá:

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



Obr. 1 Konfigurácia siete

1.1.3 Konfigurácia INPUT/OUTPUT modelov

Prepojenie medzi snímačmi a akčnými členmi je realizované prostredníctvom riadiacej stanice *SIMATIC S7-300*. Do riadiacej stanice vedú zásuvné analógové vstupno-výstupné

I/O moduly, ktoré spracovávajú prúdový alebo napäťový signál. K I/O modulom sú pripájané jednotlivé zariadenia, ktoré sa dajú monitorovať a riadiť pomocou *SIMATIC-u* [2].

Slot	Module	Order number	Firmware	MPI address	I address	Q address	Comment
1	PS 307 2A	6ES7 307-1EA00-0AA0					
2	CPU315-2 DP(1)	6ES7 315-2AF03-0AB0		2			
3	IM 360	6ES7 360-3AA01-0AA0			1023*		
4	AI4/AO2x8/8Bit	6ES7 334-0CE01-0AA0			256...263	256...259	
5	AI4/AO2x8/8Bit	6ES7 334-0CE01-0AA0			272...279	272...275	
6	AI4/AO2x8/8Bit	6ES7 334-0CE01-0AA0			288...295	288...291	
7	AI4/AO2x8/8Bit	6ES7 334-0CE01-0AA0			304...311	304...307	
8	AI4/AO2x8/8Bit	6ES7 334-0CE01-0AA0			320...327	320...323	
9							
10							
11							

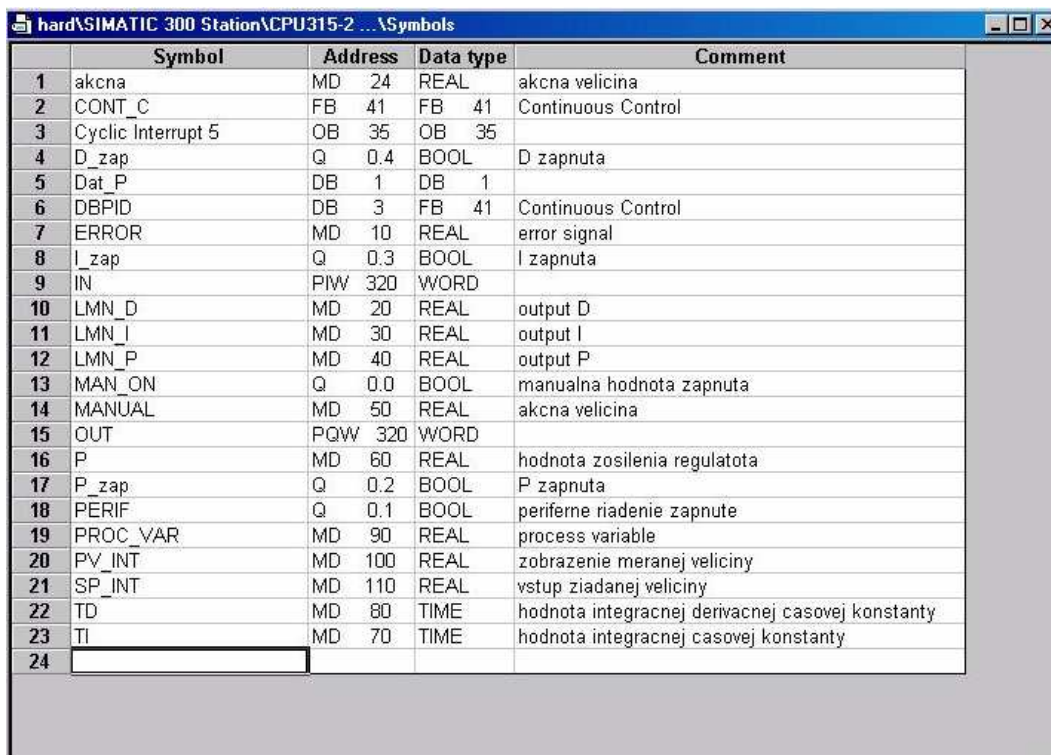
Obr. 2 Konfigurácia hardwaru

Konfigurácia INPUT/OUTPUT (I/O) modulov sa vykonáva v okne *Hardware configuration*, kde sa nastavujú jednotlivé zapojené moduly. Nachádza sa tam tzv. Rail, ktorý predstavuje celú pracovnú stanicu *SIMATIC S7-300*. Jeho jednotlivé riadky sú sloty, v ktorých sa definujú konkrétne I/O moduly [1]. Pri konfigurácii I/O modulov tiež platia určité pravidlá:

1. Slot 1 je rezervovaný pre PS moduly.
2. Slot 2 je rezervovaný pre CPU. Ak CPU v danom Rail-e nie je, Slot 2 zostáva prázdny.
3. Slot 3 je rezervovaný pre IM (*Interface Modul*) moduly. Ak IM v danom Rail-e nie je Slot 3 zostáva prázdny.
4. Sloty 4-11 sú rezervované pre I/O moduly.

5. Maximálny počet použitých Rail-ov je 4.

Konfigurácia je správna, ak sa moduly nachádzajúce sa v okne *Hardware configuration* presne zhodujú so skutočne použitými modulmi (obr. 2).



	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

1.1.4 Konfigurácia premenných, logické bloky a ich programovanie

Absolútna adresa každého vstupu aj výstupu je automaticky definovaná v *Hardware configuration*. Každá absolútna adresa môže byť nahradená ľubovoľnou symbolickou premennou. Už počas konfigurácie I/O modulov je možné vytvárať symbolické premenné. Takisto sa dajú premenné vytvárať aj pomocou symbolickej tabuľky v okne *Symbol editor* (obr. 3). Umožňuje pridávať nové symbolické premenné alebo upravovať už existujúce, ktoré boli vytvorené počas konfigurácie I/O modulov a preniesli sa do symbolickej tabuľky. Ďalej je možné priradiť premennú aj použitým blokom, čo umožňuje väčšiu prehľadnosť. Výhodou symbolickej tabuľky je, že nie je nutné si zdefinovať všetky premenné na začiatku, ale je ich možné pridávať aj počas programovania jednotlivých blokov.

1.1.5 Logické bloky a ich programovanie

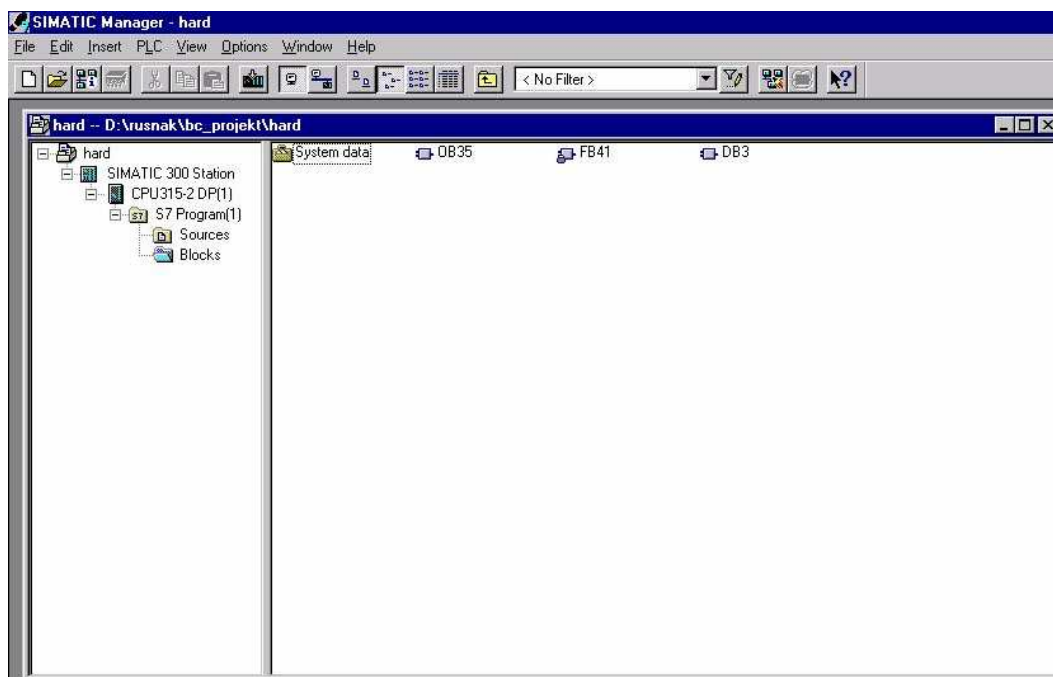
Programovanie logických blokov sa vykonáva v troch rôznych programovacích jazykoch, ktoré sú si navzájom rovné:

Function block diagram(FBD)	- programovanie blokovou schémou
Ladder logic(LAD)	- programovanie cez schematické zapojenie
Statement list(STL)	- programovanie pomocou príkazov

Pre môj projekt som si zvolil riadiaci program napísaný FBD kvôli jeho prehľadnosti.

STEP7 obsahuje rôzne typy blokov [1], z ktorých každý má svoju funkciu:

- OB- sú organizačné bloky, ktoré tvoria základ užívateľského programu.
- FB- sú samostatne programovateľné bloky obsahujúce „pamäť“, do ktorej sa ukladajú vnútorné premenné. Každý funkčný blok pracuje samostatne.
- FC- sú funkcie. Neobsahujú „pamäť“, obsahujú rutiny s najčastejšie používanými funkciami.
- DB- sú dátové bloky, do ktorých sa ukladajú užívateľské dáta.
- SFB a SFC- sú systémové funkčné bloky a systémové funkcie integrované priamo v S7 procesore. Umožňujú prístup k niektorým dôležitým systémovým funkciám.



Obr. 4 Program a jeho bloky

Bloky umožňujú vykonávať rôzne logické operácie a je nimi možné riadiť aj reálny proces. Blok OB35 reprezentuje hlavný program pracujúci cyklicky s časom snímania 100 ms. V ňom sa nachádza blok FB41 predstavujúci blok PID regulátora. K bloku FB41 je vytvorený DB blok k nemu asociovaný, čo znamená, že poskytuje informácie len pre tento FB blok (obr. 4). Okrem asociovaného DB bloku existuje aj spoločný DB blok, ktorý sprístupňuje informácie všetkým FB blokom.

1.1.6 Spustenie programu a jeho testovanie

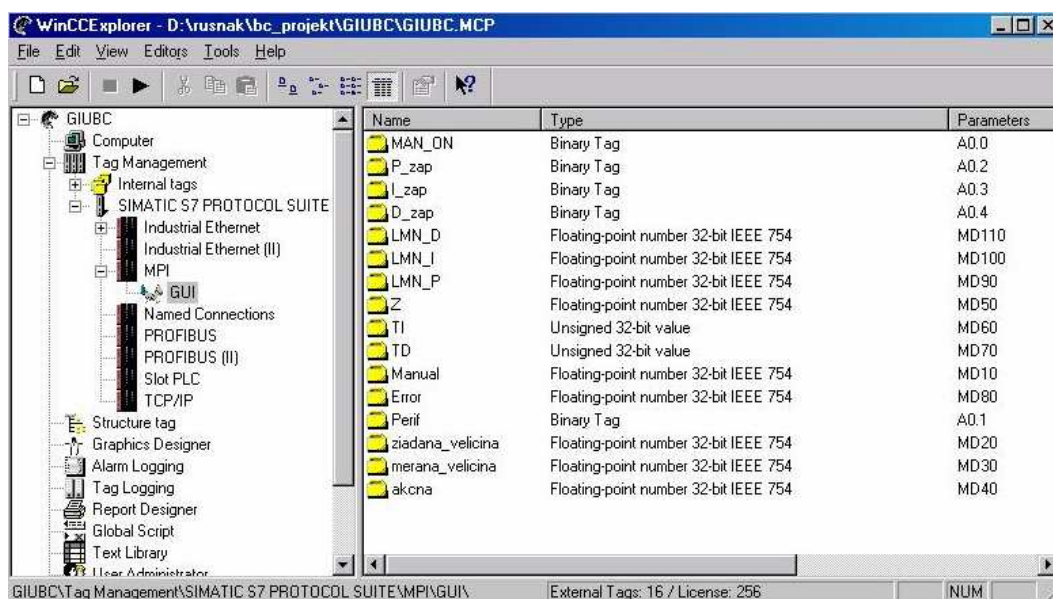
Predtým ako sa použijú logické a regulačné obvody v reálnom procese, tak je vhodné ich najprv otestovať. Zapne sa pracovná stanica a zvolí sa jeden z pracovných módov. Najprv sa musí nakopírovať program do RAM pamäte CPU. Táto operácia sa vykonáva v STOP móde, kde program ešte nebeží.

Po nakopírovaní programu sa prejde buď do RUN módu, čo je normálny pracovný režim, alebo sa zvolí RUN-P mód, kde sa program testuje cez tabuľku premenných. Okrem toho existuje ešte štvrtý mód M RES, ktorým sa zresetuje pamäť CPU. Testovanie prebieha ďalej vytvorením online spojenia, ktoré monitoruje vybraný blok a testujú sa logické operácie v ňom.

Ak logická operácia neprebehne, budú jej bloky ohraničené prerušovanou modrou, čiarou. Ak došlo k chybe pri pripojení bloku alebo pri definícii nejakej premennej, tak budú bloky ohraničené červenou farbou a nakoniec, ak všetko funguje správne, tak sú bloky ohraničené zelenou farbou [2].

1.2 Vizualizačný software WinCC

Vizualizačný software WinCC slúži na vytvorenie grafického prostredia riadiaceho programu. Vďaka nemu je možné aktívne zasahovať do riadenia reálneho procesu prostredníctvom zmeny niektorej z veličín. Nefunguje samostatne, ale je napojený na program STEP7, z ktorého čerpá informácie vďaka prepojeniu cez tagy.



Obr. 5 Tagy

1.2.1 Vytvorenie projektu, tagy

Na začiatku sa vytvorí nový projekt a pomenuje sa. Prostredníctvom *Tag Management* sa definuje rozhranie zabezpečujúce komunikáciu *WinCC* s PLC. Komunikácia je vykonávaná prostredníctvom tagov.

Tagy sú virtuálne dátové kanály slúžiace na prenos dát medzi riadiacim programom v *STEP7* a *WinCC*. Prenášajú informácie z určitej pamäťovej adresy, ktorá vykonáva úlohu zásobníka dát, a poskytujú ich priamo užívateľovi [1]. Rozlišujú sa dva druhy tagov:

- Interné tagy – zabezpečujú udržiavanie interných premenných (obr. 5)
- Externé tagy – zabezpečujú komunikáciu s PLC, s ich pomocou je možné ovládať pripojené zariadenia napr. tagy pre detekciu vstupných a výstupných signálov

1.2.2 Vytvorenie vizualizačného rozhrania

K tvorbe vizualizačného rozhrania dochádza v *Graphics Designer*-i. Tento editor je súčasťou *WinCC* a umožňuje používateľovi vytvoriť vlastné grafické rozhranie s ľubovoľným rozmiestnením ovládacích prvkov, čo značne zvyšuje prehľadnosť pri

riadení reálneho procesu. Objekty upravované s jeho pomocou sa delia na dve základné skupiny.

Prvou z nich sú statické objekty, ktoré tvoria pozadie každej schémy. Môžu to byť texty, rôzne zariadenia. Najjednoduchšie z nich sa nachádzajú priamo na palette nástrojov, zložitejšie z nich možno nájsť v knižnici *Graphics Designer*-a. Druhú skupinu tvoria dynamické objekty. Ich charakteristickou vlastnosťou je, že môžu buď ovplyvňovať vznikajúce udalosti alebo môžu byť týmito udalosťami ovplyvňované.

Ako jeden z príkladov dynamického objektu možno uviesť textové pole *I/O Field* nachádzajúce sa v strome *Smart Objects* na palette objektov [1]. Môže byť charakteru:

- vstupného (input)- možno doň zapisovať, čím sa daná hodnota vloží do príslušného tagu
- výstupného (output)- jeho hodnota sa mení s meniacou sa hodnotou príslušného tagu
- kombinovaného (both)

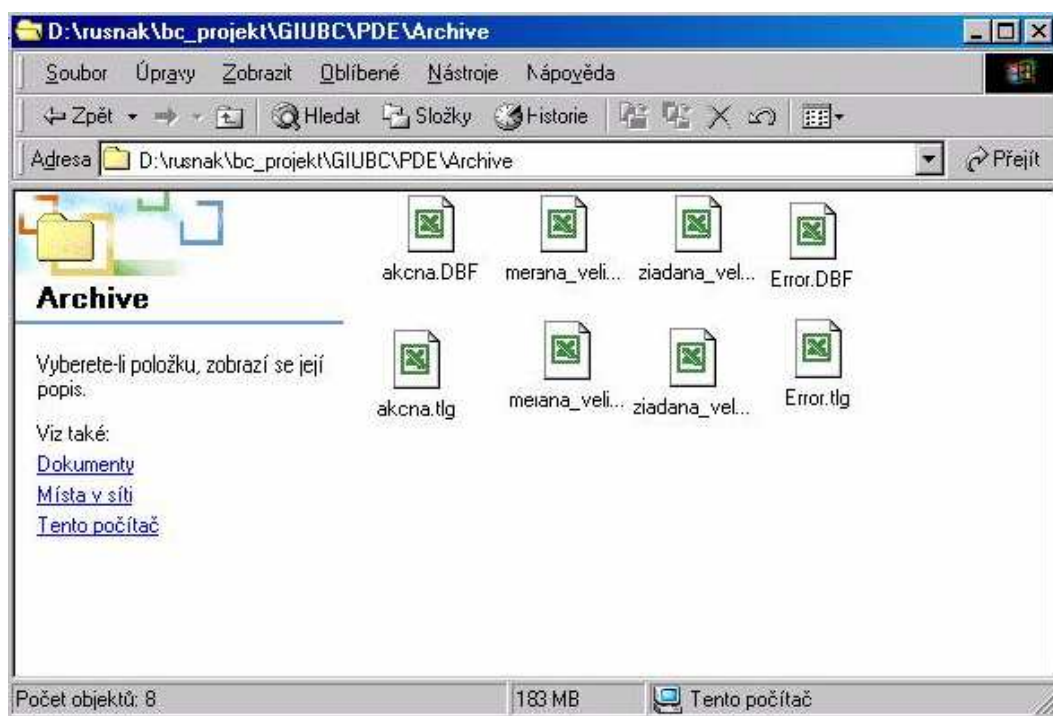
Kvôli prehľadnosti som na obrazovku umiestnil hodnoty všetkých parametrov regulátora, hodnoty meraných veličín a takisto ich časový priebeh.

1.2.3 Vytvorenie trendov a správa archívov

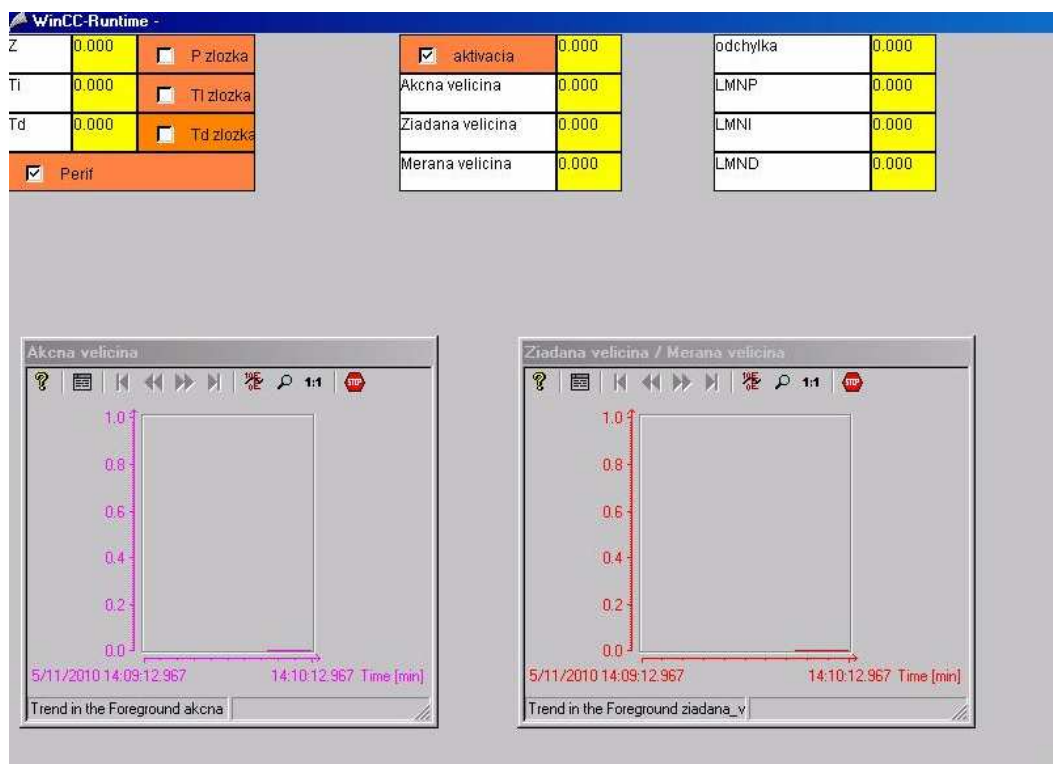
Trendy slúžia na zobrazenie nameraných údajov za vybrané časové obdobie. Medzi ich hlavné úlohy patrí tvorba a správa archívov a taktiež samotné nastavenie vizualizačných prvkov.

Archívy (obr. 6) je možné ukladať na pevný disk alebo do pamäte. Neustále sa do nich ukladajú dáta z meraní. Je dôležité priradiť archívu správny tag, ktorého hodnota sa bude doň ukladať a takisto určiť aj počet meraní. Informácie uložené v archívoch je možné ďalej spracovať tabuľkovými programami ako napr. *MS Excell*.

K tomu, aby bolo možné si prezerat' namerané údaje priamo na obrazovke počas riadenia procesu (obr. 6) slúži prvok *WinCC Online Trend Control* (trendový graf). Po jeho umiestnení na obrazovku treba nastaviť spojenie s archívom, z ktorého sa budú čerpať údaje. V položke *Properties* je možné nastaviť požadované parametre ako napríklad časový interval, za ktorý sa majú hodnoty zobrazit'. Vytvorená vizualizačná obrazovka sa nachádza na obr. 7.



Obr. 6 Archívy



Obr. 7 Grafické prostredie

1.2.4 Aktivácia projektu

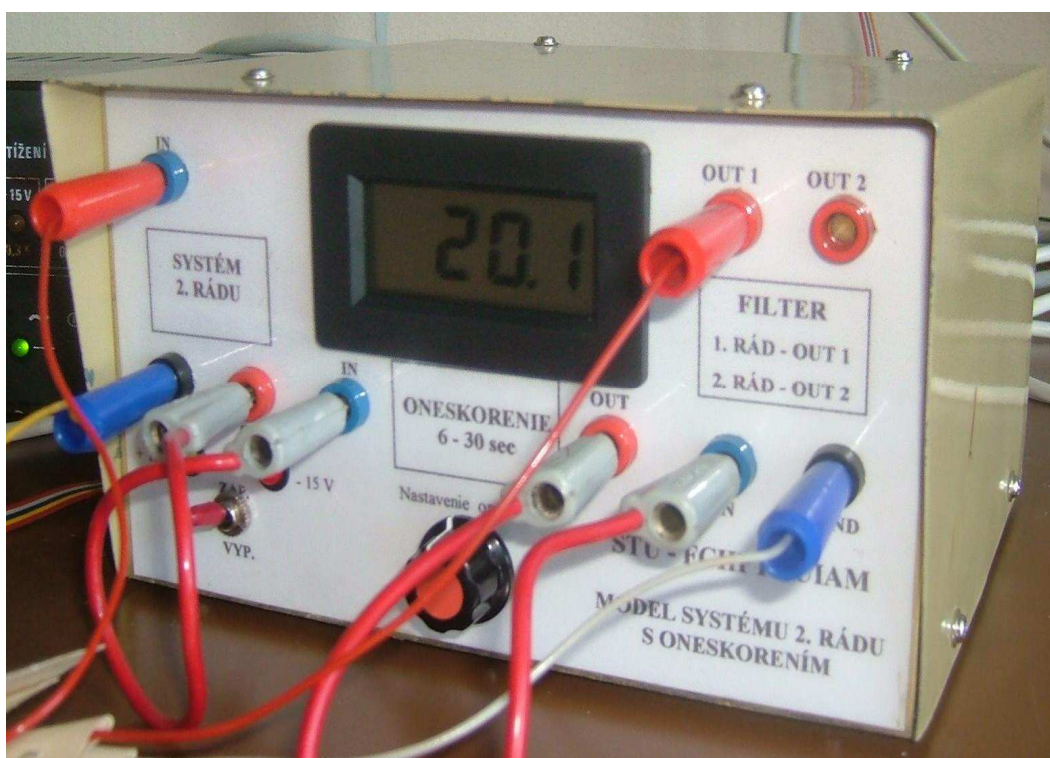
Poslednou časťou pri tvorbe grafického rozhrania je samotná aktivácia projektu. K tomu, aby projekt bol schopný komunikácie s PLC musí byť skompilovaný a aktívny. Pred spustením projektu je vhodné zvoliť si moduly, ktoré sa spustia pri jeho štarte. S ich pomocou je možné zadávať hodnoty do schémy, či upravovať si zobrazenie trendov. Tieto moduly sa nastavujú vo vlastnostiach zložky *Computer* v záložke *Startup*.

V mojom prípade som si zvolil moduly *Graphics Runtime* a *Tag Logging Runtime*. Na to, aby sa zobrazila vytvorená schéma, je treba v ďalšej záložke *Graphics Runtime* vložiť jej názov do kolónky *Start Picture*. Ak sú nasledovné kroky správne vykonané, môže dôjsť k aktivácii projektu a k riadeniu procesu.

2 ELEKTRONICKÝ MODEL

Riadený systém, ktorý som riadil priemyselným systémom *SIMATIC S7-300*, predstavoval elektronický model systému druhého rádu s dopravným oneskorením.

Tento model funguje ako samostatná jednotka (obr. 8) schopná práce aj bez ďalších dodatočných zariadení modelujúcich časové oneskorenie. Nastaviteľné dopravné oneskorenie je od 6 do 30 sekúnd a hodnoty časových konštánt T_1 a T_2 sa pohybujú v rozmedzí hodnôt 5 až 20 sekúnd.



Obr. 8 Elektronický model

Zariadenie je riešené formou blokového systému, v ktorom sú jednotlivé kroky umiestnené na doskách s tlačnými spojmi a prepojené príslušnými riadiacimi signálmi a napájaním. Napájanie je realizované z externého zdroja ± 15 V. V prípade náhodného chybného zapojenia napájacieho napätia je zariadenie istené diódami, zapojenými patričnou polaritou a LED diódy slúžia na indikáciu. Vyvedenie vstupov a výstupov každého bloku na čelnom paneli umožňuje využitie každého bloku samostatne alebo

spoločne po prepojení prepojovacími káblami. Časové oneskorenie je možné meniť gombíkom potenciometra a jeho veľkosť je indikovaná číslcovým meracím zariadením. Filter na vstupe meracieho zariadenia spôsobuje, že je potrebné niekoľko sekúnd počkať na skutočnú hodnotu časového oneskorenia [3].

3 SYNTÉZA REGULÁTORA

K tomu, aby bolo možné elektronický model riadiť je predovšetkým potrebné zistiť jeho prenos a navrhnuť preň vhodný regulátor.

3.1 Identifikácia prenosu elektrického modelu

Identifikáciu prenosu elektrického modelu som realizoval formou spracovania jeho nameranej prechodovej charakteristiky (PCH). Vykonával som niekoľko meraní PCH pri skokovej zmene z $u_0=0$ na $u_\infty=10$, pričom sa postupne menila hodnota dopravného oneskorenia z hodnoty minimálnej na hodnotu maximálnu.

V ďalšom spracovaní nameraných PCH som preložil ich inflexné body dotyčnicou. V miestach, kde sa pretne dotyčnica s rovnobežkami časovej osi prechádzajúcimi hodnotami y_0 a y_∞ , som odčítal dva časové údaje: čas prietahu t_u a čas náběhu t_n . Na určenie zosilnenia systému Z som použil vzťah:

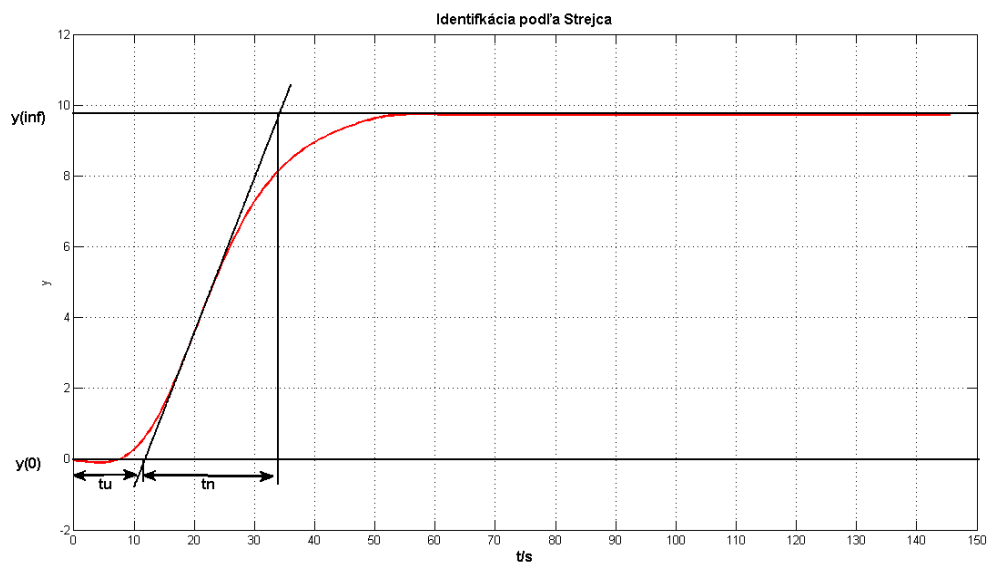
$$Z = \frac{y_\infty - y_0}{u_\infty - u_0} \quad (1)$$

K identifikácii prenosu systému (obr. 8) som využil Strejcovu metódu identifikácie [4]. Identifikovaný prenos má tvar:

$$G(s) = \frac{Z}{(Ts + 1)^n} e^{-Ds} \quad (2)$$

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

Zo získaných údajov t_u a t_n (obr. 9) som určil jednotlivé parametre prenosu, ktoré sú uvedené v tabuľke 1. Z výsledkov identifikácie mi vyšlo, že identifikovaný prenos systému je druhého rádu. Pre hodnotu zosilnenia Z platí, že je konštantné, časová konštanta T spolu s dopravným oneskorením D sa pohybujú v rozmedzí istých hodnôt, čo možno súhrnne nazvať intervaly neurčitosti (tab. 1).

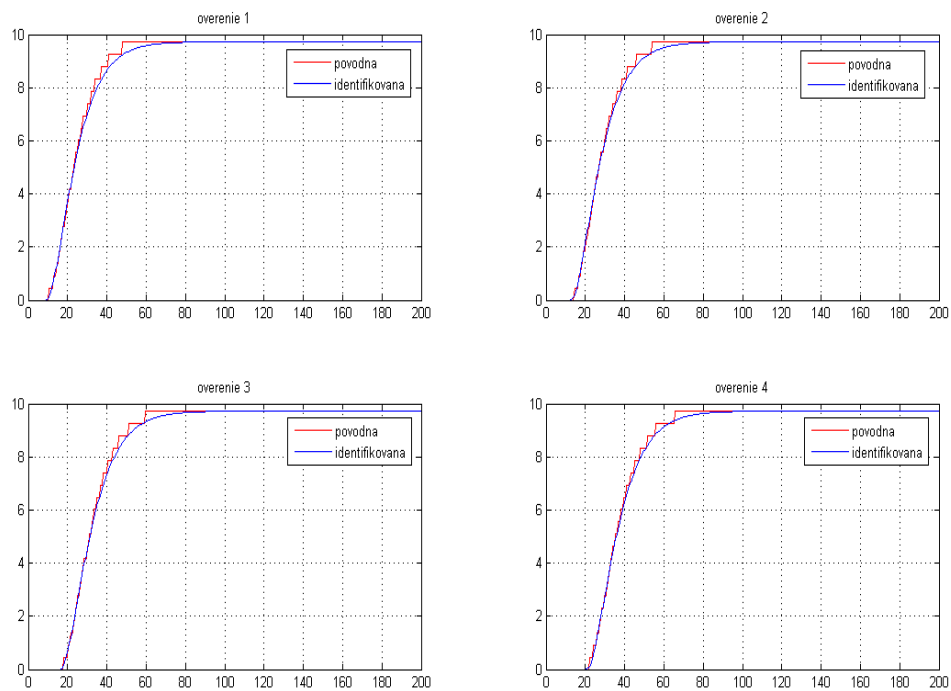


Obr. 9 Ukážka identifikácie

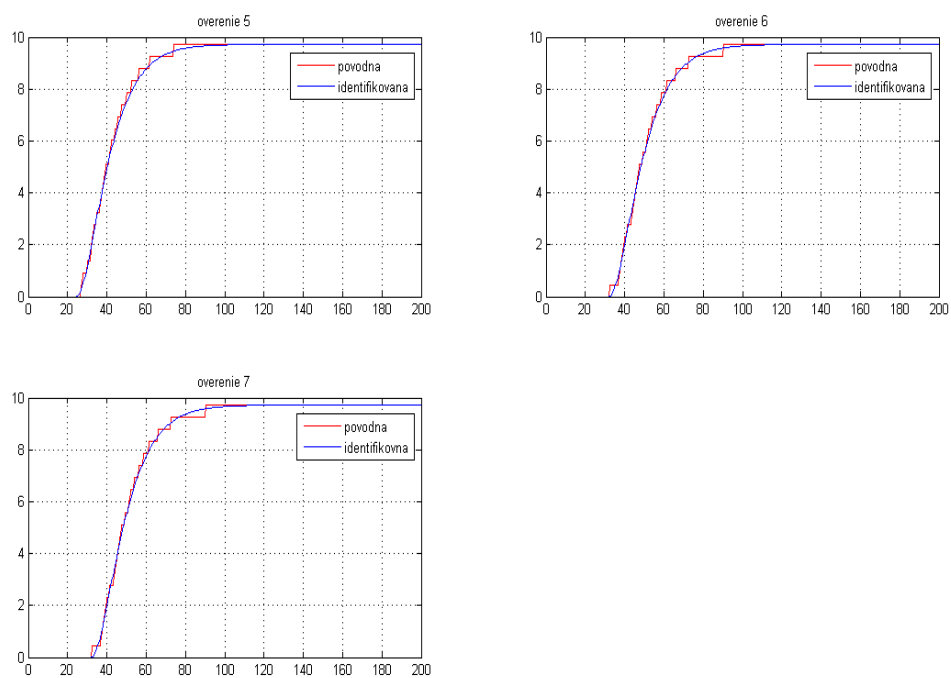
Tabuľka 1 Identifikované parametre

Číslo merania	T/s	D/s	Z
1	8,1922	8,9094	0,9722
2	8,2926	12,4103	0,9722
3	8,7149	16,0074	0,9722
4	8,7435	20,4065	0,9722
5	8,9970	24,4061	0,9722
6	9,1786	27,0081	0,9722
7	9,3290	31,9068	0,9722

Pre overenie každej identifikácie som vykreslil graf porovnania prechodovej charakteristiky identifikovaného prenosu s pôvodnou prechodovou charakteristikou elektronického modelu (obr. 10 - 11).



Obr. 10 Overenie identifikácie prenosov 1- 4



Obr. 11 Overenie identifikácie prenosov 5- 7

3.2 Syntéza robustného PI regulátora, metóda umiestnenia pólov

Pri syntéze robustného PI regulátora je postup založený na hľadaní hraníc stability v (k_p, k_i) -rovine a nasledovnom určení stabilných PI regulátorov. Nájdená hranica stability rozdelí (k_p, k_i) -rovinu na dve časti, t.j. na stabilnú a nestabilnú oblasť. Parametre stabilného regulátora možno získať zvolením bodu zo stabilnej oblasti [5].

Pre systémy s dopravným oneskorením platí, že prenos člena ich dopravného oneskorenia možno aproximovať, t.j. zo systému druhého rádu s dopravným oneskorením vznikne systém vyššieho rádu bez dopravného oneskorenia [6].

Metóda umiestnenia pólov patrí do skupiny analytických metód, pri ktorých je predpokladom znalosť prenosu riadeného systému.

$$(s + \alpha)(s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2) = 0 \quad (3)$$

Pri predpoklade systému druhého rádu a PI regulátora predstavuje vzťah (3) jeden z možných tvarov charakteristickej rovnice uzavretého regulačného obvodu (CHR URO), kde α je pól URO, ω_0 vlastná frekvencia a ξ koeficient relatívneho tlmenia.

Metóda umiestnenia pólov umožňuje zvoliť si póly, a teda ovplyvniť aj správanie sa URO. Voľba pólov má vplyv na stabilitu, periodický alebo aperiodický priebeh výstupu, ktorý sa riadi. Umiestnením týchto pólov viac doľava od imaginárnej osi ako sú póly riadeného procesu spôsobí, že URO bude rýchlejší [4].

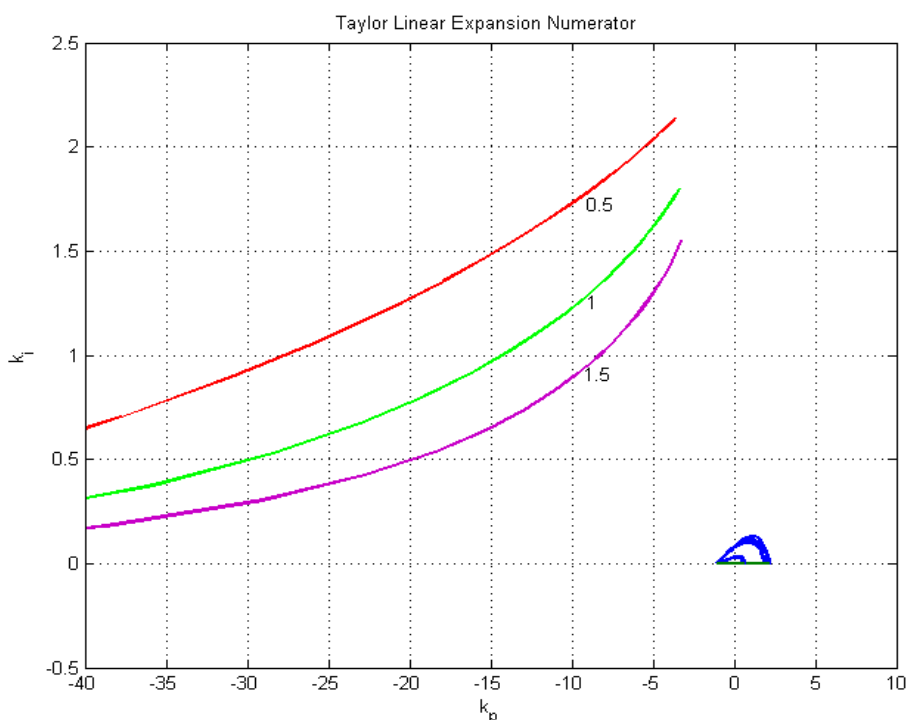
3.3 Návrh regulátorov

Pri návrhu regulátorov som použil GUI pre syntézu robustných PI regulátorov. Umožňuje navrhnuť robustný PI regulátor aproximáciou dopravného oneskorenia lineárnym alebo kvadratickým rozvojom, napr. Taylorovým rozvojom do čitateľa, Taylorovým rozvojom do menovateľa, Padého rozvojom. Takto je možné vybrať robustný regulátor z prieniku všetkých stabilných oblastí. Ak je potrebné, možno pridať metódu umiestnenia pólov, pri ktorej sa parametrom regulátora pridá ďalšie kritérium - koeficient tlmenia ξ [7]. Algoritmus výpočtu robustného PI regulátora si sám určil optimálny rozsah vlastnej frekvencie ω_0 . V prípade potreby ho však bolo možné upraviť.

Prenos systému získaný lineárnou aproximáciou dopravného oneskorenia Taylorovým rozvojom do čitateľa má nasledovný tvar:

$$G = \frac{-ZDs + Z}{T^2s^2 + 2Ts + 1} \quad (4)$$

Na obr. 12 je zobrazený návrh regulátora pre tento typ aproximácie. Program dokázal nájsť stabilnú oblasť, tri krivky reprezentujú návrh regulátora metódou umiestnenia pólov pre tri rôzne hodnoty parametra ξ . Pre riadený model však táto aproximácia nedokáže zabezpečiť vhodný stabilný regulátor, ktorý by spĺňal zadané kritériá.

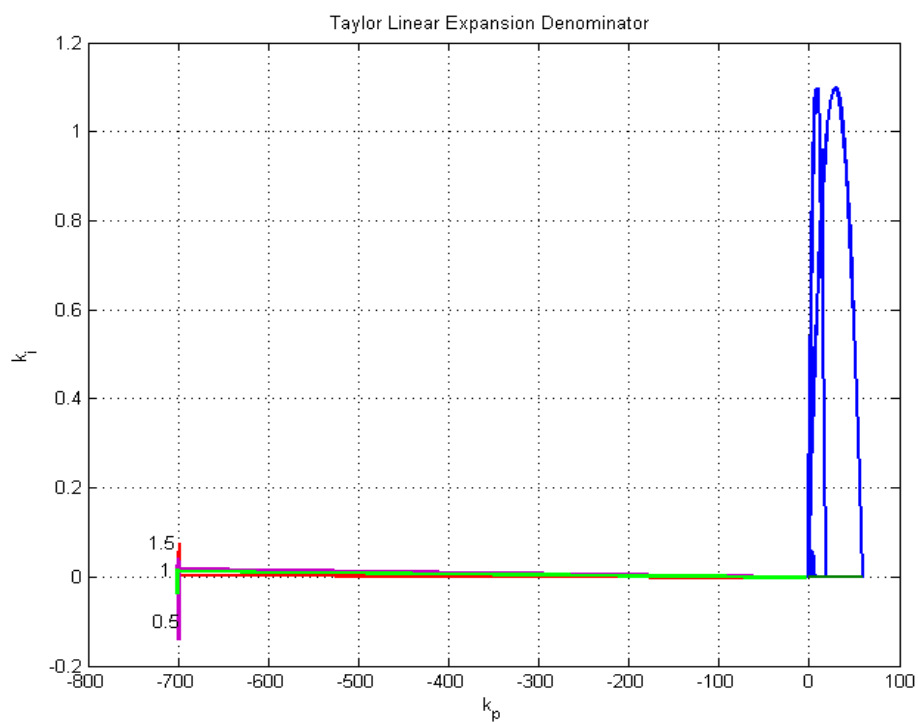


Obr. 12 Návrh regulátora lineárnou aproximáciou Taylorovým rozvojom do čitateľa

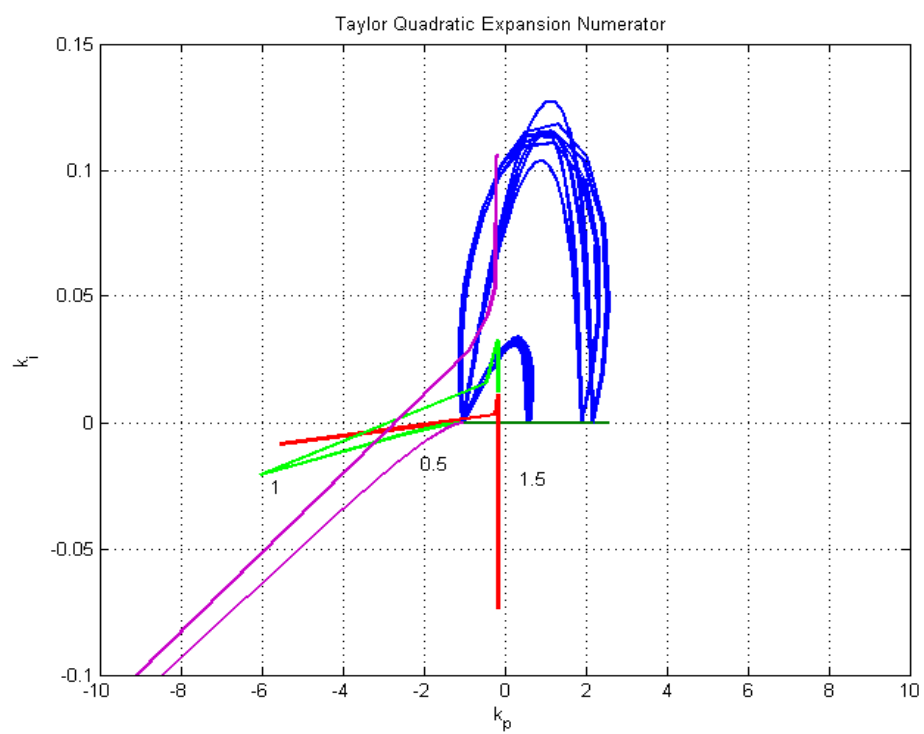
Prenos systému získaný lineárnou aproximáciou dopravného oneskorenia Taylorovým rozvojom do menovateľa má nasledovný tvar:

$$G = \frac{Z}{T^2Ds^3 + (T^2 + 2TD)s^2 + (2T + D)s + 1} \quad (5)$$

Na obr. 13 je zobrazený návrh regulátora pre tento typ aproximácie. Možno vidieť, že nedošlo k prieniku stabilnej oblasti s krivkami reprezentujúcimi návrhy metódou umiestnenia pólov. Z toho vyplýva, že táto aproximácia nedokáže pri daných podmienkach zabezpečiť vhodný stabilný regulátor.



Obr. 13 Návrh regulátora lineárnou aproximáciou Taylorovým rozvojom do menovateľa



Obr. 14 Návrh regulátora kvadratickou aproximáciou Taylorovým rozvojom do čitateľa

Prenos systému získaný kvadratickou aproximáciou dopravného oneskorenia Taylorovým rozvojom do čitateľa má nasledovný tvar:

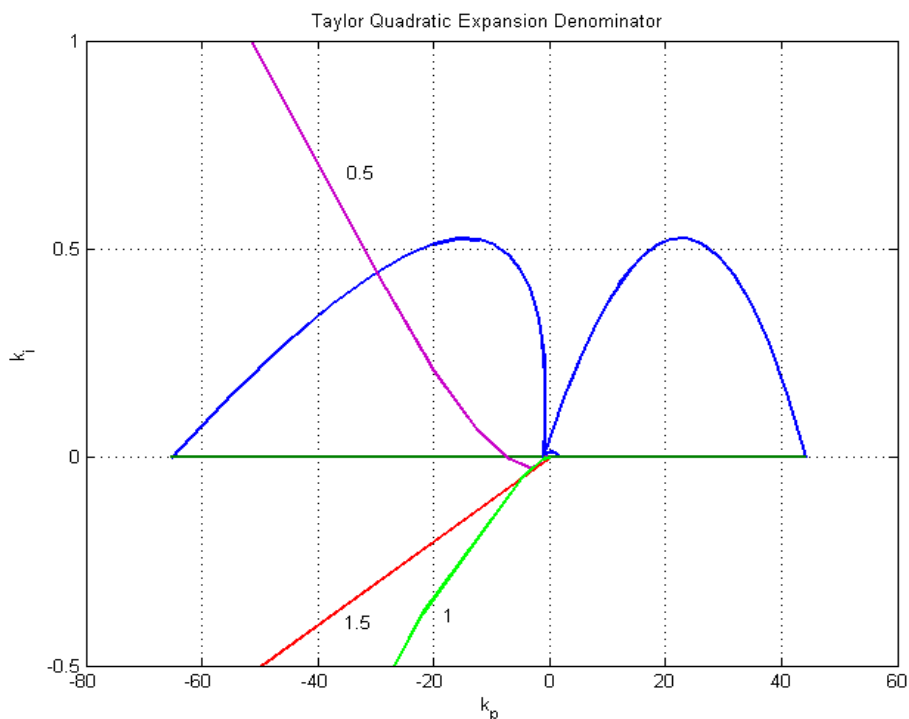
$$G = \frac{Z \frac{D^2}{2} s^2 - ZDs + Z}{T^2 s^2 + 2Ts + 1} \quad (7)$$

Na obr. 14 je zobrazený návrh regulátora pre tento typ aproximácie. Hoci nájdená stabilná oblasť má prienik s krivkami metódy umiestnenia pólov, navrhnuté parametre regulátora nemožno použiť z dôvodu ich zápornej hodnoty.

Prenos systému získaný kvadratickou aproximáciou dopravného oneskorenia Taylorovým rozvojom do menovateľa má nasledovný tvar:

$$G = \frac{Z}{T^2 \frac{D^2}{2} s^4 + (T^2 D + TD^2) s^3 + \left(T^2 + \frac{D^2}{2} + 2TD \right) s^2 + (2T + D)s + 1} \quad (8)$$

Na obr. 15 je zobrazený návrh regulátora pre tento typ aproximácie. Aproximácia je nevhodná, pretože sa nenašla stabilná oblasť.

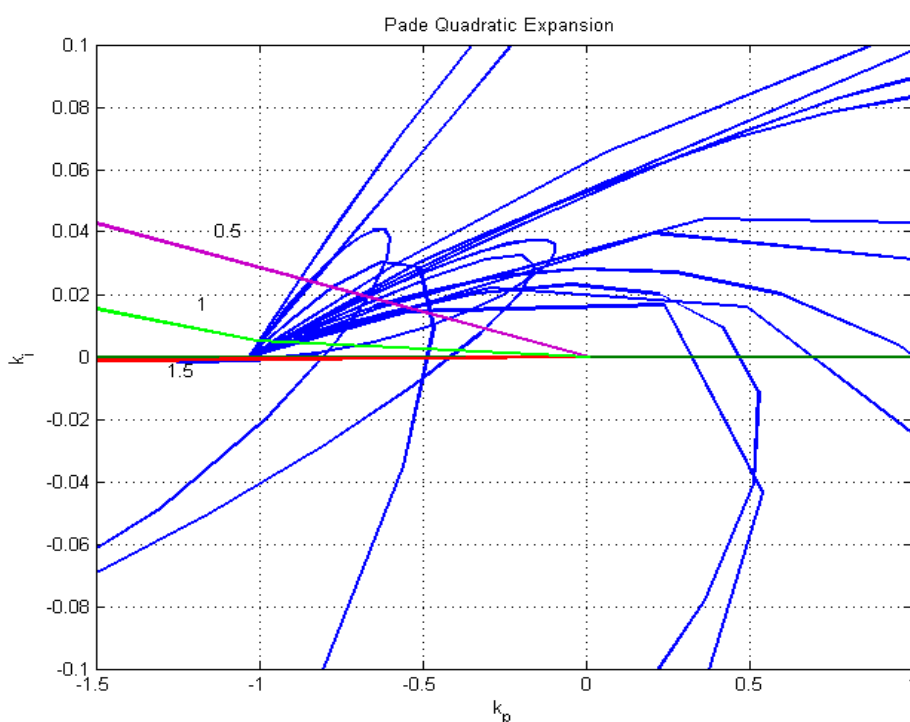


Obr. 15 Návrh regulátora pre aproximáciu kvadratickým Taylorovým rozvojom menovateľa

Prenos systému získaný kvadratickou Padého aproximáciou dopravného oneskorenia má nasledovný tvar:

$$G = \frac{Z \frac{D^2}{12} s^2 - Z \frac{D}{2} s + Z}{T^2 \frac{D^2}{12} s^4 + \left(T^2 \frac{D}{2} + T \frac{D^2}{6} \right) s^3 + \left(T^2 + \frac{D^2}{12} + TD \right) s^2 + \left(2T + \frac{D}{2} \right) s + 1} \quad (9)$$

Na obr. 16 je zobrazený návrh regulátora pre tento typ aproximácie. Aproximácia síce nájde prienik stabilnej oblasti s čiarami metódy umiestnenia pólov, avšak nájdené parametre regulátora nie sú vhodné pre riadený model z dôvodu ich zápornej hodnoty.



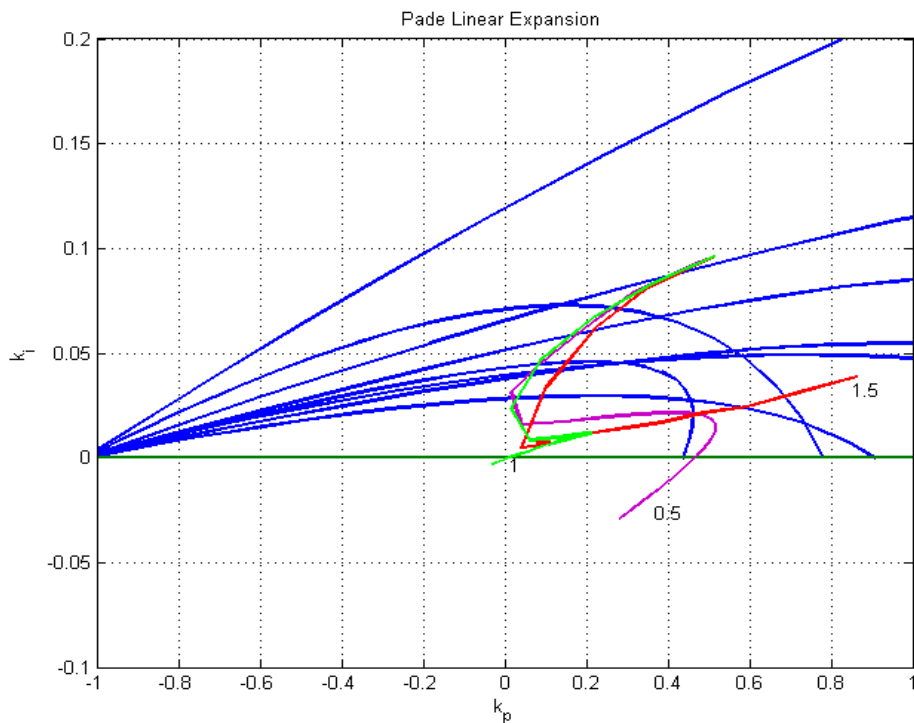
Obr. 16 Návrh regulátora pre kvadratickú Padého aproximáciu

Prenos systému získaný lineárnou Padého aproximáciou dopravného oneskorenia má nasledovný tvar:

$$G = \frac{-Z \frac{D}{2} s + Z}{T^2 \frac{D}{2} s^3 + (T^2 + TD) s^2 + \left(2T + \frac{D}{2} \right) s + 1} \quad (10)$$

Na obr. 17 je zobrazený návrh regulátora pre tento typ aproximácie. Táto aproximácia dopravného oneskorenia je ako jediná z uvedených metód vhodná pre daný riadený model,

prienik stabilnej oblasti a čiar reprezentujúcich metódu umiestnenia pólov zabezpečí dostatok vhodných robustných regulátorov. Parametre navrhnutých regulátorov sa nachádzajú v tab. 2.



Obr. 17 Návrh regulátora pre lineárnu Padého aproximáciu

Tabuľka 2 Parametre navrhnutých regulátorov

Aproximácia	Regulátor číslo	ξ	Z_r	T_i/s
lineárna Padého aproximácia	1	0,5	0,088	5,37195
	2		0,034	1,76289
	3	1	0,032	1,87356
	4		0,023	1,11058
	5	1,5	0,056	4,58837
	6		0,448	22,6515

3.4 Riadenie navrhnutými regulátormi

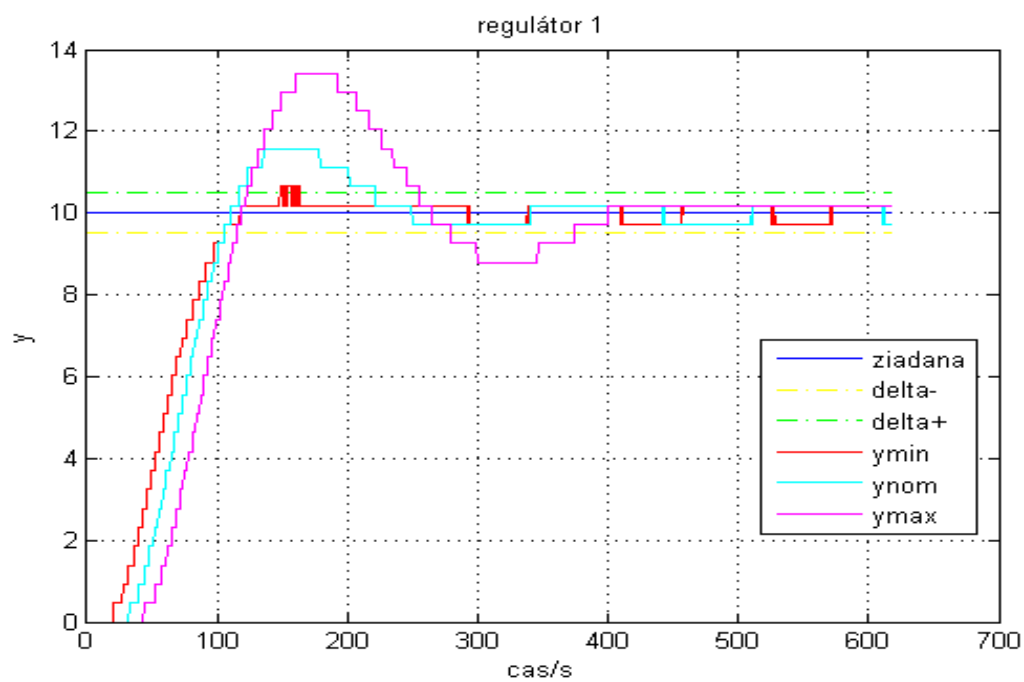
Po návrhu regulátorov som ich testoval na reálnom zariadení. Ako hodnotiace kritérium som si zvolil čas regulácie t_{reg} , t.j. čas kedy sa meraná veličina dostala do δ -okolía predstavujúceho $\pm 5\%$ žiadanej hodnoty, ďalej maximálne preregulovanie σ_{max} a čas maximálneho preregulovania t_{σ} . Pre každý regulátor som vykonal meranie pri minimálnej, maximálnej a nominálnej (strednej) hodnote dopravného oneskorenia. Výsledky riadenia som uviedol v tab. 3 - 5 spolu s obrázkami jednotlivých priebehov riadenia (obr. 18 - 23). Na obr. 18 - 23 je žiadaná veličina reprezentovaná modrou čiarou, δ -okolie žiadanej veličiny je ohraničené žltou a zelenou prerušovanou čiarou. Meraná veličina je zobrazená červenou krivkou pri minimálnej hodnote dopravného oneskorenia, tyrkysovou pri strednej hodnote dopravného oneskorenia a ružovou pri maximálnej hodnote dopravného oneskorenia, ktoré sa nastavuje gombíkom na čelnom paneli elektronického modelu.

Tabuľka 3 Kritériá kvality riadenia pre $\zeta=0,5$

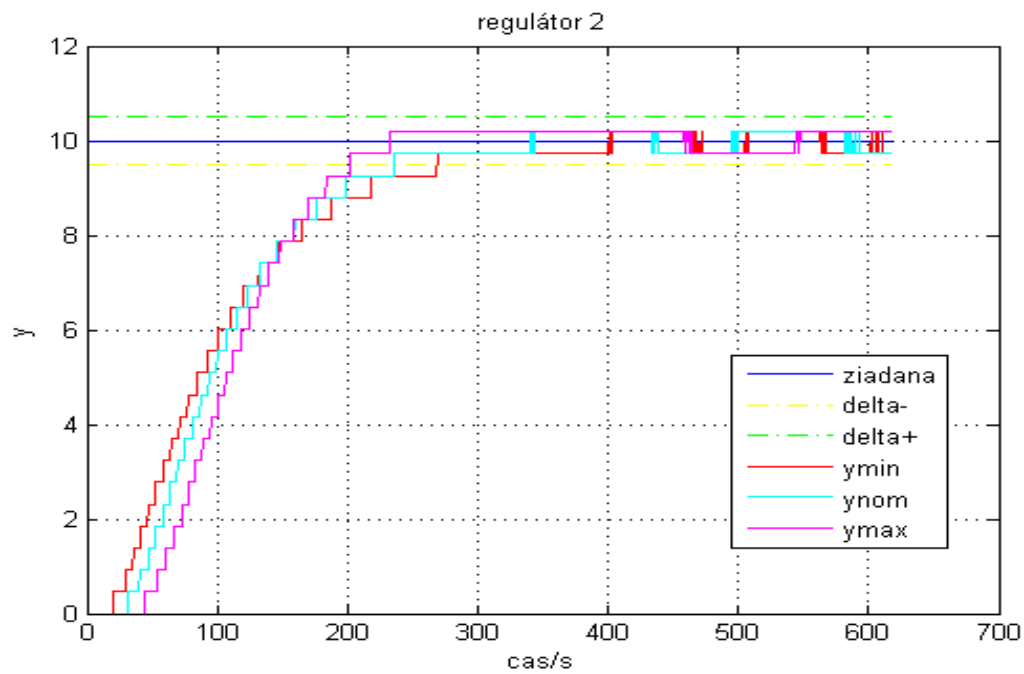
Regulátor	Z_r	T_i/s	D	$\sigma_{max}/\%$	t_{σ}/s	t_{reg}/s
1	0,088	5,37195	D_{min}	6,98	163,5	163,66
			D_{nom}	16,28	178,5	220,66
			D_{max}	34,87	192,5	373,76
2	0,034	1,76289	D_{min}	-	-	268,76
			D_{nom}	-	-	236,26
			D_{max}	-	-	201,76

Tabuľka 4 Kritériá kvality riadenia pre $\zeta=1$

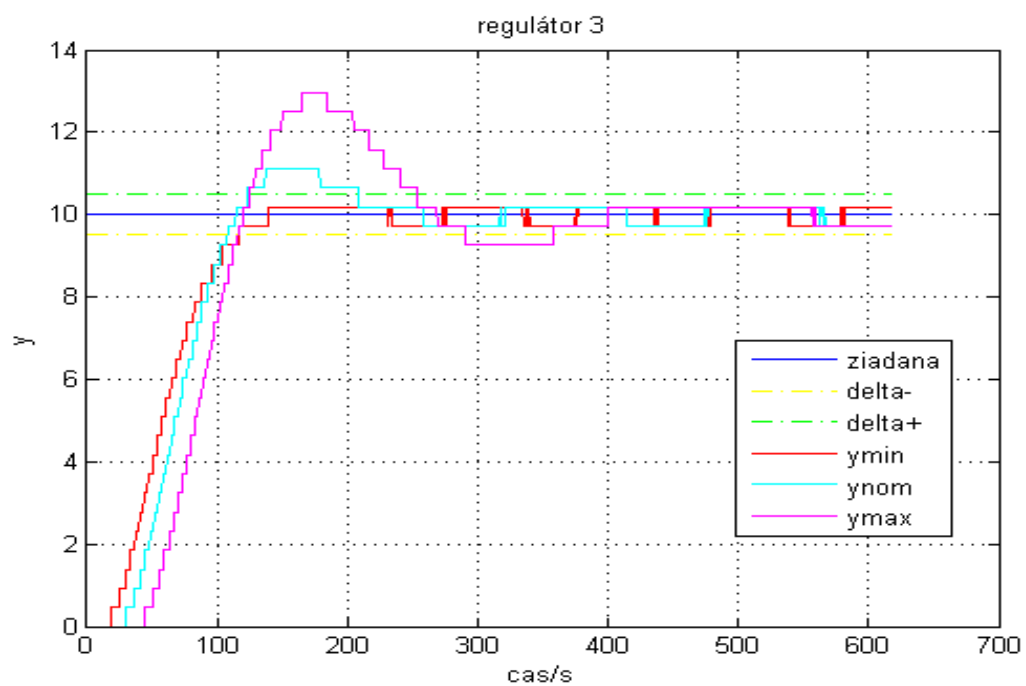
Regulátor	Z_r	T_i/s	D	$\sigma_{max}/\%$	t_{σ}/s	t_{reg}/s
3	0,032	1,87356	D_{min}	-	-	116,26
			D_{nom}	11,63	178,5	208,16
			D_{max}	30,24	184,5	357,76
4	0,023	1,11058	D_{min}	6,98	175	175,16
			D_{nom}	25,58	151	268,76
			D_{max}	44,19	182	485,16



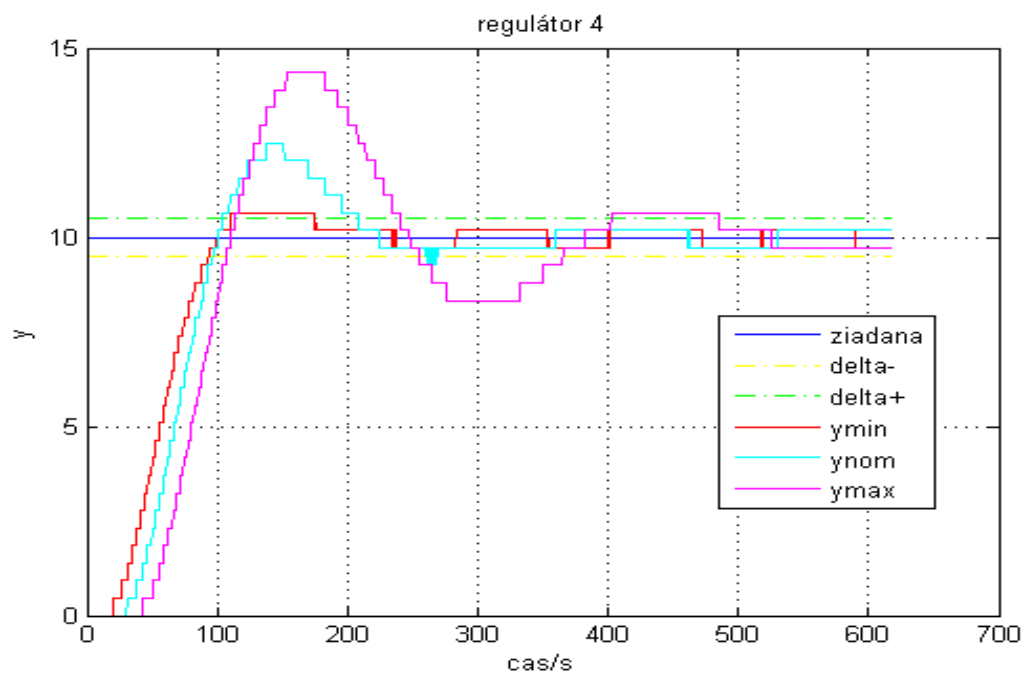
Obr. 18 Riadenie regulátorom č. 1



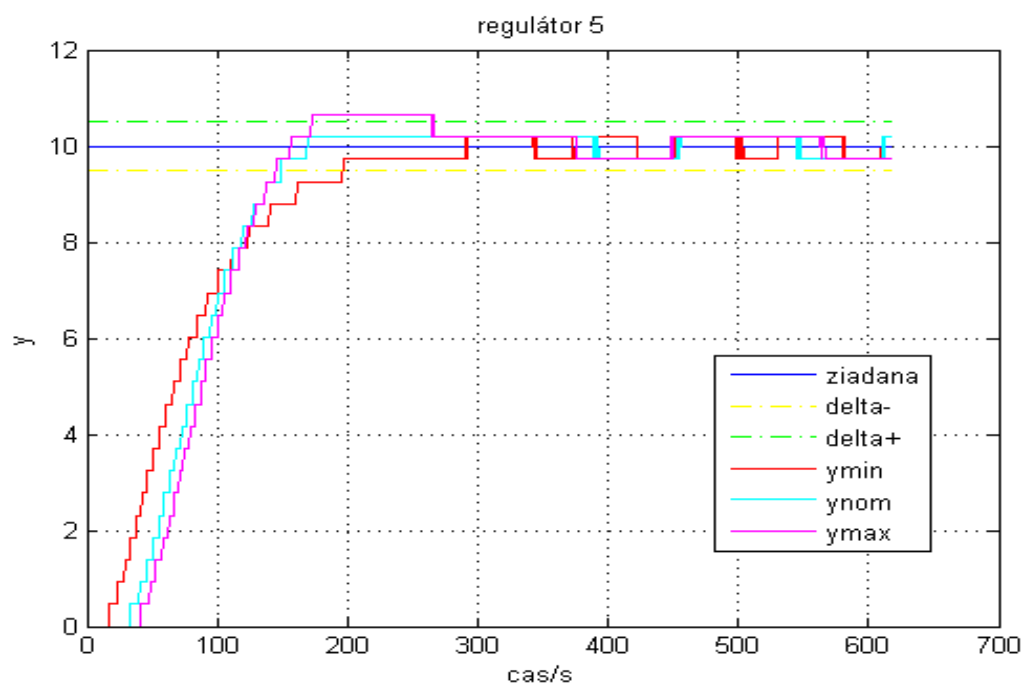
Obr. 19 Riadenie regulátorom č. 2



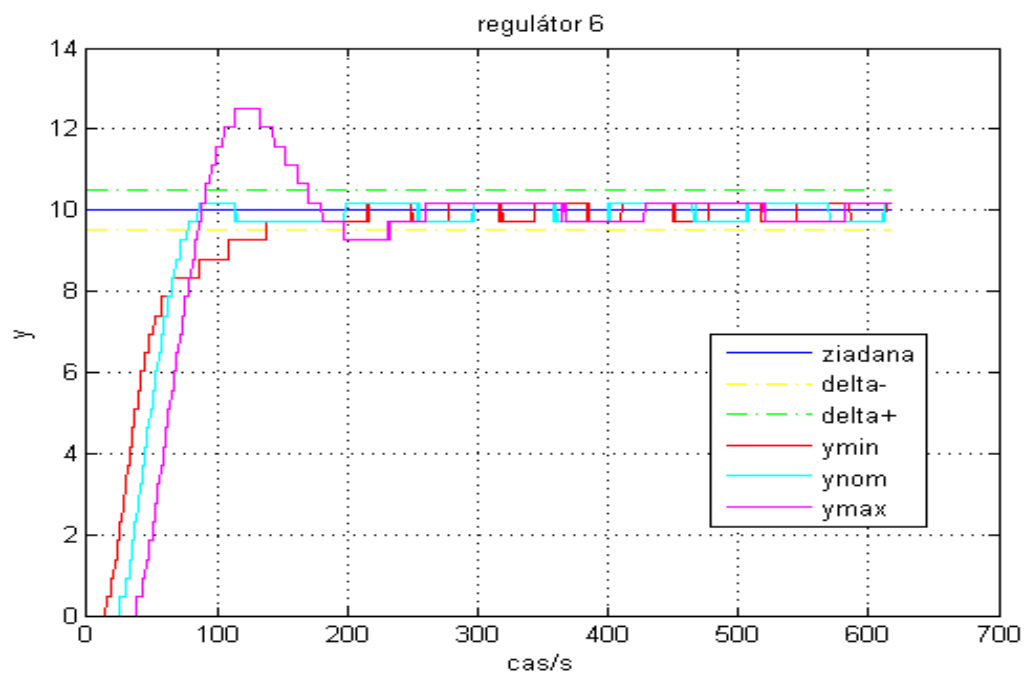
Obr. 20 Riadenie regulátorom č. 3



Obr. 21 Riadenie regulátorom č. 4



Obr. 22 Riadenie regulátorom č. 5



Obr. 23 Riadenie regulátorom č. 6

Tabuľka 5 Kritériá kvality riadenia pre $\zeta=1,5$

Regulátor	Z_r	T_i/s	D	$\sigma_{\max}/\%$	t_σ/s	t_{reg}/s
5	0,056	4,58837	$D_{\min}$	-	-	196,26
			D_{nom}	-	-	149,26
			$D_{\max}$	192,5	6,98	266,16
6	0,448	22,6515	$D_{\min}$	-	-	137,26
			D_{nom}	-	-	77,26
			$D_{\max}$	132	25,58	232,26

V tab. 3 - 5 sú zapísané údaje predstavujúce kritériá kvality riadenia jednotlivých regulátorov. Vzhľadom k priebehom riadenia zobrazeným na obrázkoch 18 - 23 možno povedať, že všetky regulátory, ktoré boli navrhnuté uvedenou metódou, dokážu elektronický model uradiť. Z obrázkov je zrejmé, že zvolením si parametrov je možné určiť priebeh riadenia. Meraná veličina sa môže správať aperiodicky (obr. 19), postupne sa približuje k žiadanej veličine a čas regulácie je v celom rozsahu dopraveného oneskorenia vyšší. V prípade voľby kmitavejšieho regulátora (obr. 18), meraná veličina sa rýchlo dostane do okolia žiadanej veličiny, ale neudrží sa v ňom. Porovnaním ukazovateľov kvality riadenia možno usúdiť, že najlepšie riadenie bolo regulátorom č. 2, ktorý dokázal proces v celom rozsahu dopravného oneskorenia najrýchlejšie uradiť. Tiež je možné povedať, že všetky regulátory sú stabilné pre celý interval neurčitosti elektronického modelu, čo potvrdzuje správnosť ich návrhu.

ZÁVER

Moja bakalárska práca bola zameraná na riadenie elektronického modelu s dopravným oneskorením pomocou priemyselného riadiaceho systému *SIMATIC*. Na základe nameraných prechodových charakteristík v celom rozsahu dopravného oneskorenia som vykonal identifikáciu. Stanovil som hodnotu zosilnenia systému Z a intervaly hodnôt časovej konštanty T , dopravného oneskorenia D a rád systému n . Získané údaje som vložil do programu, ktorý je určený pre návrh robustných PI regulátorov v kombinácii s metódou umiestnenia pólov. Návrh regulátorov je realizovaný pomocou aproximácie dopravného oneskorenia, kde sa získa z pôvodného prenosu systému druhého rádu s dopravným oneskorením systém vyššieho rádu bez dopravného oneskorenia. Ako jediná vhodná aproximácia sa ukázala lineárna Padého aproximácia. Regulátory som navrhoval pri troch rôznych hodnotách parametra ζ . Z výsledkov riadenia vyplýva, že uvedené metódy boli vhodne použité a navrhnuté regulátory pracujú správne. Na základe priebehov riadenia a ukazovateľov kvality usudzujem, že najvhodnejší regulátor pre elektronický model bol regulátor č. 2 s koeficientom tlmenia $\zeta=0,5$.

LITERATÚRA

- [1] Kožka Š. , Kvasnica M.: Programovanie PLC SIMATIC 300 (Základná príručka). KIRP, Bratislava 2001.
- [2] Vaneková K.: Riadenie pomocou priemyselného riadiaceho systému SIMATIC ,Diplomová práca. KIRP, Bratislava 2006.
- [3] Babirád J.: Model systému druhého rádu s oneskorením. KIRP, Bratislava 2006.
- [4] Bakošová M. , Fikar M.: Riadenie procesov. STU, Bratislava 2008.
- [5] Vaneková K. , Bakošová M. , Závacká J.: Robust PI controllers for systems with transport delay. International Conference Cybernetics and Informatic, Vyšná Boca (Slovakia) 2010.
- [6] Paulen R.: Riadenie systémov s dopravným oneskorením, Bakalárska práca. KIRP, Bratislava 2006.
- [7] Klaučo M.: Tvorba GUI pre syntézu robustných PI regulátorov, Bakalárska práca. KIRP, Bratislava 2010.