# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická – Katedra řídicí techniky


BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

# Regulace pneumatické jednotky


Vypracoval: Juraj Rusnák

Praha, leden 2009 Vedoucí: doc. Ing. Kateřina Hyniová, CSc.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Juraj Rusnák**

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (bakalářský), strukturovaný
Obor: Kybernetika a měření

Název tématu: **Regulace pmeumatické jednotky**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s funkcí a konstrukčním uspořádáním pneumatické jednotky Elettronica Veneta.
2. Pneumatickou soustavu identifikujte a navrhněte metodu automatické regulace tlaku v jednotce a řízení realizujte.
3. Navrhněte měření pro laboratorní úlohu „Regulace tlaku v pneumatické jednotce" v předmětu Instrumentace procesů v rozsahu stanoveném vedoucím BP. Navržená měření realizujte a vyhodnoťte jejich výsledky.

Seznam odborné literatury:

Dodá vedoucí práce

Vedoucí: doc. Ing. Kateřina Hyniová, CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2008/2009

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

L.S.

doc. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

V Praze dne 1. 12. 2008

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č. 121/2002 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 13. ledna 2008 .....

Juraj Rusnák

## Poďakovanie

Ďakujem vedúcej mojej bakalárskej práce doc. Ing. Kateřině Hyniovej, CSc. za odborné vedenie práce, za jej prístup, cenné rady a pripomienky, bez ktorých by sa táto práca neobišla. Taktiež ďakujem svojím rodičom za podporu počas celej doby môjho štúdia.

# Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá návrhom laboratórnej úlohy „Regulácia tlaku v pneumatickej jednotke“ pre vyučovanie predmetu „Instrumentace procesů“. Práca obsahuje aj popis, usporiadanie a identifikáciu pneumatickej sústavy. Návrh regulácie pomocou spojitých regulátorov a výsledky praktického prevedenia.



# Abstract

This bachelor thesis is drowned as project of lab task “Control the pressure process unit” for education of subject “Instrumentace procesů”. Bachelor thesis includes description and identification of the system. Draft of control by the help of continuous action controller and results of practical implementation.

# Obsah

Zadání práce ..... ii

Čestné prohlášení ..... iii

Poďakovanie ..... iv

Abstrakt ..... v

Abstract ..... v

Obsah ..... vi

1. Úvod ..... 1

2. Teoretický úvod ..... 2

2.1. Identifikácia neznámej sústavy ..... 2
2.1.1. Matematicko-fyzikálna analýza ..... 2
2.1.2. Experimentálna identifikácia sústavy ..... 3
2.2. Základné pojmy teórie riadenia ..... 3
2.2.1. Klasifikácia riadiacich systémov ..... 3
2.2.2. Riadenie so spätnou väzbou ..... 4
2.2.3. Základné parametre regulácie ..... 5
2.3. Regulátory ..... 6
2.3.1. Spojité lineárne regulátory ..... 6
2.3.1.1. Proporcionálny regulátor (regulátor P) ..... 6
2.3.1.2. Integračný regulátor (regulátor I) ..... 7
2.3.1.3. Regulátor PI ..... 7
2.3.1.4. Regulátor PD ..... 8
2.3.1.5. Regulátor PID ..... 10
2.4. Metódy návrhu lineárnych regulačných obvodov ..... 11
2.4.1. Frekvenčné metódy ..... 11
2.4.2. Metódy umiestňovania pólov ..... 12
2.4.3. Empirické metódy ..... 12

3. Popis pneumatickej sústavy ..... 14

3.1. Pneumatická jednotka Elettronica Veneta ..... 14
3.2. Modul UP ..... 17
3.3. Regulátor ZEPADIG 10 ..... 17

4. Realizácia riadenia sústavy ..... 18

4.1. Identifikácia ..... 18
4.2. Návrh konštánt regulátora ..... 21

5. Laboratórna úloha Regulácia pneumatickej jednotky ..... 23

5.1. Návrh laboratórnej úlohy ..... 23
5.2. Vyhodnotenie laboratórnej úlohy ..... 30

6. Záver ..... 34

7. Literatúra ..... 35

# 1. Úvod

Medzi najbežnejšie sledované a následne aj regulované fyzikálne veličiny v technickej a technologickej praxi patrí tlak. Či už sa jedná o obytné budovy, distribučné alebo o výrobne systémy – všade sa vyskytujú rozličné zariadenia pracujúce s touto základnou veličinou. Primárnou časťou každého meracieho a regulačného obvodu tohto typu je snímač, ktorý realizuje prevod príslušnej veličiny na údaj prevedený väčšinou na elektrický signál. Tento signál je spracovávaný podľa regulačného algoritmu do podoby akčného zásahu prostredníctvom koncového regulačného členu.

Súčasťou tejto práce je práve identifikácia a návrh riadenia tlakovej jednotky, ktorá je stavaná do laboratórnych podmienok a na demonštráciu riadenia tlaku na požadovanú úroveň.

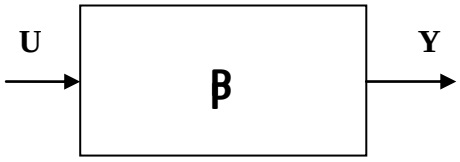
Hlavnou úlohou tejto práce je teda návrh merania laboratórnej úlohy, ktorá bude demonštrovať spôsoby regulácie tejto tlakovej jednotky a bežné situácie, ktoré môžu nastať v prípade zlého či dobrého nastavenia regulátoru.

# 2. Teoretický úvod

Riadenie v obecnom slova zmysle znamená pôsobenie na nejaký dynamický systém, ktoré mení jeho chovanie buď úplne, alebo aspoň toto chovanie podstatne modifikuje.

Dynamický systém alebo sústava (obr. 1) môže byť určená definovaním funkcie výstupu ako funkcie vstupu. Najpresnejším spôsobom ako to urobiť je použitie „Prenosovej funkcie“, ktorá môže byť obecne vyjadrená ako [1]:

$$P(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}$$




*Obr. 1 Jednoduchý blokový diagram*

## *2.1.Identifikácia neznámej sústavy*

Predtým než začneme navrhovať akýkoľvek riadiaci mechanizmus pre konkrétnu sústavu tak je potrebné poznať jej chovanie v ustálenom a prechodnom stave a previesť to do matematického modelu sústavy. Na jeho vytvorenie existuje viacero postupov, ktoré je možné rozdeliť do troch obecných skupín:

- Matematicko-fyzikálna analýza
- Experimentálna identifikácia sústavy
- Kombinovaný prístup – je kombináciou predchádzajúcich dvoch prístupov

### 2.1.1. Matematicko-fyzikálna analýza

Je založená na technologickom štúdiu sústavy a jej procesov, z ktorého je možné zostaviť jej matematický popis. Výsledný model pozostáva zo zjednodušených a navzájom prepojených modelov, ktorých základom sú matematické, fyzikálne, chemické a iné zákony. Často nie je možné do popisu zahrnúť všetky zákonitosti, aby sa model nestal príliš zložitým na riešenie a ďalšie spracovanie.

Správanie výsledného matematického popisu je samozrejme potrebné porovnať so správaním sa reálneho modelu a vyhodnotiť ho.[2]

### 2.1.2. Experimentálna identifikácia sústavy

Je založená na meraní, zaznamenávaní a následnom spracovávaní vstupných a výstupných dát procesu.

Merania a záznamy hodnôt prebiehajú v ustálenom aj prechodovom stave. Z meraní v ustálenom stave je možné zistiť statické charakteristiky sústavy a vyhodnotiť ju z hľadiska jej linearity. Merania v prechodovom stave sa vykonávajú vyhodnocovaním reakcie na skokovú funkciu v okolí pracovného bodu.

Z meraní a ich správneho vyhodnotenia je tak možné získať matematický popis sústavy a použiť ho k ďalšiemu spracovaniu. [2]

V súčasnosti existuje viacero metód založených na experimentálnej identifikácii sústavy, ktoré sú podporované rôznymi softwarovými programami ako je napríklad System Identification Toolbox, ktorý je súčasťou Matlabu.

## *2.2.Základné pojmy teórie riadenia*

### 2.2.1. Klasifikácia riadiacich systémov

Riadiace systémy sú rozdelené do dvoch obecných kategórií:

- Otvorená štruktúra riadenia
- Uzatvorená štruktúra riadenia alebo riadenie so spätnou väzbou

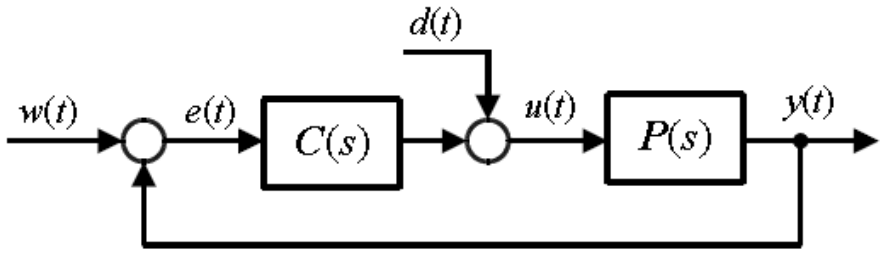
Systémy s otvorenou štruktúrou riadenia sú tie, v ktorých riadiaca činnosť je nezávislá na výstupe.

V systémoch s uzavretou štruktúrou riadenia riadiaca činnosť závisí do určitej miery na výstupe.

Rozdiel medzi hodnotou riadiacej a referenčnej premennej bude vyvolávať činnosť zameranú na vyrušenie rozdielu.

Hlavné výhody uzavretej štruktúry riadenia oproti otvorenej štruktúre riadenia sú menšia citlivosť na zmeny parametrov a menšie ovplyvnenie rušivými zložkami. Pričom zmeny parametrov a rušenia sú prakticky nepredvídateľné a zároveň reálne.[1]

### 2.2.2. Riadenie so spätnou väzbou




*Obr. 2 Blokový diagram riadenia so spätnou väzbou*

Význam označenie jednotlivých blokov a veličín (obr. 2):

*P(s) – sústava*

*C(s) - regulátor*

*w(t) – žiadaná veličina* pre výstup sústavy

*e(t) – regulačná odchýlka*

*d(t) – chyba vstupu sústavy*

*P(s), u(t) – vstup sústavy*

*P(s), y(t) – regulovaná veličina* (výstup sústavy)

Regulačný obvod môže byť samozrejme zložitejší. Môžeme napríklad pridať filter na výstup regulovanej sústavy, aby sme potlačili šum meracích členov atď.

Pri analýze a syntéze regulačných obvodov využívame aj ďalšie prenosy, ktoré plynú z tohto blokového diagramu (obr. 2). [3]

Prenos otvorenej regulačnej slučky L(s) je:

L(s) = C(s) * P(s)

Prenos regulačnej odchýlky S(s) je:

$$\mathrm{S(s)} = \frac{\mathrm{E(s)}}{\mathrm{W(s)}} = \frac{1}{1 + \mathrm{P(s)} * \mathrm{C(s)}} = \frac{1}{1 + \mathrm{L(s)}}$$

Prenos riadenia T(s) je:

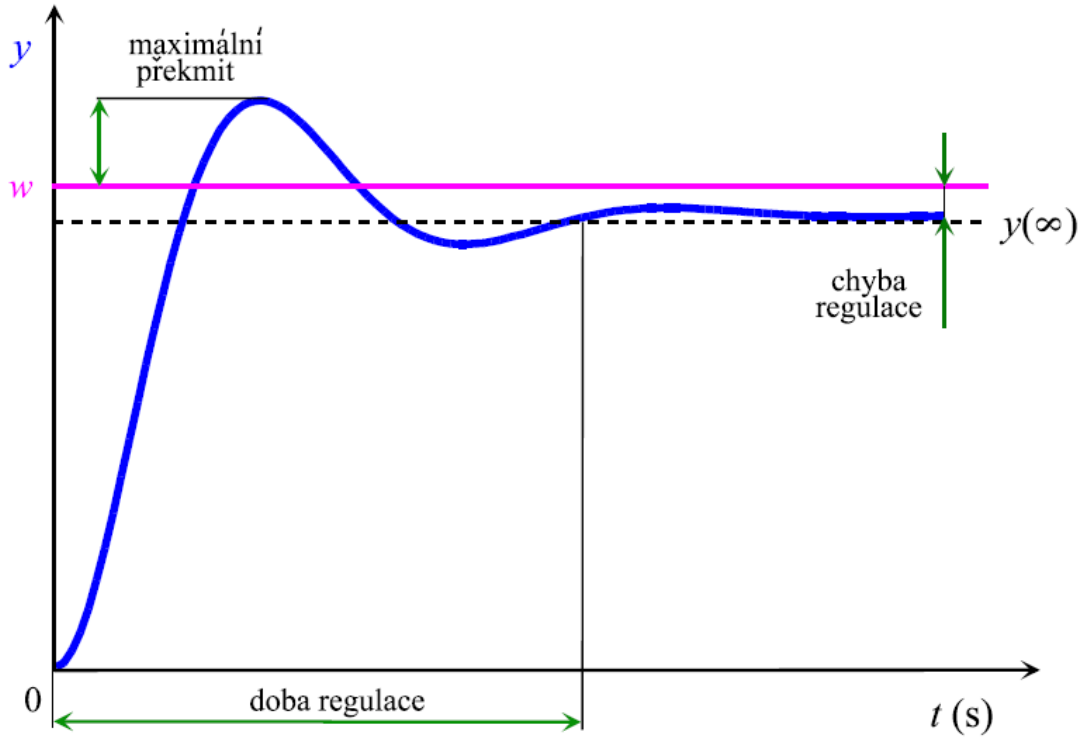
$$\mathrm{T(s)} = \frac{\mathrm{Y(s)}}{\mathrm{W(s)}} = \frac{\mathrm{P(s)} * \mathrm{C(s)}}{1 + \mathrm{P(s)} * \mathrm{C(s)}} = \frac{\mathrm{L(s)}}{1 + \mathrm{L(s)}}$$

### 2.2.3. Základné parametre regulácie

Základnými požiadavkami na reguláciu sú jej *stabilita*, *kvalita* a *presnosť*.

<u>*Stabilita*</u> – obvod sa považuje za stabilný vtedy ak po vyvedení v dôsledku zmeny vstupnej veličiny, napríklad v dôsledku poruchy, zo svojej rovnovážnej polohy sa naspäť ustáli v novej rovnovážnej polohe po ukončení zmeny, ktorá to vyvolala. Niekedy sa za stabilné považujú aj obvody, v ktorých sa výstupná hodnota periodicky mení okolo žiadanej hodnoty v povolených medziach.

<u>*Kvalitu regulácie*</u> porovnávame podľa základných parametrov, ktoré sú vyznačene na Obr. 3.




*Obr. 3 Prechodová charakteristika regulovaného obvodu*

*Maximálny prekmit* – spravidla sa jedná väčšinou o prvú amplitúdu krivky regulačného obvodu; je to najvyššia hodnota krivky regulačného obvodu, ktorá je zaznamenaná počas regulácie.

*Doba regulácie* – predstavuje čas, za ktorý sa priebeh regulačného obvodu dostane na trvalo do pásma regulácie, v ktorom obvod spĺňa požiadavky kladené na žiadanú výstupnú hodnotu.

*Chyba regulácie* – predstavuje odchýlku od požadovanej hodnoty a vyjadrujeme pomocou nej <u>*presnosť regulácie*</u>. [3]

## *2.3. Regulátory*

Po získaní matematického modelu sústavy a zvolení základných požiadaviek na žiadanú hodnotu výstupu môžeme pristúpiť k návrhu samotného regulátoru sústavy. Zaujímajú nás regulátory s jedným vstupom (regulačná odchýlka) a jedným výstupom (akčná veličina), ktoré delíme na:

- Spojité lineárne regulátory
- Diskrétne lineárne regulátory
- Kombinované regulátory
- Nelineárne a spínacie regulátory
- Impulzné regulátory [4]

### 2.3.1. Spojité lineárne regulátory

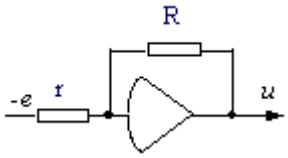
Pre úplnosť a názornosť uvediem aspoň popis spojitých lineárnych regulátorov. Sú to regulátory, u ktorých je možné meniť hodnotu ich akčnej veličiny plynule. Akčná veličina spojitého regulátoru je spojitou funkciou jeho regulačnej odchýlky. Základné rozdelenie spojitých regulátorov [4]:

- Regulátor P
- Regulátor I
- Regulátor PI
- Regulátor PD
- Regulátor PID

#### *2.3.1.1. Proporcionálny regulátor (regulátor P)*

Je zosilňovač, ktorého dynamické vlastnosti sa nijak neodrážajú v dynamike regulačného obvodu. Jeho prenos a elektronická implementácia (Obr. 4) je [4]:

$$C(s) = \frac{R}{r}$$

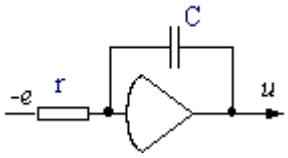



*Obr. 4 Regulátor P*

#### 2.3.1.2. *Integračný regulátor (regulátor I)*

Je integrátor, ktorý zvyšuje statickú presnosť regulačného obvodu, ale zároveň zhoršuje jeho dynamiku. Jeho prenos a elektronická implementácia (Obr. 5) je [4]:

$$C(s) = \frac{r_{-1}}{s}, \qquad \text{kde} \quad r_{-1} = \frac{1}{rC}$$

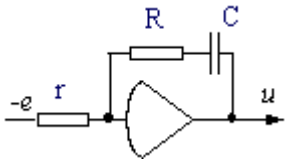



*Obr. 5 Regulátor I*

#### 2.3.1.3. *Regulátor PI*

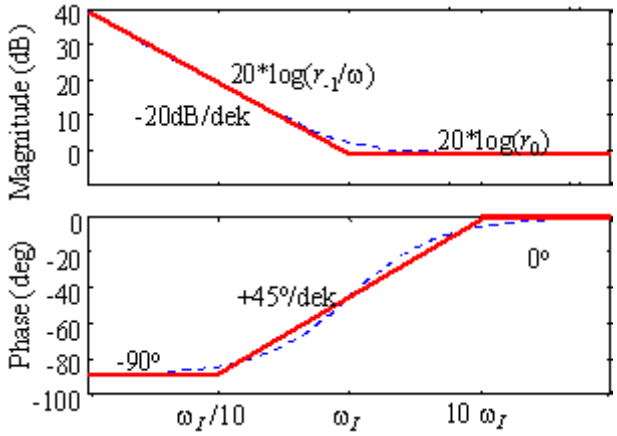
Je kombináciou regulátoru P a regulátoru I. Jeho prenos a elektrická implementácia (Obr. 6) je:

$$C(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s}, kde\ r_0 = \frac{R}{r}\ a\ r_{-1} = \frac{1}{rC}$$

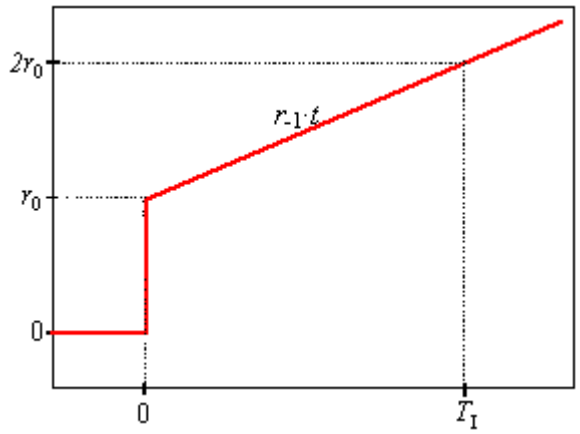



*Obr. 6 Regulátor PI*

Dôležitými vlastnosťami regulátoru sú frekvenčná charakteristika (Obr. 7) a prechodová charakteristika (Obr. 8). [4]




*Obr. 7 Frekvenčná charakteristika PI regulátoru*

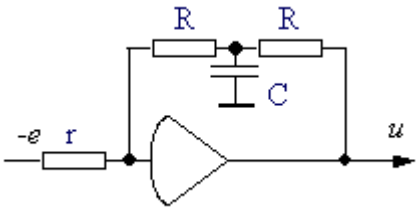



*Obr. 8 Prechodová charakteristika PI regulátoru*

#### *2.3.1.4. Regulátor PD*

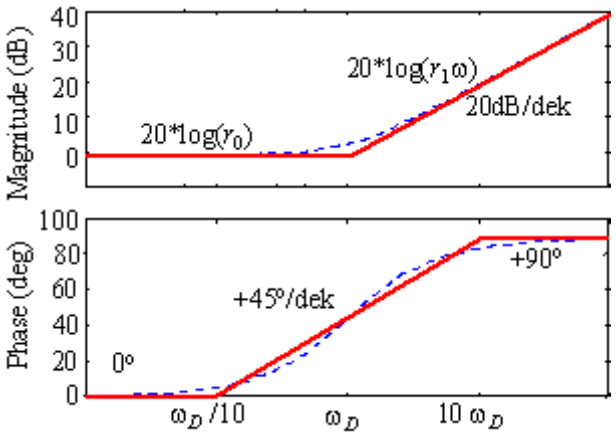
Je určitým vylepšením regulátoru P. Popri regulačnej odchýlke zosilňuje aj jej deriváciu a tým do výstupného signálu pridáva informáciu o časovom trende odchýlky. Jeho prenos a elektronická implementácia (Obr. 9) je:

$$C(s) = r_1 s + r_0, kde\ r_0 = \frac{2R}{r}\ a\ r_1 = \frac{R^2 C}{r}$$

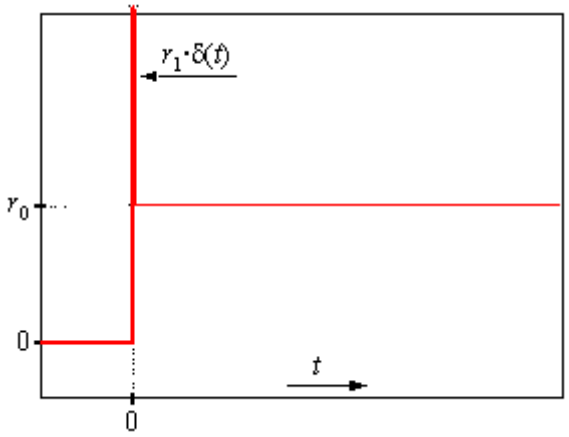



*Obr. 9 Regulátor PD*

Frekvenčná (Obr. 10) a prechodová charakteristika (Obr. 11) vyzerajú nasledovne [4]:




*Obr. 10 Frekvenčná chrakteristika PD regulátoru*

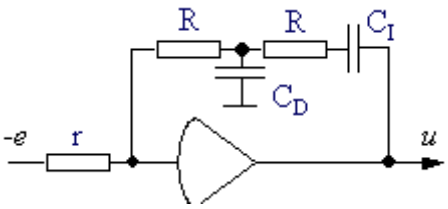



*Obr. 11 Prechodová charakteristika PD regulátoru*

#### 2.3.1.5. *Regulátor PID*

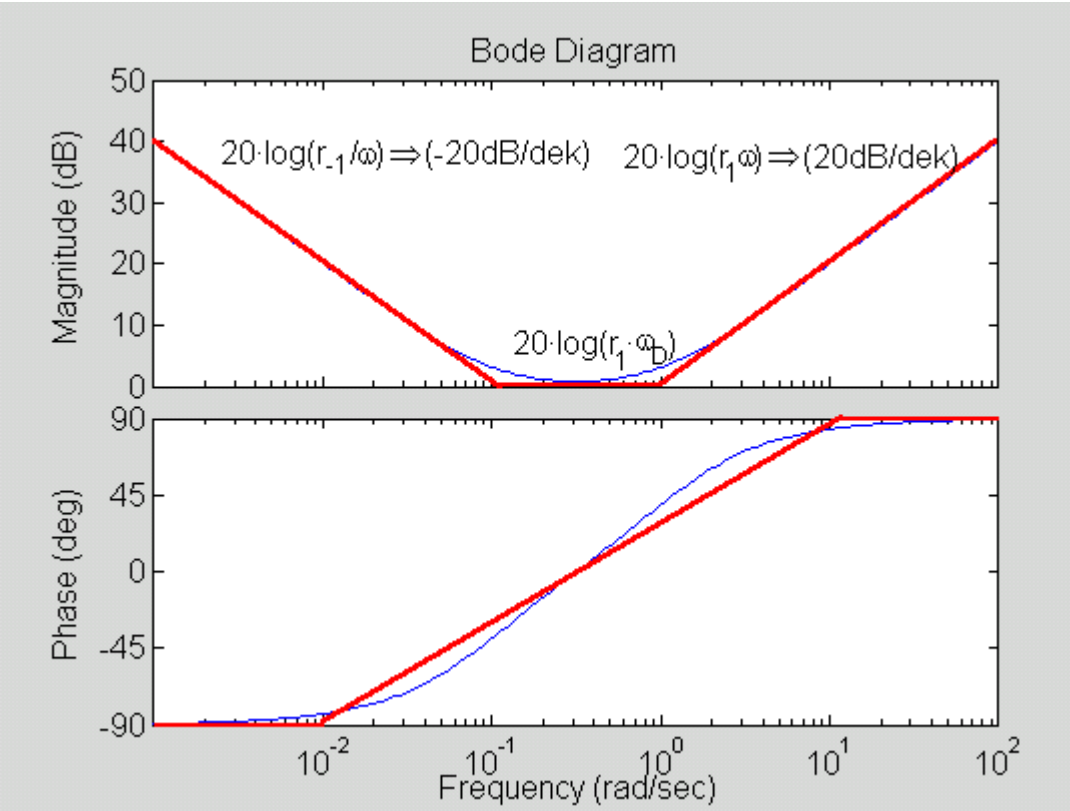
Je kombináciou regulátorov PI a PD. Do akčnej veličiny zavádza spolu s regulačnou odchýlkou aj jej integrál (tým umožní dosiahnutie vyššej presnosti regulácie v ustálenom stave) a jej deriváciu (tým dodáva informáciu o časovom trende odchýlky). Jeho prenos a elektronická interpretácia (Obr. 12) je [4]:

$$C(s) = r_1 s + r_0 + \frac{r_{-1}}{s}, \text{kde } r_0 = \frac{R(C_D + 2C_I)}{rC_I}, r_1 = \frac{R^2 C_D}{r} \text{ a } r_{-1} = \frac{1}{rC_I}$$

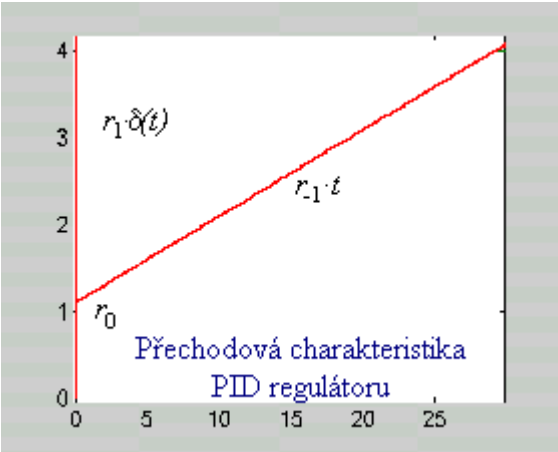



*Obr. 12 Regulátor PID*

Základné charakteristiky PID regulátora sú na Obr. 13 a Obr. 14.




*Obr. 13 Frekvenčná charakteristika PID regulátora*




*Obr. 14 Prechodová charakteristika PID regulátora*

## *2.4.Metódy návrhu lineárnych regulačných obvodov*

Metódu návrhu volíme podľa toho či nás zaujíma výsledná frekvenčná charakteristika, alebo chceme upraviť dynamiku systému bez ohľadu na jeho budiaci signál. Základné metódy:

- Frekvenčné metódy
- Metóda umiestňovania pólov uzavretej slučky
- Empirické metódy [4]

### 2.4.1. Frekvenčné metódy

Snažia sa upraviť frekvenčnú charakteristiku otvorenej slučky tak, aby výsledná frekvenčná charakteristika uzavretej slučky mala požadovaný priebeh. Pre hodnotenie kvality riadenia môžeme na frekvenčnej charakteristike uzavretej slučky definovať nasledujúce miery:

- *Rezonančné prevýšenie* – maximálna hodnota zosilnenia; charakterizuje možné prekmity, respektíve rýchlosti odozvy systému.
- *Šírka prenášaného pásma* – frekvencia, na ktorej poklesne zosilnenie o 3 dB oproti zosilneniu na nízkych frekvenciách; charakterizuje rýchlosť odozvy systému a teda dobu nábehu prechodovej charakteristiky.

Z Nyquistovho kritéria vyplývajú dve bezpečnostné medze:

- *Amplitúdová bezpečnosť* – hovorí koľkokrát sa ešte môže zväčšiť zosilnenie v otvorenej slučke než sa spätneväzbový systém dostane na hranicu stability
- *Fázová bezpečnosť* – hovorí o aké veľké meškanie (fázy) si môžeme dovoliť spomaliť vstupný signál na frekvencii $\omega_{PM}$ , pre ktorú má prenos otvorenej slučky jednotkové zosilnenie, než sa fáza obráti na -180° a spätneväzbový systém sa tak dostane na hranicu stability.

Jedným z parametrov pri návrhu regulátora tak môže byť dopredu určená fázová bezpečnosť otvorenej slučky. Hodnoty fázovej a amplitúdovej bezpečnosti môžeme ľahko nájsť napríklad na Bodeho diagrame. [5]

### 2.4.2. Metódy umiestňovania pólov

Najčastejšou metódou tohto typu je metóda Geometrického miesta koreňov (GMK). Umožňuje nám umiestňovať póly uzavretej regulačnej slučky na základe poznania umiestnenia núl a pólov otvorenej slučky. Pre identifikovaný prenos si načrtneme GMK a pomocou Matlabu a nástroja na to určeného môžeme sledovať vplyv zmeny zosilnenia, či pridanie derivačnej, alebo integračnej zložky na frekvenčnú charakteristiku otvorenej slučky, alebo na prechodovú charakteristiku uzavretej regulačnej slučky. [4]

### 2.4.3. Empirické metódy

Spomeniem dve najčastejšie metódy tohto typu. Prvou je metóda cyklickej optimalizácie konštánt, ktorá ale môže byť pomerne zdĺhavá keďže je založená na zámene regulačných konštánt a sledovaní chovania prechodového deja uzavretej regulačnej slučky. Konštanty meníme podľa vypozorovaného chovania prechodového deja a na základe znalostí vplyvov jednotlivých regulačných konštánt na prechodový dej tak, aby sme dosiahli požadovanú výstupnú odozvu regulovanej sústavy.

Druhou metódou je metóda Ziegler – Nicholsa. Základnou podmienkou pre jej správne použitie je, aby prechodová charakteristika mala tvar písmena „S“, teda aby nebola ani kmitavá a ani integračná. Prenos regulátora je:

$$C(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} + r_1 s = r_0(1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s)$$

Všeobecný postup metódy:

- $r_1 = r_{-1} = 0$; tj. $T_D = 0$, $T_i = inf$
- zväčšujeme $r_0$ tak dlho až dosiahneme hranicu stability a na nej odčítame kritické zosilnenie $r_{0k}$ a kritickú periódu kmitov $T_k$
- nastavíme konštanty regulátoru podľa jeho typu pomocou tabuľky [4]:

| **P** | **PI** | **PD** | **PID** |
|---|---|---|---|
| $r_0=0,5*r_{0k}$ | $r_0=0,45*r_{0k}$ | $r_0=0,45*r_{0k}$ | $r_0=0,6*r_{0k}$ |
| | | $T_d=0,12*T_k$ | $T_d=0,12*T_k$ |
| | $T_i=0,85*T_k$ | | $T_i=0,5*T_k$ |

*Tab. 1 Nastavenie konštánt metódou Ziegler - Nicholsa*

# 3. Popis pneumatickej sústavy

Základným prvkom sústavy je pneumatická jednotka Elettronica Veneta, ktorej súčasťou je aj samostatný modul UP. Modul v sebe obsahuje zosilňovač s výstupom pripojeným na elektromagnetický ventil a tlakový snímač s prevodníkom na napätie. Do sústavy sú zaradené aj dva napájacie zdroje a to DIAMETRAL P230R51D, ktorý je zdrojom jednosmerného napätia 30V privádzaného do zosilňovača. Druhým napájacím zdrojom je POWER SUPPLY 18148, ktorý slúži na napájanie operačných zosilňovačov v module. K regulácii sústavy sa používa univerzálny regulátor ZEPADIG 10.

## *3.1. Pneumatická jednotka Elettronica Veneta*

*Obr. 15 Pneumatická jednotka*

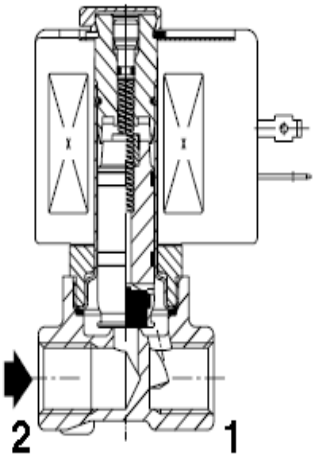
Na obrázku 15 je vidieť uloženie jednotlivých komponent pneumatickej jednotky. Na ľavej strane je sieťové napájanie kompresora, napájanie elektromagnetického ventilu zo samostatného modulu a výstupný signál tlaku pre tlakový prevodník. Hlavnou súčasťou jednotky je kompresor, ktorý po spustení tlačí vzduch do nádoby, v ktorej sa tak zvyšuje tlak a meria sa manometrom. Na manometri a v ďalších súčastiach pneumatickej jednotky (prevodník na module UP,

viď v 3.2) je stupnica uvedená v baroch čo nie je jednotka SI sústavy, ale pre ľahšiu prácu a prehľadnosť budem aj naďalej používať túto jednotku. Pre prehľad uvádzam, že 1 bar = $10^5$ Pa.

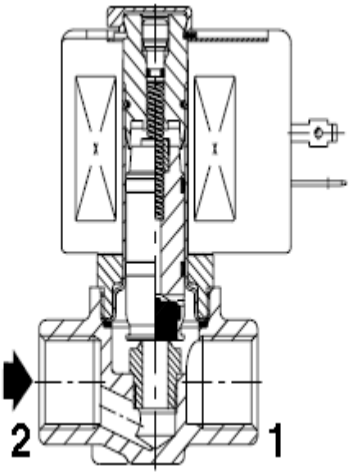
Jednotka má tri ventily. Najdôležitejším pre jej regulovanie je elektromagnetický ventil, ktorý je zobrazený na obrázku 16.

*Obr. 16 Elektromagnetický ventil*

Na obrázkoch 17 a 18 je vidieť ako ventil pracuje. Vo fáze keď je ventil uzavretý (Obr. 18) tak je privedené napätie do cievky okolo, ktorej vznikne elektromagnetické pole a to pôsobí elektromagnetickou silou na kotvu. Kotva sa po prekročení určitej hranice elektromagnetickej sily pritiahne a otvorí ventil (Obr. 17). Pri vypnutí napájacieho napätia začne klesať elektromagnetická sila, ktorá pridržiava kotvu. Kotva pri dostatočnom zoslabení elektromagnetickej sily opäť uzavrie ventil (Obr. 18). [6]



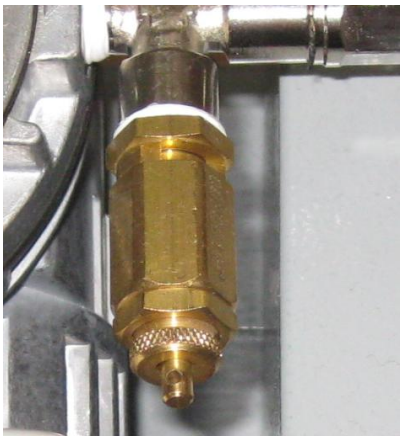

*Obr. 17 Otvorený ventil*




*Obr. 18 Uzavretý ventil*

*Obr. 19 Manuálny ventil*

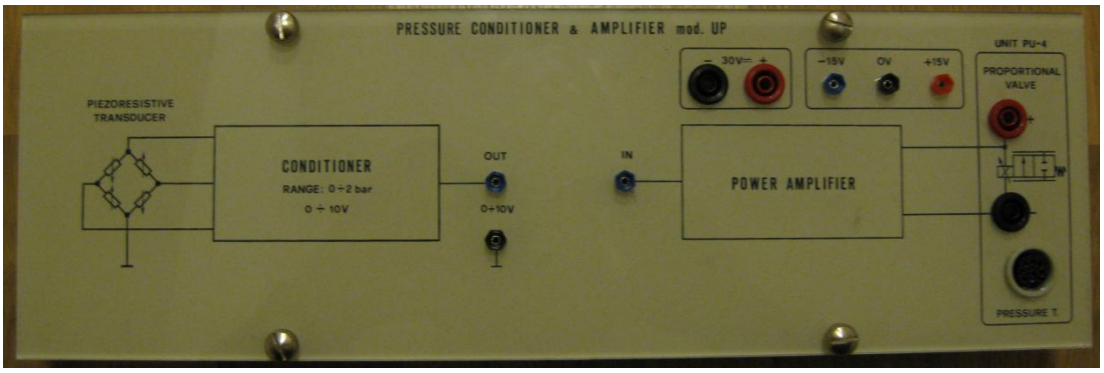
Manuálny ventil na obrázku 19 slúži hlavne na vypustenie vzduchu z nádoby podľa potreby. Napríklad keď je v nádobe natlakovaný vzduch, kompresor je vypnutý a mi ho chceme opäť zapnúť. Pretože podľa bezpečnostných pokynov pri zapnutí kompresora musí byť tlak v tlakovej nádrži pred jeho spustením nulový. Týmto ventilom samozrejme môžeme tiež simulovať väčšiu nádobu a tak zmenšiť dynamiku sústavy. Problémom je ale nemožnosť zafixovania ventilu do určitej polohy a zároveň jej opätovné nastavovanie keďže citlivosť na správne nastavenie je veľmi vysoká, lebo priemer ventilu je malý. Zaujímavým využitím na cvičeniach môže byť tiež jeho pootvorenie pri ustálení sústavy na požadovanej hodnote, čím zmeníme vlastnosti sústavy a vyvoláme tak nový zásah regulátora a jeho snahu o získanie požadovanej hodnoty na výstupe. Nesmie byť, ale otvorený priveľmi aby bol kompresor schopný vôbec vyvolať požadovaný tlak v nádobe.



*Obr. 20 Bezpečnostný ventil*

Na obrázku 20 je znázornený tretí a to bezpečnostný ventil jednotky. Je zaradený v hlavnom prívode vzduchu od kompresora do tlakovej nádoby a otvára sa mechanicky pri vysokom tlaku, aby nedošlo k zničeniu jednotky. Tlakové rozmedzie jednotky je 0 až 4 bary.

## 3.2. Modul UP




*Obr. 21 Modul UP*

Na obrázku 20 je samostatný modul dodávaným spolu s pneumatickou jednotkou Elettronica Veneta. Obsahuje svorky na vstupné napätie 30V, ktoré je prevádzané do zosilňovača, ktorého výstup je pripojený do pneumatickej jednotky a ku elektromagnetickému ventilu. Na vstup zosilňovača je možné pripojiť 0 až 10 V a tak ovládať otváranie (0V) a zatváranie (10V) ventilu. Na tento vstup sa privádza výstup regulátora.

Ďalšími vstupnými napájacími svorkami sú svorky na napájanie operačných zosilňovačov (-15V 0V +15V) v oboch elektrických obvodoch modulu.

V pravom dolnom rohu modulu (Obr. 21) je vstup pre tlakový prevodník, ktorý sníma tlak a prevádza ho na napätie. Základom prevodníka je tenzometrický snímač tlaku s kremíkovými doštičkami na membráne. Tlak pôsobiaci na membránu spôsobí zmeny odporu rezistorov zapojených do Wheatstonovho mostíka. Výstupný signál tenzometrického snímača je ďalej spracovávaný a privedený na výstup, ktorý je zároveň vstupom do regulátora. Merací rozsah prevodníka je 0 – 2 bar, čo je 0 – 10V.

## 3.3. Regulátor ZEPADIG 10

Patrí medzi univerzálne, kompaktné priemyselné regulátory. Je vybavený analógovými vstupmi s galvanickým oddelením, analógovým výstupom v napäťovej aj prúdovej podobe a štyrmi reléovými výstupmi. Perióda algoritmu môže byť od 0,1s. Ovládať ho je možné buď osem tlačítkovou klávesnicou, alebo počítačom pomocou sériového rozhrania RS 232, alebo RS 485. V prípade tejto Bakalárskej práce bol ovládaný osem tlačítkovou klávesnicou.

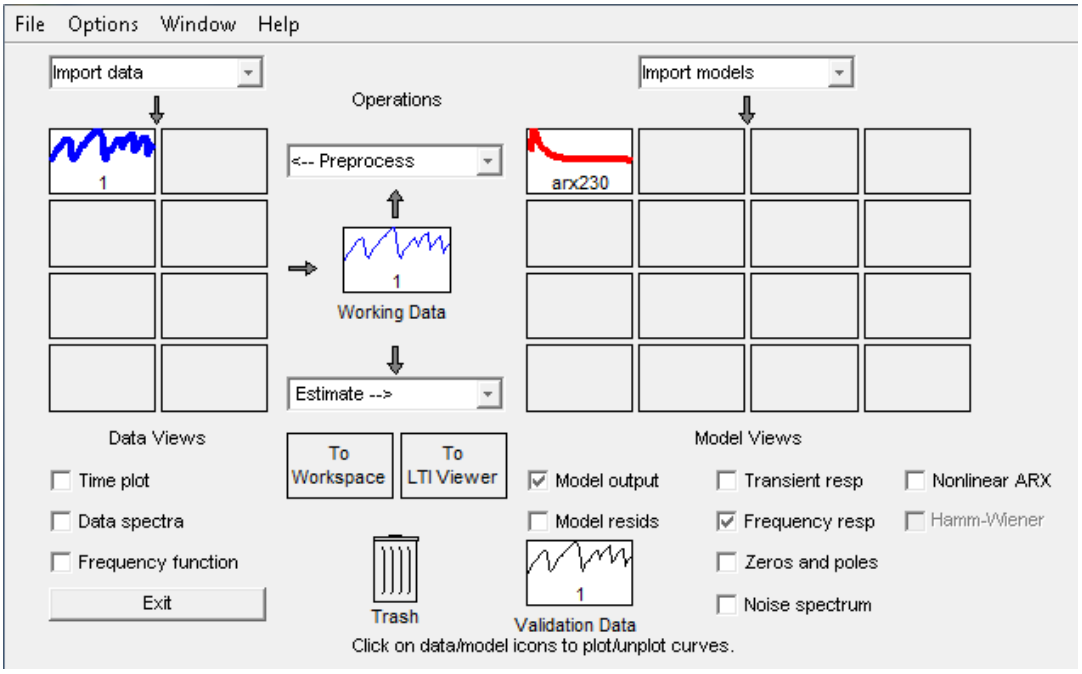
# 4. Realizácia riadenia sústavy

Z kapitoly 2. vyplýva, že samotnej realizácii riadenia sústavy predchádza jej identifikácia a potom následný návrh konkrétneho regulátora.

## *4.1.Identifikácia*

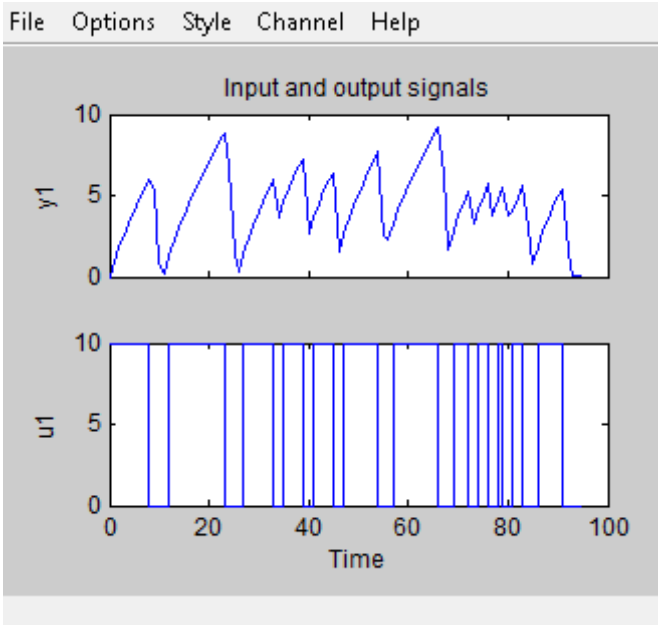
Sústavu som identifikoval experimentálnou metódou a to nameraním a zaznamenaním vstupných a výstupných dát. Dáta som nameral a zaznamenal pomocou prístroja GRANT 2010 so software-om Squirrel. Namerané hodnoty som tak mohol z prístroja exportovať napríklad do Excel-u a ďalej s nimi pracovať. Minimálna vzorkovacia doba prístroja a zároveň doba, ktorú som používal je 1 sekunda.

Namerané hodnoty som potom spracovával pomocou programu Matlab a jeho nástroja s názvom „System Identificiation Toolbox“. V samotnom „Toolboxe“ som pracoval pomocou jeho grafického prostredia (Obr. 22).



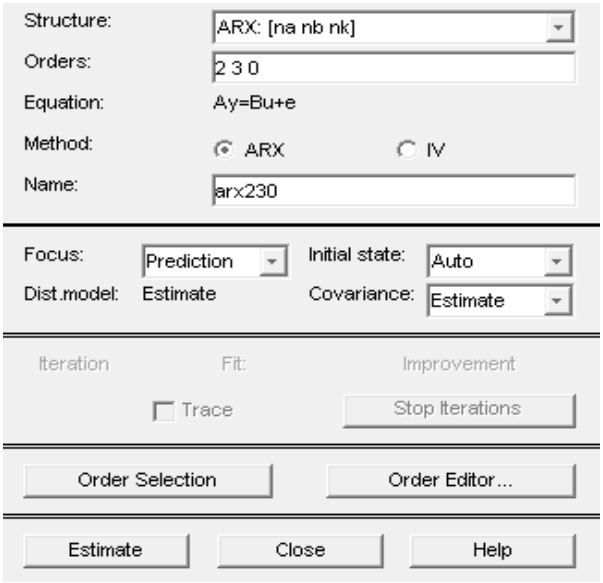

*Obr. 22 GUI System Identification Toolbox*

Po naimportovaní nameraných vstupných a výstupných dát (Obr. 23) sa mi priebeh výstupu zobrazí v ľavej časti úvodného okna (Obr. 22) a je možné ho ešte prípadne pred spracovávať (Preprocess), čo som ja ale nerobil.



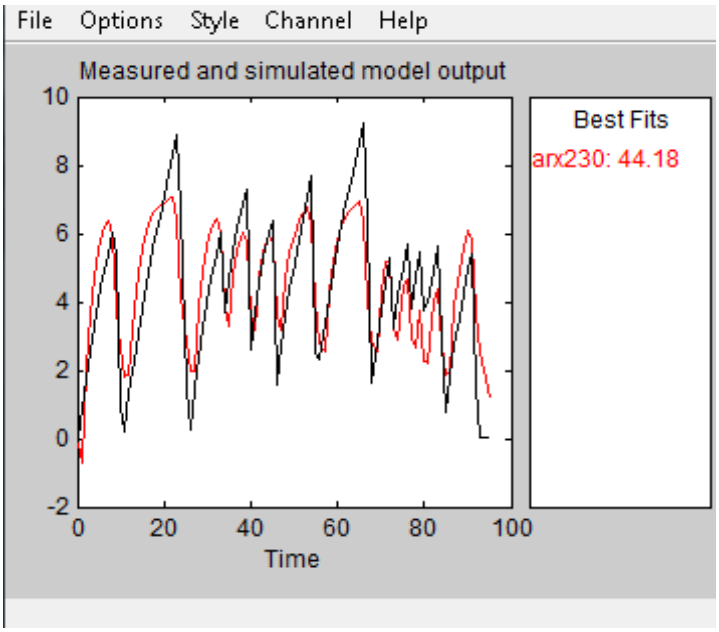

*Obr. 23 Vstupné a výstupné dáta*

Ďalšie spracovanie importovaných dát som určil výberom Estimate a voľbou vytvorenia lineárneho modelu pomocou metódy ARX s určením počtu rádu polynómov a bez dopravného meškania(Obr. 24).



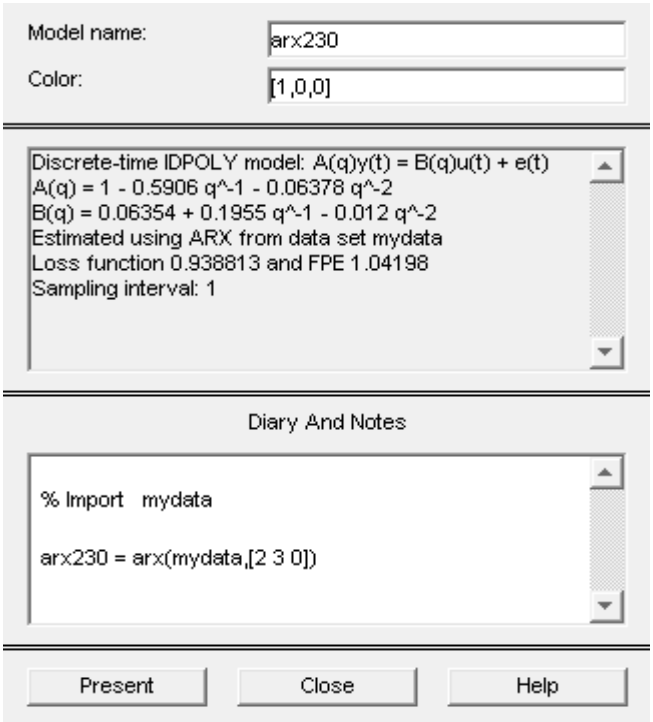

*Obr. 24 Nastavenie parametrov ARX modelu*

Po výbere parametrov a vytvorení modelu v pravej časti základného okna toolboxu (Obr. 22) som si porovnal priebeh výstupu reálneho modelu s vytvoreným modelom (Obr. 25) a porovnal ho s ďalšími, u ktorých som zmenil rád polynómov. Najlepším zo všetkých bol práve model, ktorý používam aj tu na obrázkoch.




*Obr. 25 Výstup reálnej a vypočítanej sústavy*

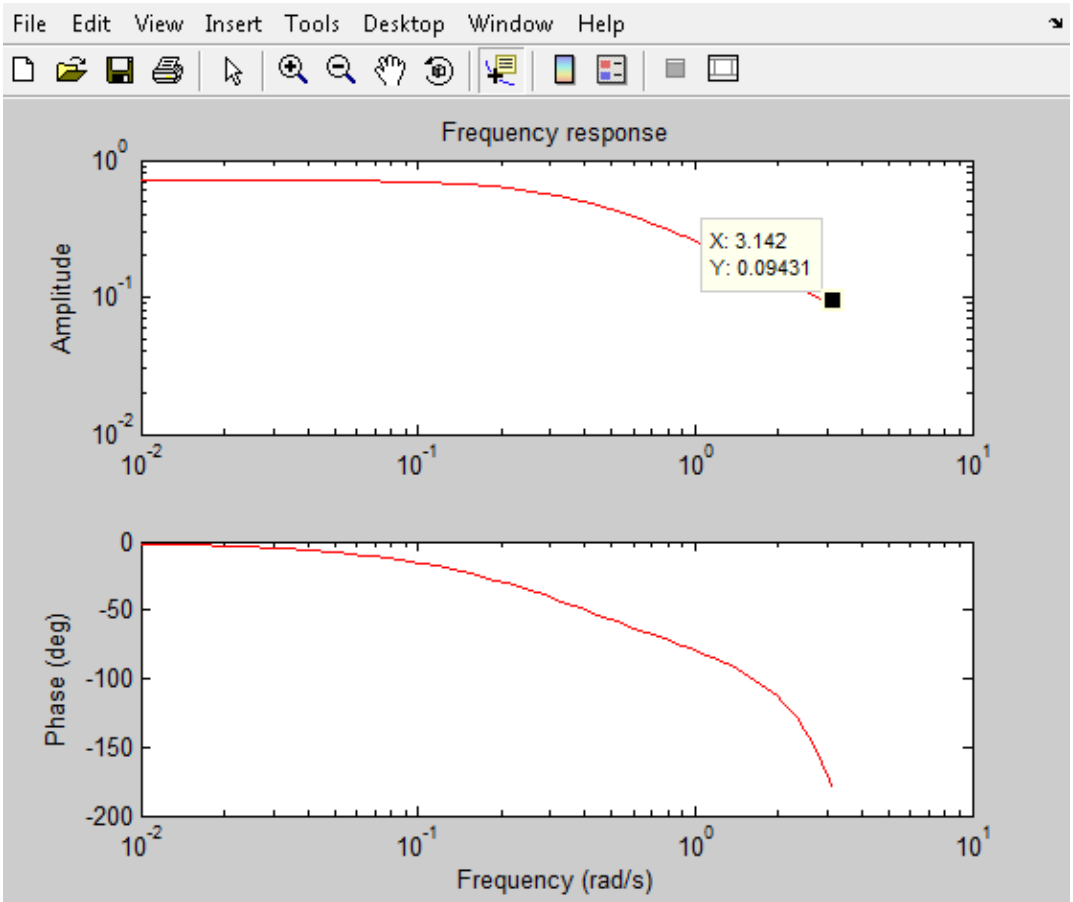
Ide o sústavu druhého rádu bez dopravného meškania ako je vidno z hodnôt na obrázku 26.




*Obr. 26 Vypočítané parametre teoretického modelu*

## *4.2.Návrh konštánt regulátora*

Konštanty regulátora som navrhoval pomocou frekvenčných metód. Pomocou System Identificiaton Toolbox-u“ som si zobrazil frekvenčné charakteristiky identifikovaného modelu (Obr. 27), aby som z nich mohol odčítať zlomovú frekvenciu ($\omega_D$) a zosilnenie (PM) na zlomovej frekvencii pre určenie konštánt PID regulátora.



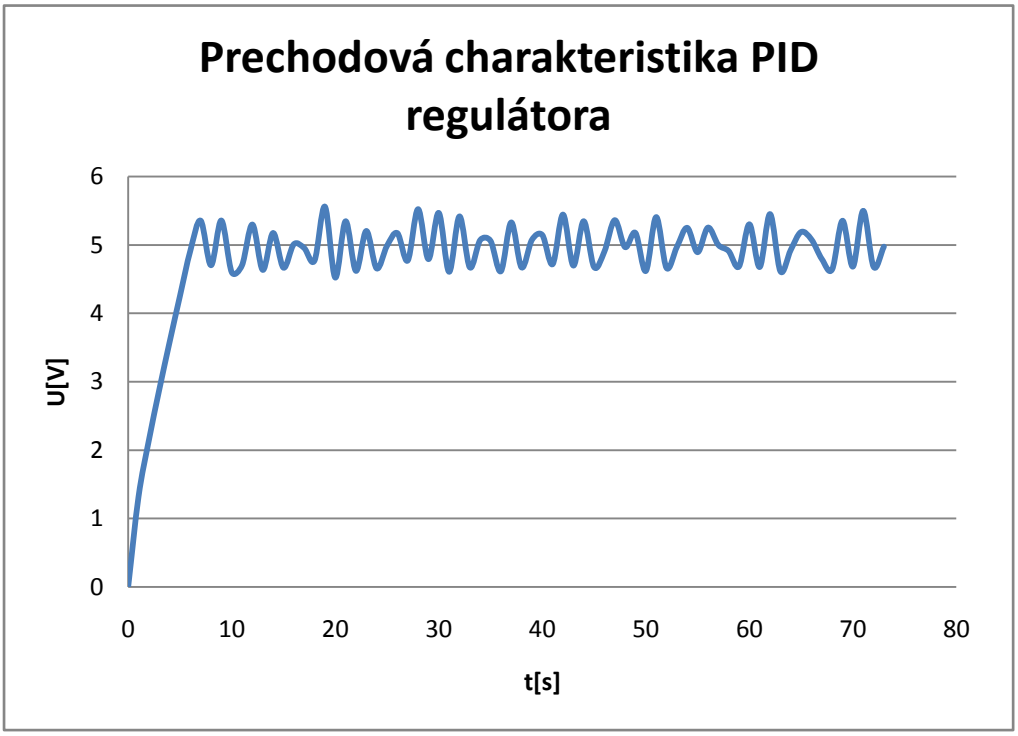

*Obr. 27 Frekvenčné charakteristiky navrhnutého modelu*

Pri návrhu PID regulátoru volíme požadovanú fázovú bezpečnosť na PM = 39,3°, čo je oproti bežne volenej u iných regulátorov menšia o 5,7°. Tento úbytok spôsobuje integračná zložka, ktorej zlomovú frekvenciu ($\omega_I$) volíme 10-krát menšiu ako zlomovú frekvenciu fázovej bezpečnosti, aby sa na nej výraznejšie neprejavil vplyv integračnej korekcie. Fáza sústavy, na ktorej budeme teraz odčítavať zlomovú frekvenciu je -180°. Na obrázku 27 je znázornené toto odčítanie pričom zlomová

frekvencia je 3,142 a zosilnenie je 0,09431. Pri splnení podmienky jednotkového zosilnenia môžeme odvodiť vzťahy pre výpočet konštánt regulátora:

$$k_D = \frac{1}{\omega_D\sqrt{2}|P(j\omega_D)|}\,, \qquad k_P = 1{,}1\omega_D k_D\,, \qquad k_I = 0{,}1 k_D \omega_D^2$$

Po dosadení potrebných hodnôt do vzťahov pre výpočet regulátora mi výsledné konštanty vyšli takto: $k_D$=2,506; $k_P$=6.909 a $k_I$=1,173. Na obrázku 28 je vidno priebeh prechodovej charakteristiky s takto nastavenými konštantami regulátoru. Požadovaná hodnota je 1 bar, čo na grafe predstavuje 5V. Výstup sústavy kmitá okolo požadovanej hodnoty v rozsahu +-10%. Podobne sa správala sústava aj pri navrhnutých konštantách pri PD či PI regulátore, čo je pre laboratórne cvičenie podľa mňa nedostačujúce. Ďalšie regulátory a ich konštanty, ktoré sú v zadaní laboratórnej úlohy boli dosiahnuté cyklickou optimalizáciou konštánt pričom som vychádzal z tejto navrhnutej sústavy a jej správania. Keďže regulátor pracuje v inverznom režime tak kmity sústavy je možné odstrániť napríklad zvýšením I zložky pričom sa jej hodnota, ale nesmie prehnať, aby regulátor nemal zbytočne veľký prekmit.




*Obr. 28 Prechodová charakteristika navrhnutého PID regulátora*

# 5. Laboratórna úloha Regulácia pneumatickej jednotky

## *5.1.Návrh laboratórnej úlohy*

**Úvod**

Laboratórna úloha je zameraná na reguláciu pneumatickej jednotky a názornú ukážku vplyvu jednotlivých regulačných konštánt regulátora v inverznom režime, v ktorom $y=y_{max}-y$, kde $y_{max}$ predstavuje maximálnu hodnotu výstupu regulátoru a y výstup sústavy.

**Popis sústavy**

Základným prvkom sústavy je pneumatická jednotka Elettronica Veneta, ktorej súčasťou je aj samostatný modul UP. Modul v sebe obsahuje zosilňovač s výstupom pripojeným na elektromagnetický ventil a tlakový snímač s prevodníkom na napätie. Do sústavy sú zaradené aj dva napájacie zdroje a to DIAMETRAL P230R51D, ktorý je zdrojom jednosmerného napätia 30V privádzaného do zosilňovača. Druhým napájacím zdrojom je POWER SUPPLY 18148, ktorý slúži na napájanie operačných zosilňovačov v module. K regulácii sústavy sa používa univerzálny regulátor ZEPADIG 10.

*Pneumatická jednotka Elettronica Veneta*

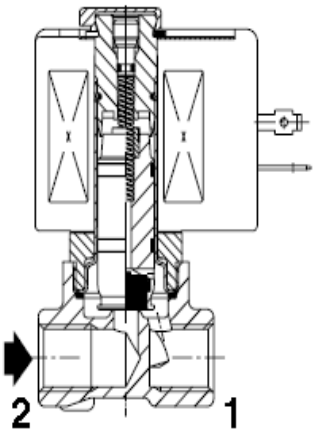
*Obr. 1 Pneumatická jednotka*

Na obrázku 1 je vidieť uloženie jednotlivých komponent pneumatickej jednotky. Na ľavej strane je sieťové napájanie kompresora, napájanie elektromagnetického ventilu zo samostatného modulu a výstupný signál tlaku pre tlakový prevodník. Hlavnou súčasťou jednotky je kompresor, ktorý po spustení tlačí vzduch do nádoby, v ktorej sa tak zvyšuje tlak a meria sa manometrom.

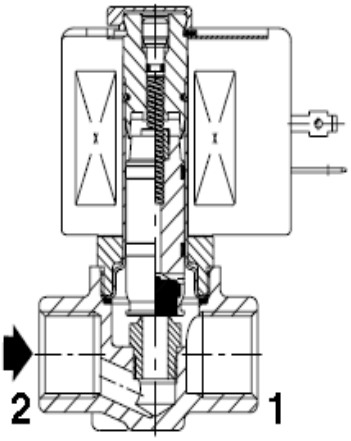
Jednotka má tri ventily. Najdôležitejším pre jej regulovanie je elektromagnetický ventil, ktorý je zobrazený na obrázku 2.

*Obr. 2 Elektromagnetický ventil*

Na obrázkoch 3 a 4 je vidieť ako ventil pracuje. Vo fáze keď je ventil uzavretý (Obr. 4) tak je privedené napätie do cievky okolo, ktorej vznikne elektromagnetické pole a to pôsobí elektromagnetickou silou na kotvu. Kotva sa po prekročení určitej hranice elektromagnetickej sily pritiahne a otvorí ventil (Obr. 3). Pri vypnutí napájacieho napätia začne klesať elektromagnetická sila, ktorá pridržiava kotvu. Kotva pri dostatočnom zoslabení elektromagnetickej sily opäť uzavrie ventil.



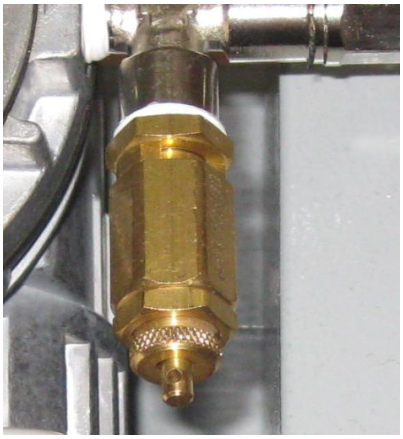

*Obr. 3 Otvorený ventil*




*Obr. 4 Uzavretý ventil*

*Obr. 5 Manuálny ventil*

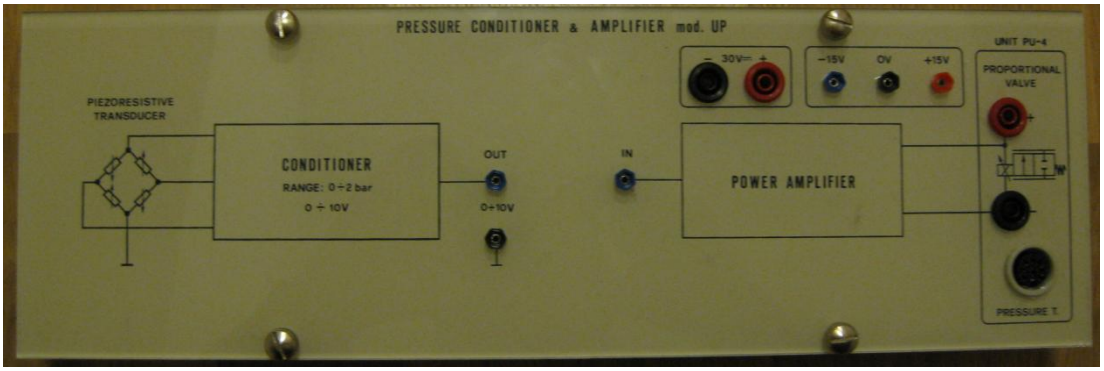
Manuálny ventil na obrázku 5 slúži hlavne na vypustenie vzduchu z nádoby podľa potreby. Napríklad keď je v nádobe natlakovaný vzduch, kompresor je vypnutý a mi ho chceme opäť zapnúť. Pretože **podľa bezpečnostných pokynov pri zapnutí kompresora musí byť tlak v tlakovej nádrži pred jeho spustením nulový**. Týmto ventilom samozrejme môžeme tiež simulovať väčšiu nádobu a tak zmenšiť dynamiku sústavy. Problémom je ale nemožnosť zafixovania ventilu do určitej polohy a zároveň jej opätovné nastavovanie keďže citlivosť na správne nastavenie je veľmi vysoká, lebo priemer ventilu je malý.



*Obr. 6 Bezpečnostný ventil*

Na obrázku 6 je znázornený tretí a to bezpečnostný ventil jednotky. Je zaradený v hlavnom prívode vzduchu od kompresora do tlakovej nádoby a otvára sa mechanicky pri vysokom tlaku, aby nedošlo k zničeniu jednotky. Tlakové rozmedzie jednotky je 0 až 4 bary.

*Modul UP*




*Obr. 7 Modul UP*

Na obrázku 7 je samostatný modul dodávaným spolu s pneumatickou jednotkou Elettronica Veneta. Obsahuje svorky na vstupné napätie 30V, ktoré je prevádzané do zosilňovača, ktorého výstup je pripojený do pneumatickej jednotky a ku elektromagnetickému ventilu. Na vstup zosilňovača je možné pripojiť 0 až 10 V a tak ovládať otváranie (0V) a zatváranie (10V) ventilu. Otváranie a uzatváranie ventilu teda funguje naopak ako pri bežnom používaní elektromagnetického ventilu. Preto pracuje regulátor v opačnom režime. Na vstup zosilňovača sa privádza výstup regulátora.

Ďalšími vstupnými napájacími svorkami sú svorky na napájanie operačných zosilňovačov (-15V 0V +15V) v oboch elektrických obvodoch modulu.

V pravom dolnom rohu modulu (Obr. 21) je vstup pre tlakový prevodník, ktorý sníma tlak a prevádza ho na napätie. Základom prevodníka je tenzometrický snímač tlaku s kremíkovými doštičkami na membráne. Tlak pôsobiaci na membránu spôsobí zmeny odporu rezistorov zapojených do Wheatstonovho mostíka. Výstupný signál tenzometrického snímača je ďalej spracovávaný a privedený na výstup, ktorý je zároveň vstupom do regulátora. Merací rozsah prevodníka je 0 – 2 bar, čo je 0 – 10V.

*Regulátor ZEPADIG 10*

Patrí medzi univerzálne, kompaktné priemyselné regulátory. Je vybavený analógovými vstupmi s galvanickým oddelením, analógovým výstupom v napäťovej aj prúdovej podobe a štyrmi reléovými výstupmi. Perióda algoritmu môže byť od 0,1s. Ovládať ho je možné buď osem tlačítkovou klávesnicou, alebo počítačom pomocou sériového rozhrania RS 232, alebo RS 485. V prípade tejto laboratórnej úlohy ho budeme ovládať osem tlačítkovou klávesnicou.

*Nastavenie regulátoru*

Všetky základne nastavenia sú už urobené. Na hornom displeji sa zobrazuje hodnota aktuálneho výstupu sústavy. Na dolnom displeji sa zobrazuje odchýlka od žiadanej hodnoty. Ako žiadaná hodnota je nastavený 1 bar, čo na výstupe sústavy a grafoch predstavuje hodnotu 5V.

Regulátor je schopný pracovať v dvoch režimoch a to v automatickom, ktorý volíme tlačítkom v prvom riadku a prvom stĺpci klávesnice s obrázkom dvojšípky v cykle. Druhým režimom je manuálny režim, ktorý volíme tlačítkom v druhom riadku a prvom stĺpci klávesnice. Z neho sa práve stlačením tlačítka ENTER dostaneme do programovacieho režimu, kde sa pohybujeme tlačítkami so šípkami v poslednom stĺpci klávesnice. Programovací režim opustíme pomocou tlačitka ESC.

Počas merania je potrebné meniť nastavenia konštánt regulátora a to nasledovne.

Prejdeme do manuálneho režimu, stlačením tlačítka ENTER vstúpime do programovacieho režimu. Do P0-01 nastavíme hodnotu proporcionálnej konštanty. Do P0-02 nastavíme hodnotu integračnej konštanty a do P0-03 nastavíme derivačnú konštantu. Pomocou tlačítka ESC opustíme programovací režim a vrátime sa do manuálneho, z ktorého prejdeme do automatického.

**Úlohy merania**

1. ***Vplyv P zložky***

A.

- Nastavte proporcionálnu konštantu regulátoru na hodnotu 1 a hodnotu integračnej a derivačnej konštanty na hodnotu 0, čím získame P regulátor.
- Zmerajte a zaznamenajte prechodovú charakteristiku sústavy.

B.

- Opakujte postup podľa bodu A. pričom proporcionálnu konštantu nastavte na hodnotu 0,715.

Porovnajte výsledky oboch meraní a vplyv proporcionálnej zložky regulátora.

2. ***Vplyv D zložky***

A.

- Nastavte proporcionálnu konštantu regulátoru na hodnotu 0,715. Hodnotu integračnej konštanty na 0 a hodnotu derivačnej konštanty na hodnotu 0,107. Takto získame PD regulátor.
- Zmerajte a zaznamenajte prechodovú charakteristiku sústavy.

B.

- Nastavte proporcionálnu konštantu regulátoru na hodnotu 0,715. Hodnotu integračnej konštanty na 0 a hodnotu derivačnej konštanty na hodnotu 2,808.
- Zmerajte a zaznamenajte prechodovú charakteristiku sústavy.

Porovnajte výsledky merania s meraniami z bodu 1. a vplyv derivačnej zložky regulátora.

### *3. Vplyv I zložky*

A.

- Nastavte proporcionálnu konštantu regulátoru na hodnotu 1,715 a hodnotu integračnej konštanty na 0,997. Derivačnú konštantu nastavte na hodnotu 0, čím získame PI regulátor.
- Zmerajte a zaznamenajte prechodovú charakteristiku sústavy.

Porovnajte výsledky merania s meraniami z bodu 1. a vplyv integračnej zložky.

### *4. PID regulátor*

A.

- Nastavte proporcionálnu konštantu regulátoru na hodnotu 1,35. Hodnotu integračnej konštanty na 8,7 a hodnotu derivačnej konštanty na 0,89.
- Zmerajte a zaznamenajte prechodovú charakteristiku sústavy.

B.

- Nastavte proporcionálnu konštantu regulátoru na hodnotu 3,9. Hodnotu integračnej konštanty na 1,903 a hodnotu derivačnej konštanty na 0,66.
- Zmerajte a zaznamenajte prechodovú charakteristiku sústavy.

Porovnajte výsledky meraní z týchto posledných dvoch bodov a vplyv zlého nastavenia konštánt regulátora.

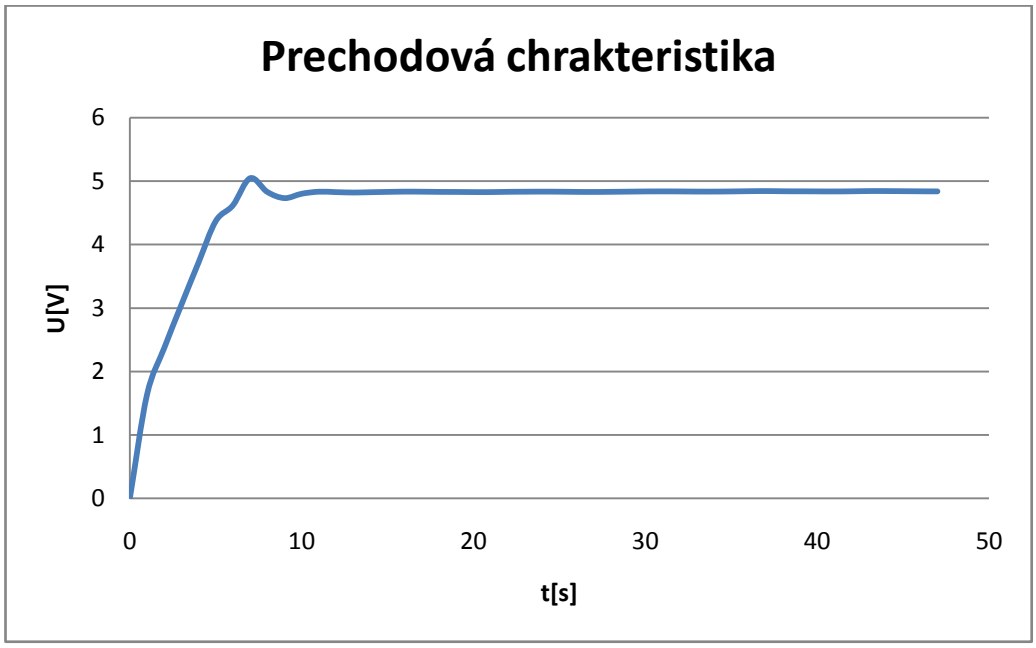
## *5.2. Vyhodnotenie laboratórnej úlohy*

***1.***

A.

*Obr. 29*

B.

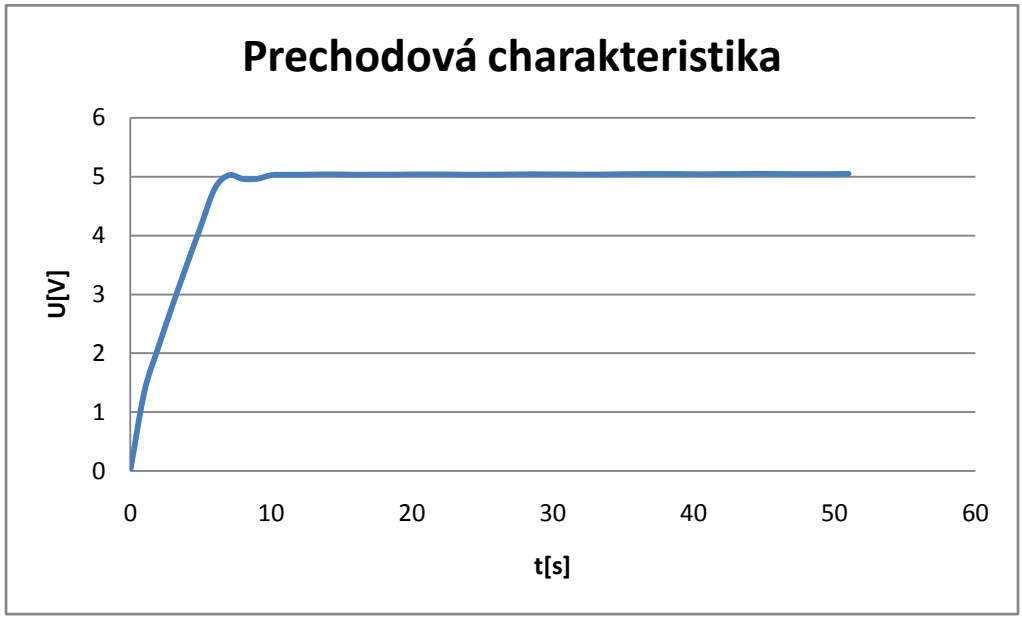



*Obr. 30*

Proporcionálna zložka určuje regulačné zosilnenie. V inverznom režime v tejto sústave pôsobí tak, že čím je väčšia tak tým skôr začne pôsobiť pričom otvorí ventil a pri jej vyšších hodnotách sa može stať, že sa výstup nedostane do požadovanej hodnoty.

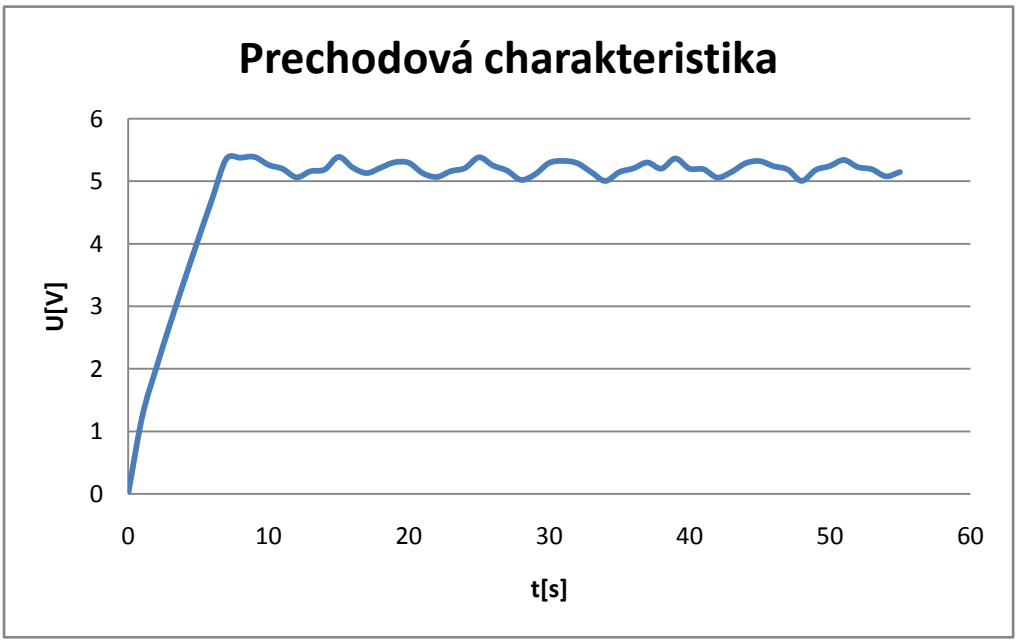
***2.***

A.




*Obr. 31*

B.

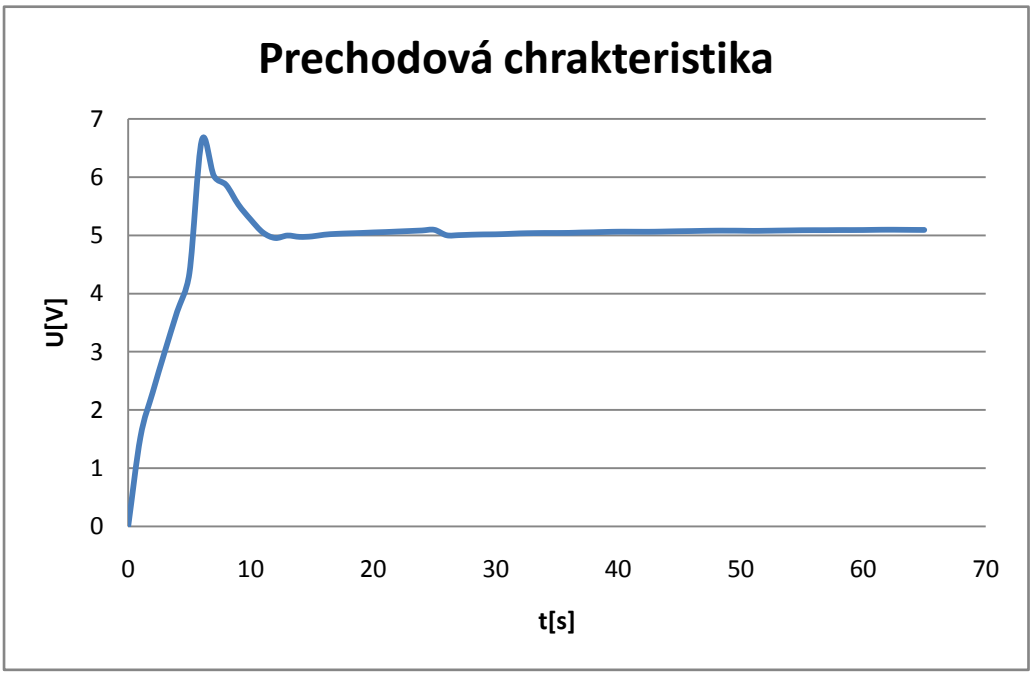



*Obr. 32*

Derivačná zložka v inverznom režime regulátora zvyšuje citlivosť zosilnenia proporcionálnej zložky a spomaľuje jej reakciu avšak při vyšších hodnotách spôsobuje osciláciu sústavy, keď reakciu zosilnenia potlačí až príliš a tá potom náhle reaguje na vysokú odchylku.

***3.***

A.

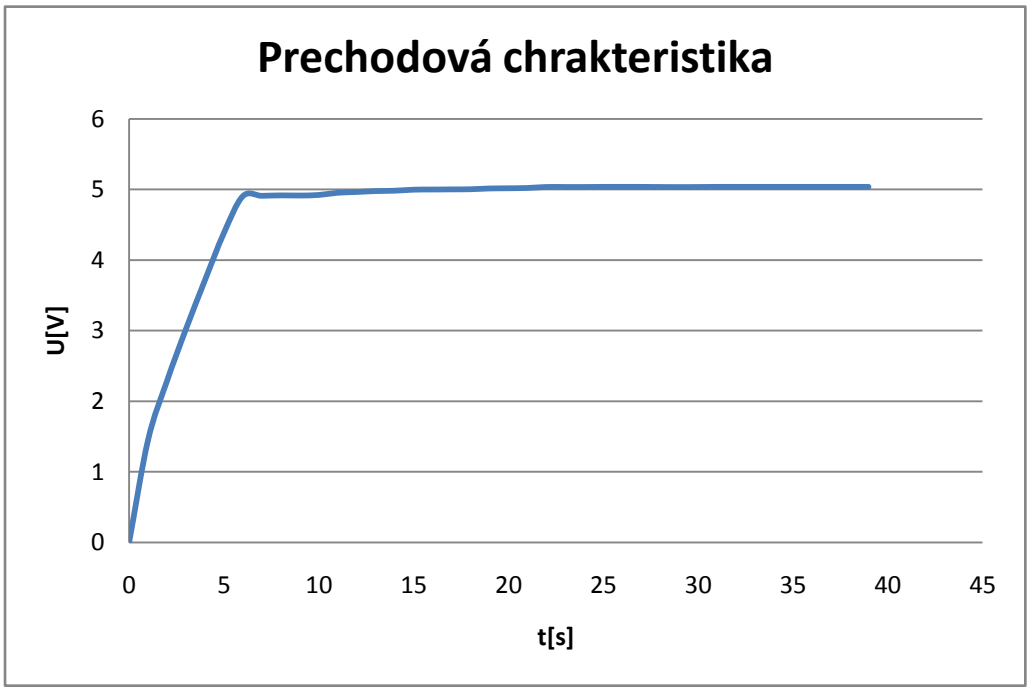



*Obr. 33*

Integračná zložka regulátora v inverznom režime potláča rýchlosť reakcie proporcionálnej zložky, čím môže spôsobiť vysoký prekmit sústavy, ale s pribúdajúcim časom dosiahne na výstupe požadovanú hodnotu.

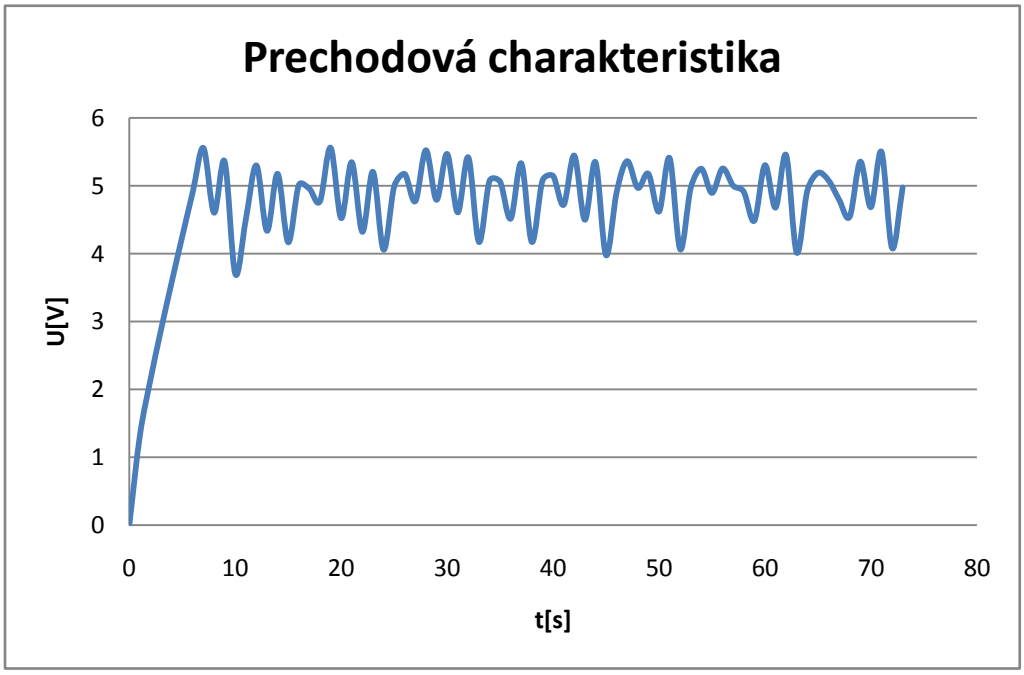
***4.***

A.




*Obr. 34*

B.




*Obr. 35*

# 6. Záver

Jedným z výsledkov Bakalárskej práce je funkčná realizácia automatickej regulácie tlaku v pneumatickej jednotke na požadovanú hodnotu. Možné nastavenia regulátorov a prechodové charakteristiky sú zahrnuté v návrhu laboratórnej úlohy, ktorá je ďalším výsledkom tejto práce. Návrh laboratórnej práce je zameraný na praktické ukážky vplyvu proporcionálnej, integračnej a derivačnej konštanty regulátorov v inverznom režime, ktorý je vhodný práve na reguláciu tejto pneumatickej jednotky. Väčšina regulačných konštánt je navrhnutá pomocou metódy cyklickej optimalizácie. Je to jednak z dôvodu praktických ukážok zlého nastavenia a z časti aj z dôvodu nie úplne presného výsledku identifikácie sústavy. Jedným z dôvodov nepresnosti modelu môže byť nedostatočná vzorkovacia doba záznamového zariadenia oproti rýchlosti odozvy jednotky na zmeny a z toho plynúca aproximácia hodnôt. Na druhej strane mi to pomohlo pri tvorbe návrhu laboratórnej úlohy a výbere správnych ukážkových nastavení.

# 7. Literatúra


[1] Elettronica Veneta, Teacher/student manual, Volume 1/2

[2] Prof. Ing. Oldřich Drábek, CSc.: Automatizované systémy řízení, 2 opravené vydání, Pardubice 2000, http://krpvt.upce.cz/files/asr/ASR.pdf

[3] Podpora výuky predmetu Systémy a řízení na ČVUT, FEL http://support.dce.felk.cvut.cz/e-kurzy/file.php/14/cviceni/SRI_sem3_HsPIDr.pdf

[4] Podpora výuky predmetu Systémy a řízení na ČVUT, FEL http://dce.felk.cvut.cz/sari/SARI-ucebnice.html

[5] Havel Petr, Frekvenční metódy syntézy http://dce.felk.cvut.cz/sri2/ss/Synteza/Havel_frekv_met2.pdf

[6] Dokumentácia ku elektromagnetickému ventilu http://www.ascojoucomatic.com/images/site/upload/_en/pdf1/00021GB.pdf

[7] Dokumentácia ku Systém Identification Toolbox od Matlabu http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/ident/ident_gs.pdf