

# **Modelování, identifikace a řízení pneumatického motoru CE107**

Modelling, Identification and Control  
of the  
Engine Speed Control Apparatus CE107

Bc. Pavel Sousedík



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel SOUSEDÍK**  
Osobní číslo: **A08485**  
Studijní program: **N 3902 Inženýrská informatika**  
Studijní obor: **Automatické řízení a informatika**

Téma práce: **Modelování, identifikace a řízení pneumatického motoru CE107**

### Zásady pro vypracování:

1. **Důkladně se seznamte s reálným modelem pneumatického motoru CE107 včetně dostupné dokumentace a literatury.**
2. **Vytvořte zjednodušený matematický model tohoto zařízení.**
3. **Neznámé parametry navrženého matematického modelu určete experimentálně.**
4. **Implementujte vytvořený matematický model do prostředí MATLAB/Simulink.**
5. **Porovnejte získané simulační odezvy s reálně naměřenými daty, a to jak v otevřeném, tak i uzavřeném regulačním obvodu.**
6. **Pro tyto účely navrhnete vhodný systém řízení.**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. CE107 Engine Speed Control. Nottingham: TQ Education and Training Ltd, 2004. 62 s.
2. WELLSTEAD, P; READMAN, M. Control-systems-principles.co.uk [online]. 2004 [cit. 2011-01-28]. Technical White Paper on Engine Speed Control. Dostupné z WWW: <http://www.control-systems-principles.co.uk/whitepapers/engine-speed-control.pdf>.
3. FROLKA, V. Pneumatický motor CE 107. Zlín, 2007. 106 s. Diplomová práce na Fakultě aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. František Gazdoš, Ph.D.
4. HORÁČEK, Petr. Systémy a modely. Praha : ČVUT, 1999. 232 s. ISBN 80-01-01923-3.
5. WELLSTEAD, Peter. Introduction to Physical Modelling. London : Academic Press Ltd, 1979. 244 s. ISBN 0-12-744380-0.
6. KARBAN, Pavel. Výpočty a simulace v programech Matlab a Simulink. Praha : BEN-technická literatura, 2007. 220 s. ISBN 978-80-251-1448-3.
7. BOBÁL, Vladimír. Identifikace systémů. Zlín : UTB ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, 2009. 128 s. ISBN 978-80-7318-888-7.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. František Gazdoš, Ph.D.

Ústav řízení procesů

Datum zadání diplomové práce:

25. února 2011

Termín odevzdání diplomové práce:

3. června 2011

Ve Zlíně dne 25. února 2011



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
ředitel ústavu

## ABSTRAKT

Hlavním cílem této diplomové práce bylo jednak vytvoření matematického modelu pneumatického motoru CE107 a určení jeho neznámých parametrů pomocí experimentů.

Dále bylo třeba implementovat takto vytvořený model do prostředí MATLAB/SIMULINK a porovnat získané simulační odezvy s reálně naměřenými daty na modelu pneumatického motoru.

Posledním úkolem bylo navrhnout vhodný systém řízení pro reálný motor i jeho vytvořený simulační model s následným porovnáním a vyhodnocením výsledků.

Klíčová slova: PNEUMATICKÝ MOTOR CE107, MODELOVÁNÍ, IDENTIFIKACE, KASKÁDNÍ ŘÍZENÍ, MATLAB.

## ABSTRACT

The main aim of this master thesis was to design a mathematical model of CE107 Engine Speed Control apparatus with unknown parameters diagnosis.

Next goal was model implementation into the MATLAB/SIMULINK programming environment and its output result comparison with the real model.

Last aim was to design appropriate control system for both models (real and mathematical) with subsequent result comparison.

Keywords: CE107 ENGINE SPEED CONTROL APPARATUS, MODELLING, IDENTIFICATION, CASCADE CONTROL, MATLAB.

Děkuji vedoucímu své diplomové práce Ing. Františku Gazdošovi, Ph.D. za odborné vedení, ochotu a trpělivost, podnětné připomínky a rady udílené při vypracování nejen této práce.

Dále patří poděkování panu Ing. Petru Chalupovi, Ph.D. za šikovné ruce a zapůjčení nářadí k opravě pneumatického motoru.

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>8</b>  |
| <b>1 PNEUMATICKÝ MOTOR CE107</b> .....                         | <b>10</b> |
| 1.1 OBECNÝ POPIS .....   | 10        |
| 1.2 PODROBNÝ POPIS.....  | 10        |
| 1.2.1 Motor, setrvačnick a brzdny systém.....                  | 11        |
| 1.2.2 Přívod vzduchu.....                                      | 13        |
| 1.2.3 Technické parametry .....                                | 13        |
| <b>2 MATEMATICKÝ MODEL PNEUMATICKÉHO MOTORU</b> .....          | <b>15</b> |
| 2.1 VZDUCHOVÁ Klapka .....                                     | 15        |
| 2.2 MOTOR A BRZDA .....  | 16        |
| 2.3 MODEL CELÉHO SYSTÉMU .....                                 | 18        |
| <b>3 VYTVOŘENÍ S-FUNKCE V PROSTŘEDÍ MATLAB-SIMULINK</b> .....  | <b>20</b> |
| <b>4 ŘÍZENÍ MOTORŮ</b> .....                                   | <b>24</b> |
| 4.1 POHLED DO HISTORIE ŘÍZENÍ OTÁČEK MOTORŮ.....               | 24        |
| 4.2 KASKÁDNÍ ŘÍZENÍ.....                                       | 24        |
| 4.3 MRTVÉ PÁSMO A JEHO KOMPENZACE.....                         | 25        |
| <b>5 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ NA MODELU</b> .....                 | <b>27</b> |
| 5.1 KALIBRACE OTÁČEK.....                                      | 27        |
| 5.2 MĚŘENÍ STATICKÝCH CHARAKTERISTIK .....                     | 28        |
| 5.3 MĚŘENÍ, MODELOVÁNÍ A IDENTIFIKACE VENTILU .....            | 31        |
| 5.3.1 Dynamická charakteristika ventilu.....                   | 31        |
| 5.3.2 Identifikace ventilu.....                                | 32        |
| 5.3.3 Matematický model ventilu a jeho parametry.....          | 35        |
| 5.4 MĚŘENÍ, MODELOVÁNÍ A IDENTIFIKACE OTÁČEK MOTORU .....      | 36        |
| 5.4.1 Měření statické charakteristiky motoru - přírůstky ..... | 36        |
| 5.4.2 Identifikace otáček motoru.....                          | 38        |
| 5.4.3 Matematický model motoru a jeho parametry.....           | 42        |
| <b>6 NÁVRH SYSTÉMU ŘÍZENÍ</b> .....                            | <b>44</b> |
| 6.1 NÁVRH REGULÁTORŮ .....                                     | 44        |
| 6.1.1 Návrh regulátoru pro řízení ventilu.....                 | 44        |
| 6.1.2 Regulace ventilu.....                                    | 45        |
| 6.1.3 Návrh regulátoru pro řízení otáček motoru .....          | 51        |
| 6.1.4 Regulace otáček motoru .....                             | 58        |
| <b>7 BENCHMARK</b> .....                                       | <b>68</b> |
| <b>8 CHYBY A PROBLÉMY PŘI MĚŘENÍ</b> .....                     | <b>74</b> |
| <b>ZÁVĚR</b> .....   | <b>76</b> |
| <b>CONCLUSION</b> .....  | <b>78</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>           | <b>80</b> |
| <b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b> | <b>81</b> |
| <b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>                     | <b>82</b> |
| <b>SEZNAM TABULEK.....</b>                      | <b>85</b> |
| <b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>                       | <b>86</b> |

## ÚVOD

Modely systémů se staly každodenní součástí našeho života. Jejich působení na naše rozhodování je od globálních vlivů podílejících se na naší budoucnosti po lokální rozhodnutí např. model předpovědi počasí, který ovlivní zda pojedeme odpoledne do školy na kole či nikoli. Mnoho procesů může být popsáno matematickými rovnicemi tj. pomocí matematického modelu. Tyto modely jsou využívány v různorodých vědních disciplínách jako fyzika, medicína, sociální vědy (průběh hlasování u voleb) a v neposlední řadě v průmyslu k modelování různých systémů, chování strojů a fyzikálně-chemických procesů. [1]

Tato práce se zabývá vytvořením zjednodušeného matematického modelu reálného motoru CE107. Nejdříve bylo nutné se seznámit s reálným modelem, principem jeho fungování a technickými parametry.

Pneumatický motor byl matematicky popsán a následně byl celý matematický model převeden do prostředí MATLAB s využitím S-FUNKCE.

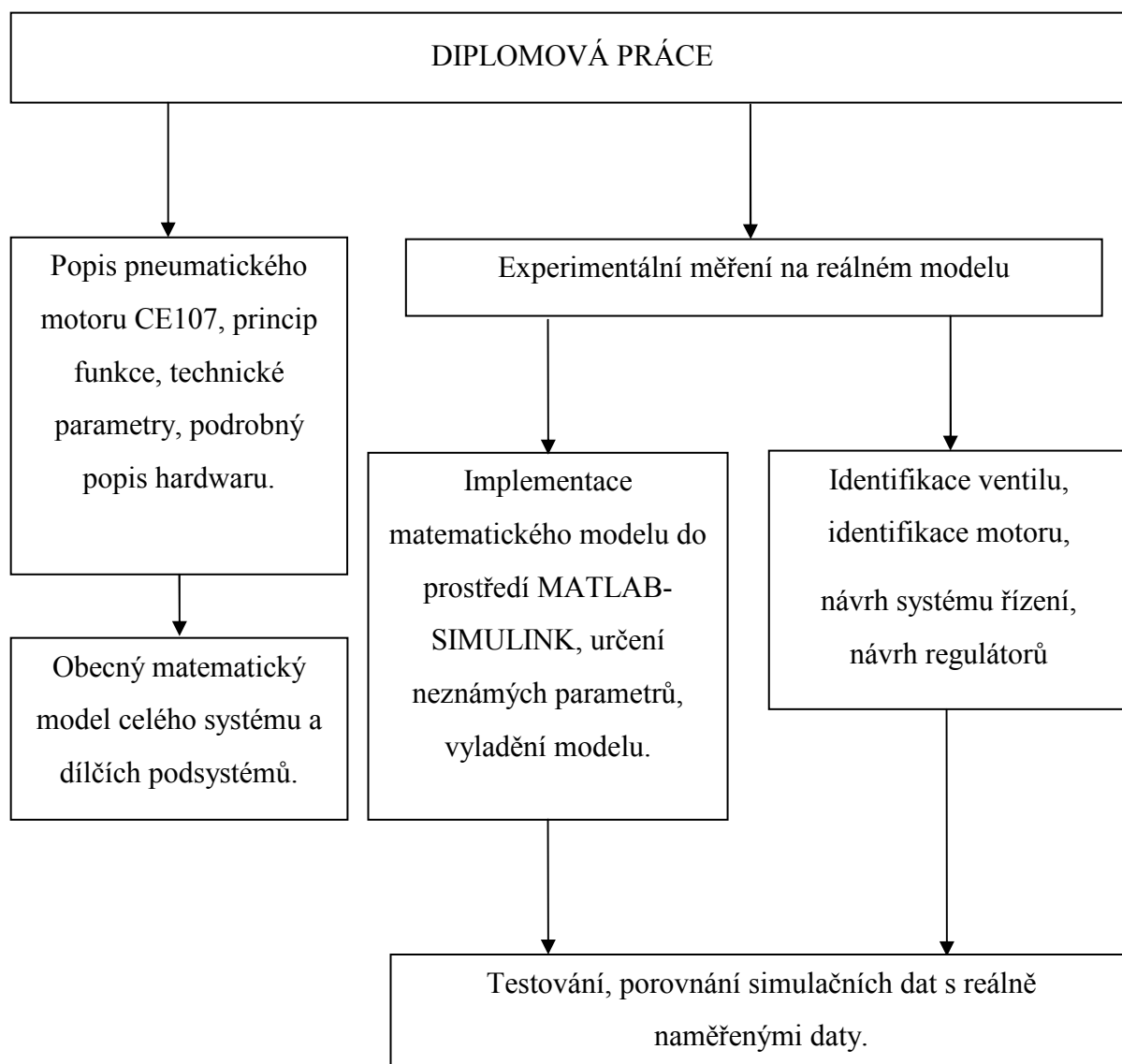
Na základě experimentů byly zjištěny jeho neznámé parametry. Nejprve byla provedena kalibrace otáček k získání převodní rovnice pro rychlost otáčení motoru. Dále byly naměřeny statické charakteristiky k určení pracovní oblasti motoru. Následovalo naměření přechodových charakteristik k získání hodnot zesílení a časových konstant pro jednotlivé podsystémy (ventil, kliková hřídel, brzda, a další).

V dalším bodu práce byla provedena identifikace vzduchového ventilu a otáček motoru. Byl navržen systém řízení s kaskádní regulací, který využívá dvou regulátorů. Hlavní regulátor řídí otáčky motoru a vedlejší (také označován jako podřízený regulátor) řídí pozici ventilu. Při návrhu regulátorů byly zvoleny osvědčené metody. Pro vedlejší regulátor je to metoda nastavení z přechodové charakteristiky a pro hlavní regulátor polynomiální metoda 1DOF struktury.

V předposledním bodu byly provedeny testy a porovnání získaných simulačních odezev s reálně naměřenými daty, a to jak v otevřeném, tak i uzavřeném regulačním obvodu.

V poslední kapitole jsou zmíněny chyby a problémy, které se vyskytly v průběhu práce. Přívod stlačeného vzduchu byl dodáván do motoru centrálním rozvodem v budově školy.

Základní stromová struktura diplomové práce je uvedena na Obrázek 1-1.

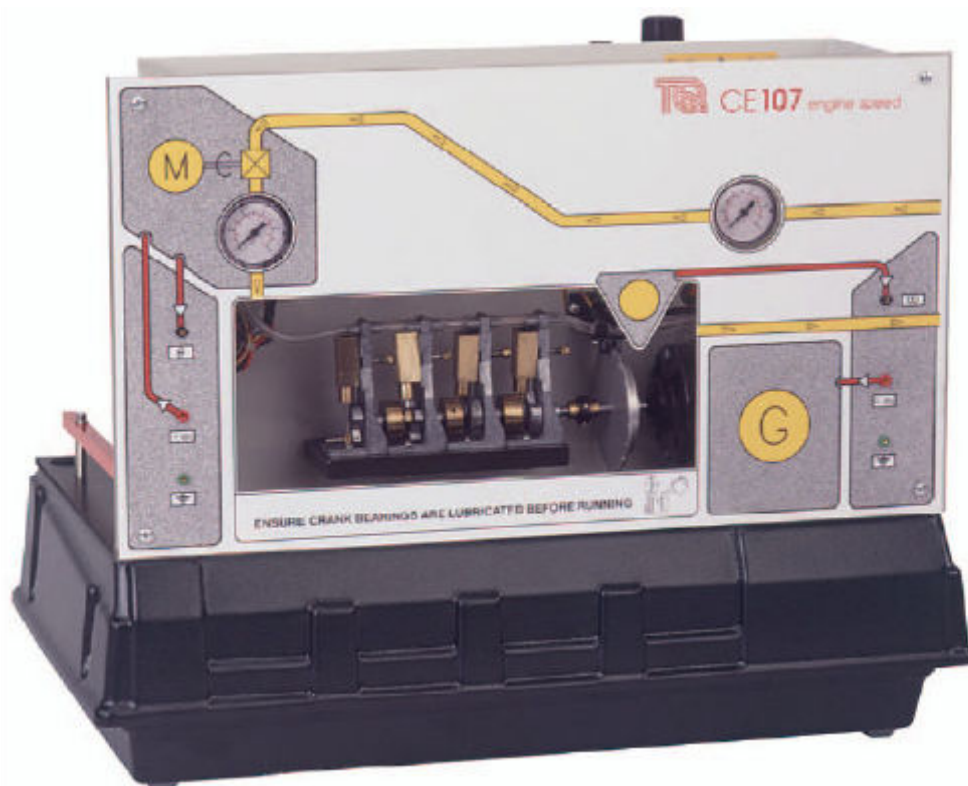


Obrázek 1-1 - Struktura diplomové práce

# 1 PNEUMATICKÝ MOTOR CE107

## 1.1 Obecný popis

Pneumatický motor CE 107 (Obrázek 1-1) je určen pro studium a výzkum základních a pokročilých principů řízení. Představuje interní systém spalovacího motoru poháněného palivem. Rychlost a otáčky motoru jsou zde regulovány množstvím přiváděného paliva v tomto případě stlačeného vzduchu. [2]



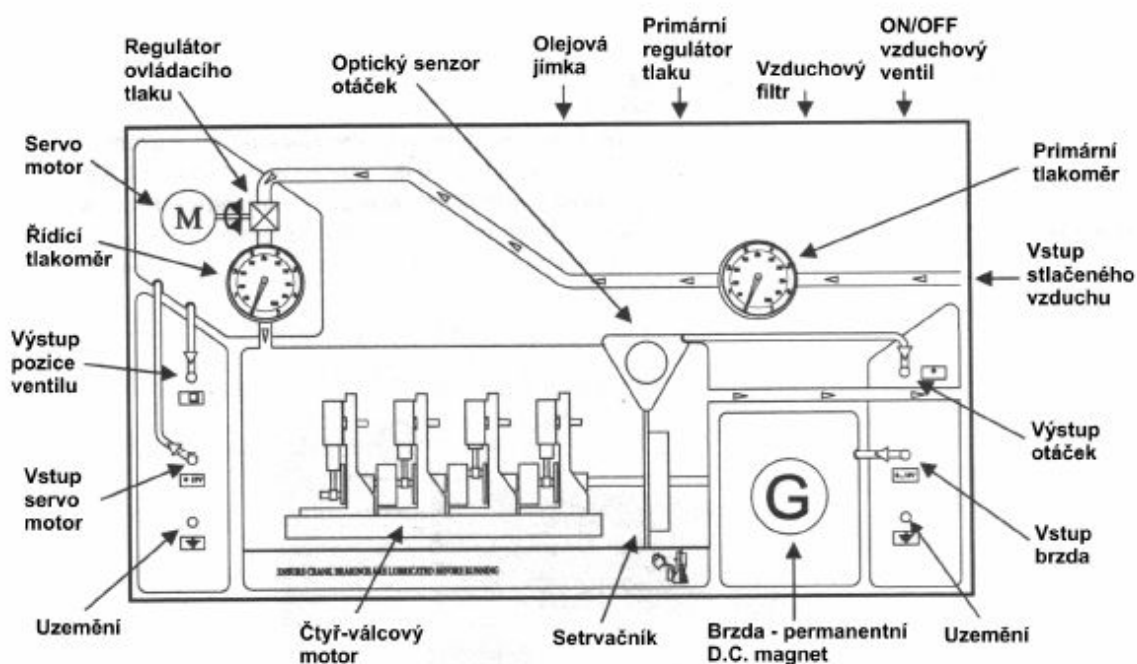
Obrázek 1-1 - Pneumatický motor CE 107

## 1.2 Podrobný popis

Napájecí zdroje, řídicí systém a sensorika jsou zcela chráněny a umístěny v základně modelu. Tyto obvody jsou přístupné skrze 2 mm konektory namontované na předním panelu (Obrázek 1-2). [2]

Celý model je složen s několika systémů. Tyto jednotlivé části jsou:

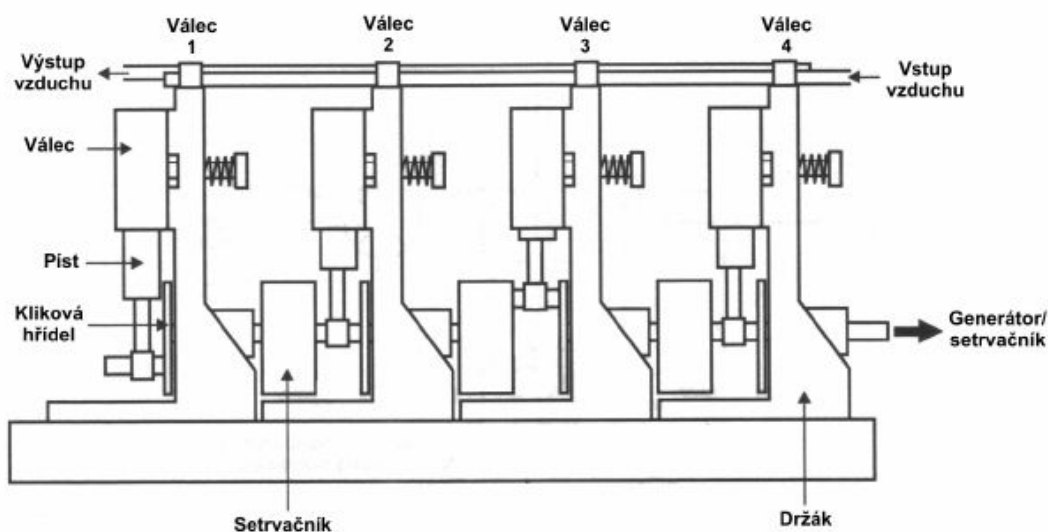
- a) Motor, setrvačnick a brzdny systém
- b) Přívod stlačeného vzduchu
- c) Vzduchový ventil ovládaný servo-motorem



Obrázek 1-2 – Popis modelu

### 1.2.1 Motor, setrvačnick a brzdny systém

V systému je namontován čtyřválcový dvoutaktní motor poháněný stlačeným vzduchem. Motor je nainstalován za průhledným předním panelem pro bezpečné pozorování chodu motoru a také ochranu před stříkajícím olejem.



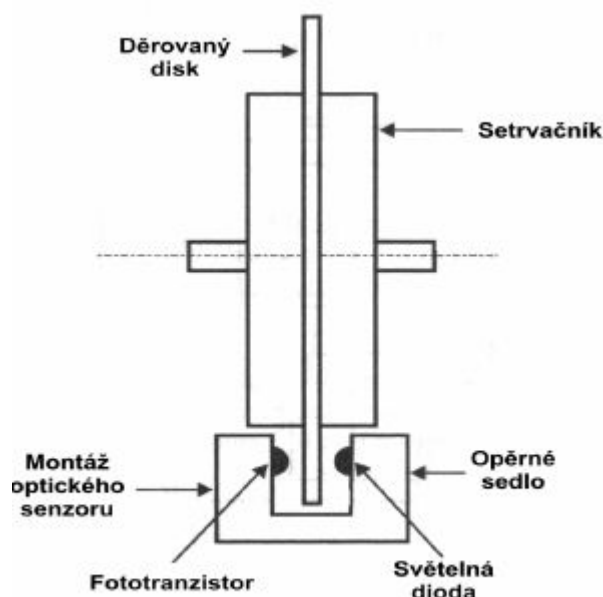
Obrázek 1-3 – Konstrukce čtyřválcového motoru

Každý z válců motoru je složen z klikové hřídele, pístu, válce, ojnice a setrvačnicku (Obrázek 1-3). Tandemové zapojení válců umožňuje efektivní přenos síly na klikovou hřídel.

Stlačený vzduch je dodáván do každého válce přes sací potrubí. Toto potrubí je umístěno nad montáží motoru. Otáčení kliky způsobuje pohyb pístu válce dovnitř a ven a také umožňuje obousměrnou rotaci válce. Tato druhá akce umožňuje vzduchu vstoupit do válce ve správném okamžiku a vyprodukovat potřebnou sílu pro pohyb hřídele. Nepřetržitá rotace je dosažena tandemovým spojením válců vzájemně posunutých o 90 stupňů. Energie uložená v setrvačnicku udržuje pohyb klikové hřídele mezi jednotlivými pracovními zdvihy. Válce jsou nastaveny pro poskytování pracovního zdvihu v pořadí 1-3-4-2.

Ke zvýšení setrvačnosti hřídele a k uchování energie udržující rotaci mezi dvěma pracovními zdvihy je každý válec vybaven přídatným setrvačnickem.

Pro měření rychlosti otáčení motoru je v každém setrvačnicku po jeho obvodu vyvrtáno několik děr. K detekci je použito optického snímače složeného ze světelné diody a fototranzistoru. Takto je generována sada elektrických pulsů odpovídajících frekvenci otáčení motoru. Motor dosahuje rychlosti od 0 do 2500 ot/min odpovídající analogovému napěťovému signálu od 0 do 10 V. Setrvačnick a optický senzor je vidět na obrázku (Obrázek 1-4). [2]



Obrázek 1-4 – Setrvačník s děrovaným diskem a optickým senzorem

### 1.2.2 Přívod vzduchu

Přívod stlačeného vzduchu do motoru je realizován z tlakového rozvodu v budově školy. Přiváděný vzduch prochází filtrem, regulátorem tlaku a jímkou s olejem umístěnými na zadním panelu. Parametry přiváděného vzduchu musí být v rozmezí tlaků od 5 do 10 barů ( $5 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^6$  Pa) s minimálním průtokem 10 l/min. [4]

Instalovaný regulátor tlaku je zajímavý z hlediska obsahu samostatného zpětnovazebního systému. Vstupující proud vzduchu prochází hlavním ventilem až do doby dosáhnutí určité hranice tlaku. V tomto okamžiku proud vzduchu zatlačí na membránu, která udržuje ventil v pozici poskytující námi zvolený tlak. [2]

### 1.2.3 Technické parametry

Typ motoru: Čtyřválcový, poháněný stlačeným vzduchem

Válce: objem válců  $3.8 \text{ cm}^3$ , vrtání 8 mm, zdvih 19 mm

|                         |   |
|-------------------------|---|
| Vstupní ventil vzduchu: | 12 V, 500 mA                                |
| Snímač otáček:          | optický senzor (fotodioda a fototranzistor) |
| Napájení modelu:        | 230 V, 50 Hz, 2A                            |

**Vstupy:**

- napěťový vstup elektromotoru ovládajícího klapku ventilu pro přívod vzduchu do válců pneumotoru. Rozsah signálu je  $\langle -10V, +10V \rangle$ . Na technologické kartě kanál č.1
- napěťový vstup brzdy. Rozsah signálu je  $\langle 0V, +10V \rangle$ . Na technologické kartě kanál č.2.

**Výstupy:**

- napěťový výstup indikující pozici klapky ventilu. Rozsah signálu je  $\langle -10V, +10V \rangle$ . Na technologické kartě kanál č.1
- napěťový výstup indikující otáčky motoru. Rozsah signálu je  $\langle 0V, +10V \rangle$ . Na technologické kartě kanál č.2. [2]

## 2 MATEMATICKÝ MODEL PNEUMATICKÉHO MOTORU

Prvním krokem pro návrh řízení systému je porozumění jeho dynamice pro jejíž vyjádření můžeme použít matematického popisu systému nazývaného jako modelování. [2]

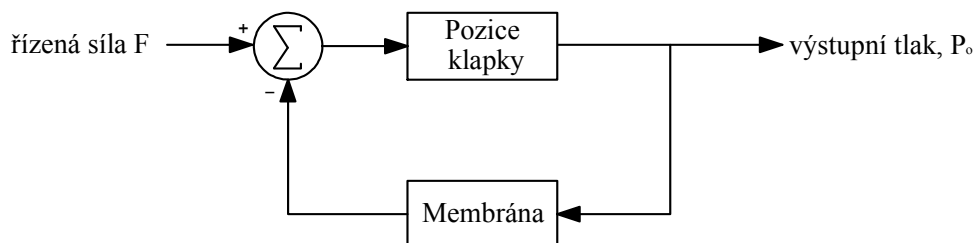
### 2.1 Vzduchová klapka

Vzduchová klapka je ovládána elektromotorem řízeným elektrickým napětím. Tento elektromotor nastavuje polohu klapky  $x[V]$  na základě velikosti vstupního napětí  $u[V]$ . Matematický popis tohoto děje se dá vyjádřit jako: [2]

$$\frac{dx}{dt} = g_m u \quad (2.1)$$

kde  $g_m$  je zesílení elektromotoru.

Klapka tlačí na membránu silou  $F[N]$ . Výstupní tlak  $P_o[\text{bar}]$  účinkuje opačnou silou na membráně, která působí proti vstupní tenzi. Vstupní klapka reprezentuje tedy zpětnovazební systém jak je ukázána na obrázku Obrázek 2-1.

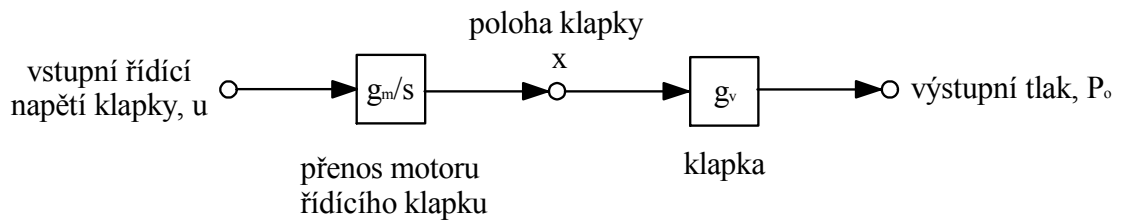


Obrázek 2-1 - Zpětnovazební systém klapky

Výše popsaný zpětnovazební systém funguje tak, že tlak na výstupu klapky  $P_o$  je proporcionální k tlakové síle  $F$  na vstupu. Tato tenze je lineárně převáděna na polohu klapky  $x$ . Dostaneme tedy rovnici:

$$P_o = g_v \times x \quad (2.2)$$

Celkový model klapky zahrnuje obě rovnice (2.1) a (2.2) znázorněné blokovým diagramem Obrázek 2-2, kde  $g_v[\text{bar/V}]$  představuje zesílení klapky.



Obrázek 2-2 - Blokový diagram modelu klapky

## 2.2 Motor a brzda

Výstupní vzduch z klapky o tlaku  $P_o$  působí na píst motoru a tím vytváří točivý moment  $\tau_e$  [N.m]. Tento točivý moment je přímoúměrný tlaku vzduchu z klapky  $P_o$ : [2]

$$\tau_e = g_e P_o \quad (2.3)$$

kde  $g_e$  je zesílení motoru a klikového tělesa.

Znázornění v blokového diagramu je následující.



Obrázek 2-3 – Diagram rovnice točivého momentu

Točivý moment motoru musí být takový, aby překonal zátěžný moment a tření k roztočení setrvačnicku. Setrvačnost setrvačnicku motoru značíme  $I$  [s]. Pokud rychlost motoru je  $\omega$  pak můžeme napsat: [3]

$$\left( \begin{array}{c} \text{Rychlost změny} \\ \text{momentu setrvačnicku} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Točivý moment} \\ \text{motoru} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{Zátěžný} \\ \text{moment} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{Třecí} \\ \text{moment} \end{array} \right) \quad (2.4)$$

nebo

$$I \frac{d\omega}{dt} = \tau_e - \tau_1 - \tau_f \quad (2.5)$$

Třecí moment  $\tau_f[\text{Kg.m}]$  je přímoúměrný rychlosti motoru  $\omega[\text{ot/min}]$ . [2]

$$\tau_f = b\omega \quad (2.6)$$

kde  $b$  je součinitel smykového tření.

Zátěžný moment  $\tau_l[\text{N.m}]$  přímoúměrně závisí na velikosti napětí zátěže  $d_l[\text{V}]$  a jejím zesílení  $g_l[\text{N.m/V}]$ .

$$\tau_l = g_l d_l \quad (2.7)$$

Standardní symbol  $d_l$  označuje externí vynucenou zátěž nebo poruchu systému.

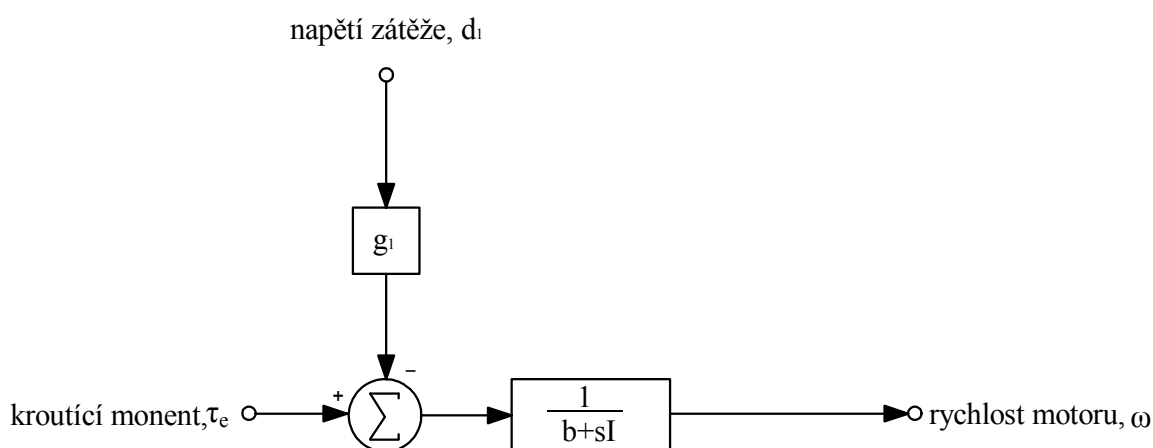
Sloučím rovnic (2.5)-(2.7) dostaneme vztah:

$$I \frac{d\omega}{dt} + b\omega = \tau_e - g_l d_l \quad (2.8)$$

Výše uvedená rovnice ve tvaru přenosové funkce je:

$$\omega = \frac{1}{b + sI} (\tau_e - g_l d_l) \quad (2.9)$$

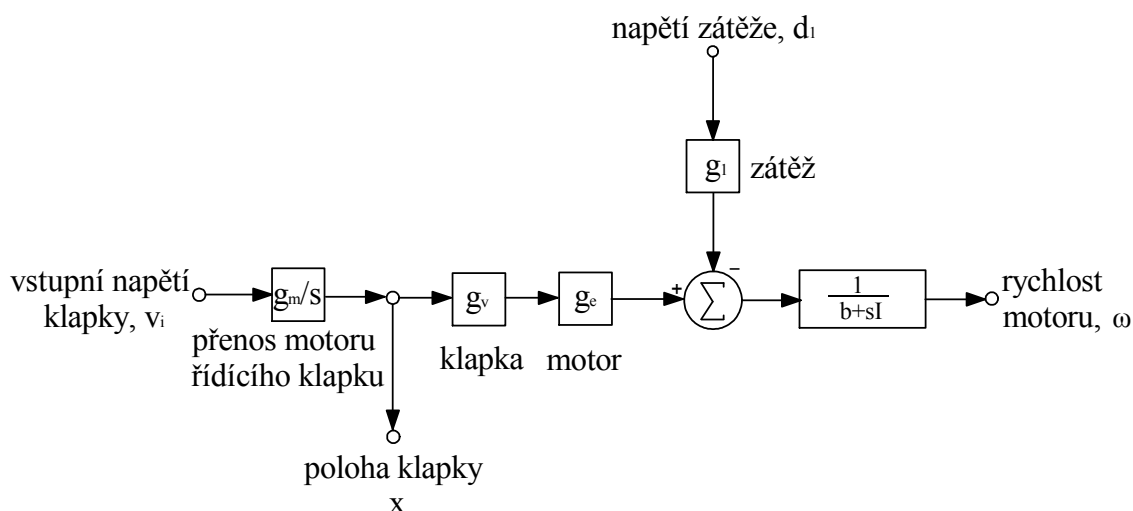
Odpovídající blokové schéma je znázorněno níže.



Obrázek 2-4 – Blokový diagram odpovídající rovnici motoru a zátěže

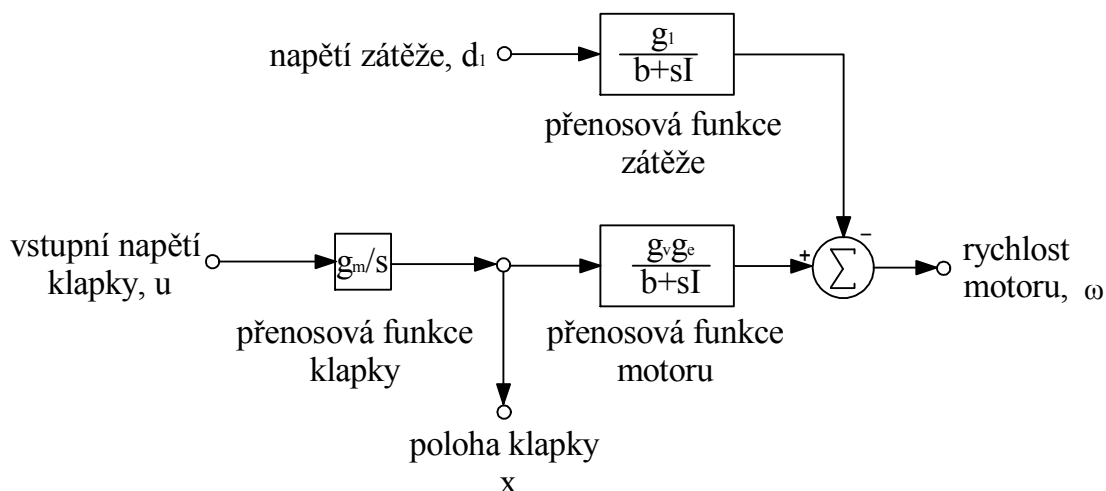
## 2.3 Model celého systému

Jednotlivé komponenty uvedené v předchozích částech kapitoly mohou být společně spojeny k vytvoření kompletního systému pneumatického motoru. Tento systém je znázorněn pomocí blokového diagramu uvedeného níže. Vstupní (nebo řídicí) proměnné jsou  $v_i[V]$  (vstupní napětí klapky) a  $d_l$  (vstupní napětí zátěže). Měřitelné výstupy jsou  $x$  (poloha klapky) a  $\omega$  (otáčky). [2]



Obrázek 2-5 - Celkový model systému

Po úpravě získáme následující diagram odpovídající předchozímu.



Obrázek 2-6 - Upravený celkový model systému

Tento model můžeme vyjádřit ve formě rovnice jako přenosovou funkci klapky:

$$x(s) = \frac{g_m}{s} u(s) \quad (2.10)$$

kde proměnná  $g_m[\text{ot/V}]$  označuje zesílení elektromotoru pohánějícího klapku, a kombinací přenosu zátěže a motoru:

$$\omega(s) = \frac{g_v g_e}{b + sI} x(s) - \frac{g_1}{b + sI} d_1(s) \quad (2.11)$$

Nyní rovnice můžeme přepsat do standardního tvaru typického pro tyto systémy.

Pro klapku:

$$y_x(s) = \frac{G_1}{s} u(s) \quad (2.12)$$

kde zesílení  $G_1 = g_m \times k_v$ ,

Pro motor:

$$y_\omega(s) = \frac{G_2}{1 + sT} y_x(s) - \frac{G_1}{1 + sT} d_1(s) \quad (2.13)$$

kde  $G_2 = \frac{g_v \times g_e \times k_s}{b \times k_v}$ ,  $G_1 = \frac{g_1 \times k_s}{b}$ ,  $T = \frac{I}{b}$

Toto je standardní forma přenosové funkce prvního řádu, kde  $G_2$  je zesílení systému,  $G_1$  zesílení zátěže a  $T$  [s] je časová konstanta.

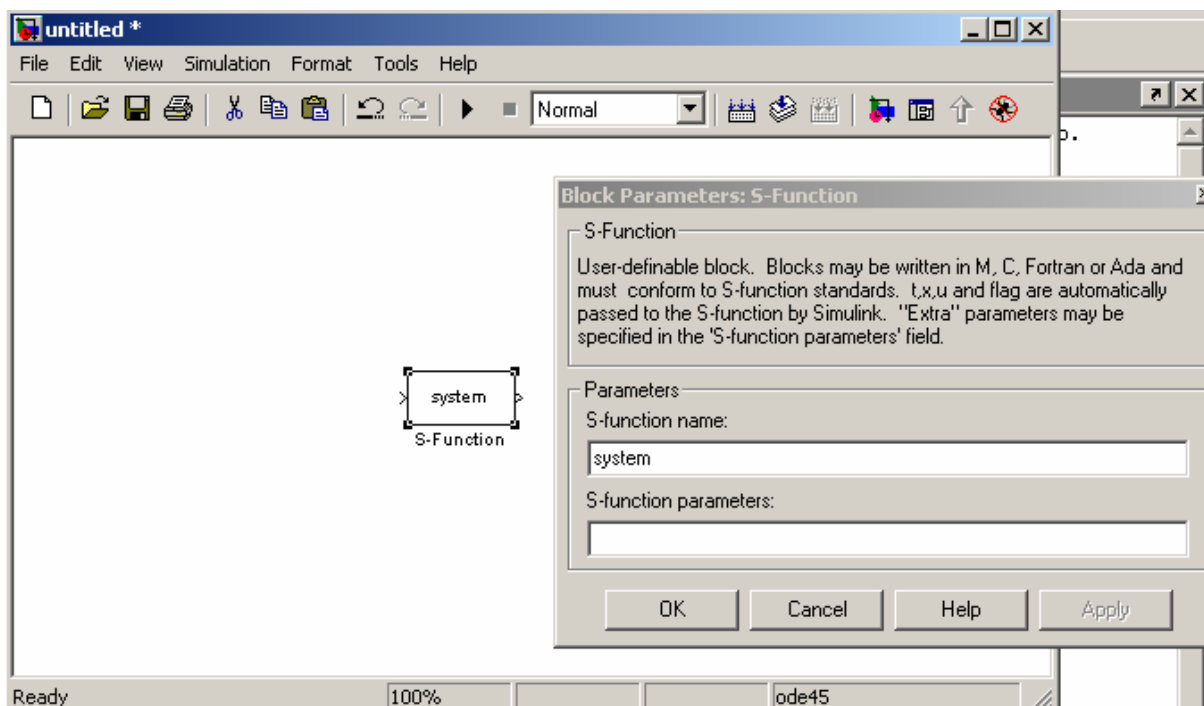
### 3 VYTVOŘENÍ S-FUNKCE V PROSTŘEDÍ MATLAB-SIMULINK

Pro implementaci vzniklých rovnic za účelem simulace chování daných systémů byl zvolen program MATLAB a jeho nástavba SIMULINK, což je jednoduchý a intuitivně stavěný nástroj pro simulaci.

S-funkce je speciální blok v SIMULINKu, který umožňuje propojení daného bloku s **m-filem**, ve kterém se nachází diferenciální rovnice popisující požadovanou dynamiku a počáteční podmínky procesu. Zde je také definován počet vstupů a výstupů.

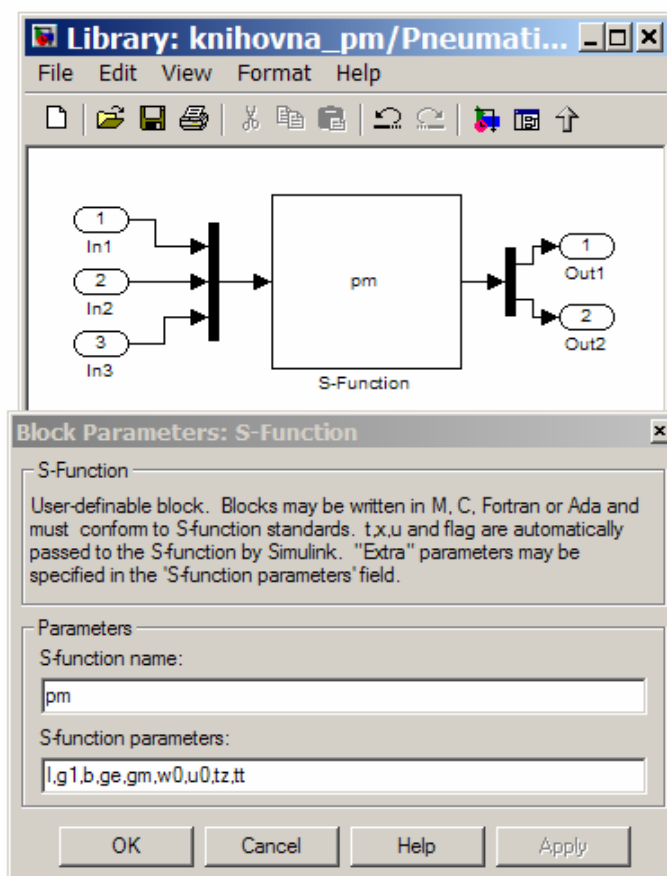
Dále je naznačeno jak se postupovalo při vytváření modelu pneumatického motoru.

S-funkce se nachází v SIMULINKU v části - **user-defined function**. Po založení nového simulačního schématu, ji tam přesuneme. Poklepáním levým tlačítkem myši se dostaneme do položky s názvem **s-funkce**. Název je důležitý, protože tím se propojí **s-funkce** s příslušným **m-filem**, který bude mít stejné jméno jako **s-funkce**. Na obrázku (Obrázek 3-2) je vidět blok s-funkce a její vlastnosti. Do pole **S-function parameters** se píše názvy proměnných, které lze předávat z bloku do s-funkce (**m-file**). [12]



Obrázek 3-1 - Blok s-funkce s parametry

Pokud máme zájem přidat potřebný počet vstupů a výstupů, provedeme to pomocí bloků **mux** a **demux**, které se nacházejí v sekci **simulink-signal routing**. Pro požadovaný počet vstupů stačí kliknout na blok a zde změnit počet vstupů. Pro náš případ vypadá schéma podle obrázku níže (Obrázek 3-2). **Vstup 1** je přívodní tlak  $P$ , **vstup 2** je řídicí napětí servo-motoru  $u$ , **vstup 3** je napětí zátěže (brzdy)  $d_1$ , **výstup 1** jsou výstupní otáčky motoru  $\omega$  a **výstup 2** je pozice ventilu  $x$ .

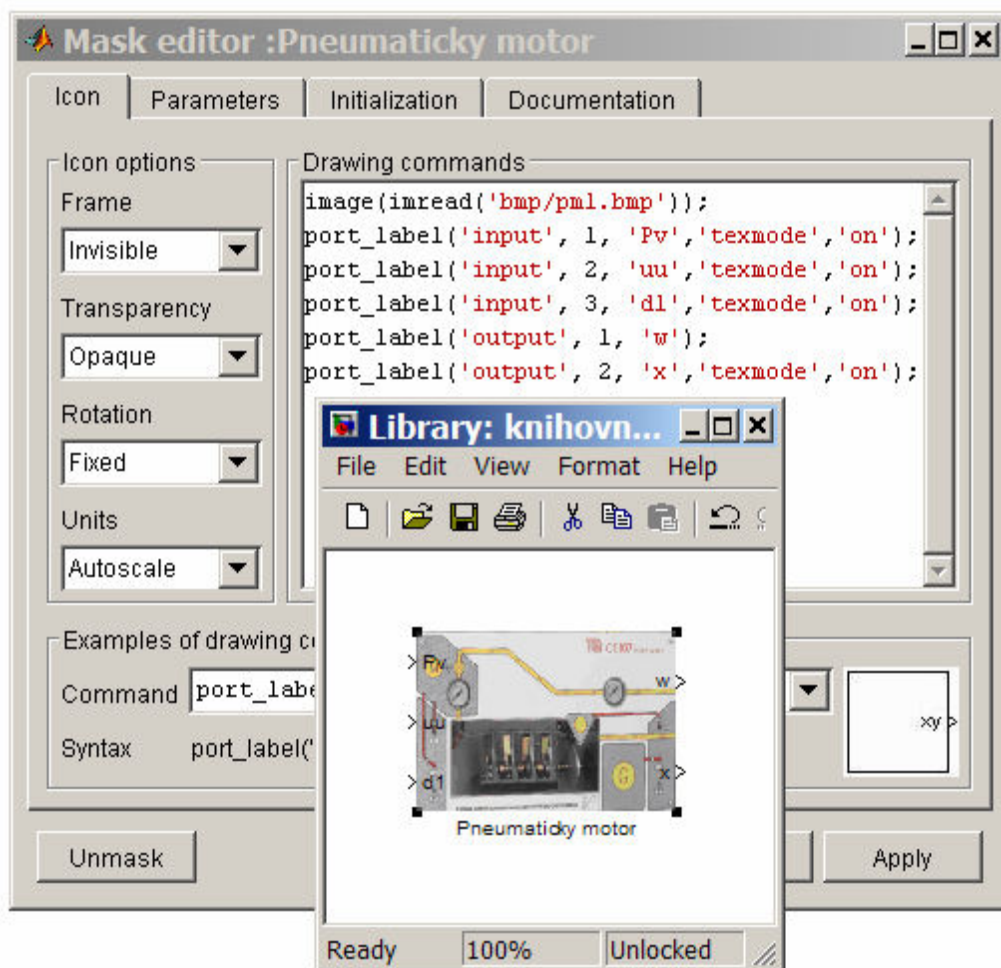


Obrázek 3-2 - S-funkce pro pneumatický motor

V jednotlivých proměnných se předávají hodnoty zesílení, vstupních napětí, konstant atd.. Označením bloků a kliknutím pravým tlačítkem myši a vybráním položky **create subsystem**, se vytvoří jeden blok se třemi vstupy a dvěma výstupy. Dále lze tento blok upravovat a to tak, že pravým tlačítkem klikneme na blok a vybereme položku **edit mask**. Otevře se okno **mask** editoru. V tomto editoru lze měnit názvy vstupů, načíst obrázek na pozadí bloku a atd.. K tomu slouží příkazy:

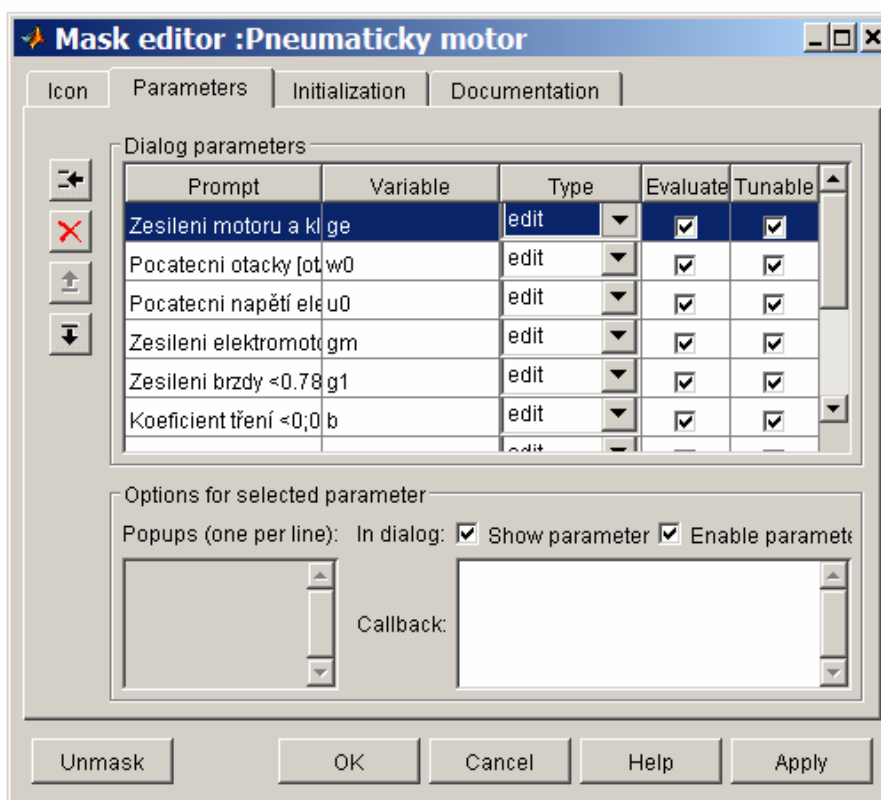
```
image(imread('bmp/pm1.bmp')); vloží obrázek na pozadí
```

`port_label('input', 1, 'Pv','texmode','on');` pojmenuje první vstup jako *Pv*, *texmode* se používá pro zobrazení dolních indexů.



Obrázek 3-3 - Blok pneumotoru se čtyřmi vstupy a dvěma výstupy

K vytvoření zadávacího menu (viz Obrázek 3-4) se využije záložky **parameters**, kde je možný slovní popis zadávaného parametru a k tomu se přiřadí proměnná, která se pak předá do s-funkce (**m-file**). Do menu se dá dostat kliknutím levého tlačítka myši na blok. [12]



Obrázek 3-4 - Vytvořené menu pneumotoru

```

1
2 function [sys,x0,str,ts] = pm(t,x,u,flag,I,gl,b,ge,gm,w0,u0,tz,tt)
3
4
5 switch flag,
6
7     case 0
8         [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes(t,x,u,flag,w0,u0); % Inicializace
9
10    case 1
11        sys = mdlDerivatives(t,x,u,I,gl,b,ge,gm,tz,tt); % vypocet derivaci
12
13    case 3
14        sys = mdlOutputs(t,x,u); % vypocet vystupu
15
16    case { 2, 4, 9 } % nepouzite flagy
17        sys = [];
18
19    otherwise
20        error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]); % Chyba obsluhy
21
22 end

```

Obrázek 3-5 - Ukázka části **m-filu** pro pneumatický motor

Celý zdrojový kód (m-file) naleznete v příloze (PŘÍLOHA I).

## 4 ŘÍZENÍ MOTORŮ

Metod řízení systémů je v dnešní době nespočet. Pro rozvětvené regulační obvody se i v praxi ukázalo výhodné použití kaskádního řízení.

### 4.1 Pohled do historie řízení otáček motorů

Řízení rychlosti je spojeno už se samými prvopočátky teorie řízení. Je zde mnoho příkladů různých zařízení a strojů z naší dávné minulosti, o kterých můžeme říci, že obsahovali zpětnou vazbu nebo regulaci. [13]

V počátcích mechanizace byly motory poháněny vodními koly a větrnými mlýny. Ale, opravdu velkou změnu přinesla doba páry v počátcích 18. století. Vynález parního motoru byl rozhodující pro úspěch průmyslové revoluce. Neméně významný podíl na úspěchu parních motorů měl vývoj regulačního ventilu pracujícího s odstředivou silou (létající kulička). James Watt je obvykle spojován s tímto vynálezem, avšak jeho práce je postavena na výzkumech mnoha dalších inženýrů. Nicméně jednoduchost a efektivita Wattova regulátoru zvítězila nad ostatními návrhy. [14]

Vynález tohoto regulátoru následovaný jeho matematickou analýzou, byly srdcem dnešního přístupu k řízení strojů. Díky průmyslové revoluci mohly skupiny vysoce vzdělaných lidí spojit vědecké obory praktického inženýrství s matematickými analytickými nástroji. [15] Bylo to důležitým krokem, který prokázal, že dynamika systémů je spojena s kořeny polynomiálních rovnic. Nyní tuto rovnici nazýváme charakteristickou rovnicí systému a její kořeny póly systému. [3]

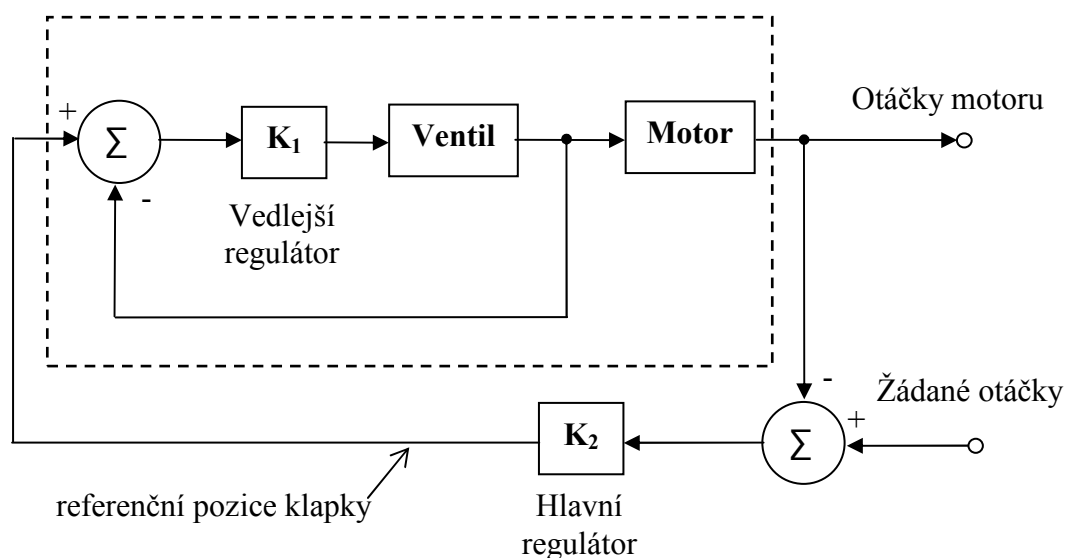
### 4.2 Kaskádní řízení

Kaskádní řízení se s výhodou používá u rozvětvených regulačních obvodů. V praxi často nastává situace, kdy je nutno řídit nejprve vedlejší systém působící jako akční člen hlavního systému a pak teprve hlavní systém.

Řízení otáček motoru je právě takový případ. Musíme nejprve řídit akční člen (pozici vzduchového ventilu) a posléze hlavní systém (otáčky motoru). Kaskádní řídicí systém pro motor je zobrazen na obrázku (Obrázek 4-1). Skládá se z vnitřního okruhu (vedlejšího regulátoru), který řídí pozici klapky. Vnější okruh (hlavní regulátor) řídí otáčky

motoru. Vnější okruh je nazýván nadřazeným řídicím okruhem, protože poskytuje hodnotu referenční pozice klapky, které se musí vnitřní (vedlejší) okruh podřídít. [3]

Více informací o kaskádním řízení a jeho nastavení lze nalézt např. zde [11].

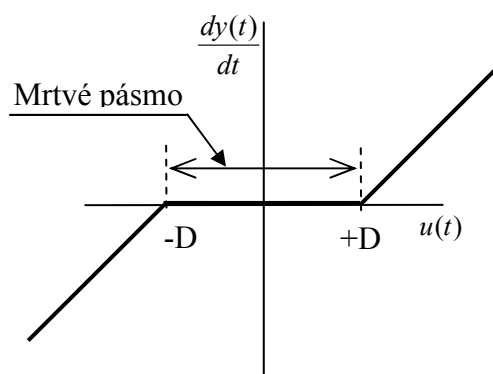


Obrázek 4-1 - Schéma kaskádního řízení motoru

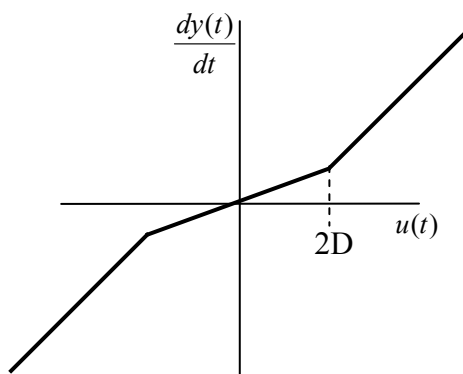
### 4.3 Mrtvé pásmo a jeho kompenzace

Nelineární charakteristika s mrtvým pásmem je typická pro mnoho akčních členů řídicích systémů (Obrázek 4-2). Prakticky všechny ventily se takto chovají z důvodu vnitřního tření. Proto ventil vyžaduje určitou výši počátečního napětí k uvedení do pohybu.

Pokud mrtvé pásmo není příliš velké lze jej kompenzovat přidáním periodického signálu ke vstupnímu signálu do ventilu (na vstup do akčního členu). Amplituda by měla nabývat přibližně hodnoty  $D$  a frekvence větší než je frekvenční pásmo systému. Tímto se docílí žádaného výsledku viz Obrázek 4-3. [2]



Obrázek 4-2 - Mrtvé pásmo



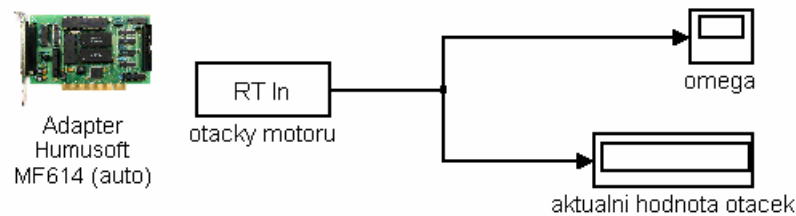
Obrázek 4-3 - Odstranění mrtvého pásma

## 5 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ NA MODELU

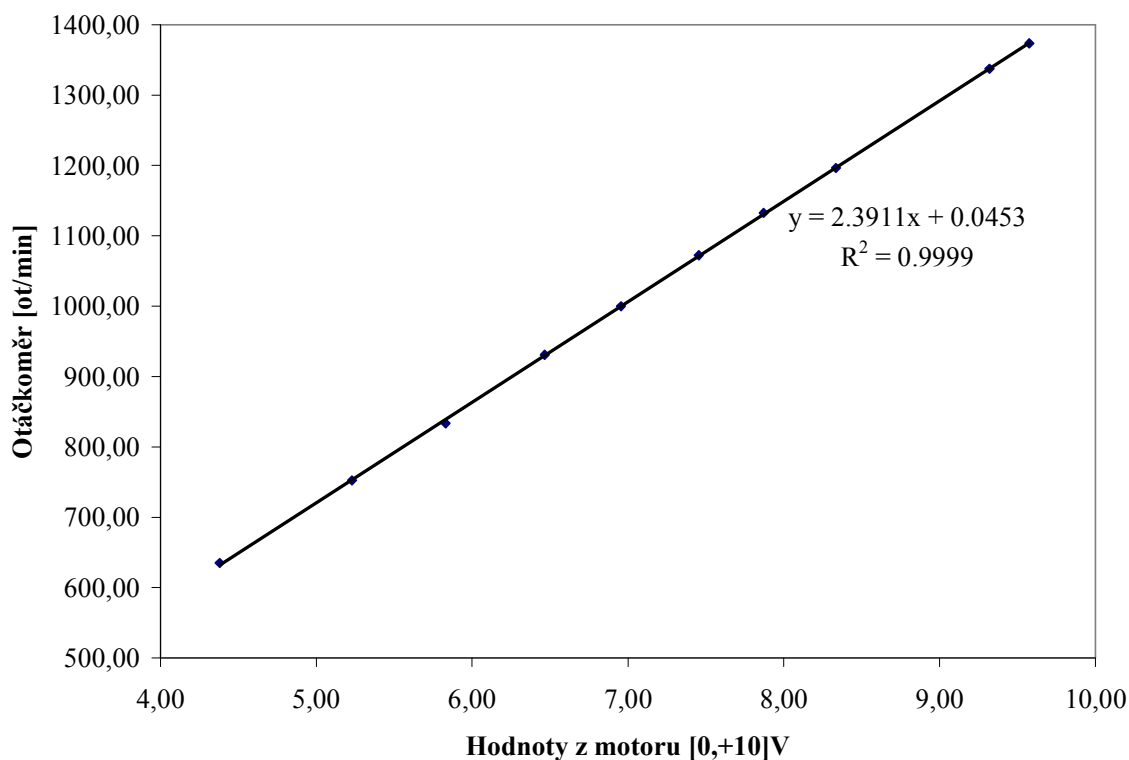
Ke zjištění parametrů motoru (časové konstanty, zesílení, atd.) a jejich správného nastavení v modelu jsem provedl mnoho různých experimentů a měření.

### 5.1 Kalibrace otáček

Pro měření bylo použito simulinkového schématu uvedeného níže (Obrázek 5-1 **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**). Byly snímány otáčky motoru ze senzoru zabudovaného přímo v modelu a zároveň měřeny pomocí optického otáčkoměru od firmy COMPACT INSTRUMENTS LIMITED - typ CT7. Měření bylo prováděno jak při rostoucích tak klesajících otáčkách. Chyba optického otáčkoměru je výrobcem uváděna  $\pm 0.01\%$  a chyba hodnot získaných z pneumotoru je  $\pm 5.24\%$ . Graf naměřených hodnot je uveden na Obrázek 5-2.



Obrázek 5-1 – Schéma pro kalibraci otáček



Obrázek 5-2 - Kalibrace otáček pneomotoru

Výsledná kalibrační rovnice je ve tvaru:

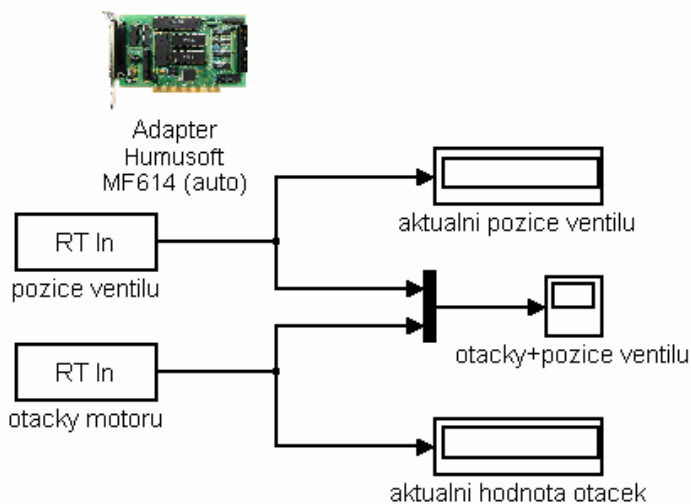
$$y = 2.3911x + 0.0453 \quad (5.1)$$

a poskytuje aktuální otáčky motoru [ot/min] v závislosti na výstupním napětí ze senzoru pneomotoru.

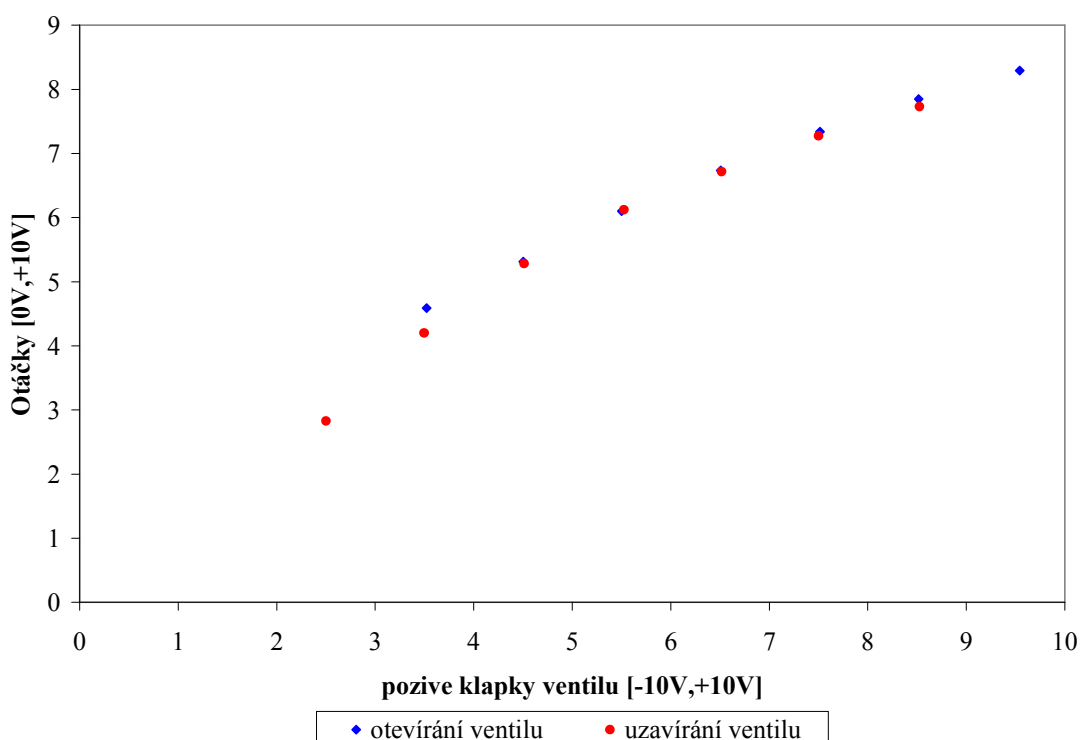
## 5.2 Měření statických charakteristik

Při měření statických charakteristik byly snímány dvě veličiny. První veličinou byla pozice ventilu (RT In THETA) a druhou velikost otáček motoru (RT In OMEGA), viz Obrázek 5-3. Otevírání i uzavírání ventilu probíhalo manuálně z důvodu mrtvého pásma ventilu. Vstupní tlak z rozvodné soustavy byl nastaven na šest barů (0.6MPa). V grafu (Obrázek 5-4) je vynesena závislost velikosti otáček pneomotoru na pozici ventilu – vše ve Voltech. V grafu (Obrázek 5-5) je pro názornější představu uvedena stejná charakteristika s přepočtem na velikost otevření ventilu v jednotkách procent a rychlost v otáčkách za minutu.

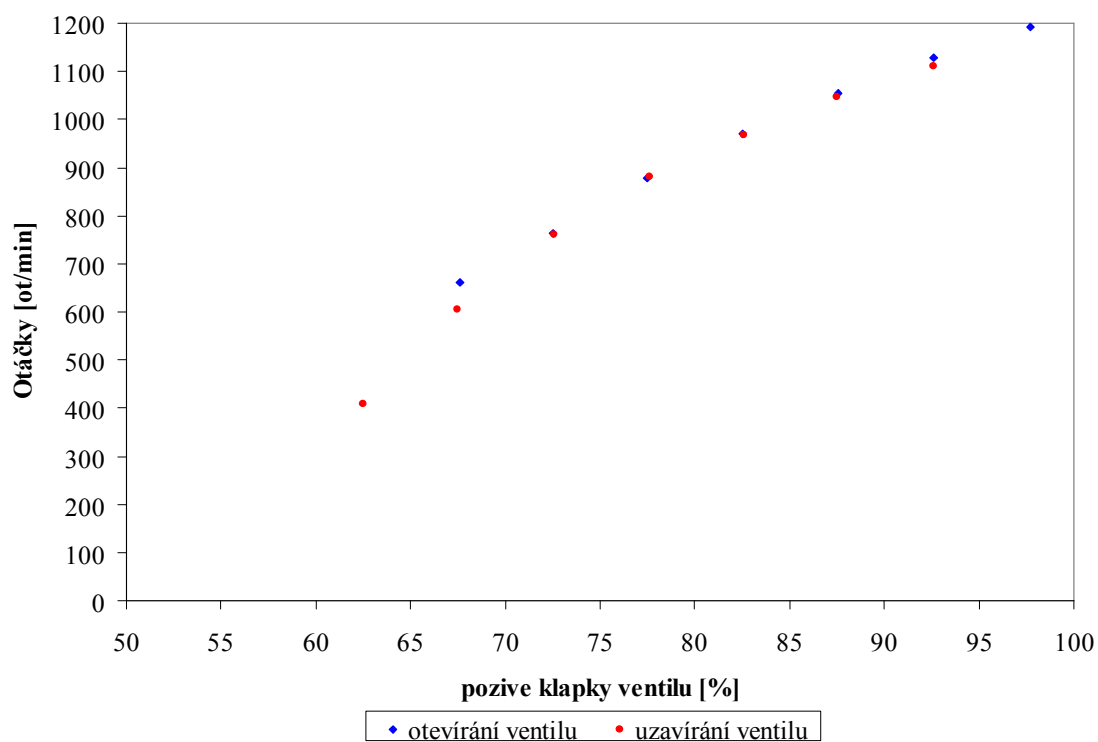
K rozběhu motoru je zapotřebí určitého minimálního otevření ventilu jak lze vidět z grafů (Obrázek 5-4, Obrázek 5-5). Je to dáno fyzikálními parametry motoru zejména klidovou třecí silou, kterou je nutno překonat. Vhodná oblast pro řízení ve výstupních hodnotách motoru je v rozmezí  $\langle 5V, 8V \rangle$  a pracovní oblast ventilu  $\langle 4V, 9V \rangle$ . Chyba měření je pro ventil v rozmezí  $\langle -0.5V, +0.5V \rangle$  a pro otáčky v rozmezí  $\langle -0.43V, +0.43V \rangle$ , resp.  $\pm 2.5\%$  a  $\pm 5.36\%$  ( $\pm 64.4$  ot/min ).



Obrázek 5-3- Schéma pro měření statické charakteristiky



Obrázek 5-4 – Statická charakteristika [V] - [V]



Obrázek 5-5 – Statická charakteristika [ot/min] - [%]

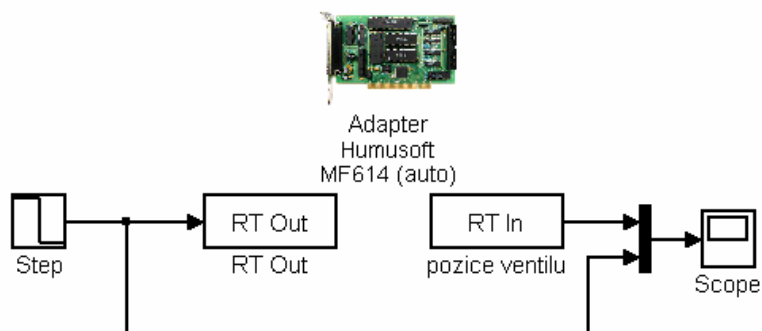
Pro další měření budu využívat horní poloviny otevření ventilu, tedy rozmezí <50%,100%>.

### 5.3 Měření, modelování a identifikace ventilu

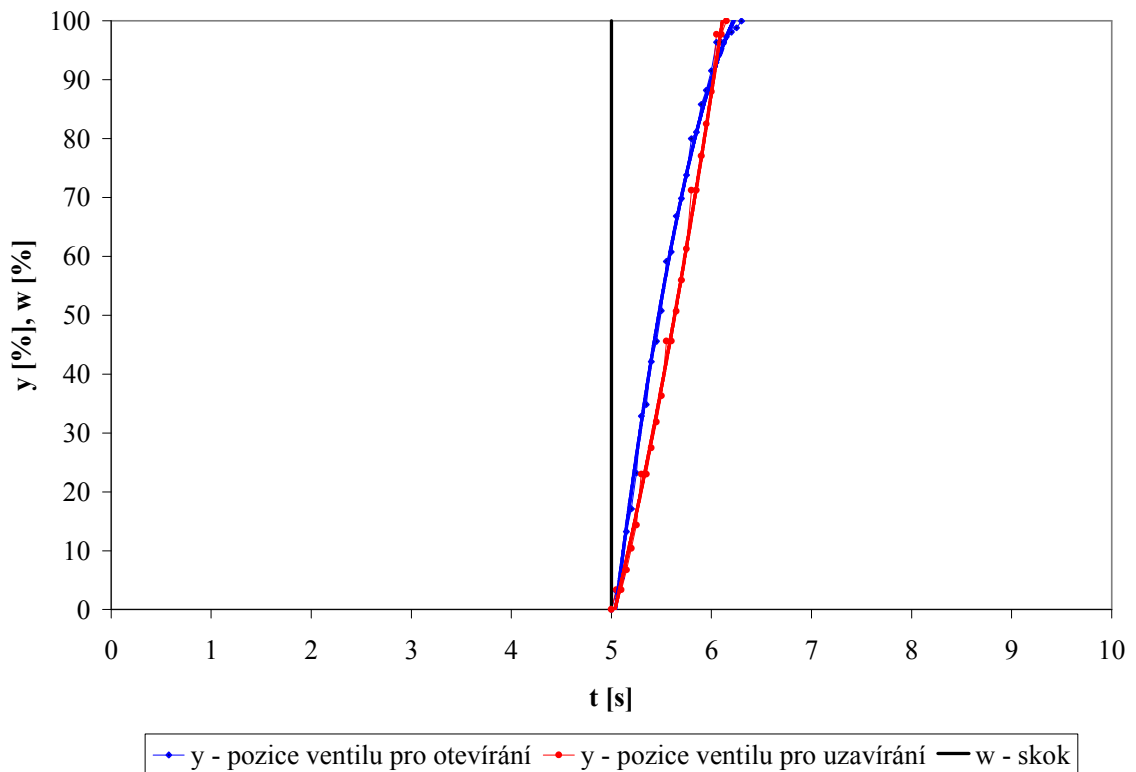
Nejprve jsem se zaměřil na subsystém ventilu. Musel jsem zjistit jeho chování a velikosti různých parametrů nezbytných pro správné nastavení modelu. Jelikož na ventilu jsou závislé výstupní otáčky motoru, byl tento úkol velmi důležitý.

#### 5.3.1 Dynamická charakteristika ventilu

Při měření dynamické charakteristiky ventilu byl přiveden na jeho vstup skokový signál a měřen čas za jak dlouho se ventil plně otevře. Zavřenému ventilu odpovídá signál  $<-10V>$  znamenající 0% otevření ventilu. Plně otevřenému ventilu na 100% odpovídá signál  $<+10V>$ . V grafu (Obrázek 5-7) je vynesena závislost procentuelního otevírání a uzavírání ventilu na čase. Pro porovnání byly zobrazeny obě charakteristiky do jednoho grafu s vynásobením charakteristiky pro uzavírání hodnotou  $<-1>$ . Takto můžeme oba průběhy graficky snáze porovnat. Chyba je přibližně u otevírání 4.6% a u zavírání 2%



Obrázek 5-6 – Schéma pro měření dynamické charakteristiky ventilu

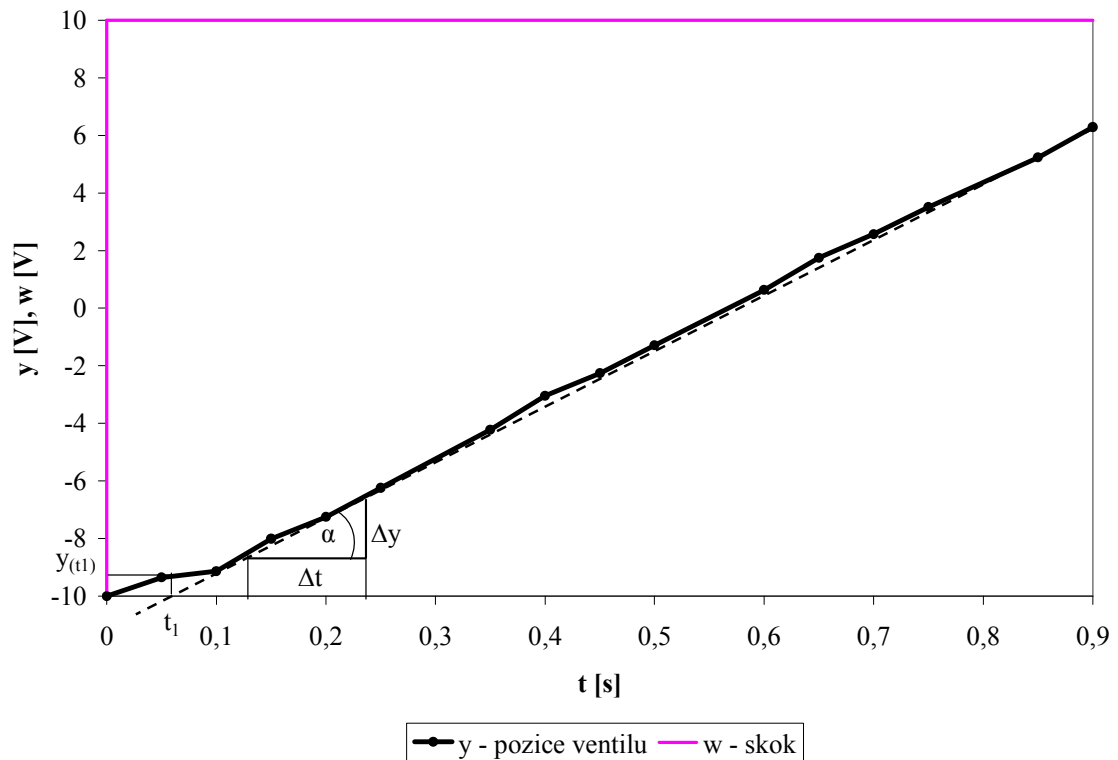


Obrázek 5-7 – Dynamická charakteristika ventilu

Rozdílné průběhy jsou dány různým odporem ventilu v obou směrech vůči motoru.

### 5.3.2 Identifikace ventilu

Bylo použito naměřených dat z dynamické charakteristiky ventilu, viz sekce 5.3.1. Výstupní hodnoty pro otevírání a uzavírání ventilu byly zprůměrovány z důvodu jednodušší identifikace. Výsledná charakteristika je zobrazena v grafu (Obrázek 5-8). Graf byl upraven tak, aby bylo možné sestavit asymptotu k přechodové charakteristice (PCH). Počátek grafu byl posunut na ose x do nuly a data oříznuta podle času na interval  $\langle 0, 0.9 \rangle$  sekund. K identifikování ventilu byla použita metoda pro aproximaci nekomitavých soustav s integračním členem popsaná v [8].



Obrázek 5-8 – Průměr přechodových charakteristik ventilu

Nekmitavou soustavu s integračním členem můžeme aproximovat přenosovou funkcí ve tvaru

$$G_{(s)} = \frac{K_v}{s(Ts + 1)^n} \quad (5.2)$$

Nejdříve je nutné sestavit asymptotu (Obrázek 5-8) a následně určit její směrnici podle vzorce.

$$K_v = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (5.3)$$

Následně odečteme z grafu přechodové charakteristiky souřadnici  $t_1$  a její pořadnici  $y(t_1)$ . Z takto získaných údajů vypočítáme hodnotu  $f(n)$  podle vztahu

$$f(n) = \frac{y(t_1)}{K_v t_1} \quad (5.4)$$

a z tabulky (Tabulka 5-1) určíme příslušný řád soustavy  $n$ .

Tabulka 5-1 - Hodnoty pro určení řádu soustavy

| <b>n</b>                        | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>6</b> |
|---------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $f(n) = \frac{y(t_1)}{K_v t_1}$ | 0.368    | 0.271    | 0.224    | 0.195    | 0.175    | 0.160    |

Na závěr vypočítáme časovou konstantu  $T$ .

$$T = \frac{t_1}{n} \quad (5.5)$$

Směrnice asymptoty je  $K_v = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{2.2}{0.115} = 19.13$ .

Hodnota souřadnice  $t_1 = 5.045 - 5 = 0.045\text{s}$  a její pořadnice  $y(t_1) = 10 - 9.42 = 0.58$

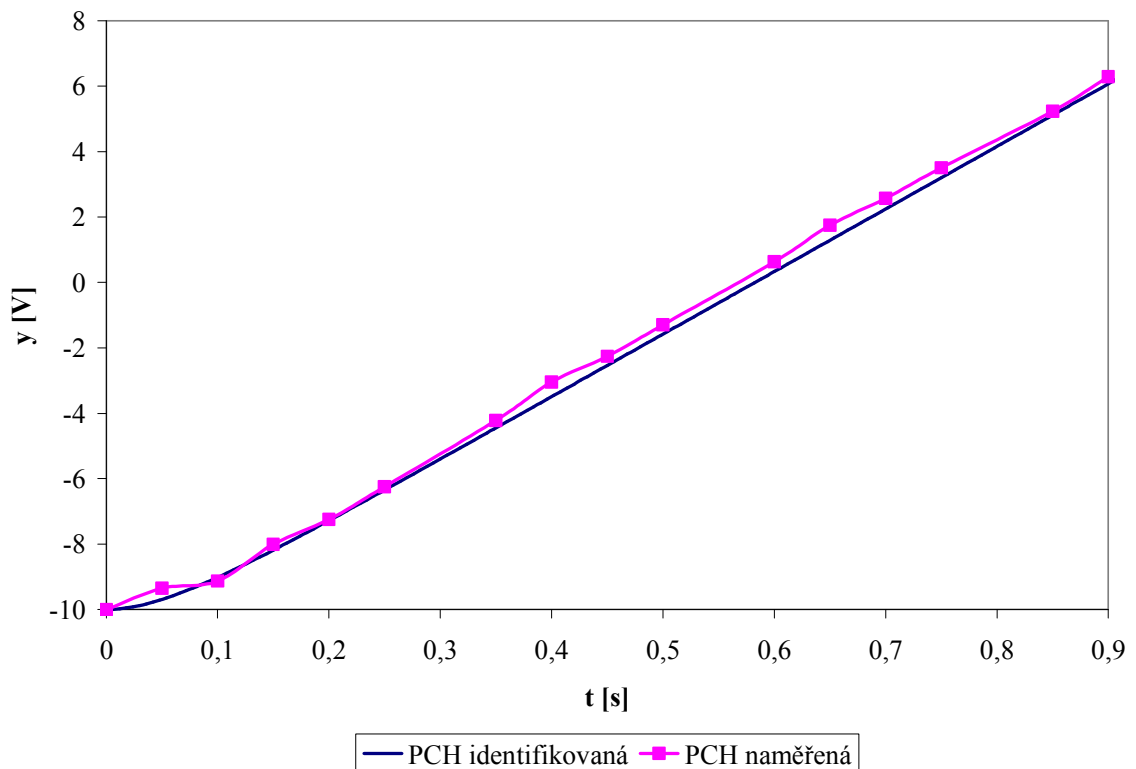
Dále,  $f(n) = \frac{y(t_1)}{K_v t_1} = \frac{0.58}{19.13 * 0.045} = 0.674$  tzn.  $n = 1$  a tedy 1. řád soustavy.

Časová konstanta je  $T = \frac{t_1}{n} = \frac{0.045}{1} = 0.045$ .

**Výsledný přenos je**

$$G_{\text{ventil}}(s) = \frac{19.13}{s(0.045s + 1)}$$

Porovnání naměřené a vypočítané přechodové charakteristiky je znázorněno v grafu (Obrázek 5-9). Jak lze vidět průběh obou charakteristik je velmi podobný.



Obrázek 5-9 – Porovnání naměřené a identifikované PCH ventilu

### 5.3.3 Matematický model ventilu a jeho parametry

Budeme pro zjednodušení považovat ventil za lineární. Matematické vyjádření funkce ventilu viz rovnice 2.1. Z přechodové charakteristiky známe zesílení ventilu  $g_m=19.13[V/s]$ . Musíme však toto zesílení přepočítat na hodnotu odpovídající jedné časové jednotce (periodě) použité při měření na reálném motoru. Tato perioda je  $T=0.05[s]$ . Napětí servo-motoru je  $u_{sm}=\pm 22[V]$  a je ovládán signálem  $u=\pm 10[V]$ . Hodnota zesílení ventilu použita v modelu je

$$g_m[V/T] = g_m[V/s] * T[s] * \frac{u_{sm}[V]}{u[V]} = 19.13 * 0.05 * \frac{22}{10} = 0.9596 * 2.2 = \underline{2.1043}$$

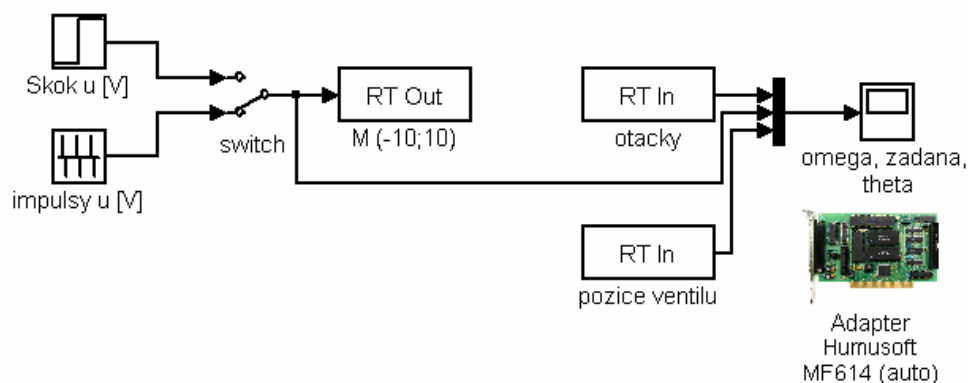
a rovnice matematického modelu pro ventil

$$\frac{dx}{dt} = g_m * u \quad (5.6)$$

## 5.4 Měření, modelování a identifikace otáček motoru

### 5.4.1 Měření statické charakteristiky motoru - přírůstky

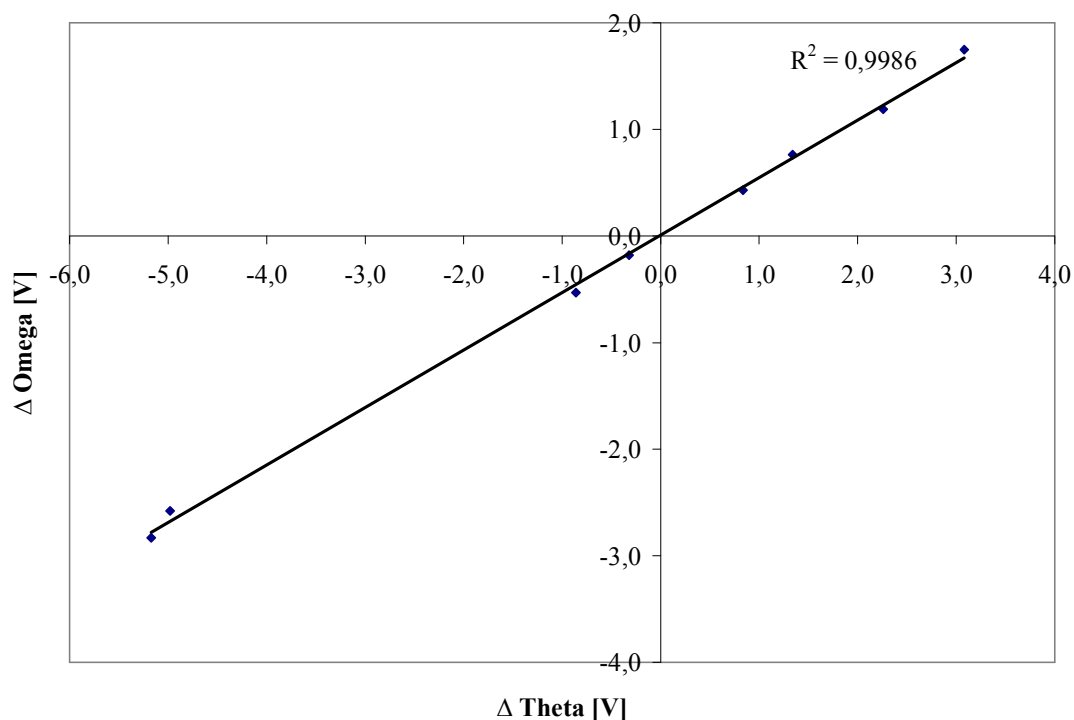
Při měření statické charakteristiky motoru byly jako vstupní signál použity impulsy o amplitudě  $<7V>$ . a šířce  $<0.1s, 0.2s, 0.3s, 0.4s>$ . Nejdříve byl motor roztočen otočením ventilu a pak byly do motoru pouštěny vstupní signály. Velikost akčního zásahu resp. amplitudy byla zvolena s ohledem na překonání pásma necitlivosti. Pro měření bylo použito schéma na Obrázek 5-10. Průměrná chyba je přibližně u otevírání 4.3% a u zavírání 2.1%. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce níže (Tabulka 5-2).



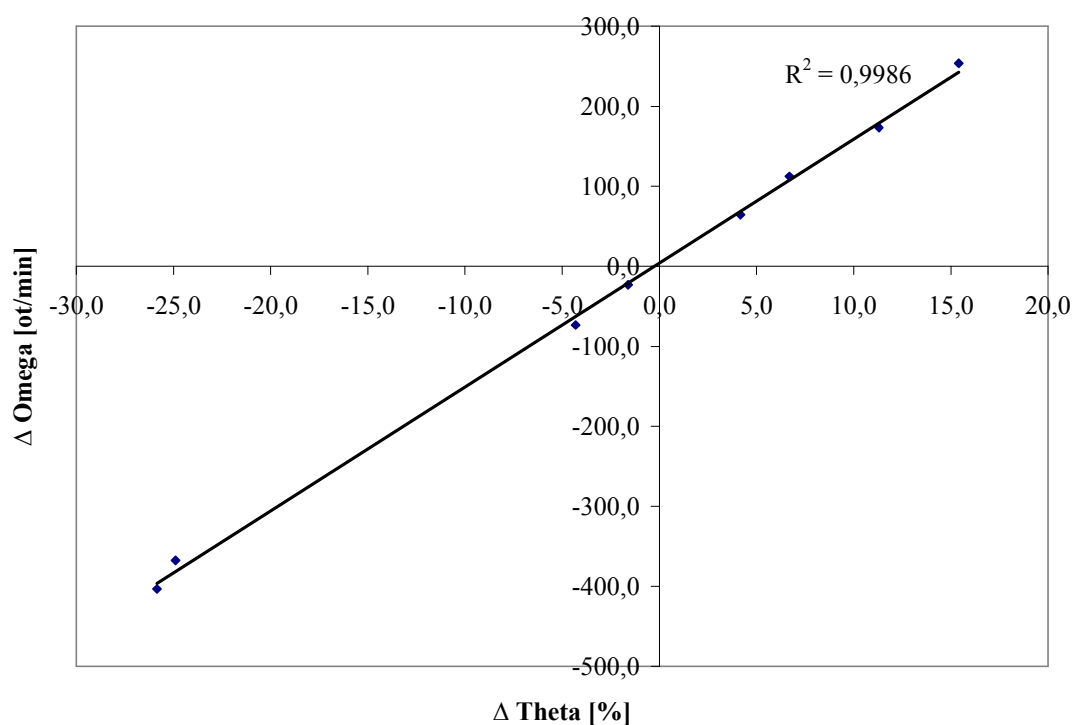
Obrázek 5-10 - Schéma pro měření statické charakteristiky motoru

Tabulka 5-2 - Hodnoty změny ventilu a změny otáček

| impuls | skok | $\Delta$ omega | $\Delta$ omega | $\Delta$ theta | $\Delta$ theta |
|--------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| s      | V    | V              | ot/min         | V              | %              |
| 0.1    | +7   | 0,430          | 64,408         | 0,835          | 4,175          |
| 0.2    | +7   | 0,764          | 112,326        | 1,340          | 6,7            |
| 0.3    | +7   | 1,190          | 173,443        | 2,260          | 11,3           |
| 0.4    | +7   | 1,750          | 253,784        | 3,082          | 15,41          |
| 0.1    | -7   | -0,180         | -23,106        | -0,320         | -1,6           |
| 0.2    | -7   | -0,530         | -73,319        | -0,860         | -4,3           |
| 0.3    | -7   | -2,580         | -367,424       | -4,980         | -24,9          |
| 0.4    | -7   | -2,830         | -403,291       | -5,170         | -25,85         |



Obrázek 5-11 – Změna otáček [V] v závislosti na změně pozice klapky ventilu [V]

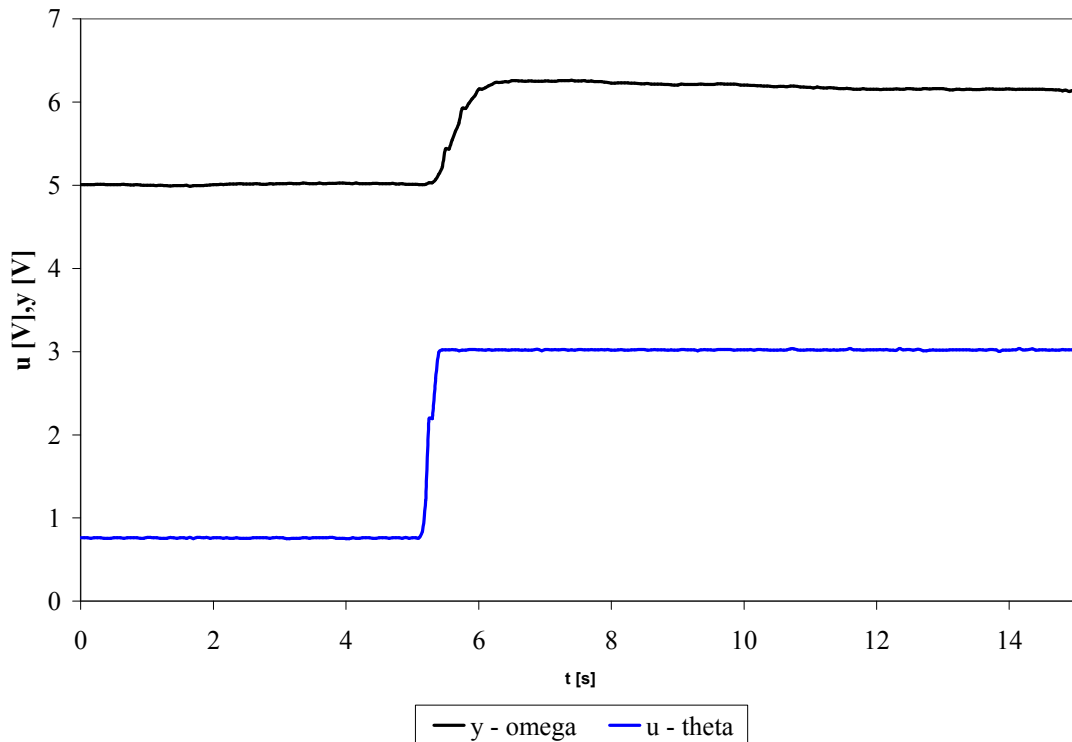


Obrázek 5-12 – Změna otáček [ot/min] v závislosti na změně pozice klapky ventilu [%]

Z průběhu charakteristik lze usoudit lineární závislost mezi změnou rychlosti otáčení motoru a změnou pozice klapky ventilu.

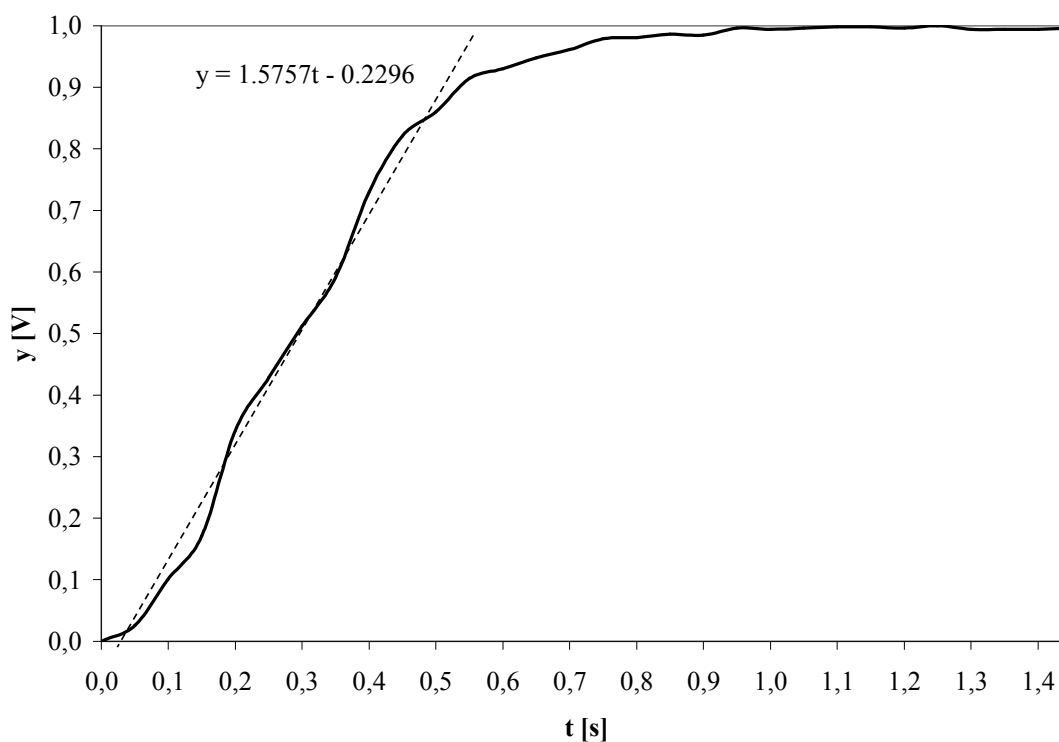
### 5.4.2 Identifikace otáček motoru

Ze statické charakteristiky motoru (Obrázek 5-11) vidíme, že závislost je lineární. Můžeme tedy provést identifikaci z jednoho skoku a impulsu. Byl zvolen impuls o šířce 0.3s a velikosti skoku 7V. Průběh je zobrazen na Obrázek 5-13. Ke zjištění přenosu soustavy jsem zvolil Strejcovu metodu identifikace popsanou např. v [8].



Obrázek 5-13 – Přechodová charakteristika soustavy

Postup identifikace je následující. Nejdříve bylo provedeno normování přechodové charakteristiky tak, aby osa  $y$  byla v rozmezí hodnot  $\langle 0,1 \rangle$ . Následně byl vypočítán inflexní bod a sestrojena k němu tečna.



Obrázek 5-14 - Normovaná PCH motoru

Byla vypočítána hodnota  $\tau$  pomocí rovnic níže k určení dalšího směru výpočtu.

$$y = ax + b \quad (5.7)$$

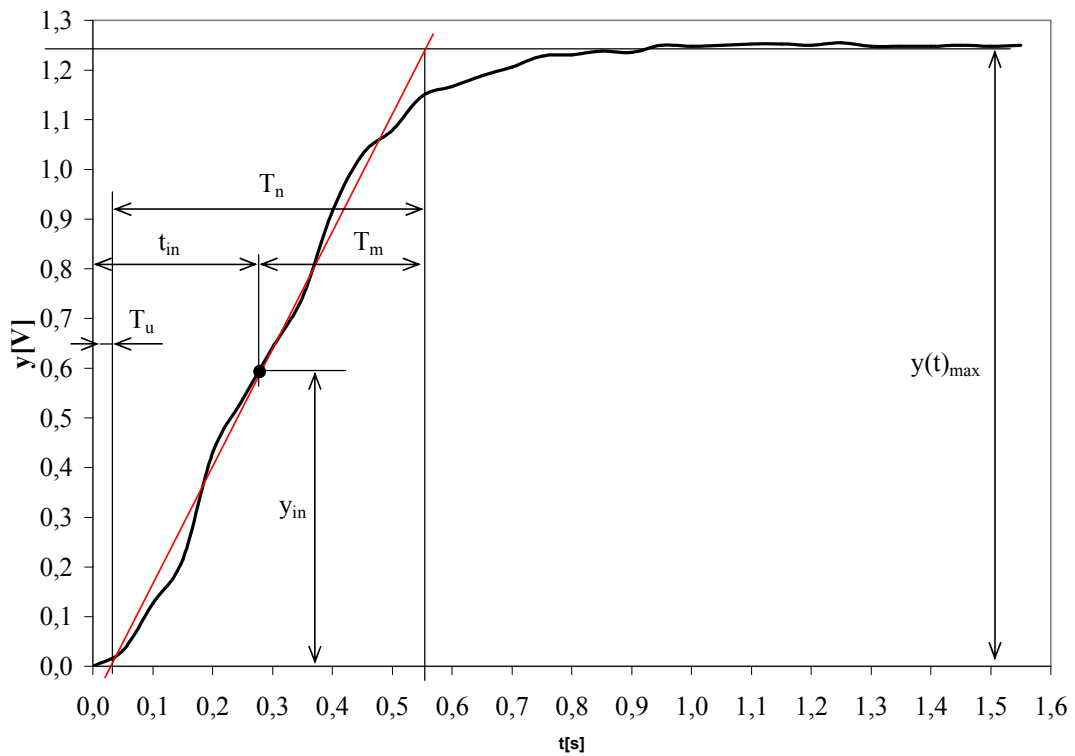
$$T_u = \frac{a}{b} \quad (5.8)$$

$$T_n = \frac{1}{b} \quad (5.9)$$

$$\tau = \frac{T_u}{T_n} \quad (5.10)$$

Hodnota  $\tau = 0.2663 > 0.14$  tzn., že soustava bude  $n$ -tého řádu se stejnými časovými konstantami.

Pro výpočet přenosové funkce použijeme originální graf (Obrázek 5-15) posunutý do nuly se zachováním velikosti  $y$  kvůli odečtu správných parametrů.



Obrázek 5-15 - Graf pro odečet parametrů Strejcovy metody

Odečtené hodnoty z grafu:

$$y(t)_{\max} = 1.25 \qquad t_{in} = 0.245 \qquad y_{in} = 0.58$$

$$T_n = 0.54 \qquad T_u = 0.04 \qquad T_m = 0.295$$

Vypočítané hodnoty:

$$\frac{T_u}{T_n} = 0.08 \Rightarrow \text{podle tabulky (Tabulka 5-3) jsem zvolil řád soustavy } n=2.$$

Tabulka 5-3 - Hodnoty pro vyhodnocování soustav  $n$ -tého řádu

| $n$ | $\frac{T_u}{T_n}$ | $\frac{y_{in}}{y_{\infty}}$ | $\frac{T_m}{T_n}$ | $\frac{T_n}{T}$ | $\frac{T_u}{T}$ | $\frac{t_{in}}{T}$ | $\frac{T_m}{T}$ |
|-----|-------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| 1   | 0                 | 0                           | 1                 | 1               | 0               | 0                  | 1               |
| 2   | 0.104             | 0.264                       | 0.736             | 2.178           | 0.282           | 1                  | 2               |

Hodnoty z tabulky (Tabulka 5-3):

$$\frac{T_n}{T} = 2.178 \Rightarrow T = 0.248$$

$$\frac{T_u}{T} = 0.282 \Rightarrow T = 0.142$$

$$\frac{t_{in}}{T} = 1 \Rightarrow T = 0.245$$

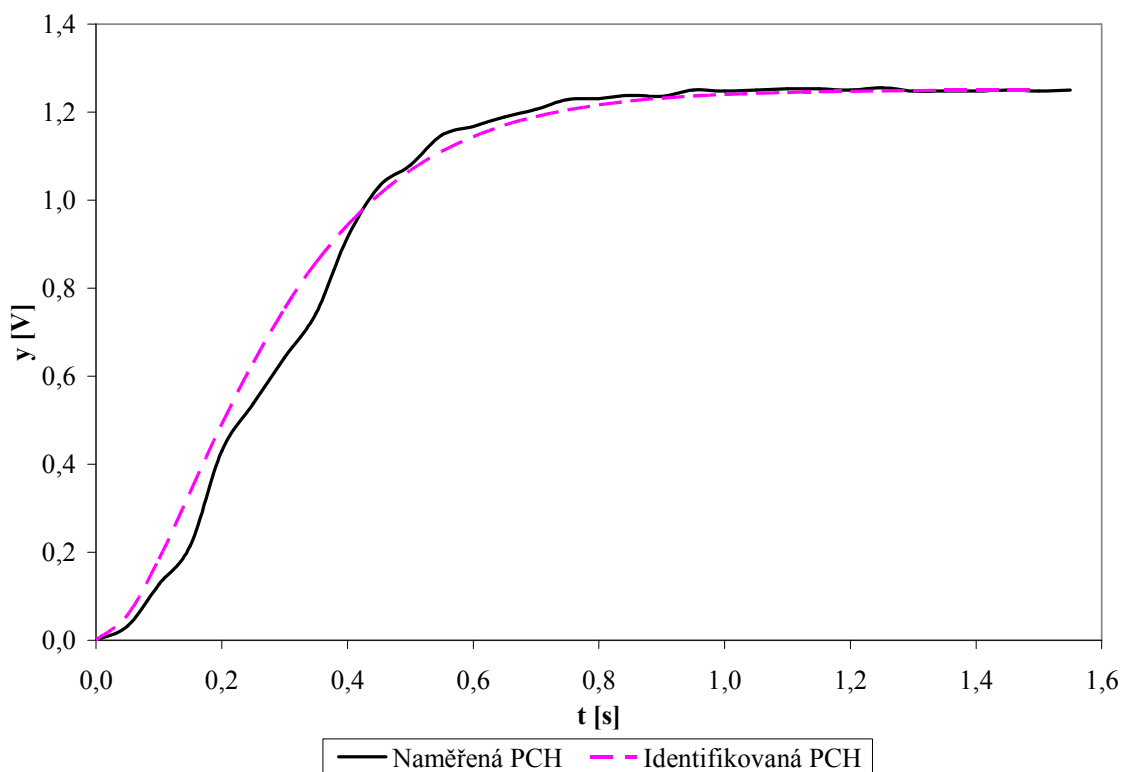
$$\frac{T_m}{T} = 2 \Rightarrow T = 0.147$$

Byla zvolena časová konstanta  $T=0.147s$ . Výsledná diferenciální rovnice popisující závislost změny rychlosti otáčení motoru  $y[V]$  na velikosti vstupního signálu servo-motoru  $u[V]$  je  $0.022y''(t) + 0.294y'(t) + y(t) = 1.25u(t)$ .

**Výsledný přenos je:**

$$G_{motor}(s) = \frac{1.25}{0.022s^2 + 0.294s + 1}$$

Porovnání naměřené a vypočítané přechodové charakteristiky je znázorněno v grafu (Obrázek 5-9). Jak lze vidět průběh obou charakteristik je podobný.



Obrázek 5-16 - Porovnání naměřené a identifikované PCH motoru

### 5.4.3 Matematický model motoru a jeho parametry

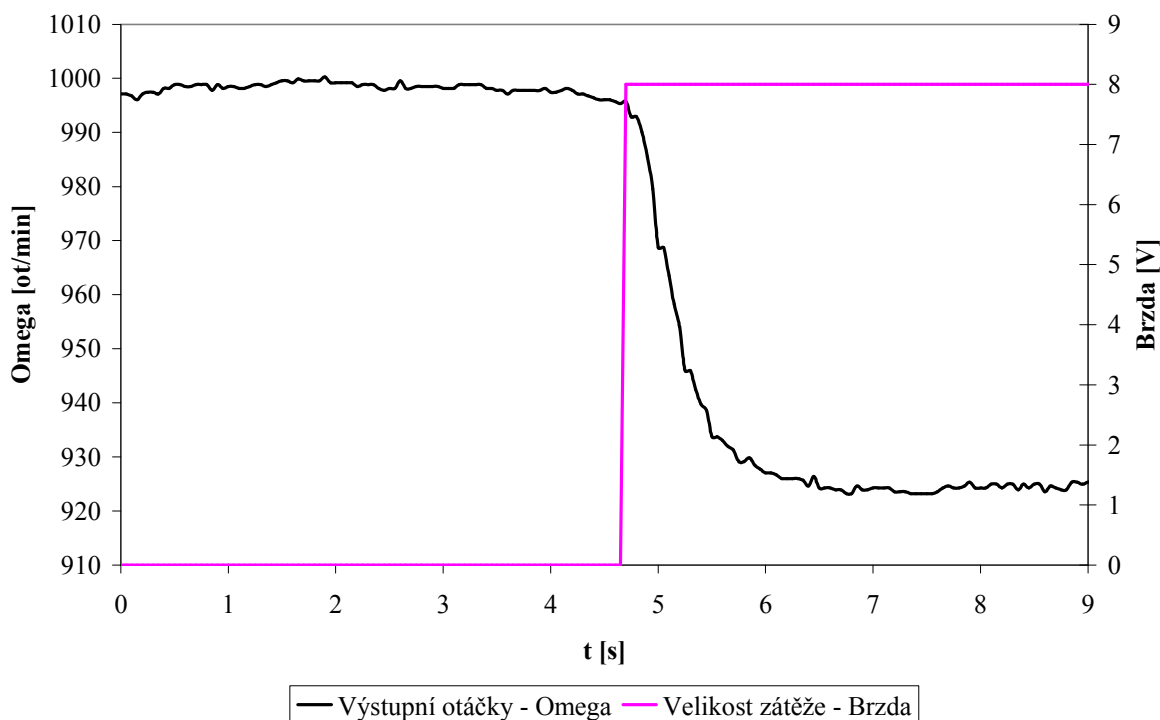
Změnu velikosti otáček motoru  $\omega$  budeme předpokládat lineární. Vycházím z přímé úměrnosti závislosti otáček na otevření ventilu  $\theta$  (Obrázek 5-11) a přívodnímu tlaku  $P_v$ , resp. přímé úměrnosti mezi točivým momentem  $\tau_e$  a tlakem  $P_o$  na výstupu ventilu (rovnice (2.2) a (2.3)). Matematická model motoru (rovnice výstupních otáček) je po úpravě rovnice (2.5) ve tvaru

$$\frac{d\omega}{dt} = (ge * x * P_o - b * \omega - g_1 * d_1) / I \quad (5.11)$$

$$P_o = P_v * t_z \quad (5.12)$$

Jednotlivé veličiny znamenají následující:  $ge$  je zesílení motoru s klikovou hřídelí,  $x$  je pozice ventilu (též značeno  $\theta$ ),  $b$  je koeficient tření motoru,  $\omega$  jsou otáčky,  $g_1$  je zesílení brzdy,  $d_1$  je řídicí napětí brzdy a  $I$  je setrvačnost setrvačnicku,  $t_z$  je koeficient ztráty tlaku ventilu.

Velikost zesílení  $g_e=2.3911[\text{ot}/\text{min}\cdot\text{V}]$  podle statické charakteristiky. Koeficient ztráty tlaku ventilu  $t_z=0.8[\text{bar}/\text{bar}]$  určen podle poměru tlaku před a za ventilem. Koeficient tření  $b=0.07[-]$  je konstanta odhadnutá pomocí fyzikálních tabulek pro součinitel smykového tření dvou kovů s vrstvou oleje mezi nimi. Napětí brzdy simulující účinek zatížení motoru  $d_l$  je v rozsahu  $\langle 0,10\text{V} \rangle$  a její zesílení je určeno z přechodové charakteristiky brzdy (Obrázek 5-17) jako  $g_l=2.948[\text{ot}/\text{T}\cdot\text{V}]$ .



Obrázek 5-17 – Přechodová charakteristika zátěže - brzdy

Výpočet zesílení brzdy

$$g_1 = \frac{\Delta y[\text{ot} / \text{min}]}{\Delta u[\text{V}]} = \frac{996.406 - 925.649}{8} = 8.845[\text{ot} / \text{min} \cdot \text{V}] = \underline{2.948}[\text{ot} / \text{T} \cdot \text{V}]$$

Setrvačnost setrvačnicku  $I$  reprezentuje časovou konstantu systému. Byla určena experimentálně  $I=0.01\text{s}$ .

## 6 NÁVRH SYSTÉMU ŘÍZENÍ

K řízení pneumatického motoru bylo využito kaskádní regulace. Systém řízení obsahuje dva podsystémy - pozice ventilu a otáčky motoru. Potřebujeme dva regulátory – jeden pro řízení ventilu a druhý pro řízení otáček motoru. Nejprve jsem navrhl regulátor pro ventil (vedlejší - podřízený regulátor). Jelikož chování ventilu má integrační charakter bude postačovat pouze proporcionální regulátor. Pak následuje návrh regulátoru pro otáčky motoru (hlavní regulátor). Žádanou veličinou celého regulačního obvodu bude rychlost otáčení motoru v jednotkách [ot/min]. Výstup hlavního regulátoru bude žádanou pozicí ventilu a tedy vstupem do vedlejšího regulátoru.

### 6.1 Návrh regulátorů

#### 6.1.1 Návrh regulátoru pro řízení ventilu

Pro návrh regulátoru jsem zvolil metodu nastavení z přechodové charakteristiky popsanou v knize od pana prof. Balátě [5]. Z důvodu chování ventilu jako integrační soustavy jsem zvolil pouze proporcionální regulátor.

Přenos ventilu je:

$$G_{\text{ventil}}(s) = \frac{19.13}{0.045s^2 + 1}$$

a odečtené parametry z přechodové charakteristiky jsou

$$T_u = t_I = 0,045 \quad T_n = 1 \quad K_V = 19.13 \quad \gamma = \frac{1}{0.045} = 22.222$$

Z tabulky (Tabulka 6-1) vypočítáme příslušné parametry regulátoru.

#### Výsledný regulátor

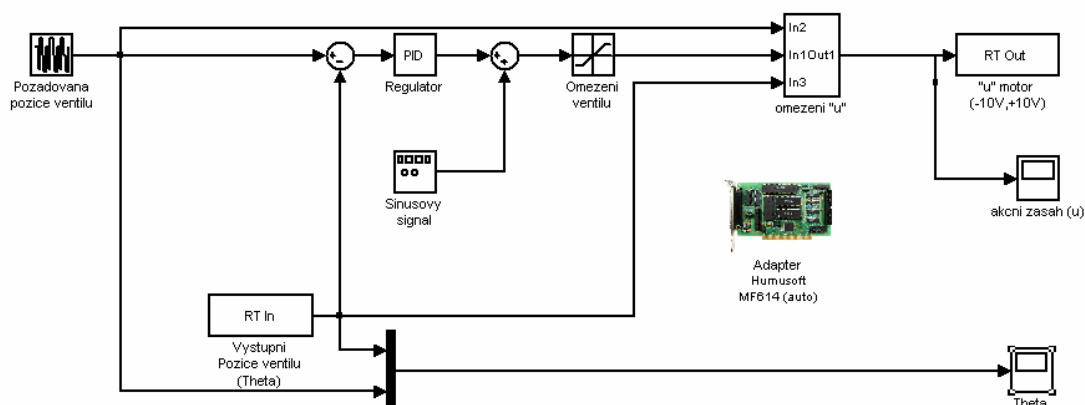
$$G_{R_{\text{ventil}}}(s) = k_p = 1.16$$

Tabulka 6-1 - Hodnoty parametrů regulátoru

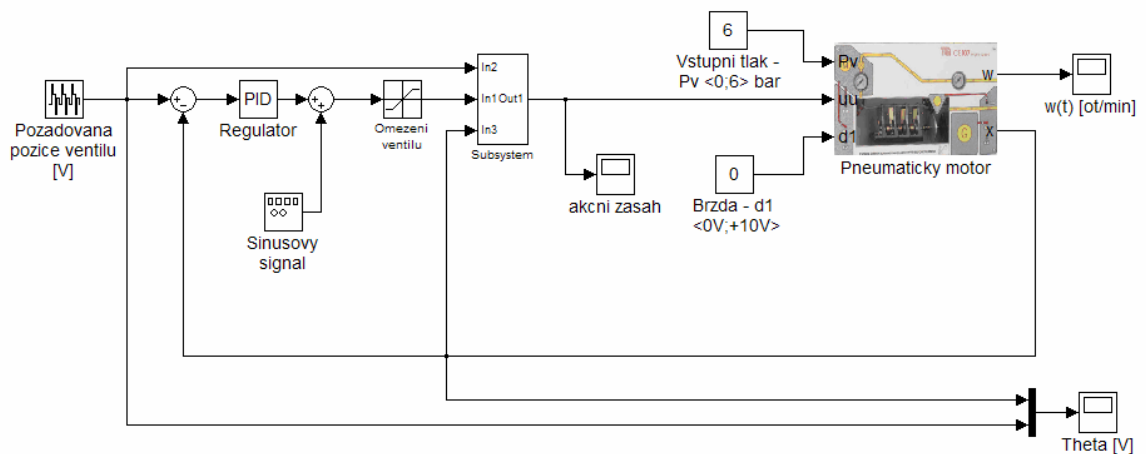
|            | $k_p$                    | $T_I$    | $T_D$     |
|------------|--------------------------|----------|-----------|
| <b>P</b>   | $\gamma \frac{1}{k}$     | -        | -         |
| <b>PI</b>  | $0,9\gamma \frac{1}{k}$  | $3,5T_u$ | -         |
| <b>PD</b>  | $1,2\gamma \frac{1}{k}$  | -        | $0,25T_u$ |
| <b>PID</b> | $1,25\gamma \frac{1}{k}$ | $2T_u$   | $0,5T_u$  |

### 6.1.2 Regulace ventilu

Regulační schéma pro řízení ventilu reálného motoru je na Obrázek 6-1 a pro model na Obrázek 6-2. Byly zvoleny stejné průběhy vstupní veličiny pro reálný motor i jeho model z důvodu porovnání. K výstupu z regulátoru se připočítává periodický signál o frekvenci 25Hz a amplitudě 4V. Je to z důvodu odstranění tzv. mrtvého pásma ventilu, viz kapitola 4.3.

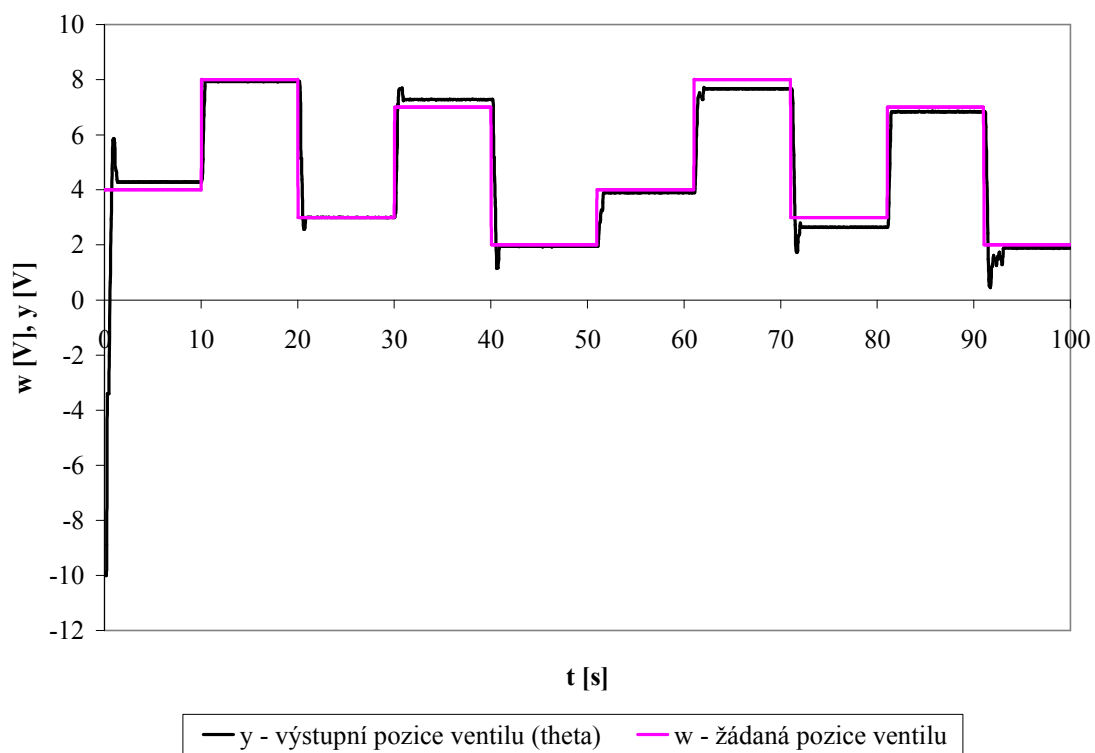


Obrázek 6-1 - Schéma pro regulaci ventilu – reálný motor

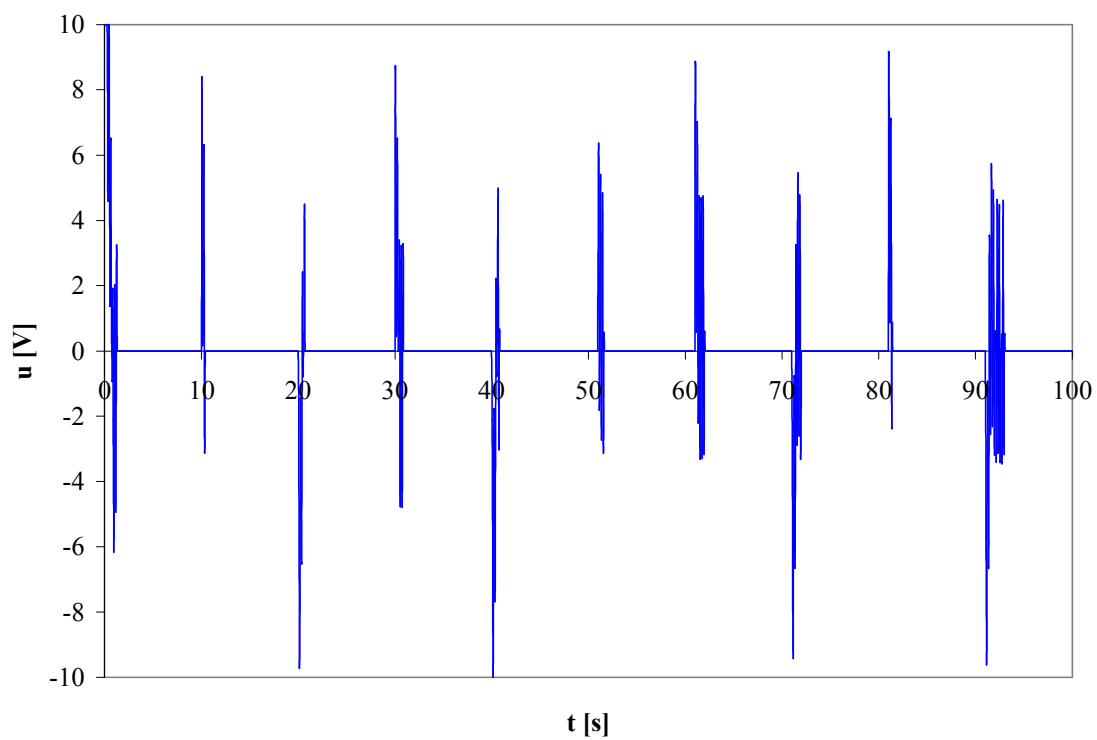


Obrázek 6-2- Schéma pro regulaci ventilu – model

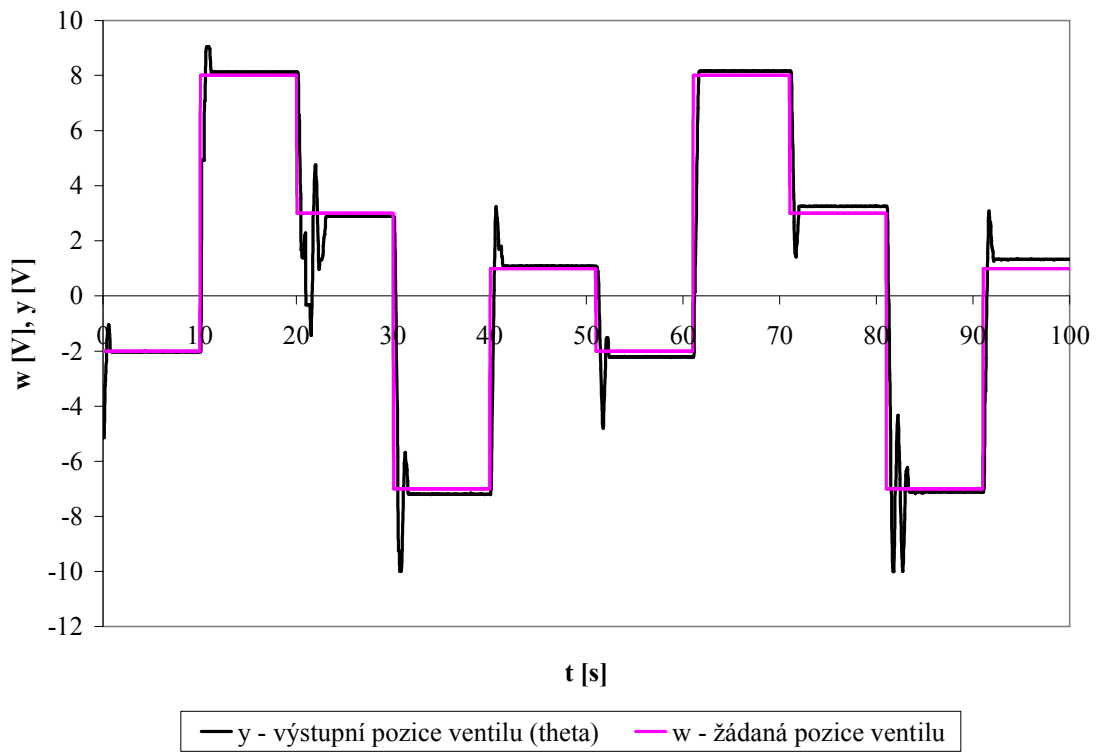
Blok **Omezení ventilu** slouží nastavení horního a spodního limitu velikosti akčního zásahu v rozsahu  $\langle -10V, +10V \rangle$  z důvodu fyzikálních parametrů elektromotoru ovládajícího klapku. Blok **Omezení “u”** je nastaven tak, aby při odchylce skutečné pozice ventilu od její požadované hodnoty do velikosti 0.4V byl akční zásah nulový. Je tím omezeno kmitání ventilu a tak prodloužena jeho životnost.



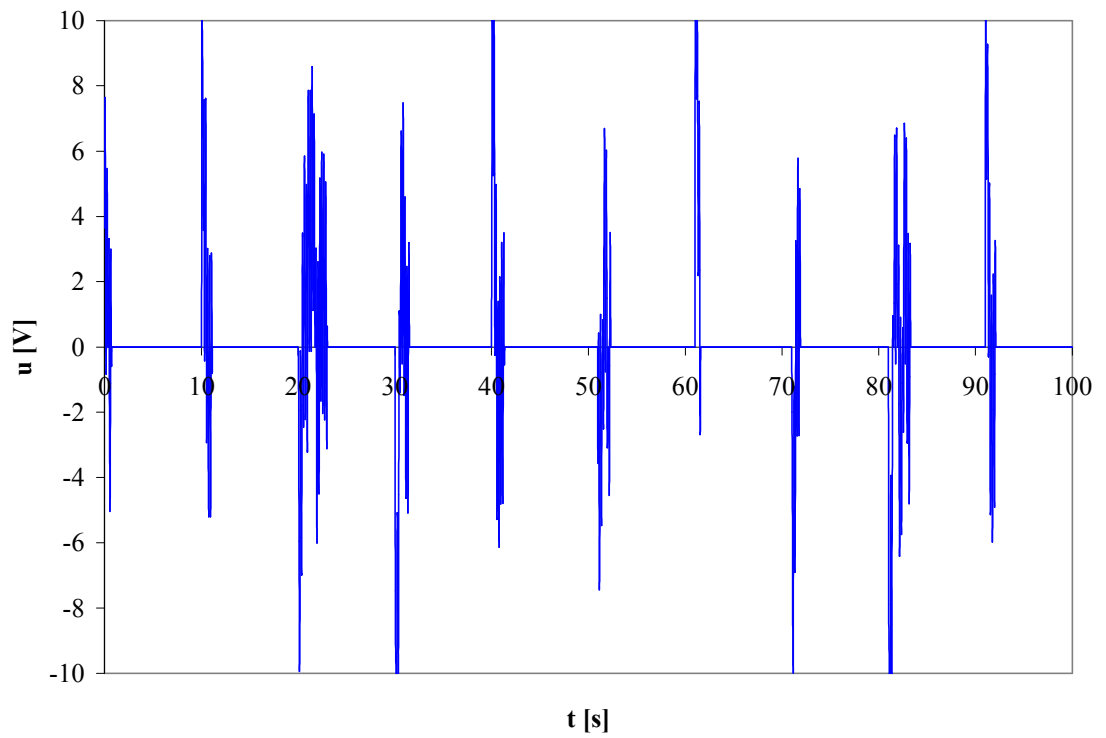
Obrázek 6-3 - Průběh řízení ventilu – reálný motor (1)



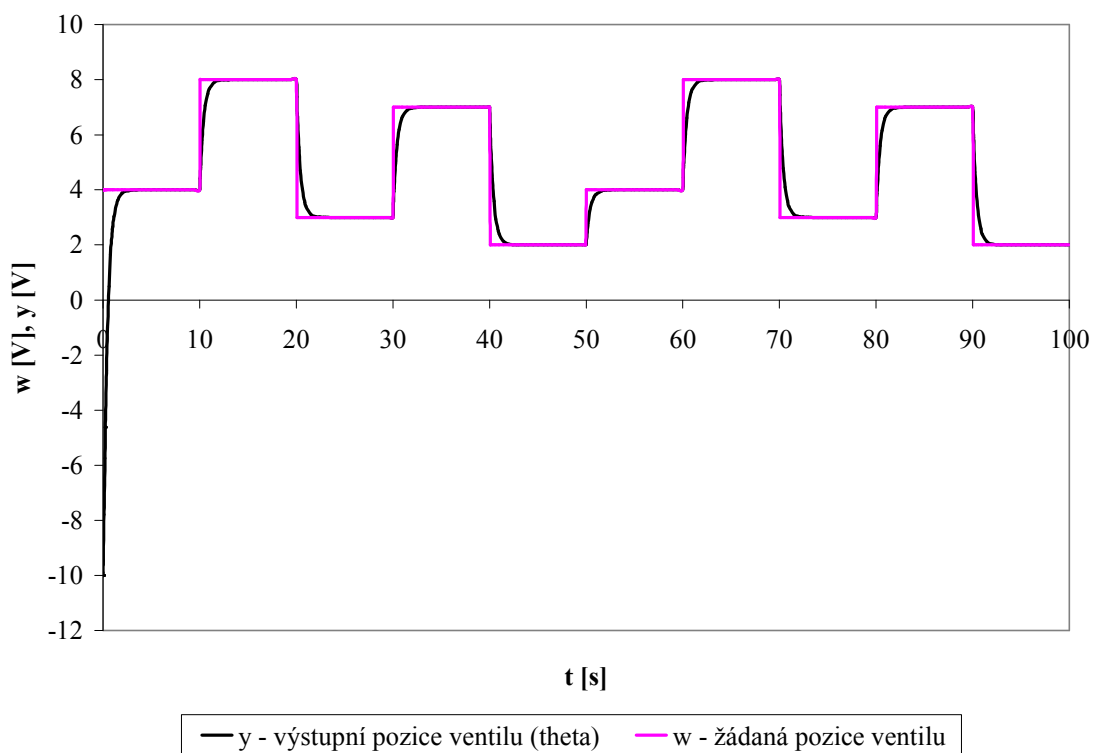
Obrázek 6-4 – Akční zásah regulátoru – reálný motor (1)



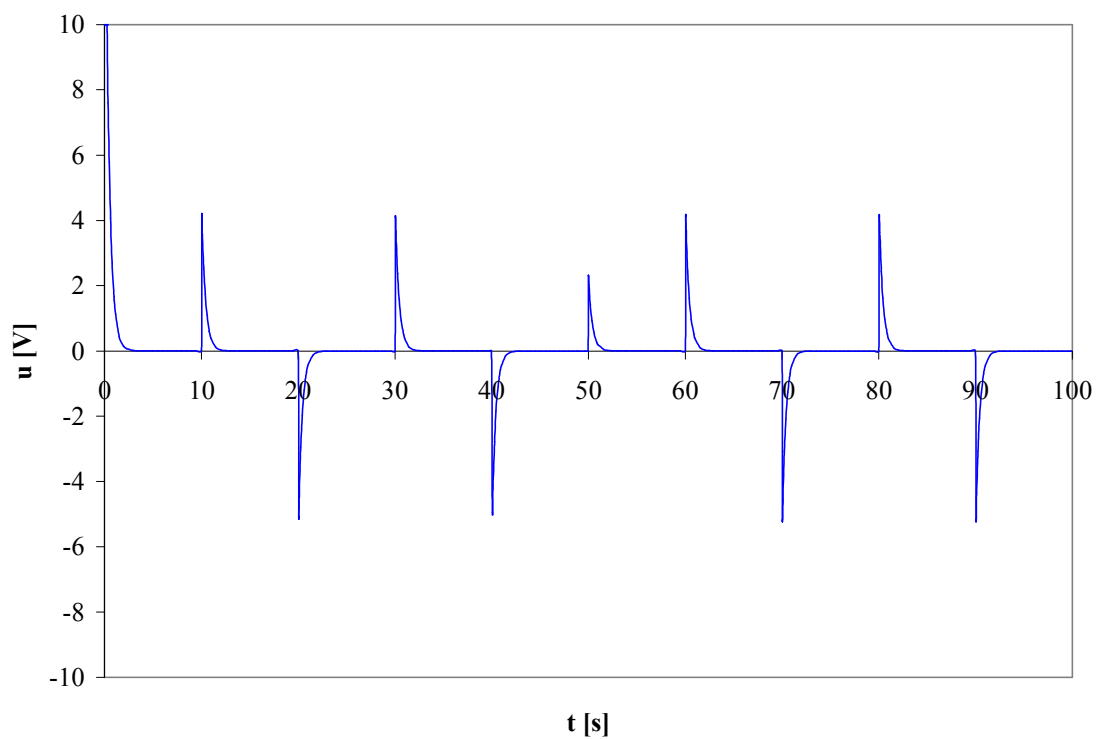
Obrázek 6-5 - Průběh řízení ventilu – reálný motor (2)



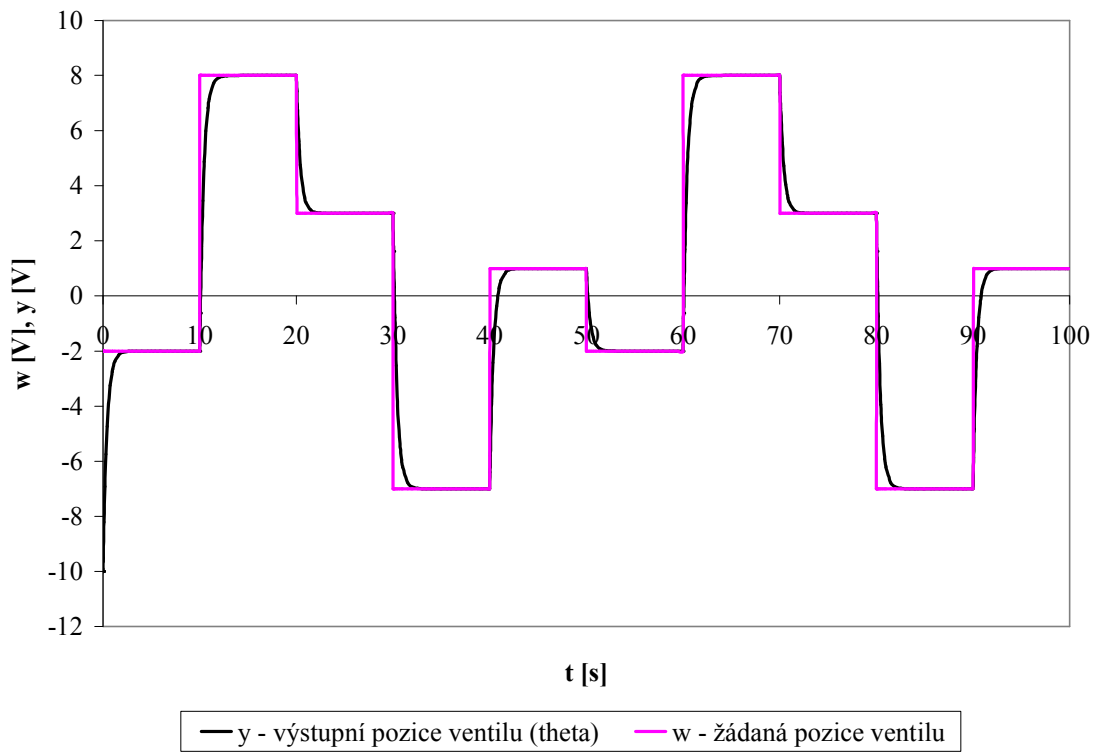
Obrázek 6-6 - Akční zásah regulátoru – reálný motor (2)



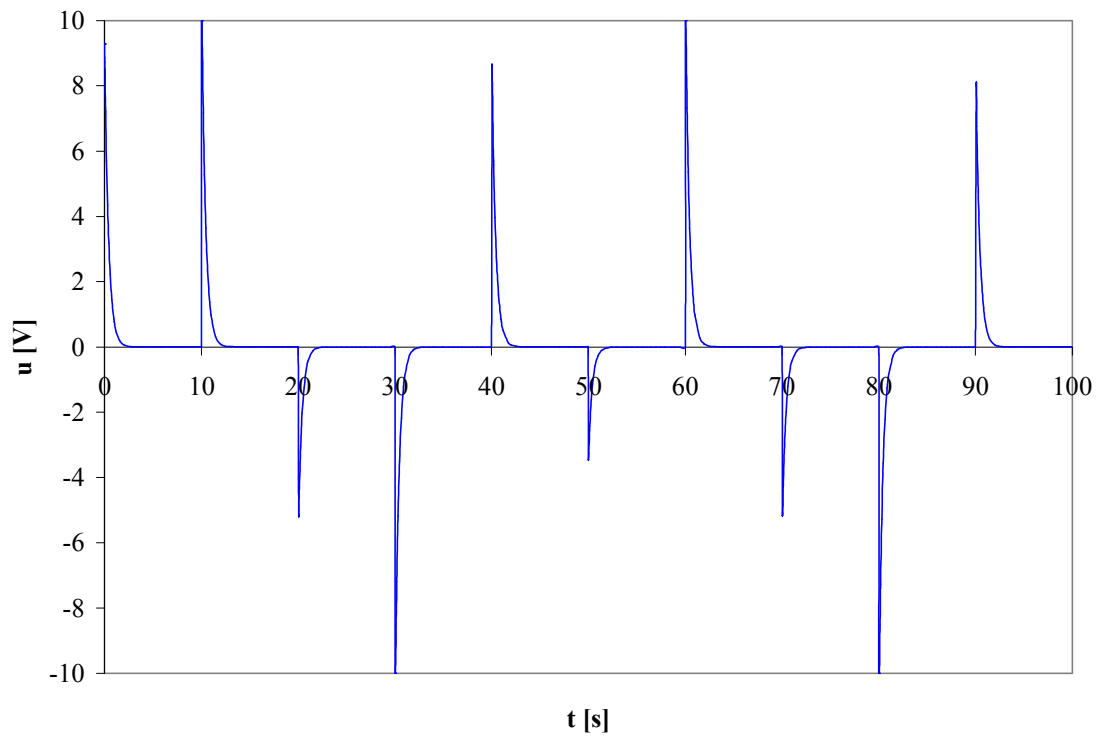
Obrázek 6-7 - Průběh řízení ventilu – model (1)



Obrázek 6-8 - Akční zásah regulátoru – model (1)



Obrázek 6-9 - Průběh řízení ventilu – model (2)



Obrázek 6-10 - Akční zásah regulátoru – model (2)

Vyhodnocení kvality regulace jsem provedl pomocí kvadratických kritérií.

$$S_y = \frac{1}{k_2 - k_1 + 1} \sum_{k=k_1}^{k_2} e^2(k); \quad (6.1)$$

$$S_u = \frac{1}{k_2 - k_1 + 1} \sum_{k=k_1}^{k_2} \Delta u^2(k) \quad (6.2)$$

Tabulka 6-2 - Vyhodnocení kvality regulace ventilu

|                                 | $S_y$   | $S_u$   |
|---------------------------------|---------|---------|
| <b>Reálný ventil - graf (1)</b> | 0.00066 | 0.00307 |
| <b>Reálný ventil - graf (2)</b> | 0.00089 | 0.00411 |
| <b>Model - graf (1)</b>         | 0.00038 | 0.00292 |
| <b>Model - graf (2)</b>         | 0.00059 | 0.00312 |

Při řízení reálného ventilu v jeho pracovní oblasti dochází k nepatrným překmitům s porovnáním s řízením ventilu v celém jeho rozsahu. Toto nám potvrzují i hodnoty kvality regulace  $S_y$  a  $S_u$ . Je to způsobeno i menšími skokovými změnami. U regulace ventilu na modelu nedochází k žádným překmitům a regulační pochod se chová jako „ideální“. Tohoto stavu samozřejmě u reálného zařízení nelze dosáhnout.

### 6.1.3 Návrh regulátoru pro řízení otáček motoru

Pro návrh regulátoru jsem zvolil polynomiální přístup s využitím konfigurace 1DOF (One Degree Of Freedom). Více o této metodě můžete nalézt například v [10], příp. [9].

Přenos motoru je:

$$G_{motor}(s) = \frac{1.25}{0.022s^2 + 0.294s + 1} = \frac{56.818}{s^2 + 13.364s + 45.455} = \frac{b(s)}{a(s)}$$

Přenos regulátoru:

$$Q(s) = \frac{q(s)}{p(s)} = \frac{q(s)}{f(s)\tilde{p}(s)}$$

kde  $q(s)$ ,  $p(s)$  jsou nesoudělné polynomy, pro něž platí podmínka ryzosti  $q \leq \deg p$  a  $f(s)$  je polynom, jenž obsahuje dynamiku referenčního signálu i poruchy působící na řízený výstup.

Z důvodu přehlednosti již v následujícím textu nebude někde psána komplexní proměnná –  $s$  tzn. místo  $x(s)$  bude psáno jen  $x$ .

*Charakteristický polynom:*

$$d = a \cdot p + b \cdot q = a \cdot f \cdot \tilde{p} + b \cdot q \quad (6.3)$$

*Určení stupně polynomů  $d(s)$ ,  $\tilde{p}(s)$ ,  $q(s)$ :*

$$\deg q = \deg a + \deg f - 1 = 2 + 1 - 1 = \underline{2} \Rightarrow q(s) = q_2 \cdot s^2 + q_1 \cdot s + q_0$$

$$\deg \tilde{p} = \deg a - 1 = 2 - 1 = \underline{1} \Rightarrow \tilde{p}(s) = \tilde{p}_1 \cdot s + \tilde{p}_0$$

$$\deg d = 2 \cdot \deg a + \deg f - 1 = 4 + 1 - 1 = \underline{4} \Rightarrow d(s) = s^4 + d_3 \cdot s^3 + d_2 \cdot s^2 + d_1 \cdot s + d_0$$

kde  $a$  je polynom jmenovatele řízené soustavy,  $b$  polynom čitatele řízené soustavy,  $p$  je polynom jmenovatele regulátoru,  $q$  je polynom čitatele regulátoru,  $f$  je tzv. kompenzátor a  $d$  je charakteristický polynom uzavřeného regulačního obvodu.

Referenční signál budeme uvažovat ve tvaru skokové funkce a stejně tak i poruchový signál, potom  $f(s)=s$

*Struktura zpětnovazební části regulátoru je:*

$$Q(s) = \frac{q_2 \cdot s^2 + q_1 \cdot s + q_0}{s \cdot (\tilde{p}_1 \cdot s + \tilde{p}_0)} = \frac{q_2 \cdot s^2 + q_1 \cdot s + q_0}{\tilde{p}_1 \cdot s^2 + \tilde{p}_0 \cdot s}$$

Požadované chování regulačního obvodu je dáno zvolením charakteristického polynomu URO  $d(s)$  a výsledné koeficienty regulátoru se pak získají řešením diofantické rovnice (6.3). Pro nekmitavý a stabilní průběh regulované veličiny byl zvolen  $d(s)=(s+m)^4$ . I když si touto jednoduchou volbou omezíme možnosti regulátoru, je to vykompenzováno snadným doladováním chování výsledného URO pomocí jednoho stavitelného parametru  $m>0$ . Diofantická rovnice potom bude:

$$d(s) = (a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0) \cdot s \cdot (\tilde{p}_1 \cdot s + \tilde{p}_0) + b_0 \cdot (q_2 \cdot s^2 + q_1 \cdot s + q_0) = (s+m)^4$$

$$d(s) = a_2 \cdot \tilde{p}_1 \cdot s^4 + (a_1 \cdot \tilde{p}_1 + a_2 \cdot \tilde{p}_0) \cdot s^3 + (a_0 \cdot \tilde{p}_1 + a_1 \cdot \tilde{p}_0 + b_0 \cdot q_2) \cdot s^2 + (a_0 \cdot \tilde{p}_0 + b_0 \cdot q_1) \cdot s + b_0 \cdot q_0 = s^4 + 4 \cdot m \cdot s^3 + 6 \cdot m^2 \cdot s^2 + 4 \cdot m^3 \cdot s + m^4$$

Porovnáním koeficientů u jednotlivých mocnin dostaneme parametry regulátoru:

$$\begin{array}{rcl}
 s^4 : & a_2 \cdot \tilde{p}_1 & = 1 \\
 s^3 : & a_1 \cdot \tilde{p}_1 + a_2 \cdot \tilde{p}_0 & = 4 \cdot m \\
 s^2 : & a_0 \cdot \tilde{p}_1 + a_1 \cdot \tilde{p}_0 + b_0 \cdot q_2 & = 6 \cdot m^2 \\
 s^1 : & + a_0 \cdot \tilde{p}_0 + b_0 \cdot q_1 & = 4 \cdot m^3 \\
 s^0 : & + b_0 \cdot q_0 & = m^4
 \end{array}$$

Po úpravě

$$\tilde{p}_1 = 1$$

$$\tilde{p}_0 = 4 \cdot m - a_1$$

$$q_2 = \frac{6 \cdot m^2 - a_1 \tilde{p}_0 - a_0}{b_0}$$

$$q_1 = \frac{4 \cdot m^3 - a_0 \tilde{p}_0}{b_0}$$

$$q_0 = \frac{m^4}{b_0}$$

Podmínkou stability regulátoru je  $m > a_1 / 4$ .

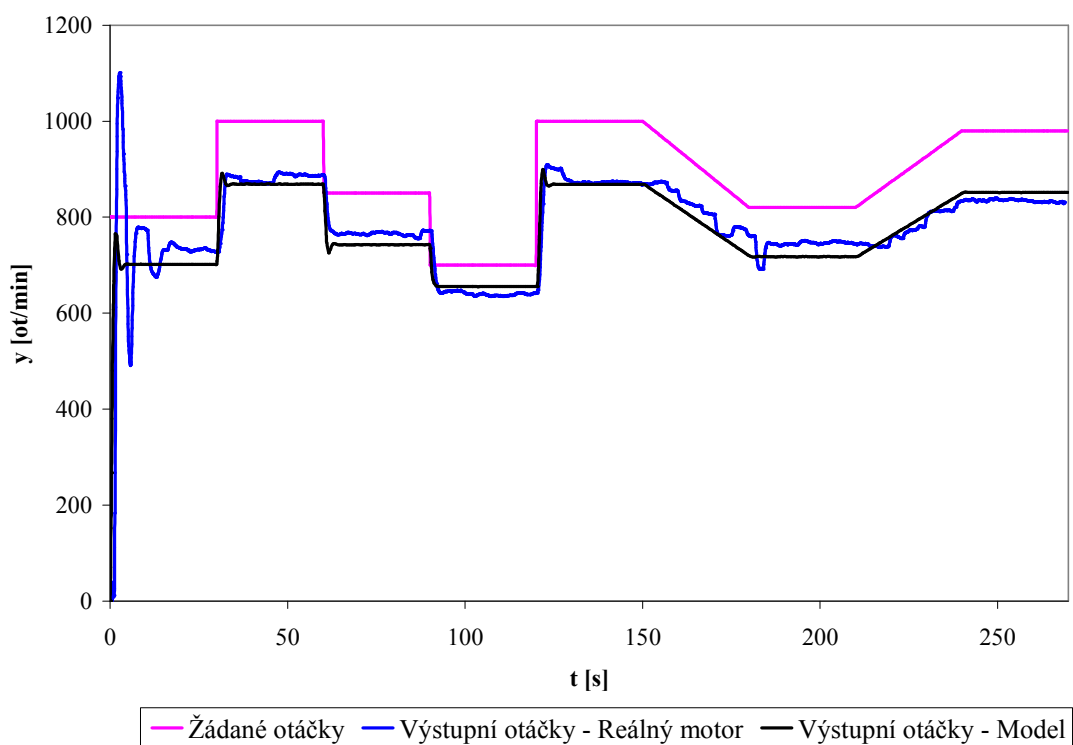
Hodnoty parametrů regulátoru pro různá  $m$  ukazuje tabulka níže (Tabulka 6-3).

Tabulka 6-3 - Parametry regulátoru pro motor

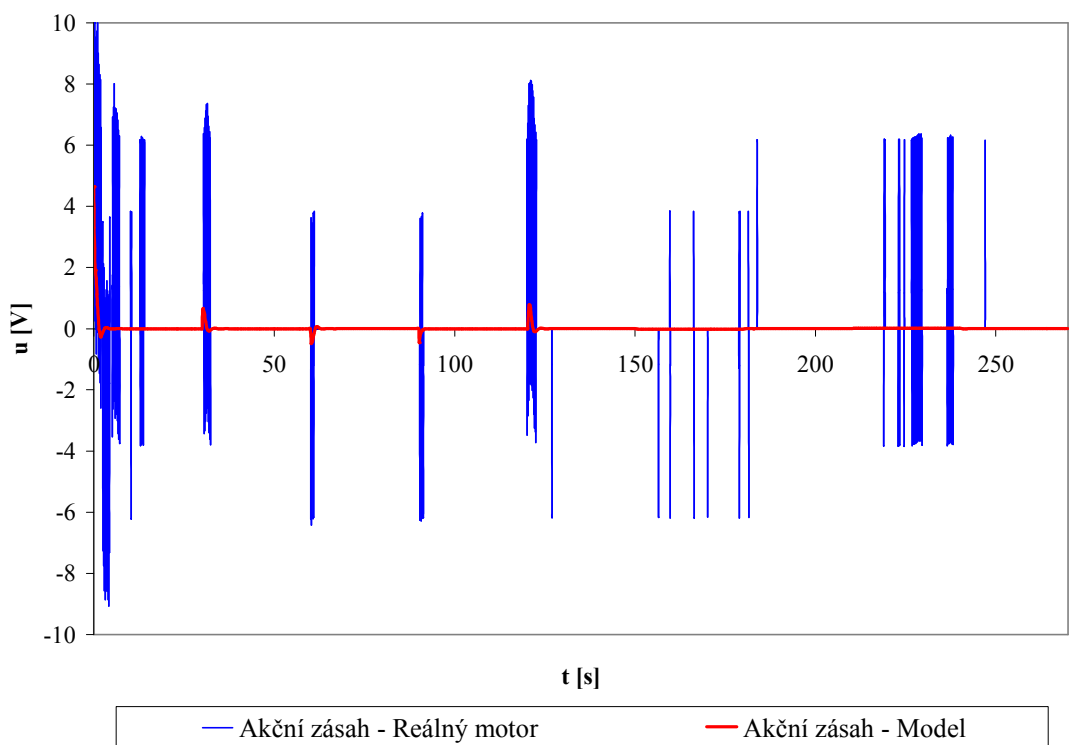
| <b>m</b> | <b><math>\tilde{p}_1</math></b> | <b><math>\tilde{p}_0</math></b> | <b><math>q_2</math></b> | <b><math>q_1</math></b> | <b><math>q_0</math></b> |
|----------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| <b>4</b> | 1                               | 2.636                           | 0.269                   | 2.396                   | 4.505                   |
| <b>5</b> | 1                               | 6.636                           | 0.279                   | 3.491                   | 11                      |
| <b>6</b> | 1                               | 10.636                          | 0.499                   | 6.698                   | 22.809                  |

Porovnání jednotlivých regulačních pochodů a jejich akčních zásahů pro výše uvedené parametry regulátorů je zobrazeno v grafech Obrázek 6-11 až Obrázek 6-16.

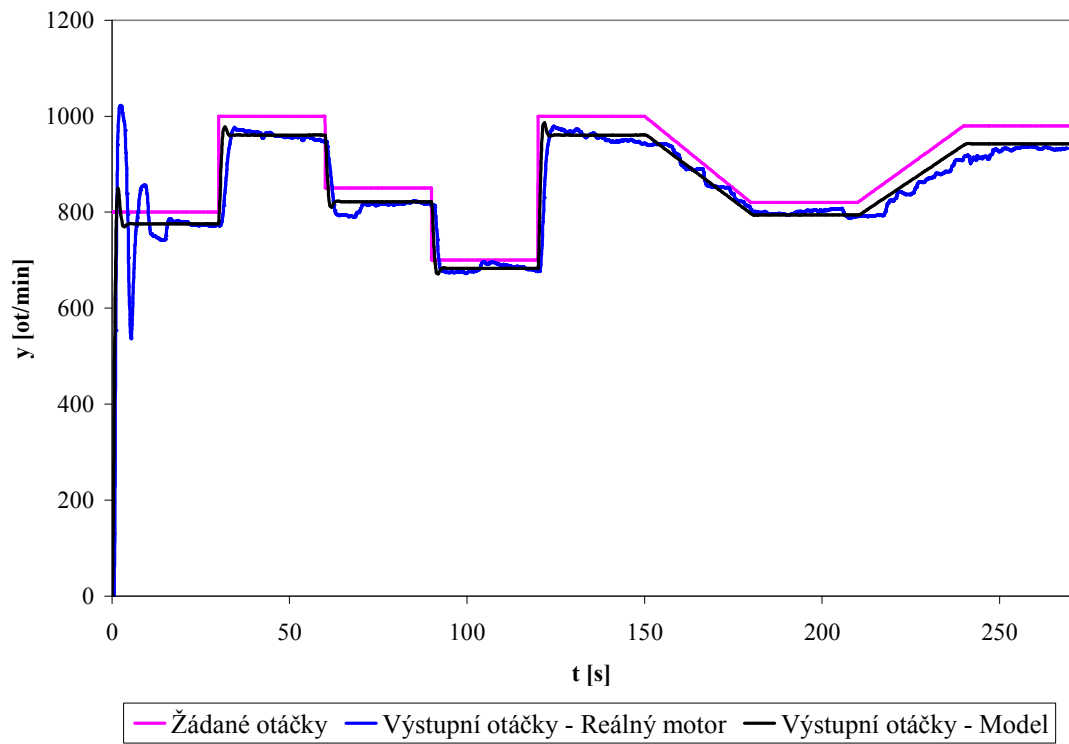
Vyhodnocení kvality regulace viz Tabulka 6-4 a Tabulka 6-5.



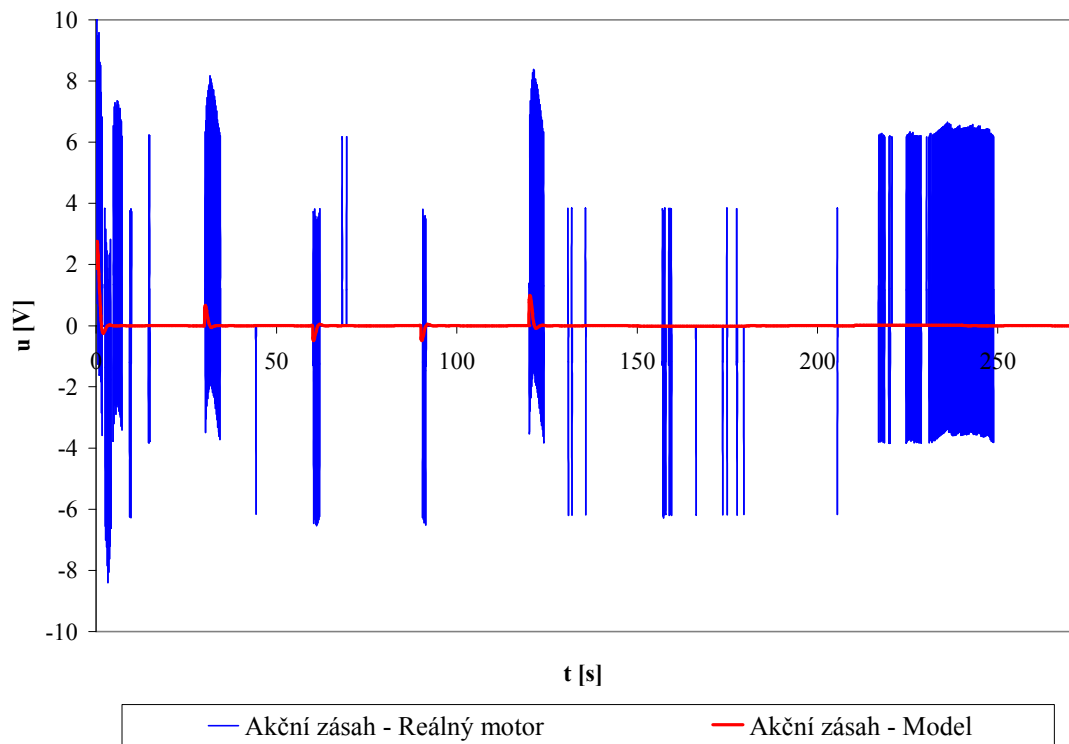
Obrázek 6-11 – Regulační pochod pro regulátor s parametrem  $m=4$



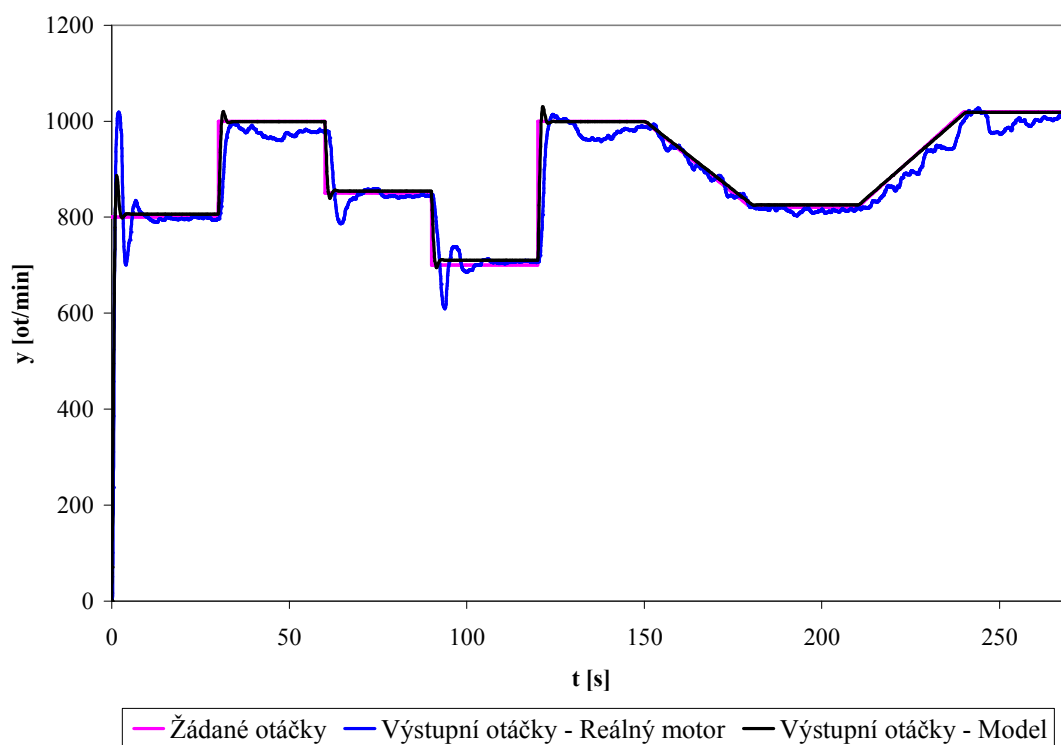
Obrázek 6-12 – Průběh akčního zásahu pro regulátor s parametrem  $m=4$



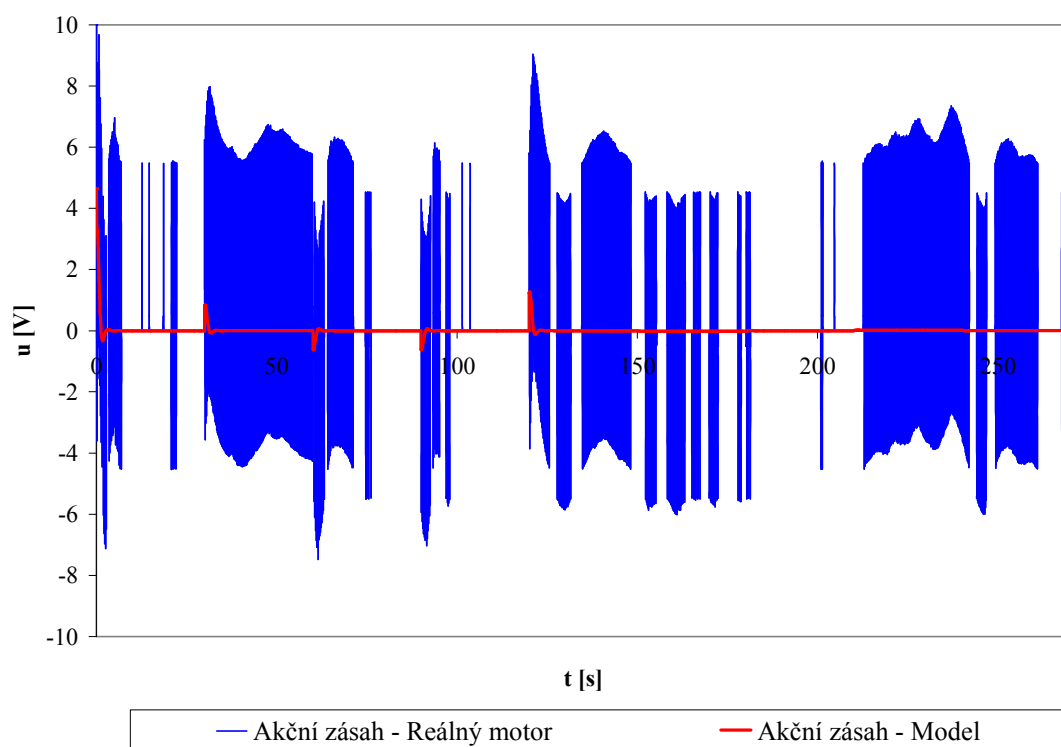
Obrázek 6-13 - Regulační pochod pro regulátor s parametrem  $m=5$



Obrázek 6-14 - Průběh akčního zásahu pro regulátor s parametrem  $m=5$



Obrázek 6-15 – Regulační pochod pro regulátor s parametrem  $m=6$



Obrázek 6-16 - Průběh akčního zásahu pro regulátor s parametrem  $m=6$

Tabulka 6-4 – Kvalita regulace - Model

| $m$ | $S_y$   | $S_u$   |
|-----|---------|---------|
| 4   | 0.00726 | 0.00069 |
| 5   | 0.00191 | 0.00066 |
| 6   | 0.00073 | 0.00077 |

Tabulka 6-5 - Kvalita regulace – Reálný motor

| $m$ | $S_y$   | $S_u$   |
|-----|---------|---------|
| 4   | 0.14870 | 0.19620 |
| 5   | 0.05370 | 0.38780 |
| 6   | 0.00073 | 0.46620 |

Jak lze vidět z jednotlivých regulačních průběhů otáček motoru a z hodnot kritéria  $S_y$  největší regulační odchylku měl regulátor s parametrem  $m=4$  a nejmenší s  $m=6$ . Podle průběhu akčních zásahů a hodnoty kritéria  $S_u$  největší akční zásah měl regulátor s parametrem  $m=6$  a nejmenší s  $m=5$  (reálný motor).

Porovnáme-li regulaci otáček reálného motoru a modelu dostaneme velmi podobné průběhy. Akční zásahy se samozřejmě liší, jelikož model je “idealizovaná“ verze reálného motoru a musíme tak k tomu i přihlížet. Hlavním cílem je, aby výstupní otáčky jak reálného motoru, tak modelu byly co nejvíce podobné v ideálním případě totožné. Při výběru regulátoru jsem kladl větší váhu na průběh výstupních otáček a hodnotu kritéria  $S_y$  s přihlédnutím k velikosti akčního zásahu a tím spojené životnosti ventilu.

Pro řízení byl zvolen regulátor  $Q(s)$  pro hodnotu  $m=6$ .

### Výsledný regulátor

$$Q(s) = \frac{0.499 \cdot s^2 + 6.698 \cdot s + 22.809}{s^2 + 10.636 \cdot s}$$

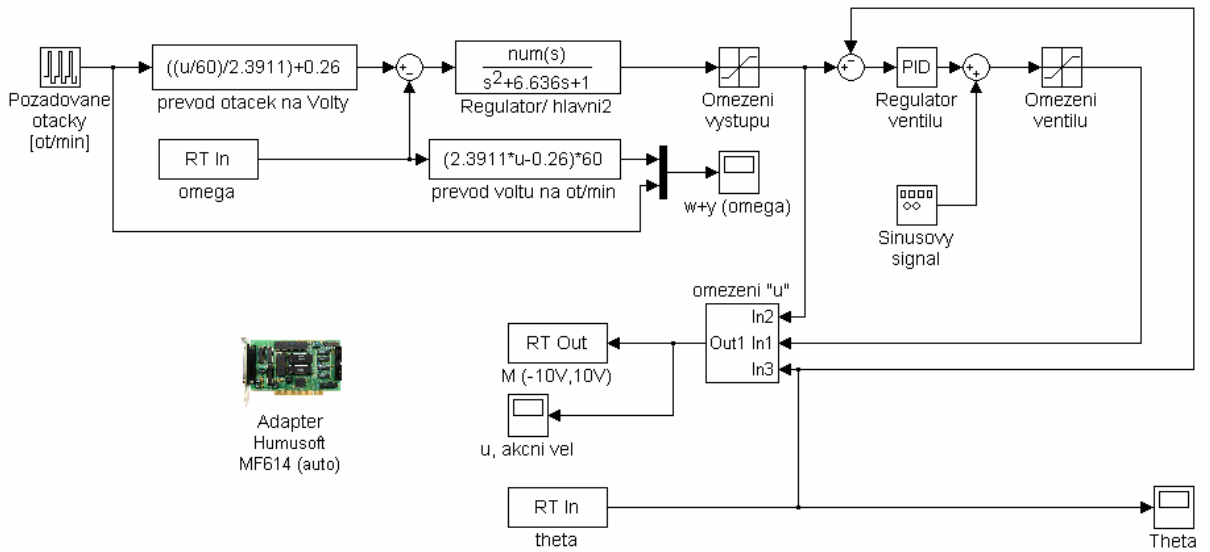
#### 6.1.4 Regulace otáček motoru

Regulační schéma pro řízení otáček reálného motoru je na Obrázek 6-1 a pro model na Obrázek 6-2. Byly zvoleny stejné průběhy vstupní veličiny pro reálný motor i jeho model z důvodu porovnání. K výstupu z regulátoru se připočítává periodický signál o frekvenci 25Hz a amplitudě 4V. Je to z důvodu odstranění tzv. mrtvého pásma ventilu, viz kapitola 4.3.

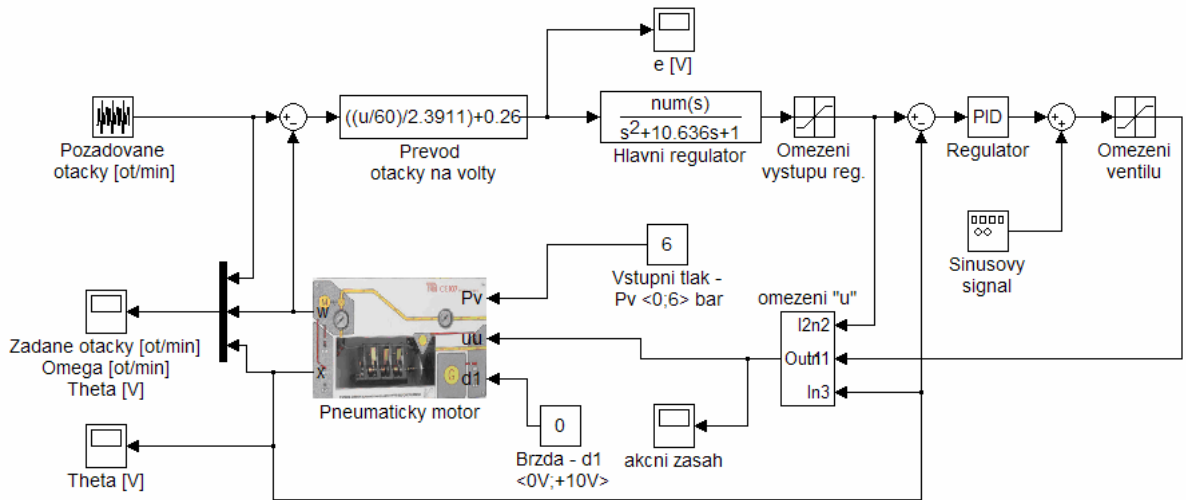
Nastavení parametrů regulace a její vyhodnocení pomocí kvadratických kritérií je zobrazeno v Tabulka 6-6. Jednotlivé regulační pochody s průběhy akčního zásahu jsou uvedeny na Obrázek 6-19 až Obrázek 6-30. Pro názorné porovnání průběhu výstupních otáček reálného motoru s modelem byly tyto průběhy vyneseny do jednoho grafu pro každé měření viz Obrázek 6-31 - Obrázek 6-33. Popis jednotlivých průběhů je uveden na konci kapitoly.

Tabulka 6-6 – Nastavení a vyhodnocení kvality regulace

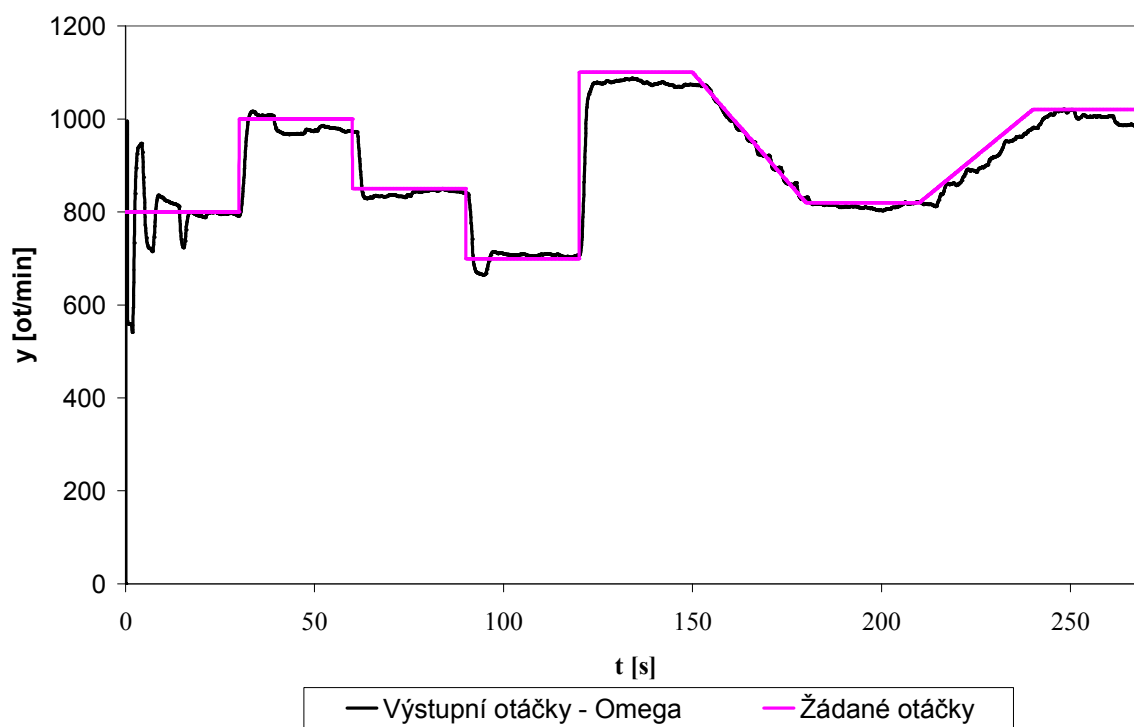
|                                  | Omezení výstupu reg. | Omezení ventilu | Omezení "u" | $S_y$   | $S_u$   |
|----------------------------------|----------------------|-----------------|-------------|---------|---------|
| <b>Reálný motor - otáčky (1)</b> | <-10,+10>            | <-10,+10>       | <-1,+1>     | 0.02307 | 0.46620 |
| <b>Reálný motor - otáčky (2)</b> | <-10,+10>            | <-10,+10>       | <-0.4,+0.4> | 0.02795 | 0.46620 |
| <b>Reálný motor - otáčky (3)</b> | <-2, +10>            | <-10,+10>       | <-1,+1>     | 0.03262 | 0.89060 |
| <b>Model - otáčky (1)</b>        | <-10,+10>            | <-10,+10>       | <-1,+1>     | 0.00077 | 0.00079 |
| <b>Model - otáčky (2)</b>        | <-10,+10>            | <-10,+10>       | <-0.4,+0.4> | 0.00073 | 0.00077 |
| <b>Model - otáčky (3)</b>        | <-2, +10>            | <-10,+10>       | <-1,+1>     | 0.00072 | 0.00077 |



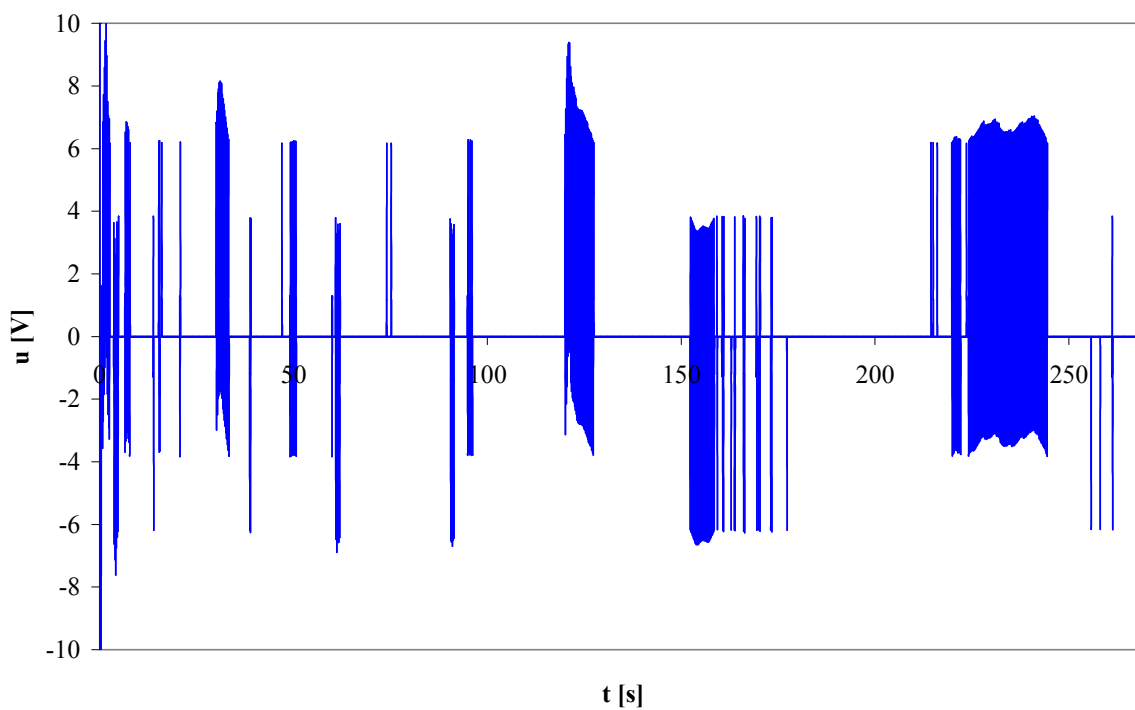
Obrázek 6-17 - Schéma pro regulaci otáček – reálný motor



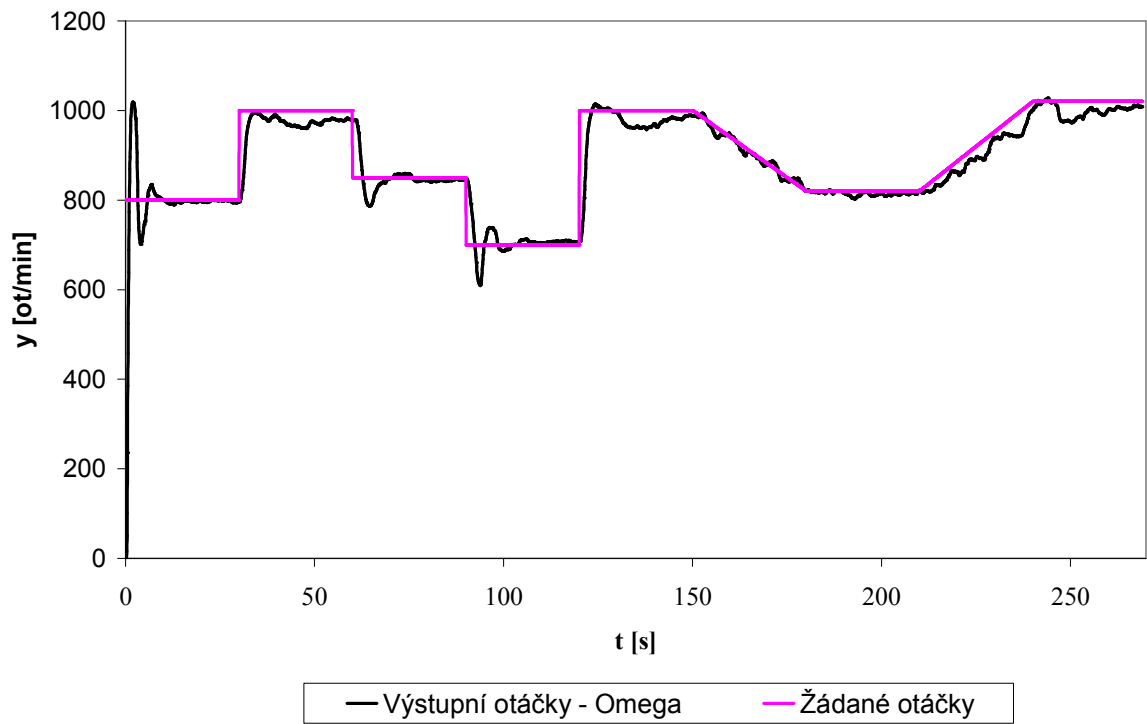
Obrázek 6-18 - Schéma pro regulaci otáček – model



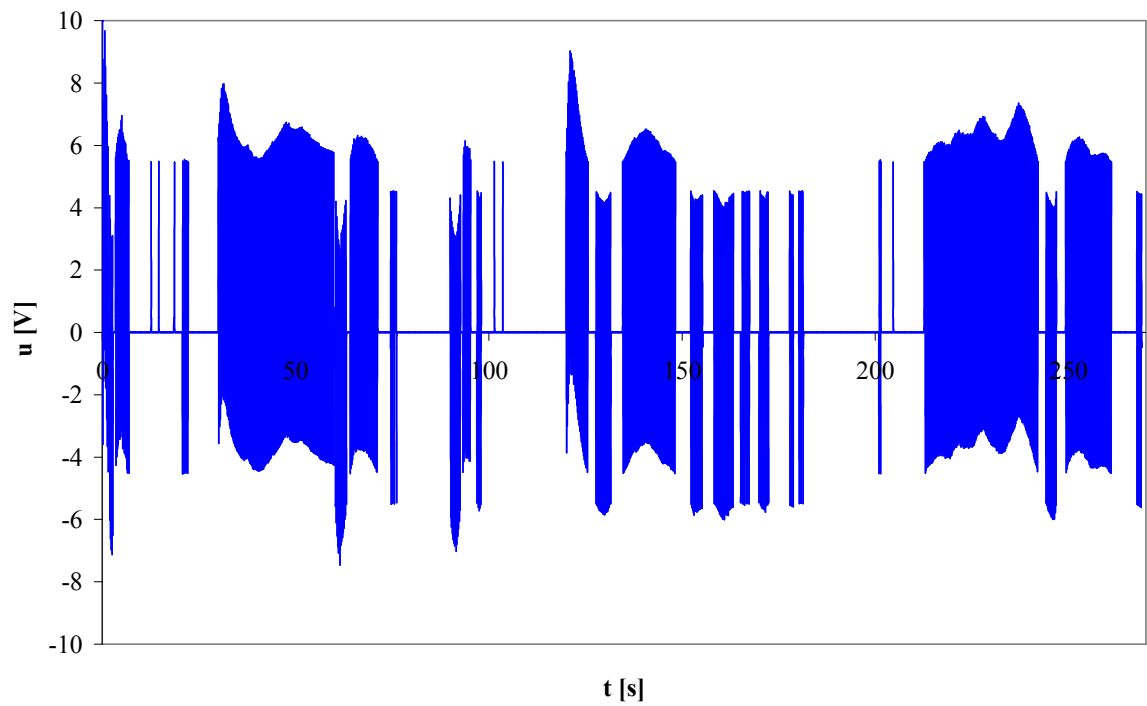
Obrázek 6-19 – Regulační průběh otáček – reálný motor (1)



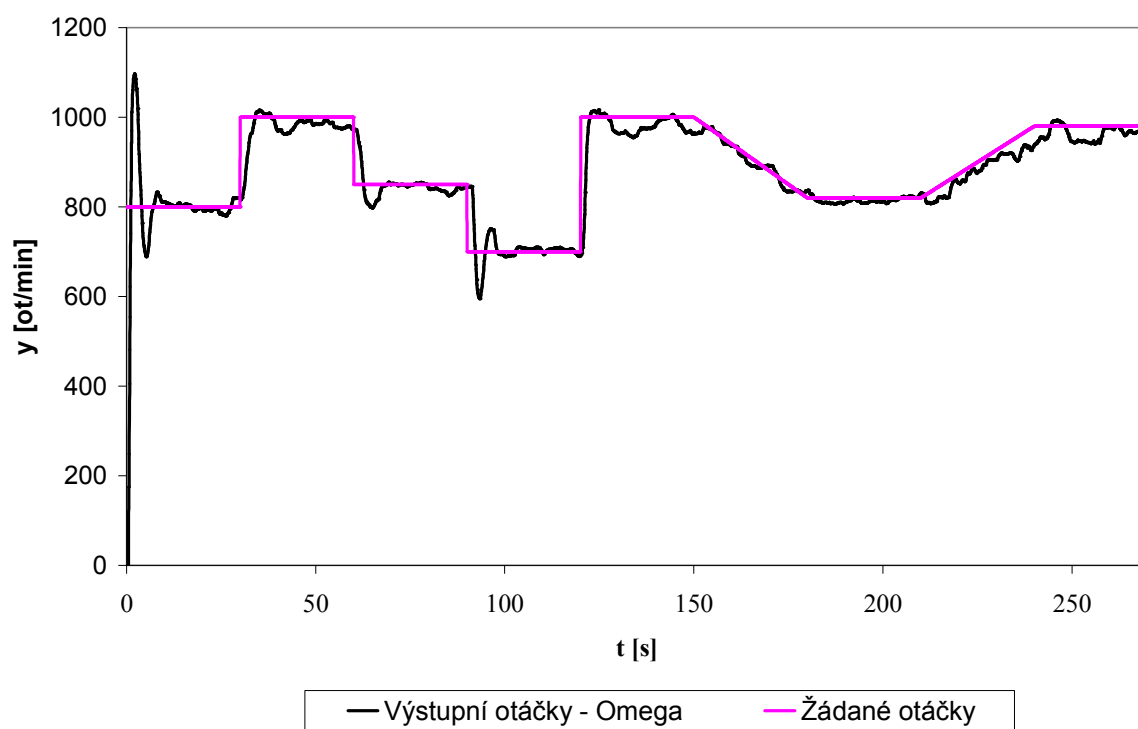
Obrázek 6-20 – Akční zásah – reálný motor (1)



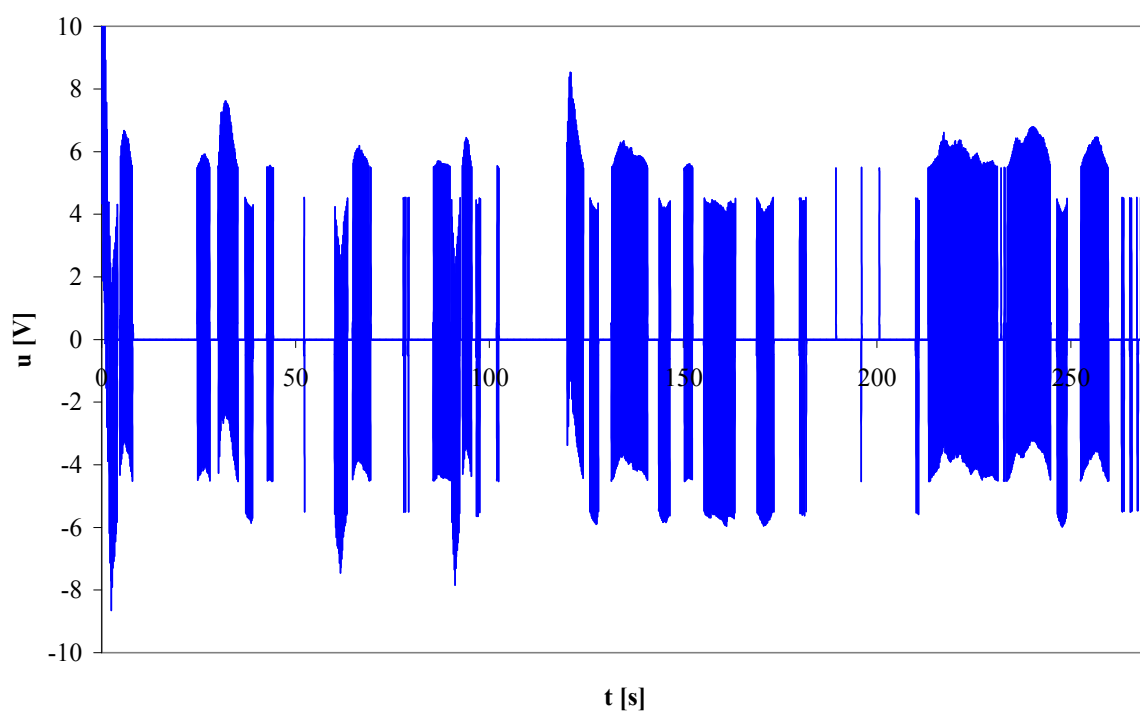
Obrázek 6-21 – Regulační průběh otáček – reálný motor (2)



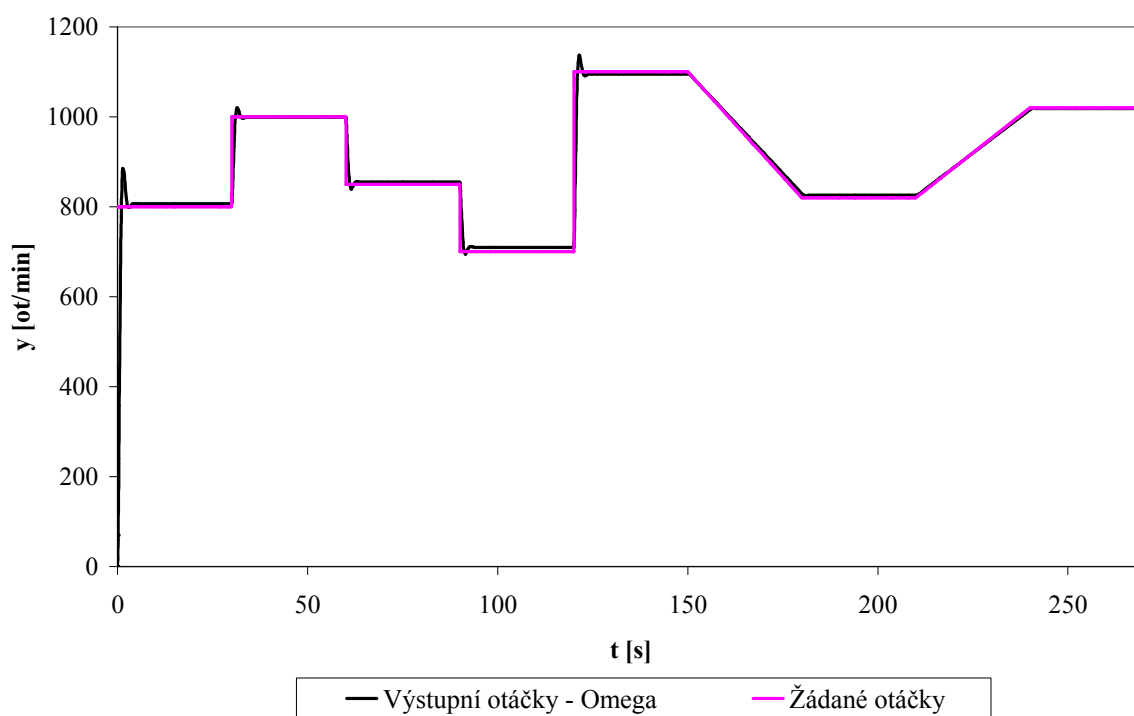
Obrázek 6-22 – Akční zásah – reálný motor (2)



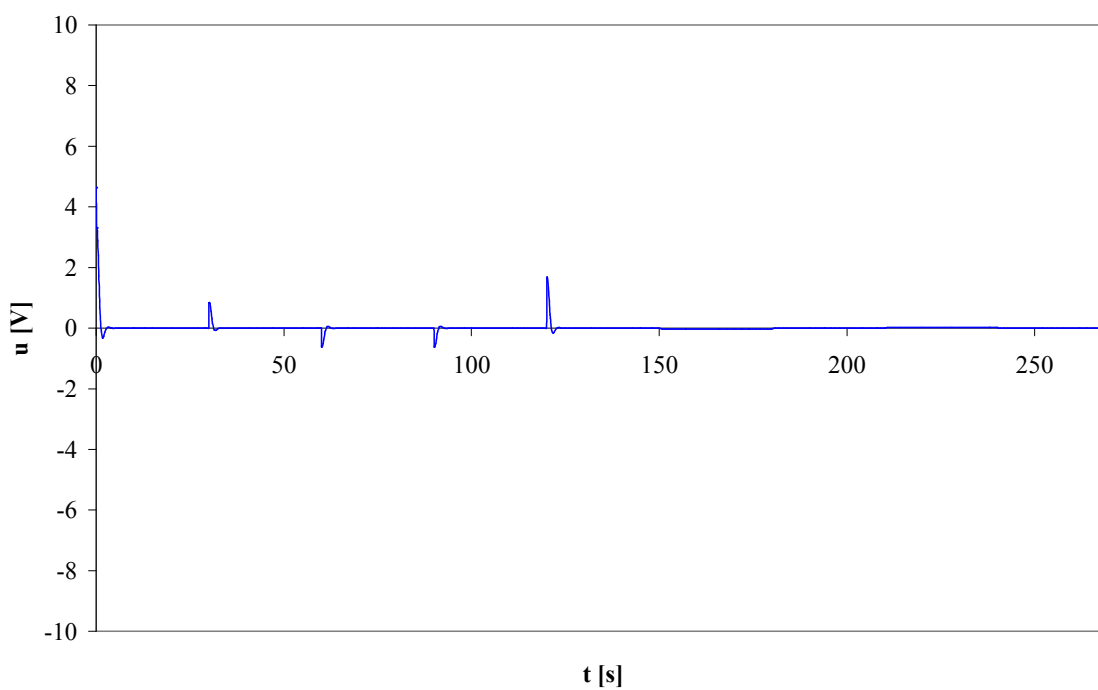
Obrázek 6-23 – Regulační průběh otáček – reálný motor (3)



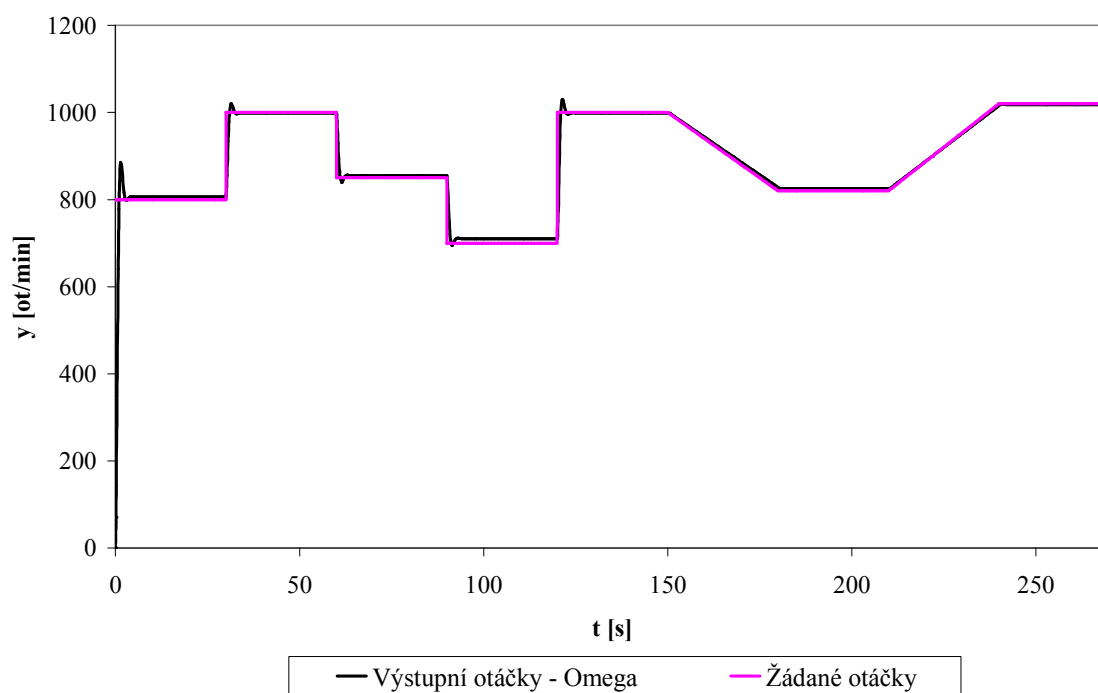
Obrázek 6-24 - Akční zásah – reálný motor (3)



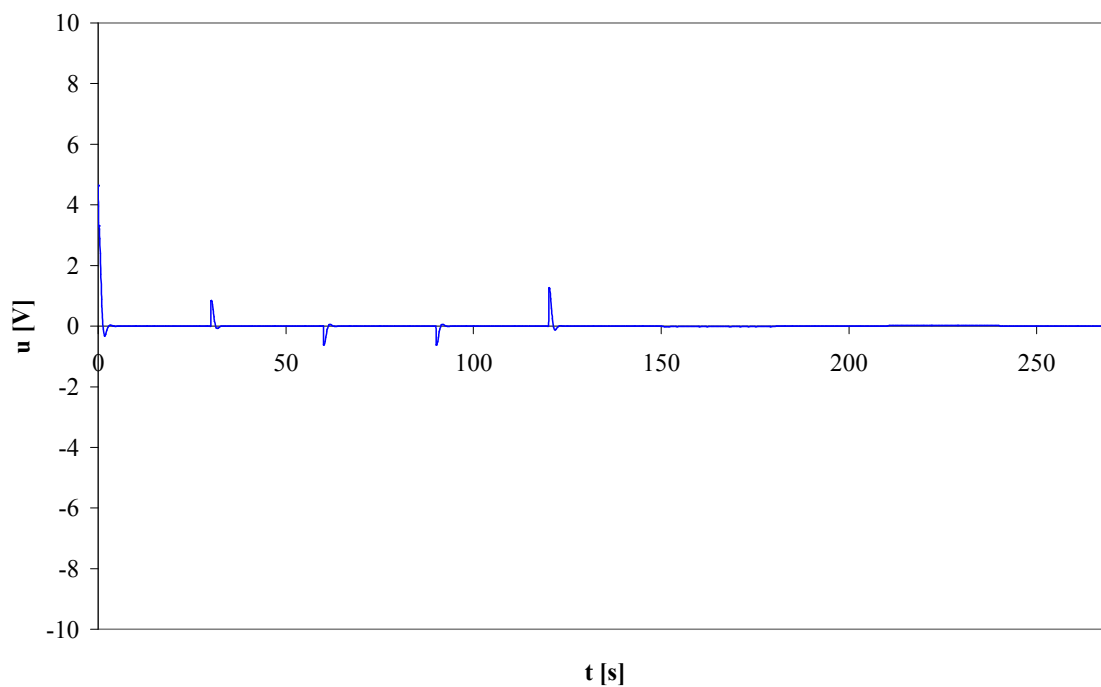
Obrázek 6-25 - Regulační průběh otáček – model (1)



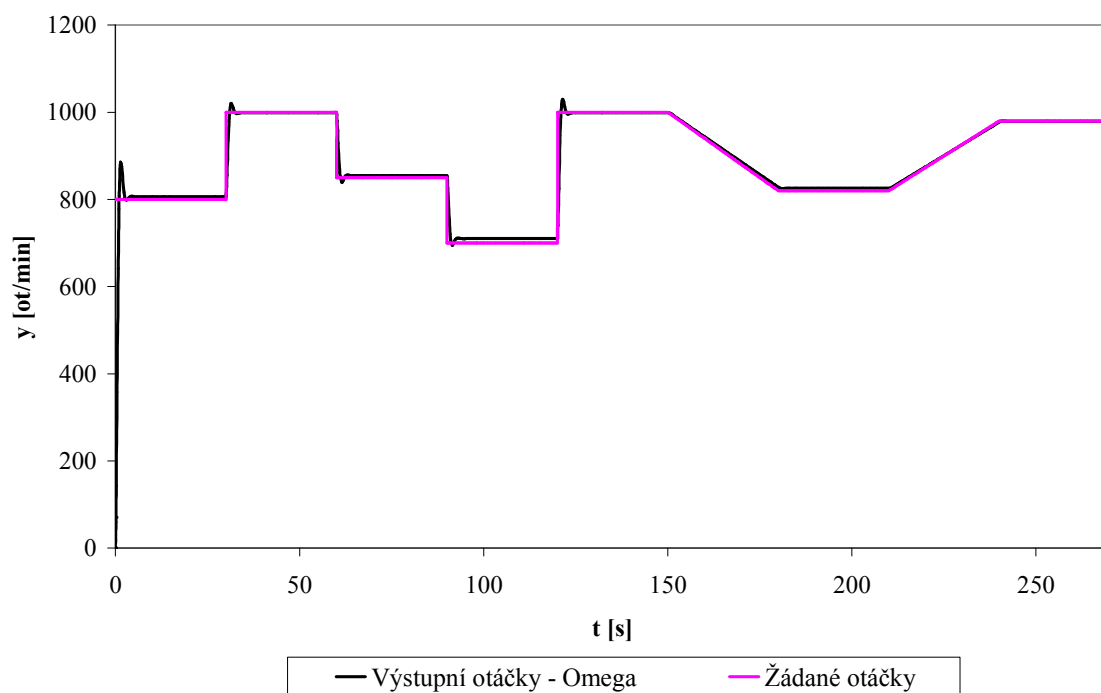
Obrázek 6-26 – Akční zásah – model (1)



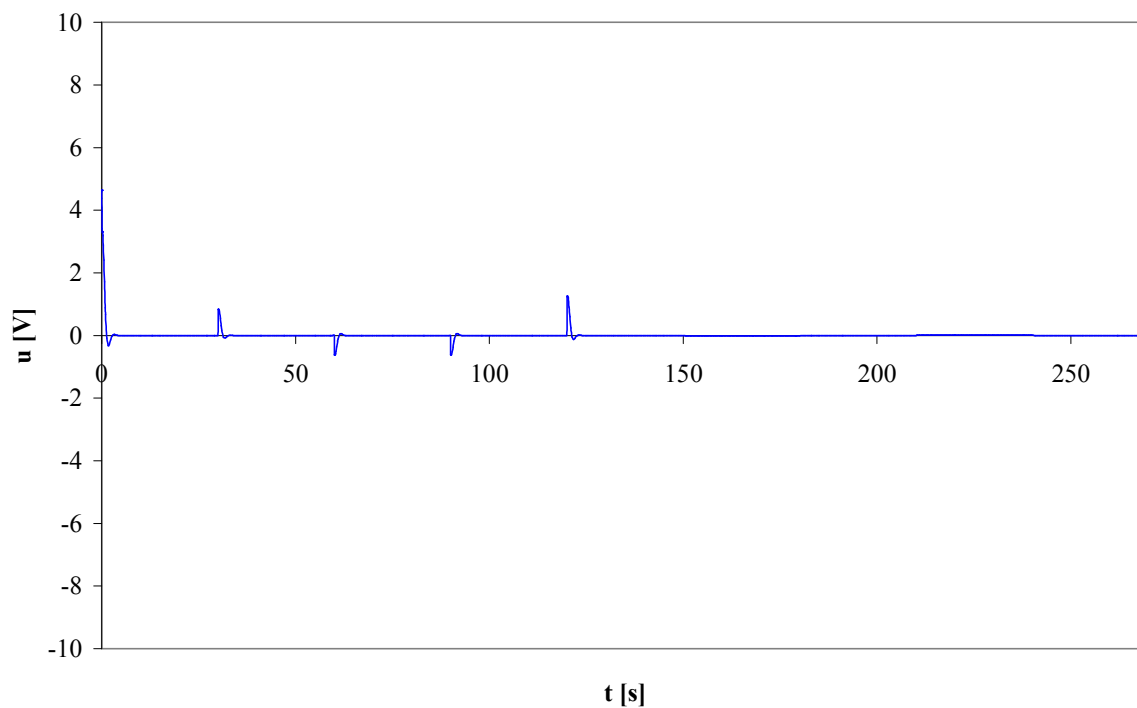
Obrázek 6-27 – Regulační průběh otáček – model (2)



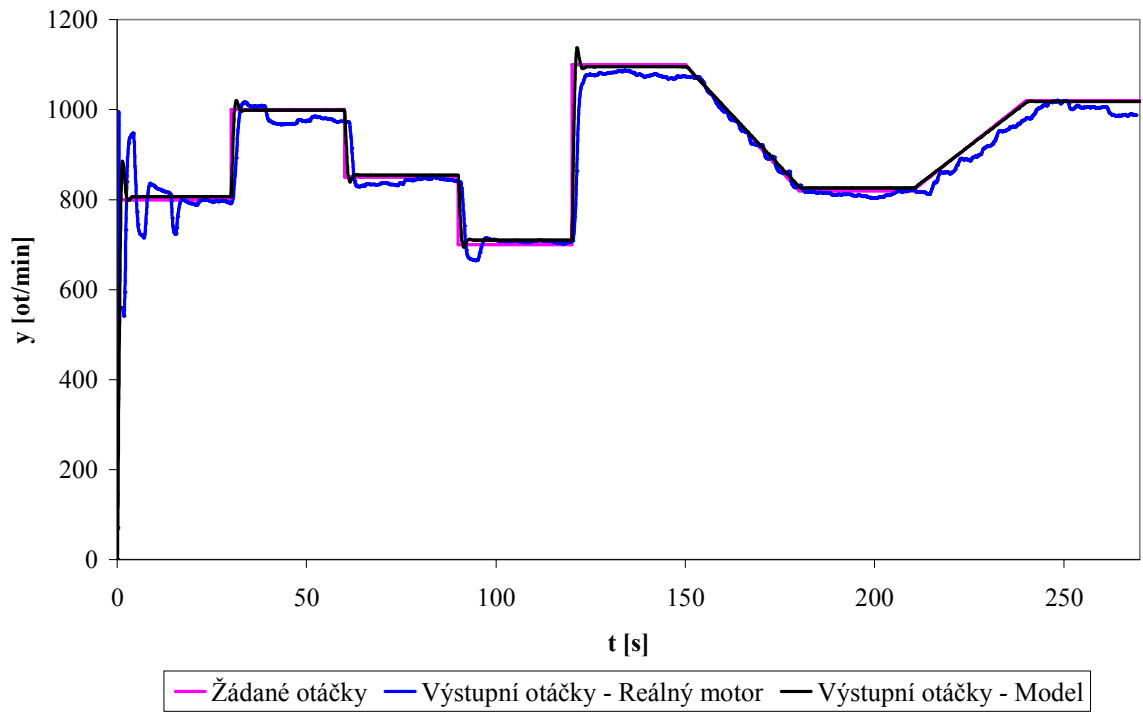
Obrázek 6-28 – Akční zásah – model (2)



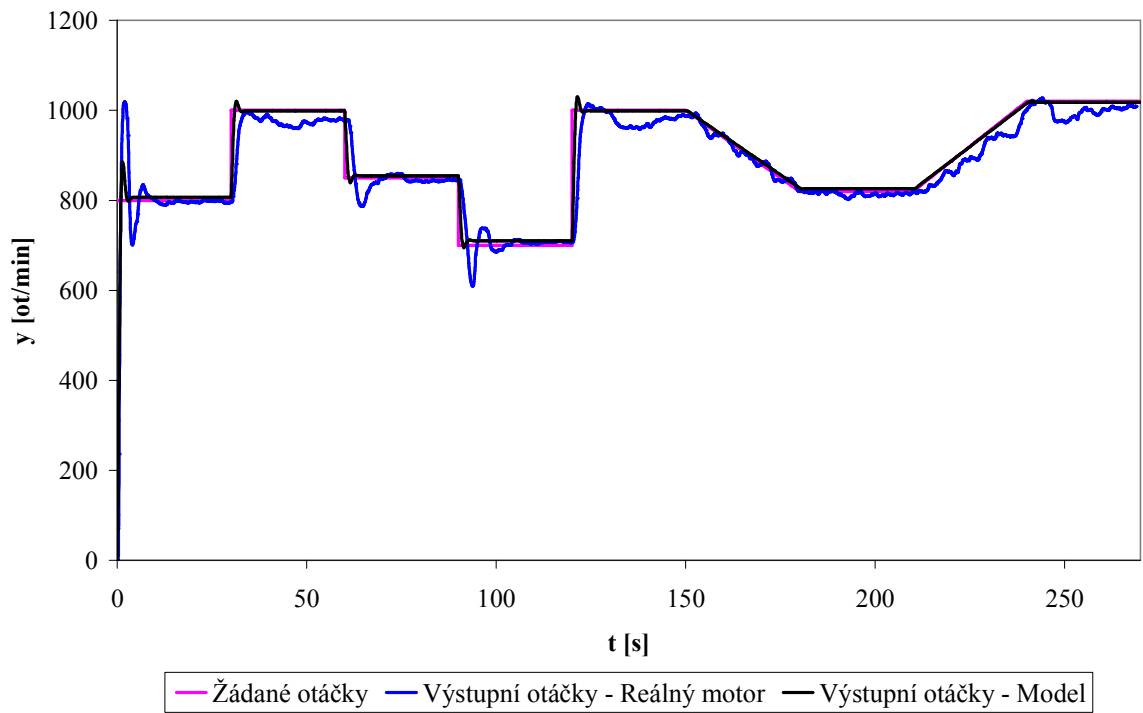
Obrázek 6-29 – Regulační průběh otáček – model (3)



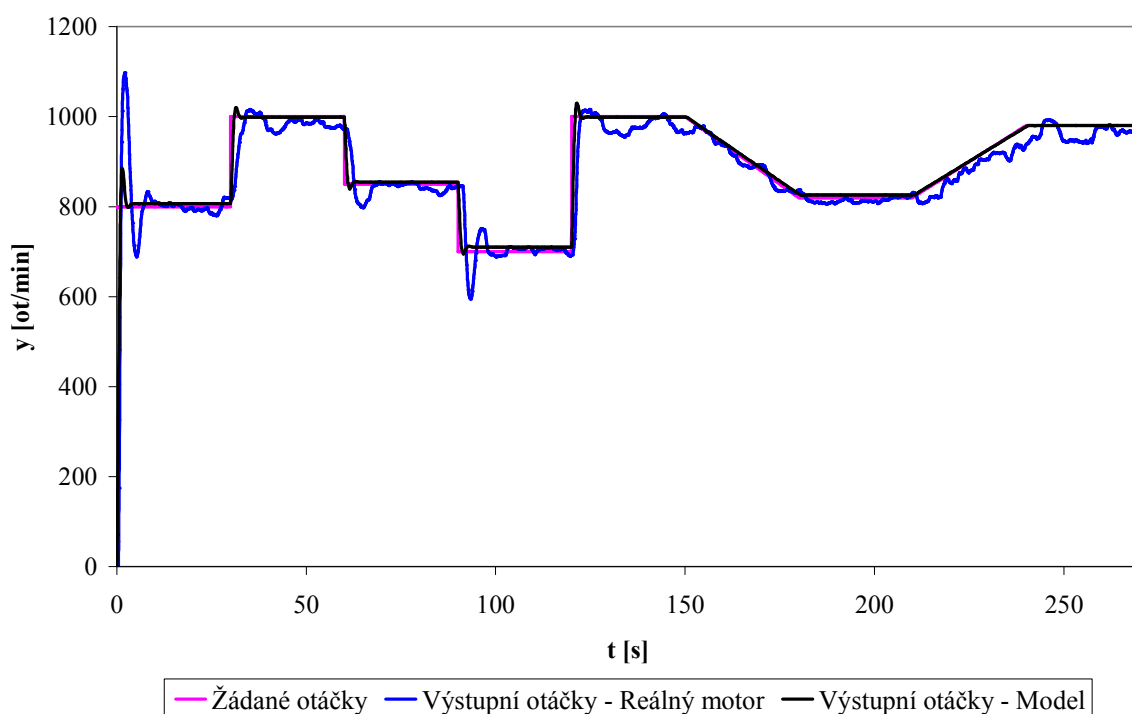
Obrázek 6-30 - Akční zásah – model (3)



Obrázek 6-31 – Porovnání regulace otáček (1)



Obrázek 6-32 – Porovnání regulace otáček (2)



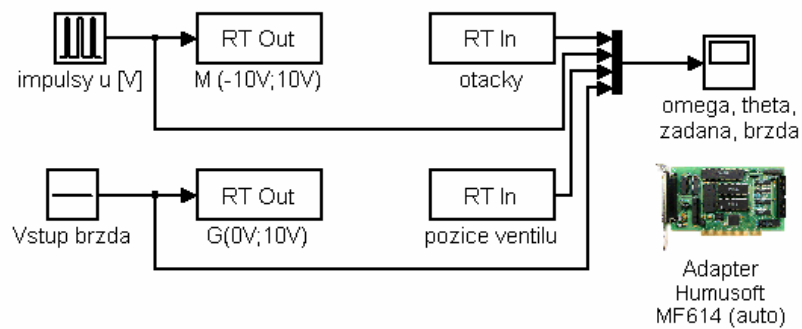
Obrázek 6-33 - Porovnání regulace otáček (3)

Z regulačních průběhů reálného motoru vidíme, že výstupní otáčky následují žádané otáčky jen s drobnými odchylkami. Na počátku dochází krátkodobě k většímu překmitu (přibližně o 25%). To je způsobeno vynuceným velkým akčním zásahem pro rozběh motoru. V průběhu regulačního pochodu pak dochází k menším překmitům do 10%. U regulačního pochodu modelu motoru také výstupní otáčky sledují žádané otáčky. I zde na počátku regulace dochází k většímu překmitu (přibližně 12%) oproti dalšímu průběhu, kde je překmit řádově v jednotkách procent.

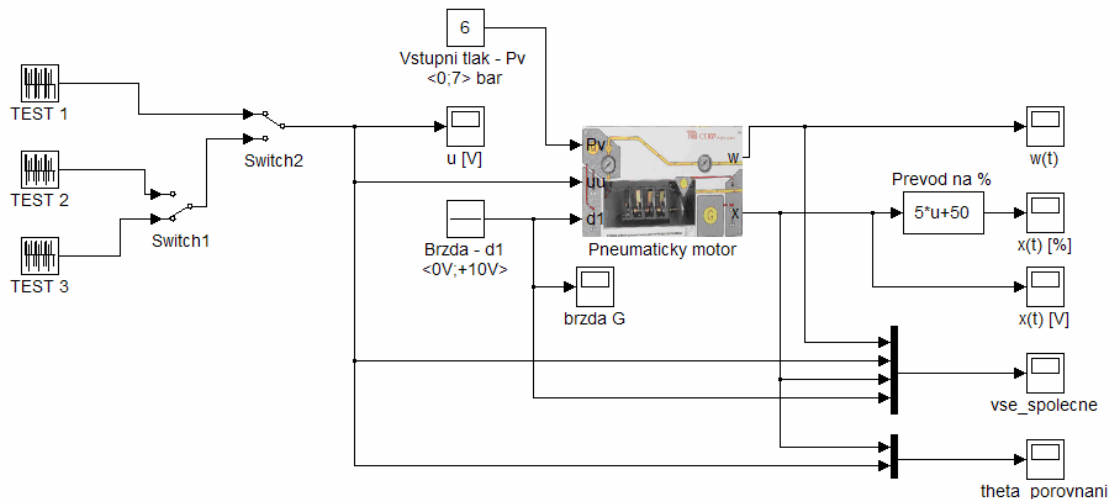
Jak reálný motor, tak model mají navzájem podobné průběhy. Jedinou významnější odchylkou je rozdílnost počátečního překmitu. S tímto překmitem musíme počítat, pokud požadujeme rychlý regulační pochod. Rychlost ustálení výstupní veličiny u reálného motoru je přibližně dvakrát delší než u modelu. Je to opět způsobeno větším překmitem u motoru při skokové změně žádaných otáček. Pokud měníme velikost otáček plynule, tak k překmitům nedochází. U pneumatických motorů se v praxi běžně používá plynulá změna otáček nikoli nárazové velké skokové změny. Na modelu můžeme bez problému simulovat různé regulační pochody a dostaneme chování odpovídající v daných tolerancích reálnému motoru.

## 7 BENCHMARK

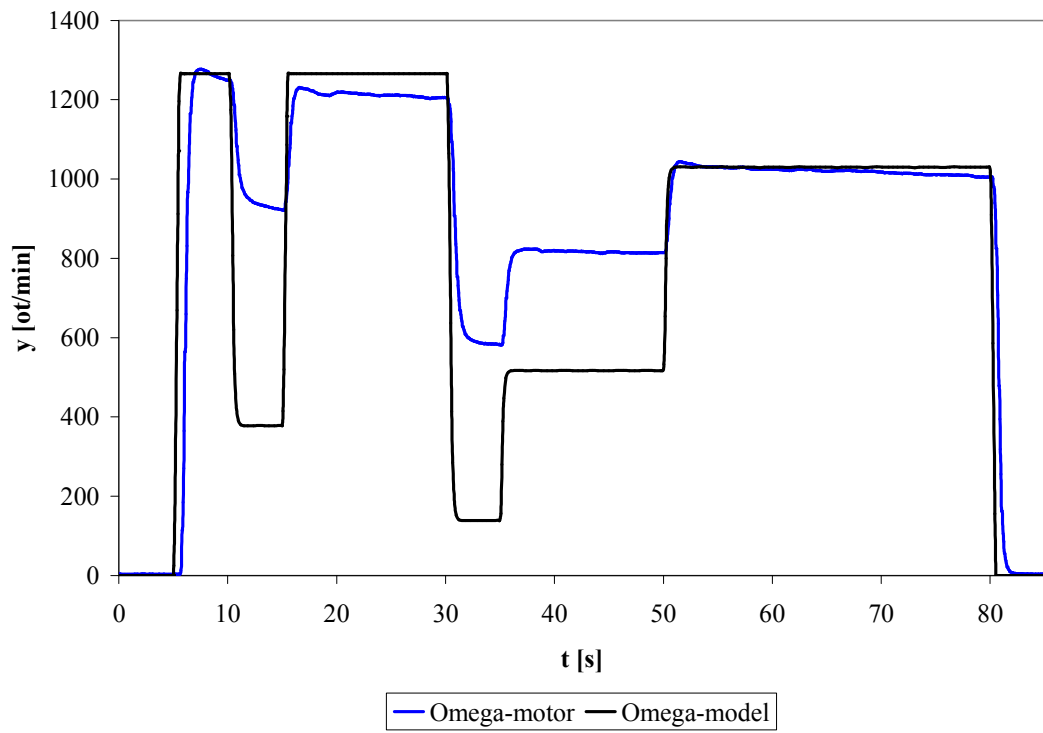
Benchmark je srovnávací test reálného motoru a jeho modelu bez zásahu řízení. Na vstup servo-motoru a brzdy jsem pouštěl sérii napět'ových impulsů o různé velikosti a sledoval jsem, kromě vstupních signálů, nastavení pozice ventilu ( $\theta$ ) a výstupní otáčky ( $\omega$ ). Měření jsem prováděl pro běh motoru bez zátěže i se zátěží. Následně jsem provedl grafické srovnání zvlášt' pro otáčky a zvlášt' pro pozici ventilu.



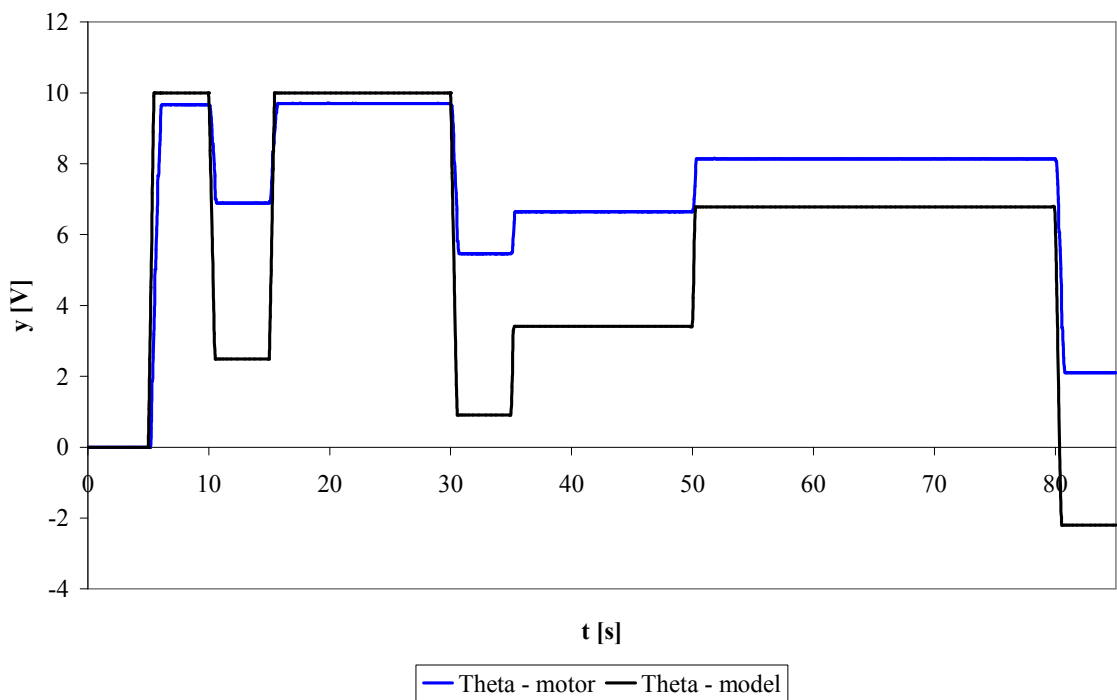
Obrázek 7-1 - Schéma pro Benchmark – reálný motor



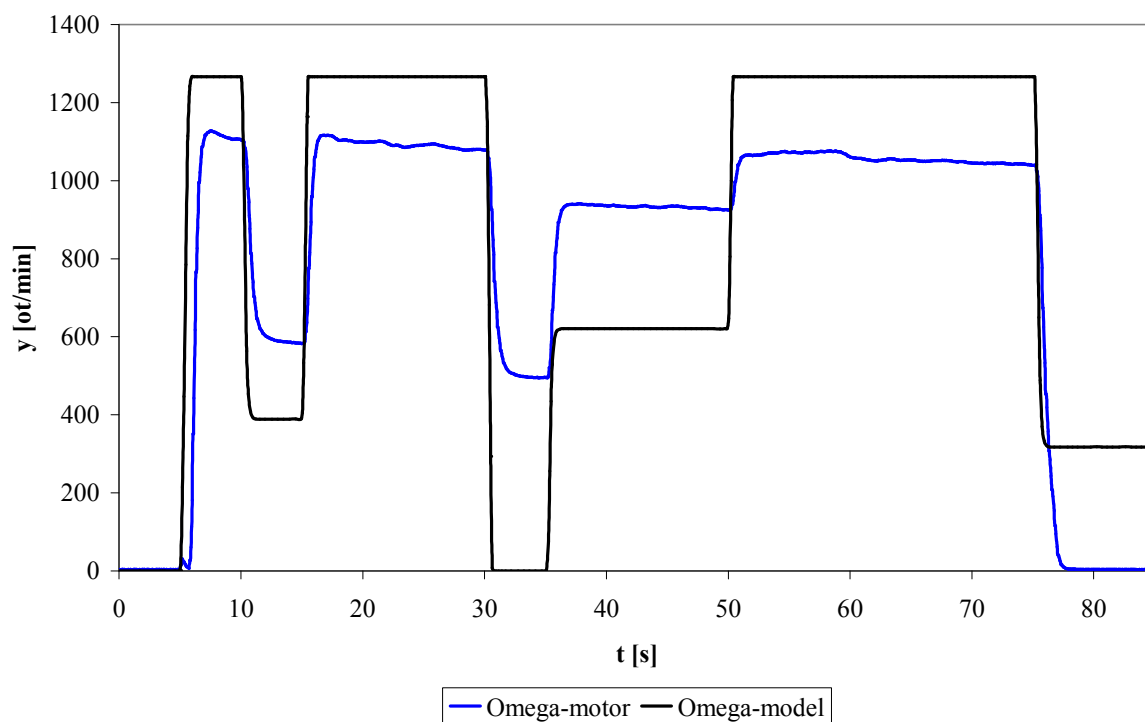
Obrázek 7-2- Schéma pro Benchmark - model



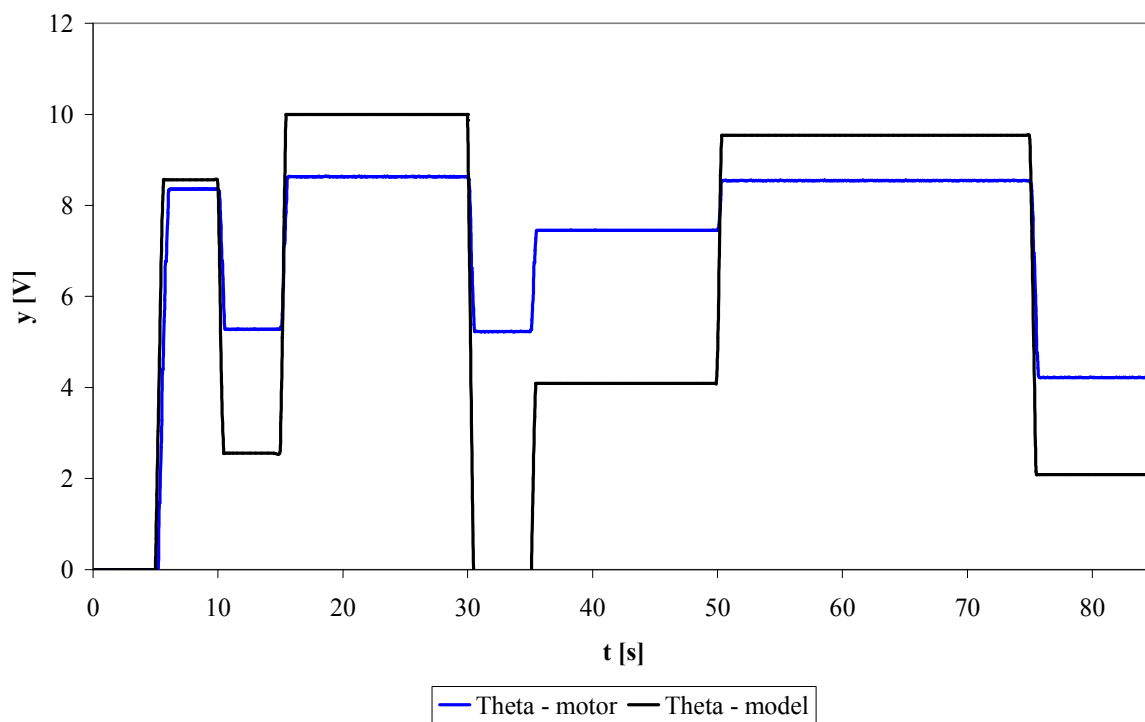
Obrázek 7-3 – Test 1 – otáčky (omega)



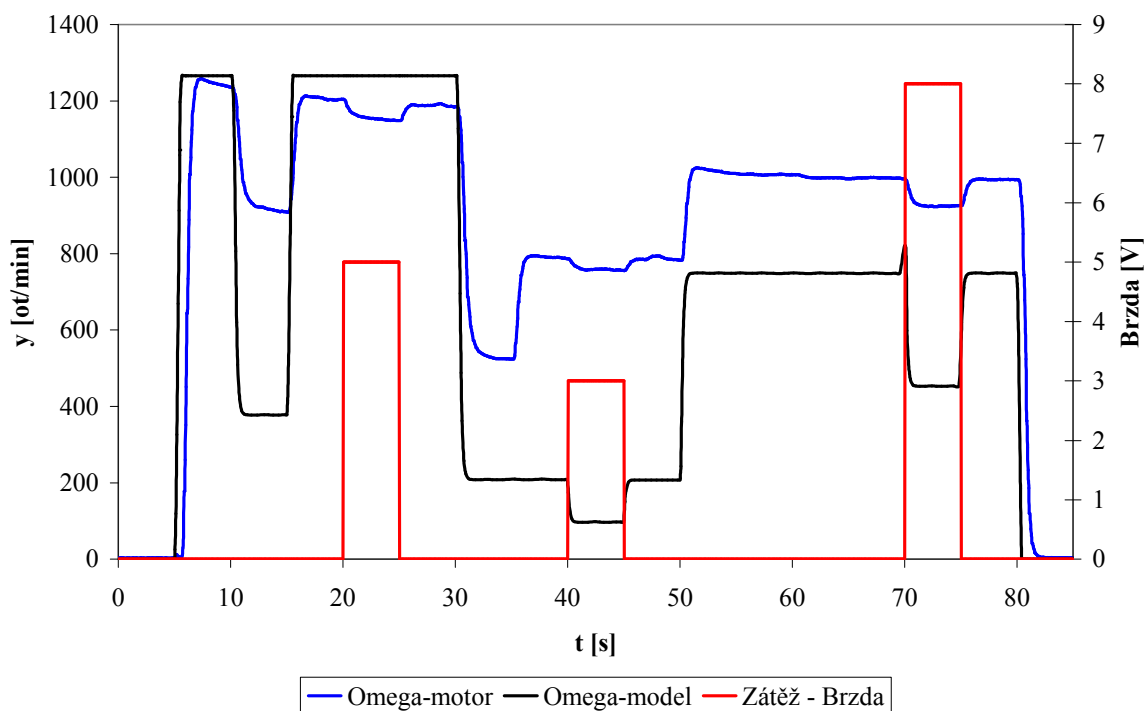
Obrázek 7-4 – Test 1 – pozice ventilu (theta)



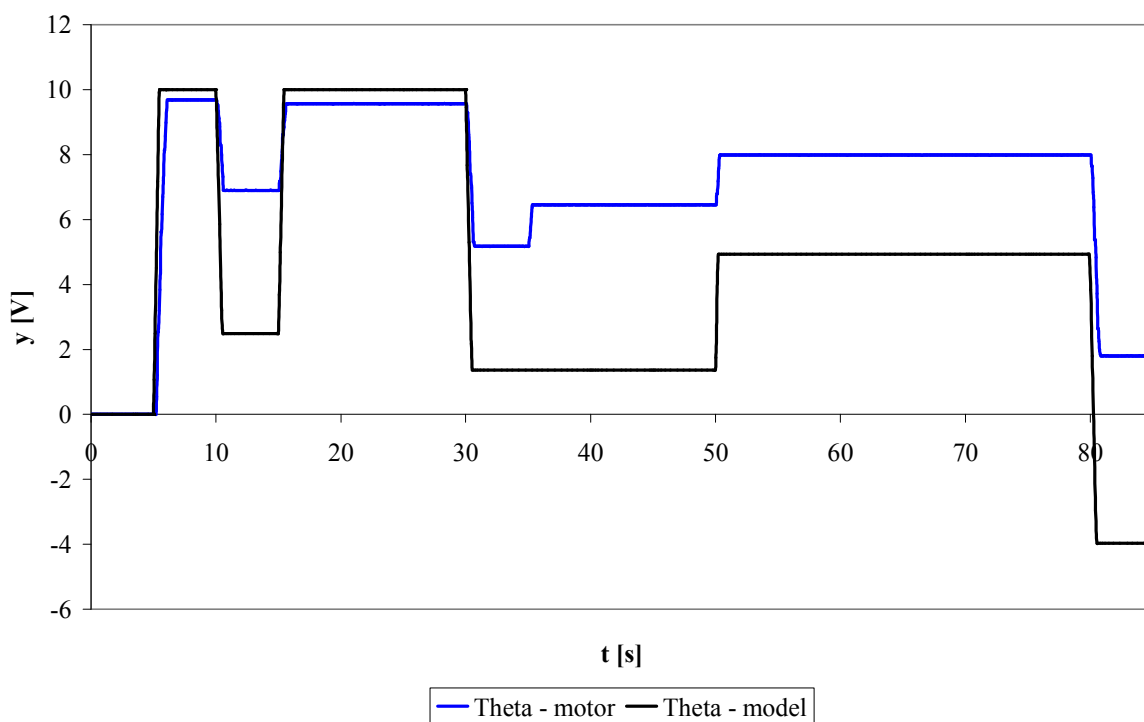
Obrázek 7-5 – Test 2 - otáčky (omega)



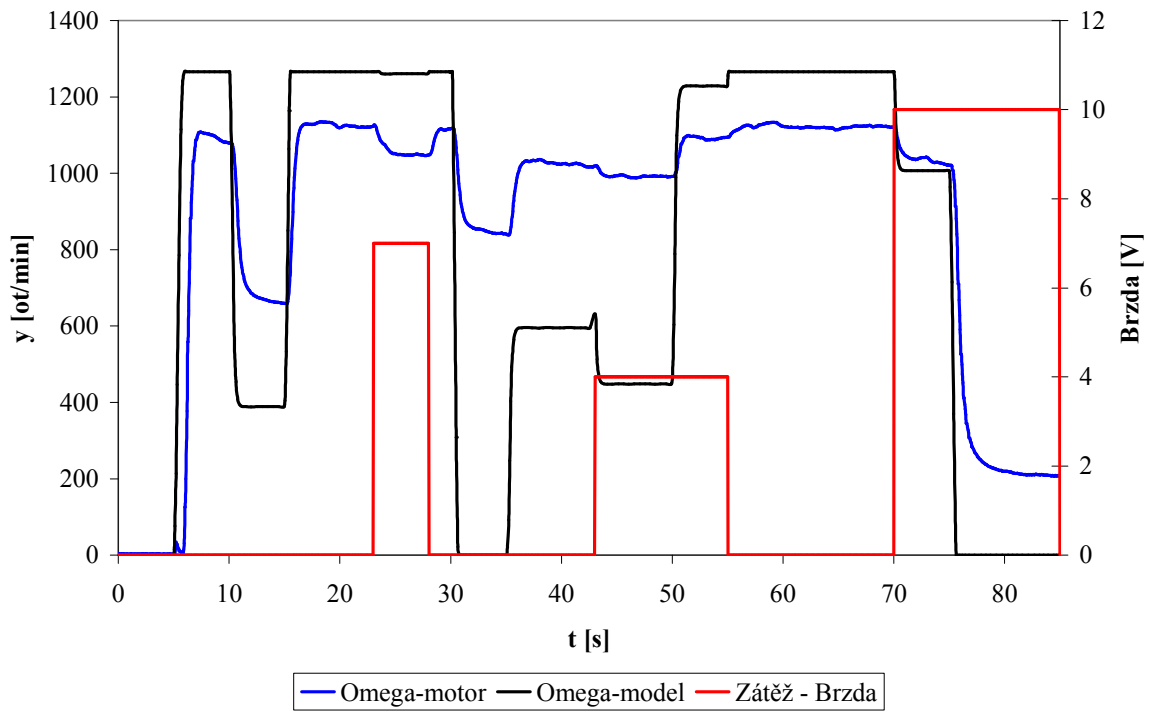
Obrázek 7-6 – Test 2 - pozice ventilu (theta)



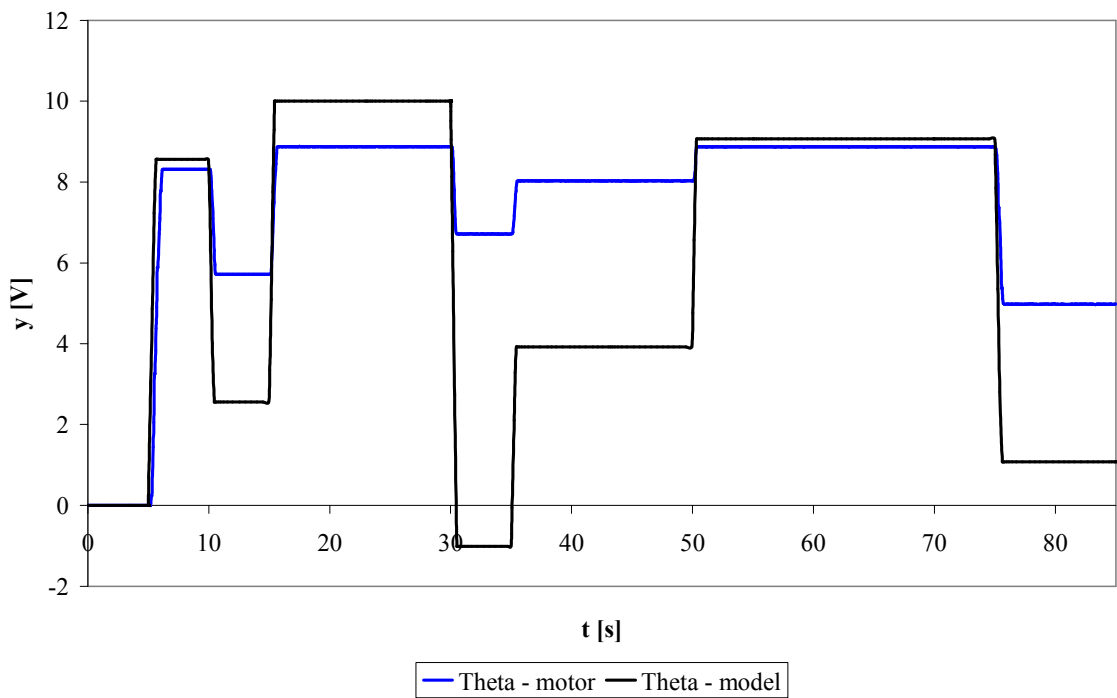
Obrázek 7-7 - Test 3 - otáčky (omega)



Obrázek 7-8 – Test 3 - pozice ventilu (theta)



Obrázek 7-9 – Test 4 – otáčky (omega)



Obrázek 7-10 - Test 4 - pozice ventilu (theta)

Z testů vyplývá, že na vstupní signály reaguje jak reálným motor tak jeho model v celku podobně. Z průběhů lze vidět reakci ventilu (*theta*) na vstupní signál. Tato rozdílná citlivost ventilu motoru, resp. modelu ovlivňuje rychlost otáčení motoru, resp. modelu. Rozdílnost reakcí ventilu, resp. jeho po\_otevření/po\_uzavření u modelu a reálného motoru je dána konstrukcí reálného ventilu a jeho spojení se servo-motorem. Model ventilu je lineární s konstantním (resp. nulovým) odporem v celém jeho rozsahu. Na druhou stranu reálný ventil ve skutečnosti lineární není. V každé pozici klade jiný odpor a tedy je nutná jiná síla ze strany servo-motoru k jeho uzavření/otevření. Spojovací hřídel má dva stupně volnosti a záleží i na aktuální pozici (vyosení) hřídele vůči ventilu. Na druhém konci hřídele je připevněn senzor pozice ventilu v podobě odporového potenciometru. V průběhu používání se samozřejmě mění vnitřní tření tohoto potenciometru při jeho otáčení. Tyto všechny aspekty mají vliv na velikost pootočení ventilu při daném vstupním signálu a tím i na hodnotu změny otáček u reálného motoru. V modelu není možné všechny tyto aspekty zakomponovat protože mají náhodný charakter a některé z nich nejsou reálně měřitelné.

## 8 CHYBY A PROBLÉMY PŘI MĚŘENÍ

V průběhu experimentů, měření a modelování pneumatického motoru se vyskytovali různé chyby a nepřesnosti, které měli vliv na výslednou přesnost modelu.

Jednalo se např. o neznámou přesnost vnitřního senzoru otáček pneumatického motoru a skutečné rychlosti otáčení mechanismu. K odstranění této chyby byla provedena kalibrace otáček. Tímto byla chyba minimalizována na třídu přesnosti optického otáčkoměru, která je s porovnáním s ostatními chybami zanedbatelná. Dále se jednalo o chybu zaokrouhlování při výpočtech u všech měření a jejich vyhodnocování a vliv lidského faktoru.

Další nepřesností je třída přesnosti senzoru pozice ventilu (odporového potenciometru) a její hardwarové vyhodnocení vnitřní elektronikou motoru.

Jedním s největších vlivů na přesnost mělo tření mechanických částí motoru (kliková hřídel, válce) v závislosti na promazání. Aktuální pozice válců při rozjezdu motoru měla vliv na průběh všech měření kromě samostatného měření ventilu.

Bylo potřeba se také potýkat s kolísavostí tlaku vzduchu v centrálním rozvodu. Vznikala v důsledku využití tohoto rozvodu v dalších dílnách a laboratořích. Tuto chybu jsem však kompenzoval opakovaným měřením při správném tlaku vzduchu (0.6MPa). Musel jsem si však toho všimnout a kontrolovat manometr. Na zvuku motoru menší kolísavost tlaku přívodního vzduchu v rozsahu  $\pm 0.05$ MPa nebyla poznat.

Nelinearita ventilu, jeho vnitřní tření (tuhost otáčení) a další chyby v souvislosti s konstrukcí ventilu byly zmíněny v kapitole 7.

Během měření na reálném motoru se dvakrát pokazil senzor pozice ventilu a musel být vyměněn. Také docházelo k velkému utáhnutí ventilu tak, že musel být demontován a za použití hrubé síly opět povolen. Před každým měřením se tato situace musela kontrolovat a v průběhu měření jsem dbal na to, abych se tomuto stavu vyhnul.

Na závěr bych zformuloval několik doporučení pro práci s pneumotorem CE0107. Nejdůležitější je mít konstantní přísun tlaku vzduchu. Doporučuji si zajistit náhradní zdroj např. přenosný generátor. Dále je nutno udržovat mechanické díly vykonávající pohyb naolejovány. Nejlépe promazat přiměřeným množstvím oleje před každým měřením. Důležité je dbát na optimální nastavení průtoku automatického přívodu oleje (olejová

jímka Obrázek 1-2). Příliš malý průtok může znamenat zadrhnutí motoru, příliš velký průtok způsobí netěsnost přívodních hadiček tlaku vzduchu a při vyšších rychlostech motoru jejich vyklouznutí. Využívejte pouze pracovní oblast ventilu. Není doporučeno zajíždět ventilem až do krajních poloh. Kontrolujte mechanické upevnění ventilu. Otřesy dochází k povolování matice a protáčení tyče, na které je ventil uchycen.

## ZÁVĚR

Hlavní náplní této diplomové práce bylo vytvoření zjednodušeného matematického modelu pneumatického motoru CE107 a jeho implementace do prostředí MATLAB/SIMULINK.

Součástí práce bylo také navrhnout vhodný systém řízení se zvolením vhodného regulátoru a jeho parametrů.

V samotné diplomové práci byla podrobně popsána technická specifikace pneumatického motoru včetně vstupně-výstupních signálů.

Byl uveden matematický popis jak dílčích subsystémů (vzduchového ventilu, motoru s klikovou hřídelí, brzdy), tak celého systému pneumatického motoru. Byly zformulovány dvě hlavní diferenciální rovnice. První popisuje chování otáček motoru a druhá dynamiku ventilu. Dále je uveden stručný popis kaskádního řízení způsob kompenzace „mrtvého pásma“ u vzduchového ventilu. Byla provedena kalibrace otáček pomocí optického otáčkoměru.

Byla provedena identifikace samotného ventilu metodou pro aproximaci nekmitavých soustav s integračním členem. Po naměření dynamické charakteristiky byl ventil identifikován jako astatická soustava druhého řádu s pásmem necitlivosti. K odstranění toho pásma byl přidán periodický signál na výstup regulátoru. Následně byla provedena identifikace celého motoru pomocí Strejcovy metody pro soustavu druhého řádu se stejnými časovými konstantami.

Dále byly popsány diferenciální rovnice modelu pro ventil a otáčky. Byly experimentálně určeny neznámé parametry modelu včetně definování jejich jednotek. Výsledný matematický popis je pro ventil

$$\frac{dx}{dt} = g_m * u$$

kde zesílení ventilu  $g_m=2.1043[V*T^{-1}]$  pro ovládací napětí servo-motoru  $u <-10V,10V>$ .

Matematický popis pro výstupní otáčky motoru

$$\frac{d\omega}{dt} = (g_e * x * P_o - b * \omega - g_1 * d_1) / I$$

kde zesílení motoru s klikovou hřídelí  $g_e=2.3911[\text{ot} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}]$ , pozice ventilu  $x$  (též značeno *theta*) v rozsahu  $\langle -10\text{V}, 10\text{V} \rangle$ , tlak na výstupu ventilu  $P_o[\text{bar}]$ , koeficient tření motoru  $b=0.07[-]$ , rychlost  $\omega[\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}]$  (také značena *omega*), zesílení brzdy  $g_f=2.948 [\text{ot} \cdot \text{T}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}]$ , řídicí napětí brzdy  $d_f$  v rozsahu  $\langle .0\text{V}, 10\text{V} \rangle$  a setrvačnost setrvačnicku  $I=0.01[\text{s}]$ .

V kapitole 6 je navrženo simulinkové schéma s kaskádním řízením. Hlavní (nadřazený) regulátor řídí otáčky motoru a vedlejší (také označován jako podřazený regulátor) řídí pozici ventilu. Parametry vedlejšího regulátoru byly vypočítány metodou nastavení z přechodové charakteristiky a pro hlavní regulátor byla zvolena polynomiální metoda s využitím 1DOF struktury. Simulační odezvy s reálně naměřenými daty byly porovnány. Regulační průběhy reálného modelu a simulačního modelu jsou vcelku podobné.

V předposlední kapitole byl testován vytvořený komplexní systém. Byly posílány vstupní signály do servo-motoru a snímána pozice ventilu a rychlost otáčení u reálného motoru i modelu. Tyto hodnoty byly následně porovnány. Z testů vyplývá, že na vstupní signál oba reagují podobně. V některých oblastech však dochází k velkým rozdílům. To je způsobeno tím, že model ventilu je lineární s konstantním (resp. nulovým) odporem v celém jeho rozsahu. Na druhou stranu reálný ventil v každé pozici klade jiný odpor (jiná velikost tření) a ze strany servo-motoru je nutná jiná síla k jeho uzavření/otevření.

Na závěr jsou sepsány problémy a chyby, které se vyskytly v průběhu práce s motorem včetně doporučení pro další efektivní práci s ním.

## CONCLUSION

This thesis was focused to design a simplified mathematic model of CE107 Engine Speed Control apparatus and its implementation into MATLAB/SIMULINK programming environment. The part of this work also covered appropriate control system design.

Technical parameters of the engine concerning input/output signals were also described.

A mathematical model of each subsystem was described in detail (Air Supply Valve, Engine with Crankshaft, Engine Load) together with the overall system model. Two main differential equations were proposed. The first is describing engine speed dynamic and the second air valve dynamic. Then, principle of cascade control and overcoming dead-band was discussed. Speed calibration was done using optical speedometer.

Air valve identification was made using approximation for integral system method. After dynamic characteristic measurement the valve was identified as second order astatic system. The valve has dead-band included. To overcome this dead-band a periodical signal was added to regulator's output. Then, overall system identification was made using Strejc method as second order system with identical time constants.

Further, for valve position and engine speed differential equations were proposed as follows:

Valve mathematical model is

$$\frac{dx}{dt} = g_m * u$$

where valve gain  $g_m=2.1043$ [Volt/Time Period], electric motor input control voltage  $u <-10V,10V>$ .

Engine speed mathematical model is

$$\frac{d\omega}{dt} = (g_e * x * P_o - b * \omega - g_1 * d_1) / I$$

where engine gain  $g_e=2.3911$ [rpm\*Volt<sup>-1</sup>], valve position  $x$  (also named *theta*) has voltage range  $<-10V,10V>$ ,  $P_o$ [bar] is output valve pressure, friction  $b=0.07$ [-], engine speed

$\omega$ [rpm] (also named *omega*), load gain  $g_I=2.948$ [revolution\*Time Period<sup>-1</sup>\*Volt], input load voltage  $d_I$  range <.0V,10V> and flywheel inertia  $I=0.01$ [second].

In Chapter 6 cascade control scheme was proposed. Master controller controls engine speed and slave controller controls valve position. To compute slave controller parameters the adjusting from step response method was used. For the master controller parameters were computed using the 1DOF control configuration and polynomial method.

Overall engine system was tested and both model and real engine output data were compared. Voltage impulse signal was input to the electrical motor and valve position with engine speed were measured. The responses of model and real engine were similar except some situations, where the valve position difference was significant. This behavior was mainly caused by non-linear characteristic of the real valve. There was also unequal friction in different valve position such that the electrical motor had to use different power to overcome that.

In the last chapter problems and errors were described, together with final recommendations for future work with this interesting system.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BARNES, Belinda; FULFORD, Glenn R. *Mathematical modelling with case studies : a differential equation approach using Maple*. London : Taylor & Francis, 2002 [cit 2011-05-21]. xiv s. ISBN 0415298040
- [2] *CE107 Engine Speed Control*. TQ Education and Training Ltd, 2004 [cit 2011-01-26]. 84 s.
- [3] WELLSTEAD, P; READMAN, M. ©2004 [cit. 2011-01-28]. *Technical White Paper on Engine Speed Control*. Dostupné z WWW: <<http://control-systems-principles.co.uk/whitepapers/engine-speed-control.pdf>>.
- [4] <http://www.tecquipment.com> [online].2004. *CE107 Engine Speed Control Apparatus*. Product Datasheet. Dostupné z WWW: <[http://www.tecquipment.com/Datasheets/CE107\\_0509.pdf](http://www.tecquipment.com/Datasheets/CE107_0509.pdf)>.
- [5] BALÁTĚ, Jaroslav. *Automatické řízení*. 2., přeprac. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2004 [cit 2011-05-07]. 663 s. ISBN 80-7300-148-9
- [6] ÅSTRÖM, Karl J; HÄGGLUND, Tore. *PID controllers : theory, design, and tuning*. 2nd ed. Triangle Park : Instrument Society of America, 1995[cit. 2011-05-08]. . 343 s. ISBN 1556175167
- [7] FROLKA, V. *Pneumatiký motor CE 107: diplomová práce*. Zlín, 2007 [cit 2011-05-15]. 106 s. Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. Vedoucí práce Ing. František Gazdoš, Ph.D.
- [8] BOBÁL, Vladimír. *Identifikace systémů*. Vyd. 1. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009 [cit. 2011-05-01]. 128 s. ISBN 978-80-7318-888-7
- [9] SOUSEDÍK, P. *Elektronická podpora výuky pro oblast automatického řízení – Informační systém CAAC; Tématický okruh ANALÝZA: bakalářská práce*. Zlín, 2008 [cit. 2011-05-08]. 116 s. Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. Vedoucí práce Ing. Pavel Navrátil, Ph.D.
- [10] DOSTÁL, P; MATUŠŮ, R. *Stavová a algebraická teorie řízení [elektronická skripta]*. ©2010. Pro studenty je plný text dostupný na adrese: <[https://web.fai.utb.cz/cs/docs/Skripta\\_SATR.pdf](https://web.fai.utb.cz/cs/docs/Skripta_SATR.pdf)>.
- [11] HUANG,HSIAO-PING, CHIEN, I-LUNG, LEE, YUEH-CHUNG and WANG, GOW-BIN(1998). *A Simple Method for Tuning Cascade Control Systems*, Chemical Engineering Communications, 165: 1, 89 — 12. Elektronická verze ve formátu PDF dostupná také z WWW (DOI):< <http://dx.doi.org/10.1080/00986449808912371>>
- [12] SOUSEDÍK, P.. *Rozšíření modelů technologických procesů*. 2009 [cit 2011-04-25]. Příspěvek na STOČ Ostrava 2009. Dostupné z WWW: <<http://www.fs.vsb.cz/akce/2009/stoc2009/proceedings/5.pdf>>
- [13] MAYR, O. *The Origins of Feedback Control*. Michigan: M.I.T. Press, 1975 [cit 2011-05-22]. 176 s. ISBN 0-262-63056-7
- [14] BENNETT, S. *A History of Control Engineering, 1930-1955*. Peregrinus, 1993 [cit 2011-05-22]. 250 s. Část textu dostupná na Google Books: <[http://books.google.com/books?id=VD\\_b81J3yFoC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false](http://books.google.com/books?id=VD_b81J3yFoC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false)>. ISBN 0-86341-299-8.
- [15] UGLOW, J. S. *The Lunar Men: The Friends Who Made the Future*. Faber and Faber 2002 [cit 2011-05-22]. 608 s. ISBN 0-57121-610-2.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

|          |  |
|----------|--|
| $b$      | součinitel smykového tření [-]                         |
| $d_l$    | vstupní napětí brzdy (zátěže) [V]                      |
| $F$      | síla [N]   |
| $G$      | obecný přenos [-]                                      |
| $g_l$    | zesílení brzdy (zátěže) [ot. $T^{-1}$ . $V^{-1}$ ]     |
| $g_e$    | zesílení pneumotoru [ot.min $^{-1}$ . $V^{-1}$ ]       |
| $g_m$    | zesílení klapky [ $V$ . $T^{-1}$ ]                     |
| $g_v$    | zesílení klapky [bar. $V^{-1}$ ]                       |
| $I$      | setrvačnost setrvačnicku (časová konstanta motoru) [s] |
| $k_s$    | zesílení senzoru rychlosti otáčení [-]                 |
| $P$      | tlak [Bar]   |
| $T$      | časová konstanta [s]                                   |
| $tz$     | koeficient ztráty tlaku ventilu [bar/bar]              |
| $u$      | napětí [V]   |
| $u_{sm}$ | napětí servo-motoru [V]                                |
| $v_i$    | vstupní napětí klapky [V]                              |
| $x$      | pozice klapky [V]                                      |
| $\tau_l$ | zátěžný moment [N.m]                                   |
| $\tau_e$ | točivý moment pneumotoru [N.m]                         |
| $\tau_f$ | třecí moment [-]                                       |
| $\omega$ | otáčky pneumotoru [ot/min]                             |

## SEZNAM OBRÁZKŮ

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 1-1 - Struktura diplomové práce.....  | 9  |
| Obrázek 1-1 - Pneumatický motor CE 107.....   | 10 |
| Obrázek 1-2 – Popis modelu.....   | 11 |
| Obrázek 1-3 – Konstrukce čtyřválcového motoru .....                                       | 12 |
| Obrázek 1-4 – Setrvačnick s děrovaným diskem a optickým senzorem .....                    | 13 |
| Obrázek 2-1 - Zpětnovazební systém klapky.....  | 15 |
| Obrázek 2-2 - Blokový diagram modelu klapky.....  | 16 |
| Obrázek 2-3 – Diagram rovnice točivého momentu.....                                       | 16 |
| Obrázek 2-4 – Blokový diagram odpovídající rovnici motoru a zátěže .....                  | 17 |
| Obrázek 2-5 - Celkový model systému.....  | 18 |
| Obrázek 2-6 - Upravený celkový model systému .....  | 18 |
| Obrázek 3-2 - S-funkce pro pneumatický motor .....  | 21 |
| Obrázek 3-3 - Blok pneumotoru se čtyřmi vstupy a dvěma výstupy .....                      | 22 |
| Obrázek 3-4 - Vytvořené menu pneumotoru .....   | 23 |
| Obrázek 3-5 - Ukázka části <b>m-filu</b> pro pneumatický motor.....                       | 23 |
| Obrázek 4-1 - Schéma kaskádního řízení motoru.....  | 25 |
| Obrázek 4-2 - Mrtvé pásmo .....   | 26 |
| Obrázek 4-3 - Odstranění mrtvého pásma .....  | 26 |
| Obrázek 5-1 – Schéma pro kalibraci otáček .....   | 27 |
| Obrázek 5-2 - Kalibrace otáček pneumotoru .....   | 28 |
| Obrázek 5-3- Schéma pro měření statické charakteristiky .....                             | 29 |
| Obrázek 5-4 – Statická charakteristika [V] - [V].....                                     | 29 |
| Obrázek 5-5 – Statická charakteristika [ot/min] - [%].....                                | 30 |
| Obrázek 5-6 – Schéma pro měření dynamické charakteristiky ventilu .....                   | 31 |
| Obrázek 5-7 – Dynamická charakteristika ventilu.....                                      | 32 |
| Obrázek 5-8 – Průměr přechodových charakteristik ventilu.....                             | 33 |
| Obrázek 5-9 – Porovnání naměřené a identifikované PCH ventilu .....                       | 35 |
| Obrázek 5-10 - Schéma pro měření statické charakteristiky motoru.....                     | 36 |
| Obrázek 5-11 – Změna otáček [V] v závislosti na změně pozice klapky ventilu [V] .....     | 37 |
| Obrázek 5-12 – Změna otáček [ot/min] v závislosti na změně pozice klapky ventilu [%]..... | 37 |

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 5-13 – Přejížděvací charakteristika soustavy .....                  | 38 |
| Obrázek 5-14 - Normovaná PCH motoru .....                                   | 39 |
| Obrázek 5-15 - Graf pro odečet parametrů Strejcovy metody .....             | 40 |
| Obrázek 5-16 - Porovnání naměřené a identifikované PCH motoru .....         | 42 |
| Obrázek 5-17 – Přejížděvací charakteristika zátěže - brzdy .....            | 43 |
| Obrázek 6-1 - Schéma pro regulaci ventilu – reálný motor .....              | 45 |
| Obrázek 6-2- Schéma pro regulaci ventilu – model .....                      | 46 |
| Obrázek 6-3 - Průběh řízení ventilu – reálný motor (1).....                 | 47 |
| Obrázek 6-4 – Akční zásah regulátoru – reálný motor (1).....                | 47 |
| Obrázek 6-5 - Průběh řízení ventilu – reálný motor (2).....                 | 48 |
| Obrázek 6-6 - Akční zásah regulátoru – reálný motor (2) .....               | 48 |
| Obrázek 6-7 - Průběh řízení ventilu – model (1) .....                       | 49 |
| Obrázek 6-8 - Akční zásah regulátoru – model (1).....                       | 49 |
| Obrázek 6-9 - Průběh řízení ventilu – model (2) .....                       | 50 |
| Obrázek 6-10 - Akční zásah regulátoru – model (2).....                      | 50 |
| Obrázek 6-11 – Regulační pochod pro regulátor s parametrem $m=4$ .....      | 54 |
| Obrázek 6-12 – Průběh akčního zásahu pro regulátor s parametrem $m=4$ ..... | 54 |
| Obrázek 6-13 - Regulační pochod pro regulátor s parametrem $m=5$ .....      | 55 |
| Obrázek 6-14 - Průběh akčního zásahu pro regulátor s parametrem $m=5$ ..... | 55 |
| Obrázek 6-15 – Regulační pochod pro regulátor s parametrem $m=6$ .....      | 56 |
| Obrázek 6-16 - Průběh akčního zásahu pro regulátor s parametrem $m=6$ ..... | 56 |
| Obrázek 6-17 - Schéma pro regulaci otáček – reálný motor.....               | 59 |
| Obrázek 6-18 - Schéma pro regulaci otáček – model .....                     | 59 |
| Obrázek 6-19 – Regulační průběh otáček – reálný motor (1).....              | 60 |
| Obrázek 6-20 – Akční zásah – reálný motor (1).....                          | 60 |
| Obrázek 6-21 – Regulační průběh otáček – reálný motor (2).....              | 61 |
| Obrázek 6-22 – Akční zásah – reálný motor (2).....                          | 61 |
| Obrázek 6-23 – Regulační průběh otáček – reálný motor (3).....              | 62 |
| Obrázek 6-24 - Akční zásah – reálný motor (3).....                          | 62 |
| Obrázek 6-25 - Regulační průběh otáček – model (1) .....                    | 63 |
| Obrázek 6-26 – Akční zásah – model (1) .....                                | 63 |
| Obrázek 6-27 – Regulační průběh otáček – model (2) .....                    | 64 |
| Obrázek 6-28 – Akční zásah – model (2) .....                                | 64 |

---

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 6-29 – Regulační průběh otáček – model (3) ..... | 65 |
| Obrázek 6-30 - Akční zásah – model (3) .....             | 65 |
| Obrázek 6-31 – Porovnání regulace otáček (1).....        | 66 |
| Obrázek 6-32 – Porovnání regulace otáček (2).....        | 66 |
| Obrázek 6-33 - Porovnání regulace otáček (3) .....       | 67 |
| Obrázek 7-1 - Schéma pro Benchmark – reálný motor.....   | 68 |
| Obrázek 7-2- Schéma pro Benchmark - model.....           | 68 |
| Obrázek 7-3 – Test 1 – otáčky (omega).....               | 69 |
| Obrázek 7-4 – Test 1 – pozice ventilu (theta).....       | 69 |
| Obrázek 7-5 – Test 2 - otáčky (omega).....               | 70 |
| Obrázek 7-6 – Test 2 - pozice ventilu (theta) .....      | 70 |
| Obrázek 7-7 - Test 3 - otáčky (omega) .....              | 71 |
| Obrázek 7-8 – Test 3 - pozice ventilu (theta) .....      | 71 |
| Obrázek 7-9 – Test 4 – otáčky (omega).....               | 72 |
| Obrázek 7-10 - Test 4 - pozice ventilu (theta) .....     | 72 |

**SEZNAM TABULEK**

|   |    |
|---|----|
| Tabulka 5-1 - Hodnoty pro určení řádu soustavy.....                 | 34 |
| Tabulka 5-2 - Hodnoty změny ventilu a změny otáček .....            | 36 |
| Tabulka 5-3 - Hodnoty pro vyhodnocování soustav $n$ -tého řádu..... | 40 |
| Tabulka 6-1 - Hodnoty parametrů regulátoru .....                    | 45 |
| Tabulka 6-2 - Vyhodnocení kvality regulace ventilu.....             | 51 |
| Tabulka 6-3 - Parametry regulátoru pro motor .....                  | 53 |
| Tabulka 6-4 – Kvalita regulace - Model .....                        | 57 |
| Tabulka 6-5 - Kvalita regulace – Reálný motor.....                  | 57 |
| Tabulka 6-6 – Nastavení a vyhodnocení kvality regulace .....        | 58 |

## SEZNAM PŘÍLOH

PI ZDROJOVÝ KÓD (M-FILE)

PII OBSAH PŘILOŽENÉHO CD-ROM

**PŘÍLOHA P I: ZDROJOVÝ KÓD (M-FILE)**

```
function [sys,x0,str,ts] = pm(t,x,u,flag,I,g1,b,ge,gm,w0,u0,tz)

%Tento blok simuluje chovani pneumatickeho motoru CE107. Vstupnimi parametry
%jsou vstupni tlak "Pv", napeti elektromotoru "uu", napeti brzdy "d1"

% s-funkce pro vypocet dynamiky systemu

% PNEUMOTOR C107

%=====

% Pv ... vstupni tlak (na vstupu do klapky)[bar]

% uu ... ridici napeti elektromotoru ovladajiciho klapku [V]

% d1 ... ridici napeti brzdy (zateze) [V]

% w ... rychlost motoru (omega) [ot/min]

% w0 ... pocatecni rychlost motoru (omega) [ot/min]

% x ... pozice klapky [V]

% u0 ... pocatecni pozice klapky [V]

% g1 ... zesileni brzdy [ot/(T*V)]

% b ... soucinitel smykoveho treni [Kg.m^2/s]

% ge ... zesileni motoru s klikovou hrideli (system) [ot/(min*V)]

% gm ... zesileni elektromotoru klapky [V/T]

% I ... setrvacnost setrvacniku [s]

% tz ... koeficient ztraty tlaku ventilu [-]
```

```
switch flag,
```

```
case 0
```

```
[sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes(t,x,u,flag,w0,u0); % Inicializace
```

```
case 1
```

```
sys = mdlDerivatives(t,x,u,I,g1,b,ge,gm,tz); % vypocet derivaci
```

```
case 3
```

```
sys = mdlOutputs(t,x); % vypocet vystupu
```

```
case { 2, 4, 9 } % nepouzite flagy
```

```
sys = [];
```

```
otherwise
```

```
error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]); % Chyba obsluhy
```

```
end
```

```
%=====
```

```
% mdlInitializeSizes
```

```
% Vraci rozmery, pocatec. podminky a periody vzorkovani pro
```

```
% S-funkci.
```

```
%=====
```

```
function [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes(t,x,u,flag,w0,u0)
```

```
sizes = simsizes;

sizes.NumContStates = 2; % pocet spojitych stavu - w(t),x(t)

sizes.NumDiscStates = 0; % pocet diskretnich stavu

sizes.NumOutputs = 2; % pocet vystupu - w(t), x(t)

sizes.NumInputs = 3; % pocet vstupu - Pv(t), u(t), d1(t)

sizes.DirFeedthrough = 1; % '0' jestlize se ve vystupu nepouziva vstupni signal, '1' kdyz
%ano

sizes.NumSampleTimes = 1; % pocet period vzorkovani (min. 1)

sys = simsizes(sizes);

% Inicializace pocatecnich podminek

x0 = [w0 u0];

% retezec razeni stavu - obecne specifikovany jako []

str = [];

ts = [0 0]; % perioda vzorkovani a offset, pro spojite systemy [0 0]

%=====

% mdlDerivatives

% Vratí derivace spojitych stavu

%=====

function sys = mdlDerivatives(t,x,u,I,g1,b,ge,gm,tz)
```

```
%ROVNICE - matematicky model
```

```
%-----
```

```
%otacky motoru
```

```
sys(1) =(ge*(x(2))*u(1)*tz -b*x(1) -g1*u(3))/I;
```

```
%Ventil
```

```
%otevirani ventilu (0-100% za 1.3s pri +10V)
```

```
if u(2)>=0
```

```
    if x(2) > 10,
```

```
        sys(2) = 0;
```

```
    else
```

```
        sys(2) = u(2)*gm;
```

```
    end
```

```
end
```

```
%zavirani ventilu (0-100% za 1.15s pri -10V)
```

```
if u(2)<0
```

```
    if x(2) < -10,
```

```
        sys(2) = 0;
```

```
    else
```

```
        sys(2) = u(2)*gm*1.026;

    end

end

%Podminky a osetreni
%-----

%Osetreni maximalnich otacek

if x(1) > 1266
    x(1)=1266;
end

%Osetreni privodniho tlaku Pv

if u(1)>7
    error('Privodni tlak vyduchu moc velky.Hrozi poskozeni motoru!');
end

if u(1) < 0
    error('Tlak na vstupu je mimo rozsah');
end
```

```
%=====
% mdlOutputs
% Vratí výstup bloku
%=====

function sys = mdlOutputs(t,x)

%Prirazeni vystupu
%-----

sys(1)=x(1); %OMEGA, otacky
sys(2)=x(2); %THETA, pozice ventilu

%Podminky a osetreni
%-----

%Osetreni maximalnich otacek
if sys(1) > 1266
    sys(1)=1266;
end

%Osetreni zapornych otacek
if sys(1) < 0
    sys(1)=0;
end
```

## PŘÍLOHA P II: OBSAH PŘILOŽENÉHO CD-ROMU

Na zadní straně desek je vložen 1 CD-ROM, který obsahuje adresáře s níže uvedeným obsahem:

- adresář „Program“
  - obsahuje soubory potřebné k běhu vytvořeného modelu pneumatického motoru, vytvořenému v programovém prostředí MATLAB a SIMULINK.
  -
- adresář „DP“
  - elektronická verze diplomové práce