

# **Návrh metody řízení výšky hladiny v zásobníku na laboratorním modelu PCT40**

Design of the controller for level control in the water tank on  
laboratory model PCT40

Bc. Ladislav Skovajsa

---

Diplomová práce  
2008



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
Ústav automatizace a řídicí techniky  
akademický rok: 2007/2008

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ladislav SKOVAJSA**  
Studijní program: **N 3902 Inženýrská informatika**  
Studijní obor: **Automatické řízení a informatika**

Téma práce: **Návrh metody řízení výšky hladiny v zásobníku na laboratorním modelu PCT40**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši pro výběr vhodné metody řízení tohoto procesu.
2. Sestavte matematický model systému.
3. Provedte simulaci statických a dynamických vlastností tohoto matematického modelu.
4. Provedte statickou a dynamickou analýzu na reálném systému a porovnejte ji se simulačními výsledky.
5. Navrhněte vhodnou metodu pro řízení výšky hladiny v zásobníku.
6. Odsimulujte tuto metodu nejprve na matematickém modelu.
7. Provedte řízení na reálném modelu a opět ho porovnejte s odsimulovanými průběhy.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Mikeš, J. a M. Fikar: Modelovanie, identifikácia a riadenie procesov I. Vydavateľstvo STU, Bratislava, 1999.
2. Ingham, J., Dunn, I. J., Heinzle, E., Přenosil, J. E.: Chemical Engineering Dynamics. An Introduction to Modeling and Computer Simulation. Second, Completely Revised Edition, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 2000.
3. Luyben, W.L.: Process modelling, simulation and control for chemical engineers. McGraw-Hill, New York, 1989.
4. Balátě, J. Automatické řízení. BEN – technická literatura, Praha. 2003.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jiří Vojtěšek, Ph.D.  
Ústav řízení procesů  
Datum zadání diplomové práce: 22. února 2008  
Termín odevzdání diplomové práce: 6. června 2008

Ve Zlíně dne 22. února 2008

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
ředitel ústavu

## ABSTRAKT

Hlavním úkolem této diplomové práce bylo navrhnout řízení pro regulaci výšky hladiny v zásobníku na modelu PCT 40. Aby bylo možné navrhnout co nejlepší způsob řešení daného problému, byl sestaven pomocí diferenciální rovnice matematický model, který byl použit při simulačních experimentech a hledání vhodného regulátoru a jeho nastavení pro řízení výšky hladiny. K řízení regulace výšky hladiny v zásobníku bylo navrženo a použito adaptivní řízení, které spočívá v tom, že po určitém časovém okamžiku se parametry složek regulátoru přepočítají vzhledem k aktuální identifikované soustavě. Tato soustava se identifikuje v každém kroku na základě předchozích výstupů a akčních zásahů. Výsledky simulací a reálných řízení jsou vykresleny v jednotlivých grafech a je porovnán regulační pochod pro různé nastavení regulátoru. Všechna simulační a regulační schémata byla vypracována v programu Matlab – Simulink.

Klíčová slova: PCT 40, matematický model, experimenty, regulátor, adaptivní řízení, identifikace, Matlab

## ABSTRACT

The main task of this diploma work was to design a sort of appliance intended to the regulation of level in the reservoir on the PCT 40 model. To enable suggesting as good way as possible for solving the given problem, a mathematical model has been set by a differential equotation, which has been used at the simulation experiment and looping for a suitable regulator and its adjusting for the level control. Self-adapting control has been designed for controlling the level in the reservoir the principle of which lies in the fact that the parametres of the components of the regulator are re-counted owing to the up-to date identified scale after a certain instant of time. This scale is identified in each phase based on the previous outputs and action interventions. The results of the simulations and realistic controls are drawn in the individual graphs and control performance for various adjustments of the simulator are compared. All simulation and regualtion schemes have been elaborated in Matlab – Simulink program.

Key words: PCT 40, mathematical model, experiments, regulator, self-adapting control, identification, Matlab

## Poděkování

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Vojtěškovi za jeho pomoc, obětavost a čas, který byl vynaložen na řešení dané problematiky a odborné vedení, bez kterého by tato práce nemohla vzniknout. Zvláštní poděkování bych chtěl udělit Ing. Petru Chalupovi za pomoc při opravě simulačních schémat návrhu regulátoru, bez kterých by nebylo možné simulační ani reálné experimenty uskutečnit.

*Motto*

*Vykonávat věc, které se bojíme, je první krok k úspěchu.*

*M.Gándhí*

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvolněno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně

.....  
Podpis diplomanta

**OBSAH**

<b>ÚVOD</b> .....	<b>7</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>8</b>
<b>1 ZAŘÍZENÍ PCT 40</b> .....	<b>9</b>
<b>2 ZÁSOBNÍK NA KAPALINU</b> .....	<b>11</b>
2.1 PŘÍMÉ MĚŘENÍ VÝŠKY HLADINY .....	13
2.2 DIFERENCIÁLNÍ MĚŘENÍ VÝŠKY HLADINY .....	13
2.3 PLOVÁKOVÉ MĚŘENÍ VÝŠKY HLADINY.....	14
2.4 MĚŘENÍ VÝŠKY HLADINY POMOCÍ ULTRAZVUKU .....	14
<b>3 MODELOVÁNÍ A SIMULACE</b> .....	<b>16</b>
<b>4 NÁVRH ADAPTIVNÍHO ŘÍZENÍ</b> .....	<b>18</b>
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>26</b>
<b>5 POPIS ZÁSOBNÍKU NA KAPALINU</b> .....	<b>27</b>
5.1 MATEMATICKÝ MODEL.....	27
5.2 KALIBRACE ZÁSOBNÍKU .....	30
<b>6 REÁLNÉ ŘÍZENÍ A SIMULACE</b> .....	<b>32</b>
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>54</b>
<b>CONCLUSION</b> .....	<b>56</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>58</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>59</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>60</b>

## ÚVOD

V dnešní době jsou největší požadavky kladeny na přesnost řízení procesů a na jejich regulačním pochodu. Nejúčinnější způsob jak změnit chování systémů je použitím zpětné vazby. Tato vazba ovlivňuje na základě výstupních veličin akční zásah do celé soustavy. Bez této zpětné vazby se žádný regulační obvod neobejde. Spousta technologických procesů se bez automatického řízení neobejde. V tomto řízení se pro regulaci používají nejčastěji PID regulátory. Tyto regulátory obsahují tři složky, proporcionální, integrační a derivační. Pro správnou a účinnou funkci takového regulátoru je tedy potřeba tyto složky co nejlépe naladit.

Říká se, že v přírodě je každý systém jedinečný a proto je tedy nutné pro každý systém najít vhodné nastavení regulátoru, aby byla provedena co nejlepší regulace. Postupem času byla odvozena spousta metod, které se zabývají nastavením regulátorů. Mezi nejznámější metody patří Ziegler-Nichols, ale taky Takahashi a Äström. Každá metoda se odvíjí od toho, jakým způsobem jsou nastavovány složky regulátoru.

Tato práce se zabývá regulací výšky hladiny v zásobníku na modelu PCT40. Zásobník simuluje chování napouštění a vypouštění kapaliny v zásobníku v běžném provozu. Tento model se tedy používá pro laboratorní měření a odzkoušení navrhnutého řízení před jeho větší realizací a nasazení do provozu. Je to z toho důvodu, aby nedošlo k poškození zařízení v případě, že průběh regulace bude mít nežádáný průběh. Tyto zařízení totiž bývají velmi nákladné na konstrukci nebo opravu.

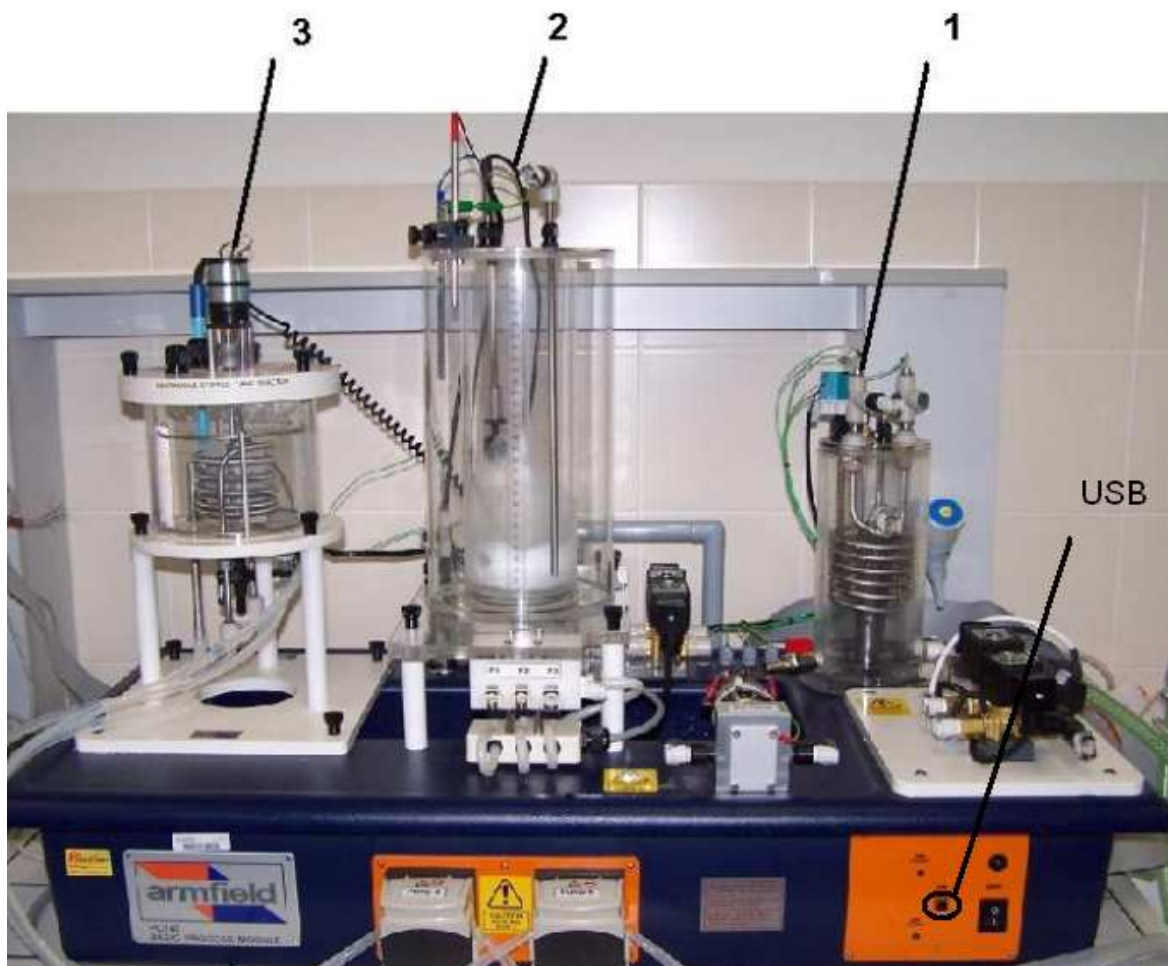
Hlavním úkolem je tedy navrhnout řízení regulace výšky hladiny tohoto zásobníku s co nejlepším regulačním pochodem a bez větších překmitů. U tohoto zásobníku je ale nejdůležitější navrhnout takový systém regulace, aby míra akčního zásahu do soustavy nebyla veliká a moc nekmitala. Je to proto, že akčním zásahem je otevírání napouštěcího ventilu a může se stát, že při delší době regulace dojde k poškození ventilu. Z toho důvodu je prvním úkolem sestavit matematický model, který nám popisuje dynamiku tohoto zásobníku a pomocí simulačních experimentů hledat co nejlepší návrh řízení a následné nastavení jednotlivých složek regulátoru.

## I. TEORETICKÁ ČÁST



## 1 ZAŘÍZENÍ PCT 40

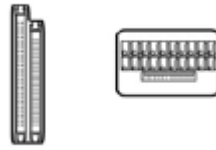
Model PCT 40 byl vyvinut k laboratornímu řízení různých druhů procesů. Výukový model obsahuje zařízení pro řízení výšky hladiny, ohřevu vody a chemický reaktor s měřením pH a vodivosti.



Obr. 1: Laboratorní model PCT 40

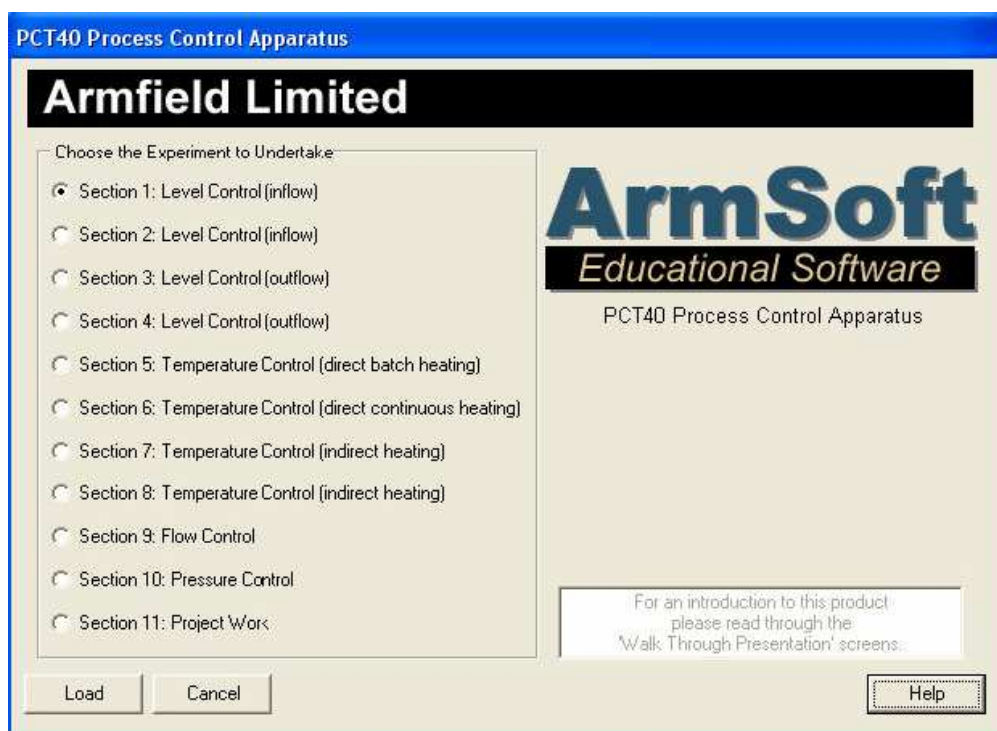
(1) – Výměník tepla, (2) – Zásobník na kapalinu, (3) – Chemický reaktor

Celou soustavu PCT 40 můžeme řídit automaticky nebo manuálně. Pro komunikaci s počítačem je možno použít hned několik druhů připojení. Jako základní se používá připojení pomocí vstupu USB, který je na přední straně přístroje. Dalším možným připojením je pomocí 60 – pin, nebo 50 – pin konektorem. V případě použití pinového konektoru je potřeba PC opatřit technologickou kartou.



Obr. 2: Konektor 60 a 50-pin

Pro komunikaci zařízení s PC je firmou Armfield dodáván kompatibilní software. S jeho pomocí je možno ovládat zařízení jako celek, nebo je možné si vybrat jen určitou úlohu a spustit ovládání jen pro danou problematiku jako je např. regulace výšky hladiny. Po spuštění ovladačů pro tuto část systému není možné spustit jinou úlohu. Tento program komunikuje se zařízením pomocí kabelu USB a je možno v něm spouštět pouze vytvořené projekty.



Obr. 3: Program ArmSoft pro ovládání PCT 40

Program umožňuje ukládání dat do formátu XLS, dále pak kalibraci senzorů a možnost výběru mezi automatickým a manuálním ovládáním. Je možné zde použít k regulaci jednoduchý proporcionalní nebo PID regulátor. Program detailnější nastavení zařízení a jeho kontrolu neumožňuje. Z tohoto důvodu bylo pro ovládání PCT 40 vytvořeno simulinkové schéma v programu Matlab, které umožňuje lepší kontrolu nad systémem a je zde možnost kvalitnější regulace.

## 2 ZÁSOBNÍK NA KAPALINU

Zásobník na kapalinu tvoří dvě válcové nádoby se soustředěným uložením. Napouštěcí prostor tvoří mezikruží těchto dvou válcových nádob. Model se používá pro simulaci regulace výšky hladiny. K napouštění zásobníku je možno použít dva vstupy a k vypouštění 3 výstupy. Snímání výšky hladiny se může provádět buď pomocí diferenciálního, tlakového, nebo ultrazvukového snímače. Zásobník také obsahuje plovák pro měření limitní výšky hladiny, a je opatřen přepadovým otvorem, aby nedošlo k přeplnění zásobníku. Platí zde ale podmínka, že objemový průtok napouštění nesmí být větší než objemový průtok odtoku kapaliny.



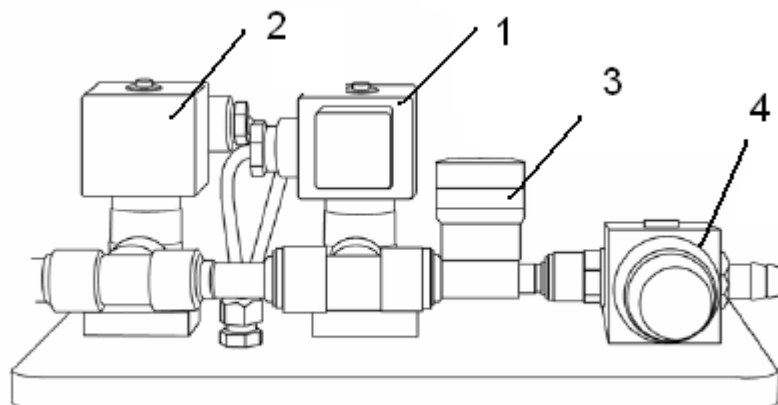
Obr. 4: Zásobník na kapalinu

Technická data:

- maximální výška hladiny : 300 mm
- maximální objem kapaliny : 4 l
- počet vstupních míst pro kapalinu: 2

- počet výstupních míst pro kapalinu: 3 (1x SOL2 2,4 mm, 1x SOL3 3,2 mm, 1x manuální nastavitelný ventil v rozsahu 0 - 100%)
- snímač výšky hladiny : tlakový systém
- diferenciální snímač výšky hladiny : elektroodový systém
- limitní snímač výšky hladiny : plovákový systém

Přívod kapaliny je zajišťován dvěma způsoby. Můžeme použít buď PSV pumpu jak můžeme vidět na obr. 5 (1), nebo SOL1 obr. 5 (2). PSV pumpa má nastavitelný rozsah od 0 - 100% svého objemového průtoku. Je tedy možné ji použít pro spojitou regulaci přívodu tekutiny. Pro dvoupolohovou regulaci se používá solenoid, který má nastavitelné parametry (on/off). Lze jej tedy jen plně otevřít nebo uzavřít.



Obr. 5: Ovládání přítoku tekutiny

Průtok vody je měřen turbínovým průtokoměrem obr. 5 (3) umístěným před PSV pumpou. Přítok vody do celé soustavy je možno regulovat pomocí manuálního ventilu obr. 5 (4), kterým určíme, jakým maximálním průtokem budeme moci přivádět tekutinu do soustavy.

Dalším možným způsobem řízení přítoku je za použití dvou peristaltických čerpadel (PUMP A,B), umožňující regulaci 0 – 100% svého výkonu. Pro tato čerpadla je nutné použít zvláštní druh hadic z měkkého pružného materiálu. Čerpadla totiž pracují na principu škrcení hadic.

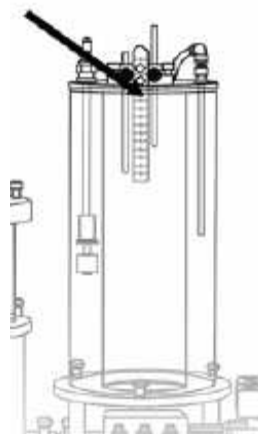
Priváděná tekutina do zásobníku se pak může snímat níže uvedenými způsoby podle toho, v jaké výšce se kapalina nachází.

## 2.1 Přímé měření výšky hladiny

K měření výšky hladiny přímým způsobem rozumíme takové měřidla, na kterých je možno přímo odečíst danou výšku hladiny. Jako nejčastěji používané jsou stupnice, kterými jsou zásobníky opatřeny, a je možné na nich zjistit okamžitou výšku hladiny. Dalším možným způsobem je pomocí hloubkoměru, kde se odečítá velikost ponoření do měřené kapaliny. V praxi jsou tato měření nejméně používaná z důvodu velké nepřesnosti.

## 2.2 Diferenciální měření výšky hladiny

Měření výšky hladiny spočívá ve změně elektrické vodivosti prostředí, jak popisuje HRUŠKA<sup>1</sup>. Ke změně vodivosti se používá vodivé látky v zásobníku. U spojitěho měření je vložena elektroda ponořená do měřené látky podle výšky hladiny. Výsledná vodivost mění celkový odpor mezi elektrodami. Vyhodnocení se provádí zapojením do můstku a zesílením signálu, který je převeden na unifikovaný signál.

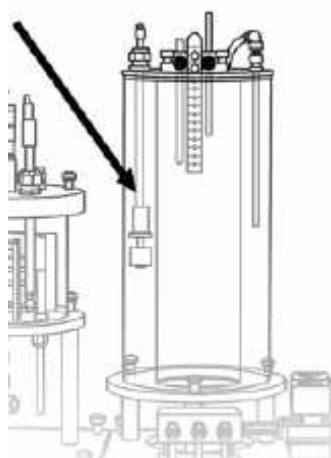


Obr. 6: Systém diferenciálního měření

Snímače pro měření výšky hladiny mohou být provedeny jako bodové pro jeden nebo více bodů. Výstupní signál je nespojitý, dvouhodnotový nebo číslicový.

### 2.3 Plovákové měření výšky hladiny

Tento systém měření patří mezi mechanické způsoby snímání hladiny, jak udává HRUŠKA<sup>1</sup>. Jako nejčastěji použité měřidla se používají plováky a vztlaková tělesa s velmi malou hustotou, které se vznášejí na hladině, nebo jsou částečně ponořena. Používají se pro kapaliny a mají kulové tvary pro malé změny výšky, nebo válcové pro výšky až 40 m. Kulové plováky jsou často umístěny na pákové tyči a ovládají většinou přímo uzavírací zařízení. Válcové plováky jsou vedeny po tyči a jsou spojeny lankem s vnějším prostředím. Nejčastěji jsou doplněny spínacím kontaktem nebo snímačem polohy.



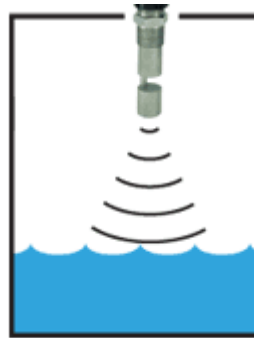
Obr. 7: Systém plovákového měření

Při měření na plovák působí vztlaková síla daná Archimédovým zákonem, kde se uplatňuje hustota materiálu plováku, hustota měřené kapaliny, plošný obsah, délka vztlakového tělesa, hloubka ponoru a gravitační zrychlení.

### 2.4 Měření výšky hladiny pomocí ultrazvuku

Měření výšky hladiny pomocí ultrazvuku využívá odrazu zvukových vln od měřené výšky hladiny nebo změny rychlosti při průchodu různým prostředím, jak popisuje HRUŠKA<sup>1</sup>. Přístroj pro měření výšky hladiny obsahuje vysílač a snímač v jednom tělese umístěného na víku nádrže. Vysílač periodicky vysílá ultrazvukové vlny, které proudí prostředím nad hladinou a odráží se od hladiny. Takto odražené paprsky se vrací zpět do snímače a měří se, za jak dlouho se vygenerovaný paprsek vrátí zpět a podle doby za kterou se paprsek

vrátí, spočítáme vzdálenost, kterou urazil a tím odečteme i aktuální výšku hladiny v zásobníku dle toho, v jaké výšce se senzor v zásobníku nachází.



Obr. 8: Systém ultrazvukového měření

Při používání průchodového způsobu je vysílač umístěn na dně a snímač na horním víku zásobníku. Vysílač opět vysílá periodicky impulzy, které se šíří kapalinou a prostředím nad ní. Doba průchodu paprsku je dána rychlostí šíření v prostředí měřené kapaliny a prostředím nad hladinou. Pro šíření ultrazvukových paprsků, platí závislosti parametrů jako frekvence ultrazvuku, adiabatický koeficient plynu a jeho plynová konstanta, molekulová hmotnost plynu a absolutní teplota.

Vysílač generuje ultrazvuk o frekvenci od 16 kHz do 100 kHz. Šíření v prostředí je ovlivněno především teplotou, vlhkostí prostředí, hustotou látky v zásobníku a jeho tvarem. Používá se pro měření výšky hladiny od 0,3 m do 60 m. K vyhodnocení se používá digitální metody měření doby průchodu paprsku, a nebo změny jeho rychlosti. Tímto měřením lze dosáhnout třídy přesnosti až 0,1. Převodník je tvořen mikroprocesorem a zajišťuje kompenzace parazitních vlivů a řízení generování impulzů.

Měření výšky hladiny pomocí ultrazvuku se používá pro agresivní kapaliny, ale i pro sypké materiály. Hlavní přednost tohoto principu je bezkontaktní měření bez pohyblivých částí a jednoduché nastavení a údržba. Jeho jedinou nevýhodou je změna rychlosti ultrazvuku na teplotě.

### 3 MODELOVÁNÍ A SIMULACE

Modelování a simulace tvoří nedílnou součást technických disciplín jako je například teorie automatického řízení a kybernetika. Postupem času se modelování rozrostlo do dalších koutů odvětví, jako je např. metrologie, geologie, ekonomie atd.

Největší výhodou modelování a simulace je, že pomocí pokusů a omylů můžeme vyřešit úlohy, které mají většinou složité a zdlouhavé řešení. Často může dojít, že navržené řešení k dané problematice nemá řešení navrhnutým způsobem. Velmi často se simulace používají k ověření vlastností nákladně navržených zařízení předtím, než dojde k jejich skutečné realizaci (letadla, atomové bomby), aby bylo zaručeno, že zařízení bude plnit funkci, ke které bylo navrženo.

Simulační modely se velmi často používají jako výcvikové trenažéry, kde zařízení simuluje chování daného systému, nebo nejnámější v podobě počítačových her, kde je vlastně možné říci, že každá hra simuluje nějaký určitý děj. Simulace se používají tam, kde je potřeba pomocí navrženého modelu, kterým je co nejlépe popsán daný systém, odzkoušet jeho chování, a zjistit jak se navržený model bude chovat v rámci nastavených parametrů.

Výhodou je, že můžeme najít nejlepší řešení problému a vyhnout se tak chybám při skutečné realizaci a jejich vyloučením pomocí simulačního ověřování.

V různých druzích oborů byla postupem času vyvinuta celá řada specializovaných softwarů. Pro modelování dynamických systémů je nejnámější Matlab a pro elektrické obvody Spice. Dávno předtím, než byly vyvinuty tyto programy, bylo nutné pomocí analogového počítače nebo pomocí různých softwarů, najít řešení diferenciálních rovnic.

Nejdůležitější částí modelování je sestavení matematického modelu systému, který chceme zkoumat a navrhnout. Model můžeme navrhnout hned několika způsoby. Jako nejpoužívanější metodou se jeví postup pomocí bilanční rovnice. Dalším možným řešením je empiricky na základně naměřených hodnot. Tento postup odborně nazýváme identifikace systémů, jak udává BOBÁL<sup>2</sup>.

Hlavním úkolem modelu je, že musí co nejlépe popisovat závislost výstupů na jeho vstupech. Takto navržené modely bývají nejčastěji popsány pomocí diferenciálních rovnic. Jejich zápis se může i lišit dle toho v jakém oboru pracujeme a jaký stav potřebujeme pomocí rovnice vyjádřit. Některé obory pracují také s parciálními



diferenciálními rovnicemi, nebo diferenčními. Dalším možným řešením popisu je pomocí Laplaceovi transformace a nebo jiným navrhnutým způsobem, jakým si zvolíme.

Navrhnutý a popsáný matematický model nikdy nebude přesně odpovídat originálu z toho důvodu, že při sestavování modelu jsme mohli na nějaké dění v systému zapomenout a nebo použít nevhodného modelu. Největší problém při návrhu systému hraje šum soustavy, který nelze přesně popsat a který se vyskytuje náhodně o různé velikosti dle zásahů do soustavy. Je proto dobré znát omezení modelu pro jeho použití a nevyvozovat ze simulací konečné závěry. Simulační experimenty totiž nikdy nebudou přesně odpovídat výsledkům získaných na reálném systému.

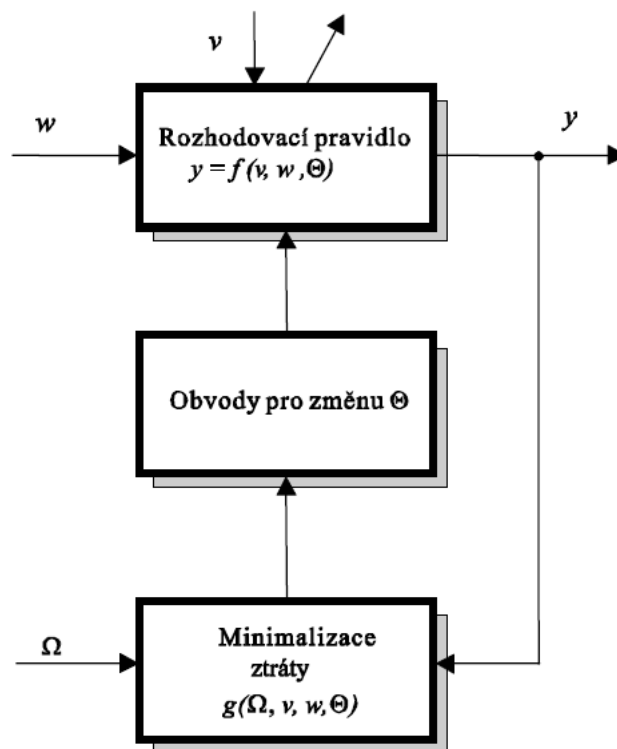
## 4 NÁVRH ADAPTIVNÍHO ŘÍZENÍ

Převážná většina procesů, se kterými se člověk setkává, má stochastický charakter a vykazuje nelineární chování. Regulátory s pevným nastavením nejsou schopny tyto procesy uřídit z důvodu změny v systému, na které pevně nastavitelný regulátor nemusí včas a správně reagovat a může dojít k nestabilitě systému.

Adaptace je pojem, kdy se určitý vnitřní systém snaží přizpůsobit své chování okolnímu prostředí, jak popisuje BOBÁL<sup>3</sup>. Každá adaptace v sobě nese jistou ztrátu. Při mnohonásobné adaptaci na určité prostředí je možné tyto ztráty minimalizovat. Opakováním adaptací je možné získávat zkušenosti. Tento jev nazýváme učením. Aby bylo možné mluvit o adaptivním systému, musí platit jedno z následujících pravidel.

- systém může změnit stav nebo strukturu
- můžeme ovlivňovat stav nebo výstup systému

Adaptivní systém je systém se třemi vstupy a jedním výstupem. Na tento systém působí prostředí tvořené dvěma veličinami a to řídicí veličinou  $w$  a poruchou  $v$ .



Obr. 9: Struktura adaptivního systému

Řídící veličina je tvořena uživatelem a porucha bývá často neměřitelná. Dále pak na systém působí veličina  $\Omega$ , která nese informaci o tom, jak se má systém chovat. Výstup tvoří chování systému

$$y = f(w, v, \Theta) \quad (1)$$

keré přiřazuje každému projevu prostředí  $w$  a  $v$  jediný výstup  $y$ . Změna chování se uskutečňuje pomocí parametrů  $\Theta$ . Za parametry  $\Theta$  se volí pro každou kombinaci  $(w, v, \Theta)$  takové parametry  $\Theta^*$ , aby minimalizovaly ztrátovou funkci  $g$  (za jednotku času nebo určitý časový úsek)

$$g(w, v, \Theta^*) = \min(w, v, \Theta) \quad (2)$$

Adaptace je tedy proces, kde se hledají parametry  $\Theta^*$  a trvá tak dlouho, dokud nejsou nalezeny. K procesu adaptace dochází vždy, pokud dojde ke změně projevu prostředí  $w$ , nebo ke změně požadovaného chování  $\Omega$ . Dojde-li ke změně prostředí po každém časovém intervalu  $T_0$ , dojde k adaptaci na začátku každého intervalu.

Bude-li adaptivní systém určen pro řízení procesů, může být ukazatel chování např.:

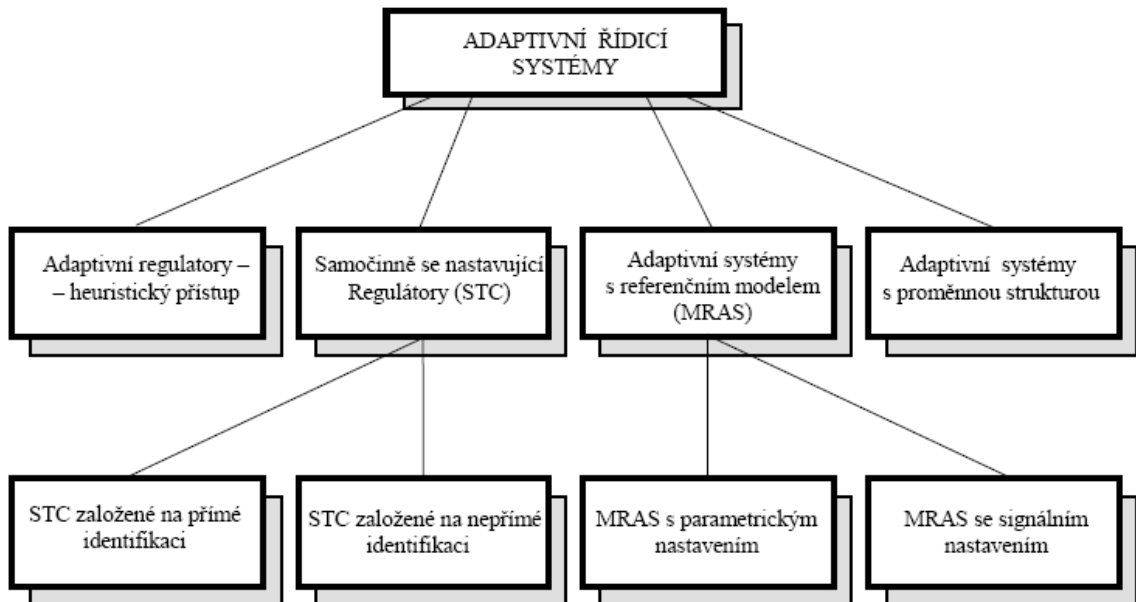
- poloha pólů a nul přenosů uzavřeného regulačního obvodu
- žádaný překmit soustavy uzavřeného regulačního obvodu při skokové změně
- doba regulace
- minimální hodnota různých kritérií
- amplituda a frekvence vlastních kmitů u nelineárních obvodů apod.

Adaptivní systémy přizpůsobují nastavení parametrů regulátorů změnám parametrů nebo struktury jiné části systému, kterou je regulovaná soustava tak, aby celý systém měl co nejoptimálnější chování podle zadaného kritéria nezávisle na změnách, které nastaly. Adaptaci lze uskutečnit třemi způsoby:

- změnou nastavitelných parametrů regulátoru
- změnou struktury regulátoru

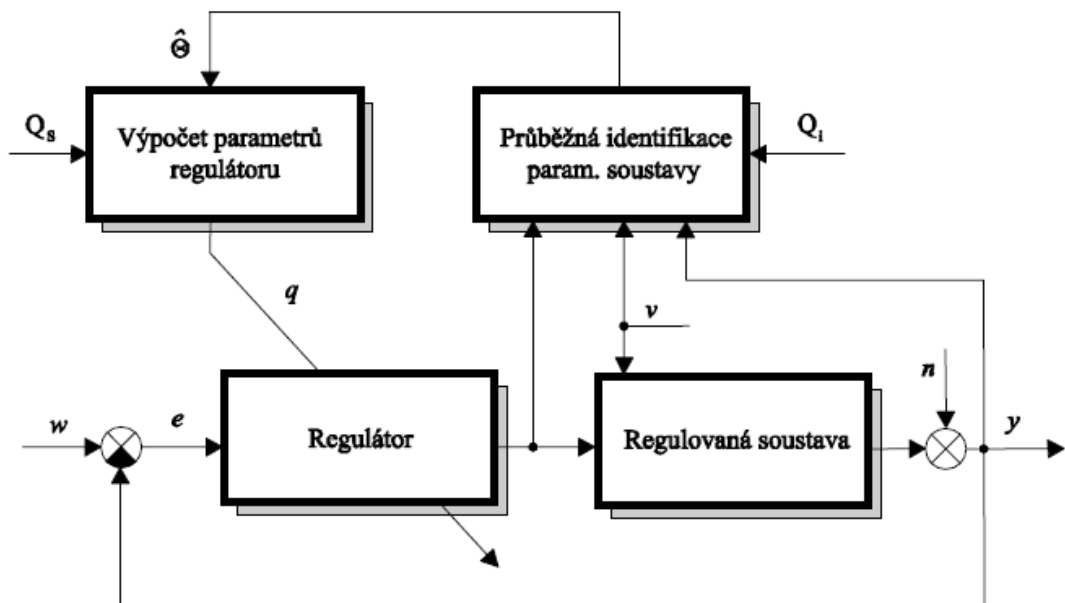
- generováním vhodného přídavného vstupního signálu (adaptace vstupním signálem)

Adaptivitu lze tedy chápat jako zpětnou vazbu, která mění parametry regulátoru podle kvality regulačního pochodu. Adaptivní systémy lze tedy rozdělit do několika skupin podle druhu adaptace jak je možno vidět na obr.10.



Obr. 10: Klasifikace adaptivních systémů

V našem případě budeme uvažovat STC (Self-Tuning Controllers) založené na přímé identifikaci. Základní regulační obvod je dán následujícím zapojením



Obr. 11: Blokové schéma adaptivního řízení

Jak již víme z teorie automatického řízení, každý regulátor a nastavení jeho parametrů se volí dle soustavy, jakou má řídit. Proto je nutné, aby regulační obvod obsahoval část pro průběžnou identifikaci parametrů soustavy jako např.:

- rekurzivní metoda nejmenších čtverců
- metoda nejmenších čtverců s exponenciálním zapomínáním
- metoda nejmenších čtverců s adaptivním zapomínáním

Pro každou metodu identifikace budeme uvažovat její výstup identifikace jako diskrétní přenos systému ve tvaru

$$G(z) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}} z^{-d} \quad (3)$$

Odhadovaný výstup procesu v kroku  $k$  ( $\hat{y}_k$ ) je vypočten na základě předchozích vstupů  $u$  a výstupů  $y$  pomocí rovnice

$$\hat{y}(k) = -\hat{a}_1 y_{k-1} - \dots - \hat{a}_n y_{k-n} + \hat{b}_1 u_{k-d-1} + \hat{b}_m u_{k-d-m} \quad (4)$$

kde  $\hat{a}_1, \dots, \hat{a}_n, \hat{b}_1, \dots, \hat{b}_m$  jsou aktuální odhady parametrů procesu. Tato rovnost může být také napsána vektorovou formou, která je pro další práci vhodnější.

$$\begin{aligned} \hat{y}(k) &= \Theta_{k-1}^T \cdot \Phi_k \\ \Theta_{k-1} &= [\hat{a}_1, \dots, \hat{a}_n, \hat{b}_1, \dots, \hat{b}_m]^T \\ \Phi_k &= [-y_{k-1}, \dots, -y_{k-n}, u_{k-d-1}, \dots, u_{k-d-m}]^T \end{aligned} \quad (5)$$

Vektor  $\Theta_{k-1}$  obsahuje informace o odhadu parametrů vypočtených v předchozím kroku a vektor  $\Phi_k$ , obsahuje výstupní a vstupní hodnoty pro počítání aktuálního výstupu. Tento vektor je použit pro výpočet parametrů pro jednotlivé druhy identifikací.

### ***Rekurzivní metoda nejmenších čtverců***

Tato metoda je založená na minimalizaci sumy kvadratických chyb.

$$J_k = \sum_{i=1}^k (y_i - \Theta_k^T \Phi_i)^2 \quad (6)$$

Kde  $y_i$  je výstup v  $i$ -tém kroku a  $\Theta_k^T \Phi_k$  předpovídá výstup procesu. Řešení této rovnice vede k rekurzivní verzi metody nejmenších čtverců, kde vektor parametrů odhadů je aktualizovaný v každém kroku podle rovnice (7):

$$\Theta_k = \Theta_{k-1} + \frac{C_{k-1} \cdot \Phi_k}{1 + \Phi_k^T \cdot C_{k-1} \cdot \Phi_k} (y_k - \Theta_k^T \Phi_k) \quad (7)$$

Matice kovariance  $C$  je aktualizována v každém kroku a je definována rovnicí (8):

$$C_k = C_{k-1} - \frac{C_{k-1} \cdot \Phi_k C_{k-1} \cdot \Phi_k^T}{1 + \Phi_k^T \cdot C_{k-1} \cdot \Phi_k} \quad (8)$$

Počáteční hodnota matice  $C$  určí vliv identifikace počátečních parametrů soustavy.

### ***Rekurzivní metoda nejmenších čtverců s exponenciálním zapomínáním***

Nevýhodou této rekurzivní metody čtverců je nedostatek signálního zatížení. Každý vstup i výstup ovlivňují výsledek parametrů stejnou váhou. Tento problém může být vyřešen použitím zapomínající metody, která používá zapomínající koeficient  $\varphi$  a snižuje tak váhy z dat získaných v předešlých krocích. Váhy  $\varphi^{k-i}$  jsou tedy přiřazeny k hodnotám  $y_i, u_i$ . Odhady parametrů jsou tedy vypočítané dle následujících rovnic.

$$\Theta_k = \Theta_{k-1} + \frac{C_{k-1} \cdot \Phi_k}{\varphi + \Phi_k^T \cdot C_{k-1} \cdot \Phi_k} (y_k - \Theta_k^T \Phi_k) \quad (9)$$

$$C_k = \frac{1}{\varphi} \left( C_{k-1} - \frac{C_{k-1} \cdot \Phi_k C_{k-1} \cdot \Phi_k^T}{\varphi + \Phi_k^T \cdot C_{k-1} \cdot \Phi_k} \right) \quad (10)$$

### ***Rekurzivní metoda nejmenších čtverců s adaptivním řízeným zapomínáním***

Exponenciální metoda může být vylepšena adaptivním řídicím zapomínáním, která mění zapomínající koeficient s ohledem na změny vstupního a výstupního signálu. Parametry procesu jsou měněny dle rovnice (11):

$$\Theta_k = \Theta_{k-1} + \frac{C_{k-1} \cdot \Phi_k}{1 + \xi} (y_k - \Theta_k^T \Phi_k) \quad (11)$$

kde

$$\xi = \Phi_k^T \cdot C_{k-1} \cdot \Phi_k \quad (12)$$

a matice  $C$ , je aktualizovaná v každém kroku podle rovnice

$$C_k = C_{k-1} - \frac{C_{k-1} \cdot \Phi_k C_{k-1} \cdot \Phi_k^T}{\varepsilon^{-1} + \xi} \quad (13)$$

kde

$$\varepsilon = \varphi_{k-1} - \frac{1 - \varphi_{k-1}}{\xi} \quad (14)$$

Zapomínající koeficient je pak dán vztahem

$$\varphi_k = \frac{1}{1 + (1 + \rho) \left\{ \ln(1 + \xi) + \left[ \frac{(v_k + 1)\eta}{1 + \xi + \eta} - 1 \right] \frac{\xi}{1 + \xi} \right\}} \quad (15)$$

kde

$$v_k = \varphi_{k-1} (v_{k-1} + 1) \quad (16)$$

$$\eta = \frac{(y_k - \Theta_{k-1}^T \Phi_k)^2}{\lambda_k} \quad (17)$$

$$\lambda_k = \varphi_{k-1} \left[ \lambda_{k-1} + \frac{(y_k - \Theta_{k-1}^T \Phi_k)^2}{1 + \xi} \right] \quad (18)$$

Takto navržené metody se používají k identifikaci parametrů soustavy, ke kterým se navrhuje požadované nastavení regulátoru dle řídicího zákona pro jednotlivé druhy regulátorů. V našem případě budeme uvažovat výstup parametrů soustavy druhého řádu z identifikačního cyklu z důvodu návrhu PID regulátoru. Soustava, ke které jsou pak v každém časovém okamžiku  $T_0$  přepočítány parametry regulátoru, má tvar:

$$G(z) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (19)$$

Z takto vypočítané soustavy jsou brány parametry  $a_1, a_2, b_1, b_2$  které se používají pro výpočet jednotlivých složek navrženého regulátoru. Pro soustavu druhého řádu se používá k regulaci regulátor tvaru PID, který nastavuje proporcionální, integrační a derivační složku. Jelikož každý systém vykazuje jiné chování, je proto nutné vybrat vhodný typ regulátoru a jeho nastavení. Může totiž dojít k tomu, že regulátor bude plnit nežádoucí funkci a regulace systému bude probíhat špatně vzhledem k možnostem parametrů regulované soustavy. Proto není vhodné volit regulátory s velkým akčním zásahem vzhledem k omezením řízených soustav.

### *Návrh PID regulátoru*

Pro řízení systému byl použit regulátor PID typu A-1 s rozložením pólů. Vyjádření regulačního pochodu je dáno následujícím zákonem řízení, jak udává BOBÁL<sup>4</sup>:

$$u_k = q_0 e_k + q_1 e_{k-1} + q_2 e_{k-2} + (1 - \gamma) u_{k-1} + \gamma u_{k-2} \quad (20)$$

kde  $e_k$  je regulační odchylka ( $e_k = w_k - y_k$ ) a parametry regulátoru  $q_0, q_1, q_2$  a  $\gamma$  jsou vypočteny pomocí diofantické rovnice.

$$A(z^{-1})P(z^{-1}) + B(z^{-1})Q(z^{-1}) = D(z^{-1}) \quad (21)$$

kde jednotlivé polynomy jsou dány rovnicemi:

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} \\ B(z^{-1}) &= b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} \\ P(z^{-1}) &= (1 - z^{-1})(1 + \gamma z^{-1}) \\ Q(z^{-1}) &= q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2} \\ D(z^{-1}) &= 1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} \end{aligned} \quad (22)$$

a platí

$$\begin{aligned} d_1 &= -2 \exp(-\xi \omega T_0) \cos(\omega T_0 \sqrt{1 - \xi^2}) & \text{pro } \xi \leq 1 \\ d_1 &= -2 \exp(-\xi \omega T_0) \cosh(\omega T_0 \sqrt{\xi^2 - 1}) & \text{pro } \xi > 1 \\ d_2 &= \exp(-2\xi \omega T_0) \end{aligned} \quad (23)$$



Kde  $\zeta$  je faktor tlumení a  $\omega$  je frekvence ovlivňující dynamické chování uzavřeného regulačního obvodu pomocí charakteristického polynomu  $s^2 + 2 \cdot \omega \cdot \zeta \cdot s + \omega^2$

Řešením diofantické rovnice dostaneme pak následující vzorce pro výpočet jednotlivých složek regulátoru:

$$q_2 = \frac{s_1}{r_1} \quad q_1 = \frac{a_2}{b_2} - q_2 \left( \frac{b_1}{b_2} - \frac{a_1}{a_2} + 1 \right) \quad q_0 = \frac{1}{b_1} (d_1 + 1 - a_1 - \gamma) \quad \gamma = q_2 \frac{b_2}{a_2} \quad (24)$$

kde

$$r_1 = (b_1 + b_2)(a_1 b_1 b_2 - a_2 b_1^2 - b_2^2) \quad s_1 = a_2 [(b_1 + b_2)(a_1 b_2 - a_2 b_1) + b_2 (b_1 d_2 - b_2 d_1 - b_2)] \quad (25)$$

Řešením rovnic (21) - (25), jsou pak parametry regulátoru podle jednotlivých vstupních parametrů soustavy. Výsledný regulátor má pak tvar:

$$G(z^{-1}) = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2}} \quad (26)$$

Takto sestavený výsledný regulátor může být použit pro reálné řízení systému.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 POPIS ZÁSOBNÍKU NA KAPALINU

### 5.1 Matematický model

Odvození matematického modelu:

$$\{\text{přítok do zásobníku}\} = \{\text{odtok ze zásobníku}\} + \{\text{akumulace kapaliny v zásobníku}\}$$

$$q_v = q + \frac{dV}{dt} \quad (27)$$

Vzhledem k tomu, že průřez zásobníku je konstantní, můžeme změny objemu vyjádřit pomocí změn výšky hladiny  $dV = F dh$  a následně rovnicí (27) napsat ve tvaru:

$$q_v = q + F \frac{dh}{dt} \quad (28)$$

s počáteční podmínkou  $h(0)=h^s$  a kde  $F$  je obsah podstavy nádrže. Nesmíme však zapomenout, že napouštěcí prostor tvoří mezikruží dvou válcových nádob o různém poloměru.

Je známo, že průtok média přes ventil je úměrný druhé odmocnině z rozdílu tlaků média před a za ventilem. V našem případě jde o hydrostatický tlak úměrný výšce hladiny v zásobníku a tudíž pro průtok platí:

$$q = k\sqrt{h} \quad (29)$$

kde  $k$  je konstanta ventilu a vypočítá se z ustáleného přítoku  $q^s$  a z ustálené výšky hladiny  $h^s$ . V našem případě bylo zjištěno, že při průtoku 1770 ml/min se dosáhne ustálené výšky hladiny 265,5 mm. Konstanta ventilu  $k$ , je tedy rovna hodnotě 0,0184.

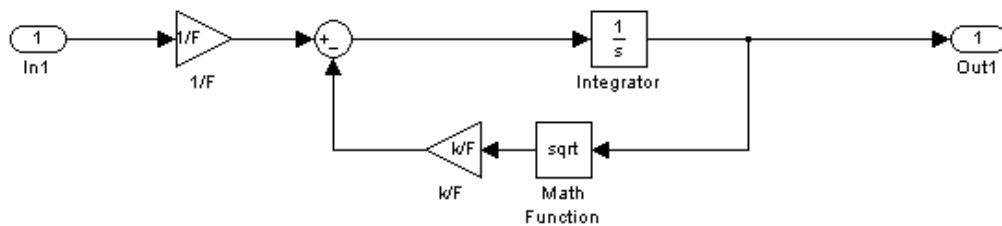
Výsledný matematický model má pak tvar:

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{1}{F} [q_v(t) - k\sqrt{h(t)}] \quad (30)$$

kde

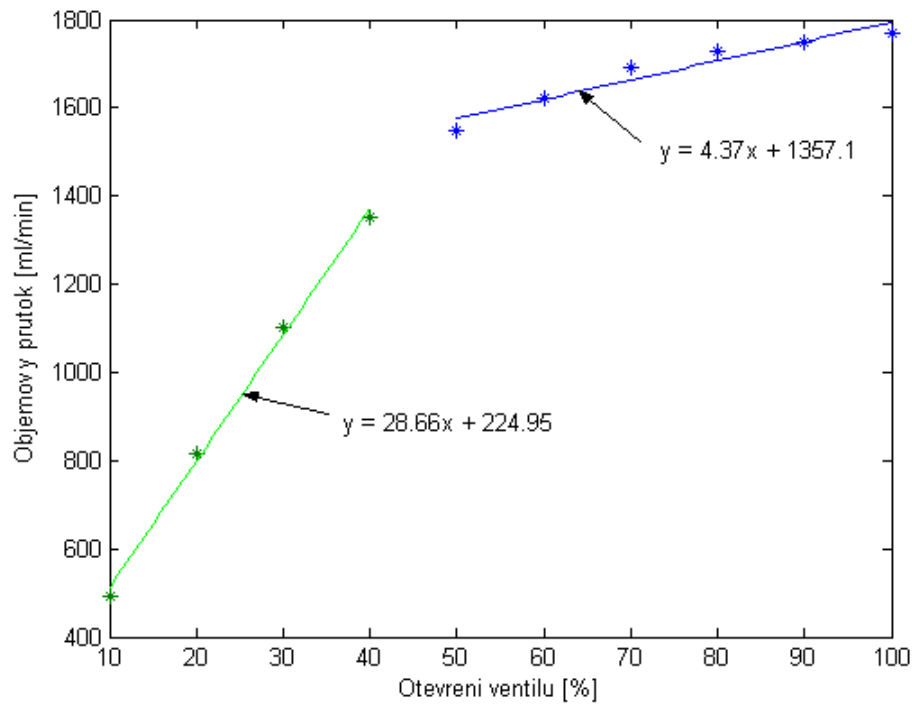
$$F = \pi \cdot r_1^2 - \pi \cdot r_2^2 = 1,3195 \text{ dm}^2 \quad (31)$$

Takto sestavený základní matematický model zásobníku byl použit pro řízení simulace regulačního obvodu. Všechny simulace byly provedeny v programu Matlab – Simulink pomocí diferenciální rovnice. Základní diferenciální rovnice pak měla následující zapojení.



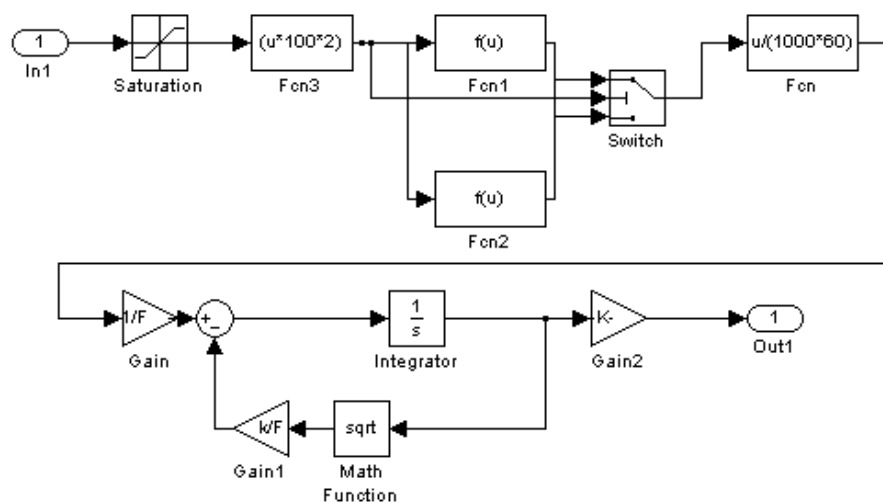
Obr. 12: Základní schéma matematického modelu zásobníku

Aby se ale zásobník co nejvíce podobal reálu, bylo nutno brát v úvahu, že průtok napouštěcího ventilu nebyl lineární, proto bylo nutné tento fakt zahrnout do výpočtu, aby navrhnutý model co nejvíce odpovídal skutečnosti. Na obr 13. Je znázorněn objemový průtok ventilu na jeho otevření (0 – 100%).



Obr. 13: Závislost objemového průtoku na otevření ventilu

Jak je možno vidět z obr. 13, tak jedním ze způsobů aproximace průtoku, bylo rozdělit závislost na dvě lineární křivky o různé rovnici, jejichž přechod z jedné do druhé byl asi při 45 % otevření ventilu. Výsledné schéma zapojení matematického modelu tedy mělo následující tvar.

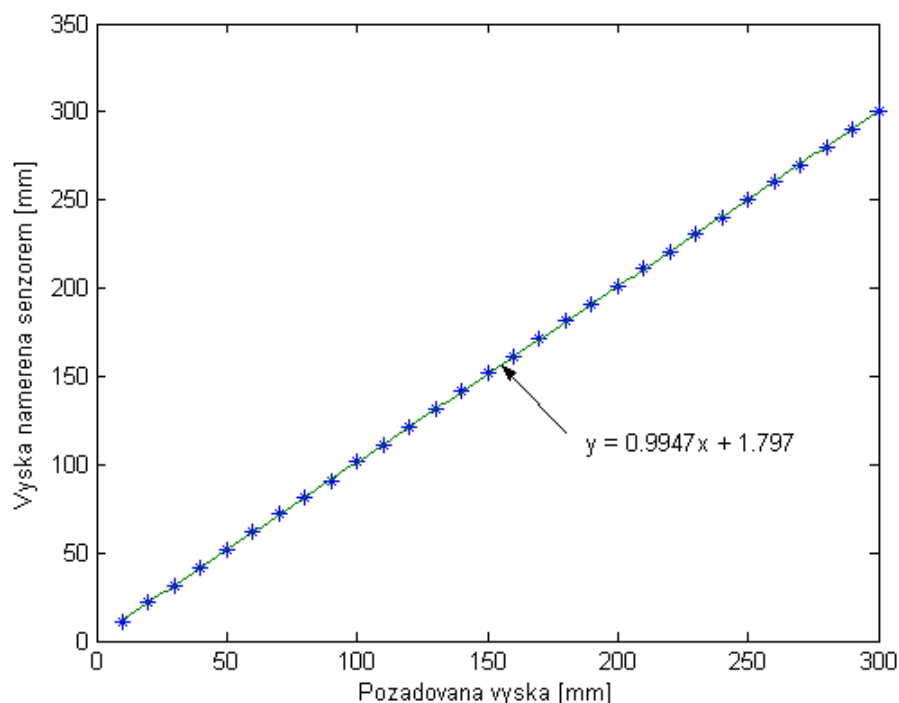


Obr. 14: Konečné schéma matematického modelu

Přepínání z jedné aproximační rovnice do druhé bylo řešeno pomocí přepínače a Fcn1, 2. Posledním problémem řešení modelu bylo upravit vstup schéma na rozmezí 0 – 0.5. Je to z toho důvodu, že napouštěcí ventil pracuje s tímto rozmezím a tento interval odpovídá otevření ventilu 0 – 100 %. Aby nedošlo k překročení hranice 0.5, čímž by mohlo dojít ke zničení ventilu, byla na vstup umístěna saturace. Do modelu zásobníku tedy vstupuje napětí 0 – 0.5V a vystupuje z něj výška hladiny v napětí, která se dále přepočítává na výšku v milimetrech.

## 5.2 Kalibrace zásobníku

Jelikož každé měření sebou nese určitou nepřesnost měření senzorů, je nutné, aby před každým měřením byla provedena jejich kalibrace. V našem případě je to senzor na snímání výšky hladiny v zásobníku a je nutné, aby výška hladiny odečtená ze senzoru odpovídala skutečné výšce hladiny. Proto bylo nutné porovnat a vykreslit naměřenou výšku získanou senzorem a skutečnou výšku hladiny a získat tak aproximační rovnici.

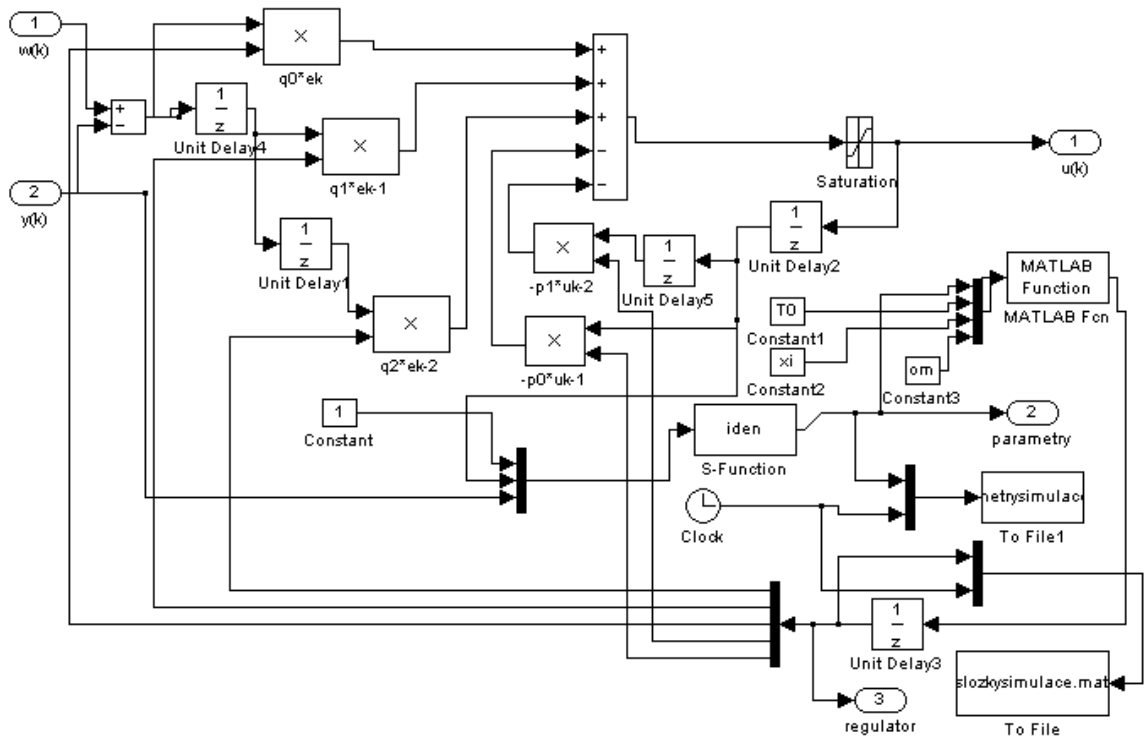


Obr. 15: Kalibrační křivka

Z obr. 15 byla získána rovnice regrese, kterou bylo nutné doplnit na výstup senzoru, aby data získána senzorem odpovídala skutečné výšce odečtené na zásobníku kapaliny. Po takto provedené kalibraci bylo možné zahájit měření.

## 6 REÁLNÉ ŘÍZENÍ A SIMULACE

V této kapitole se budeme zabývat výsledky získanými z reálného řízení a ze simulace, kdy pomocí simulace bylo hledáno co nejlepší řešení nastavení adaptivního regulátoru. Jeho návrh udávají rovnice (1) – (26). Pomocí těchto rovnic a návrhu řízení byl vytvořen obvod tohoto regulátoru, který má zapojení:

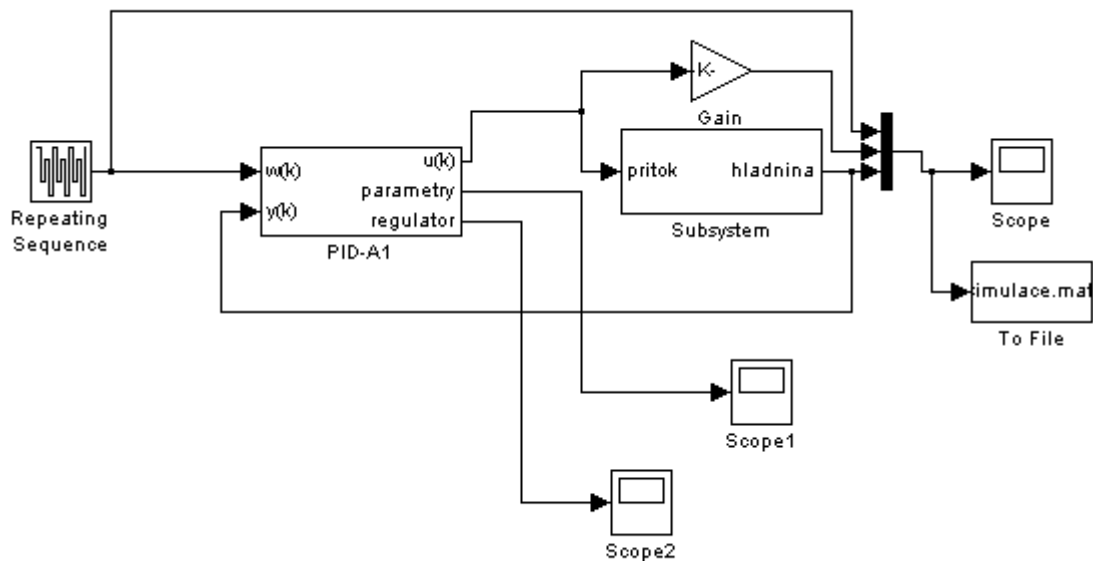


Obr. 16: Schéma regulátoru

Do regulátoru vstupuje žádaná hodnota a regulovaná veličina. Zapojení regulátoru nám udává zákon řízení rovnice (20). Obvod obsahuje S-Funkci *iden*, kde probíhá průběžná identifikace na základě předchozích akčních zásahů a regulovaných veličin. Takto získané výsledky identifikace jsou pomocí *Matlab Funkce* přepočítány na výstupy složek PID regulátoru. Identifikace a nastavení parametrů regulátoru je po každém časovém okamžiku  $T_0$ . Než obvodem ale projde první cyklus adaptace je nutné regulátor spustit z nějakých nastavených počátečních hodnot, které jsou v dalším kroku nahrazeny aktuálními.

Takto navržený obvod regulátoru byl použit pro simulaci řízení. Regulační obvod simulace pak má následující tvar:





Obr. 17: Regulační obvod pro simulaci

**Repeating Sequence**

Zde se zadává průběh žádané hodnoty  $w(t)$ , která vstupuje do adaptivního regulátoru.

**PID - A1**

Subsystem adaptivního regulátoru. Regulátor obsahuje dva vstupy a tři výstupy. Vstupními veličinami do regulátoru jsou žádaná hodnota a regulovaná veličina. Výstup tvoří akční zásah, parametry identifikované soustavy a složky regulátoru.

**Subsystem**

Tento systém obsahuje zapojení matematického modelu zásobníku, který se nachází na obr. 14. Na vstup se přivádí hodnota přítoku a výstupem ze systému je výška hladiny.

**Gain**

Slouží pouze k vykreslení akčního zásahu (0 – 100%). Jeho hodnota je nastavena na 100 z toho důvodu, že akční zásah vystupuje v intervalu  $\langle 0,1 \rangle$ .

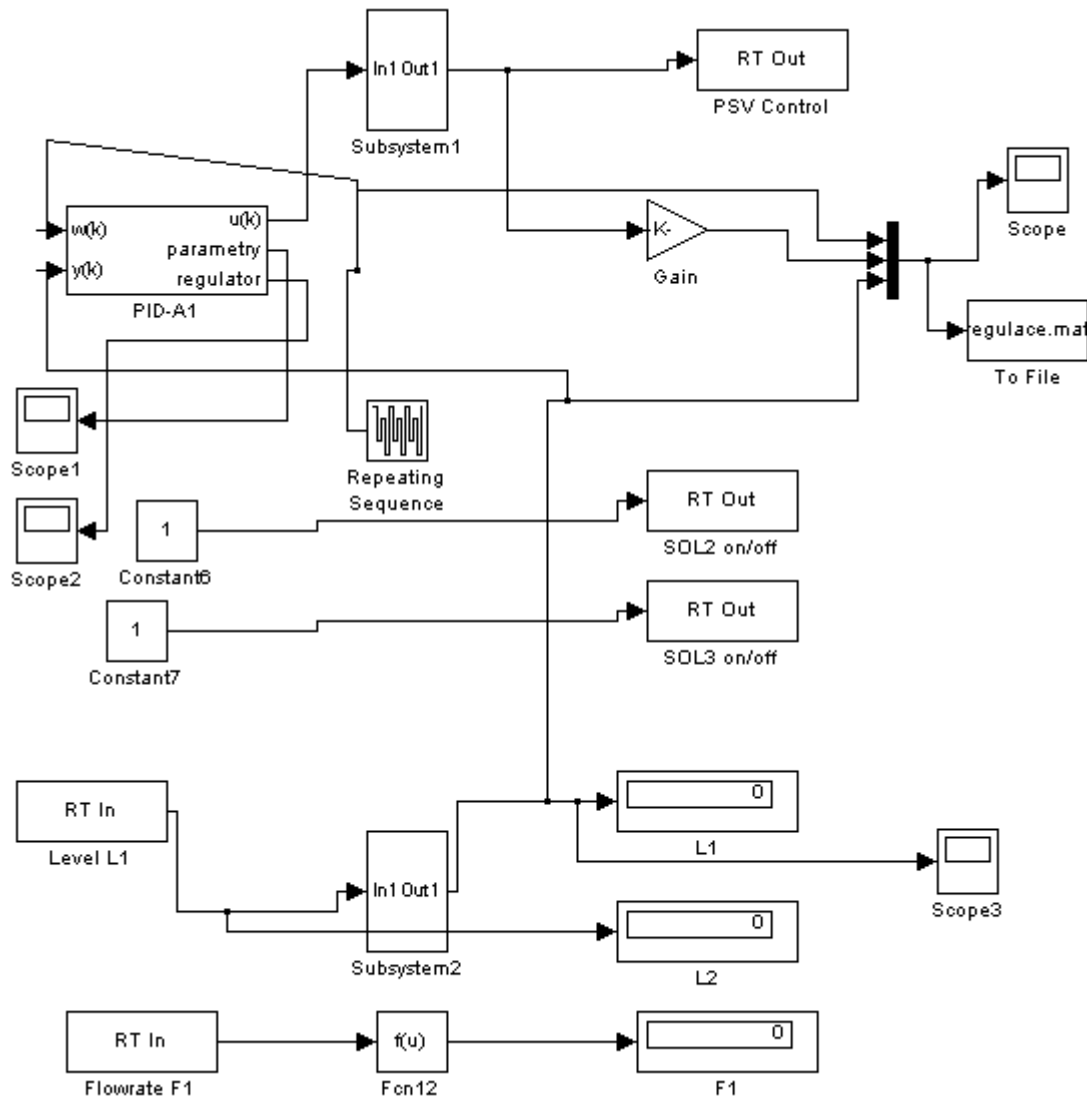
**Scope**

Slouží k zobrazení zadaných veličin v čase.

**To File**

K ukládání zadaných veličin do souboru. Výhodou je opětovné vyvolání uložených dat.

Pomocí simulačních experimentů dle obr. 17, tak bylo úkolem zjistit co nejlepší nastavení regulátoru. Jelikož se jedná o regulátor typu PID – A1 a jeho strukturu ovlivňuje umístění pólů pomocí charakteristického polynomu, bylo nutno zjistit co nejlepší nastavení parametrů  $\zeta$  a  $\omega$ , které tento polynom ovlivňují a záleží tak na nich celá dynamika systému a kvalita regulace. Po vhodném nastavení regulátoru mohlo být provedeno reálné řízení, které má regulační zapojení:



Obr. 18: Regulační obvod pro reálné řízení

### *Repeating Sequence*

Zde se zadává průběh žádané hodnoty  $w(t)$ , která vstupuje do adaptivního regulátoru.

***PID - A1***

Subsystem adaptivního regulátoru. Regulátor obsahuje dva vstupy a tři výstupy. Vstupními veličinami do regulátoru jsou žádaná hodnota a regulovaná veličina. Výstup tvoří akční zásah, parametry identifikované soustavy a složky regulátoru.

***Subsystem 1***

Převod napětí z rozsahu 0 – 1V na 0 – 0,5 V se kterým pracuje PSV pumpa.

***PSV Control***

Ovládání PSV pumpy v rozmezí 0 – 0,5V. 0 – zavřeno, 0,5 – plně otevřený ventil.

***SOL2/SOL3***

Dvoupolohové ventily na vypouštění nádrže. Mohou být buď otevřeny, nebo zavřeny.

***Level L1***

Vyhodnocená výška hladiny pomocí ultrazvukového senzoru. Výstup je v napětí.

***Subsystem 2***

Zde se nachází přepočítání napětí na výšku hladiny v milimetrech a zadává se zde rovnice regrese při kalibrování nádrže.

***Flowrate F1***

Vstup na snímání průtoku. Hodnota aktuálního průtoku udává hodnotu ve voltech.

***Fcn 12***

Převádí výstupní napětí průtoku na ml/min.

***Gain***

Slouží pouze k vykreslení akčního zásahu (0 – 100%).

***Scope***

Slouží k zobrazení zadaných veličin v čase.

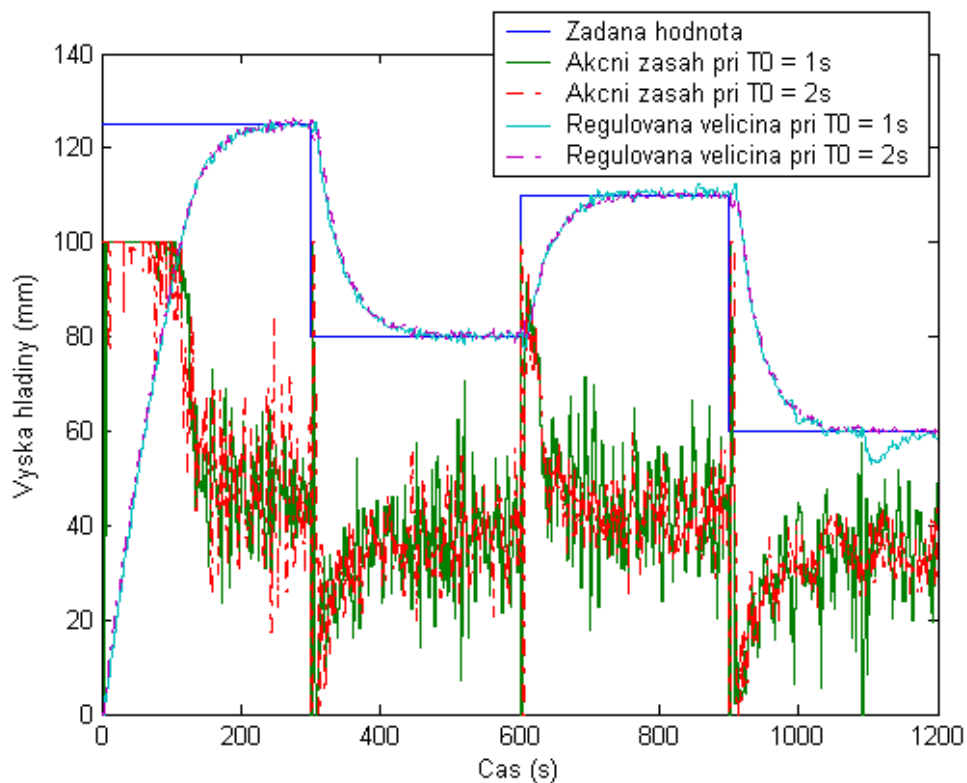
***L1, L2, F1***

Slouží pouze k zobrazení aktuálních hodnot v čase

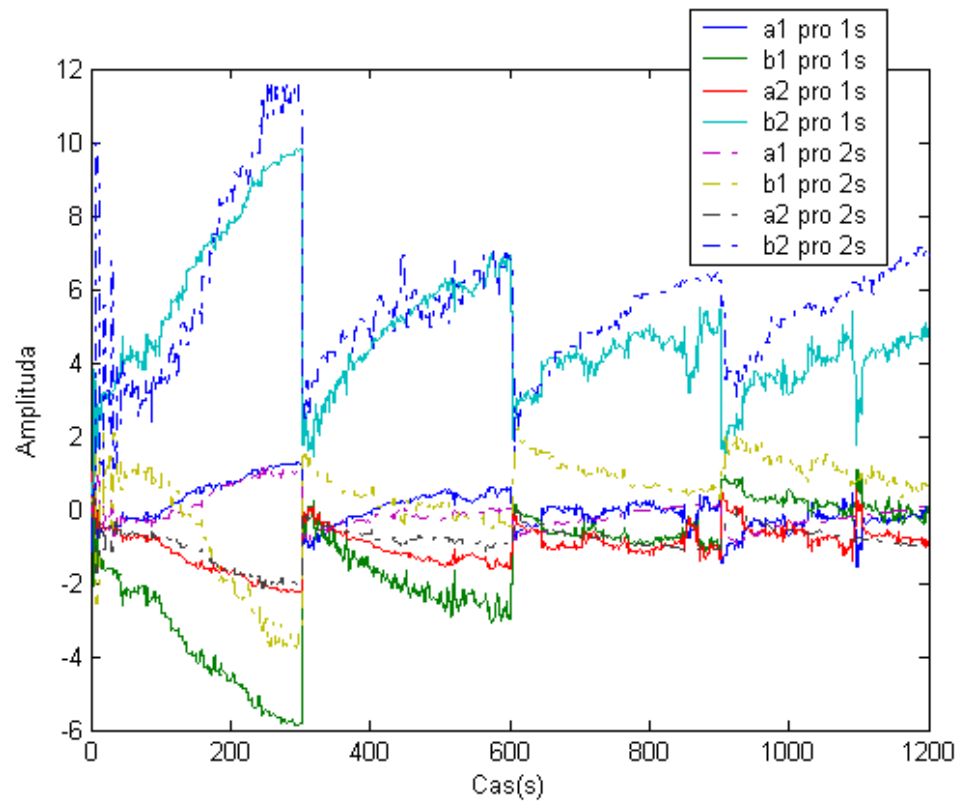
### To File

K ukládání zadaných veličin do souboru. Výhodou je opětovné vyvolání uložených dat.

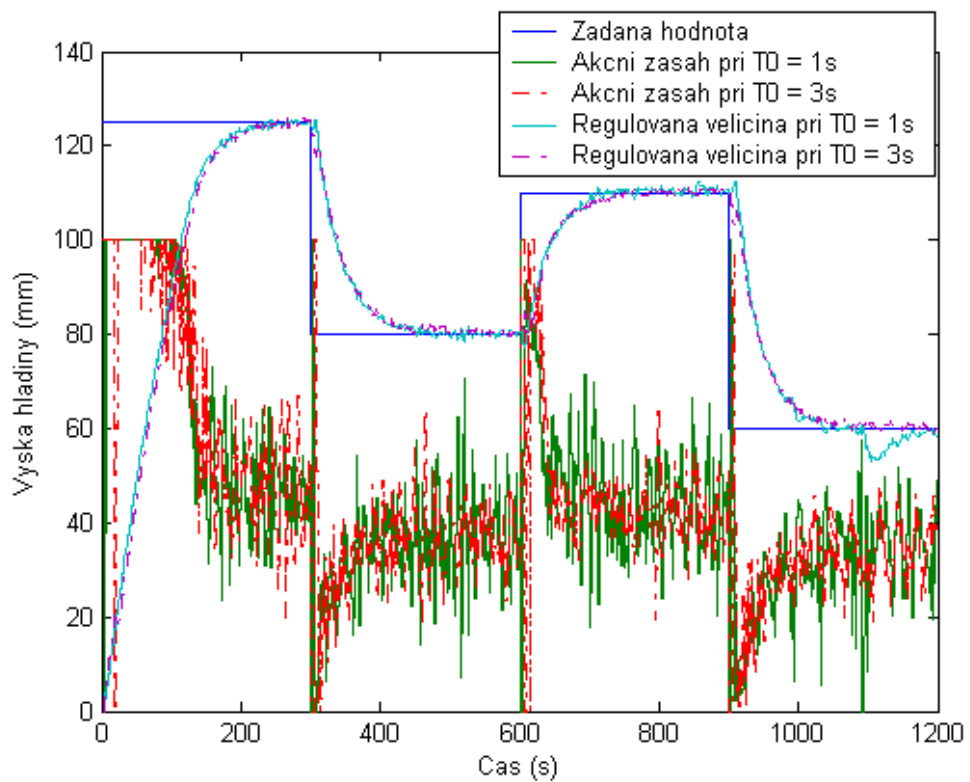
Pomocí takto navrhnutého regulačního obvodu bylo možné provádět reálné řízení s nastavenými parametry regulátoru, které byly zjištěny pomocí simulací. Výsledky a zjištění optimálních nastavitelných parametrů regulátoru ze simulací ale nemůžeme brát jako stoprocentně správné z důvodu, že reálná soustava vykazuje jiné chování kvůli vnitřním jevům, jako je šum. Proto bylo nutné vyzkoušet reálné řízení pro různé nastavení těchto parametrů v jejich okolí, aby bylo možné porovnat kvalitu těchto regulací při různém nastavení regulátoru. Kvalitu a pochod regulace nám ovlivňují tři nastavitelné parametry  $\zeta$  – koeficient tlumení soustavy,  $\omega$  – úhlová rychlost ovlivňující dynamické chování soustavy a perioda vzorkování  $T_0$ , které se za celou dobu regulace nemění a jsou pevně nastaveny. Výsledky zjištěných měření jsou zobrazeny v následujících grafech a je porovnávána kvalita regulace v závislosti na nastavených parametrech regulátoru. Kvůli nepřehlednosti akčního zásahu, do sebe byly vykresleny pouze dva průběhy regulací.

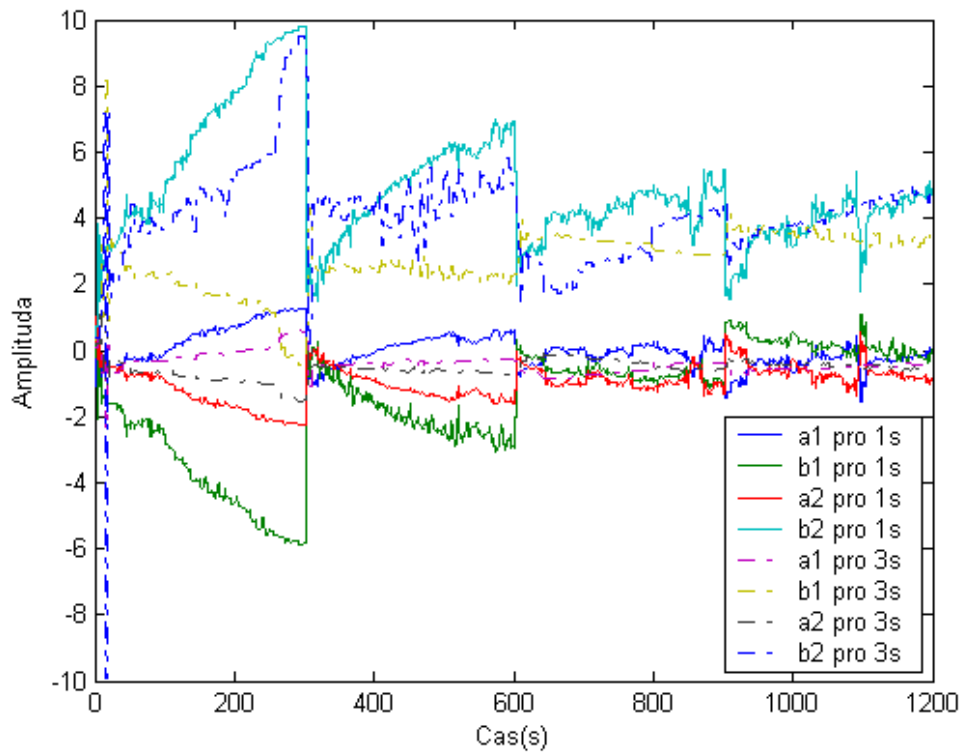


Obr. 19: Regulace pro různou periodu vzorkování při  $\zeta = 1.9$ ,  $\omega = 0.1$

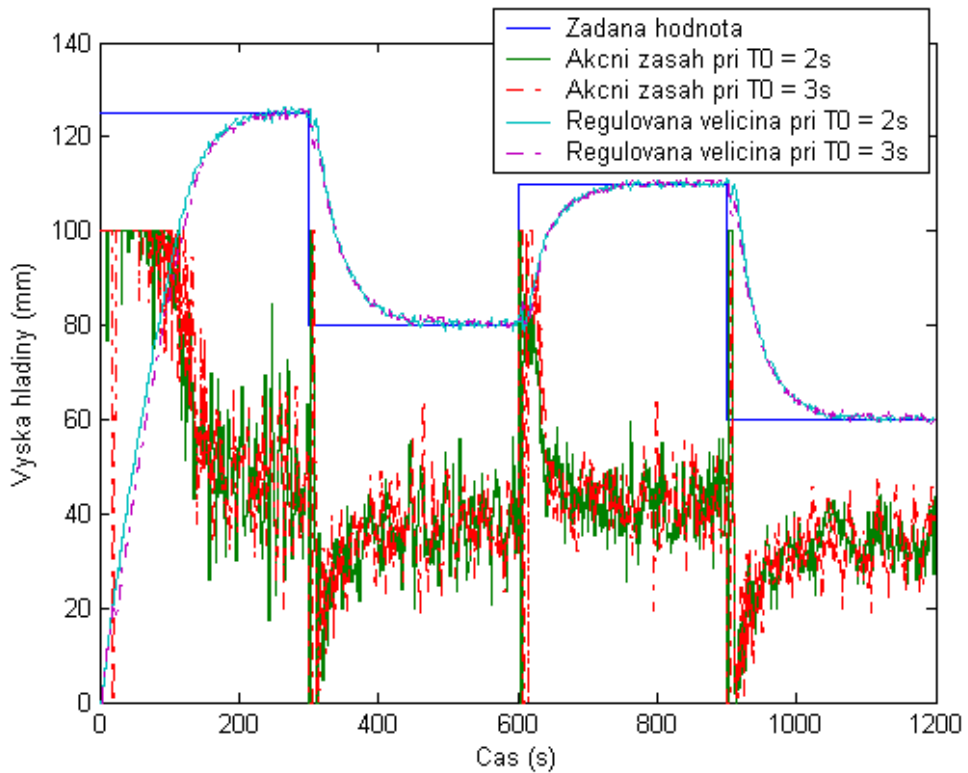


Obr. 20: Průběhy identifikace parametrů soustav k obr. 19

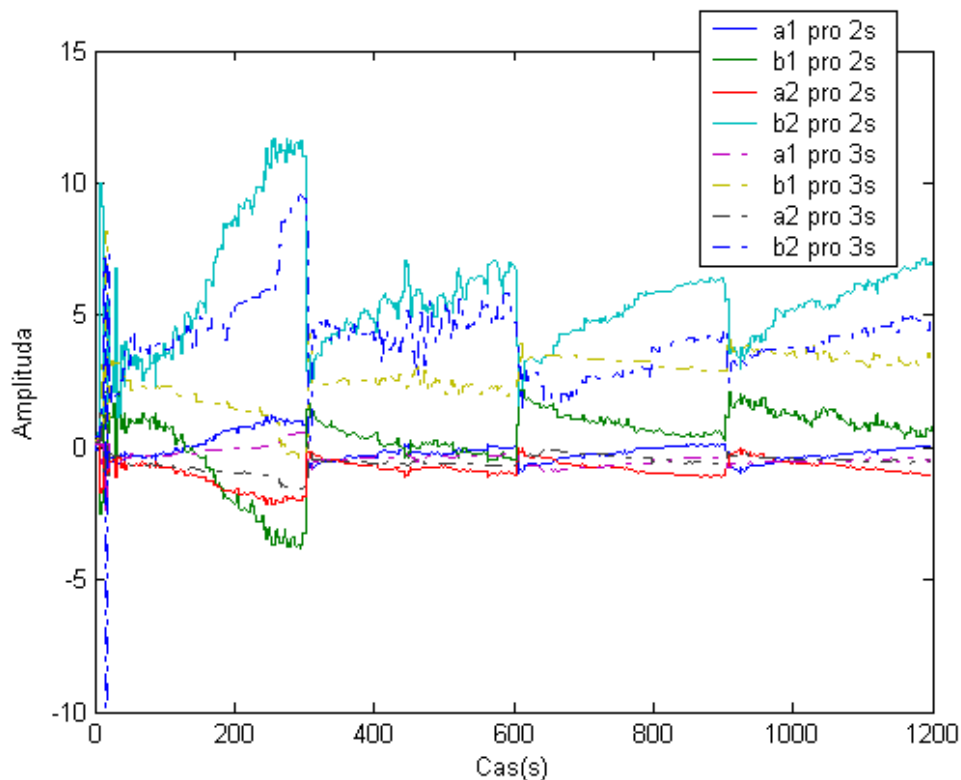

 Obr. 21: Regulace pro různou periodu vzorkování při  $\xi = 1.9$ ,  $\omega = 0.1$



Obr. 22: Průběhy identifikace parametrů soustav k obr. 21



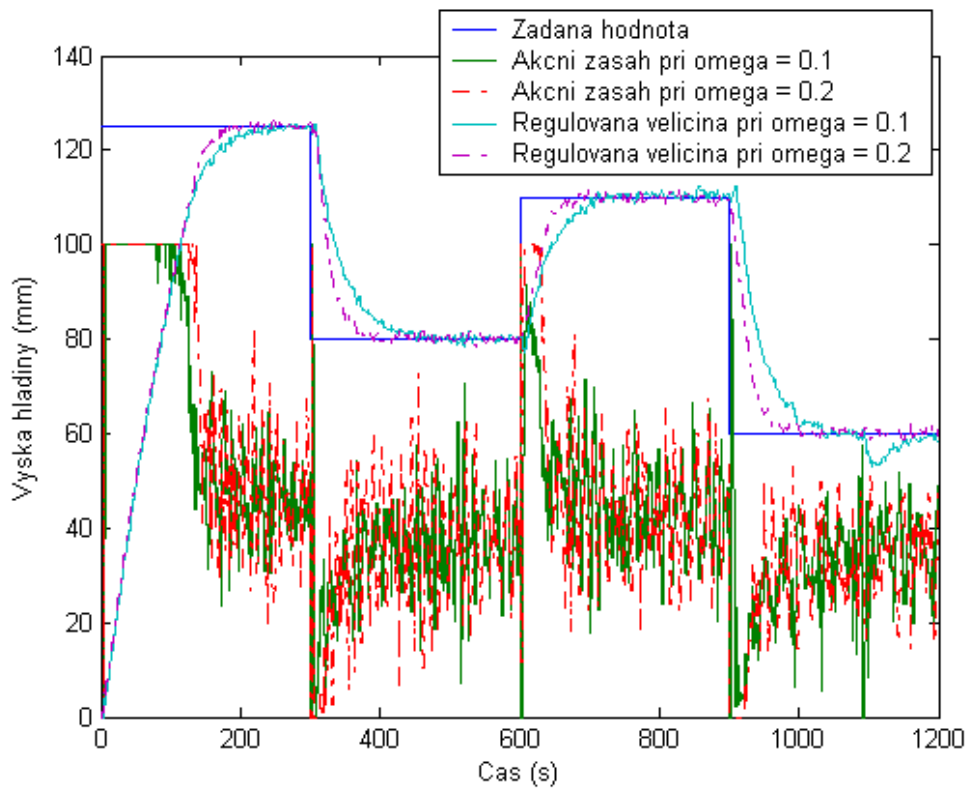
Obr. 23: Regulace pro různou periodu vzorkování při  $\xi = 1.9$ ,  $\omega = 0.1$



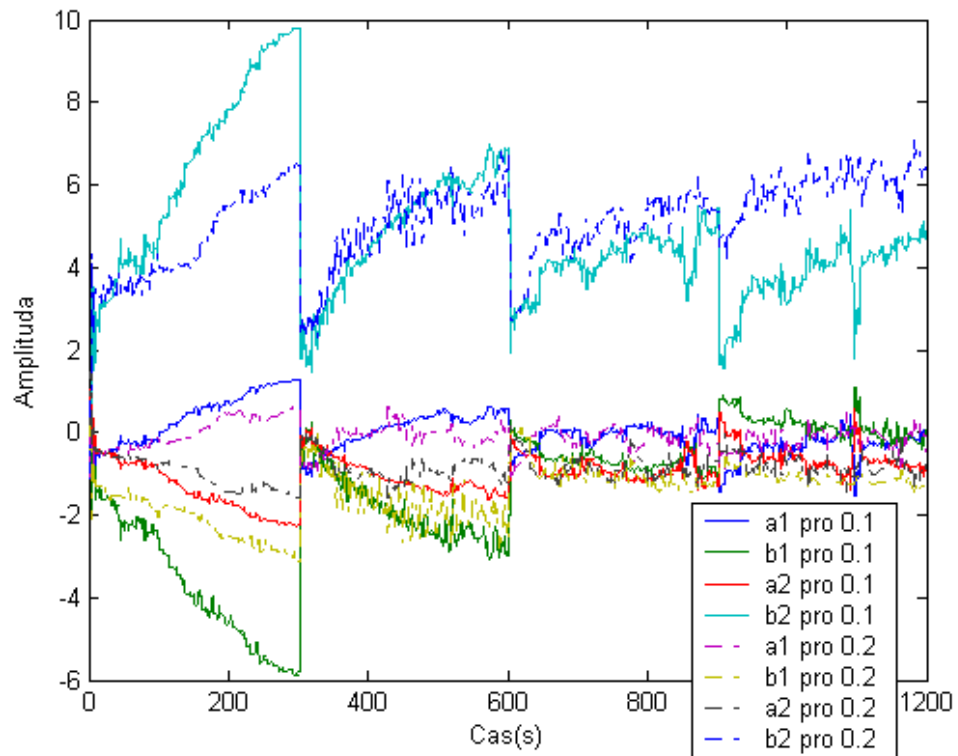
Obr. 24: Průběhy identifikace parametrů soustav k obr. 23

Na obrázcích 19, 21 a 23 byla porovnána kvalita regulace při stejném nastavení koeficientů regulátoru  $\xi = 1.9$  a  $\omega = 0.1$  při různé periodě vzorkování signálu. Na ostatních je možné vidět, jak probíhaly jednotlivé identifikace soustav, ke kterým pak byly následně přepočítávány složky regulátoru. Jak je možné vidět ze všech grafů, tak nejlepší průběh byl naměřen při periodě vzorkování 2 sekundy, kdy průběh regulované veličiny neměl příliš kmitavý průběh a což je nejdůležitější, průběh akčního zásahu byl nejmén kmitavý. Při periodě 1 sekunda došlo v závěru regulace k malému podkmitu, což mohlo způsobit špatné vyhodnocení výšky hladiny, při třech sekundách měla regulace dobrý průběh, ale s větší kmitavostí regulované veličiny.

Kvalitu regulace nám ale neovlivňuje jen perioda vzorkování a proto bylo vyzkoušeno další nastavení regulátoru a sledován regulační pochod při stejném nastavení periody vzorkování, ale se změnou parametru úhlové rychlosti.

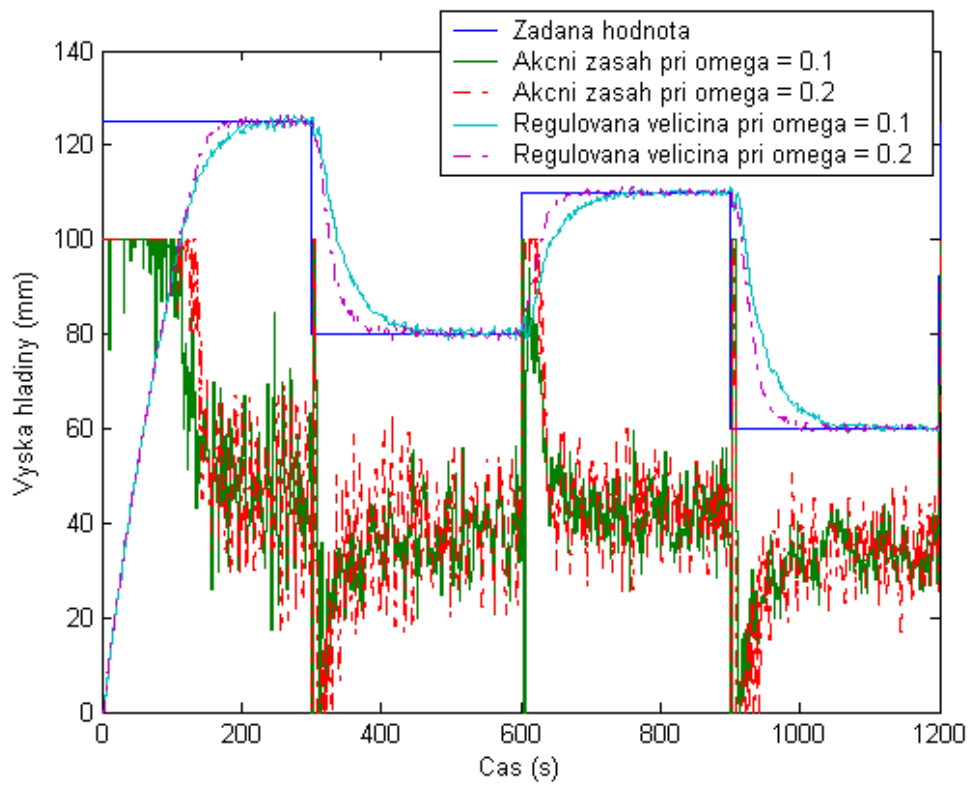
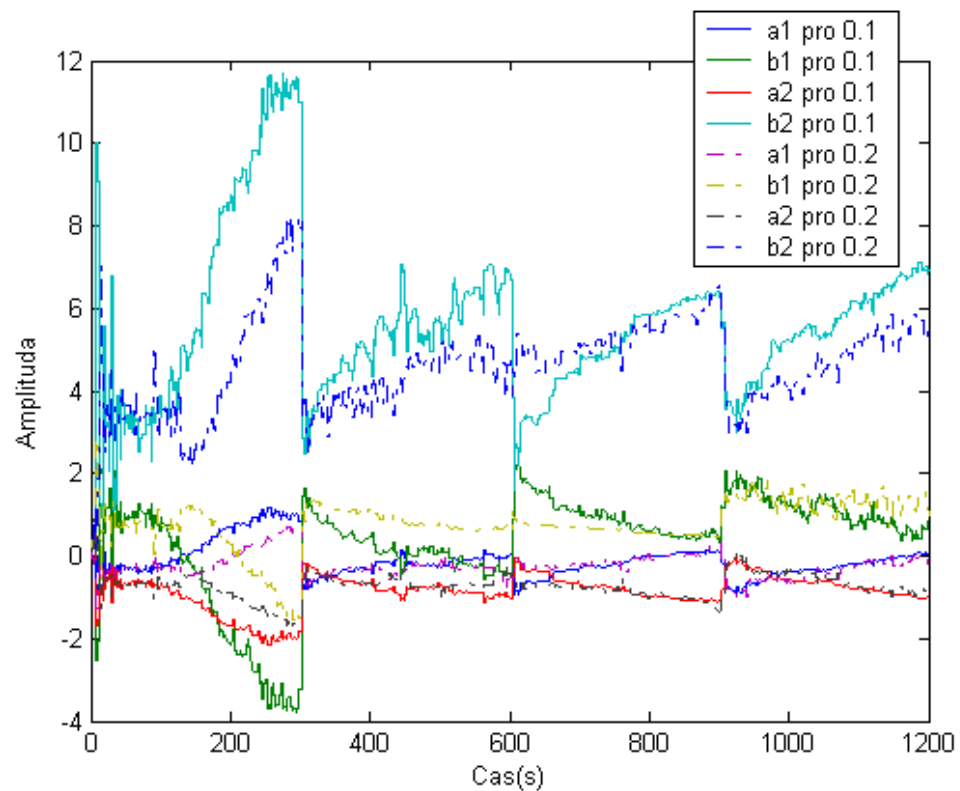


Obr. 25: Regulace pro různou úhlovou rychlost při  $\xi = 1.9$ ,  $T_0 = 1s$

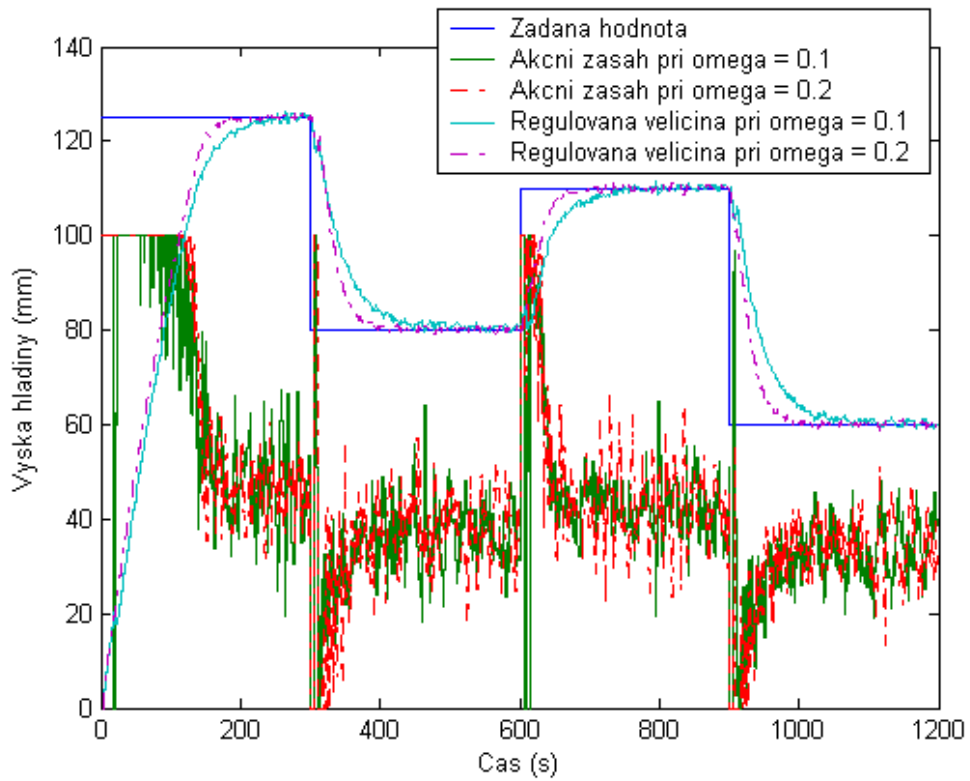


Obr. 26: Průběhy identifikace parametrů soustav k obr. 25

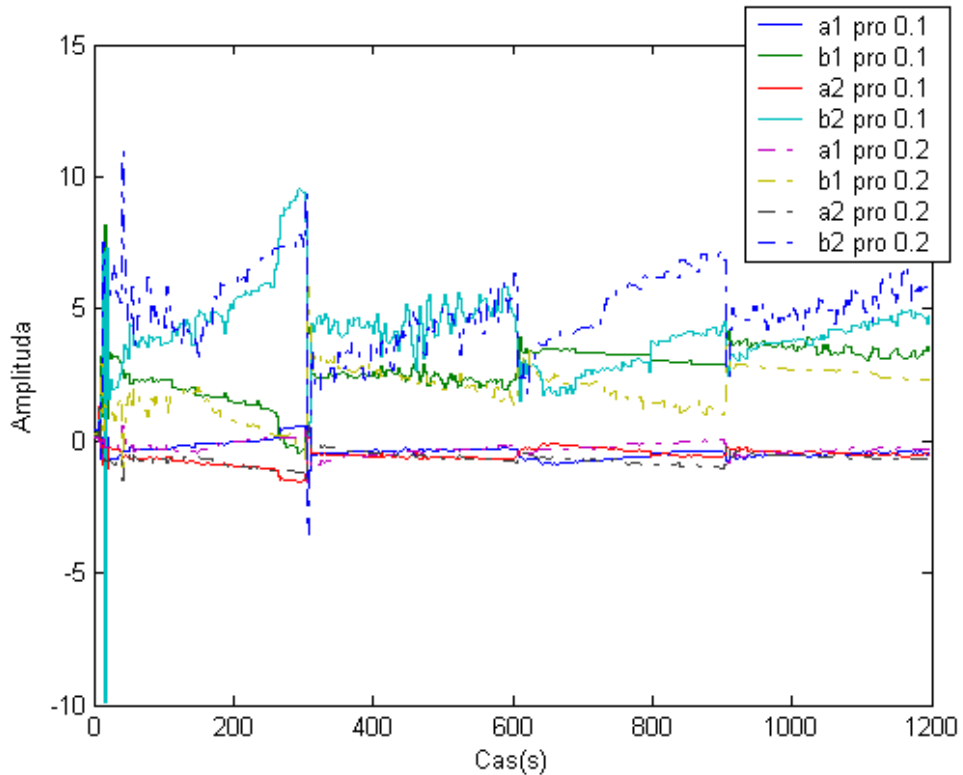



 Obr. 27: Regulace pro různou úhlovou rychlost při  $\xi = 1.9$ ,  $T_0 = 2s$ 


Obr. 28: Průběhy identifikace parametrů soustav k obr. 27



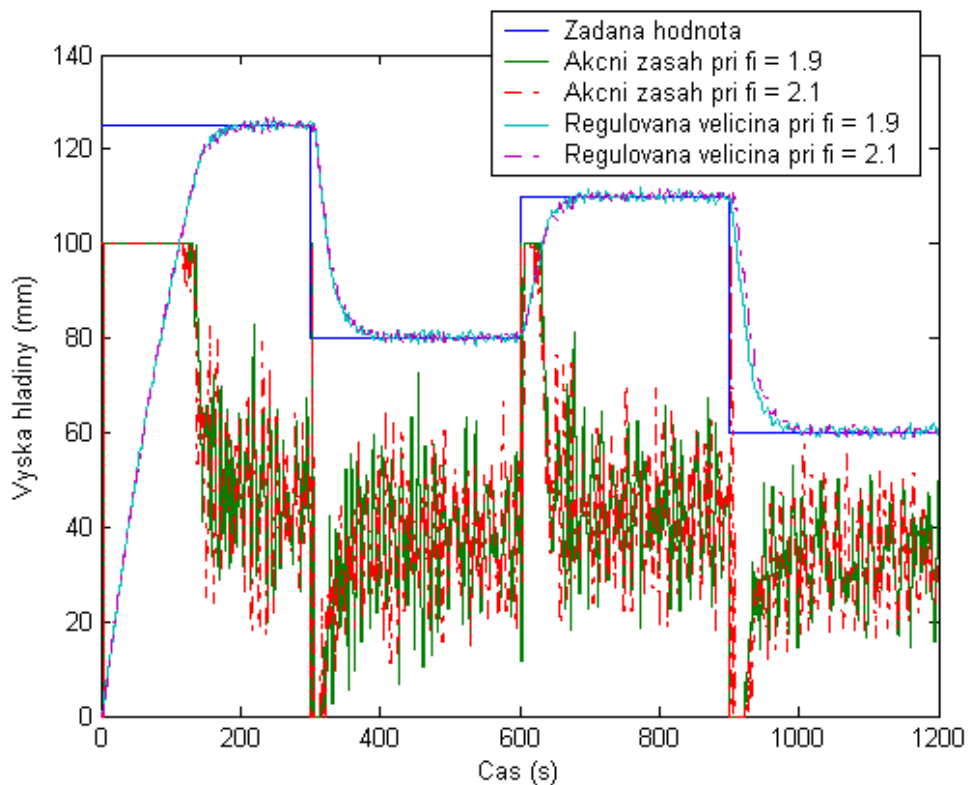
Obr. 29: Regulace pro ruznou uhlovou rychlost při  $\xi = 1.9$ ,  $T_0 = 3s$



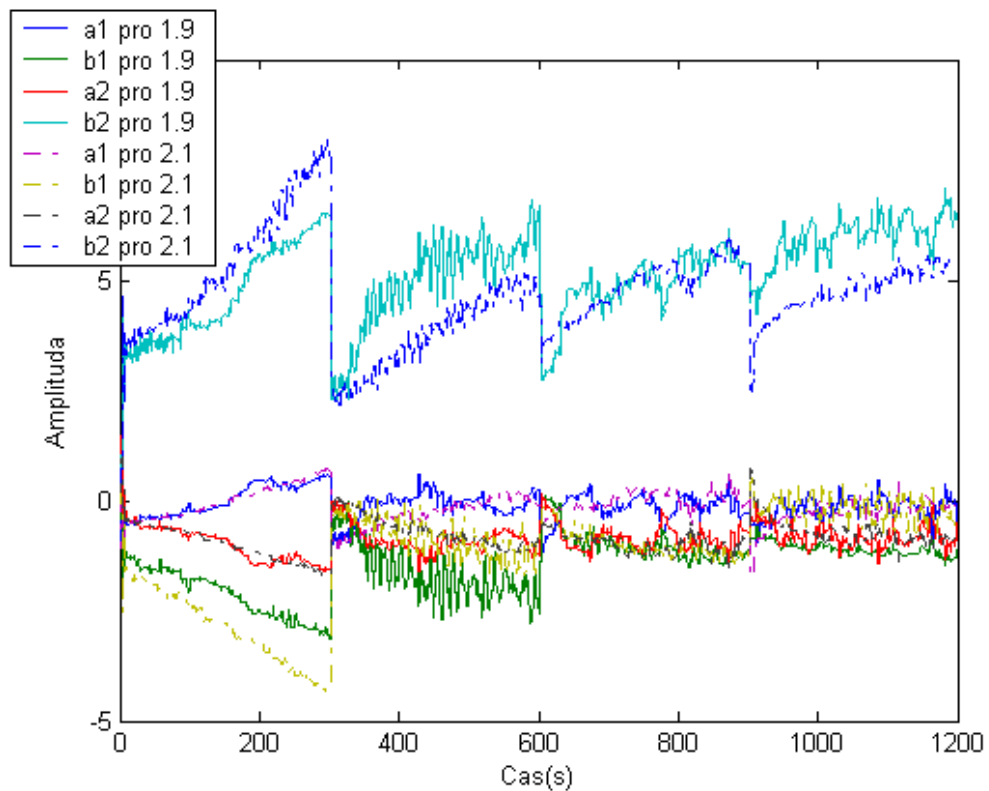
Obr. 30: Prubehy identifikace parametrů soustav k obr. 29

Jak je možné vidět z grafů, tak se vzrůstající hodnotou úhlové rychlosti dochází k tomu, že regulovaná veličina se dříve ustálí na žádané hodnotě. U periody vzorkování 1 a 2 sekundy je však tomu na úkor větších akčních zásahů do soustavy. U vzorkování po třech sekundách je možné říci, že regulace při  $\omega = 0.2$  ve většině části jeví lepší známky kvality regulace z důvodu menší kmitavosti akčního zásahu.

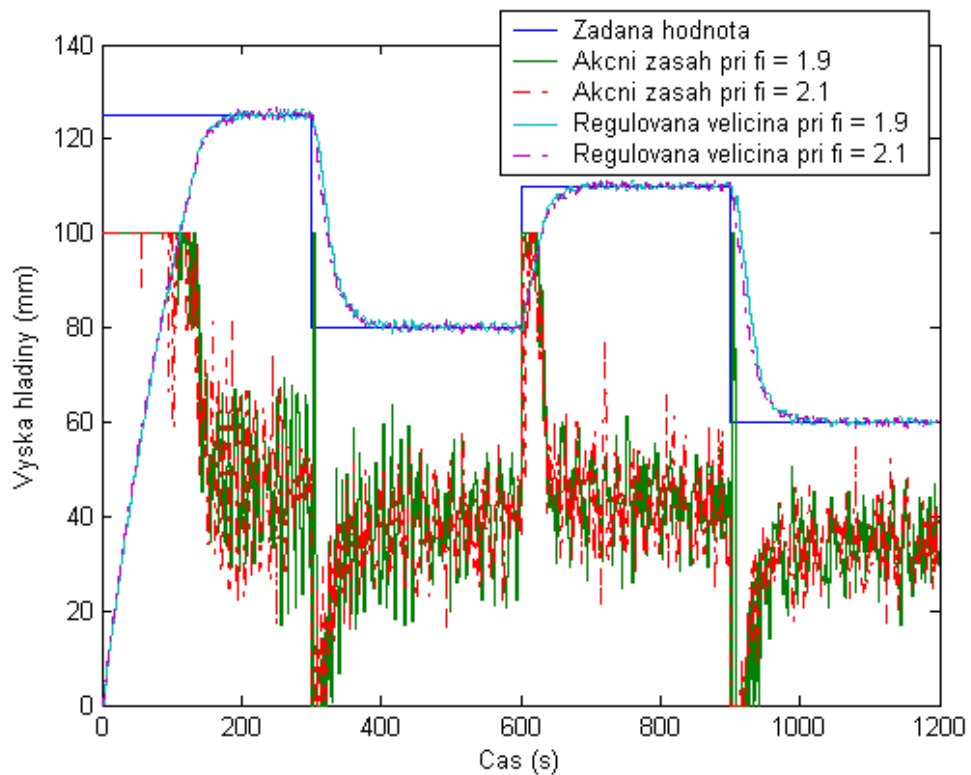
Dalším faktorem ovlivňující chování systému byl koeficient tlumení soustavy. Proto byla na následujících měřeních porovnána kvalita regulace, pokud budeme tento koeficient měnit při stejném nastavení periody vzorkování a úhlové rychlosti.

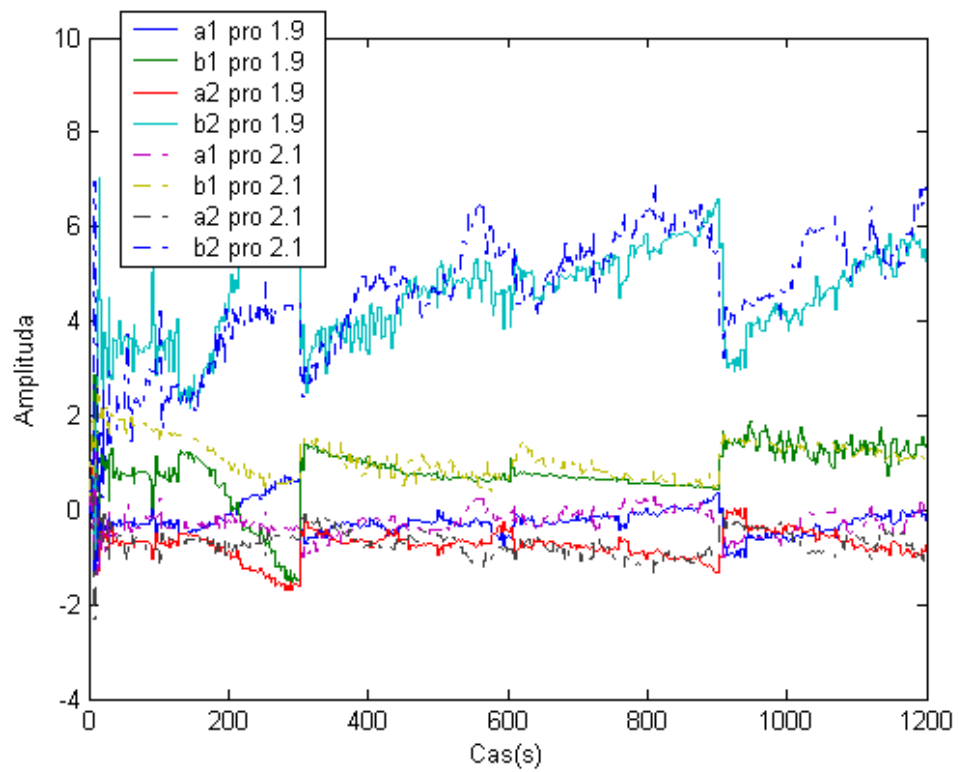


Obr. 31: Regulace pro různý koeficient tlumení při  $\omega = 0.2$ ,  $T_0 = 1s$

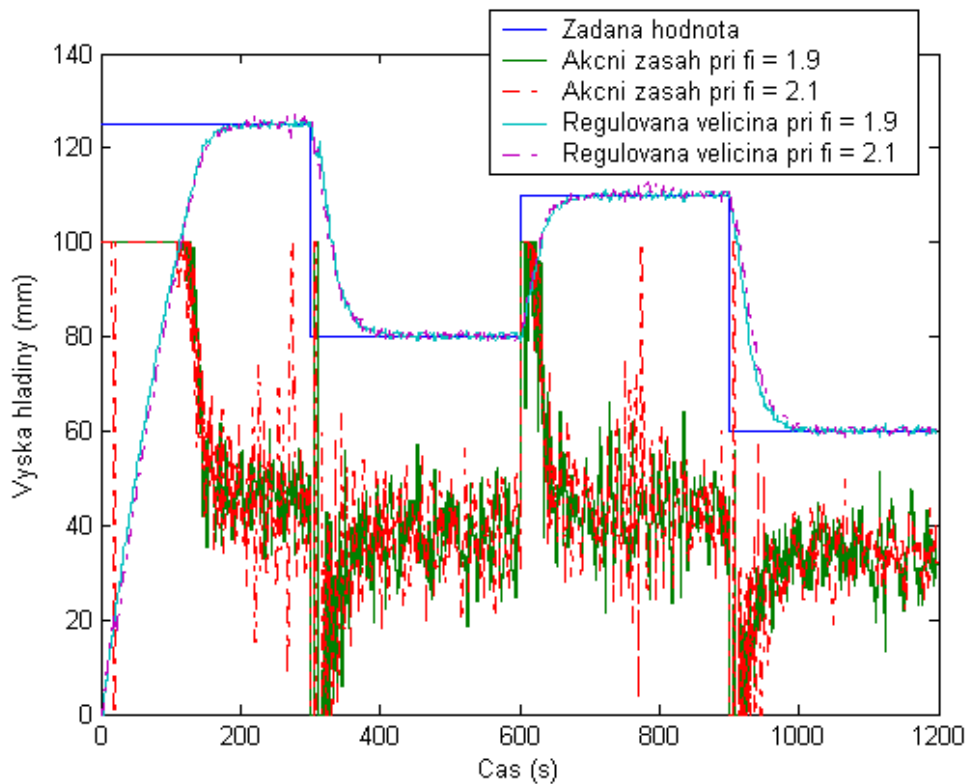


Obr. 32: Průběhy identifikace parametrů soustav k obr. 31

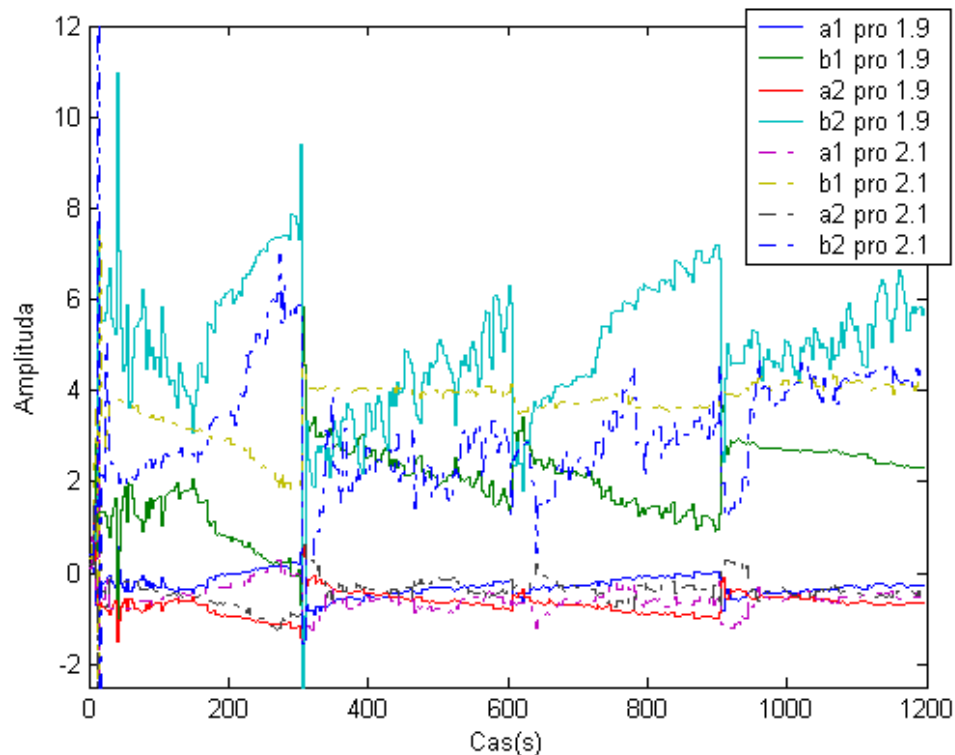

 Obr. 33: Regulace pro různý koeficient tlumení při  $\omega = 0.2$ ,  $T_0 = 2s$



Obr. 34: Průběhy identifikace parametrů soustav k obr. 33



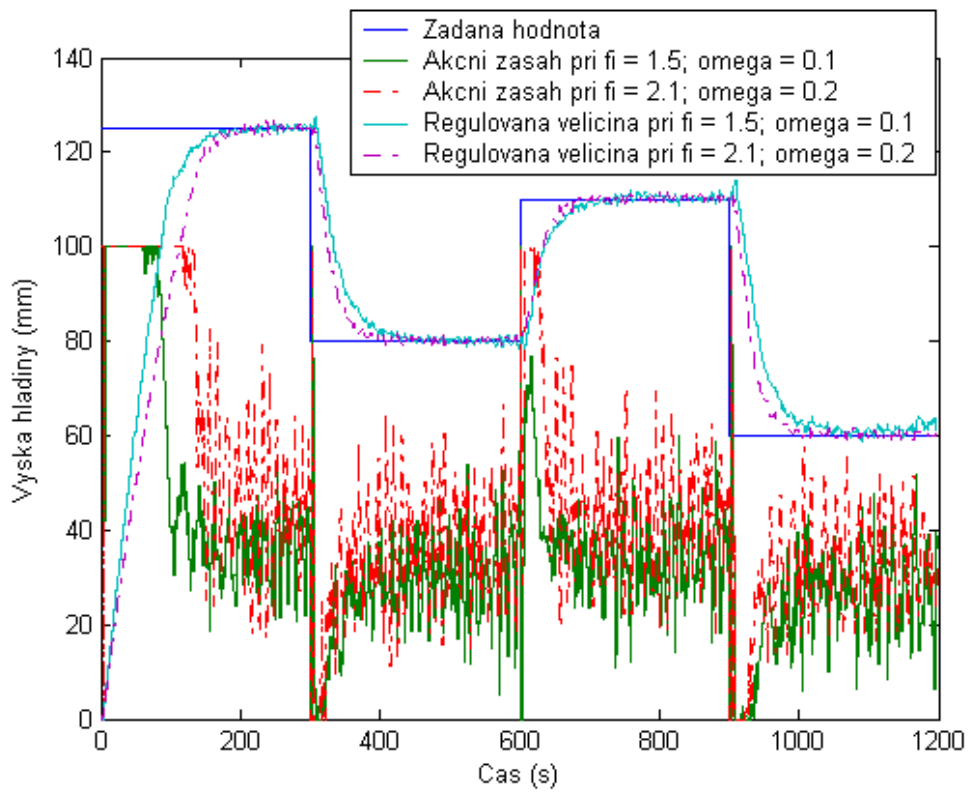
Obr. 35: Regulace pro různý koeficient tlumení při  $\omega = 0.2$ ,  $T_0 = 3s$



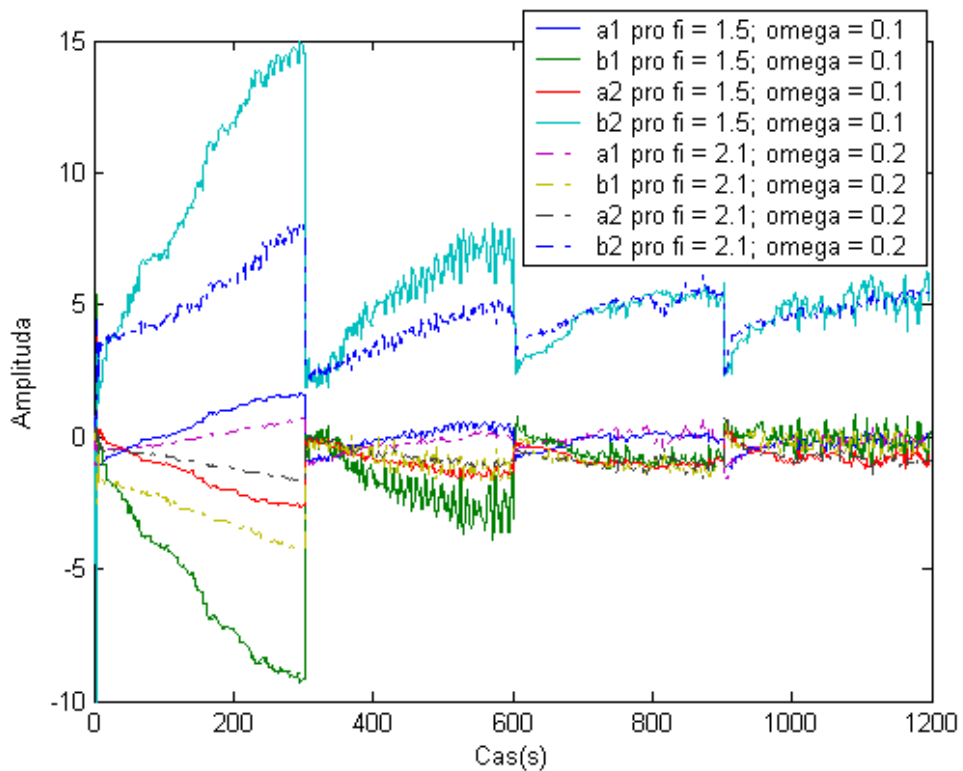
Obr. 36: Průběhy identifikace parametrů soustav k obr. 35

Při posuzování kvality regulace změnou koeficientu tlumení dochází k tomu, že existuje nějaký interval, ve kterém regulace vykazuje dobrý průběh a pokud je parametr příliš velký nebo malý dochází k velkému kmitání akčního zásahu. Při vzorkování jedna sekunda není vidět téměř žádný rozdíl mezi změnou  $\xi$ . U dvou sekund se jeví jako lepší nastavení 2.1, z důvodu menších skoků akčního zásahu při skokové změně žádané hodnoty. Koeficient menší než dva by bylo vhodné volit u periody vzorkování 3 sekundy, protože jinak dochází k většímu kmitání regulované veličiny a taky k rozhození akčního zásahu.

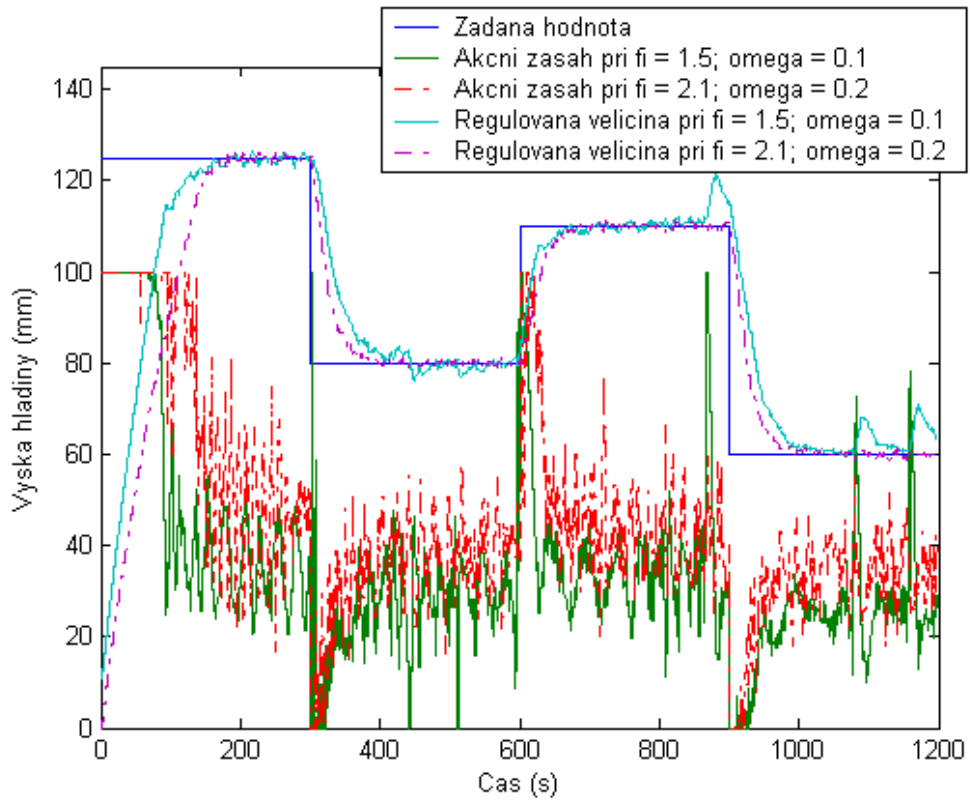
Dalším možným porovnáním je najít takové řešení, kdy budeme zkoušet, jak se navzájem ovlivňuje změna všech parametrů a zjistit jaká jejich kombinace je nejlepší v kvalitě regulace. Existuje nekonečně mnoho řešení tohoto nastavení, ale budeme uvažovat následující nastavení u každého průběhu regulace a to změnou parametrů  $\xi$  a  $\omega$  při stejné periodě vzorkování.



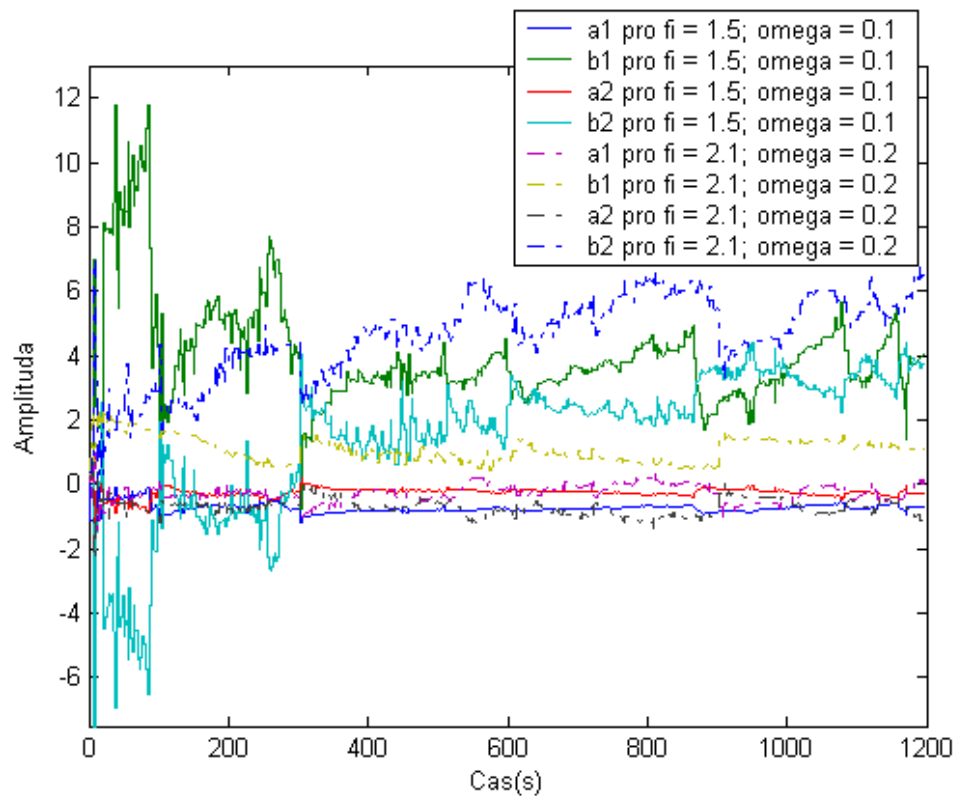
Obr. 37: Regulace pro různé parametry  $\xi$  a  $\omega$ ,  $T_0 = 1s$



Obr. 38: Průběhy identifikace parametrů soustav k obr. 37

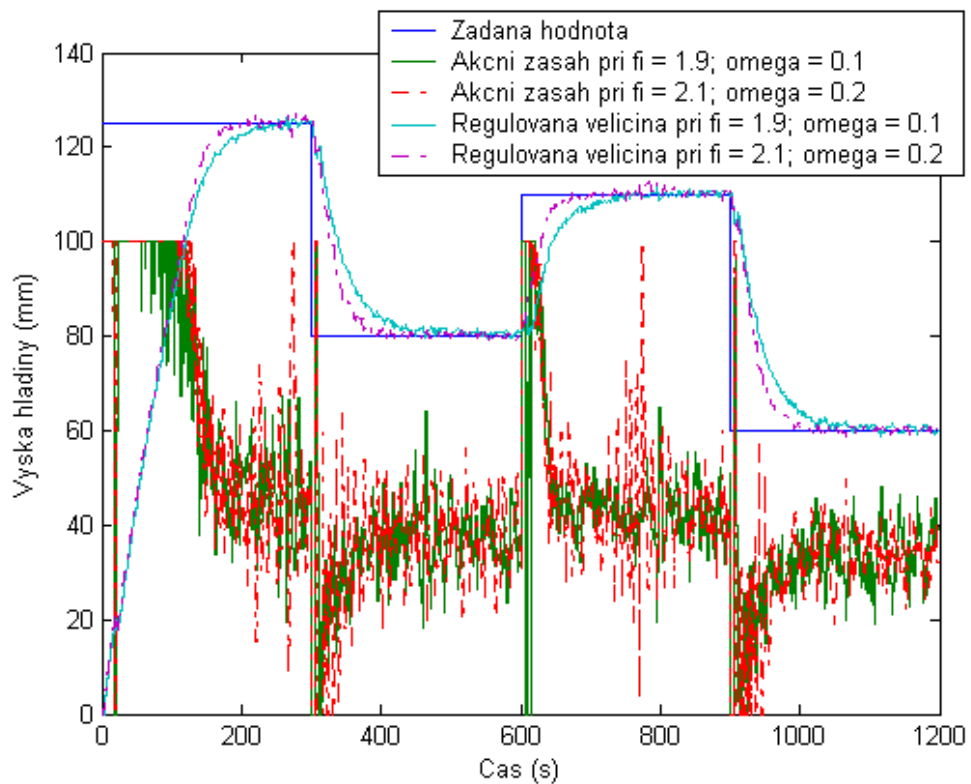
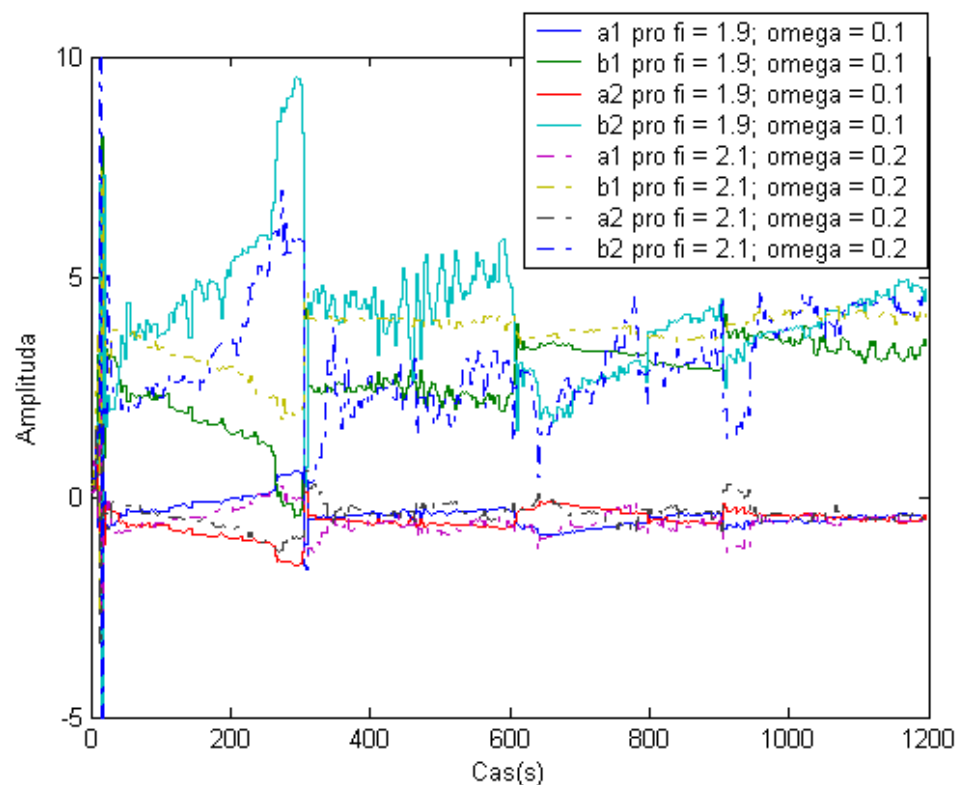


Obr. 39: Regulace pro různé parametry  $\xi$  a  $\omega$ ,  $T_0 = 2s$



Obr. 40: Průběhy identifikace parametrů soustav k obr. 39



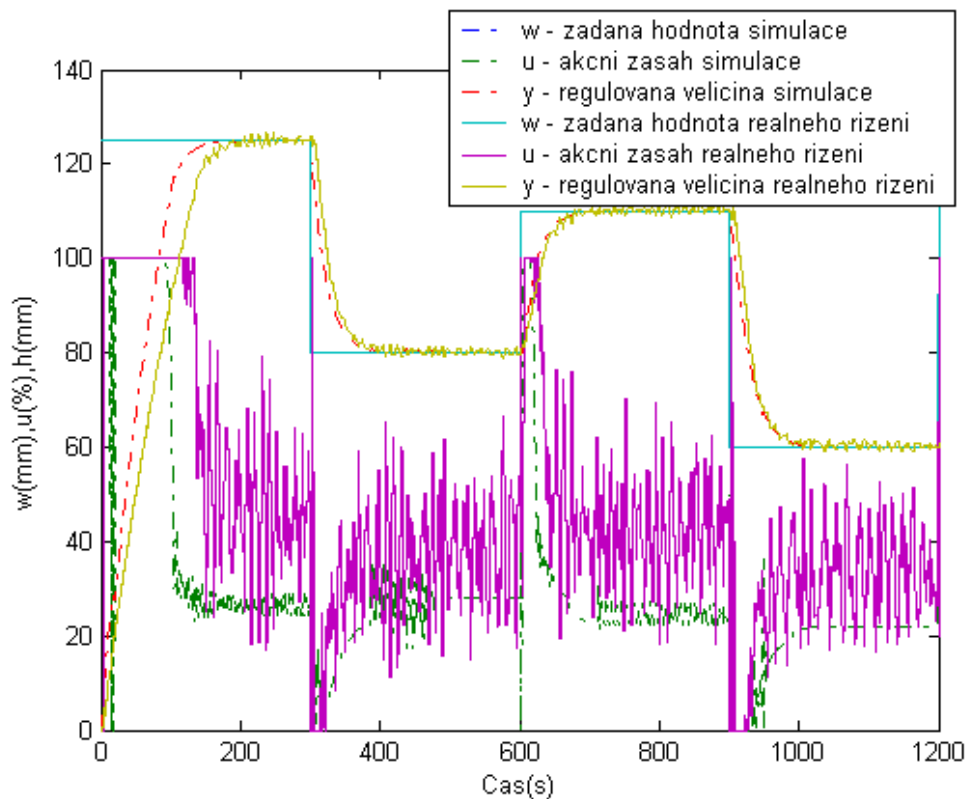

 Obr. 41: Regulace pro různé parametry  $\xi$  a  $\omega$ ,  $T_0 = 3s$ 


Obr. 42: Průběhy identifikace parametrů soustav k obr. 41

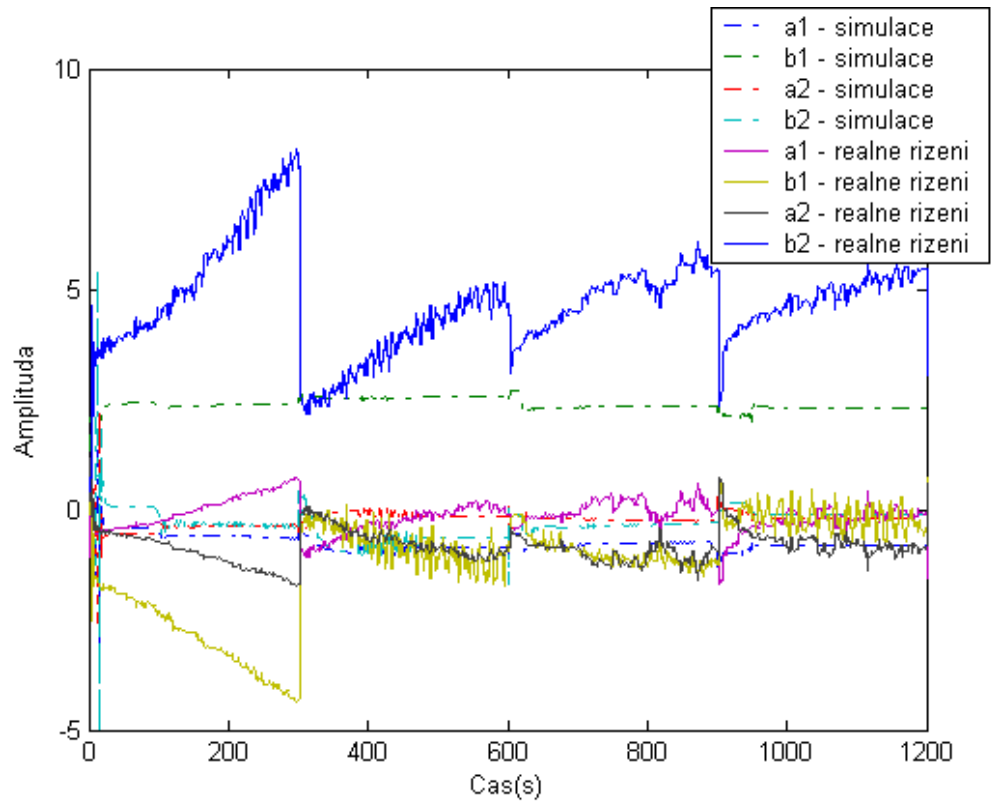
Z obr. 37 je možné vidět, že při malém  $\xi$  a  $\omega$  soustava rychle reaguje na jakoukoliv změnu a tudíž nedochází k velké změně akčního zásahu. Při větších parametrech je soustava díky velkému tlumení zpomalená a díky vyšší frekvenci reaguje na změnu s větším kmitáním. Při periodě dvě sekundy je lepší volit větší parametry z důvodu, že při menších soustava vykazovala místy nestabilní chování a docházelo k větším překmitům a podkmitům. Pro vzorkování tři sekundy je nejlepší nastavit parametr  $\xi$  kolem dvou a  $\omega$  kolem 0.2.

Ze všech grafů je ale patrné, že je těžké vybrat vhodné nastavení každého parametru z důvodu, že každá jiná jejich vzájemná kombinace může vykazovat stejný průběh. Záleží pouze spíše na tom, s jakou kvalitou chceme regulovat a jak velké kmitání regulační veličiny a akčního zásahu je pro nás zanedbatelné.

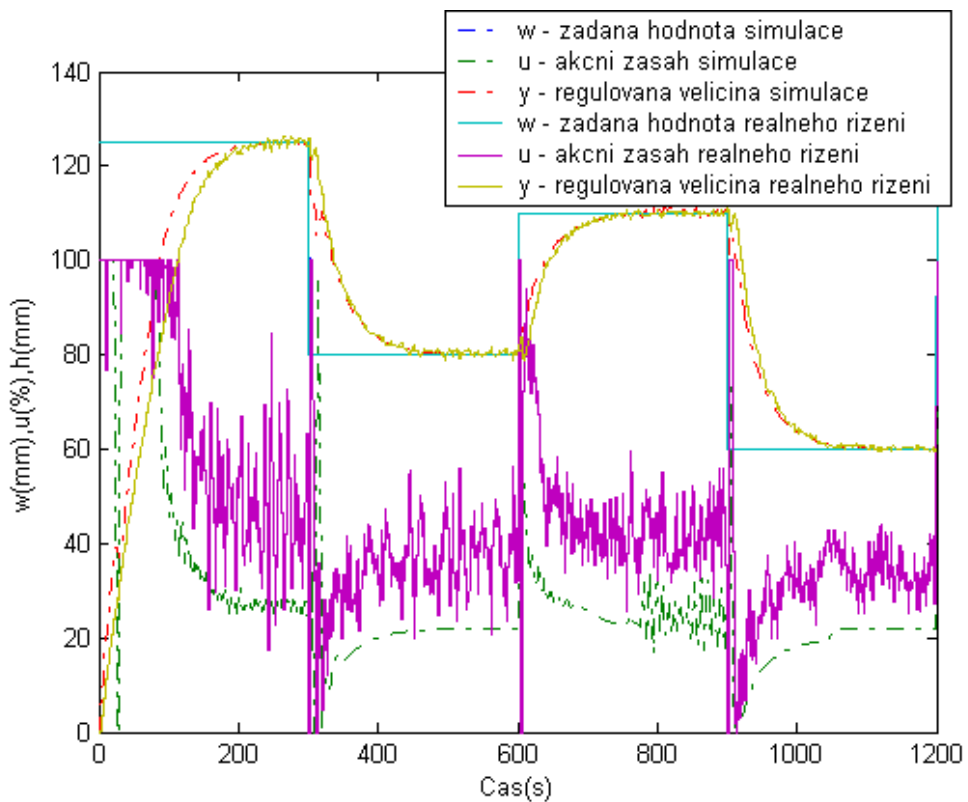
Reálné řízení nikdy nebude vykazovat takové přesné výsledky jako simulace se stejně nastavenými parametry. Proto závěrem této praktické části bylo vytvořeno pro porovnání několik grafů, kde je porovnáno reálné řízení a simulace pro některé nastavení parametrů  $\xi$  a  $\omega$ .



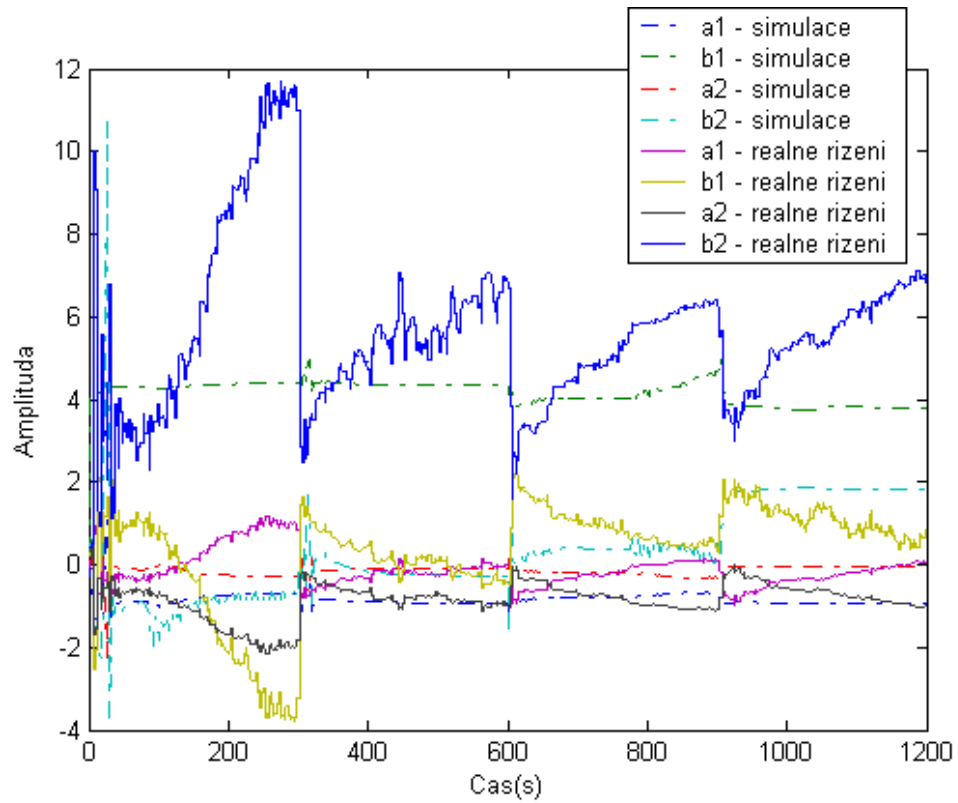
Obr. 43: Regulační pochod reálného řízení a simulace při  $\xi = 2.1$ ,  $\omega = 0.2$ ,  $T_0 = 1s$



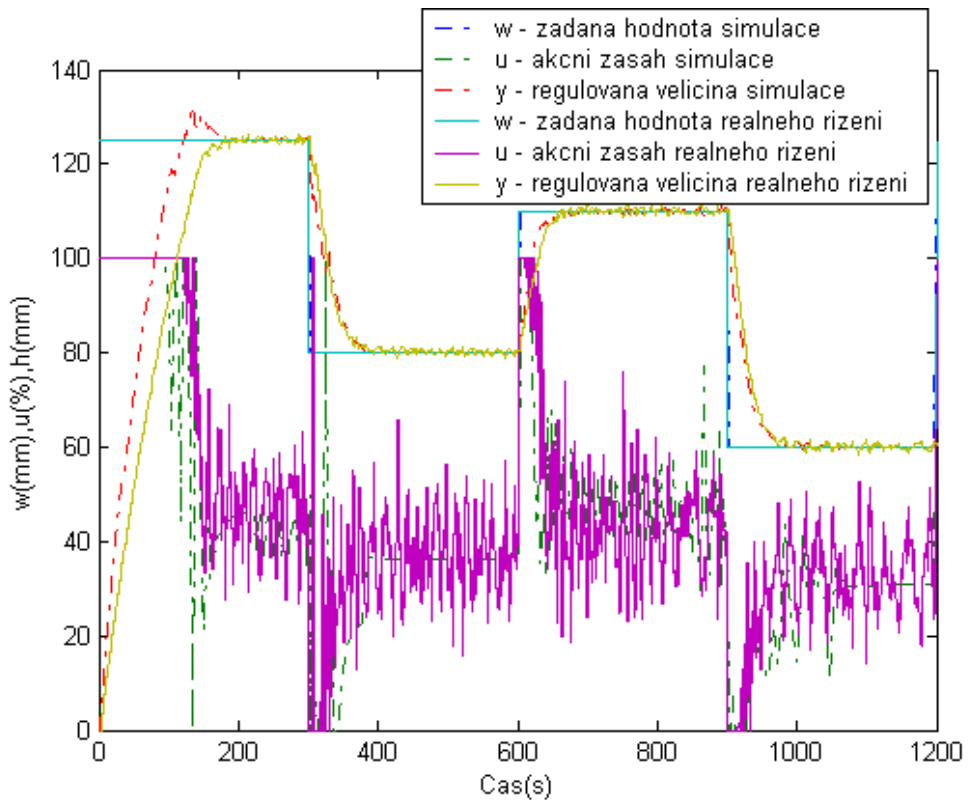
Obr. 44: Průběhy identifikace parametrů soustav k obr. 43



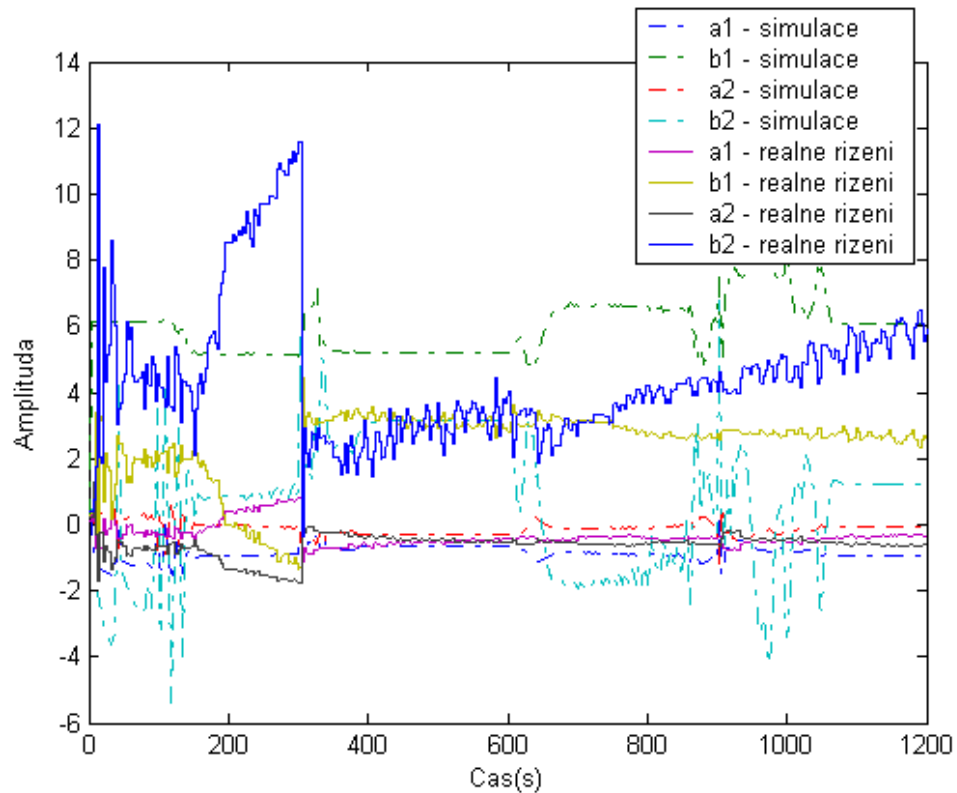
Obr. 45: Regulační pochod reálného řízení a simulace při  $\xi = 1.9$ ,  $\omega = 0.1$ ,  $T_0 = 2s$



Obr. 46: Průběhy identifikace parametrů soustav k obr. 45



Obr. 47: Regulační pochod reálného řízení a simulace při  $\xi = 2.5$ ,  $\omega = 0.3$ ,  $T_0 = 3s$



Obr. 48: Průběhy identifikace parametrů soustav k obr. 47

Jak je možno vidět z porovnání simulací a reálného řízení, je vidět, že regulovaná veličina u všech simulací se rychleji ustálí na žádané hodnotě a průběh akčního zásahu nemá příliš velký kmitavý průběh, který je téměř zanedbatelný a místy se i ustálí. U vzorkování po třech vteřinách došlo pomocí méně vhodného nastavení parametrů k menšímu překmitu regulované veličiny, která se brzy ustálila. Simulace nevykazuje takové kmitání jako regulace z důvodu, že u simulace je eliminován šum soustavy.

## ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrhnout co nejlepší systém řízení pro model zásobníku na kapalinu, který je součástí zařízení PCT 40 od firmy Armfield. Prvním krokem k úspěšnému nalezení řešení daného problému, bylo sestavení matematického modelu zásobníku pomocí diferenciální rovnice, která nám charakterizovala dynamiku zásobníku. Tento matematický model byl následně použit pro návrh a hledání vhodného regulátoru k řízení pomocí provedených simulací. Na jejich základě byla nalezena příznivá i nepříznivá řešení daného problému. Jako nepříznivé řešení bylo navrhnout regulátor s pevně danou strukturou, který se počítá od zadaného systému a který se v našem případě mění dle toho, v jaké výšce se kapalina v zásobníku nachází. Díky tomuto nastavení regulátoru může dojít ke třem výsledkům a to že takto nastavený regulátor může systém uřídit, nebo dojde k tomu, že zásobník se nenaplní na žádanou hodnotu, nebo přeteče.

Z toho důvodu, že se během napouštění zásobníku mění přenos celého systému, dle toho v jaké výšce se hladina v zásobníku nachází, byla navržena syntéza adaptivního řízení. Tato syntéza obsahuje část průběžné identifikace parametrů soustavy druhého řádu, které odpovídá aktuální výšce hladiny v zásobníku. Aktuální přenos soustavy se tedy počítá na základě předchozí výšky hladiny a akčního zásahu do soustavy vždy po určitém časovém okamžiku  $T_0$ . Jelikož je regulátor navrhnout vzhledem k identifikované soustavě, dojde k tomu, že jeho složky se mění po každém kroku identifikace podle nových parametrů soustavy. Odtud plyne termín adaptivní řízení, kdy regulační obvod se snaží co nejlépe a s minimální ztrátou přizpůsobovat vlivům okolního prostředí.

Pomocí tohoto řízení byl navrhnout regulátor typu PID-A1, jehož nastavení ovlivňuje umístění pólů pomocí parametrů  $\zeta$  – koeficient tlumení soustavy,  $\omega$  - úhlová rychlost ovlivňující dynamické chování soustavy a perioda vzorkování  $T_0$ . Takto navrhnutý regulátor vykazoval co nejlepší regulační pochod vzhledem k akčním zásahům do soustavy v podobě otevírání napouštěcího ventilu, kdy akční zásah jen nepatrně kmital. Při nastavení regulátoru pomocí Ziegler – Nicholse, byl prováděn akční zásah většinou 0, nebo 100%, z toho důvodu se od tohoto regulátoru upustilo. Tento regulátor se totiž snaží regulovat systém co nejrychleji k žádané hodnotě v podobě velkých akčních zásahů, což ale vzhledem k dynamice a vlastnostem soustavy není možné. V praxi by tak došlo po krátkém čase ke zničení napouštěcího ventilu, který by byl buď plně otevřený, nebo uzavřený.

Celý systém řízení byl tedy prováděn pomocí adaptivního regulátoru PID-A1, kdy bylo zkoušeno různé nastavení parametrů tohoto regulátoru, které ovlivňují jeho chování a regulační pochod. K nalezení optimálního nastavení těchto parametrů bylo použito matematického modelu a simulace. Výsledky všech získaných měření v rámci nastavených parametrů jsou vykresleny v grafech. Je zde znázorněna kvalita regulace při změně periody vzorkování, koeficientu tlumení soustavy a úhlové rychlosti, ale taky jak se lišily výsledky získané reálným řízením a simulací. V každém grafu je vykresleno více regulačních průběhů z toho důvodu, aby bylo možné lépe vidět rozdíly mezi jednotlivým nastavením regulátoru.

Každá změna parametru regulátoru v sobě nese určitou změnu a ovlivňuje tak celou kvalitu regulace. Za nejvíce vhodnou regulaci pro model zásobníku se tedy bude uvažovat ta, kde míra kmitavosti akčního zásahu do soustavy bude co nejmenší, z důvodu otevírání napouštěcího ventilu a kde průběh výšky hladiny nebude mít příliš velký kmitavý průběh.

## CONCLUSION

The goal of this work was to design as good system for control of liquid reservoir model as possible which is the part of PCT 40 appliance by *Armfield* company. The first step for successful finding the solution of the given problem was setting the mathematical model of the reservoir by the differential equation that would provide us the characteristic feature of the reservoir. Subsequently this mathematical model was used for the design and looking for a suitable regulator for controlling by the simulations carried out. Based on them the favourable and unfavourable solutions of the given problem have been found. The unfavourable solution was to design the regulator with fixed structure that is counted from the scheduled system and which is variable according to the height which the liquid in the reservoir can be found in. There can be three sorts of result occurring and these are that the regulator is adjusted in such a way is able to control the system or the possibility occurs that the reservoir is not filled up to the scheduled value or the liquid inside it can overflow.

Due to the fact that there is a variation in the transfer of whole system during the watering depending on the height which the level can be occurred in, the synthesis of the adaptive control. This synthesis contains a certain share of identification of the parameters of the scale of the second order to which the height of the level in the reservoir corresponds. So the actual transfer is counted based on the previous height of the level and the action intervenes into the scale every time after a certain instance of time  $T_0$ . Because the regulator is designed owing to the identified scale, the situation occurs that the components of this are changed after each step of the identification according to the new parameters of the scale. From here the expression of self-adapting control flows, where the regulation point tries to adjust to the influence surrounding environment as well as possible and with the minimal loss.

By this controlling the regulator of the PID-A1 type has been designed, the adjustment of which influences the location of the pins by the parameters  $\zeta$  – damping coefficient of the scale,  $\omega$  – angular speed influencing the behaviour of the scale and the sampling period  $T_0$ . The regulator designed in such a way embodied as good regulation process as possible owing to the action intervenes into the scale in the form of opening the filling valve where there was just a slight oscillation of the action intervenes. At the adjustment of the regulator by Ziegler – Nichols, the action intervenes 0 per cent was carried out mostly or 100 per cent that was the reason why the regulator was stopped being used. This regulator



tries to regulate the scale towards the requested value in the form of big action interence as quickly as possible, which is not possible owing to the dynamics and properties of the scale. There would be an occurrence of the damage of the filling valve after a short time which would be either fully open or closed.

The whole control system was carried out by the PID-A1 self-adapting regulator, when the various sorts of adjustment influencing its behaviour and regulation process were tested. To find the optimum adjustment of these parameters the mathematical model was used and simulation were used. The results of all measurements within the framework of the parameters being set are described in the graphs. The regulation at change of sampling period, damping coefficient of the scale and angular speed but also the way in which the results gained by the realistic control and simulation differed. There are more regulation cycles being described in each graph from the reason of enabling to see the differences among the individual settings of the regulator.

Each modification in the parameter of the regulator bears a certain change in itself and it can influence the global quality of the regulation. As the most suitable regulation for the model of the reservoir will be considered the one where the extent of the oscillation of the action interence will be as small as possible due to opening the filling valve and where the course of the height of the level will not have too big oscillating track.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] HRUŠKA, F. *Technické prostředky automatizace II*, UTB Zlín, Academia centrum Zlín, Březen 2005, ISBN 80-7318-259-9.
- [2] BOBÁL, V. *Identifikace systémů*, Brno, VUT, 1990.
- [3] BOBÁL, V. *Adaptivní a prediktivní řízení*, UTB Zlín, Academia centrum Zlín, 2008.
- [4] BOBÁL, V. – CHALUPA, P. *Self – Tuning controllers simulink library*, Version 2., User's Manual, UTB Zlín, 2002. URL: <<http://www.utb.cz/stctool/>>.
- [5] MIKEŠ, J. – FIKAR, M. *Modelovanie, identifikácia a riadenie procesov I*, Vydavateľstvo STU, Bratislava, 1999.
- [6] INGHAM, J. – DUNN, I. – HEINYLE, E. – PŘENOSIL, J.E. *Chemical Engineering Dynamics. An Introduction to Modeling and Computer Simulation*. Second, Completely Revised Edition, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 2000.
- [7] LUYBEN, W.L. *Process modelling, simulation and control for chemical engineers*, McGraw-Hill, New York, 1989.
- [8] BALÁTĚ, J. *Automatické řízení*, BEN – technická literatura, Praha, 2003.
- [9] Manuály k modelu PCT40 od firmy Armfield

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

PCT 40	Process control teaching 40.
PC	Personal computer.
USB	Universal serial bus.
PID	Proporcionálně – integračně - derivační.
PSV	Proportioning solenoid valve.
STC	Self – Tuning controllers.
y	Regulovaná veličina.
w	Žádaná hodnota.
v	Porucha.
u	Akční zásah.
$T_0$	Perioda vzorkování.
STC	Self – Tuning controllers.
$a_1, a_2, b_1, b_2$	Parametry diskrétního přenosu soustavy.
$q_2, q_1, q_0, p_1, p_2$	Složky PID regulátoru.
$\xi$	Koeficient tlumení soustavy.
$\omega$	Úhlová rychlost.
$\phi$	Koeficient zapomínání.
C	Kovarianční matice.
$q_v$	Přítok do zásobníku.
q	Odtok ze zásobníku.
F	Plocha podstavy zásobníku.
h	Výška hladiny.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Laboratorní model PCT 40 .....	9
Obr. 2: Konektor 60 a 50-pin .....	10
Obr. 3: Program ArmSoft pro ovládání PCT 40 .....	10
Obr. 4: Zásobník na kapalinu .....	11
Obr. 5: Ovládání přítoku tekutiny .....	12
Obr. 6: Systém diferenciálního měření .....	13
Obr. 7: Systém plovákového měření .....	14
Obr. 8: Systém ultrazvukového měření .....	15
Obr. 9: Struktura adaptivního systému .....	18
Obr. 10: Klasifikace adaptivních systémů .....	20
Obr. 11: Blokové schéma adaptivního řízení .....	20
Obr. 12: Základní schéma matematického modelu zásobníku .....	28
Obr. 13: Závislost objemového průtoku na otevření ventilu .....	29
Obr. 14: Konečné schéma matematického modelu .....	29
Obr. 15: Kalibrační křivka .....	30
Obr. 16: Schéma regulátoru .....	32
Obr. 17: Regulační obvod pro simulaci .....	33
Obr. 18: Regulační obvod pro reálné řízení .....	34
Obr. 19: Regulace pro různou periodu vzorkování při $\xi = 1.9$ , $\omega = 0.1$ .....	36
Obr. 20: Průběhy identifikace parametrů soustav k obr. 19 .....	37
Obr. 21: Regulace pro různou periodu vzorkování při $\xi = 1.9$ , $\omega = 0.1$ .....	37
Obr. 22: Průběhy identifikace parametrů soustav k obr. 21 .....	38
Obr. 23: Regulace pro různou periodu vzorkování při $\xi = 1.9$ , $\omega = 0.1$ .....	38
Obr. 24: Průběhy identifikace parametrů soustav k obr. 23 .....	39
Obr. 25: Regulace pro různou úhlovou rychlost při $\xi = 1.9$ , $T_0 = 1s$ .....	40
Obr. 26: Průběhy identifikace parametrů soustav k obr. 25 .....	40
Obr. 27: Regulace pro různou úhlovou rychlost při $\xi = 1.9$ , $T_0 = 2s$ .....	41
Obr. 28: Průběhy identifikace parametrů soustav k obr. 27 .....	41
Obr. 29: Regulace pro různou úhlovou rychlost při $\xi = 1.9$ , $T_0 = 3s$ .....	42
Obr. 30: Průběhy identifikace parametrů soustav k obr. 29 .....	42
Obr. 31: Regulace pro různý koeficient tlumení při $\omega = 0.2$ , $T_0 = 1s$ .....	43

Obr. 32: Průběhy identifikace parametrů soustav k obr. 31.....	44
Obr. 33: Regulace pro různý koeficient tlumení při $\omega = 0.2$ , $T_0 = 2s$ .....	44
Obr. 34: Průběhy identifikace parametrů soustav k obr. 33.....	45
Obr. 35: Regulace pro různý koeficient tlumení při $\omega = 0.2$ , $T_0 = 3s$ .....	45
Obr. 36: Průběhy identifikace parametrů soustav k obr. 35.....	46
Obr. 37: Regulace pro různé parametry $\xi$ a $\omega$ , $T_0 = 1s$ .....	47
Obr. 38: Průběhy identifikace parametrů soustav k obr. 37.....	47
Obr. 39: Regulace pro různé parametry $\xi$ a $\omega$ , $T_0 = 2s$ .....	48
Obr. 40: Průběhy identifikace parametrů soustav k obr. 39.....	48
Obr. 41: Regulace pro různé parametry $\xi$ a $\omega$ , $T_0 = 3s$ .....	49
Obr. 42: Průběhy identifikace parametrů soustav k obr. 41.....	49
Obr. 43: Regulační pochod reálného řízení a simulace při $\xi = 2.1$ , $\omega = 0.2$ , $T_0 = 1s$ .....	50
Obr. 44: Průběhy identifikace parametrů soustav k obr. 43.....	51
Obr. 45: Regulační pochod reálného řízení a simulace při $\xi = 1.9$ , $\omega = 0.1$ , $T_0 = 2s$ .....	51
Obr. 46: Průběhy identifikace parametrů soustav k obr. 45.....	52
Obr. 47: Regulační pochod reálného řízení a simulace při $\xi = 2.5$ , $\omega = 0.3$ , $T_0 = 3s$ .....	52
Obr. 48: Průběhy identifikace parametrů soustav k obr. 47.....	53