

Pneumatický motor CE 107

CE107 Engine Speed Control

Bc. Vilém Frolka

Diplomová práce
2007



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav automatizace a řídicí techniky
akademický rok: 2006/2007

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

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

Téma práce: **Pneumatický motor CE 107**

Zásady pro vypracování:

1. **Důkladně se seznamte s reálným modelem pneumatického motoru CE 107 včetně dostupné literatury.**
2. **Naměřte statické charakteristiky tohoto systému a na základě nich doporučte vhodnou pracovní oblast pro řízení.**
3. **Provedte kalibraci otáček.**
4. **V různých pracovních bodech naměřte dynamické charakteristiky a na základě nich provedte experimentální identifikaci. Srovnajte dynamiku identifikovaných modelů s reálnou dynamikou systému.**
5. **Navrhněte vhodné metody řízení a experimentálně je ověřte.**
6. **Vytvořte stručný manuál k danému modelu včetně návrhu laboratorních úloh pro studenty.**

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

[1] CE 107 Engine Speed Control. TQ Education and Training Ltd, 2004.

[2] CE 107 Engine Speed Control — Safety Guide. TQ Education and Training Ltd, 2004.

[3] Engine speed control apparatus. Product data sheet. TQ Education and Training Ltd, ver. 21/3/2005.

[4] Bobál, V., Böhm, J., Prokop, R., Fessler, J.: Praktické aspekty samočinně se nastavujících regulátorů: algoritmy a implementace. Vutium, VUT v Brně, 1999.

[5] Mikleš, J., Fikar, M.: Modelovanie, identifikácia a riadenie procesov I. Vydavateľstvo STU, Bratislava, 1999.

[6] Wellstead, P., Readman, M.: Engine speed control. Technical white paper. Control systems principles, ver. 8/5/2004.

[7] Real time toolbox – user's manual. Humusoft s.r.o.. 2003.

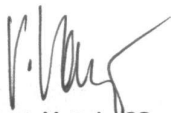
Vedoucí diplomové práce: **Ing. František Gazdoš, Ph.D.**

Ústav řízení procesů


Datum zadání diplomové práce: **13. února 2007**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2007**

Ve Zlíně dne 13. února 2007


prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan




prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Hlavním cílem diplomové práce bylo řízení otáček u pneumatického motoru CE 107 v prostředí MATLAB. Za tímto účelem byly naměřeny statické charakteristiky, provedla se kalibrace otáček, identifikace ventilu a identifikace celé soustavy. Model byl řízen pomocí kaskádní regulace, kde se využívají dva regulátory. Primární regulátor řídí otáčky a sekundární řídí pozici ventilu. Závěrem je pak přiložen stručný manuál a návrh laboratorní úlohy pro studenty.

Klíčová slova:

Řízení otáček motoru, CE 107, kaskádní řízení, identifikace

ABSTRACT

The main goal of this thesis was to continue speed of the CE 107 Engine Speed Control apparatus in the MATLAB environment. First, complete identification of the system was done including speed calibration. This was then used for cascade control of the process. This type of control uses two controllers - the first one regulator speed & the second control valve position. At the end of this work, a brief manual together with a concept for student's laboratory work are also included.

Keywords:

Engine speed control, CE 107, cascade control, identification

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Františku Gazdošovi, Ph.D. za odborné rady a podněty, které mi poskytoval během řešení diplomové práce.

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, 21. 5. 2007

.....

Vilém Frolka

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 ŘÍZENÍ RYCHLOSTI MOTORŮ	10
1.1 HISTORIE	10
1.2 VÝZNAMNOST REGULACE OTÁČEK V SOUČASNOSTI	10
1.3 ŘÍZENÍ RYCHLOSTI PARNÍHO MOTORU	11
1.4 TYPICKÉ POŽADAVKY NA ŘÍZENÍ MOTORU.....	12
1.4.1 Kompenzace mrtvého pásma	12
2 MODEL PNEUMATICKÉHO MOTORU CE 107	14
2.1 POPIS MODELU	14
2.2 APARATURA MODELU.....	15
2.2.1 Motor a setrvačnick.....	16
2.2.2 Přívod vzduchu.....	17
2.2.3 Technická specifikace	18
3 PŘIPOJENÍ A ŘÍZENÍ MODELU	19
3.1 PŘIPOJENÍ	19
3.2 MULTIFUNKČNÍ VSTUPNĚ-VÝSTUPNÍ KARTA MF614.....	20
3.2.1 Parametry karty	20
3.3 MATLAB	20
3.3.1 Popis	20
3.3.2 Co MATLAB nabízí	21
3.4 REAL TIME TOOLBOX.....	21
3.4.1 Základní rysy.....	21
3.4.2 Vlastnosti.....	21
3.5 NÁSTAVBA MATLABU SIMULINK	22
4 KASKÁDNÍ ŘÍZENÍ	23
4.1 VÝHODY KASKÁDNÍ REGULACE.....	23
4.2 KASKÁDNÍ REGULACE U ŘÍZENÍ MOTORU	23
II PRAKTICKÁ ČÁST	25
5 MĚŘENÍ STATICKÝCH CHARAKTERISTIK	26
5.1 KALIBRACE OTÁČEK.....	27
6 MĚŘENÍ DYNAMICKÝCH CHARAKTERISTIK A IDENTIFIKACE	29

6.1	DYNAMICKÁ CHARAKTERISTIKA VENTILU.....	29
6.2	EXPERIMENTÁLNÍ IDENTIFIKACE VENTILU	30
6.3	DYNAMICKÁ CHARAKTERISTIKA SOUSTAVY	32
6.4	EXPERIMENTÁLNÍ IDENTIFIKACE SOUSTAVY	34
7	REGULACE VENTILU	38
7.1	REGULACE S P A PI REGULÁTOREM:.....	38
7.2	REGULACE S 1DOF REGULÁTOREM	42
7.2.1	Výpočet 1DOF regulátoru:.....	42
7.2.2	Parametry 1DOF regulátoru:.....	44
8	REGULACE SOUSTAVY.....	51
8.1	REGULACE BEZ ZÁTĚŽE	51
8.1.1	Regulace soustavy 1DOF regulátorem.....	52
8.1.2	Regulace PI a PID regulátorem.....	60
8.1.3	Regulace adaptivním regulátorem.....	67
8.2	POROVNÁNÍ KVALITY ŘÍZENÍ S_Y A S_U U VŠECH REGULÁTORŮ	69
8.3	REGULACE SE ZÁTĚŽÍ	71
8.3.1	Regulace 1DOF regulátorem při zatížení motoru	71
8.3.2	Regulace PI a PID regulátorem při zatížení motoru	74
8.3.3	Regulace adaptivním regulátorem při zatížení motoru	79
8.4	POROVNÁNÍ KVALITY ŘÍZENÍ S_Y A S_U U VŠECH REGULÁTORŮ PŘI ZATÍŽENÍ 30% A 60%	82
	ZÁVĚR.....	84
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ	86
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	88
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	90
	SEZNAM OBRÁZKŮ	91
	SEZNAM TABULEK.....	95
	SEZNAM PŘÍLOH.....	96

ÚVOD

Úkolem této práce je řízení otáček u pneumatického motoru CE 107. Nejdříve bylo provedeno naměření statických charakteristik, aby bylo možné určit vhodnou oblast pro řízení otáček motoru. Dále byly naměřeny dynamické charakteristiky a provedena následná identifikace ventilu, který ovládá vstup vzduchu do válců. Vzhledem k tomu, že motor ovládající vzduchový ventil obsahuje pásmo necitlivosti, bylo toto odstraněno přidáním periodického signálu na vstup motoru. V dalším bodě byl navržen a prakticky ověřen vhodný regulátor pro řízení pozice ventilu.

Dále byly naměřeny dynamické charakteristiky celé soustavy a následně se provedly identifikace. Aby bylo možné soustavu řídit je nutné využít kaskádní regulaci, která využívá dvou regulátorů. Sekundární regulátor řídí pozici ventilu a primární řídí otáčky motoru. Za sekundární regulátor se dosadil ten, který dosáhl nejlepší kvality řízení a je výchozí pro regulaci celé soustavy. Jako primární regulátor bylo zvoleno několik typů regulátorů a ty byly prakticky ověřeny.

V dalších bodech práce byla prováděna regulace otáček při zatížení. Byly vybrány nejkvalitnější regulátory u primární smyčky a ty byly ověřeny při regulaci se zátěží. Při řízení byly voleny dvě hodnoty zátěže, které se přidávaly ke třem hodnotám otáček. Nakonec bylo provedeno posouzení kvality řízení vyhodnocením nejkvalitnějšího regulátoru pro řízení se zátěží.

Tlak do pneumatického motor byl dodáván pomocí kompresoru nebo tlakového rozvodu v budově školy.

V závěru diplomové práce je přiložen stručný manuál k laboratornímu modelu a navržena úloha pro studenty.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ŘÍZENÍ RYCHLOSTI MOTORŮ

1.1 Historie

Potřeba řízení otáček nastala koncem 18. století s vývojem parního stroje. James Watt navrhl na řízení odstředivý regulátor. Principem jeho funkce je ventil připojený k páře přes rotační váhu. Jakmile se změnily otáčky motoru, odstředivá síla na váhy se změnila, a váhy zvedly nebo spustily prstenec na hřídeli regulátoru. Prstenec je připojený k ventilu, který ovládá páru vstupující do válců parního stroje. Odstředivý regulátor a vazba s parním ventilem vytvoří záporný uzavřený regulační obvod se kterým je možné ovládat otáčky motoru. Odstředivý regulátor měl sklon k nestabilitě, kterou způsobovalo periodické kmitání motoru. Astronom G. B. Airy navrhl překonání nestability přidáním třetího tlumiče. Dále Clerk Maxwell (1831 - 1879) vymyslel matematickou analýzu stabilního regulačního obvodu. Od té doby je automatické řízení označováno jako disciplína. [1]

1.2 Významnost regulace otáček v současnosti

V současné době je regulace otáček u motorů velmi důležitá. Benzínové a naftové motory pro automobily a nákladní vozy jsou nejdůležitější motory našeho věku. Moderní automobily jsou řízeny elektronickými řídicími jednotkami. Při řízení motoru je nutné ještě kromě dávkování paliva regulovat:

- předstih zapalování
- palivově – vzdušnou klapku ke snížení množství emisí
- požadavky výkonu

Běžně se vyskytující řídicí problém je regulace rychlosti v podmínkách proměnného zatížení. Typické příklady takových systémů jsou:

- a) Elektrický generátor – jako pohon slouží spalovací motor nebo turbína, které poskytují vstupní energii a ta se převádí na výstupní elektrickou energii. Pro udržení výstupního napětí a frekvence při měnícím se zatížení je nutné udržet rychlost motoru nebo turbíny v určitých specifikovaných hranicích. Změna rychlosti je prováděna ručně nebo automaticky přísunem paliva do motoru nebo páry do parní turbíny.

- b) Udržení stálé rychlosti jízdy na motorovém vozidle (tempomat) – zařízení umožňuje řidiči, aby si zvolil rychlost, kterou pojedje na dlouhém úseku. Regulační systém vyřadí z funkce plynový pedál a udržuje zadanou rychlost vozidla bez ohledu na to, zda je cesta z kopce nebo do kopce. [2]

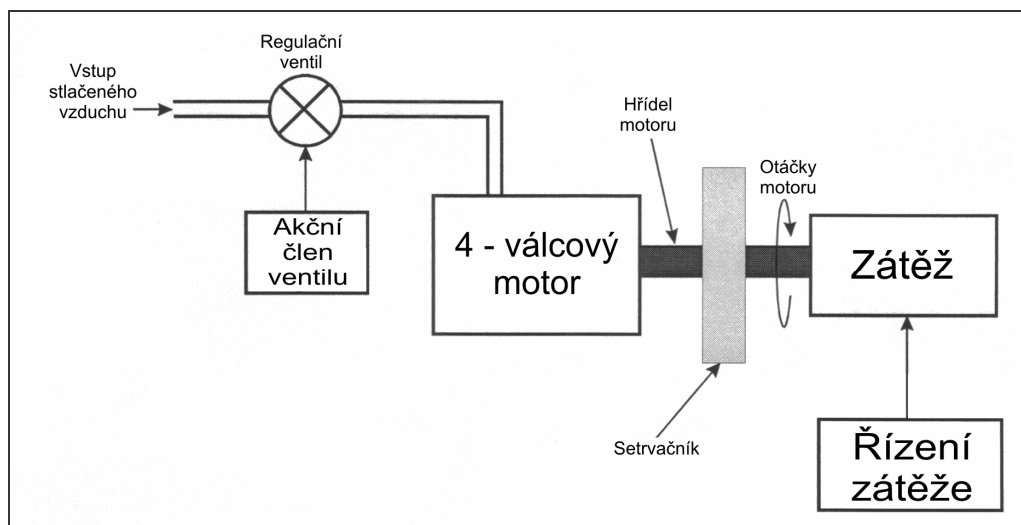
1.3 Řízení rychlosti parního motoru

Základní prvky řídicího systému motoru, které vedly k vývoji regulátorů jsou:

- ventil, kterým se mění zásobovací poměr paliva (stlačeného vzduchu)
- pístový motor
- výstupní hřídel se setrvačníkem a zátěží

Vstupní ventil tohoto systému je velmi důležitá část – ventil je nelineární s pásmem necitlivosti (*dead-zone*) na vstupu. Pásmo necitlivosti je obvykle způsobeno statickým třením. Vstupní ventil standardního systému je vytvořen tak, že stálý řídicí vstup do ventilu způsobuje stálou změnu rychlosti polohy ventilu. [1]

Na obrázku (Obr. 1) je znázorněno použití řídicího systému pro řízení motoru na stlačený vzduch. Stlačený vzduch vstupuje do 4 – válcového motoru přes regulační ventil. Výkon motoru se přenáší pomocí hřídele. Na hřídeli je umístěn setrvačník a zátěž.



Obr. 1. Schéma systému řízení motoru na stlačený vzduch

1.4 Typické požadavky na řízení motoru

Řízení otáček motoru jak je zobrazeno na obrázku (Obr. 1) má dvě hlavní složky, které se nacházejí v mnoha případech u ovládání motorů. [1]

Ty jsou:

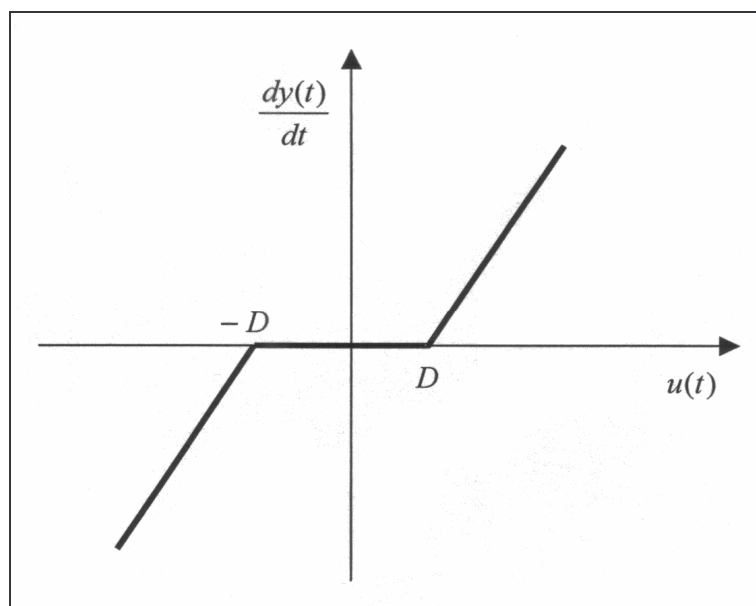
- požadavek řízení nelineárního vstupního akčního členu
- požadavek k řízení otáček motoru pod proměnným zatížením

K řešení těchto problémů je nutné použít řídicí techniku, aby bylo možné:

- kompenzovat pásmo necitlivosti v akčním členu
- použít kaskádní regulaci – vnitřní regulační obvod řídí pozici ventilu ovládající proud vzduchu a vnější regulační obvod reguluje výstupní otáčky
- regulovat otáčky pod proměnným zatížením

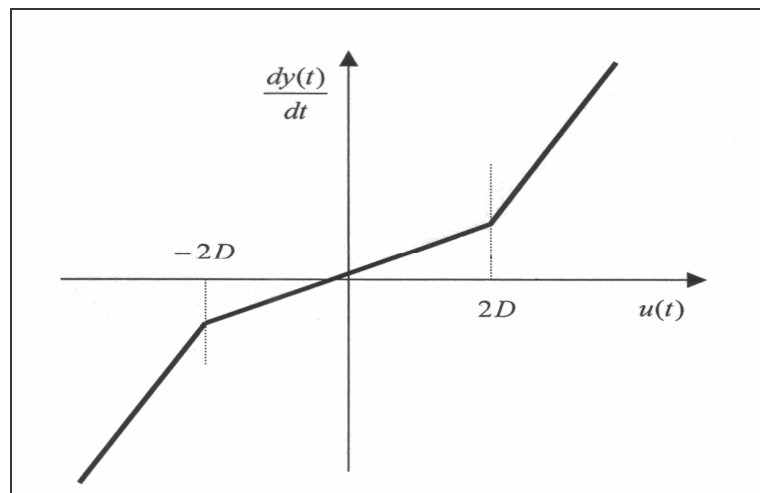
1.4.1 Kompenzace mrtvého pásma

Na obrázku (Obr. 2) je zobrazena typická charakteristika mrtvého pásma. Pro vstupní signál menší než hodnota v intervalu $< -D, D >$ je výstupní signál nulový – žádný řídicí signál se neposílá do systému. [1]



Obr. 2. Charakteristika mrtvého pásma

K odstranění mrtvého pásma se nejčastěji využívá periodického signálu. Signál se přidá k výstupnímu signálu z regulátoru a tyto signály vstupují do akčního členu. Frekvence by měla být vyšší než frekvenční pásmo systému a amplituda přibližně velikost D . Výsledkem je odstranění pásma necitlivosti jak je uvedeno na obrázku (Obr. 3). [1]

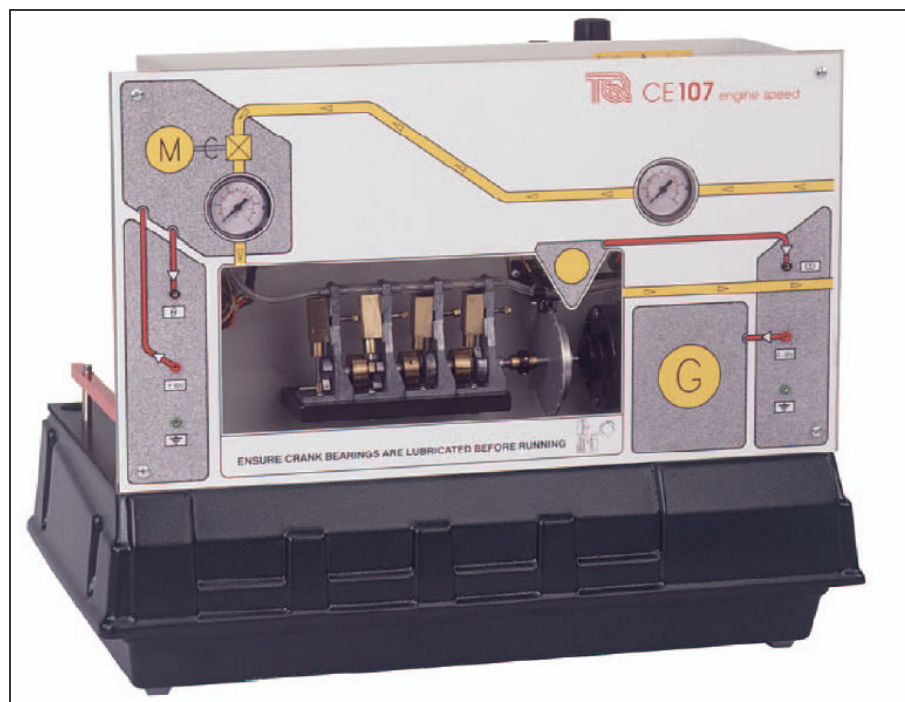


Obr. 3. Odstranění mrtvého pásma přidáním periodického signálu

2 MODEL PNEUMATICKÉHO MOTORU CE 107

2.1 Popis modelu

Pneumatický motor CE 107 je určen pro studium dynamických systémů s využitím analogového nebo digitálního signálu. CE 107 demonstruje problémy se kterými se setkáváme v regulaci rychlosti stroje a zvláště problémy s nelineárními řídicími systémy. Aparát se sestává z parního motoru který, v zájmu bezpečnosti, je poháněn stlačeným vzduchem. CE 107 modeluje situaci se kterou se setkáváme u spalovacích motorů, kde rychlost a výstupní výkon jsou ovládané množstvím paliva. Primární úlohou je řídit otáčky motoru pomocí pozice ventilu regulující stlačený vzduch. Na obrázku (Obr. 4) je zobrazen pneumatický motor CE 107. [4]



Obr. 4. Pneumatický motor CE 107

2.2 Aparatura modelu

Napájení a okruhy na úpravu signálů ze sensorů jsou plně chráněné a umístěné v základně jednotky. Tyto okruhy jsou přístupné přes 2 mm konektory umístěné na přední straně modelu. Výstupy z modelu [2] :

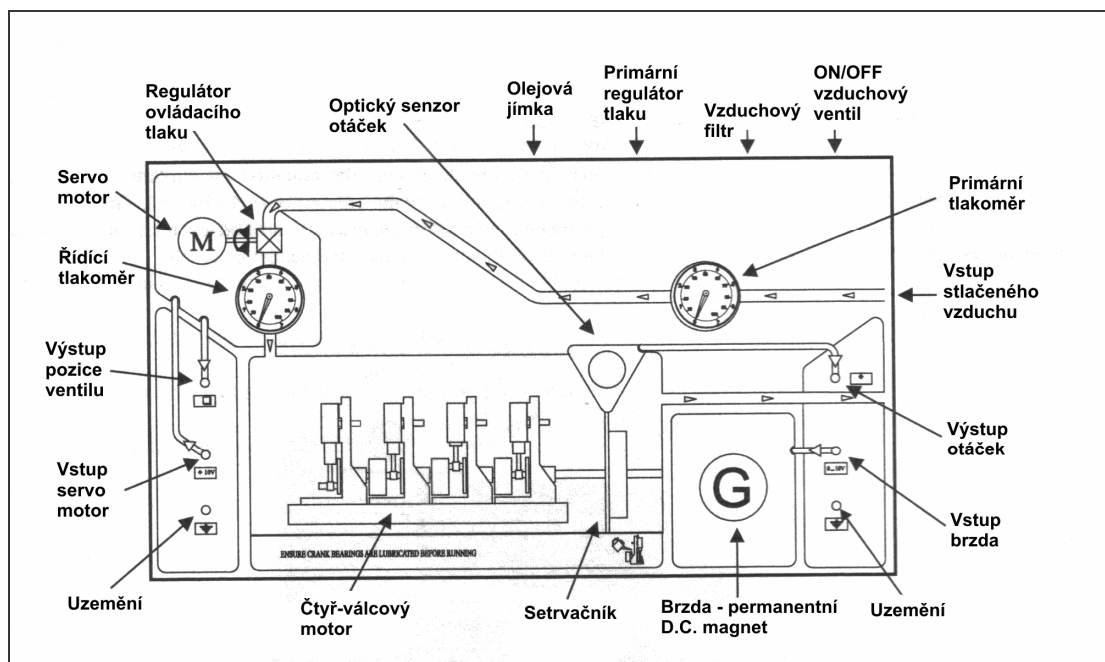
- výstup signálu pozice ventilu ovládající vstup vzduchu do válců – rozsah výstupních hodnot $< -10V, 10V >$ - kanál č. 1
- výstup signálu otáček motoru – rozsah výstupních hodnot $< 0V, 10V >$ - kanál č. 2

Vstupy do modelu:

- vstup signálu pro servomotor na ovládání ventilu vstupujícího vzduchu do válců – rozsah vstupních hodnot $< -10V, 10V >$ - kanál č. 1
- vstup signálu pro brzdu – rozsah vstupních hodnot $< 0V, 10V >$ - kanál č. 2

Jednotlivé systémy obsažené v modelu:

- motor, setrvačnick a brzda
- přívod stlačeného vzduchu
- vzduchový ventil pro regulaci vstupujícího vzduchu do válců

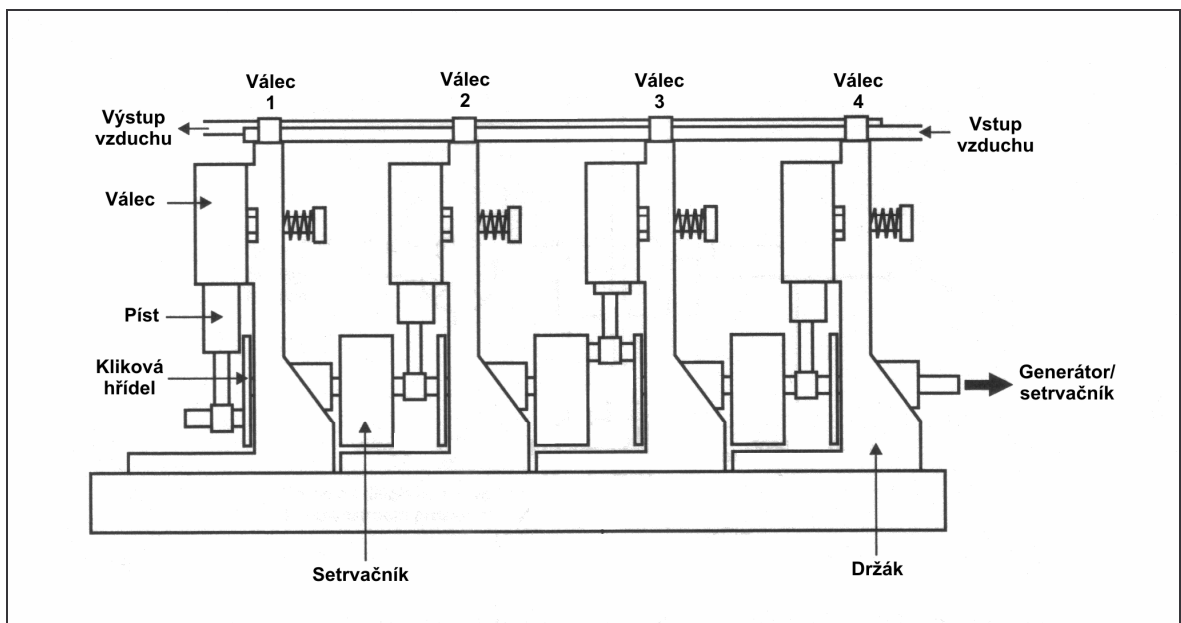


Obr. 5. Aparatura modelu

Na obrázku (Obr. 5) je znázorněna aparatura modelu.

2.2.1 Motor a setrvačnick

Model obsahuje 4 – válcový dvoutaktní motor na stlačený vzduch. Motor je namontován za průhledným předním panelem, což umožňuje sledovat otáčení motoru aniž by se obsluha dostala do kontaktu s rotačními prvky motoru.



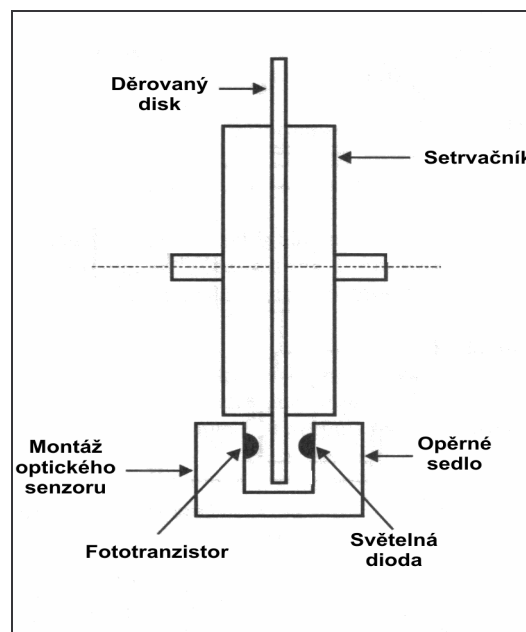
Obr. 6. Detail konstrukce 4 – válcového motoru

Každý válec motoru se skládá z pístu, válce, kliky, setrvačnicku a ojnice jak je ukázáno na obrázku (Obr.6). Napínač válce umožňuje volné otáčení a zajišťuje utěsnění vzduchu vstupujícího do válce. Tyto válce jsou spojené v tandemu tak, že efektivně předávají výkon na klikovou hřídel.

Vzduch je dodáván každému válci přes sací potrubí umístěné nad montáží motoru. Vzduch vstupuje do válce v okamžiku, kdy je píst v horní úvrati, takže píst předává sílu přes ojnicu na klikovou hřídel. Dále následuje výfuk vzduchu přes odvodušňovací ventil. Nepřetržitý oběh klikové hřídele je dán spojením válců vzájemně posunutých o 90°. Energie uložená v setrvačnicku poskytuje hybnost potřebnou k tomu, aby kliková hřídel udržovala oběh mezi pracovními zdvihy. Válce dodávají pracovní zdvihy v pořadí 1 – 3 – 4 – 2 každou otočku hřídele.

Na setrvačnicku jsou umístěny díry pomocí kterých se určuje rychlost otáčení motoru. K detekci slouží světelná dioda a fototranzistor. Fototranzistor generuje sérii impulsů, které jsou úměrné rychlosti otáčení motoru. Okruhy na úpravu signálu převedou impulsy do analogového napětíového stupně. Schéma setrvačnicku s děrovaným diskem je vidět na obrázku (Obr. 7).

Za setrvačnickem je umístěn stejnosměrný generátor, který slouží ke změně zatížení motoru. [2]



Obr. 7. Schéma setrvačnicku s děrovaným diskem

2.2.2 Přívod vzduchu

Stlačený vzduch k motoru je dodáván tlakovým rozvodem v budově školy nebo kompresorem. Přivedený vzduch prochází filtrem, primárním regulátorem tlaku a olejovou jímkou. Olejová jímka slouží k mazání motoru pomocí vhaněného vzduchu. Tlak vzduchu nesmí překročit hodnotu 10 bar. [3]

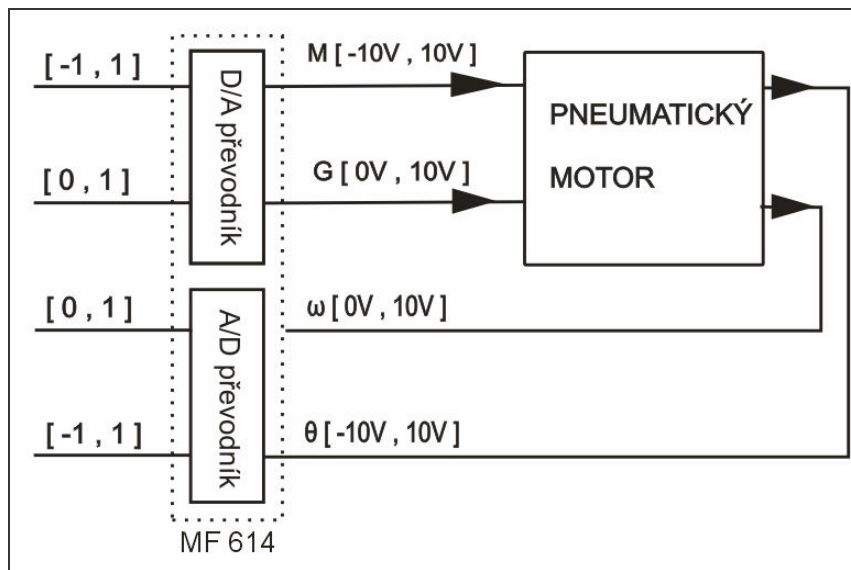
2.2.3 Technická specifikace

Motor:	4 – válcový motor poháněný stlačeným vzduchem
Rozměry válce:	vrtání 8 mm, zdvih 19 mm, zdvihový objem válců 3.8 cm ³
Ventil vstupujícího vzduchu:	12 V, 500 mA
Snímač otáček motoru:	optický senzor
Napájení modelu:	240 V, 50 Hz, 2A

3 PŘIPOJENÍ A ŘÍZENÍ MODELU

3.1 Připojení

Připojení modulu k počítači je realizováno pomocí multifunkční vstupně výstupní karty MF614. Model CE107 má dva analogové vstupy a dva analogové výstupy viz 2.2. Vstupy a výstupy modelu jsou patrné z obrázku (Obr. 8).



Obr. 8. Vstupy a výstupy modelu

V MATLABu jsou hodnoty vstupů a výstupů v rozsahu buď $< -1 ; 1 >$ nebo $< 0 ; 1 >$. Karta MF614 násobí tyto signály konstantou 10.

Označení vstupů do modelu:

- M - motor ovládající vzduchový ventil
- G - brzda (zatížení motoru)

Označení výstupů z modelu:

- ω - otáčky motoru
- θ - pozice vzduchového ventilu

3.2 Multifunkční vstupně-výstupní karta MF614

Karta je určena pro získávání informací a řízení aplikací v reálném čase pomocí Real Time Toolbox v softwarovém prostředí MATLAB. [8]

3.2.1 Parametry karty

- osm 12-bitových analogových vstupů
 - vstupní rozsahy: $\pm 10V$, $\pm 5V$, 0-10V, 0-5V
- čtyři 12-bitové analogové výstupy
 - výstupní rozsah: $\pm 10V$
- vzorkovací frekvence do 100 kHz
- osm digitálních vstupů
- osm digitálních výstupů
- programovatelné vstupní rozsahy A/D převodníku
- 4 vstupy inkrementálních čítačů
- 5 čítačů/časovačů

3.3 MATLAB

3.3.1 Popis

MATLAB je vysoce výkonný jazyk pro technické výpočty. Je určen pro výpočty, modelování, návrh algoritmů, simulaci, analýzu dat, měření a zpracování signálů, návrhy řídicích a komunikačních systémů apod.

MATLAB je interaktivní systém, jehož základní prvek dat je pole, které nevyžaduje stanovení rozměrů. To nám dovoluje řešit mnoho technických problémů, zvláště v maticovém a vektorovém vyjádření. [5]

3.3.2 Co MATLAB nabízí

- rychlé výpočetní jádro
- otevřený a rozšiřitelný systém
- velké množství aplikačních knihoven
- objektové programování
- podpora vícerozměrných polí a uživatelsky definovaných datových struktur
- interaktivní nástroje pro tvorbu grafického uživatelského rozhraní
- komunikace s externím přístrojovým vybavením

3.4 Real Time Toolbox

3.4.1 Základní rysy

Real Time Toolbox je nástavba programu MATLAB, která slouží jako uživatelské prostředí pro měření a regulaci na různých typech zařízení v reálném čase. Umožňuje okamžitý přístup k vnějším analogovým a digitálním signálům téměř bez znalosti hardwarové problematiky. Je možno používat buď tradiční styl Matlabu — příkazovou řádku, grafické uživatelské rozhraní, nebo výkonnou knihovnu systému Simulink. Lze experimentovat na vnějším signálech přímo z MATLABu, bez nutnosti přenášet data ze specializovaných programů pro sběr dat, bez nutnosti kompilace nebo jiných složitých a dlouho trvajících činností. To je ideální pro zpracování signálu, návrhy řídicích systémů a podobné úlohy. [6]

3.4.2 Vlastnosti

Real Time Toolbox vytváří z počítače měřicí ústřednu tím, že umožňuje práci s vnějšími signály v reálném čase. Umožňuje provádět sběr dat se zajištěným pravidelným vzorkováním a jejich další zpracování. Je založen na jádře reálného času a ovladačích přídatných karet pro vstup a výstup signálů. [6]

Real Time Toolbox obsahuje:

- 32 nezávislých časovačů, 256 vstupních a 256 výstupních kanálů
- vzorkovací frekvence až do 66 kHz bez nutnosti používat externí zdroje hodinového signálu
- knihovna bloků pro systém Simulink umožňuje používat většinu funkcí přímo z blokového schématu
- úrovně spouštěné ukládání dat umožňuje zachytit jednorázové děje
- zpracování dat on-line pomocí diskrétních polynomiálních filtrů
- on-line řízení rychlých systémů vestavěnými lineárními regulátory
- podpora generování periodických signálů na analogových výstupních kanálech
- automatické vytváření skriptových M-souborů z graficky zadaných povelů
- možnost přístupu k více přídavným zařízením zároveň
- možnost změny parametrů ovladačů hardware za běhu a možnost změnit jejich implicitní nastavení

3.5 Nástavba MATLABu Simulink

Simulink je určen pro simulaci dynamických systémů pokud známe jejich matematický popis. S jeho pomocí lze určit časové průběhy výstupních veličin v závislosti na časovém průběhu vstupních veličin a na počátečním stavu.

Simulink využívá grafický zápis. Z příslušné knihovny si myší přetahujeme bloky a poté je spojíme a máme sestavený model.

Jako vstupy lze používat bloky generující základní typy signálů. Při použití Real Time Toolboxu můžeme použít jako vstupní data přímo měřené veličiny v reálném čase.

Výsledky simulace se nejčastěji zobrazují graficky. Další možností výstupu je přenesení proměnných do pracovního prostoru MATLABu nebo uložení do souboru. [7]

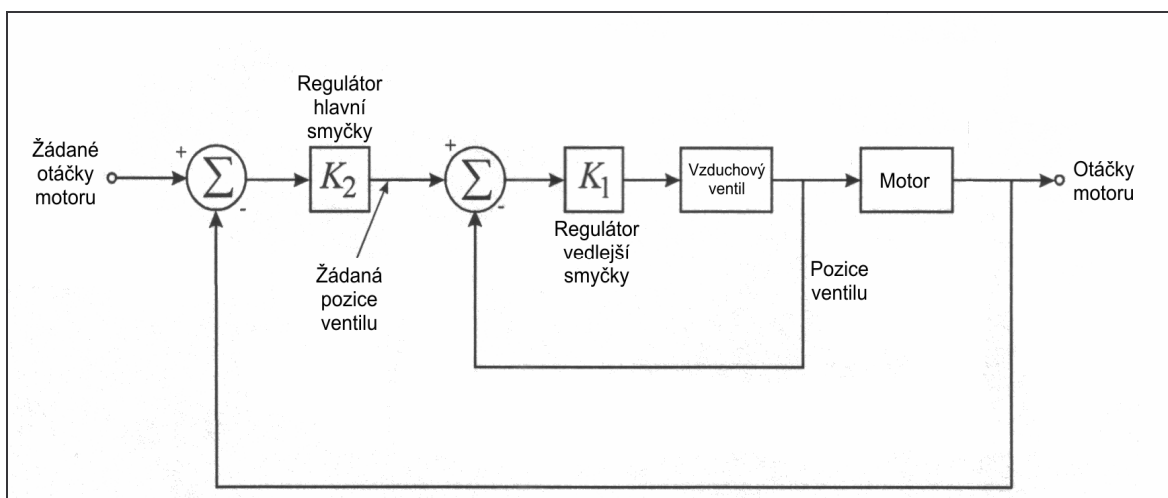
4 KASKÁDNÍ ŘÍZENÍ

4.1 Výhody kaskádní regulace

Jednoduché regulační obvody nemusí vždy zajistit požadovanou kvalitu regulačního pochodu. V tomto případě se potom ve velké míře používají regulátory se složitější strukturou, popř. se používají složitější regulační obvody. V prvním případě jsou návrh, seřízení, ale hlavně pozdější údržba v provozních podmínkách často velmi náročné jak z finančního, tak především z odborného hlediska. Často využívaný je druhý způsob, který je nenáročný z hlediska finančního, kdy použitím složitější, tzv. rozvětvené struktury regulačního obvodu lze dosáhnout podstatného zvýšení kvality regulačního pochodu. Těmto regulačním obvodům říkáme rozvětvené a to proto, že obsahují pouze jednu **hlavní** žádanou veličinu w a jednu regulovanou veličinu y . Význam rozvětvených regulačních obvodů je v současné době značný, protože dostupnost kvalitní měřicí a výpočetní techniky umožňuje snadné začlenění rozvětvené struktury do průmyslové praxe [9].

4.2 Kaskádní regulace u řízení motoru

Řídící systém motoru je příkladem procesu, ve kterém musíme nejdříve ovládat akční člen (vzduchový ventil) před hlavním systémem (otáčky motoru). Tento problém se běžně vyskytuje v průmyslu a je znám jako kaskádní řízení. Na obrázku (Obr. 9) je znázorněn regulační kaskádní systém pro řízení otáček motoru.



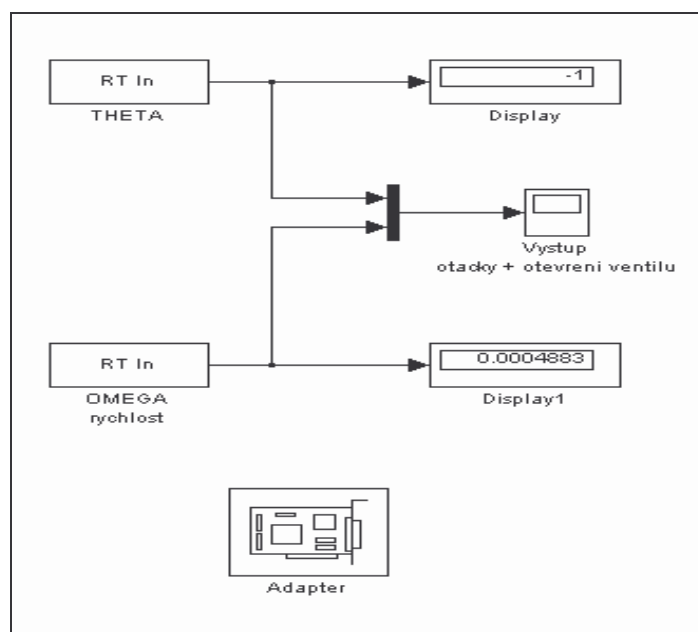
Obr. 9. Schéma kaskádní regulace řízení motoru

Regulační systém se skládá z vnitřní a vnější smyčky. Vnitřní smyčka ovládá pozici ventilu a vnější smyčka ovládá otáčky motoru. Cílem je začínat s řízením vnitřního bloku (natočení ventilu) systému a poté řídit vnější blok (otáčky). [1]

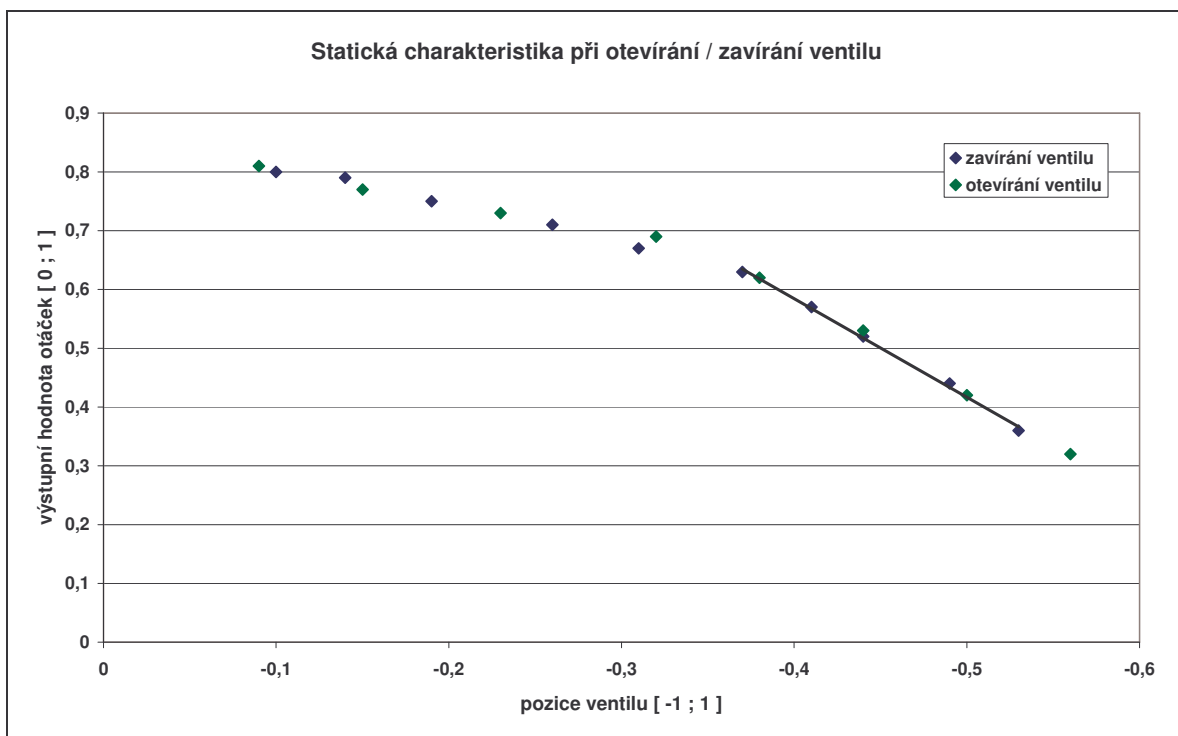
II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 MĚŘENÍ STATICKÝCH CHARAKTERISTIK

Statické charakteristiky byly měřeny podle schématu na obrázku (Obr. 10). Byly snímány 2 veličiny. Pozice ventilu (RT In – Theta) a rychlost otáčení motoru (RT In – Omega). Blok Adapter je ovladač multifunkčně vstupně-výstupní karty MF614. V grafech je vynesena závislost otáček na pozici otevření ventilu. Vstupní tlak do modelu byl nastaven na 3 bary. Pohyb ventilu se prováděl ručně kvůli mrtvému pásmu ventilu. Pracovní oblast otevření ventilu jsem zvolil v hodnotách $\langle -0,7 ; -0,1 \rangle$. Toto pásmo pokrývá maximální rozsah otáček motoru.



Obr. 10. Simulinkové schéma pro měření statické charakteristiky

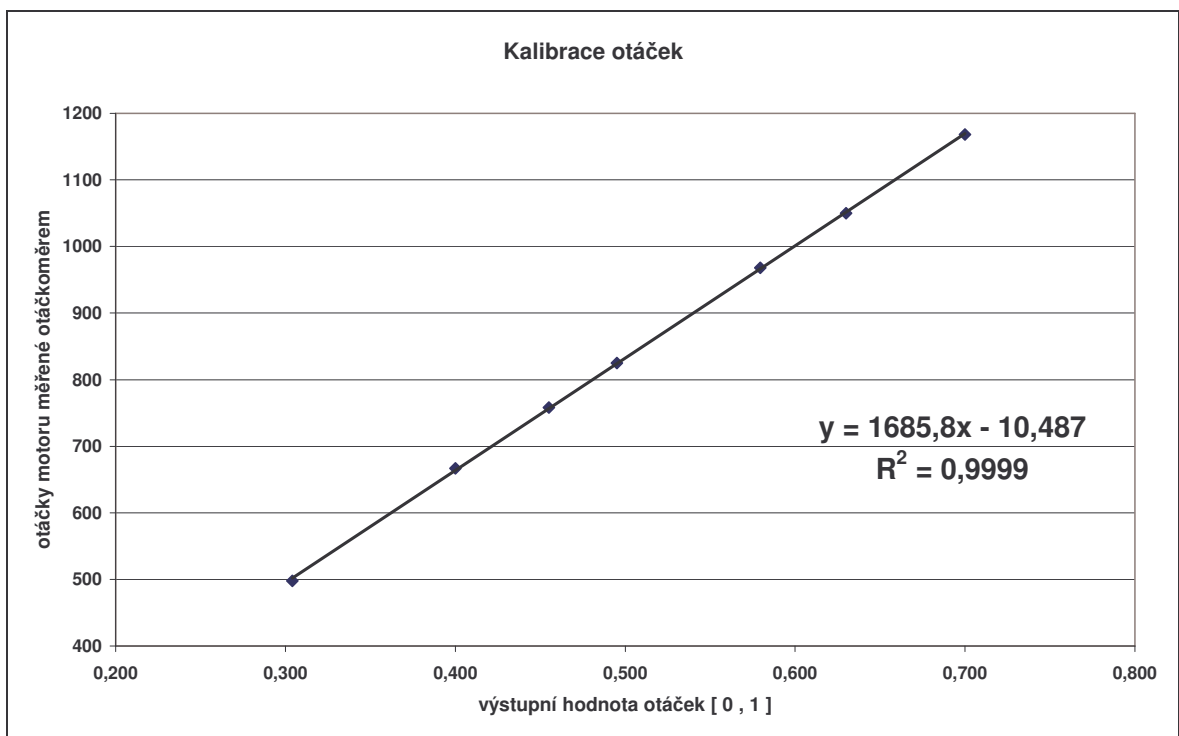


Obr. 11. Statická charakteristika při otevírání / zavírání ventilu

Z grafu (Obr. 11) je patrné, že vhodná oblast řízení (lineární pásmo) je ve výstupních hodnotách otáček motoru $< 0,3 ; 0,6 >$, ale regulátor by měl bez problémů regulovat i vyšší otáčky než v lineárním pásmu. Dále z grafu vyplývá, že motor ovládající pozici ventilu nemá hysterezi.

5.1 Kalibrace otáček

Kalibrace byla prováděna podle stejného simulinkového schématu jako měření statických charakteristik s tím rozdílem, že se snímaly pouze otáčky motoru a zároveň se měřily optickým otáčkoměrem. Měření probíhalo při klesajících i rostoucích otáčkách.



Obr. 12. Kalibrace otáček

V grafu (Obr. 12) je znázorněna kalibrace otáček. Závislost otáček měřených otáčkoměrem je lineární se snímanými otáčkami z modelu. Rovnice (1) popisuje výsledek kalibrace otáček.

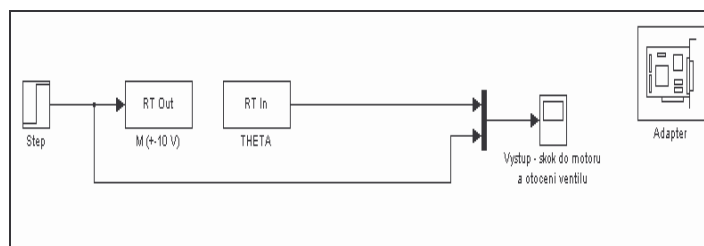
$$y=1685,8x-10,487 \quad (1)$$

Podle rovnice (1) je lineární oblast otáček přibližně v rozmezí $< 500 ; 1000 >$.

6 MĚŘENÍ DYNAMICKÝCH CHARAKTERISTIK A IDENTIFIKACE

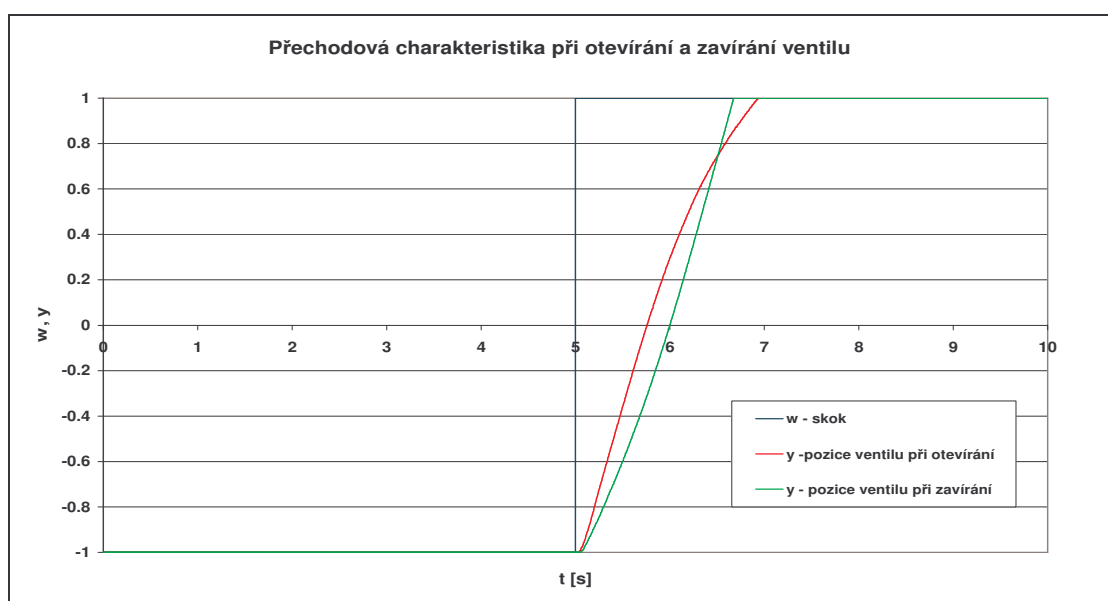
6.1 Dynamická charakteristika ventilu

Dynamická charakteristika ventilu byla měřena podle schématu na obrázku (Obr. 13). Ventil byl nastaven na zavřenou hodnotu $\langle -1 \rangle$. V čase 5s se na motor ovládající ventil přivedl skokový signál z hodnoty $\langle -1 \rangle$ na $\langle 1 \rangle$ a snímal se výstup otevření ventilu. Druhé měření probíhalo pro zavření ventilu.



Obr. 13. Simulinkové schéma pro dynamickou charakteristiku ventilu

V grafu (Obr. 14) jsou přechodové charakteristiky ventilu. Pro porovnání jsem umístil obě charakteristiky do jednoho grafu s tím rozdílem, že výstupní data při otevírání ventilu jsem vynásobil hodnotou $\langle -1 \rangle$, aby se daly charakteristiky porovnat.

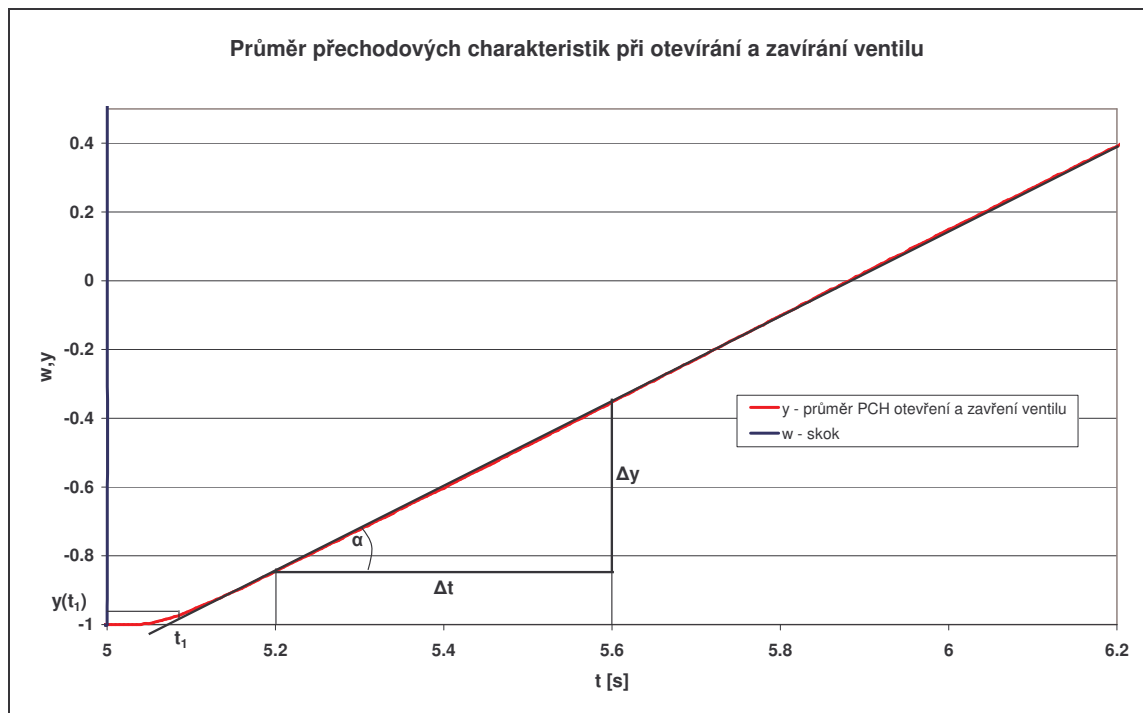


Obr. 14. Přechodová charakteristika při otevírání a zavírání ventilu

Rozdílné hodnoty při otevírání a zavírání ventilu jsou způsobené odporem ventilu vůči motoru při zavírání ventilu.

6.2 Experimentální identifikace ventilu

Z výstupních hodnot otevření a zavření ventilu jsem provedl průměr. Tato charakteristika je znázorněna v grafu (Obr. 15). Průměr hodnot byl zvolen kvůli jednodušší identifikaci a návrhu regulátoru, což by nemělo mít vliv na kvalitu regulačního pochodu. Data jsou upravena pro určení směrnice asymptoty přechodové charakteristiky. Identifikace soustavy byla provedena podle [12].



Obr. 15. Průměr přechodových charakteristik při otevírání a zavírání ventilu

Odečtené hodnoty z grafu:

$$t_1 = 5,075 - 5 = \mathbf{0,075 \text{ s}}$$

$$y(t_1) = \mathbf{0,024}$$

$$\Delta t = \mathbf{0,4 \text{ s}}$$

$$\Delta y = \mathbf{0,4848}$$

Pro určení přenosu ventilu jsem použil rovnice (2), (3) a (4)

$$G_{(s)} = \frac{K_v}{s.(Ts + 1)} \quad (2)$$

kde K_v je směrnice asymptoty k přechodové charakteristice

$$t_1 = n.T \rightarrow T = \frac{t_1}{n}, \quad (3)$$

n je řád soustavy a T je časová konstanta

$$K_v = tg \alpha = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (4)$$

Tab. 1. Určení řádu soustavy

n	1	2	3	4	5	6
$\frac{y(t_1)}{K_v \cdot t_1}$	0,368	0,271	0,224	0,195	0,175	0,160

Vypočtené hodnoty:

$$K_v = 1,212$$

Podle tabulky (Tab. 1) je $\frac{y(t_1)}{K_v \cdot t_1} = 0,267$ což odpovídá soustavě druhého řádu, ale pro

zjednodušení výpočtu regulátoru bude stačit aproximace prvním řádem, což znamená:

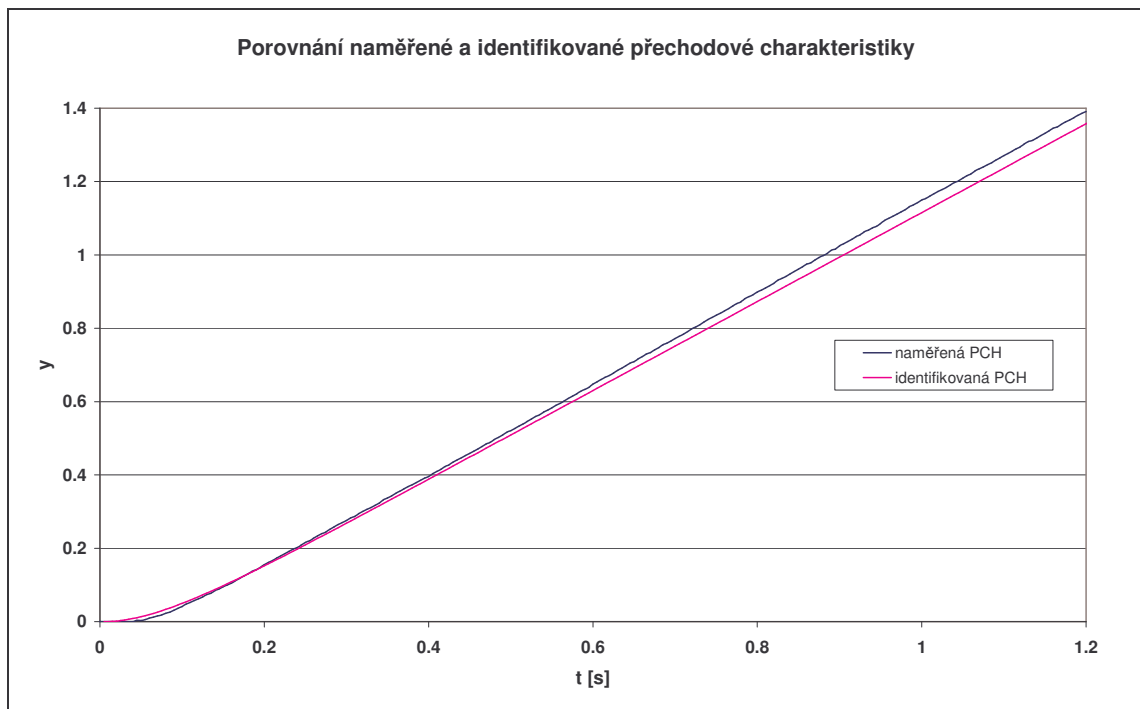
$$T = t_1 = 0,075$$

Přenos ventilu:

$$G_{(s)} = \frac{1,212}{s.(0,075s + 1)} = \frac{1,212}{0,075s^2 + s} = \frac{16,16}{s^2 + 13,33s}$$

Porovnání naměřené a identifikované přechodové charakteristiky:

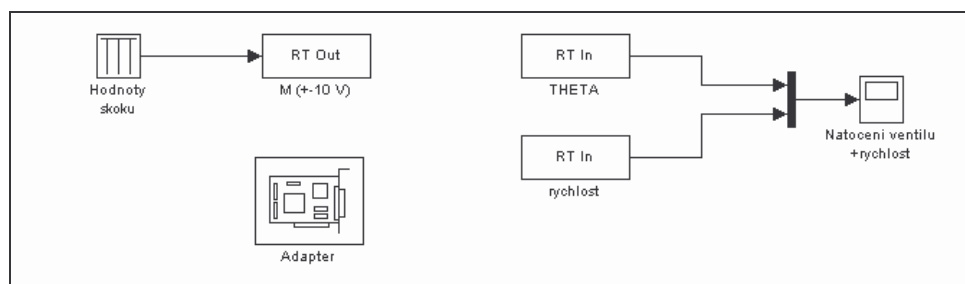
V grafu (Obr. 16) je znázorněno porovnání naměřené a identifikované přechodové charakteristiky. Rozdíl mezi oběma přechodovými charakteristikami je minimální a na řízení nemá tento rozdíl výrazný vliv.



Obr. 16. Porovnání naměřené a identifikované přechodové charakteristiky ventilu

6.3 Dynamická charakteristika soustavy

Dynamickou charakteristiku soustavy jsem měřil pomocí schématu na obrázku (Obr. 17).



Obr. 17. Schéma pro dynamickou charakteristiku soustavy

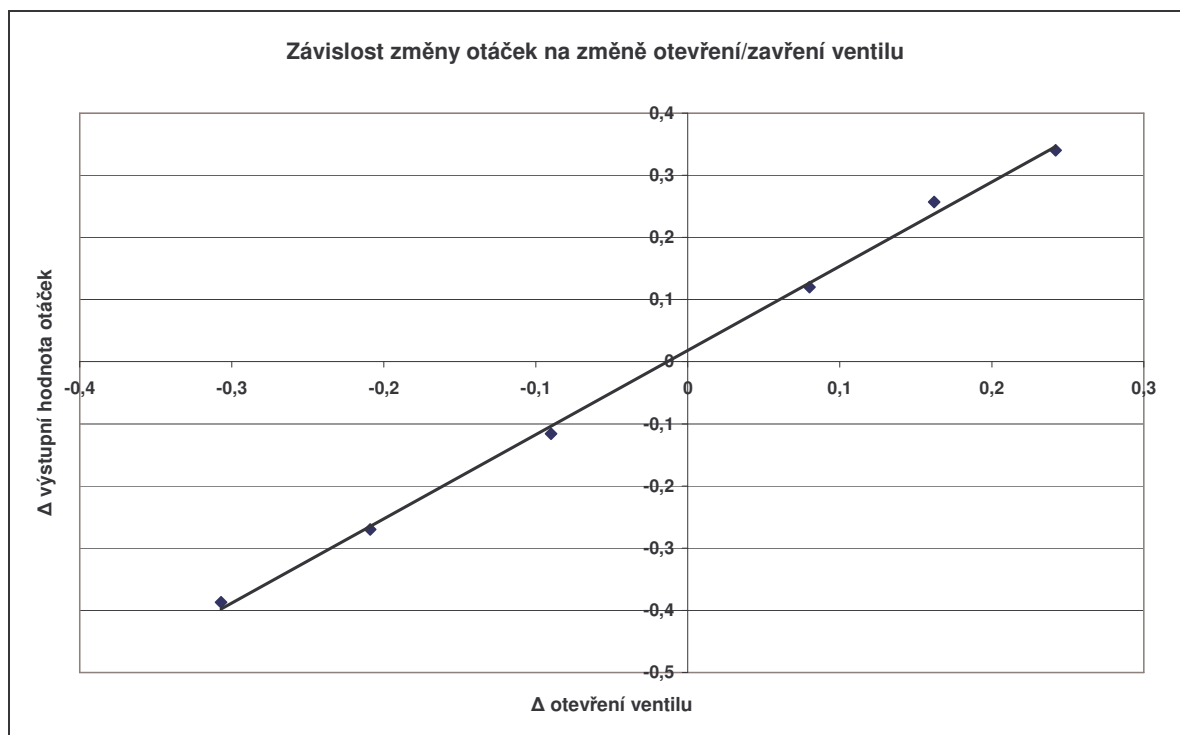
Postup identifikace:

Ručně jsem otevřel ventil tak, aby se motor rozběhl. Dále jsem do motoru ventilu pouštěl impulsy trvající $< 0,1s, 0,2s \text{ a } 0,3s >$ s akčním zásahem $< 0,75 >$ a $< -0,75 >$ pro všechny 3 časy a snímal velikost otevření/zavření ventilu a změnu otáček. Akční zásah byl zvolen kvůli překonání pásma necitlivosti. V tabulce (Tab. 2) jsou uvedeny hodnoty změn otevření/zavření ventilu a změny otáček.

Tab. 2. Změna otevření/zavření ventilu a změna otáček

čas impulsu [s]	velikost skoku	Δ otevření / zavření ventilu	Δ výstupní hodnota otáček
0,1	-0,75	-0,09	-0,116
0,2	-0,75	-0,209	-0,27
0,3	-0,75	-0,307	-0,387
0,1	0,75	0,08	0,12
0,2	0,75	0,162	0,257
0,3	0,75	0,242	0,34

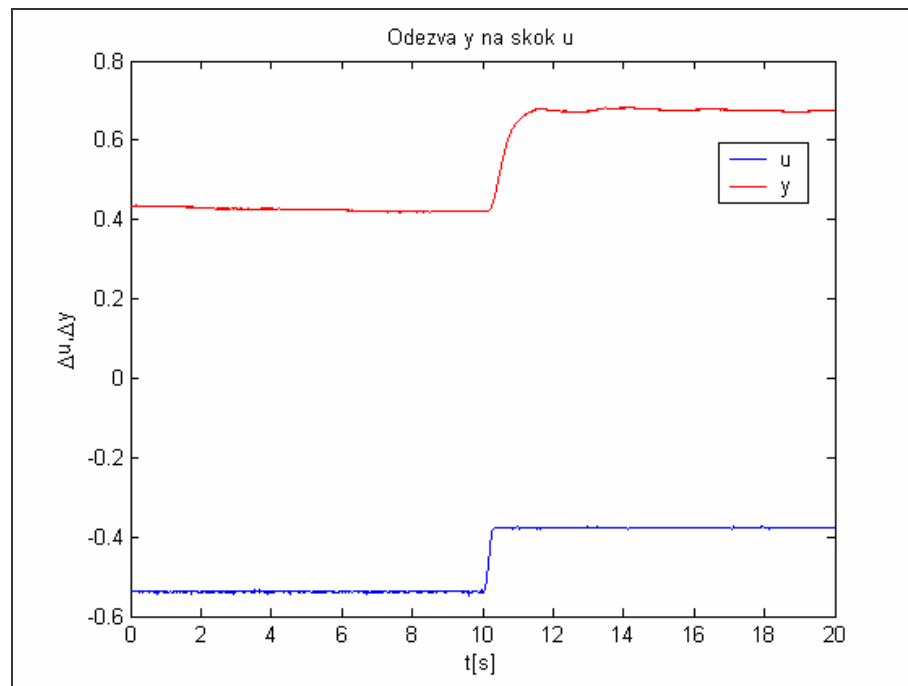
V grafu (Obr. 18) je znázorněna závislost změn otáček na změně otevření/zavření ventilu.



Obr. 18. Závislost změny otáček na změně otevření/zavření ventilu

6.4 Experimentální identifikace soustavy

Vzhledem k lineárnímu průběhu viz. obrázek (Obr. 18) stačí identifikovat soustavu z jednoho času impulsu a velikosti skoku. Pro identifikaci jsem zvolil čas impulsu 0,2s a velikost skoku 0,75. V grafu (Obr. 19) je zobrazen skok při otevření ventilu a změna otáček motoru.



Obr. 19. Změna otáček na změně otevření ventilu

Identifikace pomocí Strejcovy metody:

Postup podle [12]

Sestrojil jsem tečnu v inflexním bodě přechodové charakteristiky a určil hodnotu $\tau = \frac{T_U}{T_N}$.

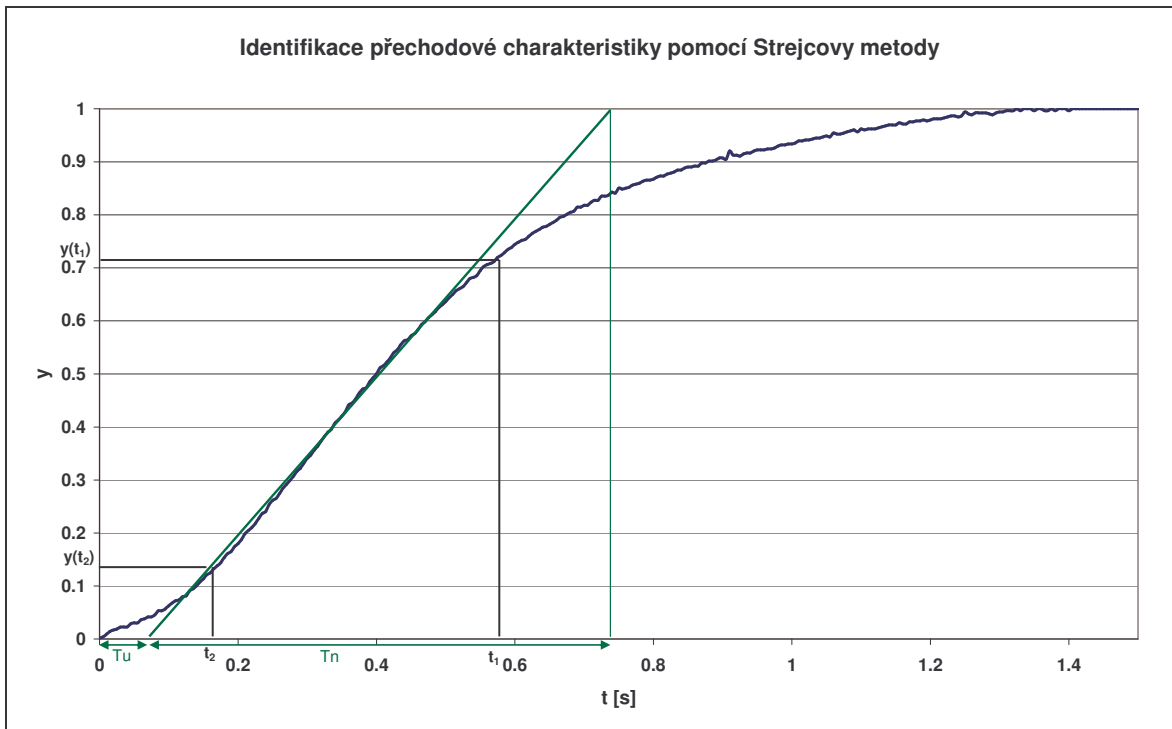
Odečtené hodnoty z grafu (Obr. 20):

$$T_U = 0,071 \text{ [s]}$$

$$T_N = 0,6845 \text{ [s]}$$

$$\tau = \frac{T_U}{T_N} = \frac{0,071}{0,6845} = 0,1037 < 0,104$$

Je-li $\tau < 0,104 \Delta y$, tak aproximace bude druhým řádem s různě velkými časovými konstantami.



Obr. 20. Identifikace přechodové charakteristiky pomocí Strejcovy metody

Provedení identifikace:

- a.) Pro pořadnici $y(t_1) = 0,720$ y se odečte z přechodové charakteristiky časový úsek t_1 a vypočítá se součet časových konstant podle rovnice (5).

$$T_1 + T_2 = \frac{t_1}{1,2564}, \quad (5)$$

odečtená hodnota $t_1 = \underline{0,5742}$, po dosazení do rovnice (5)

$$T_1 + T_2 = \frac{0,5742}{1,2564} = \underline{0,4570}$$

- b.) Vypočítá se časový úsek t_2 podle rovnice (6) a z naměřené přechodové charakteristiky se odečte příslušná pořadnice $y(t_2)$

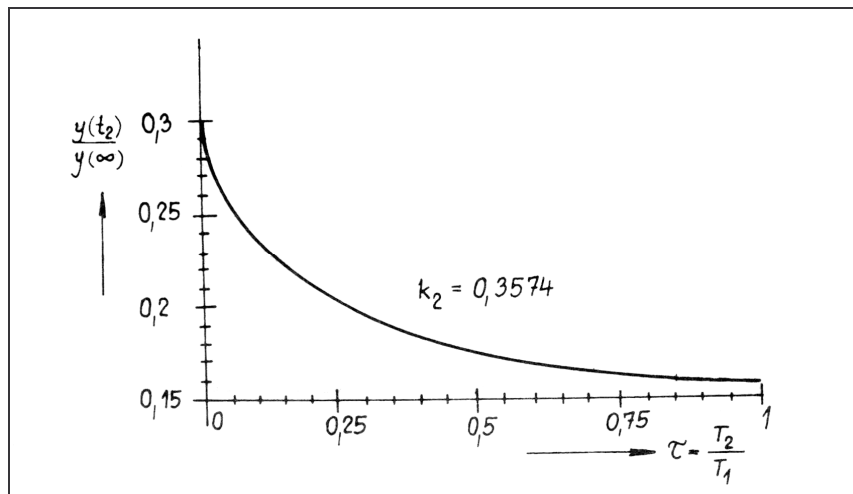
$$t_2 = 0,3574 * (T_1 + T_2) \quad (6)$$

$$t_2 = 0,3574 * (T_1 + T_2) = 0,3574 * 0,4570 = \underline{0,1633}, \quad \text{odečtená hodnota}$$

$$y(t_2) = \underline{0,1333}$$

- c.) Z grafu (Obr. 21) se určí poměr časových konstant $\tau = \frac{T_2}{T_1}$, kde

$$\frac{y(t_2)}{y(\infty)} = \frac{0,1333}{1} = 0,1333, \quad \text{odečtená hodnota } \tau = 1$$



Obr. 21. Graf pro určení poměru časových konstant

- d.) Z rovnic (5) a (6) se vypočítají časové konstanty

$$T_1 = T_2$$

$$2T_1 = 0,4570$$

$$T_1 = T_2 = 0,2285$$

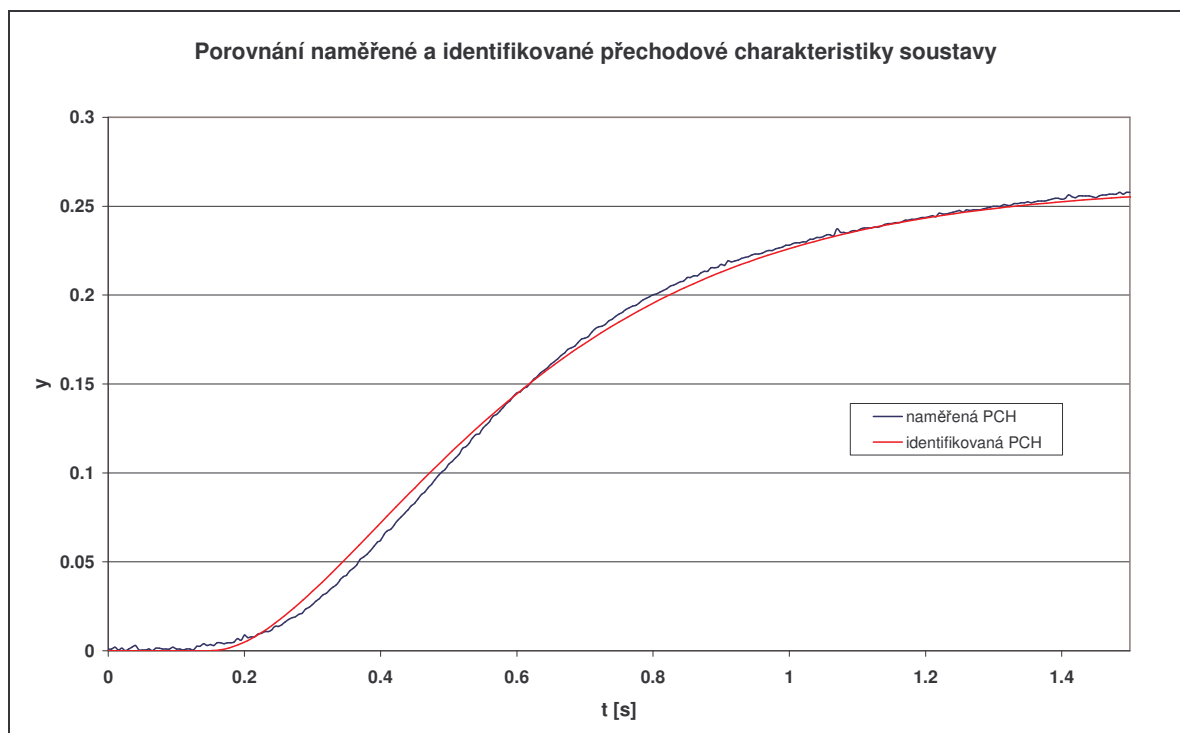
- e.) Zesílení K_V se spočítá podle rovnice (7)

$$K_V = \frac{\Delta y}{\Delta u}, \quad (7)$$

$$K_v = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{0,257}{0,162} = 1,5864$$

$$\begin{aligned} \text{Přenos soustavy: } G_{(s)SOUSTAVY} &= \frac{1,5864}{(0,2285s + 1) \cdot (0,2285s + 1)} = \frac{1,5864}{0,0522s^2 + 0,4570s + 1} = \\ &= \frac{30,3908}{s^2 + 8,7548s + 19,1571} \end{aligned}$$

V grafu (Obr. 22) je znázorněno porovnání naměřené a identifikované přechodové charakteristiky. Rozdíl mezi charakteristikami je minimální a pro regulaci soustavy zanedbatelný.



Obr. 22. Porovnání naměřené a identifikované přechodové charakteristiky soustavy

7 REGULACE VENTILU

Přenos ventilu:
$$G_{(s)VENTILU} = \frac{16,16}{s^2 + 13,33s}$$

Vhledem k tomu, že ventil je integrační soustava je podle teorie vhodné pro regulaci využití P regulátoru. Parametry P regulátoru jsou vypočteny podle [13]. Pro porovnání kvality regulace jsem zkoušel ještě regulaci PI regulátorem a 1DOF regulátorem s volitelným parametrem α .

7.1 Regulace s P a PI regulátorem:

Odečtené hodnoty z přechodové charakteristiky ventilu:

$$T_u = t_1 = 0,075$$

$$T_n = 1$$

$$K_V = 1,212$$

Tab. 3. Optimální hodnoty stavitelných parametrů regulátoru

Typ	r_0	T_I	T_D
P	$\frac{T_n * 1}{T_u * K_V}$	-	-
PI	$0.9 * \frac{T_n * 1}{T_u * K_V}$	$3.5 * T_u$	-
PID	$1.25 * \frac{T_n * 1}{T_u * K_V}$	$2 * T_u$	$0.5 * T_u$

V tabulce (Tab. 4) jsou vypočtené hodnoty parametrů regulátoru P a PI podle tabulky (Tab. 3).

Tab. 4. Vypočtené hodnoty parametrů regulátoru

Regulátor	r_0	T_I
P	11,0011	-
PI	9,9010	0,2625

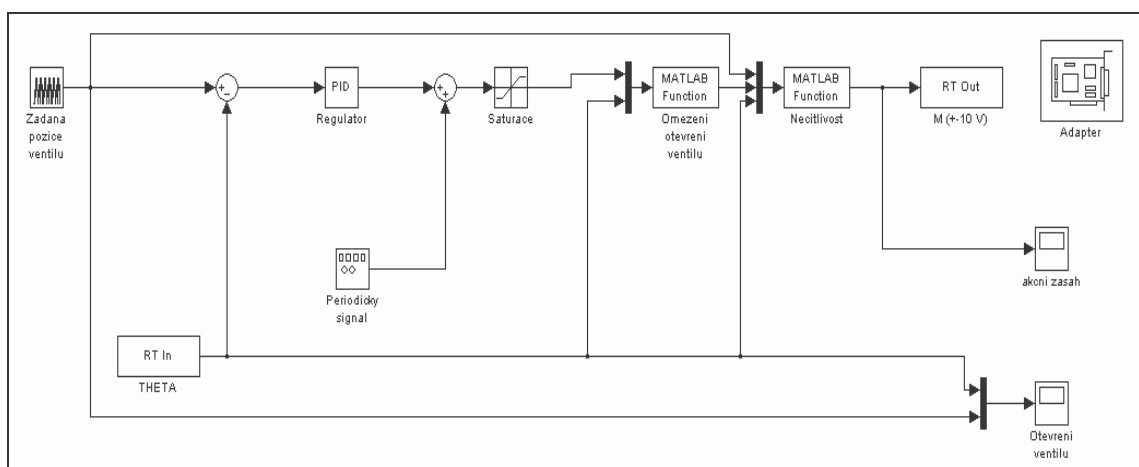
Na obrázku (Obr. 23) je znázorněno schéma pro regulaci pozice ventilu regulátorem P a PI. Jako žádaná hodnota (w) je zde pozice ventilu. K akčnímu zásahu se připočítává periodický signál k odstranění mrtvého pásma ventilu. Periodický signál má podle 1.4.1 hodnoty:

- amplituda 0,5
- frekvence 25 Hz

Akční zásah se pomocí bloku *Saturace* omezuje na hodnoty $< -1 ; 1 >$ kvůli hodnotám vstupu do ventilu.

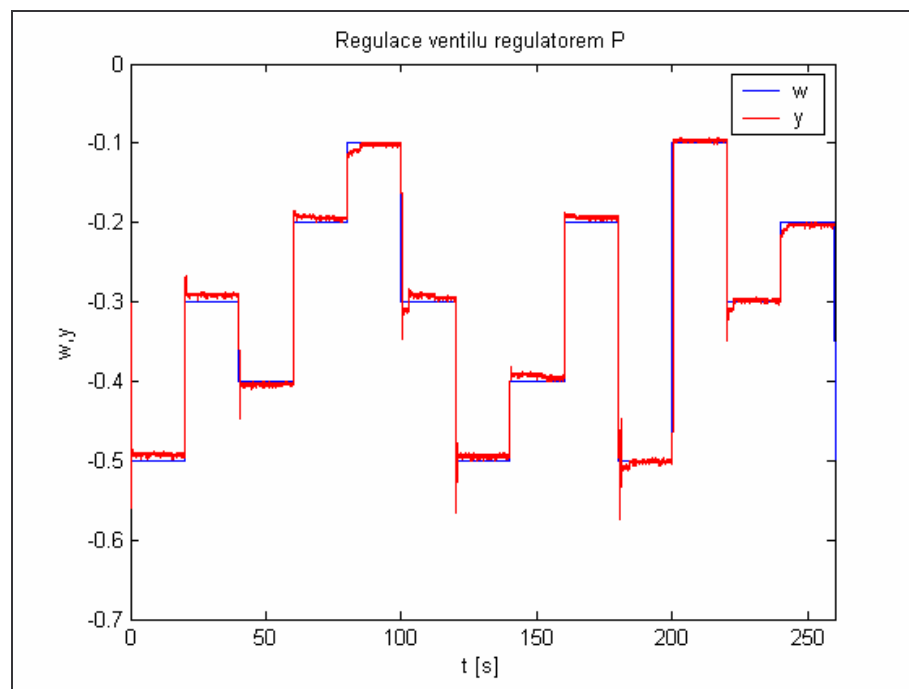
Blok *MATLAB Function – omezení otevření ventilu* slouží k omezení pozice ventilu, která je omezena na hodnoty $< -0,7 ; -0,1 >$. Tato hodnota pokrývá maximální rozsah otáček.

Blok *MATLAB Function – necitlivost* je vytvořen tak, že při odchylce skutečné pozice ventilu od žádané pozice ventilu menší než 0,01 nahoru i dolů je akční zásah nulový. Díky tomuto omezení se docílí minimálního kmitání ventilu.

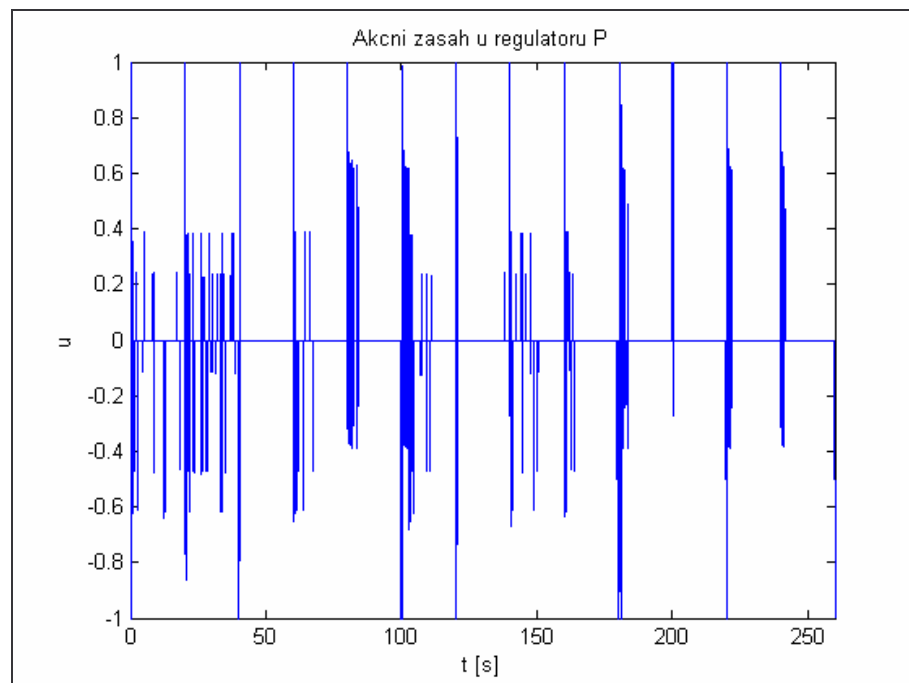


Obr. 23. Schéma pro regulaci pozice ventilu regulátorem P a PI

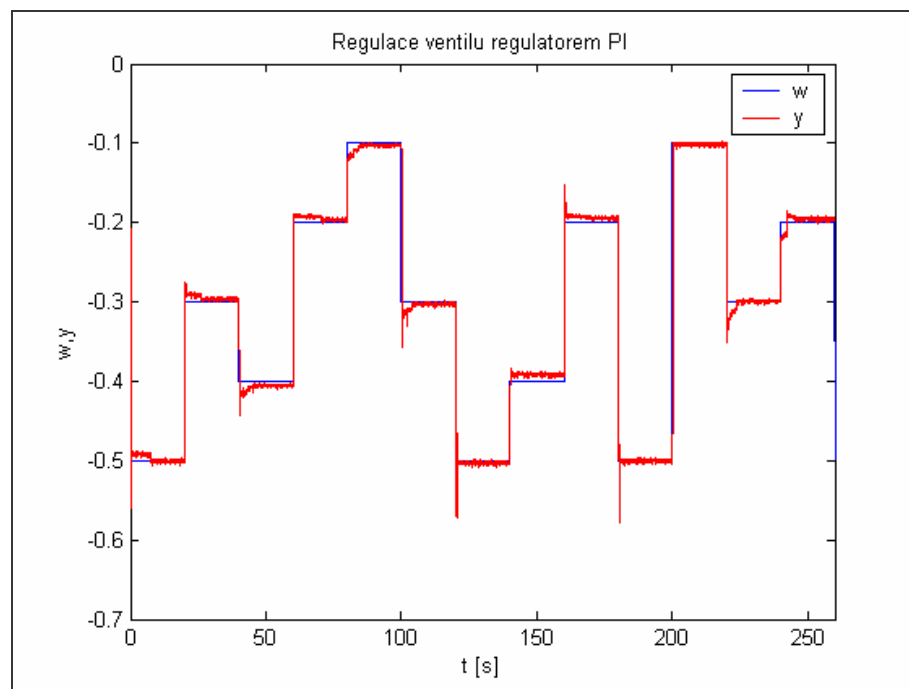
V grafech (Obr. 24. – 27.) jsou znázorněny průběhy regulací regulátorem P a PI a k nim příslušné akční zásahy.



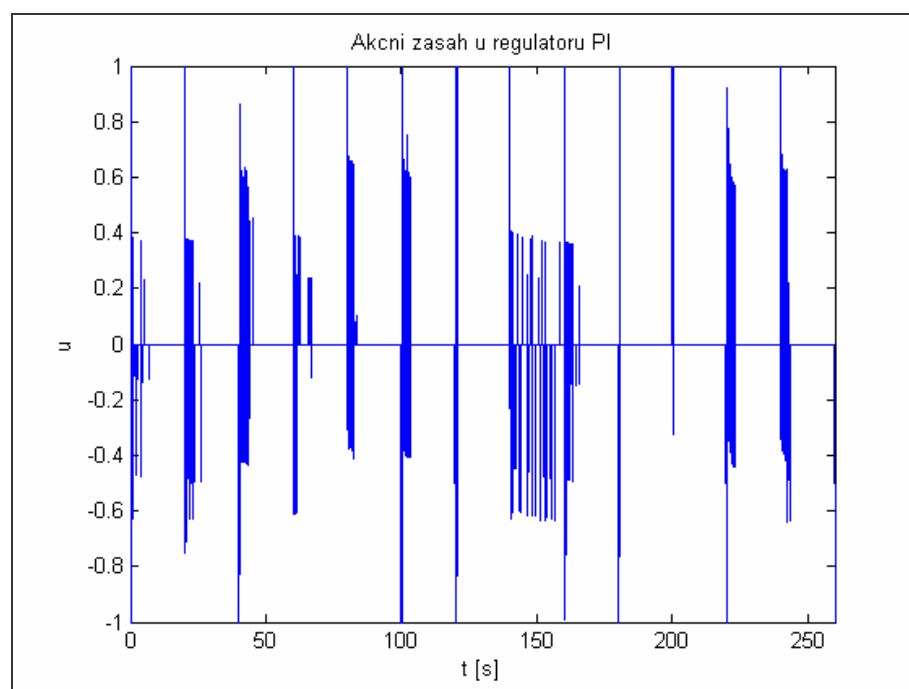
Obr. 24. Průběh regulace pozice ventilu regulátorem P



Obr. 25. Akční zásah regulátoru P na ventil



Obr. 26. Průběh regulace pozice ventilu regulátorem PI



Obr. 27. Akční zásah regulátoru PI na ventil

7.2 Regulace s 1DOF regulátorem

Tento postup vychází z algebraické teorie řízení s využitím operací v okruhu polynomů. Detailní informace mohou být nalezeny např. v [15].

7.2.1 Výpočet 1DOF regulátoru:

$$\text{Systém} \quad G_{(s)} = \frac{b_{(s)}}{a_{(s)}}$$

$$\text{Regulátor} \quad Q_{(s)} = \frac{q_{(s)}}{p_{(s)}}$$

Regulátor se navrhuje tak, aby bylo dosaženo:

- a.) stability
- b.) asymptotického sledování referenčního signálu
- c.) vnitřní ryzosti

Rovnice pro stupně polynomů:

$$\deg q(s) \geq \deg a(s) + \deg f(s) - 1$$

$$\deg p(s) \geq \deg a(s) - 1$$

$$\deg d(s) \geq 2 * \deg a(s) + \deg f(s) - 1$$

Kde p je polynom jmenovatele regulátoru, q je polynom čitatele regulátoru, a je jmenovatel řízeného systému, b je čítel řízeného systému, f je kompenzátor a d je charakteristický polynom uzavřeného regulačního obvodu.

Vypočtené stupně polynomů:

$$\deg q(s) \geq 2+1-1=2$$

$$\deg p(s) \geq 2-1=1$$

$$\deg d(s) \geq 4+1-1=4$$

Přenos regulátoru:

$$Q(s) = \frac{q_2 s^2 + q_1 s + q_0}{s \cdot (p_1 s + p_0)}$$

Diofantická rovnice pro výpočet koeficientů regulátoru představuje požadované chování uzavřeného regulačního obvodu (URO), které je voleno jako $d = (s + \alpha)^4$. Tím se zajistí aperiodický průběh regulované veličiny. Přechodový děj se bude dát jednoduše doladovat jedním stavitelným parametrem α .

$$ap + bq = d$$

$$(s^2 + a_1 s + a_0) \cdot [s \cdot (p_1 s + p_0)] + b_0 \cdot (q_2 s^2 + q_1 s + q_0) = (s + \alpha)^4$$

$$\begin{aligned} p_1 s^4 + p_0 s^3 + a_1 p_1 s^3 + a_1 p_0 s^2 + a_0 p_1 s^2 + a_0 p_0 s + b_0 (q_2 s^2 + q_1 s + q_0) &= \\ = s^4 + 4\alpha s^3 + 6\alpha^2 s^2 + 4\alpha^3 s + \alpha^4 \end{aligned}$$

Porovnáním koeficientů získáme následující hodnoty parametrů regulátoru:

$$s^4 : \underline{p_1 = 1}$$

$$s^3 : p_0 + a_1 \cdot 1 = 4\alpha \rightarrow \underline{p_0 = 4\alpha - a_1}$$

$$s^2 : a_1 p_0 + a_0 \cdot 1 + b_0 q_2 = 6\alpha^2 \rightarrow \underline{q_2 = \frac{6\alpha^2 - a_1 p_0 - a_0}{b_0}}$$

$$s^1 : a_0 p_0 + b_0 q_1 = 4\alpha^3 \rightarrow \underline{q_1 = \frac{4\alpha^3 - a_0 p_0}{b_0}}$$

$$s^0 : b_0 q_0 = \alpha^4 \rightarrow \underline{q_0 = \frac{\alpha^4}{b_0}}$$

Podmínky pro stabilitu regulátoru:

$$b_0 > 0, \quad \alpha > \frac{a_1}{4}$$

7.2.2 Parametry 1DOF regulátoru:

Parametr – α = póly uzavřeného regulačního obvodu

$\frac{1}{\alpha}$ → časové konstanty

Pro regulaci jsem zvolil 4 parametry alfa v hodnotách (5, 10, 15 a 20)

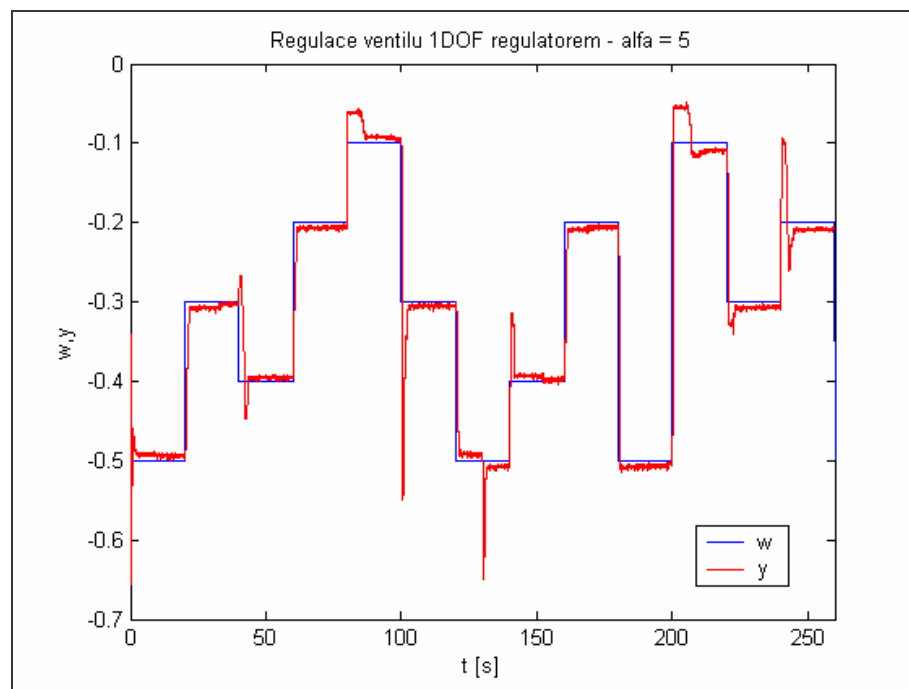
Tab. 5. Parametry 1DOF regulátoru ventilu

α	q2	q1	q0	p1	p0
5	3,78	30,94	38,67	1	6,6700
10	31,63	247,52	618,81	1	26,6700
15	61,54	835,40	3132,70	1	46,6700
20	110,02	1980,20	9901,00	1	66,6700

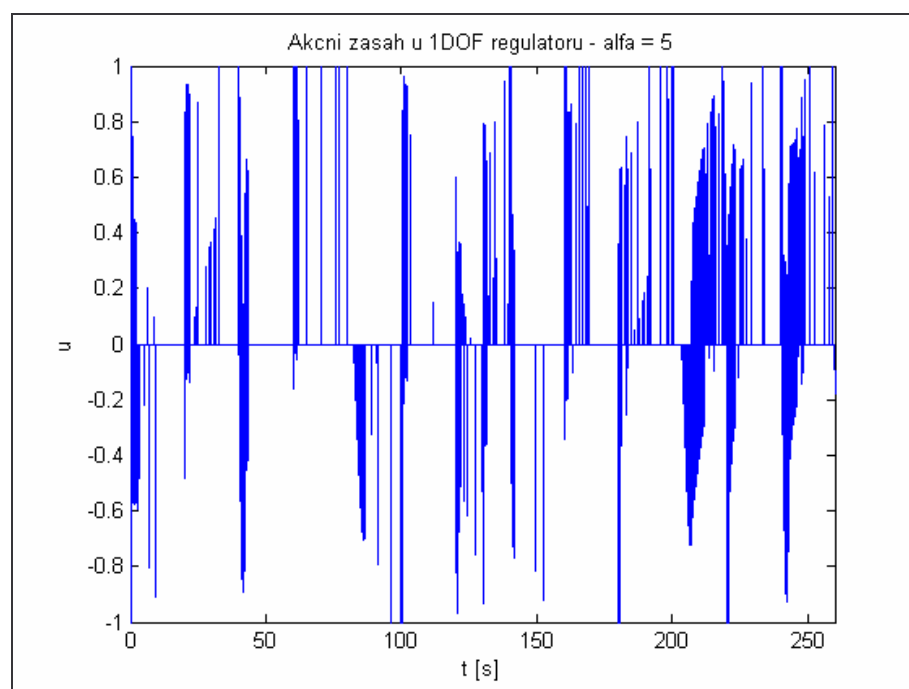
Schéma pro regulaci 1DOF regulátorem:

Schéma je stejné jako při regulaci regulátorem P a PI regulátorem s tím rozdílem, že místo PID bloku regulátoru je zde blok regulátoru 1DOF.

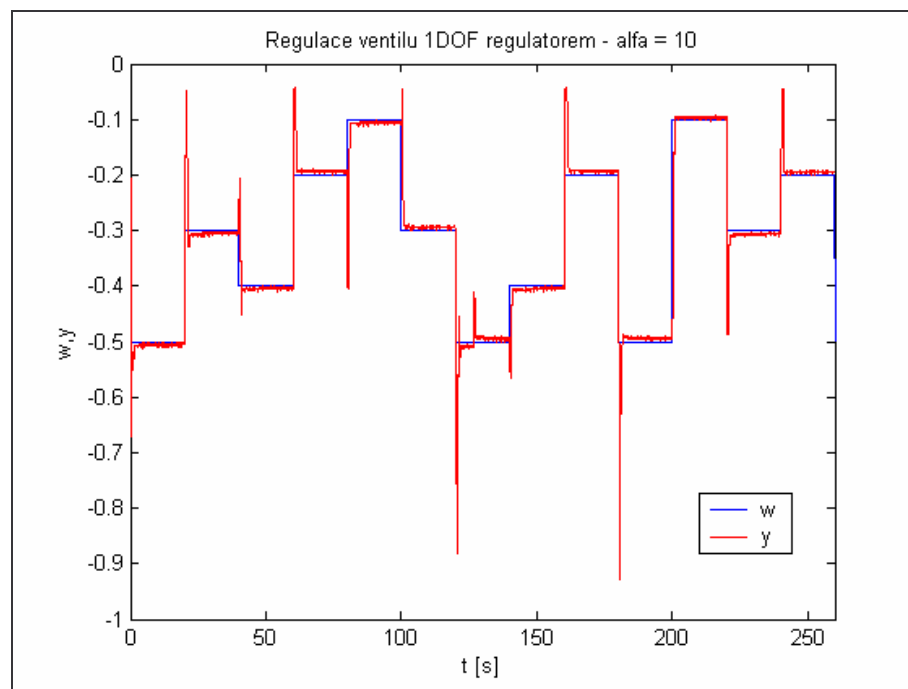
V grafech (Obr. 28. – 35.) jsou znázorněny průběhy regulací regulátorem 1DOF s volitelným parametrem α a k nim příslušné akční zásahy.



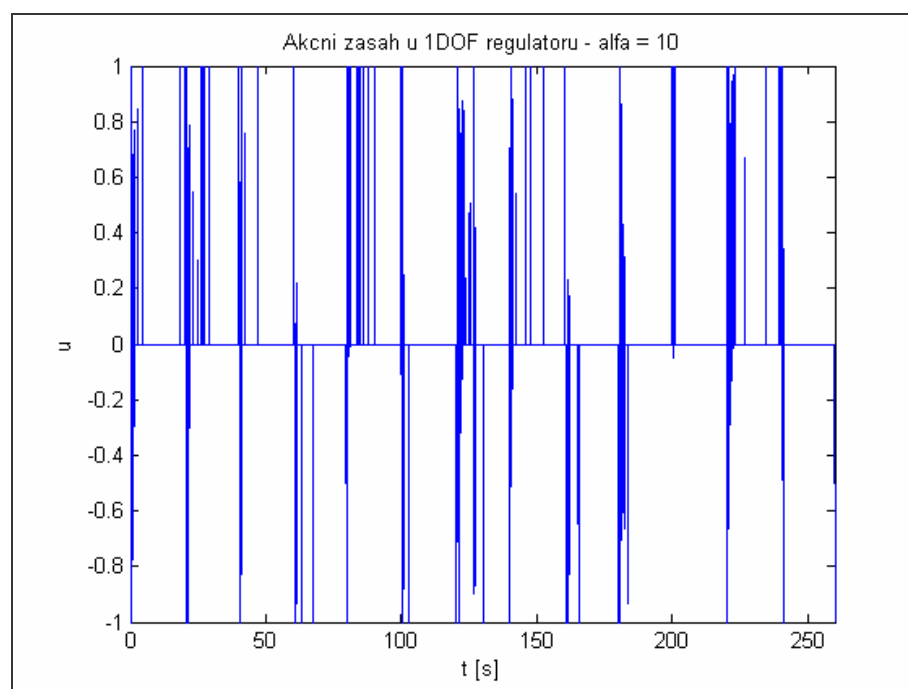
Obr. 28. Průběh regulace pozice ventilu regulátorem 1DOF, alfa = 5



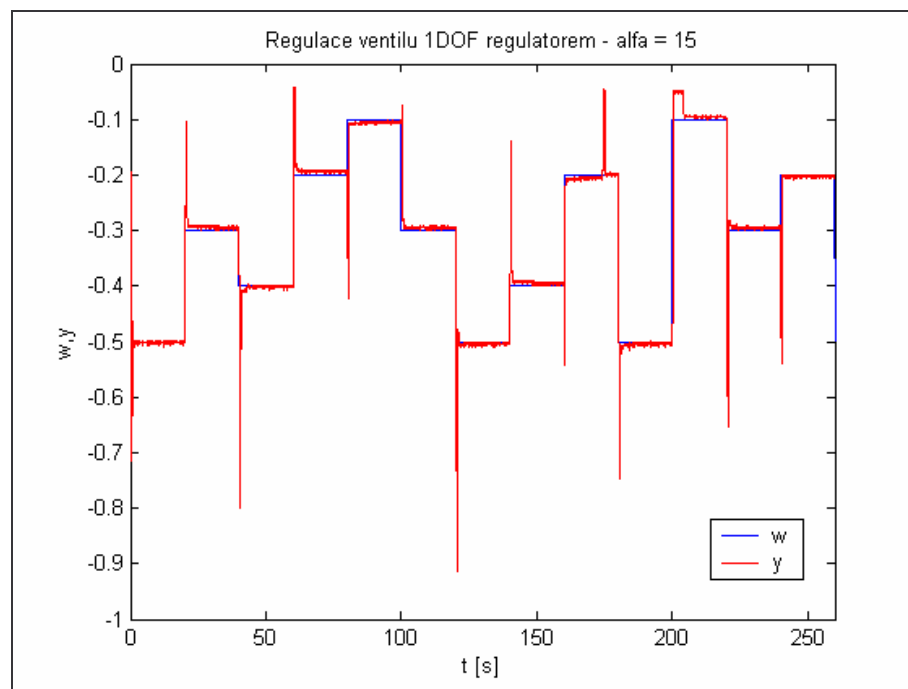
Obr. 29. Akční zásah regulátoru 1DOF na ventil, alfa = 5



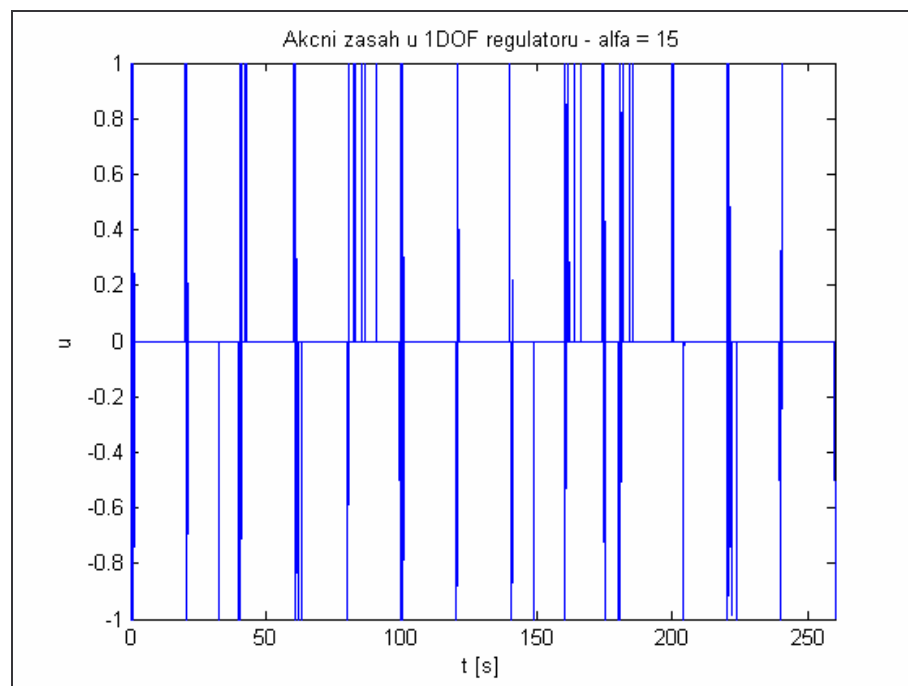
Obr. 30. Průběh regulace pozice ventilu regulátorem 1DOF, alfa = 10



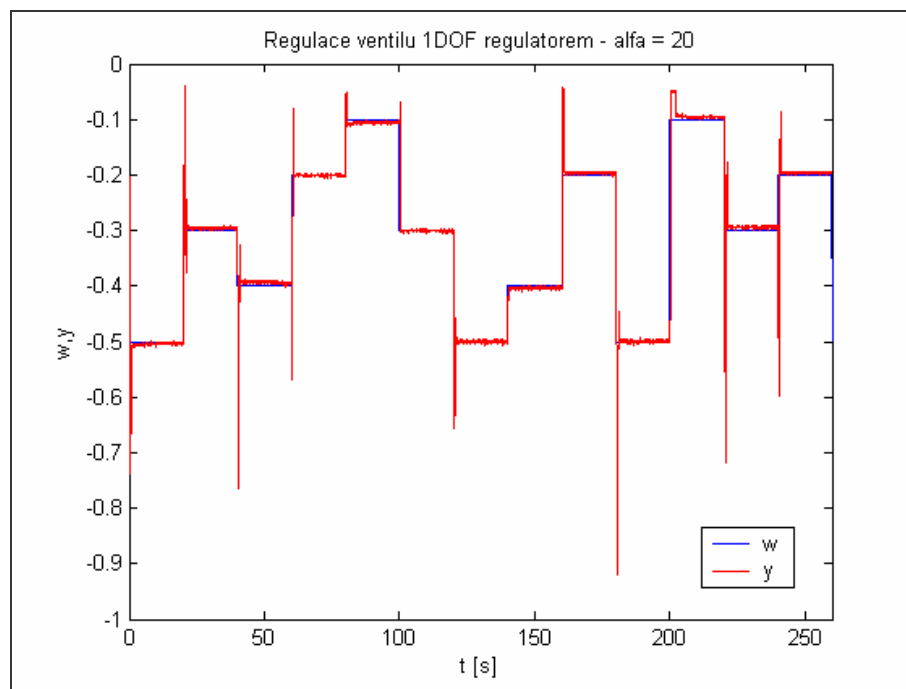
Obr. 31. Akční zásah regulátoru 1DOF na ventil, alfa = 10



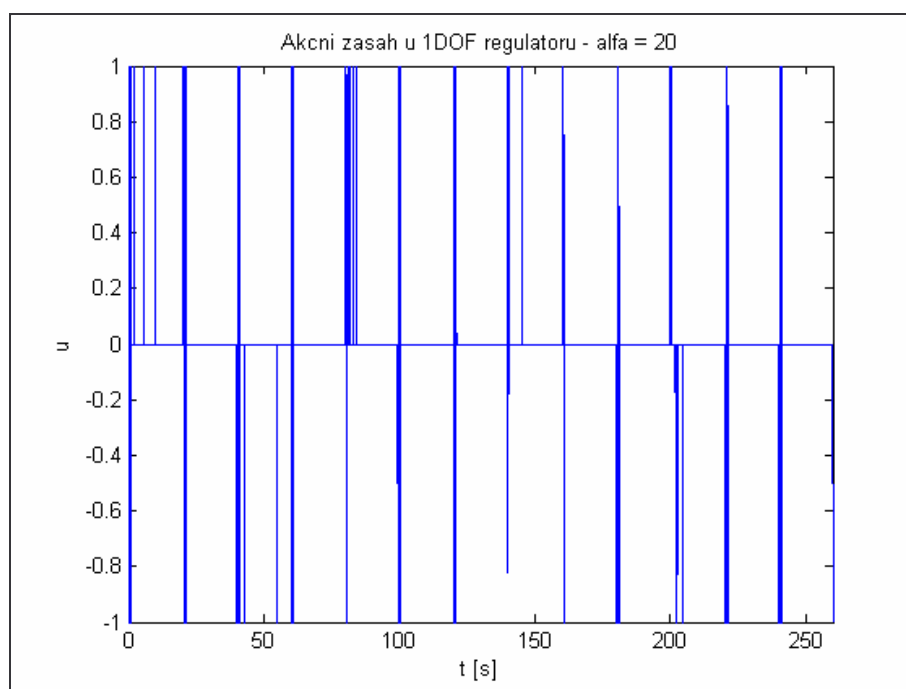
Obr. 32. Průběh regulace pozice ventilu regulátorem 1DOF, alfa = 15



Obr. 33. Akční zásah regulátoru 1DOF na ventil, alfa = 15



Obr. 34. Průběh regulace pozice ventilu regulátorem 1DOF, alfa = 20



Obr. 35. Akční zásah regulátoru 1DOF na ventil, alfa = 20

Vyhodnocení kvality regulace:

Pro výpočet kvality regulace se využívá např. kritéria založeného na výpočtu sumace kvadrátů regulační odchylky podle rovnice (8) a (9) a přírůstků akční veličiny podle rovnic (10) a (11), kde $\langle k_1, k_2 \rangle$ je interval pro určení kvality regulace, e - regulační odchylka, w – žádaná veličina, y – regulovaná veličina a u – akční zásah. Při vyhodnocení se použily data až po ustálení regulované veličiny po počátečním skoku otáček.

$$e(k) = w(k) - y(k) \quad (8)$$

$$S_y = \frac{1}{k_2 - k_1 + 1} \sum_{k=k_1}^{k_2} e^2(k) \quad (9)$$

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \quad (10)$$

$$S_u = \frac{1}{k_2 - k_1 + 1} \sum_{k=k_1}^{k_2} \Delta u^2(k) \quad (11)$$

Tab. 6. Vyhodnocení kvality řízení – S_y při regulaci ventilu

Typ regulátoru	S_y
P	0,000417
PI	0,000901
1DOF – alfa = 5	0,003295
1DOF – alfa = 10	0,004197
1DOF – alfa = 15	0,003170
1DOF – alfa = 20	0,002889

Tab. 7. Vyhodnocení kvality řízení – S_u při regulaci ventilu

Typ regulátoru	S_u
P	0,004675
PI	0,006134
1DOF – alfa = 5	0,008423
1DOF – alfa = 10	0,004689
1DOF – alfa = 15	0,003682
1DOF – alfa = 20	0,003244

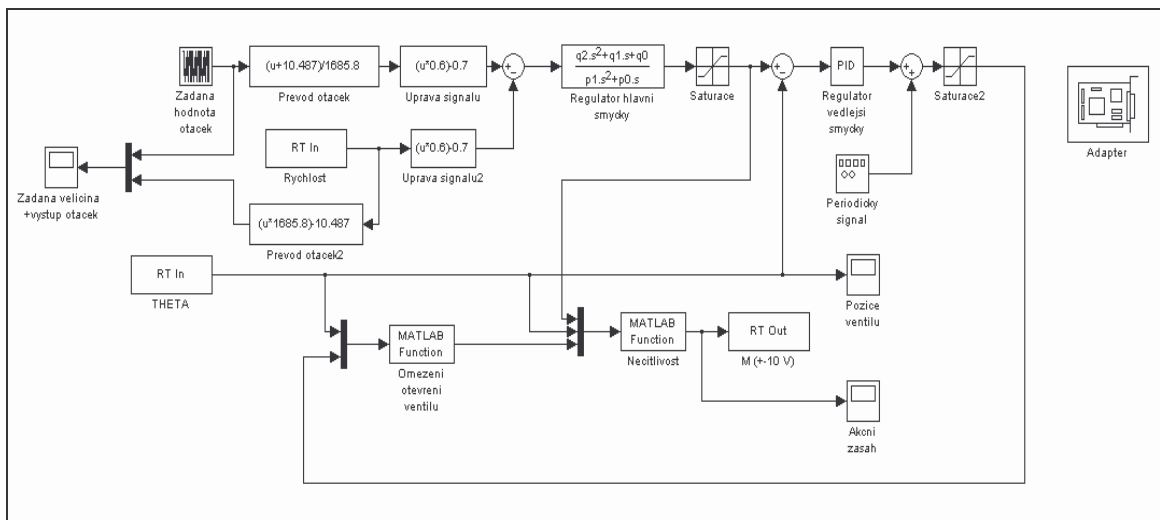
Při porovnání kvality řízení S_y podle tabulky (Tab. 6) je nejlepší použití regulátoru P. Regulátor P při regulaci má velmi rychlý přechodový děj při skokové změně žádané veličiny. Překmity a podkmity jsou minimální. Při regulaci PI regulátorem je také rychlý přechodový děj, ale překmity a podkmity jsou větší. Při regulaci 1DOF regulátorem s parametrem $\alpha = 5$ je přechodový děj rychlý, ale při velkých překmitech a podkmitěch. S rostoucím parametrem α je přechodový děj stále rychlý, ale překmity a podkmity se zvětšují. Regulátor jako akční zásah posílá do motoru ventilu impulsy. Motor ventilu na impuls reaguje pootočením o velikost a délku impulsu. V této pozici zůstává až do příchodu dalšího impulsu. V tabulce (Tab. 7) je vyhodnocení kvality řízení S_u . Nejmenší přírůstek akční veličiny je u regulátoru 1DOF s alfa = 20. P regulátor, který má nejlepší kvalitu řízení S_y má třetí nejlepší hodnoty kritéria S_u . Čím je menší hodnota S_u , tím méně je akčních změn u motoru, který ovládá pozici ventilu, což je z praktického hlediska užitečné.

8 REGULACE SOUSTAVY

8.1 Regulace bez zátěže

$$\text{Přenos soustavy: } G_{(s)SOUSTAVY} = \frac{1,5864}{0,0522s^2 + 0,4570s + 1} = \frac{30,3908}{s^2 + 8,7548s + 19,1571}$$

Na obrázku (Obr. 36) je znázorněno simulinkové schéma pro regulaci soustavy. Pro tuto regulaci jsem použil kaskádní řízení. Pro regulaci vedlejší smyčky (regulace ventilu) jsem použil P regulátor, který měl nejlepší regulační pochod při samotné regulaci ventilu. Tento regulátor bude řídit vedlejší smyčku při každé regulaci soustavy. Hodnota žádané veličiny (w) (otáček) se zadává ve skutečných otáčkách. Proto je ve schématu blok *převod otáček*, který převádí otáčky na hodnotu $\langle 0 ; 1 \rangle$. Aby bylo možné porovnat žádanou (w) a regulovanou (y) veličinu je nutné snímané otáčky v hodnotách $\langle 0 ; 1 \rangle$ převést na skutečné. To je realizováno pomocí bloku *převod otáček 2*. Dále kvůli omezení otevření ventilu na hodnotu $\langle -0,7 ; -0,1 \rangle$ (kvůli mezním hodnotám ventilu) jsem upravil signál žádaných a snímaných otáček bloky *úprava signálu* a *úprava signálu 2*. Po těchto úpravách signálu se signál snímaných otáček odečte od signálu žádaných otáček a rozdíl je regulační odchylka (e). Tento rozdíl vstupuje do regulátoru primární smyčky. Regulátor vypočítá akční zásah (u), který se omezí saturací na hodnoty $\langle -0,7 ; -0,1 \rangle$ a tato hodnota je žádaná hodnota pozice ventilu. Skutečná pozice ventilu se odečte od žádané pozice ventilu a tento rozdíl (e) vstupuje do regulátoru vedlejší smyčky. Ten vypočítá akční zásah ke kterému se přidá periodický signál kvůli odstranění pásma necitlivosti, dále se omezí saturací na hodnotu $\langle -1 ; 1 \rangle$ a vstupuje do bloku *omezení otevření ventilu*, který slouží jako ochrana před mezními pozicemi ventilu tím, že omezí otevření ventilu na hodnotu $\langle -0,7 ; -0,1 \rangle$. Dále signál vstupuje do bloku *necitlivost*, který při odchylce pozice ventilu od žádané pozice menší než 0,01 nahoru i dolů vygeneruje akční zásah roven 0 a tím se docílí minimálního kmitání ventilu kolem žádané hodnoty. Dále jde signál na výstup karty MF614, která jej pošle na motor ovládající pozici ventilu.



Obr. 36. Schéma pro regulaci soustavy

Žádané hodnoty otáček motoru jsem volil v rozmezí $< 800 ; 1200 >$ otáček. Při identifikaci soustavy jsem určil lineární pásmo pro řízení otáček v hodnotách $< 500 ; 1000 >$. Nejmenší otáčky pro řízení $< 800 >$ jsou zvoleny kvůli tomu, že při nižších otáčkách a při záporném akčním zásahu se motor někdy zastaví. To je způsobeno fyzikálními parametry modelu. Vyšší otáčky by měl regulátor řídit bez problémů. Žádané hodnoty se skládají ze skokových změn a také rampy.

U všech regulátorů je perioda vzorkování $0,005s$ a vstupní tlak do soustavy 3 bary.

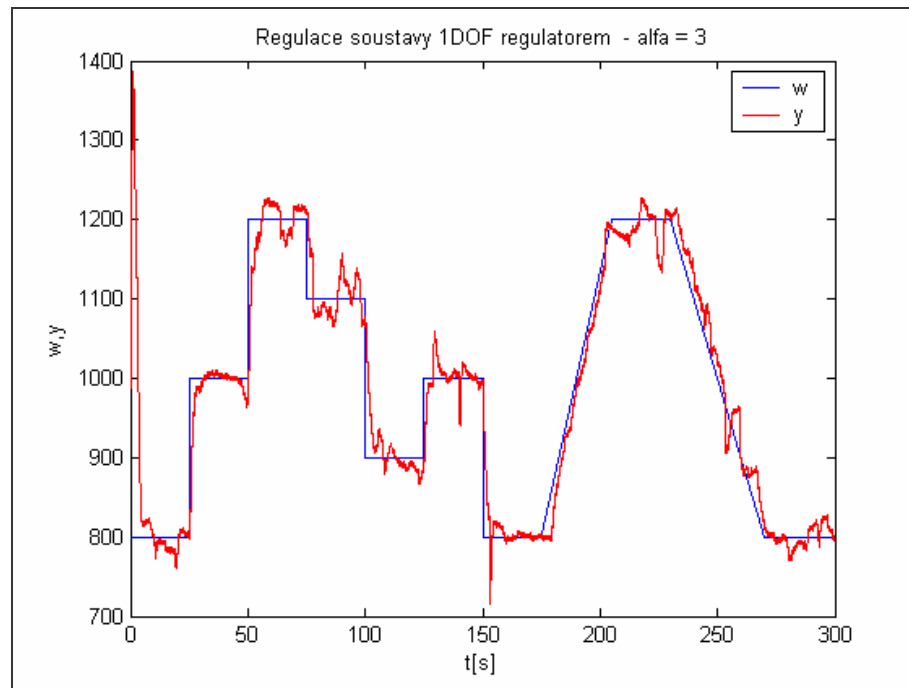
8.1.1 Regulace soustavy 1DOF regulátorem

Schéma pro regulaci je zobrazeno na obrázku (Obr. 36). Parametry 1DOF regulátoru byly vypočteny podle 7.2.1.

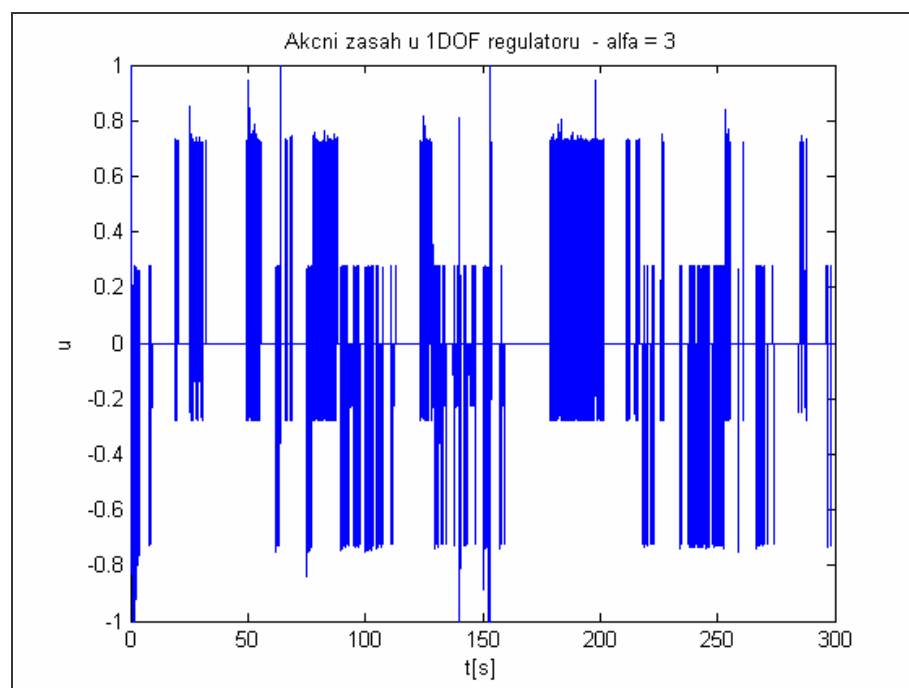
Tab. 8. Parametry 1DOF regulátoru soustavy

α	q_2	q_1	q_0	p_1	p_0
3	0,2116	1,5081	2,6653	1	3,2452
4	0,4413	3,8565	8,4263	1	7,2452
5	1,0659	9,3638	20,5654	1	11,2452
6	2,0853	18,8197	42,6445	1	15,2452
7	3,4996	33,0139	79,0042	1	19,2452

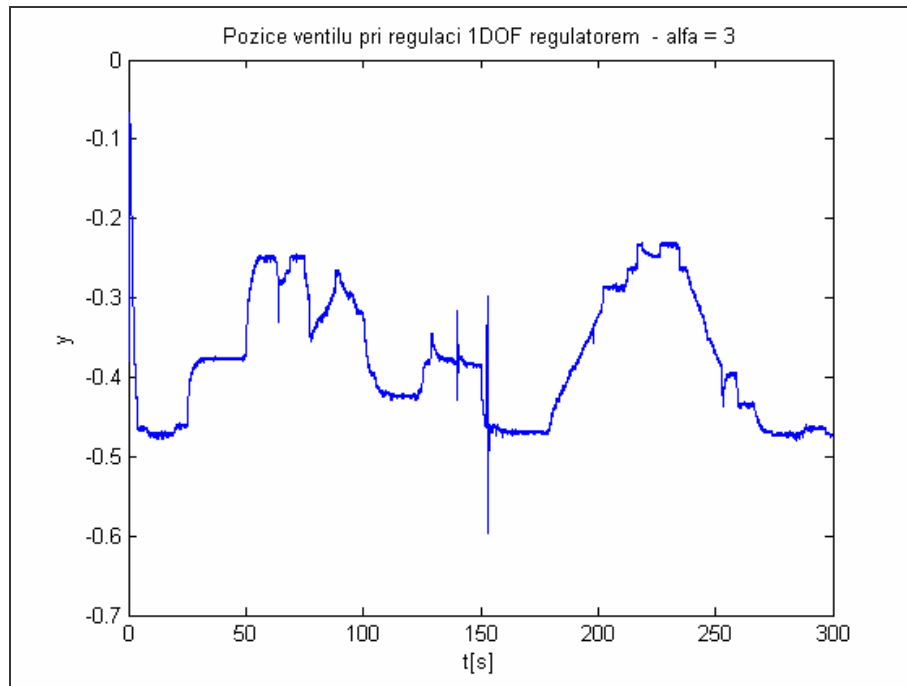
V grafech (Obr. 37. – 47.) jsou zobrazeny průběhy regulace soustavy a k nim příslušné akční zásahy. V grafu (Obr. 39) je pro ukázkou znázorněna pozice ventilu při regulaci.



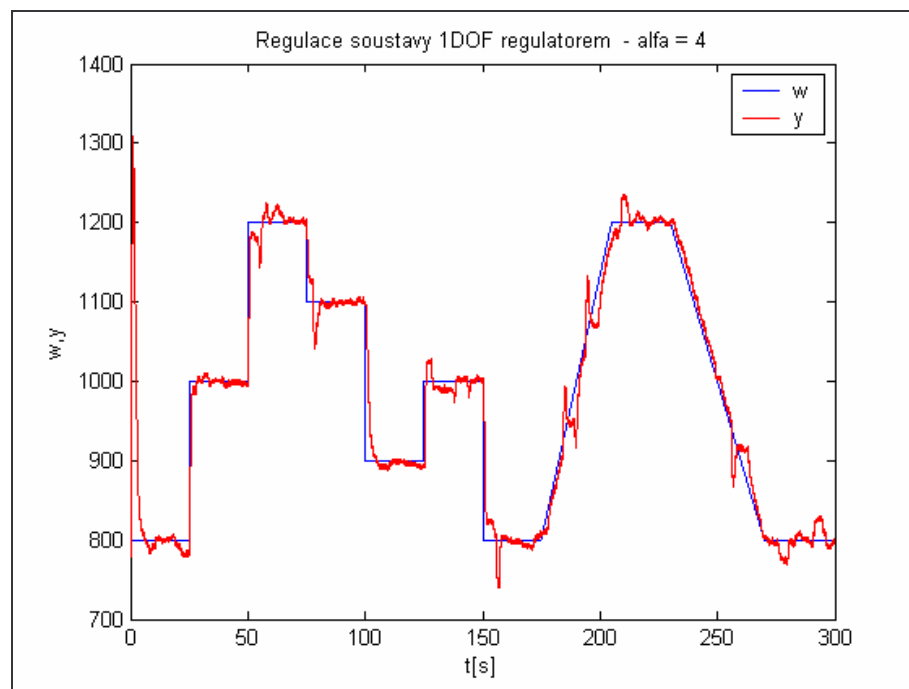
Obr. 37. Průběh regulace soustavy regulátorem 1DOF, alfa = 3



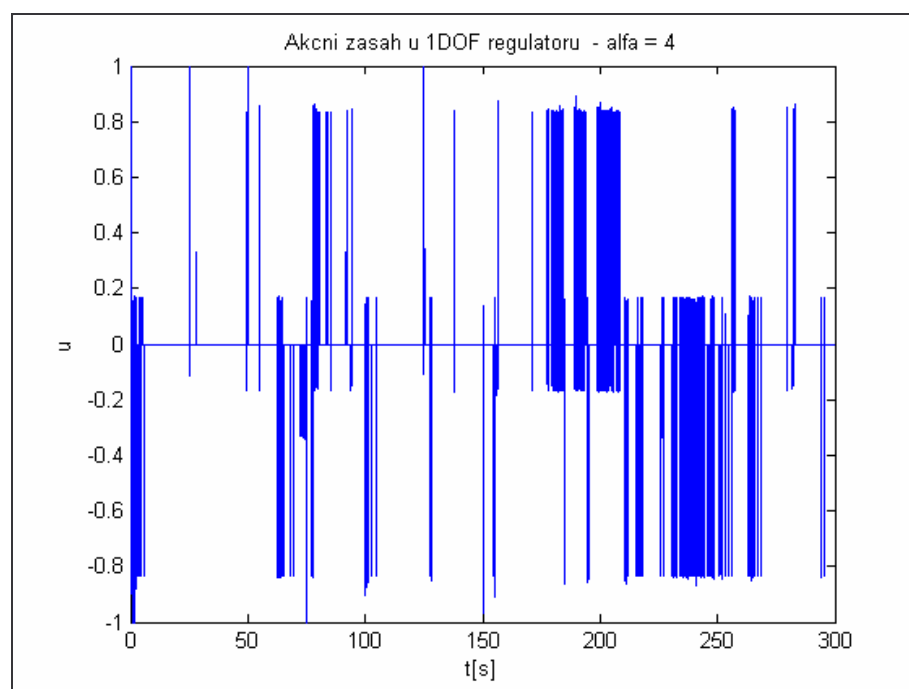
Obr. 38. Akční zásah regulátoru 1DOF na soustavu, alfa = 3



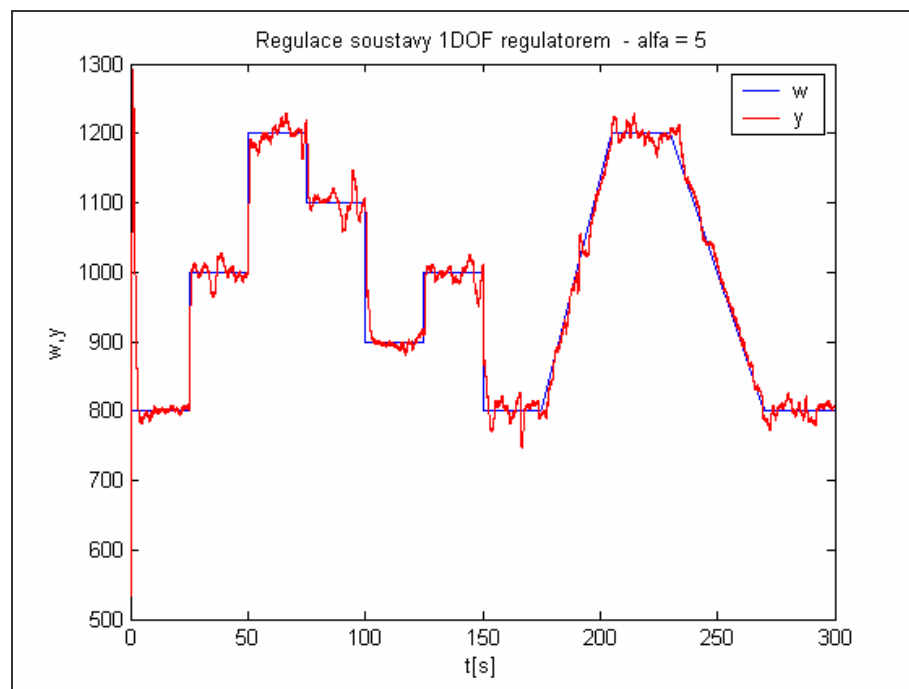
Obr. 39. Pozice ventilu při regulaci 1DOF regulátorem, alfa = 3



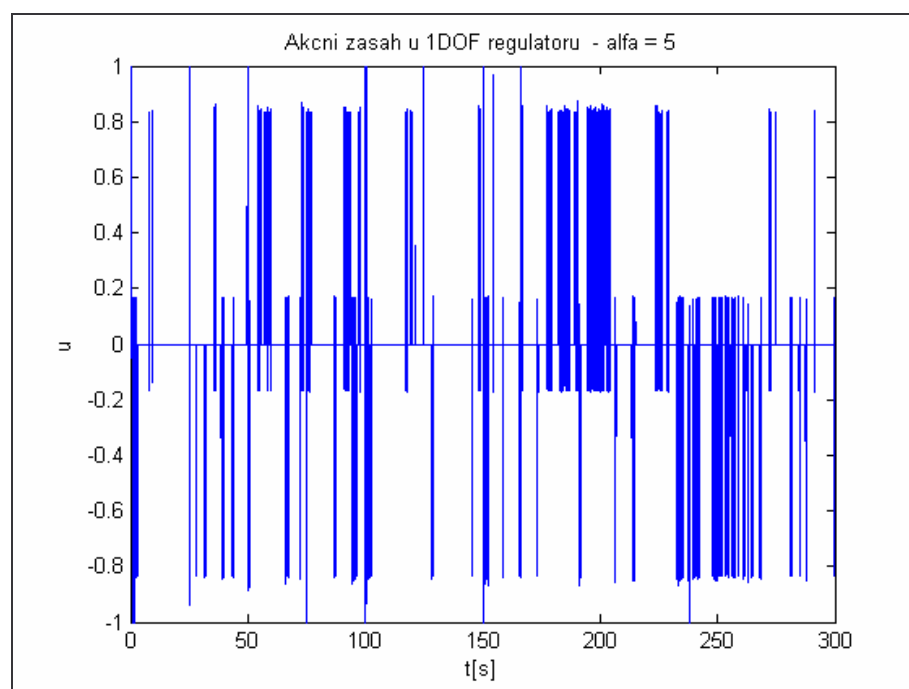
Obr. 40. Průběh regulace soustavy regulátorem 1DOF, alfa = 4



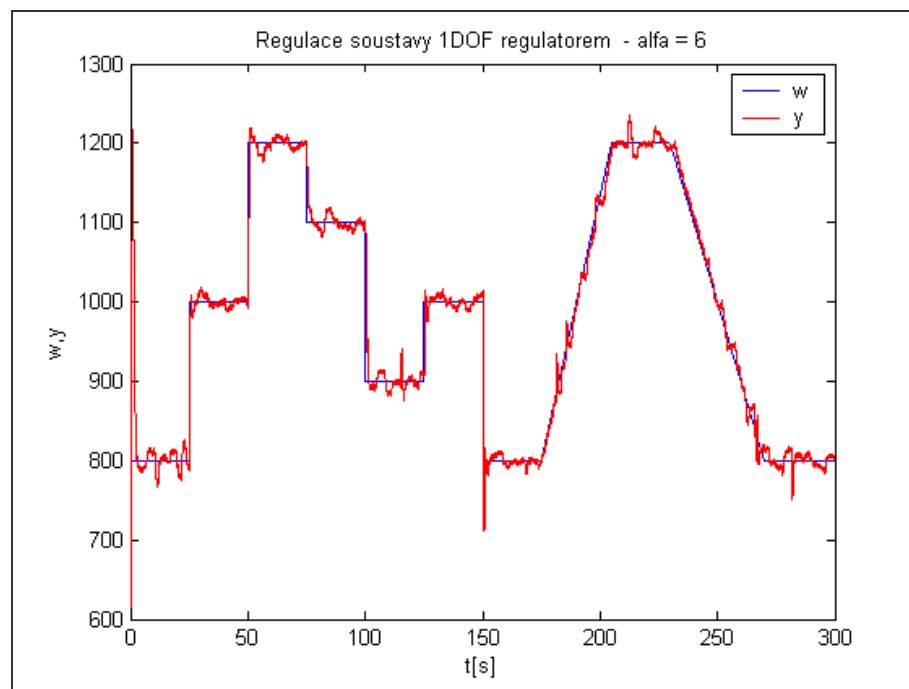
Obr. 41. Akční zásah regulátoru 1DOF na soustavu, alfa = 4



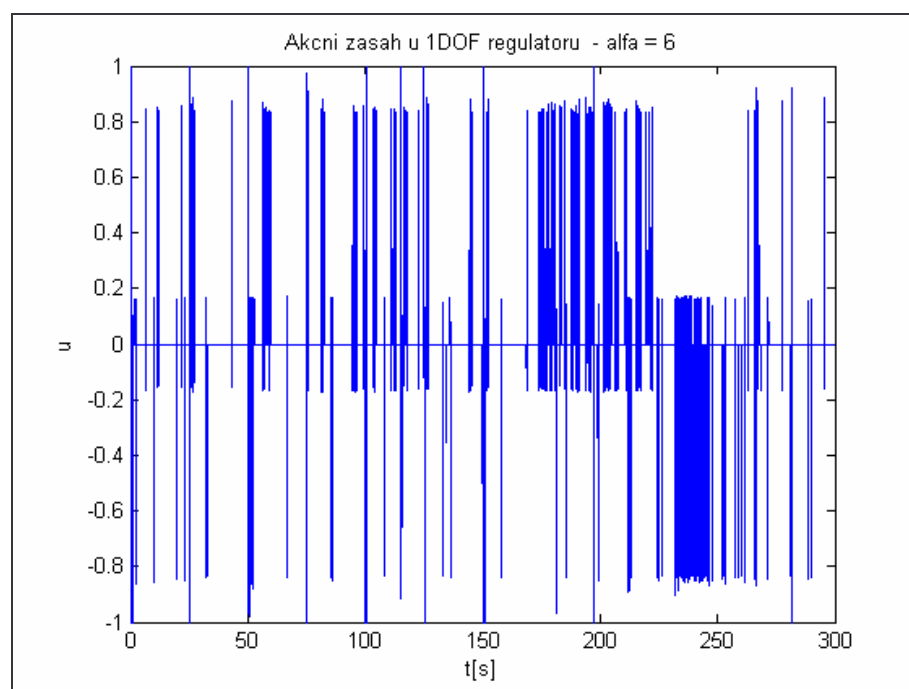
Obr. 42. Průběh regulace soustavy regulátorem 1DOF, alfa = 5



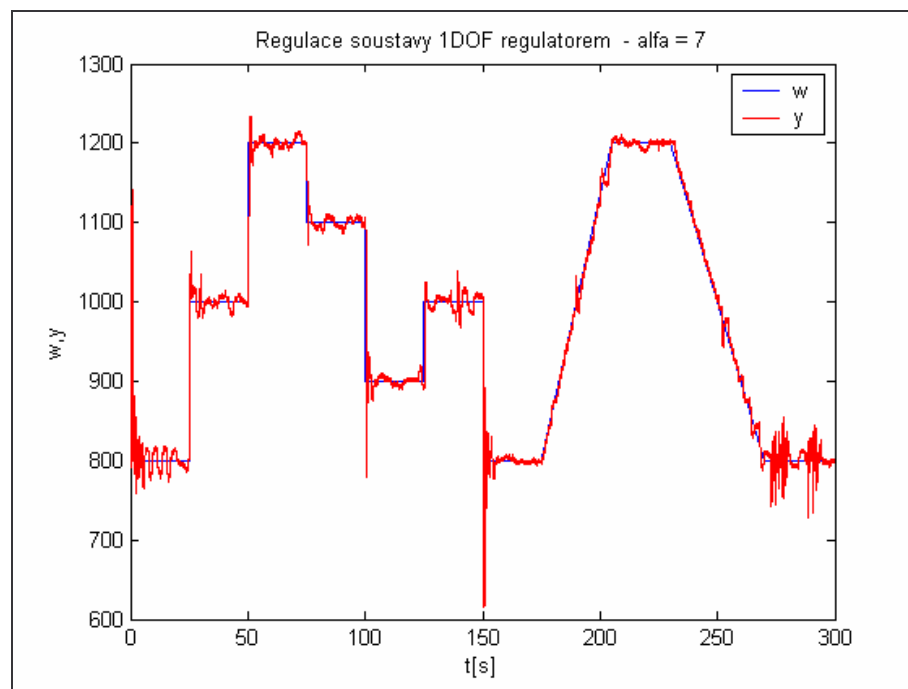
Obr. 43. Akční zásah regulátoru 1DOF na soustavu, alfa = 5



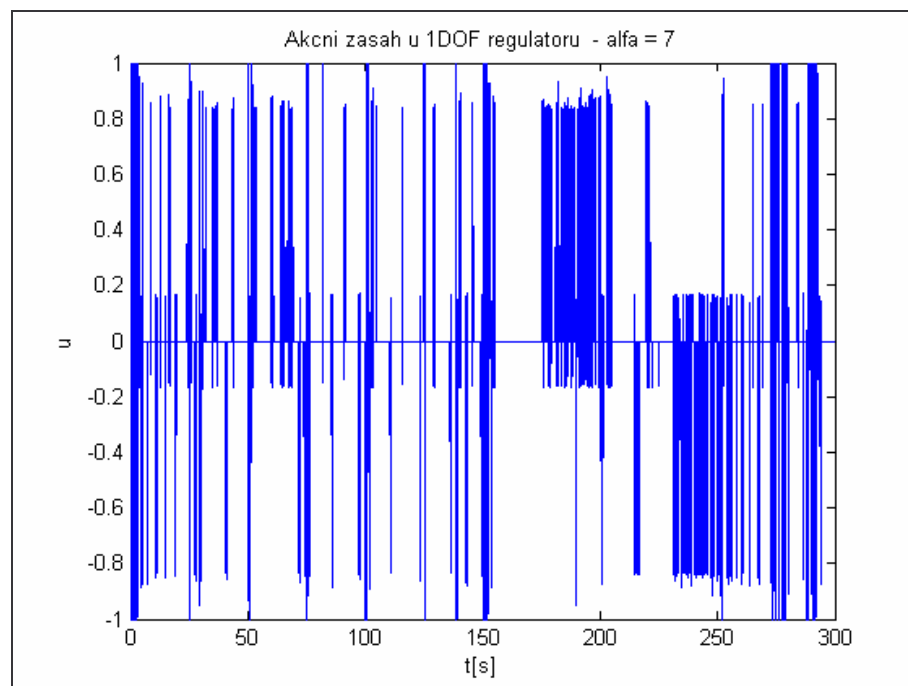
Obr. 44. Průběh regulace soustavy regulátorem 1DOF, alfa = 6



Obr. 45. Akční zásah regulátoru 1DOF na soustavu, alfa = 6



Obr. 46. Průběh regulace soustavy regulátorem 1DOF, alfa = 7



Obr. 47. Akční zásah regulátoru 1DOF na soustavu, alfa = 7

Tab. 9. Vyhodnocení kvality řízení - S_y při regulaci soustavy regulátorem 1DOF

Typ regulátoru	S_y
1DOF – alfa = 3	941,948
1DOF – alfa = 4	704,591
1DOF – alfa = 5	630,901
1DOF – alfa = 6	695,566
1DOF – alfa = 7	843,703

Tab. 10. Vyhodnocení kvality řízení – S_u při regulaci soustavy regulátorem 1DOF

Typ regulátoru	S_u
1DOF – alfa = 3	0,0294
1DOF – alfa = 4	0,0139
1DOF – alfa = 5	0,0191
1DOF – alfa = 6	0,0217
1DOF – alfa = 7	0,0302

Po vyhodnocení kvality má nejlepší regulační pochod regulátor 1DOF s alfa = 5. U regulátoru s alfa = 3 je regulační pochod pomalý oproti ostatním regulátorům. Při regulaci má průběh hodně překmitů a podkmitů. Rampu nahoru i dolů reguluje dobře, ale při ustálené hodnotě otáček < 1200 > tyto kmitají. Regulátor s alfa = 4 má rychlejší regulační pochod a méně kmitá. Při regulaci skokové hodnoty žádané veličiny nastává malý překmit nebo podkmit a poté se regulovaná veličina téměř ustálí na žádané veličině. Žádanou veličinu v podobě rampy řídí dobře. Nej kvalitnější pochod má regulátor s alfa = 5. Ten má minimální překmity a podkmity při skokové změně žádané veličiny. Rampu reguluje velmi dobře. U regulátoru s alfa = 6 je rychlý regulační pochod, ale při skokové změně o < 200 > otáček dolů nastal velký podkmit. Rampu řídí velmi dobře. U regulátoru s alfa = 7 už soustava kmitala.

8.1.2 Regulace PI a PID regulátorem

Schéma pro regulaci PI a PID regulátorem je stejné jako na obrázku (Obr. 36) s tím rozdílem, že místo 1DOF regulátoru se použije blok PID regulátoru.

Z přechodové charakteristiky jsem si určil T_u a T_n a vypočítal K_v . Podle tabulky (Tab. 3) jsem spočítal parametry PI a PID regulátoru. S těmito parametry nelze soustavu řídit – rozkmitá se. Proto jsem si spočítal podle následujících výpočtů z Hurwitzova kritéria nutné podmínky stability pro regulátor PI a poté jsem experimentálně regulátor nastavoval.

$$\text{prenos soustavy } G_{(s)} = \frac{b_0}{s^2 + a_1s + a_0} = \frac{b_{(s)}}{a_{(s)}}$$

$$\text{prenos regulátoru } G_{R(s)} = P + \frac{I}{s} = \frac{P \cdot s + I}{s} = \frac{q_{(s)}}{p_{(s)}}$$

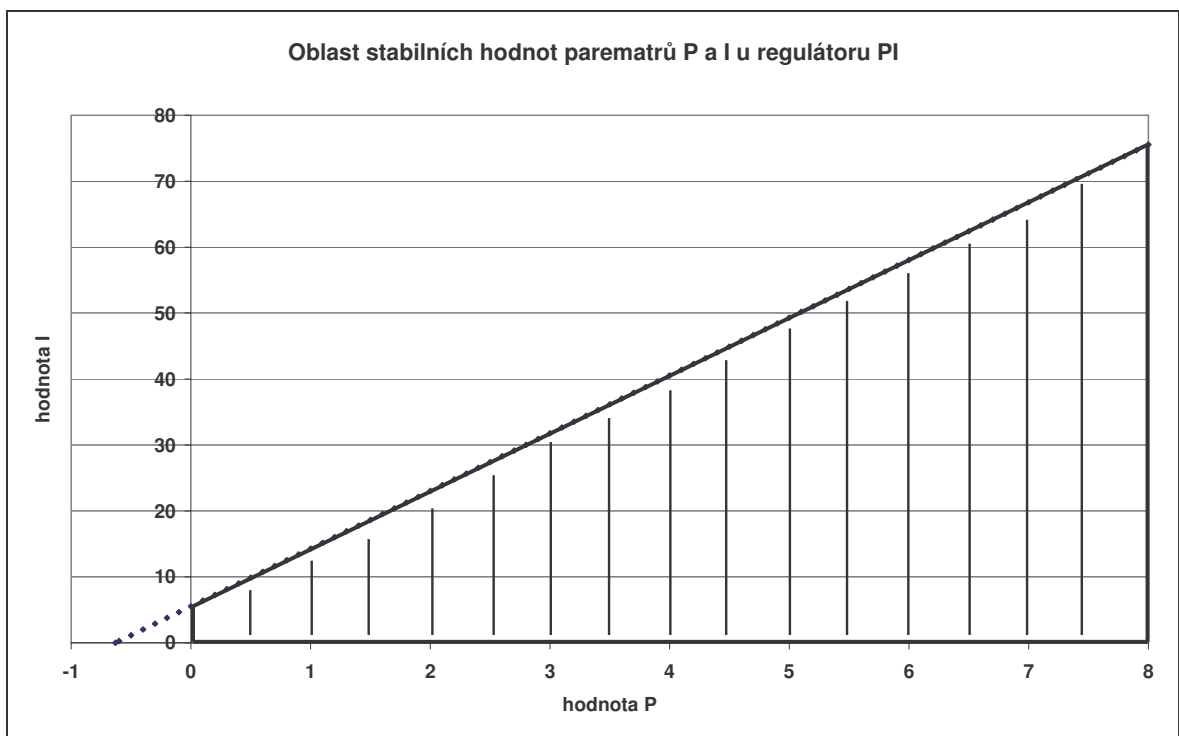
$$\begin{aligned} G_{W/Y} &= \frac{G \cdot G_R}{1 + G \cdot G_R} = \frac{\frac{b}{a} \cdot \frac{q}{p}}{1 + \frac{b}{a} \cdot \frac{q}{p}} = \frac{b \cdot q}{ap + bq} = \frac{b_0 \cdot (P \cdot s + I)}{(s^2 + a_1s + a_0) \cdot s + b_0 \cdot (P \cdot s + I)} = \\ &= \frac{b_0 \cdot P \cdot s + b_0 \cdot I}{s^3 + a_1s^2 + a_0s + b_0P \cdot s + b_0 \cdot I} = \frac{b_0 \cdot P \cdot s + b_0 \cdot I}{s^3 + a_1s^2 + s \cdot (a_0 + b_0P) + b_0 \cdot I} \rightarrow \\ &\rightarrow a_0 + b_0P > 0 \rightarrow P > -\frac{a_0}{b_0} \end{aligned}$$

$$b_0 \cdot I > 0 \rightarrow I > 0$$

$$\begin{aligned} H_2 &= \begin{bmatrix} a_1 & b_0 \cdot I \\ 1 & a_0 + b_0P \end{bmatrix} = a_1 \cdot (a_0 + b_0P) - b_0 \cdot I > 0 = \\ &= a_1 \cdot (a_0 + b_0P) > b_0 \cdot I \\ &= \frac{a_1}{b_0} (a_0 + b_0P) > I \end{aligned}$$

$$I < a_1 \cdot P + \frac{a_1 \cdot a_0}{b_0}$$

$$P > -\frac{19,1571}{30,3908} = -0,6304$$



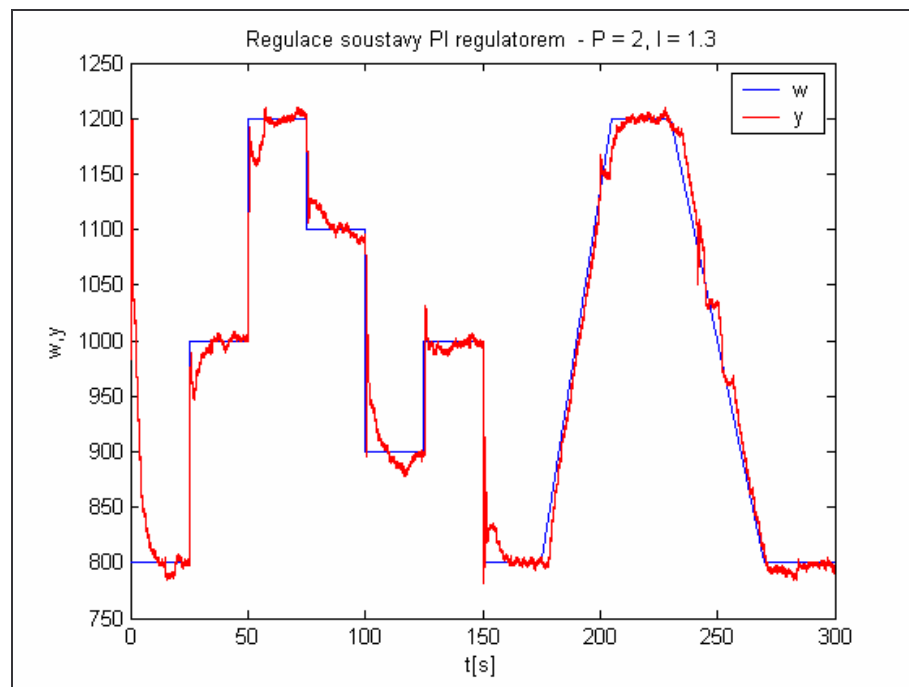
Obr. 48. Oblast stabilních hodnot parametrů P a I u regulátoru PI

V grafu (Obr. 48) je znázorněna oblast hodnot parametrů P a I u regulátoru PI. Zvolené nastavení musí být pod vypočtenou mezí (přímkou). Z této oblasti jsem experimentálně navrhl 2 regulátory PI. Dále jsem experimentálně navrhl 2 regulátory PID.

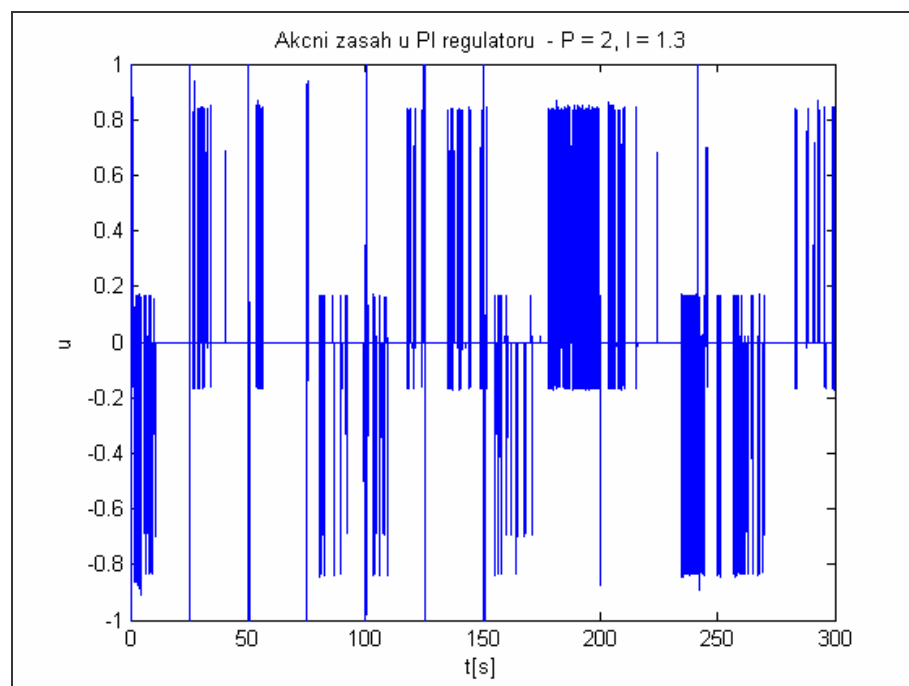
Tab. 11. Parametry navržených regulátorů PI a PID

Typ	P	I	D
PI	2	1,3	-
PI	2,2	1,8	-
PID	1,5	2	0,05
PID	2	2,2	0,1

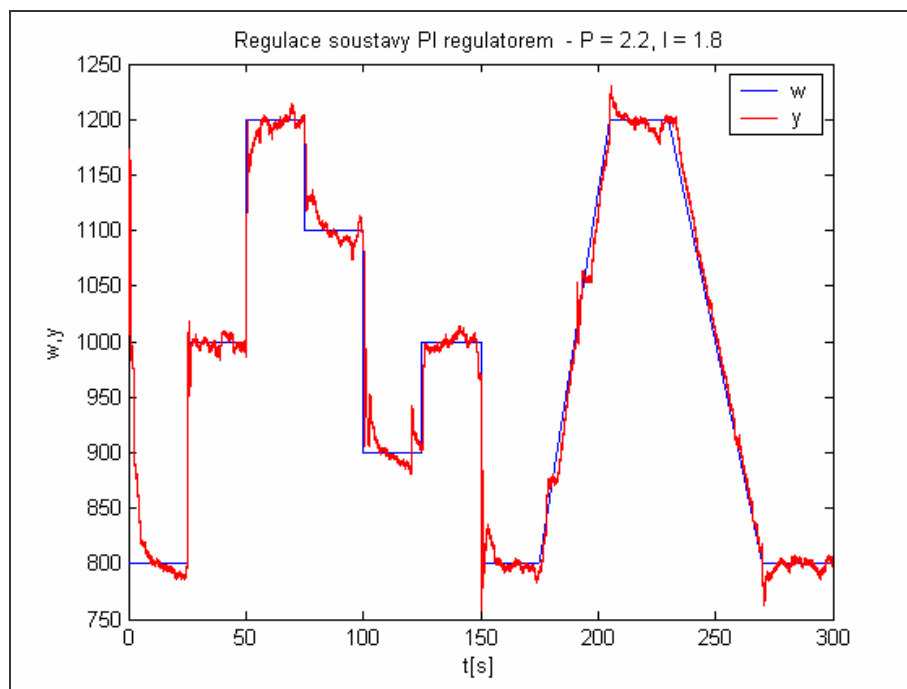
V grafech (Obr. 49. – 56.) jsou znázorněny průběhy regulací s regulátory PI a PID a jim příslušné akční zásahy.



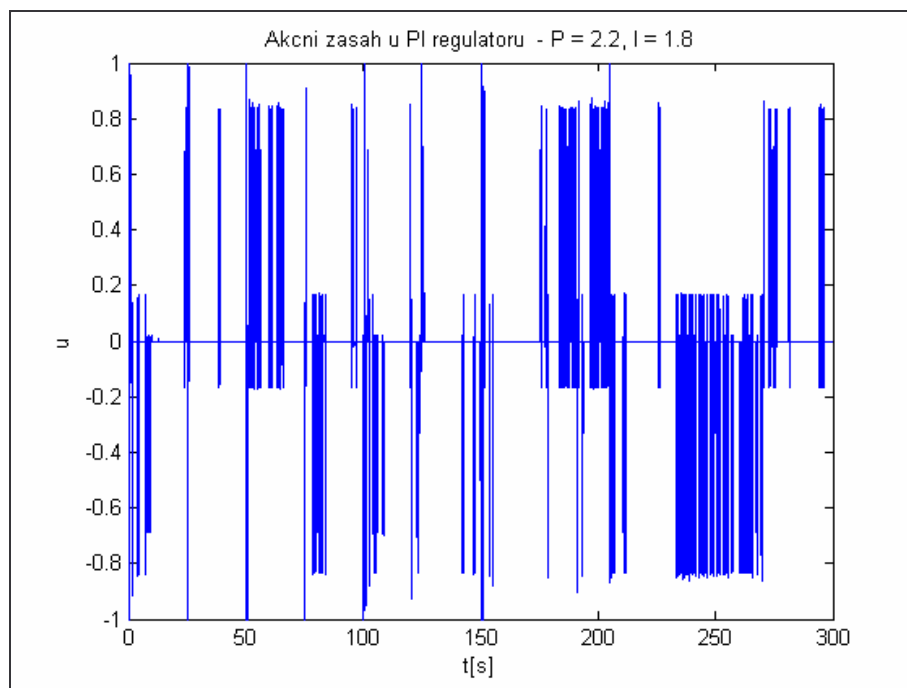
Obr. 49. Průběh regulace soustavy regulátorem PI, $P = 2; I = 1,3$



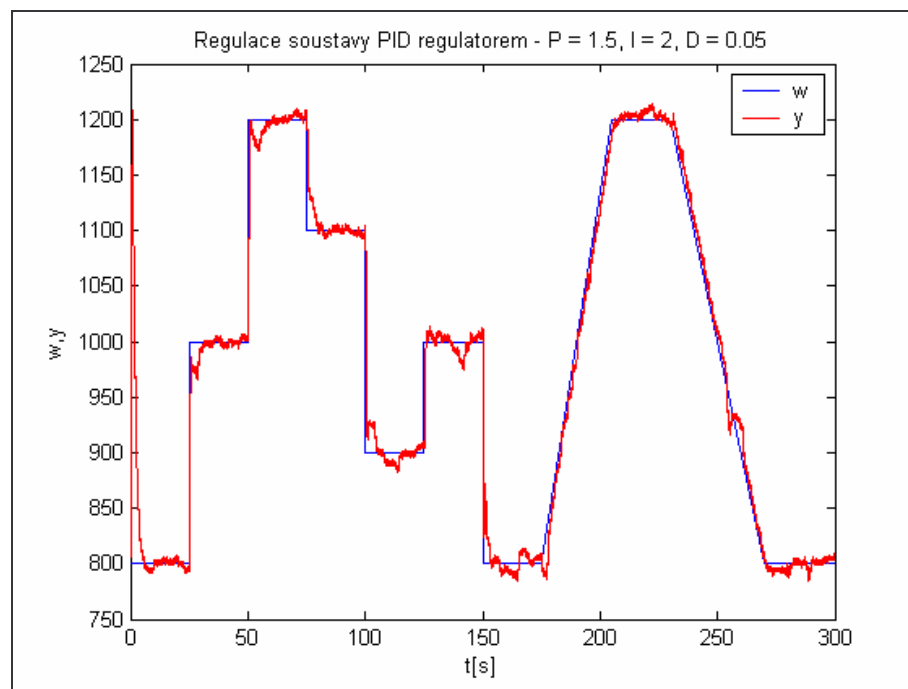
Obr. 50. Akční zásah regulátoru PI na soustavu, $P = 2; I = 1,3$



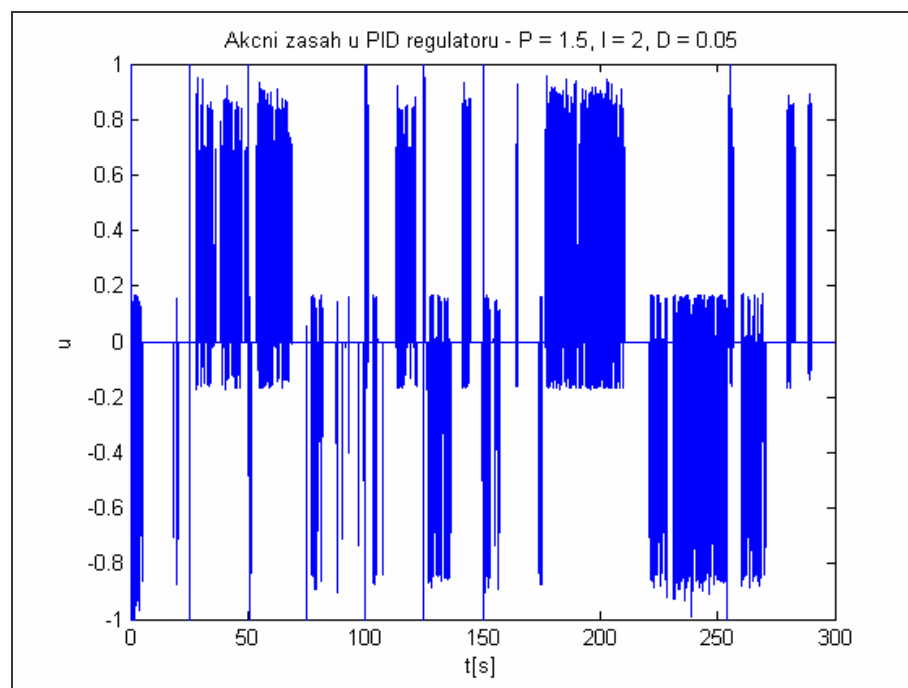
Obr. 51. Průběh regulace soustavy regulátorem PI, $P = 2,2; I = 1,8$



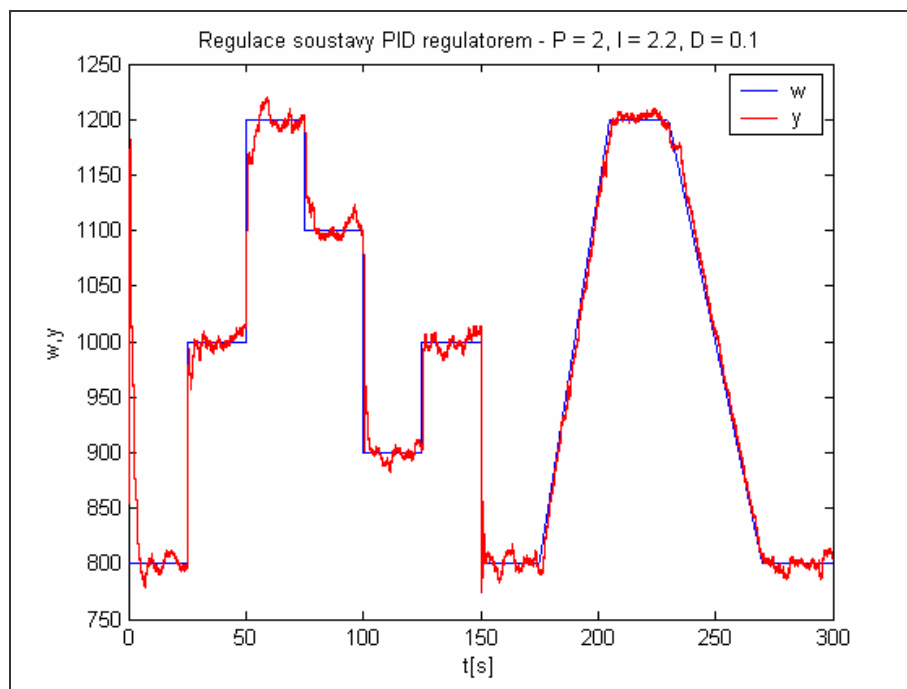
Obr. 52. Akční zásah regulátoru PI na soustavu, $P = 2,2; I = 1,8$



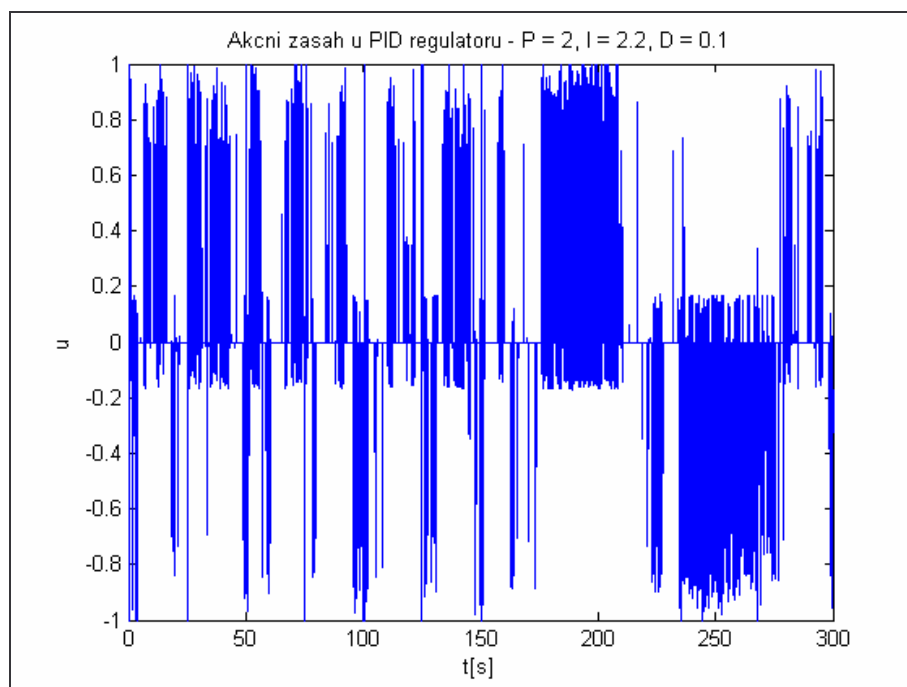
Obr. 53. Průběh regulace soustavy regulátorem PID,
 $P = 1,5; I = 2; D = 0,05$



Obr. 54. Akční zásah regulátoru PID na soustavu,
 $P = 1,5; I = 2; D = 0,05$



Obr. 55. Průběh regulace soustavy regulátorem PID,
 $P = 2$; $I = 2,2$; $D = 0,1$



Obr. 56. Akční zásah regulátoru PID na soustavu,
 $P = 2$; $I = 2,2$; $D = 0,1$

Tab. 12. Vyhodnocení kvality řízení – S_y při regulaci soustavy regulátorem PI a PID

Typ regulátoru	S_y
PI – P = 2; I = 1,3	530,525
PI – P = 2,2; I = 1,8	421,215
PID – P = 1,5; I = 2; D = 0,05	446,020
PID – P = 2; I = 2,2; D = 0,1	388,308

Tab. 13. Vyhodnocení kvality řízení – S_u při regulaci soustavy regulátorem PI a PID

Typ regulátoru	S_u
PI – P = 2; I = 1,3	0,0132
PI – P = 2,2; I = 1,8	0,0142
PID – P = 1,5; I = 2; D = 0,05	0,0372
PID – P = 2; I = 2,2; D = 0,1	0,0419

PI regulátor s parametry: P = 2,2; I = 1,8 má podle tabulky (Tab. 12) kvalitnější regulační pochod než regulátor s parametry: P = 2; I = 1,3. U prvního zmíněného regulátoru je rychlý regulační průběh bez velkých překmitů a podkmitů. Rampu regulátor řídí velmi dobře. Druhý zmíněný regulátor má také rychlý regulační pochod, ale při skokové změně nahoru nastává podkmit a jednou překmit. Rampu řídí taky dobře. Rozdíl ve vyhodnocení kvality je minimální. Při srovnání přírůstků akční veličiny podle tabulky (Tab. 13) vychází lépe regulátor s parametry: P = 2; I = 1,3 ale opět je zde velmi malý rozdíl.

Při regulaci soustavy PID regulátorem podle tabulky (Tab. 12) má lepší kvalitu regulace regulátor s parametry: P = 2; I = 2,2 a D = 0,1. Regulační pochod u tohoto regulátoru je rychlý aniž by dosahoval velkých překmitů a podkmitů. Rampu řídí velmi dobře. Druhý regulátor s parametry: P = 1,5; I = 2 a D = 0,05 má také rychlý regulační pochod bez velkých překmitů a podkmitů. Rampu řídí velmi dobře. Při srovnání přírůstků akční

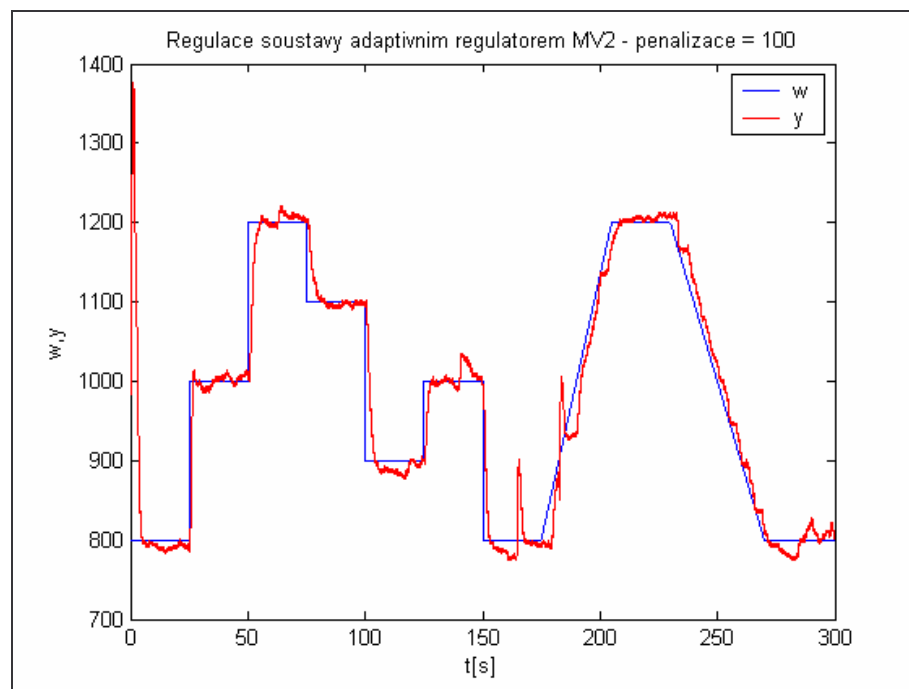
veličiny podle tabulky (Tab. 13) vychází lépe regulátor s parametry $P = 1,5$; $I = 2$ a $D = 0,05$ ale mezi oběma regulátory je jen velmi malý rozdíl.

8.1.3 Regulace adaptivním regulátorem

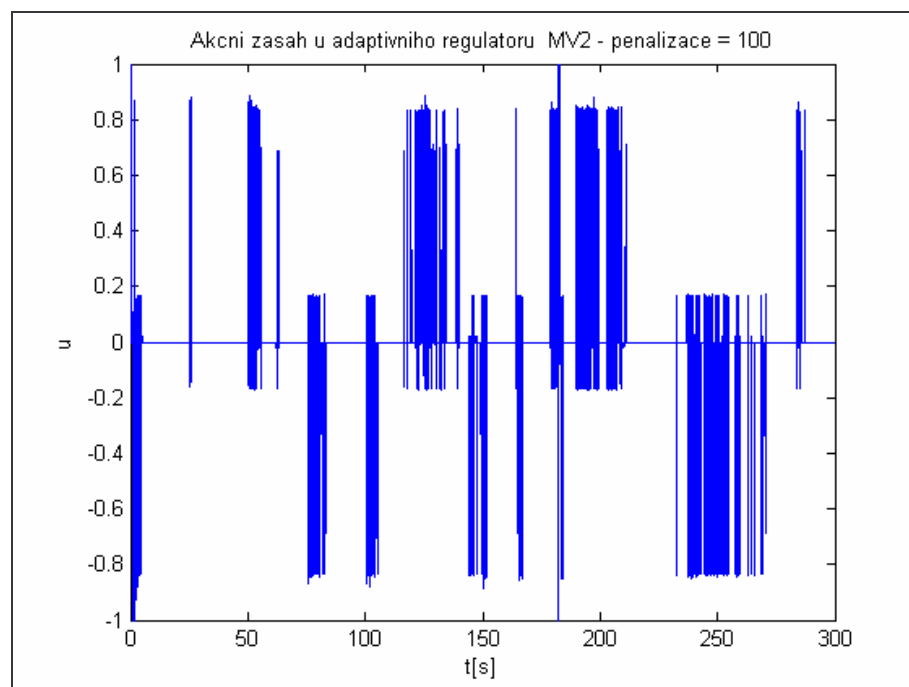
Schéma pro regulaci adaptivním regulátorem je stejné jako na obrázku (Obr. 36) s tím rozdílem, že místo 1DOF regulátoru se použije blok adaptivního regulátoru z knihovny samočinně se nastavujících regulátorů STCTOOL.

Z knihovny jsem zvolil adaptivní regulátor založený na metodě minimalizace rozptylu regulované veličiny. Označení regulátoru v knihovně je MV2. Je zde volitelný parametr - penalizace, který ovlivňuje kvalitu regulačního pochodu. Po několika experimentech vyšla nejlepší penalizace s hodnotou $< 100 >$. [14]

V grafech (Obr. 57. a 58.) je znázorněna regulace pomocí uvedeného adaptivního regulátoru MV2 a příslušný akční zásah.



Obr. 57. Průběh regulace soustavy adaptivním regulátorem, penalizace = 100



Obr. 58. Akční zásah adaptivního regulátoru na soustavu, penalizace = 100

Tab. 14. Vyhodnocení kvality řízení - S_y při regulaci soustavy adaptivním regulátorem

Typ regulátoru	S_y
MV2 – penalizace = 100	1037,246

Tab. 15. Vyhodnocení kvality řízení – S_u při regulaci soustavy adaptivním regulátorem

Typ regulátoru	S_u
MV2 – penalizace = 100	0,0199

V tabulkách (Tab. 14. a 15.) je vyhodnocena kvalita regulačního pochodu. Adaptivní regulátor MV2 má rychlý regulační pochod. Při skokové změně řídí otáčky dobře bez velkých překmitů a podkmitů. Před regulací rampy a při její regulaci nastaly dva velké překmity, jinak reguloval rampu velmi dobře.

8.2 Porovnání kvality řízení S_y a S_u u všech regulátorů

Tab. 16. Vyhodnocení kvality řízení - S_y při regulaci soustavy všemi regulátory

Typ regulátoru	S_y
1DOF – alfa = 3	941,948
1DOF – alfa = 4	704,591
1DOF – alfa = 5	630,901
1DOF – alfa = 6	695,566
1DOF – alfa = 7	843,703
PI – P = 2, I = 1.3	530,525
PI – P = 2.2, I = 1.8	421,215
PID – P = 1.5, I = 2, D = 0.05	446,020
PID – P = 2, I = 2.2, D = 0.1	388,308
MV2 – penalizace = 100	1037,246

Tab. 17. Vyhodnocení kvality řízení - S_u při regulaci soustavy všemi regulátory

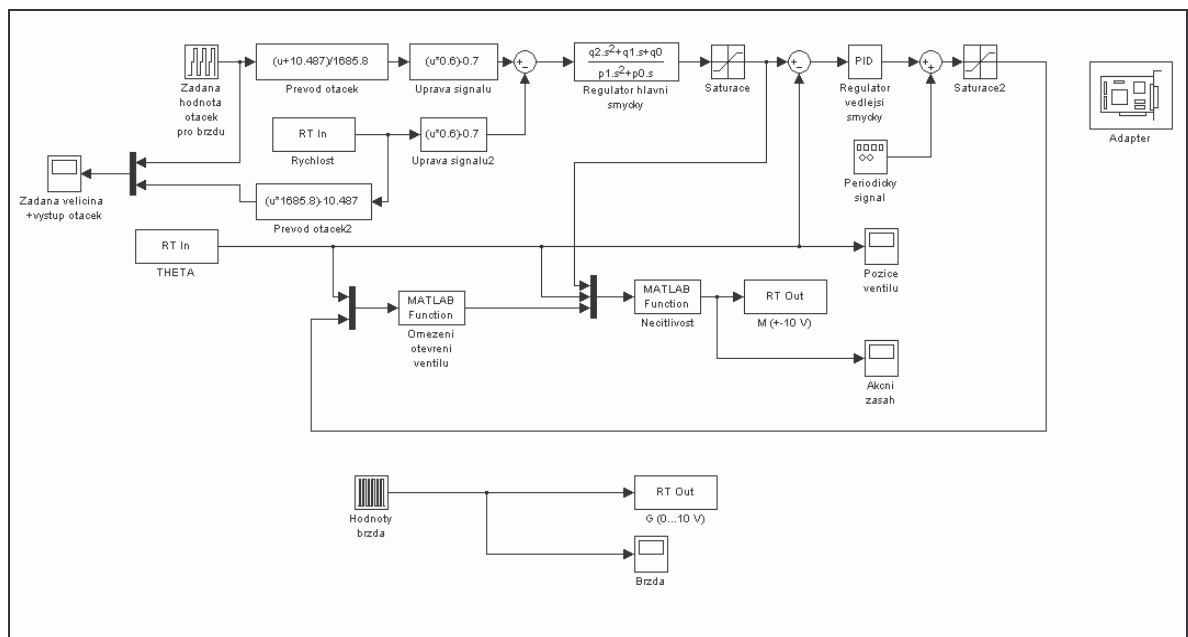
Typ regulátoru	S_u
1DOF – alfa = 3	0,0294
1DOF – alfa = 4	0,0139
1DOF – alfa = 5	0,0191
1DOF – alfa = 6	0,0217
1DOF – alfa = 7	0,0302
PI – P = 2, I = 1.3	0,0132
PI – P = 2.2, I = 1.8	0,0142
PID – P = 1.5, I = 2, D = 0.05	0,0372
PID – P = 2, I = 2.2, D = 0.1	0,0419
MV2 – penalizace = 100	0,0199

V tabulkách (Tab. 16. a 17.) jsou vyhodnoceny kvality řízení u všech zkoušených regulátorů. Jako nejlepší regulátor podle kritéria S_y je **PID regulátor s parametry: P = 2; I = 2,2; D = 0,1**. Druhou nejlepší kvalitu má **PI regulátor s parametry: P = 2,2; I = 1,8**. Dále následuje **PID regulátor s parametry: P = 1,5; I = 2; D = 0,05** poté **PI regulátor s parametry: P = 2; I = 1,3** a dále **1DOF regulátor s parametrem: alfa = 5**. Jako nejhorší regulátor co se týče uvedeného kritéria vyšel adaptivní regulátor **MV2 s penalizací = 100**.

Při srovnání kvality řízení S_u je nejlepší **PI regulátor s parametry: P = 2; I = 1,3**. Druhý celkový nejmenší přírůstek akční veličiny je u **1DOF regulátoru s parametrem: alfa = 4**. Dále následuje **PI regulátor s parametry: P = 2,2; I = 1,8**. Rozdíl mezi těmito třemi regulátory je velmi malý. Jako nejhorší regulátor ohledně přírůstků akční veličiny je **PID regulátor s parametry: P = 2; I = 2,2; D = 0,1**, který má ale nejlepší kvalitu S_y .

8.3 Regulace se zátěží

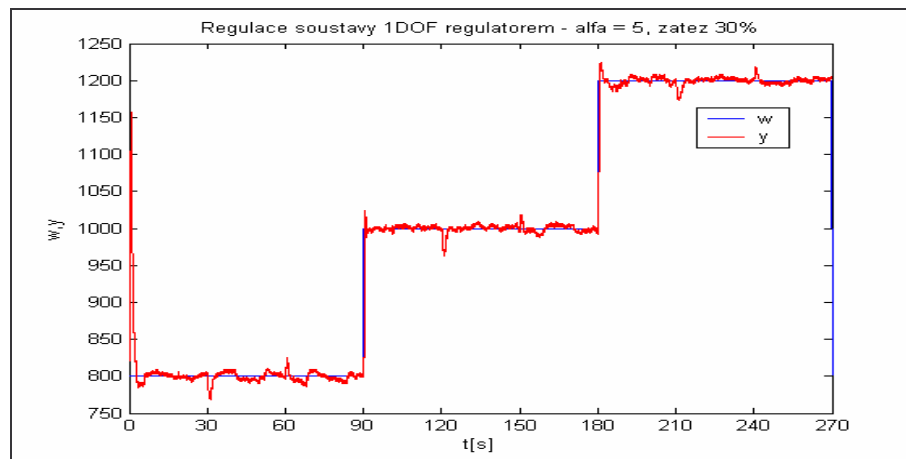
Na obrázku (Obr. 59) je znázorněno schéma pro regulaci soustavy při zatížení. Schéma je totožné se schématem na obrázku (Obr. 36) s tím rozdílem, že je zde přidán blok žádané veličiny pro zátěž. Žádané hodnoty zatížení se zadávají do bloku *hodnota brzdy*. Ze všech regulátorů, kterými jsem řídil soustavu jsem vybral z každé skupiny ten, který má nejlepší kvalitu řízení S_y a zkoušel regulovat soustavu se zatížením. Zatížení za zadává v hodnotách $< 0 \% \div 100\% >$. Vybral jsem zatížení s hodnotou $< 30 \% >$ a $< 60 \% >$ pro všechny regulátory. Regulaci se zátěží jsem prováděl pro tři hodnoty otáček: $< 800 ; 1000 \text{ a } 1200 >$. Doba jedné nastavené hodnoty otáček je 90s. Ve 30s nastane skok žádaného zatížení, který trvá do 60s. Poté je zátěž nastavena skokem na 0. Tímto lze posoudit, jak bude regulátor řídit při skokovém zatížení.



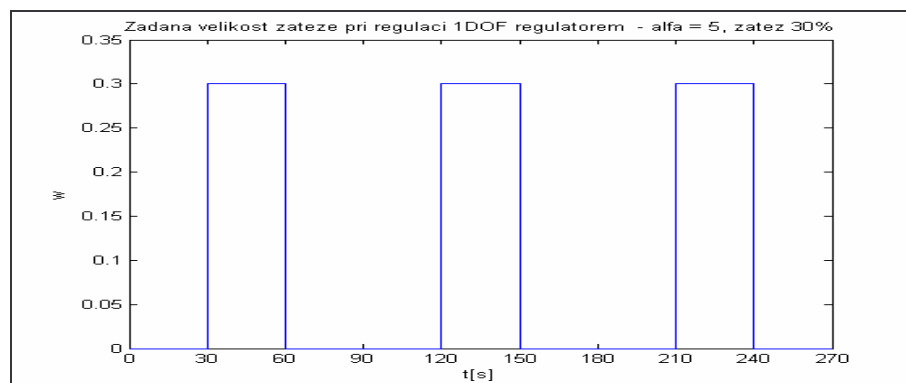
Obr. 59. Schéma pro regulaci soustavy se zatížením

8.3.1 Regulace 1DOF regulátorem při zatížení motoru

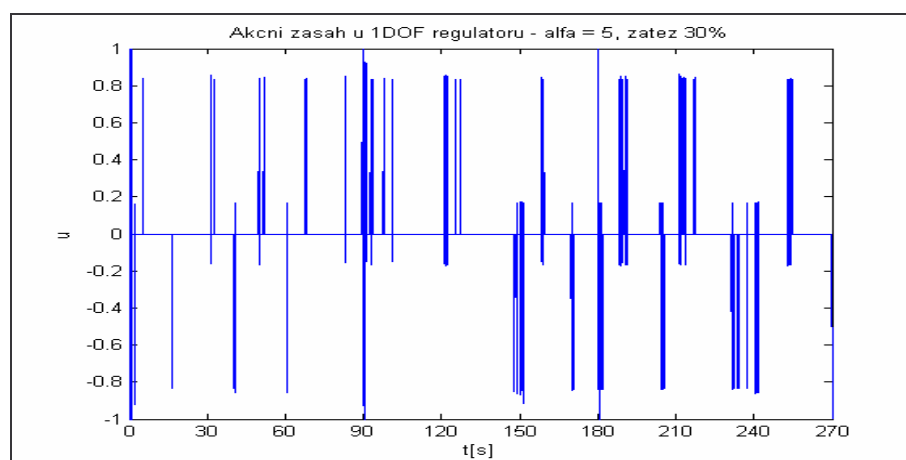
Pro regulaci soustavy se zatížením jsem použil schéma na obrázku (Obr. 59). Jako nejlepší 1DOF regulátor je podle tabulky (Tab. 6) při porovnání kvality řízení dle S_y regulátor s parametrem $\alpha = 5$. V grafu (Obr. 60) je znázorněna regulace soustavy se zatížením $< 30 \% >$, dále v grafu (Obr. 61) je žádaná velikost zátěže a v grafu (Obr. 62) je akční zásah regulátoru. Dále v grafech (Obr. 63., 64. a 65) je regulace stejným regulátorem, ale se zatížením $< 60 \% >$.



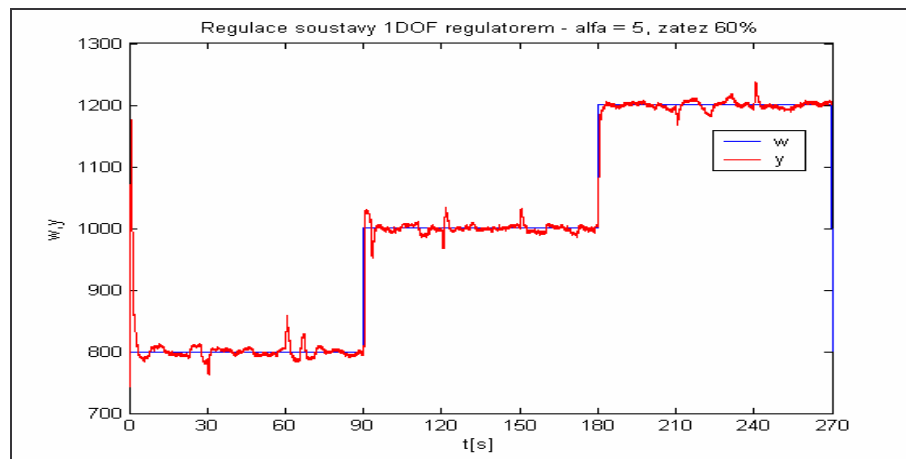
Obr. 60. Průběh regulace soustavy se zatížením regulátorem 1DOF, alfa = 5, zátěž = 30 %



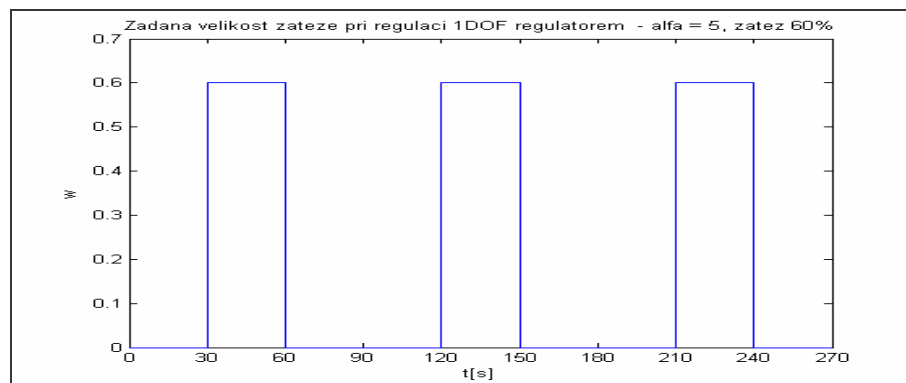
Obr. 61. Žádaná velikost zátěže při regulaci 1DOF regulátorem na soustavu, alfa = 5, zátěž = 30 %



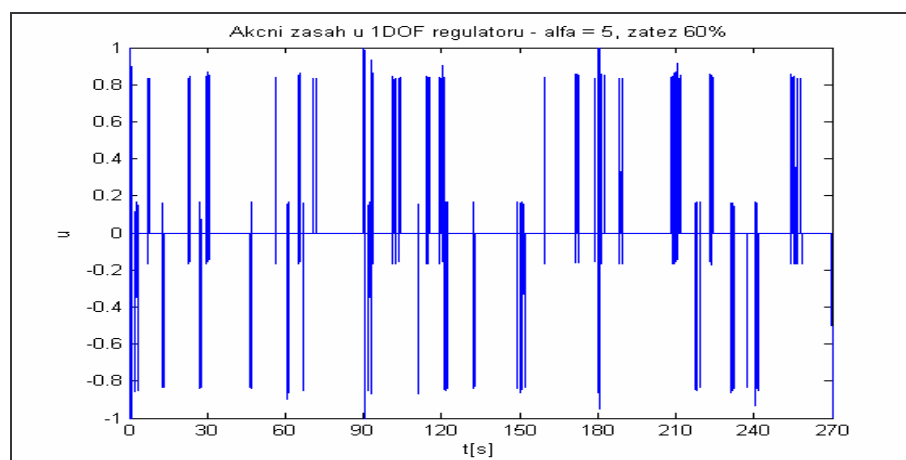
Obr. 62. Akční zásah regulátoru 1DOF na soustavu se zatížením, alfa = 5, zátěž = 30 %



Obr. 63. Průběh regulace soustavy se zatížením regulátorem 1DOF, alfa = 5, zátěž = 60 %



Obr. 64. Žádaná velikost zátěže při regulaci 1DOF regulátorem na soustavu, alfa = 5, zátěž = 60 %

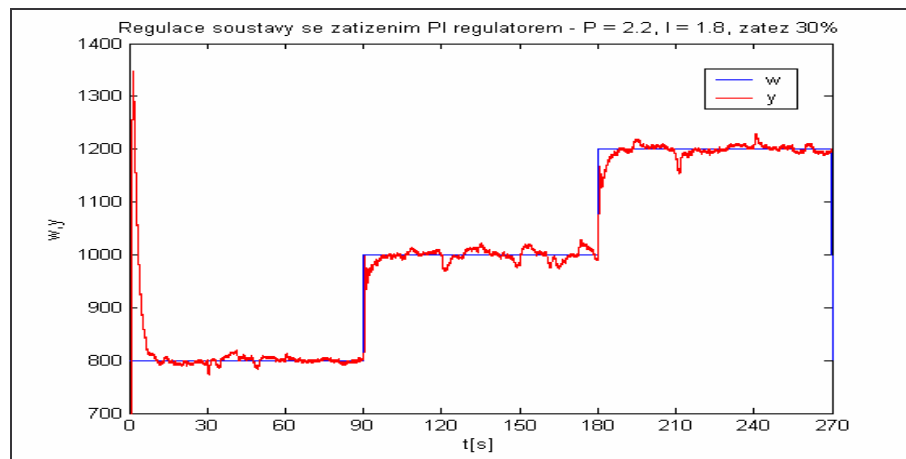


Obr. 65. Akční zásah regulátoru 1DOF na soustavu se zatížením, alfa = 5, zátěž = 60 %

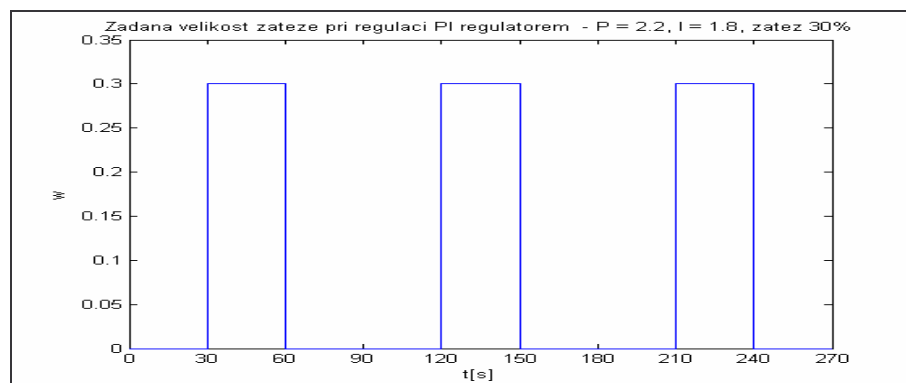
Při regulaci 1DOF regulátorem a zatížení $< 30 \% >$ je regulace velmi dobrá. Při skoku, kdy se přidá zatížení, regulovaná veličina poklesne asi o 30 otáček, ale velmi rychle se ustálí na žádané hodnotě. Při skokovém vypnutí zatížení se zvýší otáčky asi o 20, ale opět se velmi rychle ustálí na žádané hodnotě. Při zatížení $< 60 \% >$ je regulace stále dobrá. Při skoku zatížení na žádanou hodnotu, otáčky poklesnou, ale rychle se ustálí. Při skokovém vypnutí zatížení se otáčky trochu rozkmitají, ale ustálí se.

8.3.2 Regulace PI a PID regulátorem při zatížení motoru

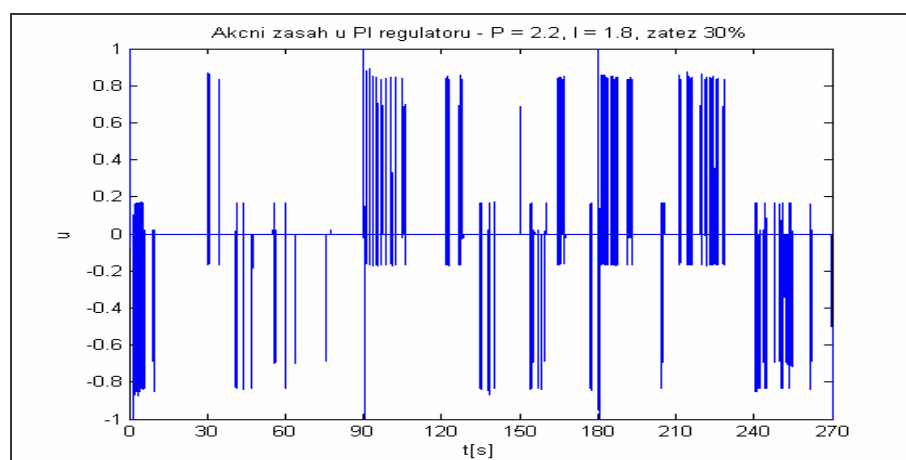
Regulace probíhala podle schématu na obrázku (Obr. 59) s tím rozdílem, že místo 1DOF regulátoru se použil PI a PID regulátor. Z tabulky (Tab. 12) je podle vyhodnocení kvality řízení dle S_y nejlepší PI regulátor s parametry: $P = 2,2$ a $I = 1,8$ a PID regulátor s parametry: $P = 2$; $I = 2,2$ a $D = 0,1$. V grafech (Obr. 66. – 77.) jsou zobrazeny průběhy regulací, žádané velikosti zatížení a akční zásahy u obou regulátorů.



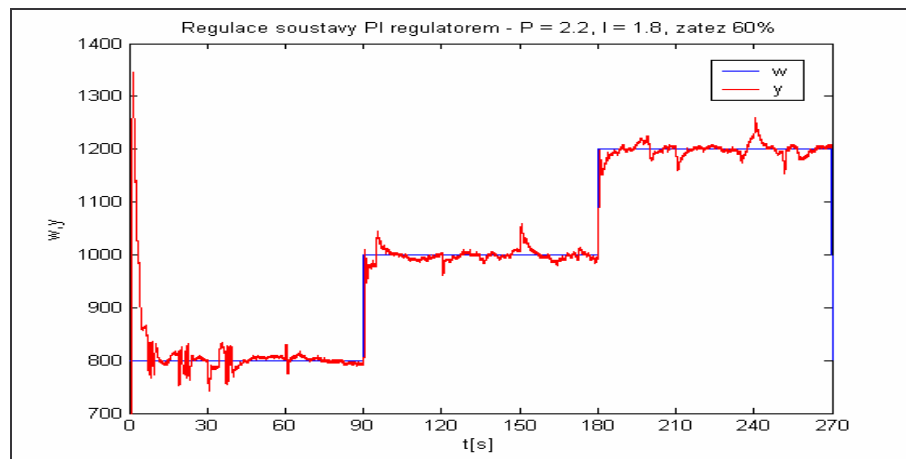
Obr. 66. Průběh regulace soustavy se zatížením regulátorem PI, $P = 2,2$; $I = 1,8$; zátěž = 30 %



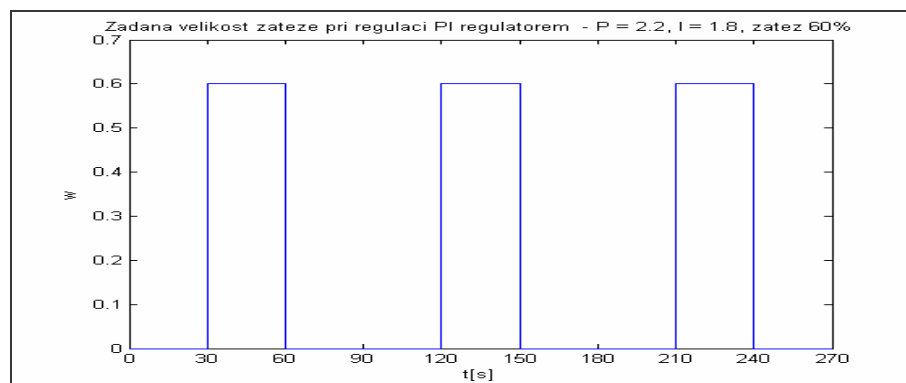
Obr. 67. Žádaná velikost zátěže při regulaci PI regulátorem na soustavu, $P = 2,2$; $I = 1,8$; zátěž = 30 %



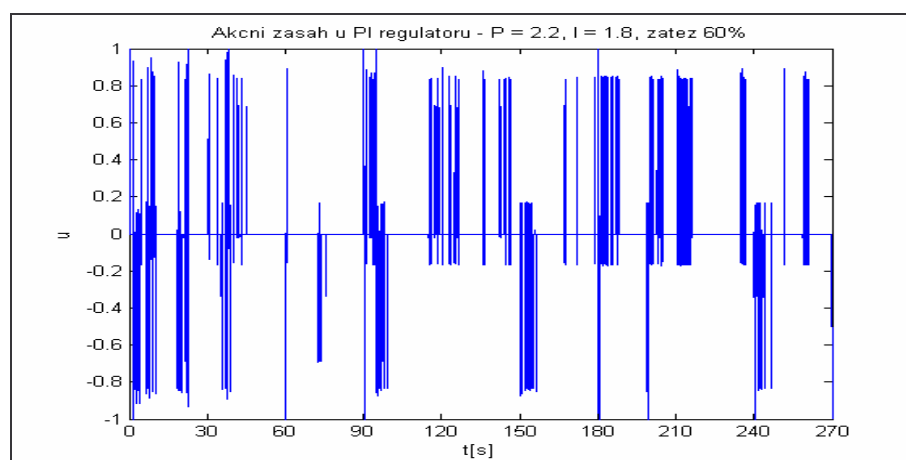
Obr. 68. Akční zásah regulátoru PI na soustavu se zatížením, $P = 2,2$; $I = 1,8$; zátěž = 30 %



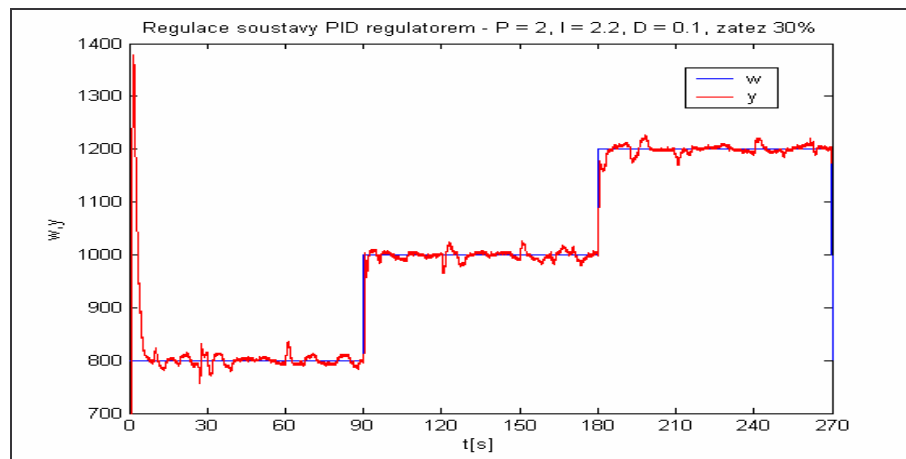
Obr. 69. Průběh regulace soustavy se zatížením regulátorem PI, $P = 2,2$; $I = 1,8$; zátěž = 60 %



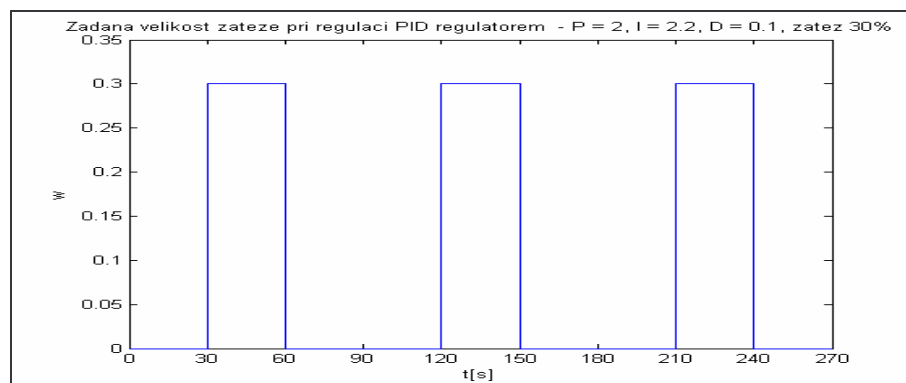
Obr. 70. Žádaná velikost zátěže při regulaci PI regulátorem na soustavu, $P = 2,2$; $I = 1,8$; zátěž = 60 %



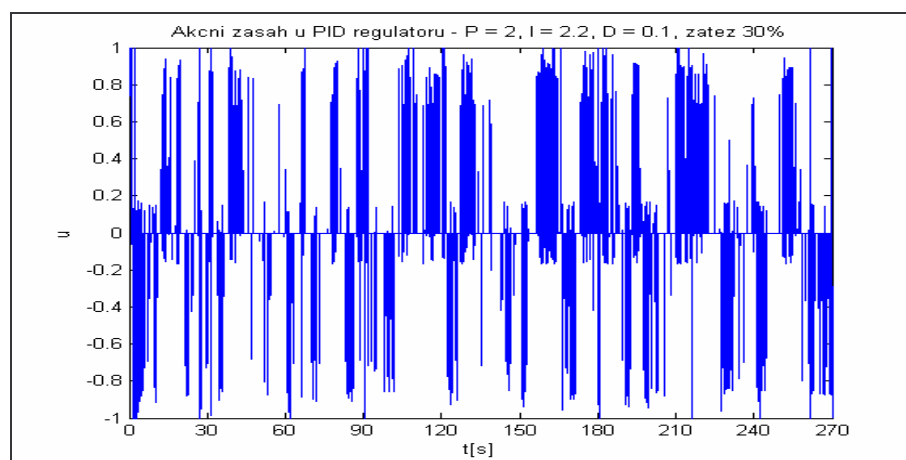
Obr. 71. Akční zásah regulátoru PI na soustavu se zatížením, $P = 2,2$; $I = 1,8$; zátěž = 60 %



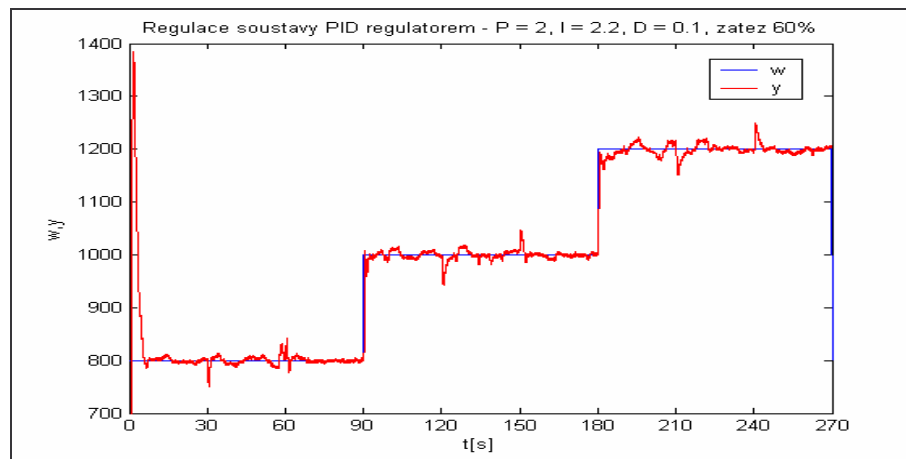
Obr. 72. Průběh regulace soustavy se zatížením regulátorem PID, $P = 2$; $I = 2,2$; $D = 0,1$; zátěž = 30 %



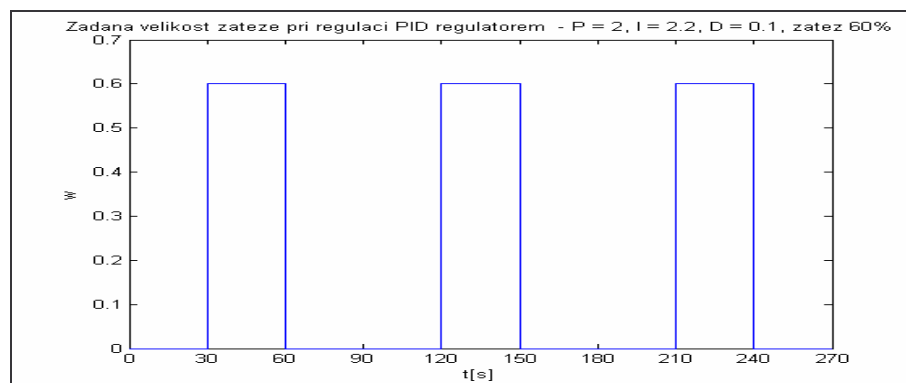
Obr. 73. Žádaná velikost zátěže při regulaci PID regulátorem na soustavu, $P = 2$; $I = 2,2$; $D = 0,1$; zátěž = 30 %



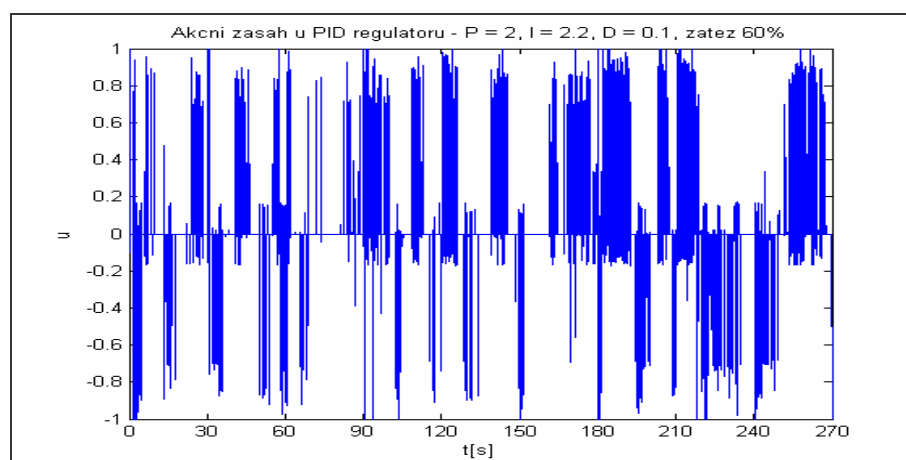
Obr. 74. Akční zásah regulátoru PID na soustavu se zatížením, $P = 2$; $I = 2,2$; $D = 0,1$; zátěž = 30 %



Obr. 75. Průběh regulace soustavy se zatížením regulátorem PID, $P = 2$; $I = 2,2$; $D = 0,1$; zátěž = 60 %



Obr. 76. Žádaná velikost zátěže při regulaci PID regulátorem na soustavu, $P = 2$; $I = 2,2$; $D = 0,1$; zátěž = 60 %

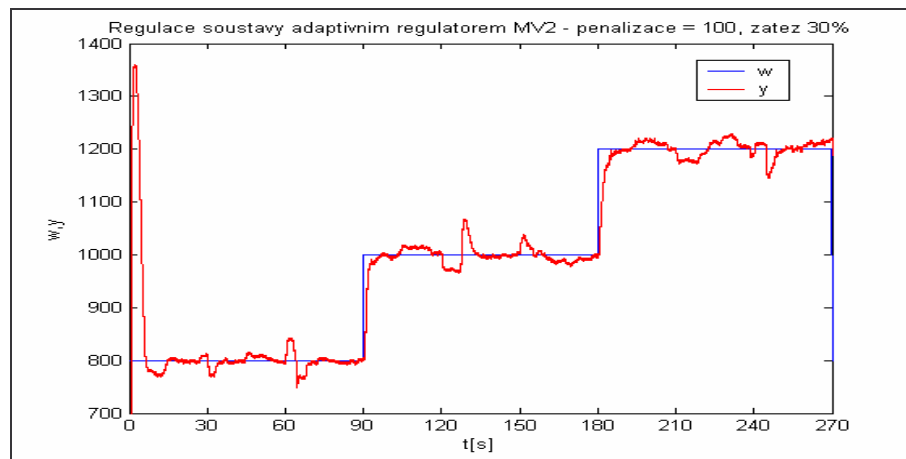


Obr. 77. Akční zásah regulátoru PID na soustavu se zatížením, $P = 2$; $I = 2,2$; $D = 0,1$; zátěž = 60 %

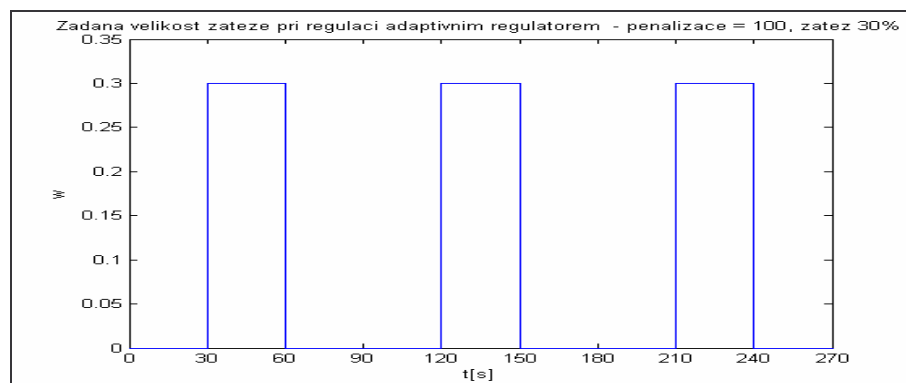
Při regulaci PI regulátorem a zatížením $< 30 \% >$ je regulace velmi dobrá. Při skokové změně zatížení nenastávají velké překmity ani podkmity a regulátor velmi rychle reaguje na změnu. Při zatížení $< 60 \% >$ regulátor velmi rychle zasahuje a regulační pochod je dobrý. Při regulaci PID regulátorem a zatížením $< 30 \% >$ je průběh regulace také velmi dobrý – nenastávají žádné velké překmity a podkmity regulované veličiny a ta se při skoku zatížení velmi rychle ustálí na žádané hodnotě. PID regulátor při zatížení $< 60 \% >$ také velmi dobře reguluje. Ani zde nenastávají velké překmity a podkmity.

8.3.3 Regulace adaptivním regulátorem při zatížení motoru

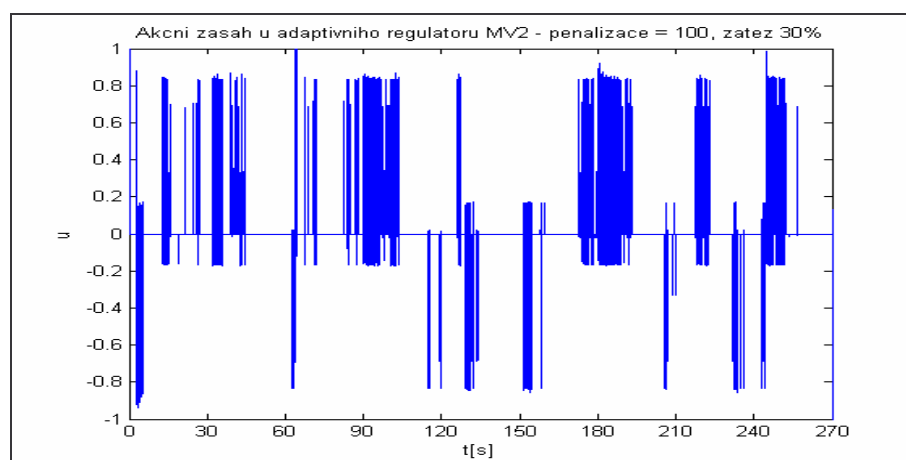
Pro regulaci jsem použil stejné schéma jako u předchozích dvou regulátorů, ale byl zde použit adaptivní regulátor MV2 s penalizací = 100. V grafech (Obr. 78. – 83.) jsou znázorněny průběhy regulací, žádané velikosti zatížení a akční zásahy u adaptivního regulátoru MV2 s penalizací = 100.



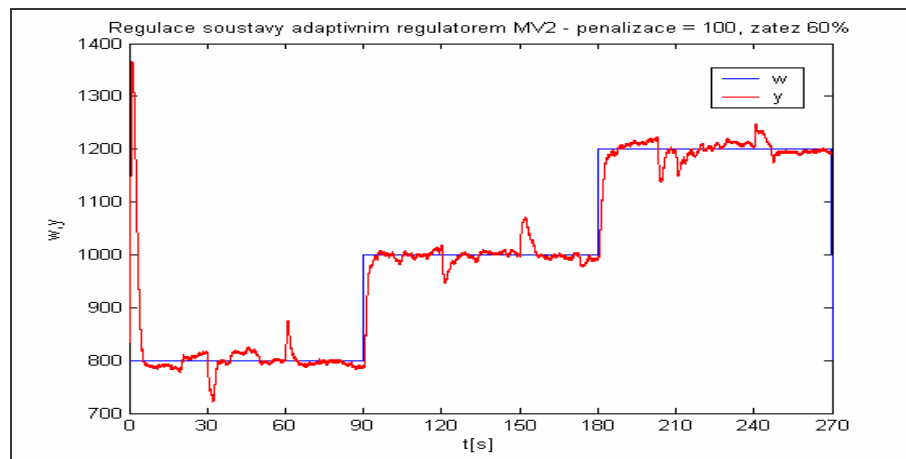
Obr. 78. Průběh regulace soustavy se zatížením adaptivním regulátorem MV2 – penalizace = 100, zátěž = 30 %



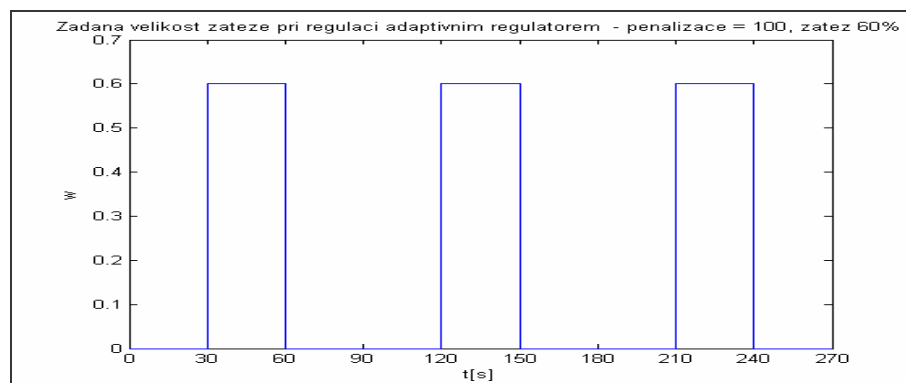
Obr. 79. Žádaná velikost zátěže při regulaci adaptivním regulátorem MV2 na soustavu - penalizace = 100, zátěž = 30 %



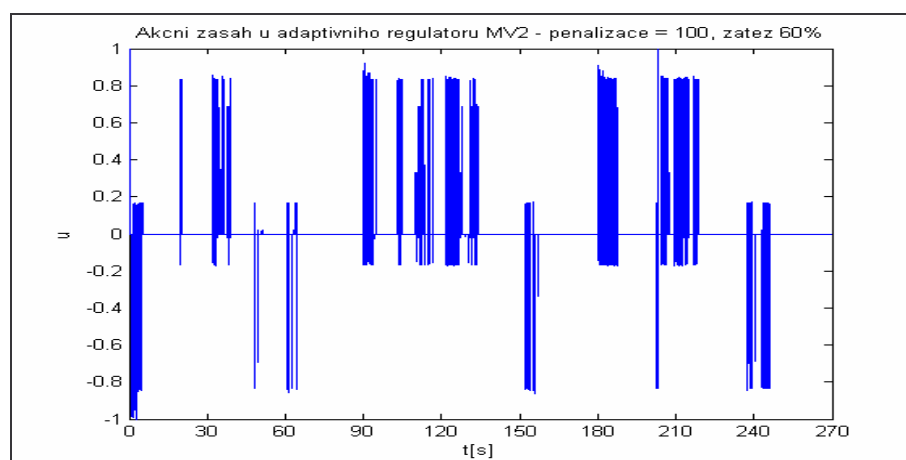
Obr. 80. Akční zásah adaptivního regulátoru MV2 na soustavu se zatížením - penalizace = 100, zátěž = 30 %



Obr. 81. Průběh regulace soustavy se zatížením adaptivním regulátorem MV2 – penalizace = 100, zátěž = 60 %



Obr. 82. Žádaná velikost zátěže při regulaci adaptivním regulátorem MV2 na soustavu - penalizace = 100, zátěž = 60 %



Obr. 83. Akční zásah adaptivního regulátoru MV2 na soustavu se zatížením - penalizace = 100, zátěž = 60 %

Při regulaci soustavy adaptivním regulátorem MV2 není při zatížení příliš dobrá regulace. Regulovaná veličina udělá podkmit a následný překmit a poté se ustálí. To samé nastává i při zatížení $< 60 \% >$, ale s větším překmitem a podkmitem. Ze všech regulátorů má adaptivní regulátor MV2 nejhorší regulaci.

8.4 Porovnání kvality řízení S_y a S_u u všech regulátorů při zatížení 30% a 60%

Vyhodnocení pro zatížení 30%

Tab. 18. Vyhodnocení kvality řízení - S_y při regulaci soustavy všemi regulátory se zátěží 30%

Typ regulátoru	S_y
1DOF – alfa = 5, zátěž = 30 %	216,764
PI – P = 2,2; I = 1,8; zátěž = 30 %	277,812
PID – P = 2; I = 2,2; D = 0,1; zátěž = 30 %	225,154
MV2, penalizace = 100 zátěž = 30 %	564,915

Tab. 19. Vyhodnocení kvality řízení – S_u při regulaci soustavy všemi regulátory se zátěží 30%

Typ regulátoru	S_u
1DOF – alfa = 5, zátěž = 30 %	0,0080
PI – P = 2,2; I = 1,8; zátěž = 30 %	0,0099
PID – P = 2; I = 2,2; D = 0,1; zátěž = 30 %	0,0275
MV2, penalizace = 100 zátěž = 30 %	0,0143

Vyhodnocení pro zatížení 60 %

Tab. 20. Vyhodnocení kvality řízení - S_y při regulaci soustavy všemi regulátory se zátěží 60%

Typ regulátoru	S_y
1DOF – alfa = 5, zátěž = 60 %	230,342
PI – P = 2,2; I = 1,8; zátěž = 60 %	326,385
PID – P = 2; I = 2,2; D = 0,1; zátěž = 60 %	269,497
MV2, penalizace = 100 zátěž = 60 %	611,110

Tab. 21. Vyhodnocení kvality řízení - S_u při regulaci soustavy všemi regulátory se zátěží 60%

Typ regulátoru	S_u
1DOF – alfa = 5, zátěž = 60 %	0,0119
PI – P = 2,2; I = 1,8; zátěž = 60 %	0,0106
PID – P = 2; I = 2,2; D = 0,1; zátěž = 60 %	0,0357
MV2, penalizace = 100 zátěž = 60 %	0,0092

Při porovnání kvality řízení S_y při zatížení $< 30 \% >$ je podle tabulky (Tab. 18) nejlepší regulátor **1DOF regulátor s parametrem alfa = 5**. Druhý téměř stejně kvalitní regulátor je **PID regulátor s parametry: P = 2; I = 2,2; D = 0,1**. Jako nejhorší co se týče kvality řízení posuzované dle S_y dopadl adaptivní regulátor MV2. Při porovnání dle kvality řízení S_u podle tabulky (Tab. 19) vyšel opět nejlépe **1DOF regulátor s parametrem alfa = 5**. Největší přírůstky akční veličiny má **PID regulátor s parametry: P = 2; I = 2,2; D = 0,1**. Při zatížení $< 60 \% >$ vychází co se týče kvality řízení S_y podle tabulky (Tab. 20) nejlépe opět regulátor **1DOF regulátor s parametrem alfa = 5** a jako nejhorší vychází **adaptivní regulátor MV2**. Při porovnání kvality řízení dle S_u podle tabulky (Tab. 21) při stejném zatížení vychází nejlépe **adaptivní regulátor MV2**, který má ale nejhorší kvalitu S_y . Největší sumu přírůstků akční veličiny má **PID regulátor s parametry: P = 2; I = 2,2; D = 0,1**.

ZÁVĚR

Práce obsahuje v teoretické části přehled o řízení rychlosti motorů, popis laboratorního pneumatického motoru CE 107, připojení modelu k počítači pomocí multifunkčně vstupně-výstupní karty MF614, popis programu MATLAB, nástavby Simulink a Real Time Toolboxu. Dále je v této části popis kaskádní regulace.

Praktická část práce se zabývá naměřením statických charakteristik a určením vhodné oblasti pro řízení. Dále je uveden výsledek kalibrace otáček a podle něj je lineární oblast pro řízení v rozmezí $< 500 \div 1000 >$ otáček.

V další části práce je provedena identifikace samotného ventilu. V tomto případě se zde ovládá motor, který je napojen na ventil ovládající vstup vzduchu do soustavy válců. Po změření dynamické charakteristiky byl motor identifikován jako astatická soustava druhého řádu, ale pro zjednodušení řízení stačila aproximace soustavou prvního řádu, což nemá zásadní vliv na řízení ventilu a při porovnání naměřené a identifikované přechodové charakteristiky jsou průběhy téměř totožné. Motor má pásmo necitlivosti, které jsem odstranil přidáním periodického signálu k výstupu z regulátoru. Regulace pozice ventilu probíhala pomocí P, PI a 1DOF regulátoru s volitelným parametrem α . Podle teorie je k regulaci astatické soustavy vhodný P regulátor, což se potvrdilo. P regulátor měl nejlepší vyhodnocení kvality řízení při regulaci ventilu. Tento regulátor jsem potom dále používal při regulaci celé soustavy jako výchozí pro regulaci pozice ventilu – sekundární regulátor při kaskádní regulaci.

V dalším bodě práce jsem identifikoval celou soustavu. Naměřil jsem 6 dynamických charakteristik a porovnal ustálené hodnoty. Při tomto porovnání vyšel lineární průběh, takže jsem soustavu identifikoval z jedné charakteristiky pomocí Strejcovy metody jako soustavu druhého řádu s různě velkými časovými konstantami. Dále jsem si sestrojil simulinkové schéma pro kaskádní regulaci. Zde se používají dva regulátory. Primární regulátor řídí otáčky motoru a sekundární regulátor řídí pozici ventilu. Jako primární regulátory jsem zvolil: pět 1DOF regulátorů s volitelným parametrem α , dva PI a dva PID regulátory a ještě adaptivní regulátor MV2 – založen na metodě minimalizace rozptylu regulované veličiny. Parametry 1DOF regulátoru jsem si spočítal z přenosu soustavy. Parametry PI a PID jsou experimentálně navrženy z oblasti stabilních hodnot parametrů, protože při výpočtu parametrů z přechodové charakteristiky se soustava rozkmitala. U adaptivního regulátoru jsem experimentálně zjistil nejlepší hodnotu parametru penalizace,

který se zde nastavuje. Otáčky jsem řídil v rozmezí $< 800 \div 1200 >$, což není přímo ve vypočtené lineární oblasti, protože při nižších otáčkách než $< 800 >$ a záporném akčním zásahu se motor někdy zastavil. To je způsobeno fyzikálními parametry modelu. Vyšší otáčky než v lineárním pásmu motor řídí bez problémů. Při porovnání kvality řízení podle výpočtů sumace kvadrátů regulační odchylky S_y u všech regulátorů vyšel nejlépe PID regulátor a druhou nejlepší kvalitu regulace má PI regulátor. Nejhorší kvalita řízení dle S_y vyšla u adaptivního regulátoru MV2. Při porovnání kvality řízení podle sumy kvadrátů přírůstků akční veličiny je nejlepší PI regulátor s 1DOF regulátorem, které mají téměř totožné výsledky. Nejhorší regulátor co se týče tohoto kritéria je PID regulátor.

Dále jsem řídil otáčky motoru se zatížením. Z každé skupiny regulátorů jsem vybral ten, který měl nejlepší kvalitu řízení dle S_y . Otáčky jsem řídil při zatížení $< 30\% \text{ a } 60\% >$ ve třech hodnotách otáček $< 800, 1000 \text{ a } 1200 >$. Při zatížení $< 30\% >$ má nejlepší kvalitu řízení S_y regulátor 1DOF s parametrem $\alpha = 5$. Při vyhodnocení přírůstků akční veličiny S_u vyšel nejlépe stejný regulátor. Při zatížení $< 60\% >$ je co se týče kvality řízení S_y nejlepší opět regulátor 1DOF s parametrem $\alpha = 5$. Při srovnání kvality řízení S_u vyšly nejlépe 1DOF regulátor s parametrem $\alpha = 5$, PI regulátor i adaptivní regulátor, které mají téměř totožné výsledky. Nejhorší výsledek nastal u PID regulátoru. V závěru jsem vypracoval stručný manuál k modelu a navrhl laboratorní úlohu pro studenty.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

My work includes a survey about control of engines speed in the theoretic part, characterization of a laboratory pneumatic motor CE 107, interface of the model to the computer by a multifunction input/output card MF614, description of the program MATLAB, its extension Simulink and the Real Time Toolbox. In this part characterization of cascade control is also given.

My work is engaging in metering of static characteristics and appointment of right area for control in practical part. Then I worked calibration of rotations speed and according of result is linear area for control in $< 500 \div 1000 >$ speed.

In another part I worked identification of the valve. In this case engine is operated here which is join on the valve which is controlling the enter of air to the system of the valves. After metering of dynamic characteristic the engine was identified of the as astatic system of the second place value but for easily control sufficed approximation system the first system, which hasn't influence on leading of valve and in comparing of metering and identified time-response characteristic are courses almost same. The engine has dead zone, which I deleted by periodic signal to the signal output for regulator.

Regulation position of valve proceeded by P,PI a 1DOF regulator with select parameter α . According to theory is the best P regulator to regulation of astatic system. P regulator had the best evaluation duality regulation control deviation in regulation valve. I used this regulator in regulation whole system as starting for regulation position valve – secondary regulator in cascade regulation.

In another point of my work I identified all system. I metered six dynamic characteristic and I compared them. When I compared it the result was linear process so I identified system from one characteristic. Aproximated the system by Strejc's method as a system of the second rule with various chronological constants. Then I made Simulink scheme for a cascade regulation. Here are using two regulators. Primary regulator is leading

Speeds of the engine and secondary regulator is leading position of the valve. As primary regulator I chose: five 1DOF regulators with free parameter α , two PI and PID regulators and adaptive regulator MV2 established in method of minimal scatter. I counted from transfer function parameters 1DOF. The parameters PI and PID are experimentally

designed from area of values of parameters. When I counted parameters from transient characteristic then amplitude swunged.

I found out the best value of penalization parameter by adaption regulator which is here set. I lead speeds in $< 800 \div 1200 >$, which isn't in calculated linear area because speeds are low then $< 800 >$ and negative action hit the engine sometimes was stopped which is incurred by physical parameters of model. The engine leads with no problems higher speeds than in linear zone. From all of regulators is the best PID regulator and the second best duality of regulation has PI regulator. The worst quality of control deviation has adaptive regulator MV2. In compare of additions action value is the best PI regulator with 1DOF regulator – they have the same results. The worst regulator is PID regulator.

Then I lead speeds of engine. From every group of regulators I chose this which had the best duality of control deviation. The speeds I lead in load $< 30 \% \text{ a } 60 \% >$ in three values of speeds $< 800, 1000 \text{ and } 1200 >$. In load $< 30 \% >$ has the best quality of control deviation the regulator 1DOF with parameter $\alpha = 5$.

It went of the same regulator in evaluation addition of action quantity. The best regulator is 1DOF with parameter $\alpha = 5$. On confrontation action quantity the best regulator was 1DOF regulator with parameter $\alpha = 5$, PI regulator and adaptive regulator – they have almost same result. The worst result was at PID regulator. In the end I wrote brief manual to the model and I designed laboratory work for students.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Wellstead, P., Readman, M.: Engine speed control. Technical white paper. Control systems principles, ver. 8/5/2004. [cit. 2007-03-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.control-systems-principles.co.uk/whitepapers/engine-speed-control.pdf>>.
- [2] CE 107 Engine Speed Control. TQ Education and Training Ltd, 2004.
- [3] CE 107 Engine Speed Control - Safety Guide. Education and Training Ltd, 2004.
- [4] Engine Speed Control apparatus. Product data sheet. TQ Education and Training Ltd, ver. 21/3/2005. [cit. 2007-03-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.tq.com/product/cart/pdfs/ce102.pdf>>.
- [5] MATLAB: Function reference, Version 7, MathWorks Inc., Natick, USA, 2004.
- [6] Real-Time Toolbox for MATLAB – user’s manual, Humusoft s.r.o., Praha 2003.
- [7] DUŠEK, F.: MATLAB a Simulink – úvod do používání, Univerzita Pardubice, 2000.
- [8] MF614 Multifunction I/O card – user’s manual, Humusoft s.r.o., Praha 2002
- [9] Zimčík, T.: Metody a simulace kaskádního řízení, rozvětvené regulační obvody, bakalářská práce, UTB Zlín 2006
- [10] Mikleš, J., Fikar, M.: Modelovanie, identifikácia a riadenie procesov I. Vydavateľstvo STU, Bratislava, 1999.
- [11] Bobál, V., Böhm, J., Prokop, R., Fessl, J.: Praktické aspekty samočinně se nastavujících regulátorů: algoritmy a implementace. Vutium, VUT Brno, 1999.
- [12] Bobál, V.: Identifikace systémů. VUT Brno, 1989.
- [13] Balátě, J.: Automatické řízení, BEN, 2004.
- [14] Univerzita Tomáše Bati Zlín: Simulinková knihovna adaptivních regulátorů [online]. [cit. 2007-03-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.utb.cz/stctool>>.

[15]KUCERA, V. Diophantine Equations in Control - A Survey. Automatica. 1993

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

- ω Otáčky motoru
- θ Pozice ventilu
- α Volitelný parametr u 1DOF regulátoru

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Schéma systému řízení motoru na stlačený vzduch	11
Obr. 2. Charakteristika mrtvého pásma	12
Obr. 3. Odstranění mrtvého pásma přidáním periodického signálu	13
Obr. 4. Pneumatický motor CE 107.....	14
Obr. 5. Aparatura modelu	15
Obr. 6. Detail konstrukce 4 – válcového motoru.....	16
Obr. 7. Schéma setrvačnicku s děrovaným diskem	17
Obr. 8. Vstupy a výstupy modelu	19
Obr. 9. Schéma kaskádní regulace řízení motoru	23
Obr. 10. Simulinkové schéma pro měření statické charakteristiky	26
Obr. 11. Statická charakteristika při otevírání / zavírání ventilu.....	27
Obr. 12. Kalibrace otáček	28
Obr. 13. Simulinkové schéma pro dynamickou charakteristiku ventilu	29
Obr. 14. Přejímová charakteristika při otevírání a zavírání ventilu	29
Obr. 15. Průměr přejímových charakteristik při otevírání a zavírání ventilu	30
Obr. 16. Porovnání naměřené a identifikované přejímové charakteristiky ventilu.....	32
Obr. 17. Schéma pro dynamickou charakteristiku soustavy.....	32
Obr. 18. Závislost změny otáček na změně otevření/zavření ventilu	33
Obr. 19. Změna otáček na změně otevření ventilu	34
Obr. 20. Identifikace přejímové charakteristiky pomocí Strejcovy metody	35
Obr. 21. Graf pro určení poměru časových konstant.....	36
Obr. 22. Porovnání naměřené a identifikované přejímové charakteristiky soustavy.....	37
Obr. 23. Schéma pro regulaci pozice ventilu regulátorem P a PI.....	39
Obr. 24. Průběh regulace pozice ventilu regulátorem P	40
Obr. 25. Akční zásah regulátoru P na ventil.....	40
Obr. 26. Průběh regulace pozice ventilu regulátorem PI.....	41
Obr. 27. Akční zásah regulátoru PI na ventil.....	41
Obr. 28. Průběh regulace pozice ventilu regulátorem 1DOF, alfa = 5	45
Obr. 29. Akční zásah regulátoru 1DOF na ventil, alfa = 5	45
Obr. 30. Průběh regulace pozice ventilu regulátorem 1DOF, alfa = 10	46
Obr. 31. Akční zásah regulátoru 1DOF na ventil, alfa = 10.....	46

Obr. 32. Průběh regulace pozice ventilu regulátorem 1DOF, $\alpha = 15$	47
Obr. 33. Akční zásah regulátoru 1DOF na ventil, $\alpha = 15$	47
Obr. 34. Průběh regulace pozice ventilu regulátorem 1DOF, $\alpha = 20$	48
Obr. 35. Akční zásah regulátoru 1DOF na ventil, $\alpha = 20$	48
Obr. 36. Schéma pro regulaci soustavy	52
Obr. 37. Průběh regulace soustavy regulátorem 1DOF, $\alpha = 3$	53
Obr. 38. Akční zásah regulátoru 1DOF na soustavu, $\alpha = 3$	53
Obr. 39. Pozice ventilu při regulaci 1DOF regulátorem, $\alpha = 3$	54
Obr. 40. Průběh regulace soustavy regulátorem 1DOF, $\alpha = 4$	55
Obr. 41. Akční zásah regulátoru 1DOF na soustavu, $\alpha = 4$	55
Obr. 42. Průběh regulace soustavy regulátorem 1DOF, $\alpha = 5$	56
Obr. 43. Akční zásah regulátoru 1DOF na soustavu, $\alpha = 5$	56
Obr. 44. Průběh regulace soustavy regulátorem 1DOF, $\alpha = 6$	57
Obr. 45. Akční zásah regulátoru 1DOF na soustavu, $\alpha = 6$	57
Obr. 46. Průběh regulace soustavy regulátorem 1DOF, $\alpha = 7$	58
Obr. 47. Akční zásah regulátoru 1DOF na soustavu, $\alpha = 7$	58
Obr. 48. Oblast stabilních hodnot parametrů P a I u regulátoru PI	61
Obr. 49. Průběh regulace soustavy regulátorem PI, $P = 2$; $I = 1,3$	62
Obr. 50. Akční zásah regulátoru PI na soustavu, $P = 2$; $I = 1,3$	62
Obr. 51. Průběh regulace soustavy regulátorem PI, $P = 2,2$; $I = 1,8$	63
Obr. 52. Akční zásah regulátoru PI na soustavu, $P = 2,2$; $I = 1,8$	63
Obr. 53. Průběh regulace soustavy regulátorem PID, $P = 1,5$; $I = 2$; $D = 0,05$	64
Obr. 54. Akční zásah regulátoru PID na soustavu, $P = 1,5$; $I = 2$; $D = 0,05$	64
Obr. 55. Průběh regulace soustavy regulátorem PID, $P = 2$; $I = 2,2$; $D = 0,1$	65
Obr. 56. Akční zásah regulátoru PID na soustavu, $P = 2$; $I = 2,2$; $D = 0,1$	65
Obr. 57. Průběh regulace soustavy adaptivním regulátorem, penalizace = 100	68
Obr. 58. Akční zásah adaptivního regulátoru na soustavu, penalizace = 100	68
Obr. 59. Schéma pro regulaci soustavy se zatížením	71
Obr. 60. Průběh regulace soustavy se zatížením regulátorem 1DOF, $\alpha = 5$, zátěž = 30 %	72
Obr. 61. Žádaná velikost zátěže při regulaci 1DOF regulátorem na soustavu, $\alpha = 5$, zátěž = 30 %	72

Obr. 62. Akční zásah regulátoru 1DOF na soustavu se zatížením, $\alpha = 5$, zátěž = 30 %.....	72
Obr. 63. Průběh regulace soustavy se zatížením regulátorem 1DOF, $\alpha = 5$, zátěž = 60 %,	73
Obr. 64. Žádaná velikost zátěže při regulaci 1DOF regulátorem na soustavu, $\alpha = 5$, zátěž = 60 %.....	73
Obr. 65. Akční zásah regulátoru 1DOF na soustavu se zatížením, $\alpha = 5$, zátěž = 60 %.....	73
Obr. 66. Průběh regulace soustavy se zatížením regulátorem PI, $P = 2,2$; $I = 1,8$; zátěž = 30 %.....	75
Obr. 67. Žádaná velikost zátěže při regulaci PI regulátorem na soustavu, $P = 2,2$; $I =$ $1,8$; zátěž = 30 %.....	75
Obr. 68. Akční zásah regulátoru PI na soustavu se zatížením, $P = 2,2$; $I = 1,8$; zátěž = 30 %.....	75
Obr. 69. Průběh regulace soustavy se zatížením regulátorem PI, $P = 2,2$; $I = 1,8$; zátěž = 60 %.....	76
Obr. 70. Žádaná velikost zátěže při regulaci PI regulátorem na soustavu, $P = 2,2$; $I = 1,8$; zátěž = 60 %	76
Obr. 71. Akční zásah regulátoru PI na soustavu se zatížením, $P = 2,2$; $I = 1,8$; zátěž = 60 %.....	76
Obr. 72. Průběh regulace soustavy se zatížením regulátorem PID, $P = 2$; $I = 2,2$; $D = 0,1$; zátěž = 30 %	77
Obr. 73. Žádaná velikost zátěže při regulaci PID regulátorem na soustavu, $P = 2$; $I = 2,2$; $D = 0,1$; zátěž = 30 %.....	77
Obr. 74. Akční zásah regulátoru PID na soustavu se zatížením, $P = 2$; $I = 2,2$; $D = 0,1$; zátěž = 30 %	77
Obr. 75. Průběh regulace soustavy se zatížením regulátorem PID, $P = 2$; $I = 2,2$; $D = 0,1$; zátěž = 60 %	78
Obr. 76. Žádaná velikost zátěže při regulaci PID regulátorem na soustavu, $P = 2$; $I = 2,2$; $D = 0,1$; zátěž = 60 %.....	78
Obr. 77. Akční zásah regulátoru PID na soustavu se zatížením, $P = 2$; $I = 2,2$; $D = 0,1$; zátěž = 60 %	78

Obr. 78. Průběh regulace soustavy se zatížením adaptivním regulátorem MV2 – penalizace = 100, zátěž = 30 %.....	80
Obr. 79. Žádaná velikost zátěže při regulaci adaptivním regulátorem MV2 na soustavu - penalizace = 100, zátěž = 30 %	80
Obr. 80. Akční zásah adaptivního regulátoru MV2 na soustavu se zatížením - penalizace = 100, zátěž = 30 %.....	80
Obr. 81. Průběh regulace soustavy se zatížením adaptivním regulátorem MV2 – penalizace = 100, zátěž = 60 %.....	81
Obr. 82. Žádaná velikost zátěže při regulaci adaptivním regulátorem MV2 na soustavu - penalizace = 100, zátěž = 60 %	81
Obr. 83. Akční zásah adaptivního regulátoru MV2 na soustavu se zatížením - penalizace = 100, zátěž = 60 %.....	81

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Určení řádu soustavy	31
Tab. 2. Změna otevření/zavření ventilu a změna otáček	33
Tab. 3. Optimální hodnoty stavitelných parametrů regulátoru.....	38
Tab. 4. Vypočtené hodnoty parametrů regulátoru	39
Tab. 5. Parametry 1DOF regulátoru ventilu	44
Tab. 6. Vyhodnocení kvality řízení – S_y při regulaci ventilu	49
Tab. 7. Vyhodnocení kvality řízení – S_u při regulaci ventilu	50
Tab. 8. Parametry 1DOF regulátoru soustavy	52
Tab. 9. Vyhodnocení kvality řízení - S_y při regulaci soustavy regulátorem 1DOF.....	59
Tab. 10. Vyhodnocení kvality řízení – S_u při regulaci soustavy regulátorem 1DOF	59
Tab. 11. Parametry navržených regulátorů PI a PID	61
Tab. 12. Vyhodnocení kvality řízení – S_y při regulaci soustavy regulátorem PI a PID	66
Tab. 13. Vyhodnocení kvality řízení – S_u při regulaci soustavy regulátorem PI a PID	66
Tab. 14. Vyhodnocení kvality řízení - S_y při regulaci soustavy adaptivním regulátorem	69
Tab. 15. Vyhodnocení kvality řízení – S_u při regulaci soustavy adaptivním regulátorem	69
Tab. 16. Vyhodnocení kvality řízení - S_y při regulaci soustavy všemi regulátory	69
Tab. 17. Vyhodnocení kvality řízení - S_u při regulaci soustavy všemi regulátory	70
Tab. 18. Vyhodnocení kvality řízení - S_y při regulaci soustavy všemi regulátory se zátěží 30%.....	82
Tab. 19. Vyhodnocení kvality řízení – S_u při regulaci soustavy všemi regulátory se zátěží 30%.....	82
Tab. 20. Vyhodnocení kvality řízení - S_y při regulaci soustavy všemi regulátory se zátěží 60%.....	83
Tab. 21. Vyhodnocení kvality řízení - S_u při regulaci soustavy všemi regulátory se zátěží 60%.....	83

SEZNAM PŘÍLOH

P1: MANUÁL K MODELU A NÁVRH LABORATORNÍ ÚLOHY

PŘÍLOHA P I: MANUÁL K MODELU A NÁVRH LABORATORNÍ ÚLOHY

1. MODEL

a. Popis modelu

Pneumatický motor CE 107 je určen pro studium dynamických systémů s využitím analogového nebo digitálního signálu. CE 107 demonstruje problémy se kterými se setkáváme v regulaci rychlosti stroje a zvláště problémy s nelineárními řídicími systémy. Aparát se sestává z parního motoru který, v zájmu bezpečnosti, je poháněn stlačeným vzduchem. CE 107 modeluje situaci se kterou se setkáváme u spalovacích motorů, kde rychlost a výstupní výkon jsou ovládané množstvím paliva. Primární úlohou je řídit otáčky motoru pomocí pozice ventilu regulující stlačený vzduch.

b. Aparatura modelu

Napájení a okruhy na úpravu signálů ze senzorů jsou plně chráněné a umístěné v základně jednotky. Tyto okruhy jsou přístupné přes 2 mm konektory umístěné na přední straně modelu. Výstupy z modelu :

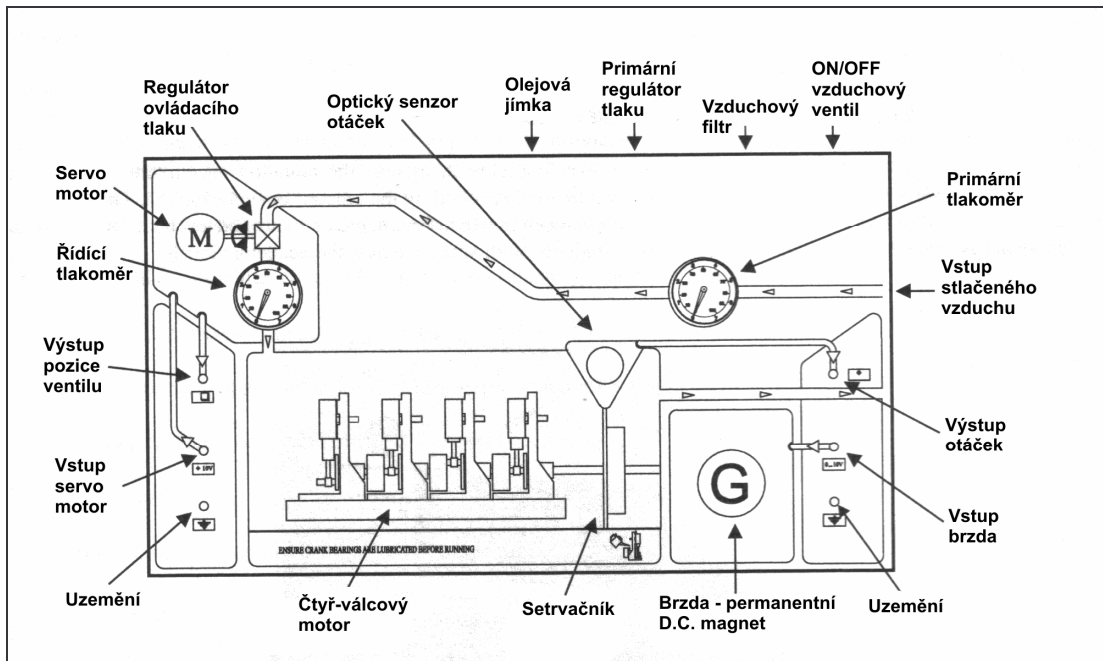
- výstup signálu pozice ventilu ovládající vstup vzduchu do válců – rozsah výstupních hodnot $< -10V, 10V >$ - kanál č. 1
- výstup signálu otáček motoru – rozsah výstupních hodnot $< 0V, 10V >$ - kanál č. 2

Vstupy do modelu:

- vstup signálu pro servomotor na ovládání ventilu vstupujícího vzduchu do válců – rozsah vstupních hodnot $< -10V, 10V >$ - kanál č. 1
- vstup signálu pro brzdu – rozsah vstupních hodnot $< 0V, 10V >$ - kanál č. 2

Jednotlivé systémy obsažené v modelu:

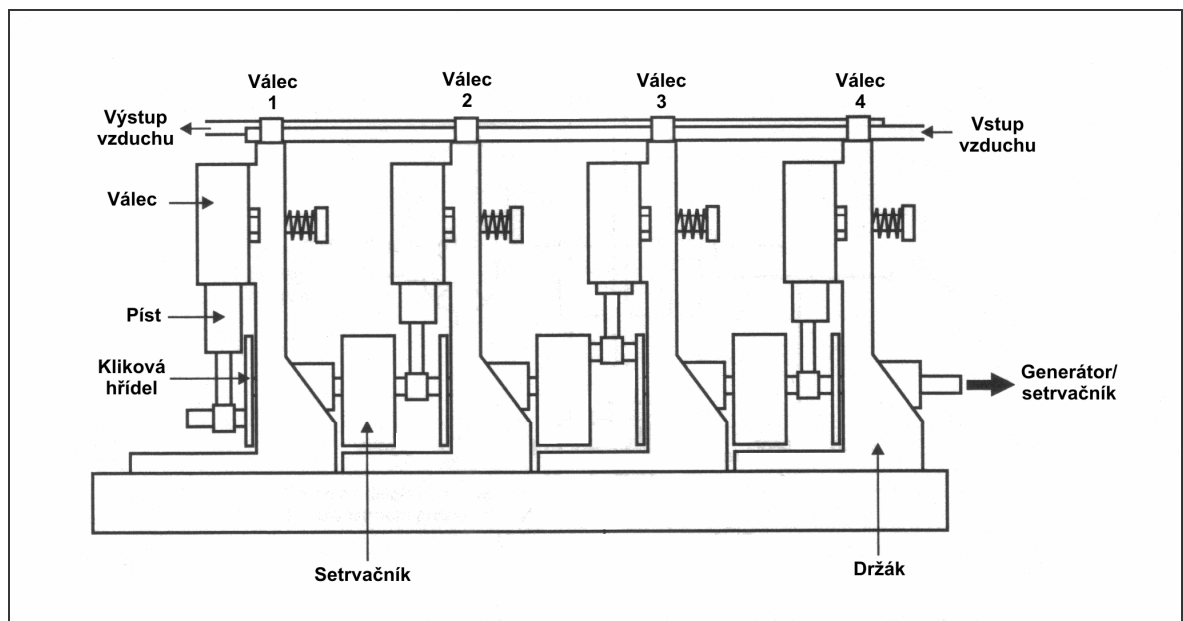
- motor, setrvačnick a brzda
- přívod stlačeného vzduchu
- vzduchový ventil pro regulaci vstupujícího vzduchu do válců



Obr. 1. Aparatura modelu

c. Motor a setrvačnick

Model obsahuje 4 – válcový dvoutaktní motor na stlačený vzduch. Motor je namontován za průhledným předním panelem, což umožňuje sledovat otáčení motoru aniž by se obsluha dostala do kontaktu s rotačními prvky motoru.



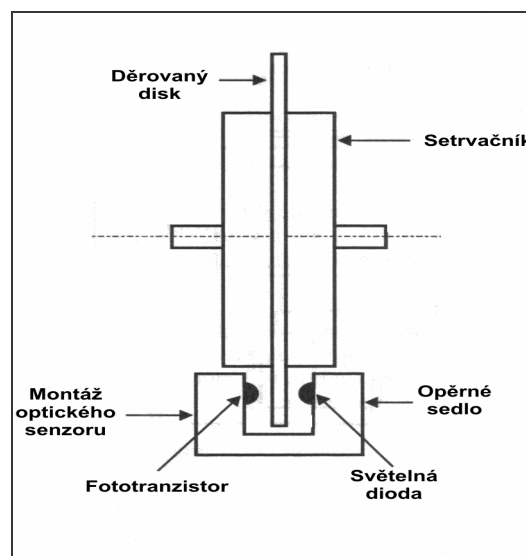
Obr. 2. Detail konstrukce 4 – válcového motoru

Každý válec motoru se skládá z pístu, válce, kliky, setrvačnicku a ojnice jak je zobrazeno na obrázku (Obr. 2). Napínač válce umožňuje volné otáčení a zajišťuje utěsnění vzduchu vstupujícího do válce. Tyto válce jsou spojené v tandemu tak, že efektivně předávají výkon na klikovou hřídel.

Vzduch je dodáván každému válci přes sací potrubí umístěné nad montáží motoru. Vzduch vstupuje do válce v okamžiku, kdy je píst v horní úvrati, takže píst předává sílu přes ojnici na klikovou hřídel. Dále následuje výfuk vzduchu přes odvodušňovací ventil. Nepřetržitý oběh klikové hřídele je dán spojením válců vzájemně posunutých o 90°. Energie uložená v setrvačnicku poskytuje hybnost potřebnou k tomu, aby kliková hřídel udržovala oběh mezi pracovními zdvihy. Válce dodávají pracovní zdvihy v pořadí 1 – 3 – 4 – 2 každou otočku hřídele.

Na setrvačnicku jsou umístěny díry pomocí kterých se určuje rychlost otáčení motoru. K detekci slouží světelná dioda a fototranzistor. Světelná dioda přes děrovaný disk generuje sérii impulsů, které jsou úměrné rychlosti otáčení motoru. Okruhy na úpravu signálu převedou impulsy do analogového napětového stupně. Schéma setrvačnicku s děrovaným diskem je zobrazeno na obrázku (Obr. 3).

Za setrvačnickem je umístěn stejnosměrný generátor, který slouží ke změně zatížení motoru.



Obr. 3. Schéma setrvačnicku s děrovaným diskem

d. Přívod vzduchu

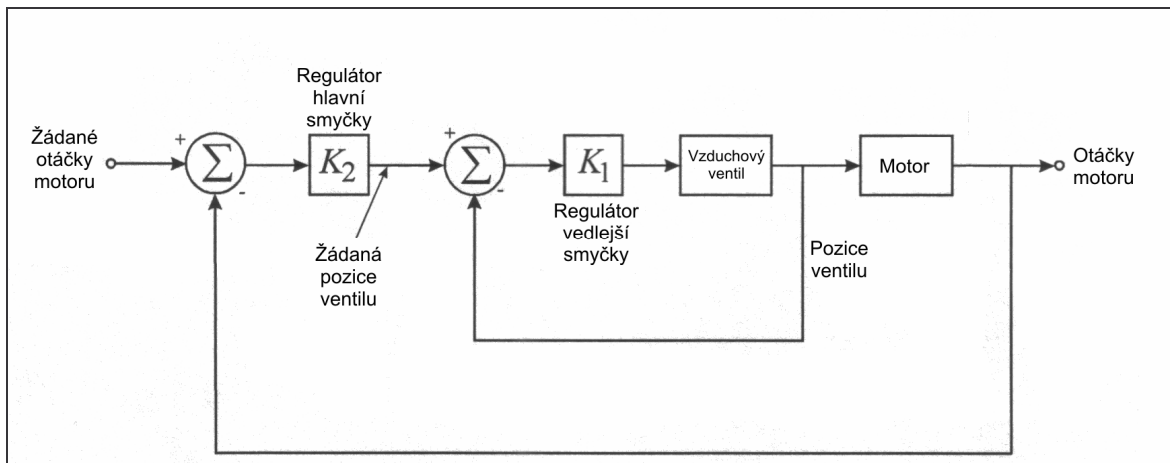
Stlačený vzduch k motoru je dodáván tlakovým rozvodem v budově školy nebo kompresorem. Přivedený vzduch prochází filtrem, primárním regulátorem tlaku a olejovou jímkou. Olejová jímka slouží k mazání motoru pomocí vháněného vzduchu. Tlak vzduchu nesmí překročit hodnotu 10 bar.

e. Technická specifikace

Motor:	4 – válcový motor poháněný stlačeným vzduchem
Rozměry válce:	vrtání 8 mm, zdvih 19 mm, zdvihový objem válců 3.8 cm ³
Ventil vstupujícího vzduchu:	12 V, 500 mA
Snímač otáček motoru:	optický senzor
Napájení modelu:	240 V, 50 Hz, 2A

2. KASKÁDNÍ REGULACE

Řídicí systém motoru je příkladem procesu, ve kterém musíme nejdříve ovládat akční člen (vzduchový ventil) před hlavním systémem (otáčky motoru). Tento problém se běžně vyskytuje v průmyslu a je znám jako kaskádní řízení. Na obrázku (Obr. 4) je zobrazen regulační kaskádní systém pro řízení otáček motoru.

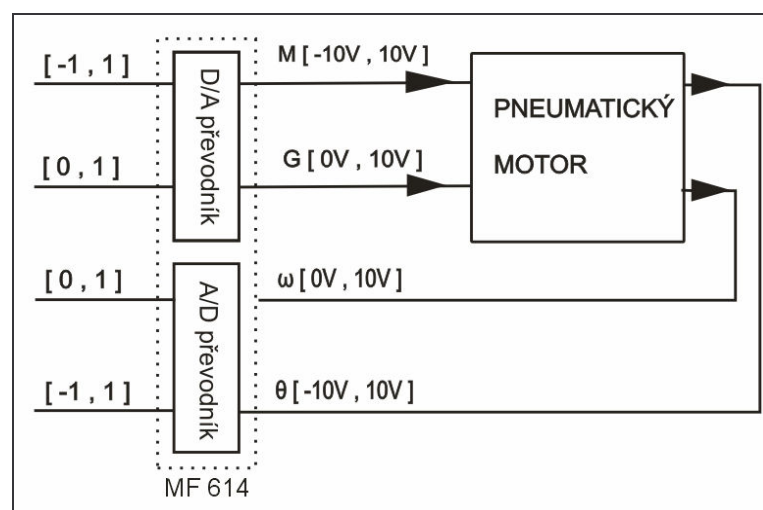


Obr. 4. Schéma kaskádní regulace řízení motoru

Regulační systém se skládá z vnitřní a vnější smyčky. Vnitřní smyčka ovládá pozici ventilu a vnější smyčka ovládá otáčky motoru. Cílem je začínat s řízením vnitřního bloku (natočení ventilu) systému a poté řídit vnější blok (otáčky).

3. PŘIPOJENÍ MODELU K POČÍTAČI

Připojení modulu k počítači je realizováno pomocí multifunkční vstupně výstupní karty MF614. Model CE107 má dva analogové vstupy a dva analogové výstupy viz 1.b. Vstupy a výstupy modelu jsou zobrazeny na obrázku (Obr. 5).



Obr. 5. Vstupy a výstupy modelu

V MATLABu jsou hodnoty vstupů a výstupů buď [-1 , 1] nebo [0 , 1]. Karta MF614 násobí tyto signály konstantou 10.

Označení vstupů do modelu:

- M - motor ovládající vzduchový ventil
- G - brzda (zatížení motoru)

Označení výstupů z modelu:

- ω - otáčky motoru
- θ - pozice vzduchového ventilu

4. NÁVRH LABORATORNÍ ÚLOHY

a. Naměření statických charakteristik

Naměřte statické charakteristiky systému a na základě nich určete vhodnou oblast pro řízení. Hodnoty vstupů, výstupů a příslušné kanály jsou:

Výstupy z modelu :

- výstup signálu pozice ventilu ovládající vstup vzduchu do válců – rozsah výstupních hodnot < -10V , 10V > - kanál č. 1
- výstup signálu otáček motoru – rozsah výstupních hodnot < 0V , 10V > - kanál č. 2

Vstupy do modelu:

- vstup signálu pro servomotor na ovládání ventilu vstupujícího vzduchu do válců – rozsah vstupních hodnot < -10V , 10V > - kanál č. 1
- vstup signálu pro brzdu – rozsah vstupních hodnot < 0V , 10V > - kanál č. 2

b. Kalibrace otáček

Pomocí otáčkoměru a snímaných otáček přes kartu proveďte kalibraci otáček modelu.

c. Naměření dynamické charakteristiky ventilu a následná identifikace

Sestrojte si simulinkové schéma pro naměření dynamické charakteristiky ventilu. Proveďte měření a následnou identifikaci soustavy.

d. Regulace pozice ventilu

Z identifikované soustavy navrhnete a experimentálně vyzkoušejte několik regulátorů k řízení pozice ventilu. Motor ovládající ventil obsahuje pásmo necitlivosti. To odstraníte přidáním periodického signálu s parametry - frekvence by měla být vyšší než frekvenční pásmo systému a amplituda přibližně velikosti necitlivosti (asi 0.4). Ze získaných dat vypočítejte kvalitu řízení S_y a S_u pomocí rovnic (1) - (2).

$$e(k) = w(k) - y(k) \quad (1)$$

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

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \quad (3)$$

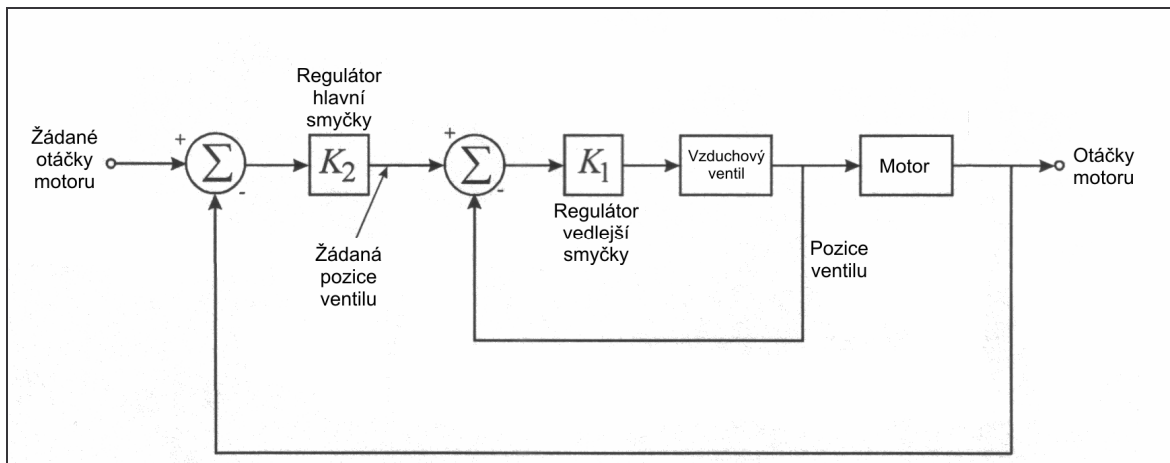
$$S_u = \frac{1}{k_2 - k_1 + 1} \sum_{k=k_1}^{k_2} \Delta u^2(k) \quad (4)$$

e. Naměření dynamických charakteristik soustavy a následná identifikace

Naměřte dynamické charakteristiky celé soustavy a z nich proveďte identifikace modelu včetně regulátoru ventilu.

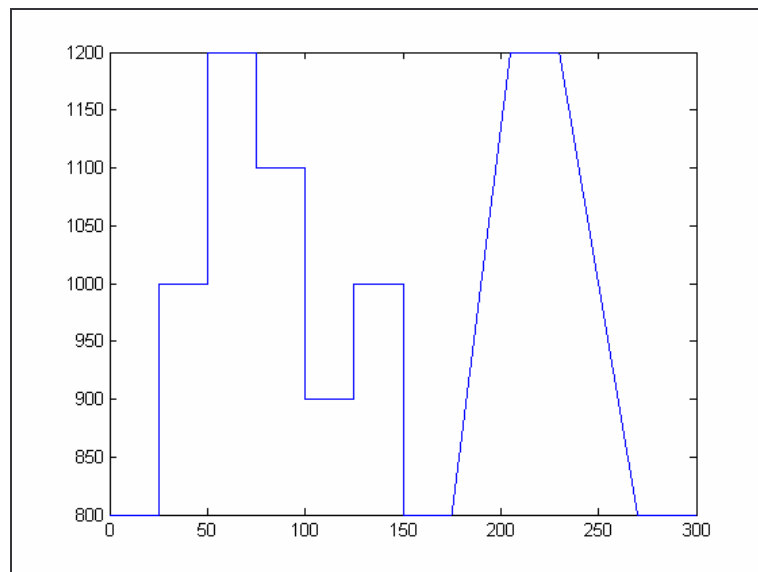
f. Regulace otáček

Pro regulaci využijete schéma na obrázku (Obr. 6). Jako regulátor vedlejší smyčky použijte regulátor s nejlepší kvalitou řízení S_y při řízení ventilu. Za primární regulátor si zvolte několik typů (např. PI, PID, DOF a samočinně se nastavující regulátor), vypočítejte parametry regulátoru a experimentálně ověřte regulaci. Dále podle výše uvedených rovnic spočítejte kvalitu řízení S_y a S_u .



Obr. 6. Schéma kaskádní regulace řízení motoru

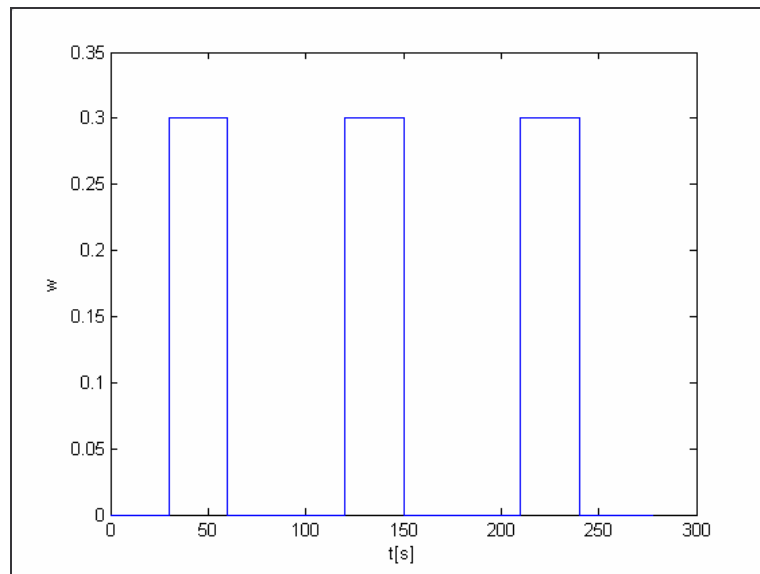
Jako žádané hodnoty otáček využijte obrázku (Obr. 7).



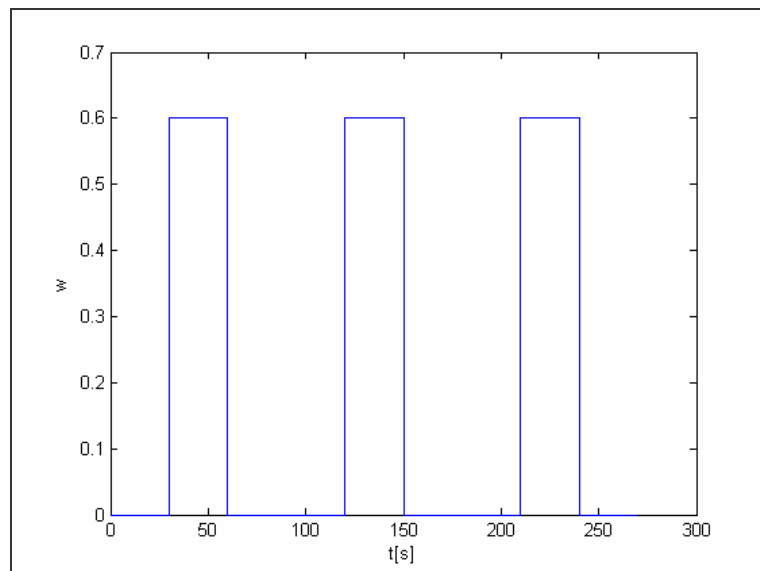
Obr. 7. Žádané hodnoty otáček

g. Regulace otáček se zatížením

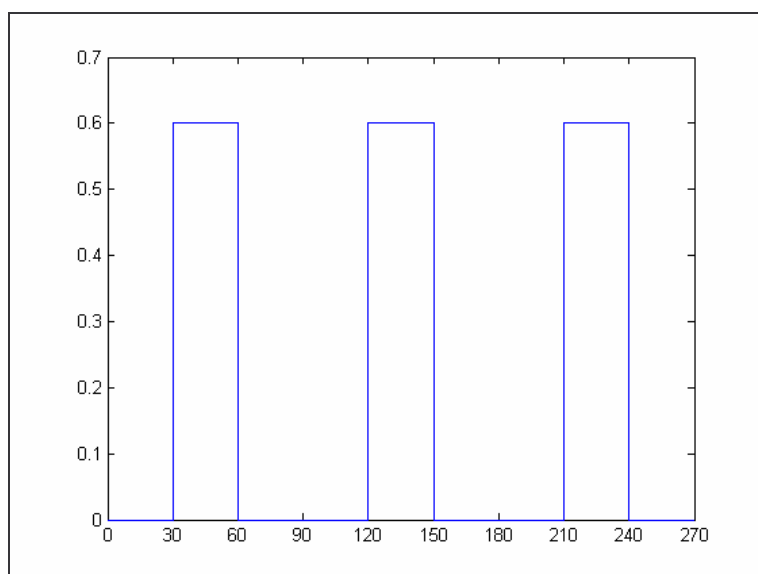
Použijte stejné schéma jako pro regulaci, ale zde doplňte bloky pro přidání zátěže. Vyberte z každé skupiny regulátorů které jste zkoušeli ty, jenž mají nejlepší kvalitu regulace a vyzkoušejte je při regulaci s přidáním zátěže a opět vyhodnoťte kvalitu regulace. Jako žádané hodnoty otáček a brzdy využijte obrázky (Obr. 8, 9 a 10).



Obr. 8. Žádané hodnoty otáček pro řízení se zatížením



Obr. 9. Žádané hodnoty brzdy pro řízení se zatížením – 30% zatížení



Obr. 10. Žádané hodnoty brzdy pro řízení se zatížením – 60% zatížení