

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

**IDENTIFIKACE MATEMATICKÉHO MODELU PNEUMATICKÉ
SOUSTAVY**

Jan Brett

Diplomová práce
2016

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Brett**
Osobní číslo: **I14212**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Řízení procesů**
Název tématu: **Identifikace matematického modelu pneumatické soustavy**
Zadávající katedra: **Katedra řízení procesů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Metodami experimentální identifikace určete aproximační dynamický matematický model pneumatického systému. Model bude obsahovat lineární dynamickou část a nelineární statické zesílení.

Teoretická část:

- a) experimentální identifikace dynamických systémů
- b) popis dynamických systémů

Praktická část:

- a) využití zařízení LabJack U3 pro měření a generování napěťových signálů
- b) program v MATLABu pro provedení experimentu s pneumatickou soustavou s cílem získat data pro vyhodnocení statické charakteristiky a určení aproximačního dynamického modelu
- c) program v MATLABu pro vyhodnocení parametrů aproximačního modelu pneumatické soustavy

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

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

Seznam odborné literatury:

BALÁTĚ, Jaroslav. Automatické řízení. 2., přeprac. vyd. Praha: BEN, 2004, 663 s. ISBN 80-730-0148-9.

DUŠEK, František. HONC, Daniel. Matlab a Simulink: úvod do používání. Vyd. 1. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2005, 172 s. ISBN 80-719-4776-8.

U3-LV/U3-HV. LabJack, Measurement & Automation Simplified [online]. 2014 [cit. 2014-10-01]. Dostupné z: <http://labjack.com/u3>

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. František Dušek, CSc.

Katedra řízení procesů

Datum zadání diplomové práce:

30. října 2015

Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2016



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan



L.S.



Ing. Daniel Honc, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 14. listopadu 2015

Prohlášení

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne

Jan Brett

Poděkování

Rád bych poděkoval doc. Ing. Františku Duškovi, CSc. za odborné vedení diplomové práce, cenné rady, připomínky a čas věnovaný v konzultačních hodinách. Dále bych chtěl poděkovat učitelům, kteří mi předávali zkušenosti. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat mé rodině za podporu při studiu.

V Pardubicích dne

Jan Brett

ANOTACE

Práce je věnována nalezení matematického modelu, který aproximuje dynamické chování reálného pneumatického systému. Model obsahuje nelineární statickou část a lineární dynamickou část a parametry jsou určeny pomocí experimentální identifikace. Generování vstupních signálů, vyhodnocení výstupních signálů a určení parametrů modelu je provedeno ve výpočetním prostředí MATLAB.

KLÍČOVÁ SLOVA

Matematický model, experimentální identifikace, nelineární dynamický model, pneumatický systém.

TITLE

IDENTIFICATION MATHEMATICAL MODEL AIR SYSTEMS

ANNOTATION

The work is dedicated to finding a mathematical model that approximates the dynamic behavior of the real pneumatic system. The model includes a nonlinear static and linear dynamic part. The parameters are determined by experimental identification. Generating input signals, the evaluation of the output signals and determining the parameters of the model is carried out in a MATLAB computing environment.

KEYWORDS

Mathematical model, Experimental identification, Nonlinear dynamic model, Pneumatic system.

Obsah

	Seznam zkratk	9
	Seznam značek	10
	Seznam obrázků	11
	Seznam tabulek	12
0	ÚVOD	13
1	TEORETICKÁ ČÁST	15
1.1	VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ	15
1.2	MODEL	16
1.3	IDENTIFIKACE	17
1.4	FORMY POPISU SPOJITÝCH LINEÁRNÍCH DYNAM. SYSTÉMŮ	18
1.4.1	Převod mezi popisem vstupně výstupním a stavovým	20
1.4.2	Dopravní zpoždění	22
1.5	VOLBA VHODNÉHO VSTUPNÍHO SIGNÁLU PRO IDENTIFIKACI.....	22
1.6	NELINEARITA	24
1.6.1	Metody řešení nelineárních diferenciálních rovnic.....	25
1.6.2	Hammersteinův a Wienerův model nelineárního systému	25
1.7	IDENTIFIKACE PARAMETRŮ MODELU DYN. SYTÉMU	27
1.7.1	Optimalizace	28
2	ŘEŠENÍ.....	31
2.1	POPIS VYŠETŘOVANÉ SOUSTAVY.....	31
2.2	MĚŘÍCÍ KARTA	33
2.3	SOFTWAREVÉ VYBAVENÍ	34
2.4	VLASTNOSTI VYŠETŘOVANÉ SOUSTAVY	35
2.4.1	Převod signálu.....	35
2.4.2	Statická charakteristika	36
2.4.3	Reakce systému na změnu vstupního signálu	38
2.4.4	Volba periody vzorkování.....	39
2.4.5	Vstupní signál	39
2.4.6	Transformace vstupních a výstupních dat.....	41
3	DOSAŽENÉ VÝSLEDKY	42
3.1	ROZVRH EXPERIMENTU	42
3.2	VOLBA PŘENOSU PRO IDENTIFIKACI PARAMETRŮ.....	42

4	VYHODNOCENÍ	47
5	ZÁVĚR	50
	LITERATURA.....	51
	Seznam příloh	52

Seznam zkratek

MIMO	multi input multi output (více vstupů, více výstupů)
MV	malý ventilátor
PNBS	Pseudonáhodný binární signál
SISO	single input single output (jeden vstup, jeden výstup)
VV	velký ventilátor

Seznam značek

U	elektrické napětí, V
y	výstupní veličina proměnná v čase
a_i	konstantní (časově neproměnné) parametry diferenciální rovnice
u	vstupní veličina proměnná v čase
b_i	konstantní (časově neproměnné) parametry diferenciální rovnice
$f_{\max}$	maximální frekvence, Hz
$f_{\min}$	minimální frekvence, Hz
A	matice systému
B	matice řízení
C	matice vazeb výstupu na stav
D	matice vazeb vstupu na výstup
u	vstupní vektor
x	vektor stavových proměnných
y	výstupní vektor
K	kritérium
T_i	časová konstanta
Z	zesílení systému
t	čas
dt	derivace podle času

Seznam obrázků

Obr. 1.1 – Třídění dynamických systémů.....	16
Obr. 1.2 – Vstupně výstupní popis	19
Obr. 1.3 – Stavový popis	19
Obr. 1.4 – Stavový popis maticově.....	20
Obr. 1.5 – Posuvný registr se šesti bity.....	23
Obr. 1.6 – Nelineární statická charakteristika závislosti průtoku na napětí	25
Obr. 1.7 – Hammersteinův model nelineárního systému.....	26
Obr. 1.8 – Wienerův model nelineárního systému	26
Obr. 1.9 – Eliminace nelinearity v regulačním obvodu.....	27
Obr. 1.10 – Shoda matematického modelu s reálnou soustavou	28
Obr. 1.11 – Postup nalezení parametrů matematického modelu	29
Obr. 2.1 – Inspirativní provedení zkoumané pneumatické soustavy	31
Obr. 2.2 – Blokové schéma pneumatického systému	32
Obr. 2.3 – Komunikační karta LabJack U3	33
Obr. 2.4– Řetězec komunikace programu se soustavou	34
Obr. 2.5 – Přepočty z napětí na otáčky	36
Obr. 2.6 – Záznam průběhu zjištění statické charakteristiky.....	37
Obr. 2.7 – Statická charakteristika pneumatické soustavy	38
Obr. 2.8 – Dynamická charakteristika soustavy	39
Obr. 2.9 – Reakce soustavy na PNBS signál	40
Obr. 2.10 – Převod dat na odchylkový tvar pro identifikaci.....	41
Obr. 2.11 – Posunutí dat do pracovního bodu (počátečních podmínek).....	41
Obr. 4.1 – Reakce G_{32} modelu na vstupní signál v druhém pracovním bodě.....	48
Obr. 4.2 – Reakce G_{32} modelu na vstupní signál v prvním pracovním bodě	49
Obr. 4.3 – Reakce G_{32} modelu na vstupní signál ve třetím pracovním bodě.....	49

Seznam tabulek

Tab. 1.1 – Naplnění posuvného registru	24
Tab. 3.1 – Vyhodnocení dat pro první pracovní bod	44
Tab. 3.2 – Vyhodnocení dat pro druhý pracovní bod	45
Tab. 3.3 – Vyhodnocení dat pro třetí pracovní bod	46
Tab. 4.1 – Přehledová tabulka optimálních modelů	47
Tab. 4.2 – Vyhodnocení modelů pro celý rozsah	48

0 ÚVOD

V současné době téměř neexistuje technologický proces, jehož součástí by nebyl nějaký řídicí systém nebo zařízení s patřičnou formou řízení. Předpokladem efektivního návrhu řízení systému je dobrá znalost jeho chování. Určité informace o chování systému můžeme získat z měření statických a dynamických charakteristik na reálném systému. Tato forma informace nám bohužel nestačí pro návrh efektivního řízení pro daný systém. Nicméně z dat, ze kterých jsou charakteristiky vytvořeny, můžeme metodami experimentální identifikace získat matematický model, popisující dynamickou závislost výstupu na vstupu. Matematický model je nejlepší formou informace, kterou o systému můžeme získat a který můžeme využít pro návrh řízení.

Matematický model je možné získat kromě matematicko-fyzikální analýzy také experimentální identifikací.

V matematicko-fyzikální analýze se matematický model získává sestavením rovnic, popisujících jednotlivé vztahy mezi vstupními, výstupními a stavovými signály prvků. Vycházíme přitom z energetické rovnováhy, fyzikálních a chemických rovnic procesů. Analytické metody vyžadují velké teoretické a praktické zkušenosti. Takto získaný matematický model lze charakterizovat jako „vnitřní“ popis chování zkoumaného systému. Jeho parametry mají fyzikální smysl a popisuje chování ve větším rozsahu.

Druhou možností je experimentální identifikace, kde se matematický model určí na základě experimentálně získaných dat o chování systému z měření vstupních a výstupních signálů. Systém zde vystupuje jako problém „černé schránky“. Experimentálně získaný model můžeme charakterizovat jako „vnější“ popis chování daného systému. Má jednoduchý tvar, parametry se snáze určují, ale nemají fyzikální smysl. Takový model je často použitelný jen v menším rozsahu (např. v okolí pracovního bodu).

Cílem této práce je nalézt vhodný spojitý dynamický matematický model, popisující chování laboratorní pneumatické soustavy, pomocí experimentální identifikace. Bude popsáno získání matematického modelu identifikované soustavy ve formě lineární diferenciální rovnice.

V praktické části bude proveden experiment na laboratorním modelu pneumatické soustavy. Pneumatická soustava se skládá ze dvou ventilátoru propojených pneumatickým objemem. Větší ventilátor vystupuje jako řídicí a menší jako řízený. Na vstupu je napětí, které roztáčí velký ventilátor a na výstupu je aktuální hodnota napětí, která odpovídá otáčkám malého ventilátoru.

Jako prostředí pro identifikaci bude použit MATLAB, propojený se soustavou pomocí komunikační karty LabJack U3. Tato karta slouží jako prostředník mezi pneumatickým systémem a prostředím MATLAB pro zapisování a čtení dat ze systému.

Bude vytvořen program pro čtení a zapisování dat z/do systému pro experimentální identifikaci a druhý program pro vyhodnocení získaných dat o soustavě, ze kterého vzejde i výsledný matematický model, který popisuje pneumatickou soustavu.

1 TEORETICKÁ ČÁST

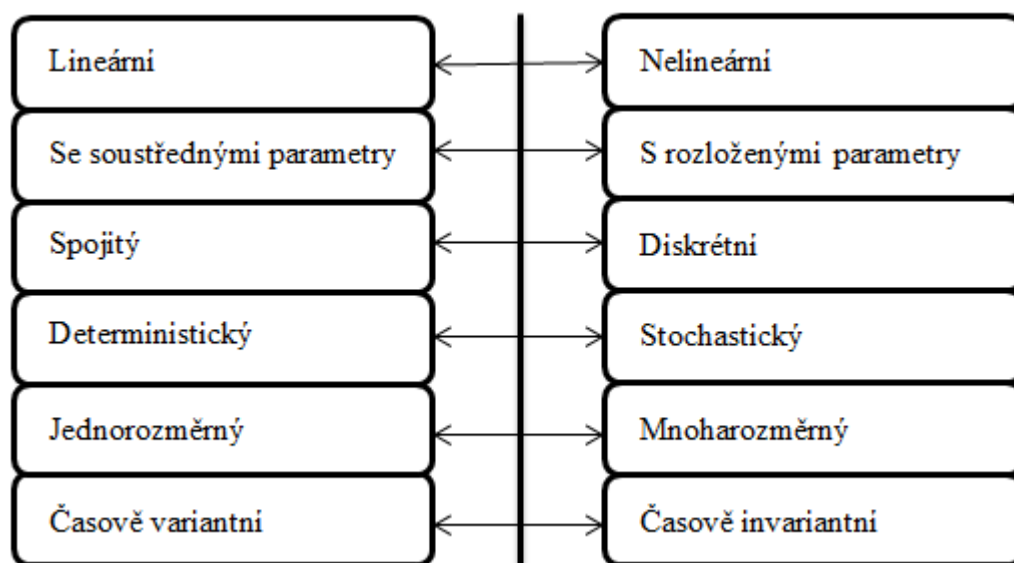
1.1 VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ

Systém si můžeme souhrnně představit jako soubor prvků, mezi nimiž existují vzájemné vztahy a jako celek má určité vazby i ke svému okolí (Balátě, 2004).

Systém lze charakterizovat jeho chováním a strukturou. Chování je závislost mezi jeho vstupními podněty a příslušnými odezvami na jeho výstupu. Strukturou rozumíme jeho vnitřní uspořádání, funkční vazby mezi prvky a chování těchto prvků.

Třídění systémů nám pomáhá zařadit zkoumaný objekt do určité třídy dynamických systémů podle určitých kritérií, jak je uvedeno v (Dostál, 2006). Lineární systémy mají jednotlivé vazby mezi veličinami lineární. U nelineárního systému jsou vazby (postačuje i část) nelineární. U systémů se soustřednými parametry jsou jejich veličiny nezávislé na poloze v prostoru a jsou proměnné pouze v čase. Veličiny systémů s rozloženými parametry jsou proměnné i v prostoru. Spojité systémy mají veličiny definovány na spojitém intervalu a jsou funkcemi v čase spojitými. Veličiny diskrétních systémů jsou definovány na množině diskrétních hodnot času a jsou tedy funkcemi v čase diskrétními. Dále rozlišujeme deterministické systémy, jejichž aktuální stav (výstup) závisí jednoznačně na předcházejícím stavu a aktuálním vstupu. Naopak u stochastických systémů lze momentální stav určit jen s určitou pravděpodobností. Dále rozlišujeme systémy jednorozměrové (SISO), které mají jeden vstup a jeden výstup a systémy mnohorozměrové (MIMO), které mají více než jeden vstup a minimálně jeden výstup. Systémy mohou být také časově variantní (nestacionární), které mají parametry proměnné v čase. V důsledku toho se jejich vlastnosti v čase mění. U invariantních systémů se parametry v čase nemění (stacionární). Výše zmíněné dělení není úplné, doplňující informace lze nalézt např. v (Balátě, 2004).

Na následujícím obr. 1.1 jsou zobrazeny kritéria třídění systémů. Na každé horizontální úrovni může systém patřit jen do jedné třídy. Ve vertikálním směru může ovšem patřit do více tříd. Může být například lineární, s rozloženými parametry, spojitý, stochastický, atd.



Obr. 1.1 – Třídění dynamických systémů, překresleno z (Dostál, 2004)

1.2 MODEL

Pro zjištění statických a dynamických vlastností vyšetřované soustavy se využívá měření přímo na reálném objektu. Ovšem toto měření není vždy možné realizovat. Důvodem může být např. riziko havárie zařízení.

Jiná možnost je mít k reálnému objektu jeho kopii, tedy systém, který má podobné vlastnosti jako zkoumaný objekt. Této kopii říkáme model. Mezi reálným objektem a jeho kopií by měla být jistá analogie mezi prvky, jejich chováním a vazbami. Model může být fyzikální nebo abstraktní.

Fyzikální model může být například zmenšenina reálného zařízení (laboratorní model), který pracuje na stejném fyzikálním principu jako reálný objekt. Takové to zachování analogie se nazývá izomorfismus. V praxi se častěji shledáváme s analogií, které zachovává vztahy mezi objektem a kopií, ale zjednodušuje je. Této analogii se říká homomorfismus.

U abstraktních modelů se snažíme nalézt matematický model reálného objektu. Matematický model se skládá ze struktury a parametrů. Model je tvořen abstraktním systémem matematických vztahů, které odpovídají fyzikálním veličinám modelovaného reálného systému. Nejčastěji se vyjadřuje v rovnicích diferenciálních, diferenčních či algebraických. Matematický model vyjadřuje závislost výstupů na vstupech popsanych matematickými vztahy.

Modelování systému je postup, při kterém ze zkoumaného objektu (procesu), redukuje nedůležité stránky daného jevu a zároveň musíme zanechat ty, které jsou důležité.

Z modelování vzniká model systému, který je z hlediska přesnosti redukcí vzhledem k původnímu systému. Identifikace a modelování jsou vzájemně propojeny.

Jestliže je k dispozici matematický model systému, je možné nahradit experimentování na reálném zařízení za experimenty na matematickém modelu.

1.3 IDENTIFIKACE

Identifikace je důležitá pro zjištění vlastností daného reálného objektu. Rozlišují se dva postupy identifikace, analytický a experimentální.

Analytický způsob spočívá v matematicko-fyzikální analýze. Toto zkoumání daného objektu je založené na materiálových a bilančních rovnicích, na fyzikálních a chemických vlastnostech dílčích procesů probíhajících v systému. Jsou využívány také informace o dané struktuře a vlastnostech použitých materiálů. Aplikací těchto informací získáme matematický model, který popisuje zkoumaný objekt. Tento model popisuje vnitřní, stavové veličiny popisovaného systému a tyto veličiny mají konkrétní fyzikální význam. Výsledný model, je modelem struktury daného systému. Nazývá se vnitřní (stavový) model. Takto sestavený model odpovídá chování daného objektu ve větším rozsahu, než v případě experimentální identifikace.

Ovšem ne všechny procesy probíhající v systému jsou známy nebo je dokonce záměrně zanedbáváme, abychom získali jednodušší matematický model. Chování je popsáno pouze aproximací dané reality. Není možné dosáhnout naprosté shody s realitou, lze se jí pouze přiblížit. Platí rovnice, čím více se snažíme přiblížit realitě, tím získáváme složitější model. Modelování je tedy jakýsi kompromis mezi složitostí a přesností. Je třeba se tedy rozhodnout, pro jaký typ aplikace bude model sloužit, zda jde o řízení velmi přesného zařízení nebo takového, u kterého na přesnosti příliš nezáleží.

Experimentální identifikace probíhá na reálném objektu, kde se provádí měření. Tento postup tedy vychází z měření vstupních a výstupních veličin reálného objektu a jejich dalším zpracování a vyhodnocení. Výsledkem je experimentální model reálného objektu. Takto sestavený model nepopisuje vnitřní vazby mezi prvky ani žádné vnitřní stavové veličiny. Není modelem struktury systému, popisuje pouze chování závislosti mezi vstupy a výstupy. Parametry nemají konkrétní fyzikální význam. Jelikož se model skládá z parametrů a struktury, je nutné na základě empirických znalostí pro daný objekt určit strukturu. Nevýhodou tohoto modelu je, že je platný pouze pro oblast, kde probíhalo měření. Pro jinou oblast změn vstupních veličin, musíme stanovit model jiný. Sestavení experimentálního

modelu je ve většině případů jednodušší než u analytického způsobu. Tento model uvádí pouze relace mezi vstupem a výstupem, proto se mu říká vstupně výstupní model.

Oba výše uvedené postupy jsou krajní možností identifikace. V praxi se využívá obou těchto metod. Příkladem může být, že se analytickým způsobem, na základě vlastností procesu, určí struktura a některé parametry a následným měřením hodnoty zbývajících parametrů.

Při identifikaci dynamického systému je kladen důraz na naměřená data, která musí obsahovat informace o dynamickém chování systému. Z tohoto důvodu je důležitá volba vhodného vstupního signálu, který vstupuje do soustavy a zároveň měření odezvy soustavy na tento vstupní signál.

Tato práce se bude zabývat pouze experimentální identifikací, kde se parametry modelu budou určovat vyhodnocením naměřených dat. A struktura bude odpovídat diferenciální rovnici zvoleného řádu.

1.4 FORMY POPISU SPOJITÝCH LINEÁRNÍCH DYNAM. SYSTÉMŮ

Existují různé formy popisu: spojitý popis (vstupně výstupní a stavový) a diskrétní popis. Dále se v práci bude pracovat s popisem spojitým.

Vstupně výstupní popis nám popisuje časovou závislost mezi vstupem a výstupem v podobě jedné diferenciální rovnice, která může být vyššího řádu. Rovnice má tvar

$$\frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m u}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} u}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{du}{dt} + b_0 u, \quad (1.1)$$

kde y – výstupní veličina proměnná v čase,

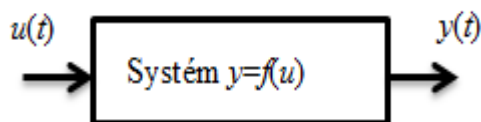
a_i, b_i – konstantní (časově neproměnné) parametry diferenciální rovnice,

u – vstupní veličina proměnná v čase,

s počátečními podmínkami pro výstupní a vstupní veličinu ve tvaru

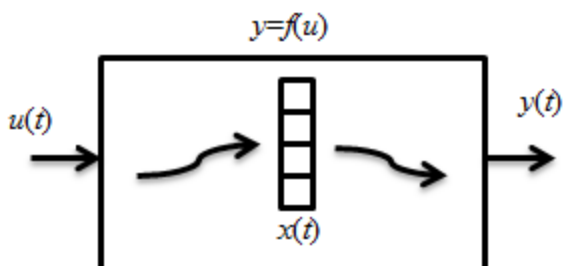
$$y^{(n-1)}(t=t_0) = y_{n-1} \dots y(t=t_0) = y_0, u^{(m-1)}(t=t_0) = u_{m-1} \dots u(t=t_0) = u_0. \quad (1.2)$$

Tento popis je vhodný pro soustavy typu SISO, tedy jeden vstup a jeden výstup. Je stručnější než popis stavový. Nejčastěji se udává ve formě přenosu, což je poměr Laplaceova obrazu výstupní veličiny k Laplaceově obrazu vstupní veličiny při nulových počátečních podmínkách. Pracuje se zde převážně s polynomy.



Obr. 1.2 – Vstupně výstupní popis

Stavový popis (popis ve stavovém prostoru) je tvořen soustavou diferenciálních rovnic prvního řádu a doplněn o výstupní algebraickou rovnici. Oproti vstupně výstupnímu popisu zde přibýly další informace o popisované soustavě (stav systému).



Obr. 1.3 – Stavový popis

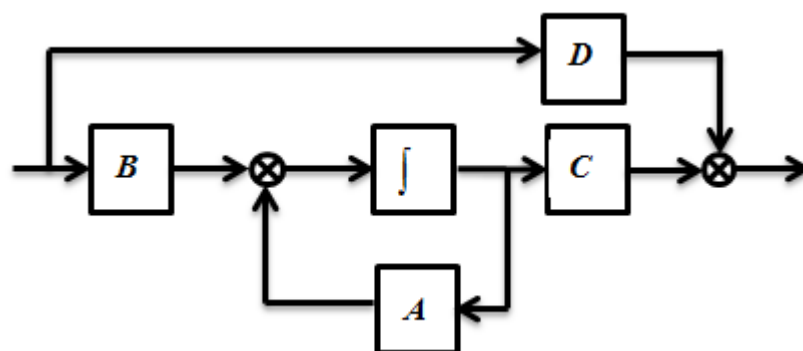
Tento popis má složitější zápis. Hodí se pro soustavy typu MIMO, tedy více vstupů, více výstupů. Je zde zaveden i vektor stavových proměnných $\mathbf{x}$. Tento popis poskytuje více informací o popisované soustavě. Udává se ve formě maticového stavového modelu, tj. parametry a veličiny jsou v maticové či vektorové formě.

Rovnice dynamiky (1.3) stavového modelu popisuje časovou závislost stavových veličin $\mathbf{x}(t)$ na vstupních. Výstupní veličina $\mathbf{y}(t)$ je lineární kombinací veličin stavových

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t), \quad (1.3)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t). \quad (1.4)$$

kde $\mathbf{A}$ – matice systému,
 $\mathbf{B}$ – matice vstupu,
 $\mathbf{C}$ – váhová matice stavu,
 $\mathbf{D}$ – váhová matice vstupu,
 $\mathbf{u}$ – vektor vstupních veličin,
 $\mathbf{x}$ – vektor stavových proměnných,
 $\mathbf{y}$ – vektor výstupních veličin.



Obr. 1.4 – Stavový popis maticově

Ke stavovému modelu existuje vždy právě jeden vstupně výstupní model, tj. jedna diferenciální rovnice. Naopak to neplatí, protože k jednomu vstupně výstupnímu modelu existuje nekonečně mnoho modelů stavových.

1.4.1 Převod mezi popisem vstupně výstupním a stavovým

Lineární časově neproměnný spojitý systém s jedním vstupem (časově proměnný signál $u(t)$) a jedním výstupem (časově proměnný signál $y(t)$) je popsán lineární diferenciální rovnicí n -tého stupně s derivacemi vstupního signálu do stupně $m \leq n$ v obecném tvaru, viz rovnice (1.1) s počátečními podmínkami rovnice (1.2), tj. tzv. vstupně výstupní nebo také vnější popis. Tento systém lze zapsat jako soustavu n diferenciálních rovnic prvního řádu například metodou postupné integrace

$$y - b_n u = \underbrace{\int_{t_0}^t \left\{ \underbrace{b_{n-1}u - a_{n-1}y + \dots}_{x_3} \int_{t_0}^t \left[\underbrace{b_1u - a_1y + \int_{t_0}^t (b_0u - a_0y)dt}_{x_1} \right] dt \right\} dt}_{x_2}}_{x_3} \quad (1.5)$$

nebo

$$\begin{aligned} y &= x_n + b_n u \\ \frac{dx_n}{dt} &= x_{n-1} - a_{n-1}y + b_{n-1}u = x_{n-1} - a_{n-1}x_n + (b_{n-1} - a_{n-1}b_n)u \\ \frac{dx_{n-1}}{dt} &= x_{n-2} - a_{n-2}y + b_{n-2}u = x_{n-2} - a_{n-2}x_n + (b_{n-2} - a_{n-2}b_n)u \\ &\vdots \\ \frac{dx_1}{dt} &= -a_0y + b_0u = -a_0x_n + (b_0 - a_0b_n)u \end{aligned} \quad (1.6)$$

s počátečními podmínkami

$$\begin{aligned}
 x_n(t_0) &= y_0 - b_n u \\
 x_{n-1}(t_0) &= y_1 + a_{n-1}y_0 - b_n u_1 - b_{n-1}u_0 \\
 x_{n-2}(t_0) &= y_2 + a_{n-1}y_1 + a_{n-2}y_0 - b_n u_2 - b_{n-1}u_1 - b_{n-2}u_0 \\
 &\vdots \\
 x_1(t_0) &= y_{n-1} + a_{n-1}y_{n-2} + \dots + a_2y_1 + a_1y_0 - b_n u_{n-1} - \dots - b_2u_1 - b_1u_0
 \end{aligned} \tag{1.7}$$

anebo v maticovém tvaru

$$\begin{aligned}
 \frac{dx}{dt} &= \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} u & \mathbf{x}(t_0) &= \mathbf{A}_0 \mathbf{y}(t_0) - \mathbf{B}_0 \mathbf{u}(t_0) \\
 y &= \mathbf{c} \mathbf{x} + \mathbf{d} u,
 \end{aligned} \tag{1.8}$$

kde se jednotlivé vektory a matice plní následovně:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{x} &= \begin{bmatrix} x_n \\ x_{n-1} \\ \vdots \\ x_2 \\ x_1 \end{bmatrix} & \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} -a_{n-1} & 1 & \dots & 0 & 0 \\ -a_{n-2} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ -a_1 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ -a_0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} & \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} b_{n-1} - a_{n-1}b_n \\ b_{n-2} - a_{n-2}b_n \\ \vdots \\ b_1 - a_1b_n \\ b_0 - a_0b_n \end{bmatrix} \\
 \mathbf{c} &= [1 \quad 0 \quad \dots \quad 0] & \mathbf{d} &= b_n \\
 \mathbf{x}(t_0) &= \begin{bmatrix} x_n(t_0) \\ x_{n-1}(t_0) \\ \vdots \\ x_2(t_0) \\ x_1(t_0) \end{bmatrix} & \mathbf{A}_0 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & a_{n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 1 & \dots & a_3 & a_2 \\ 1 & a_{n-1} & \dots & a_2 & a_1 \end{bmatrix} & \mathbf{B}_0 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & b_n \\ 0 & 0 & \dots & b_n & b_{n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & b_n & \dots & b_3 & b_2 \\ b_n & b_{n-1} & \dots & b_2 & b_1 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{y}(t_0) &= \begin{bmatrix} y_{n-1} \\ y_{n-2} \\ \vdots \\ y_1 \\ y_0 \end{bmatrix} & \mathbf{u}(t_0) &= \begin{bmatrix} u_{n-1} \\ u_{n-2} \\ \vdots \\ u_1 \\ u_0 \end{bmatrix},
 \end{aligned}$$

tj. tzv. stavový nebo také vnitřní popis. Maticový tvar je vhodný v případě numerického řešení matematického modelu z toho důvodu, že se odstraní problém derivování vstupního signálu (pracuje se pouze s aktuálním vstupem bez derivace). Což u diferenciální rovnice vyššího stupně s derivací pravé strany je komplikace.

1.4.2 Dopravní zpoždění

U systému může dojít k dopravnímu zpoždění z důvodu konečné rychlosti šíření signálu. Dopravní zpoždění ovlivňuje chování celého systému a je třeba jej zahrnout do popisu (modelu) systému a nadále s ním pracovat.

Tento systém je možné popsat diferenciální rovnicí (1.1), pouze se musí upravit posunutím vstupního signálu o $(t - D)$. Výsledná diferenciální rovnice s dopravním zpožděním má tvar

$$\begin{aligned} \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = \\ = b_m \frac{d^m u(t-D)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} u(t-D)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{du(t-D)}{dt} + b_0 u(t-D). \end{aligned} \quad (1.9)$$

Tuto rovnici (1.9) můžeme pomocí Laplaceovy transformace za předpokladu nulových počátečních podmínek přepsat na rovnici

$$(s^n + \dots + a_1 s + a_0) L\{y(t)\} = (b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0) L\{u(t-D)\}. \quad (1.10)$$

Po aplikaci věty o posunutí v originále podle rovnice

$$L\{f(t-a)\} = e^{-as} F(s), \quad (1.11)$$

lze rovnici (1.10) přepsat do tvaru rovnice

$$(s^n + \dots + a_1 s + a_0) Y(s) = e^{-Ds} (b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0) U(s), \quad (1.12)$$

ze které lze stanovit přenos soustavy s dopravním zpožděním

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{s^n + \dots + a_1 s + a_0} e^{-Ds}. \quad (1.13)$$

V práci bude uvažováno pouze dopravní zpoždění po celých jednotkách pořízených vzorků, tedy pro vzorkovací frekvenci $T_{vz} = 0,25$ s, bude $D = nT_{vz}$, kde n je kladné celé číslo včetně nuly (0, 1, ...).

1.5 VOLBA VHODNÉHO VSTUPNÍHO SIGNÁLU PRO IDENTIFIKACI

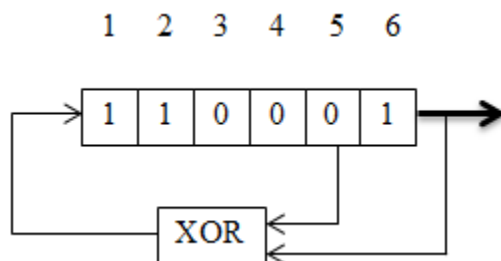
Ideální signál pro identifikaci by měl vybuzovat soustavu na všech frekvencích rovnoměrně. Pro experimentální identifikaci se jako vhodný vstupní signál jeví takzvaný pseudonáhodný binární signál (PNBS). Tento po částech spojitý signál má na určitém

frekvenčním pásmu rovnoměrně rozložený výkon. Pseudonáhodný signál se snadno generuje a realizuje, protože může nabývat pouze dvou hodnot. Pseudonáhodná posloupnost se periodicky opakuje po čase NT , kde číslo N je počet intervalů v periodě a T je minimální interval, na kterém může dojít ke změně hodnoty signálu.

Frekvenční pásmo, ve kterém má signál stejnoměrně rozloženou energii, je dáno vztahem

$$f_{\min} = \frac{1}{N \cdot T} < f < f_{\max} = \frac{1}{2 \cdot T} \frac{N-1}{N}. \quad (1.14)$$

Pro hardwarové generování signálu PNBS se používají logické obvody a posuvné registry. Tento způsob lze jednoduše realizovat i programově. Velikost posuvného registru (n) určuje délku periody ($2^n - 1$), po které se bude posloupnost hodnot opakovat. Principiální obr. 1.5 ukazuje, jak se dá vytvořit PNBS posloupnost s periodou o délce 63 bitů ze šestibitového posuvného registru. Výstupem generátoru je hodnota na poslední (šesté) pozici posuvného registru. Zároveň se první pozice posuvného registru plní hodnotou, která je výsledkem logické funkce XOR prvků na pozici pět a šest v posuvném registru. Záleží na délce posuvného registru, jak dlouhé posloupnosti chceme vytvořit. Například pro pětibitový posuvný registr je výsledkem binární posloupnost o délce 31 možných změn hodnot.



Obr. 1.5 – Posuvný registr se šesti bity

Pro některé délky posuvného registru je potřeba na vstup přivádět logické kombinace hodnot z více než dvou pozic. Také záleží na správném prvotním naplnění tohoto posuvného registru. V následující tab. 1.1 je uveden výčet počátečních hodnot několika vybraných délek posuvného registru, kdy na vstup přivedená hodnota odpovídá zapojení s jedním XOR členem, viz obr. 1.5.

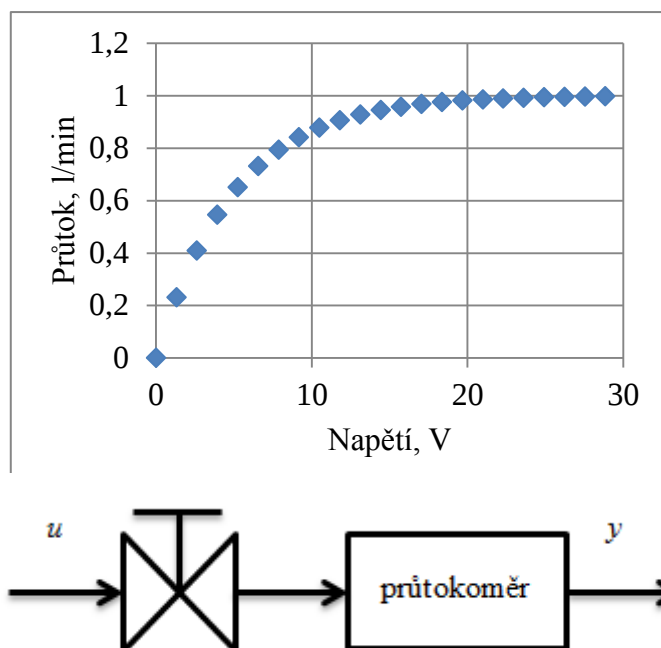
Tab. 1.1 – Naplnění posuvného registru (Peterka, 1969)

Počet bitů registru n	Perioda opakování $= (2^n - 1)$	Prvotní naplnění registru 1 2 3 4 5 6	XOR se provádí z bitů na pozici
2	3	1 1	1 2
3	7	1 0 1	2 3
4	15	1 0 0 1	3 4
5	31	0 1 0 0 1	3 5
6	63	1 1 0 0 0 1	5 6

Protože soustava dvou ventilátorů propojených pneumatickým objemem není příliš rychlá, nemá velký význam ji identifikovat v oblasti vysokých frekvencí. Příliš rychlé změny vstupního signálu by se nemusely na výstupu projevit. Proto se na vstup systému přivede pseudonáhodný binární signál s opakovací bezrozměrnou periodou $(2^n - 1)$ kde $n = 6$ je počet bitů generátoru (posuvného registru) PNBS a není třeba delšího registru. Tedy toho, který je zobrazen na obr. 1.5.

1.6 NELINEARITA

V běžném životě se často setkáváme s dynamickými systémy, které nejsou lineární, tj. neplatí pro ně princip superpozice. Jejich statická charakteristika $y = f(x)$, tudíž obvykle nebývá lineární funkcí, kde x je vstupní signál a y je výstupní odezva na vstupní signál. Na následujícím obr. 1.6 je zobrazena ilustrační nelineární statická charakteristika závislosti průtoku kapaliny, měřeného průtokoměrem, na napětí, které otevírá ventil. Tyto systémy se popisují nelineárními diferenciálními rovnicemi.



Obr. 1.6 – Nelineární statická charakteristika závislosti průtoku na napětí

1.6.1 Metody řešení nelineárních diferenciálních rovnic

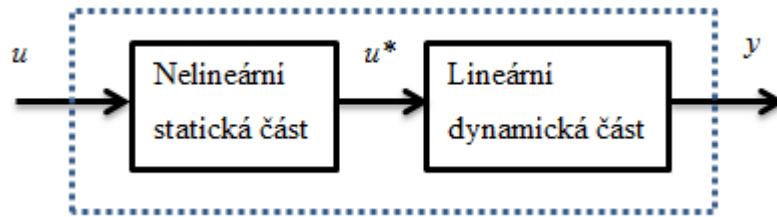
Pro řešení nelineárních diferenciálních rovnic neexistují obecné metody. Pouze některé typy rovnic lze řešit v uzavřeném tvaru. Příklady metod, které se používají v oblasti automatické regulace (Balátě, 2004).

- Grafické metody řešení diferenciálních rovnic, což je například metoda izoklín.
- Numerické metody řešení, které se dělí na jednokrokové (počítají funkční hodnotu z jedné předcházející funkční hodnoty) nebo vícekrokové, ty provádí výpočet z více hodnot.
- Metoda stavové roviny, jejímž základem je grafické řešení diferenciálních rovnic v takzvané stavové rovině, jejímiž souřadnicemi jsou vyšetřovaná veličina a její derivace. Následný pochod je znázorněn stavovou trajektorií.

Více informací o těchto metodách je možné získat v (Balátě, 2004).

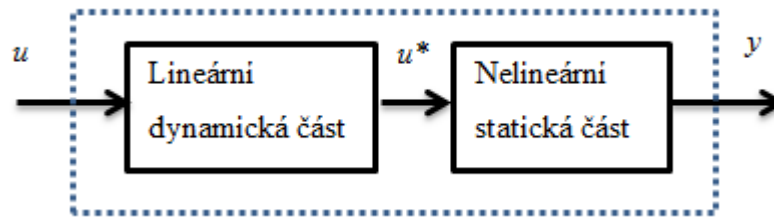
1.6.2 Hammersteinův a Wienerův model nelineárního systému

V praxi se pro modelování nelineárních dynamických systémů nejvíce používá Hammersteinův a Wienerův model (Babík, 2012; Brázdil, 2011). Tento přístup spočívá v oddělení nelineární statické a lineární dynamické části nelineárního procesu. Tyto části jsou mezi sebou propojené, ale navzájem se neovlivňují. Pokud se nelinearita objevuje na vstupu systému, tak hovoříme o Hammersteinově modelu,



Obr. 1.7 – Hammersteinův model nelineárního systému

jestli je na výstupu, poté hovoříme o Wienerově modelu.



Obr. 1.8 – Wienerův model nelineárního systému

Hammersteinův model se skládá z kaskádovité struktury, kde je za sebou zapojena statická nelineární část a dynamická lineární část. Tento model se používá u systémů, u kterých je nelinearita způsobena především akčními členy. Wienerův model má kaskádovitou strukturu, skládající se ze za sebou zapojené lineární dynamické části a nelineární statické části.

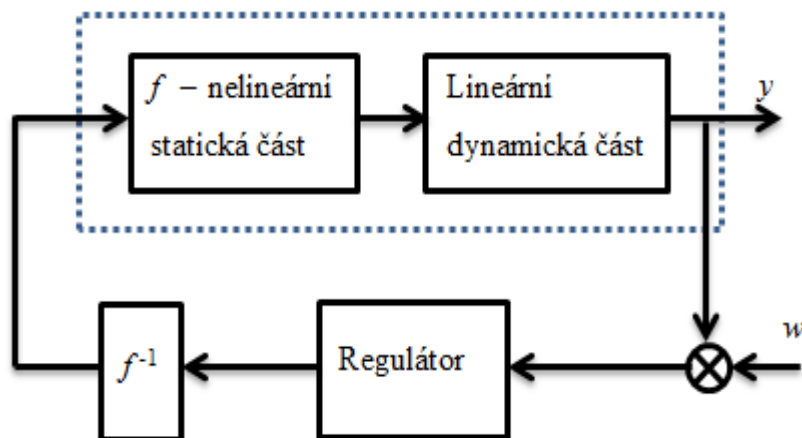
Dále se budu zabývat Hammersteinovým modelem. Hammersteinův model nelineárního systému může mít následující strukturu, která je popsána rovnicemi

$$u^*(t) = g(u(t)), \quad (1.15)$$

$$\begin{aligned} y^{(n)}(t) + a_{n-1}y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1y^{(1)}(t) + a_0y(t) = \\ = b_mu^{*(m)}(t) + b_{m-1}u^{*(m-1)}(t) + \dots + b_1u^{*(1)}(t) + b_0u^*(t). \end{aligned} \quad (1.16)$$

Tato struktura popisuje systémy, kde se vyskytuje dominantní nelineární akční člen. Nelineární akční členy mohou být servomechanismy, ventily, elektromagnetické motory.

Tento model se hojně využívá v řídicí technice, kde se eliminuje statická nelinearita její inverzní funkcí, která se zařadí za výstup regulátoru.



Obr. 1.9 – Eliminace nelinearity v regulačním obvodu

Výhodou rozdělení systému na statickou a dynamickou část je to, že se z lineární dynamické části může jednoduše ověřit, jestli je systém stabilní.

Nelineární statická část se obecně aproximuje polynomem vhodného stupně. Je ovšem možné použít i jiné aproximace, které danou charakteristiku vystihují lépe. Aproximace pro případ nelineární statické charakteristiky může mít tvar polynomu druhého stupně

$$u^*(t) = c_0 + c_1 u(t) + c_2 u^2(t) \quad (1.17)$$

1.7 IDENTIFIKACE PARAMETRŮ MODELU DYN. SYSTÉMU

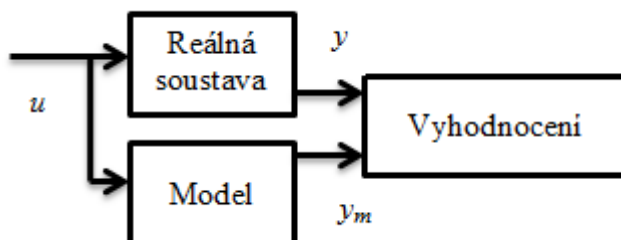
Matematický model dynamického systému může být popsán lineární diferenciální rovnicí vyššího řádu s derivací pravé strany (derivací vstupního signálu, viz rovnice (1.1)). Tato rovnice obsahuje parametry, u kterých neznáme jejich číselné vyjádření a musíme je tudíž nějakým způsobem určit. Pokud bychom znali časový průběh vstupního signálu ve formě analytické funkce, pak je teoreticky možné nalézt řešení diferenciální rovnice (1.1) (časový průběh $y(t)$) ve formě funkce závislé nejen na čase, ale také na hodnotách parametrů a počátečních hodnotách, tj.

$$y = f(t, u(t), \dot{u}(t), \dots, y(t_0), \dot{y}(t_0), \dots, u(t_0), \dot{u}(t_0), \dots, a_0, a_1, \dots, b_0, b_1, \dots) \quad (1.18)$$

na tento vstupní signál.

Identifikací parametrů modelu dynamického systému tedy rozumíme hledání číselných vyjádření parametrů funkce, která popisuje lineární dynamický systém tak, aby po přivedení stejného vstupního signálu, jak na vstup vyšetřované (reálné) soustavy, tak do modelu byla odezva na tento vstupní signál „co nejvíce“ stejná. Tato shoda se hodnotí pomocí

matematického kritéria, které vyjadřuje míru shody odezvy matematického modelu s odezvou soustavy. Problém nalezení parametrů se převede na úlohu nalezení „co nejlepší shody“, tedy nejmenší hodnoty kritéria a to se běžně řeší pomocí metod optimalizace.



Obr. 1.10 – Shoda matematického modelu s reálnou soustavou

1.7.1 Optimalizace

Optimalizace je matematický postup hledání extrému zvolené **hodnoticí funkce**. Těto hodnoticí funkci se říká účelová nebo **kritérium** optimalizace a její tvar musí být určen tak, aby při dosáhnutí požadovaného cíle toto kritérium dosáhlo extrému (obvykle minima). Hodnota kritéria je ovlivněna změnou zadaných parametrů matematického popisu, kterým se říká **optimalizační proměnné**.

Změnou optimalizačních proměnných se mění hodnota kritéria a my hledáme extrém funkce (tedy minimum nebo maximum). Na podmnožinách hodnot, z kterých optimalizační proměnné vybíráme, může existovat více extrémů. Rozlišujeme extrémy lokální, kterých je více, a jeden extrém globální, který se snažíme pomocí optimalizace objevit. Při numerické optimalizaci hledání extrému musíme v převážné většině metod zadat počáteční odhad parametrů, takzvaný nástřel. Existuje zde problém, že optimalizační metoda může uváznout v lokálním extrému a do globálního se vůbec nedostane. Nemusí být na první pohled jasné, jestli optimalizační metoda skončila v lokálním či globálním extrému. Řešením může být změna nástřelu parametrů a porovnání dosažených výsledků. Pokud se parametry změní a hodnota kritériální funkce se přiblíží extrému, je jasné, že se jednalo o lokální extrém.

Optimalizační proměnné (parametry modelu) mohou nabývat neomezených hodnot v intervalu $(-\infty; +\infty)$. Tímto způsobem se najde tzv. volný extrém. Z důvodu, že v běžném životě existují jistá technická či technologická omezení, není vždy možné použít hledání v intervalu $(-\infty; +\infty)$, ale pouze v omezeném okolí a hledá se tedy extrém za existence omezení.

Při optimalizaci je zásadní volba vhodného optimalizačního kritéria.

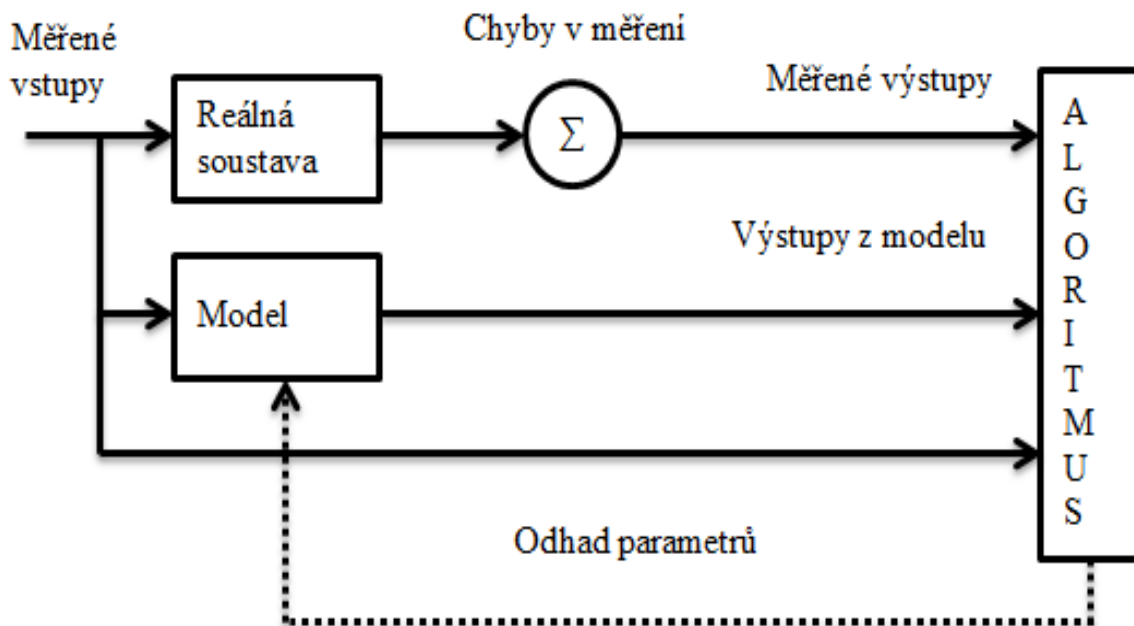
Pro názornost bude uveden následující příklad. Na vstup reálného systému se přivede předem definovaný vstupní signál $u(t)$ a na výstupu se naměří časově proměnný signál $y_R(t)$. Následně bude stejný vstupní signál $u(t)$ přiveden i na vstup modelu a zaznamenáván výstupní signál $y_M(t)$. Pokud má model odpovídat reálné soustavě, neměly by se časové průběhy příliš lišit. Optimalizační kritérium se tvoří tak, aby co nejvíce vystihovalo porovnání shody obou průběhů. Ve většině případů se používá kritérium součtu kvadrátů odchylek. Pro případ shody na spojitém intervalu $\langle a; b \rangle$ má kritérium tvar

$$S = \int_a^b (y_M - y_R)^2 dt, \quad (1.19)$$

nebo v případě porovnání dvou průběhů v n bodech je ve tvaru

$$S = \sum_{i=1}^n ((y_M)_i - (y_R)_i)^2. \quad (1.20)$$

Obě výše zmíněná kritéria mají při shodě obou průběhů hodnotu nula. Jestli se některé z nich použije jako účelová funkce, pak se hledá optimalizací jejich minimum.



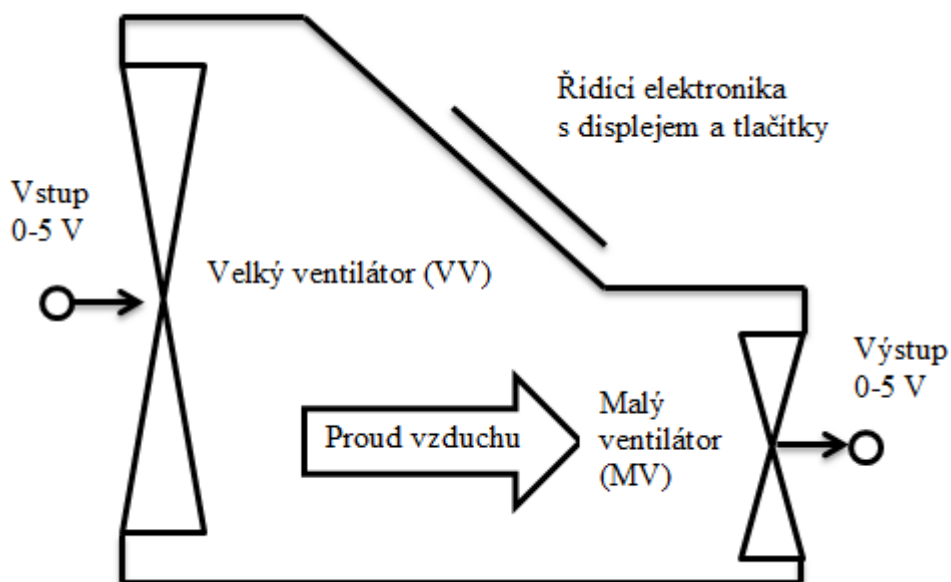
Obr. 1.11 – Postup nalezení parametrů matematického modelu

Na obr. 1.11 je znázorněn zmíněný postup nalezení parametrů. V bloku algoritmus může být zahrnuto výše zmíněné kritérium sumy kvadrátů odchylek. Dále v tomto bloku najdeme i početní postup hledání extrému kritéria a také nastavení nových hodnot parametrů matematického modelu po vyhodnocení kritéria.

2 ŘEŠENÍ

2.1 POPIS VYŠETŘOVANÉ SOUSTAVY

Pneumatický systém se skládá ze dvou ventilátorů spojených pneumatickým objemem. Ilustrační náčrtek systému je zobrazen na obr. 2.1. Půdorys zařízení odpovídá zhruba formátu papíru A4. Zařízení je dále vybaveno LCD displejem o dvou řádcích s šestnácti znaky na každém řádku pro zobrazení zvolených hodnot. Dále umožňuje měřit jedno vstupní analogové napětí v rozsahu od 0 V do 5 V s přesností, danou desetibitovým převodníkem a také může generovat jedno analogové napětí v rozmezí od 0 V do 5 V s přesností dvanáctibitového převodníku. Vstupní napětí může být buď generováno přímo v zařízení pomocí potenciometru, nebo přivedeno z vnějšku na konektor CINCH.



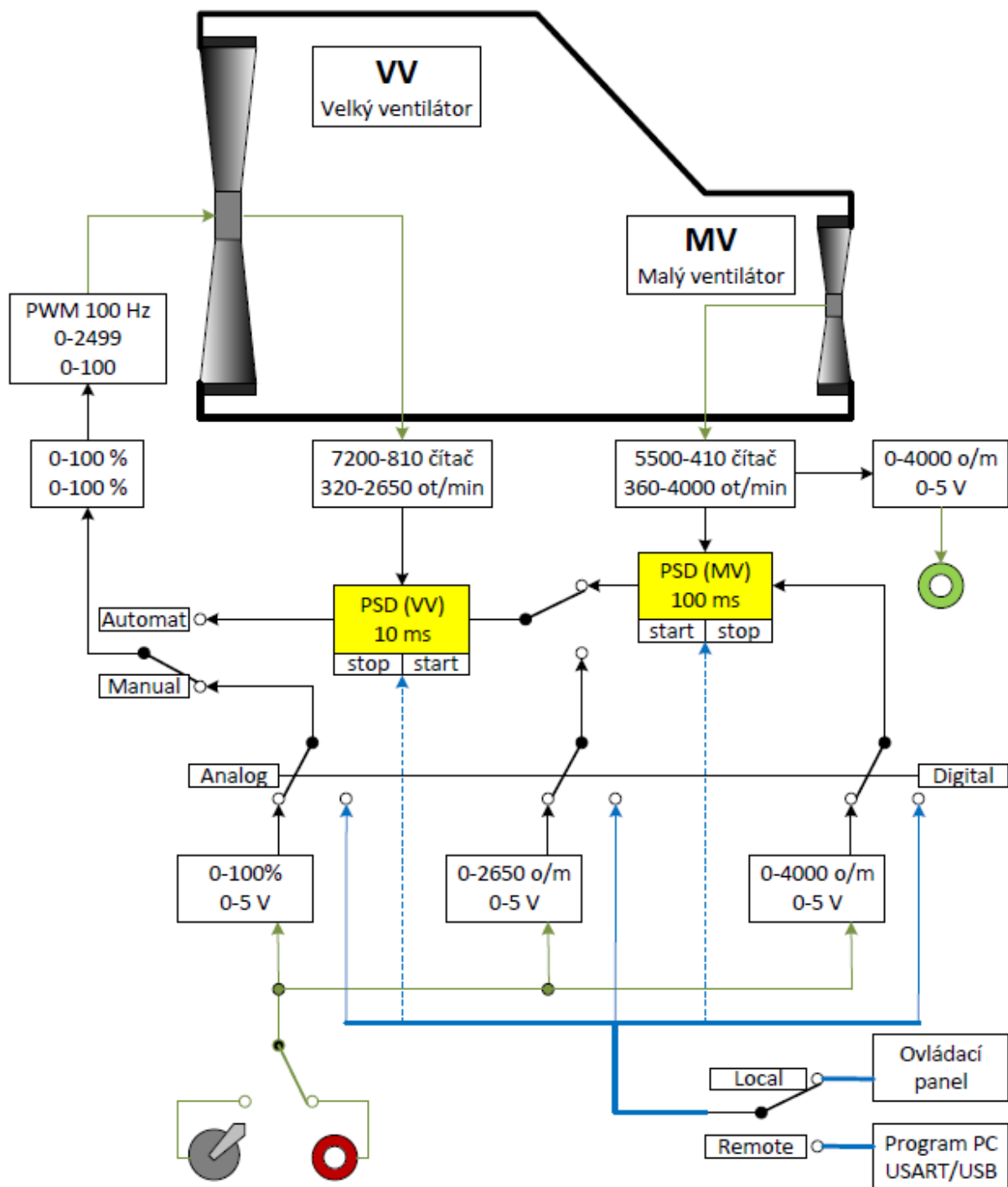
Obr. 2.1 – Inspirativní provedení zkoumané pneumatické soustavy

Princip je takový, že velkým ventilátorem je do pneumatického objemu vháněn vzduch, který roztáčí malý ventilátor. Otáčky velkého ventilátoru jsou ovládány spínáním napájecího napětí pomocí tranzistoru řízeným PWM signálem s frekvencí 100 Hz. Možnost změny délky sepnutí napětí je od 0 % do 100 % s krokem lepším než 0,1 %. Tento signál je generován řídicí jednotkou s mikroprocesorem ATMEL ATmega128. Program řídicí jednotky je sepsán v programovacím jazyku „C“.

Rychlost otáčení ventilátorů je získána na základě měření doby zastínění optického snímače. Měřené otáčky velkého ventilátoru se pohybují od 320 ot/min do 2 650 ot/min. Otáčky malého ventilátoru se měří stejným způsobem. Informace o počtu otáček malého

ventilátoru se převádí na výstupní napětí od 0 V do 5 V. Otáčky malého ventilátoru se pohybují od 360 ot/min do 4000 ot/min.

Na následujícím obr. 2.2 je zobrazeno blokové schéma tohoto systému.



Obr. 2.2 – Blokové schéma pneumatického systému

Programové vybavení řídicí jednotky obsahuje taktéž dva regulátory, které je možné do ovládání soustavy zapojit. První (VV) regulátor reguluje otáčky velkého ventilátoru na žádané. Tím se docílí větší stability a menšího kolísání měřených hodnot. Dále je možné zapojit i druhý regulátor (MV), který udržuje žádané otáčky na malém ventilátoru.

Zařízení je také vybaveno převodníkem UART/USB pro možnou digitální komunikaci mezi PC a zařízením. Toto rozšíření nebylo možné využít, protože bylo ve fázi příprav.

Podle blokového schématu na obr. 2.2 byla vybrána taková konfigurace pro identifikaci, při které zůstal zapojen první (VV) regulátor pro potlačení nelinearity systému (příkon versus otáčky VV) a druhý (MV) byl odpojen. Nastavení bylo v režimu analog a automat. Jako vstupní signál se bralo napětí odpovídající žádaným otáčkám velkého ventilátoru.

2.2 MĚŘÍCÍ KARTA



Obr. 2.3 – Komunikační karta LabJack U3

Pro sběr dat a řízení soustavy je použita USB měřicí karta LabJack U3.

Tato karta obsahuje dva analogové výstupy 0 V až 5 V s desetibitovým převodníkem. Napětí se může nastavovat s krokem zhruba 5 mV. Zároveň karta obsahuje až 16 analogových vstupů (± 10 V), které mají převodník se dvanácti bity. Podporuje softwarový nebo hardwarový časový sběr dat. K počítači se připojuje pomocí USB 2.0 a je napájena přes USB kabel. Součástí zařízení jsou i ovladače pro operační systémy typu Windows, Linux a Mac.

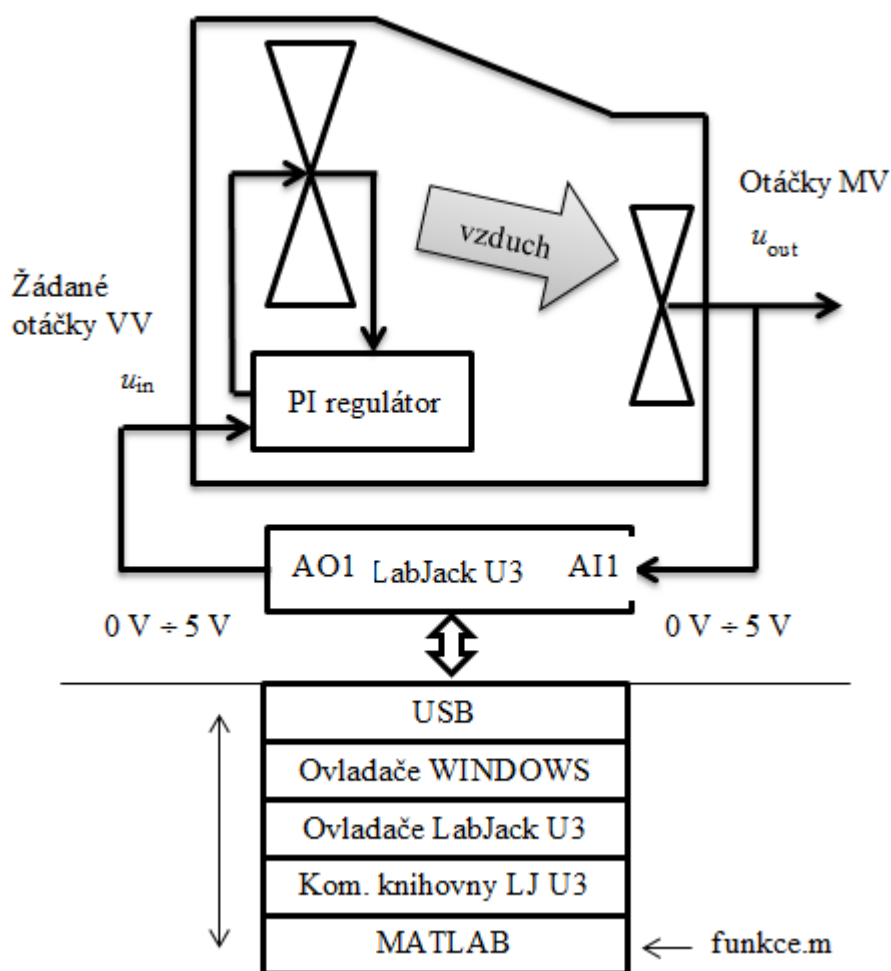
Ke komunikaci počítače se zařízením je třeba zkopírovat knihovny pro práci se zařízením do stejné složky, ze které se spouští programy. Další postup závisí na použitém softwaru. V mém případě se jedná o výpočetní software MATLAB.

Tato karta má mnohem více vlastností, ale pro experiment nám tyto informace stačí.

2.3 SOFTWAREVÉ VYBAVENÍ

Pro řízení a vyhodnocení experimentu se soustavou je použit výpočetní software MATLAB. Aby bylo možné využít přímé volání funkcí knihovny LabJackUD.dll z výpočetního softwaru MATLAB, je nutné mít soubor prototypů funkcí uvedené knihovny zkopírován v aktuálním pracovním adresáři, ze kterého se spouští jednotlivé programy (Dušek, 2009). Tento postup je ověřen pro Windows 7 Home Premium 64-bit.

Pro uživatelsky jednoduchou komunikaci byly vytvořeny čtyři funkce.



Obr. 2.4– Řetězec komunikace programu se soustavou

MATLAB pracuje s takzvanými „m-file“ soubory, pod kterými si můžeme představit skripty případně funkce. Nejprve je potřeba otevřít komunikaci se zařízením LabJack U3 a vytvořit takzvaný handle (h) neboli ukazatel na toto zařízení, který v dalších funkcích určuje, kterého zařízení se daná funkce týká

$$h = \text{Open_U3}(id), \quad (2.1)$$

kde proměnná id označuje identifikátor zařízení. Když je otevřená komunikace se zařízením, může se nastavit hodnota napětí na analogový kanál, to se provádí funkcí

$$\text{AO_U3}(h, \text{AO1}, U), \quad (2.2)$$

kde h – handle na zařízení,

AO1 – komunikační kanál (identifikátor AO),

U – hodnota napětí.

Pro čtení analogového napětí ze zařízení je vytvořena funkce

$$\text{hodnota} = \text{AI_U3}(h, \text{AI1}), \quad (2.3)$$

kde AI1 – komunikační kanál (identifikátor AI),

hodnota – aktuální hodnota napětí změřená na tomto kanálu.

Po provedení měření je vhodné ukončit komunikaci se zařízením pomocí funkce

$$\text{Close_U3}(h). \quad (2.4)$$

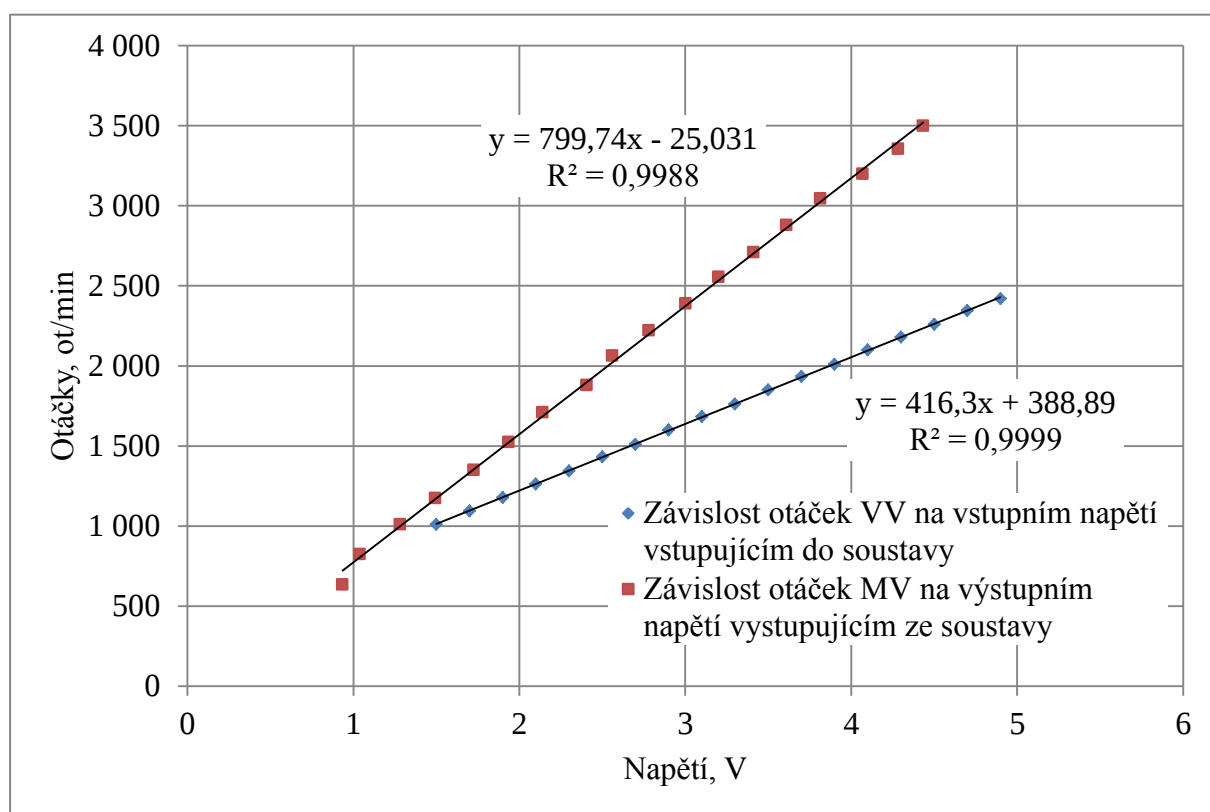
2.4 VLASTNOSTI VYŠETŘOVANÉ SOUSTAVY

Matematický model pneumatické soustavy je možné sestavit pro dvě zapojení. První bylo nalezení matematického modelu závislosti otáček malého ventilátoru na otáčkách velkého ventilátoru (s potlačením nelinearity pomocí PI regulátoru, regulujícího vstupní otáčky VV na žádanou hodnotu změnou příkonu). Druhé bylo závislost otáček malého ventilátoru na vstupním příkonu do velkého ventilátoru. Bylo rozhodnuto vytvořit nejprve první variantu, tedy závislost otáček malého ventilátoru na otáčkách velkého ventilátoru.

2.4.1 Převod signálu

Model má popisovat závislost otáček MV na žádaných otáčkách VV, ale měřený i ovládací signál je v napětí (0 V do 5 V), proto bylo nutné provést přepočít signálu z napětí na otáčky. Přepočít napětí na otáčky probíhal tak, že se nastavila vstupní hodnota napětí

velkého ventilátoru a po ustálení se z displeje zaznamenala hodnota otáček. Zároveň se prováděl i přepočet z napětí vystupujícího ze soustavy, které odpovídalo otáčkám malého ventilátoru. Tyto otáčky malého ventilátoru s příslušným napětím se odečítaly z displeje. Po zaznamenání hodnot, pro rozsah vstupního napětí od 1,5 V (hodnota experimentálně zjištěná, kdy se začal točit malý ventilátor) do 5 V, byla data vynesena do grafu a byla ověřena linearita přepočtu otáček malého ventilátoru na výstupní napětí. Pro oba přepočty z napětí na otáčky byla pomocí aproximace naměřených dat nalezena funkční závislost otáček na napětí. Jednotlivé funkční závislosti jsou vidět na obr. 2.5.



Obr. 2.5 – Přepočty z napětí na otáčky

Dále se již bude pracovat pouze s hodnotami otáček. Přepočty na napětí jsou v obr. 2.5.

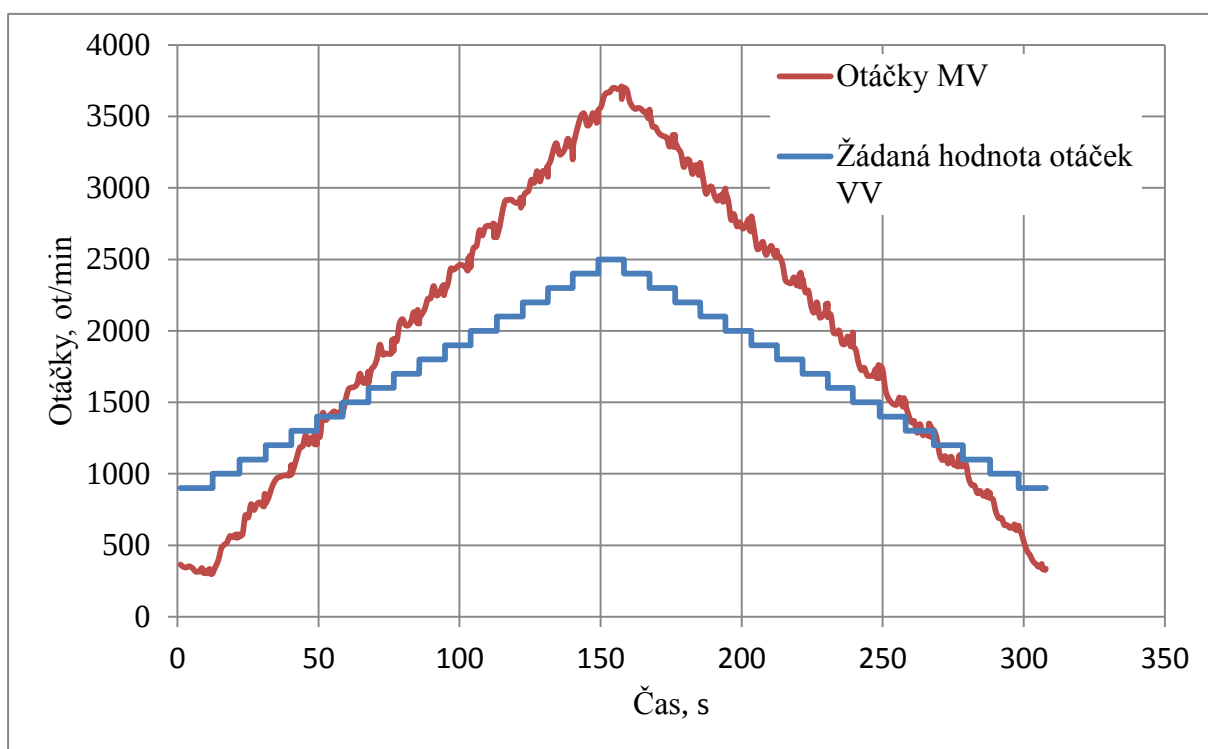
2.4.2 Statická charakteristika

Statická charakteristika je závislost mezi vstupem a výstupem v ustáleném stavu tj. po odeznění přechodových jevů. V mém případě je to závislost otáček velkého (řídícího) a malého (řízeného) ventilátoru.

Statická charakteristika byla měřena od minimálních otáček VV, co se začal točit malý ventilátor, tedy zhruba od 900 ot/min VV do 2 500 ot/min VV. Data byla pořízena pomocí

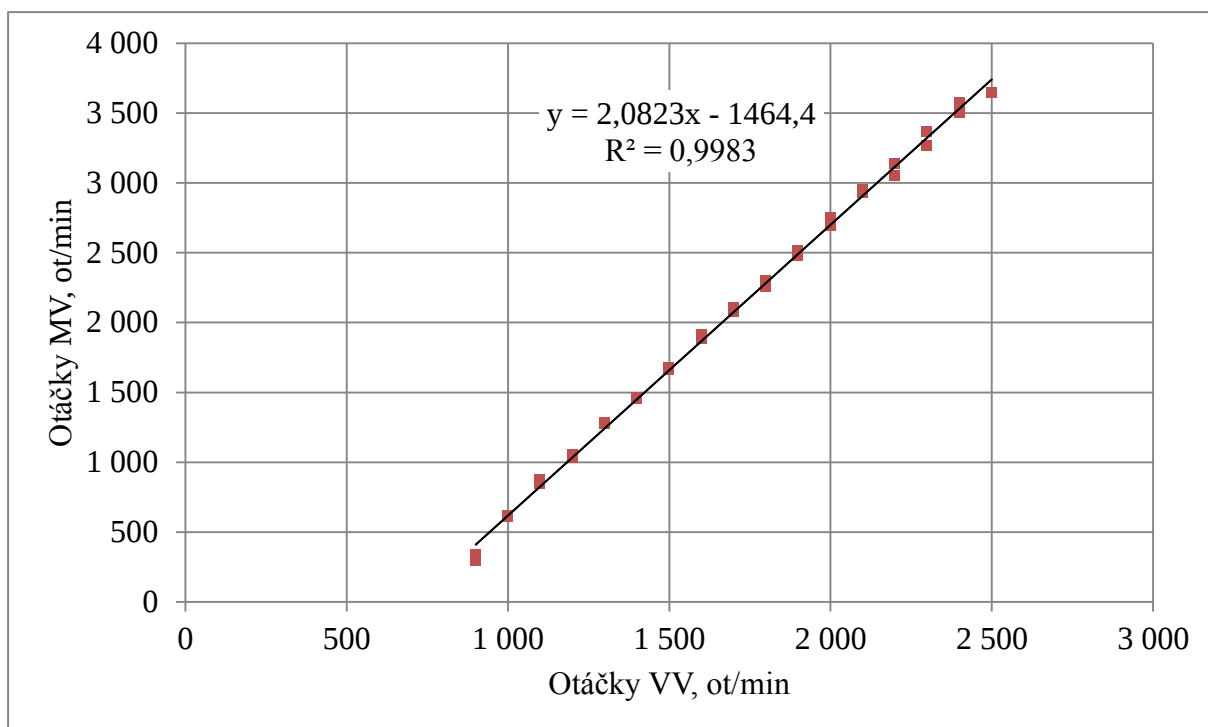
programu tak, že se nastavila požadovaná hodnota otáček a čekalo se, dokud se otáčky malého ventilátoru neustálí. Data byla pořizována se vzorkovací periodou 0,25 s a ukládala se do pole obsahujícího posledních deset měřených hodnot. Z těchto hodnot se aritmetickým průměrem zjistila průměrná hodnota a od této hodnoty se zjišťovalo, zda se vstupní hodnota neliší o více než jedno procento od průměru, pokud ano, pokračovalo se v měření, pokud ne, tak se hodnota uložila s příslušnými otáčkami VV. Po následném nastavení nové hodnoty se muselo počkat zhruba 2 s, protože by se hodnota otáček MV mohla vyhodnotit chybně z důvodu pomalé změny výstupních otáček. Data byla měřena od 900 ot/min VV do 2 500 ot/min VV a následně z 2 500 ot/min VV do 900 ot/min VV.

Průběh zjištění statické charakteristiky je znázorněn na obr. 2.6.



Obr. 2.6 – Záznam průběhu zjištění statické charakteristiky

Na obr. 2.7 je vidět, že statická charakteristika je lineární. To znamená, že by systém měl být lineární a není třeba řešit nelinearitu, kterou lze odstranit například Hammersteinovým modelem. Nicméně systém může být stále nelineární v dynamické části. Dále je vidět, že se data téměř překrývají, tedy dochází pouze k slabé hysterezi.

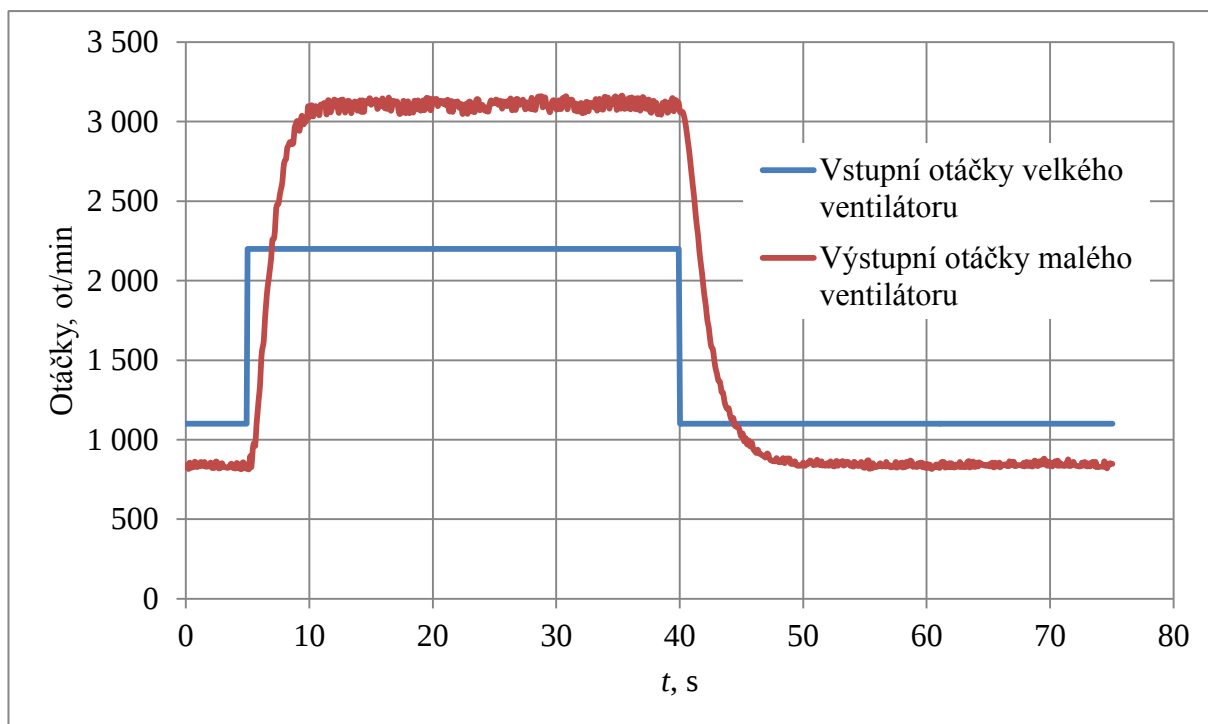


Obr. 2.7 – Statická charakteristika pneumatické soustavy

2.4.3 Reakce systému na změnu vstupního signálu

Je dobré znát dynamické vlastnosti soustavy. Jak rychle reaguje na změnu vstupního signálu. Jestli se vyskytuje dopravní zpoždění. Za jak dlouho se dostane do ustáleného stavu. Jaké má zesílení. Určit (odhadnout), o který řád systému se jedná. Tyto vlastnosti můžeme přibližně odhadnout z následujícího obr. 2.8, kde je provedena změna otáček velkého ventilátoru s měřením otáček malého ventilátoru.

Z obr. 2.8 je vidět, že soustava má zesílení zhruba dvě a ustálí se po cca deseti sekundách. Dopravní zpoždění není příliš viditelné. Tyto informace můžeme uplatnit u volby vstupního signálu a periody vzorkování.



Obr. 2.8 – Dynamická charakteristika soustavy

2.4.4 Volba periody vzorkování

Pro volbu intervalu vzorkování pro potřeby identifikace se používá empirické pravidlo 6 až 15 vzorků na dobu ustálení. Toto pravidlo je důležité u identifikace ONLINE

$$T_{vz} = \left(\frac{1}{6} \div \frac{1}{15} \right) T_{95}, \quad (2.5)$$

kde T_{vz} – interval vzorkování,

T_{95} – doba reakce přechodu do 95 % ustálené hodnoty na tuto změnu vstupního signálu.

U spjitých dynamických systémů by na velikosti intervalu vzorkování nemělo záležet. Pro identifikaci byla použita vzorkovací frekvence 0,25 sekundy.

2.4.5 Vstupní signál

Na vstup systému byl přiveden pseudonáhodný binární signál PNBS. Při základní periodě $T = 3$ s je perioda opakování posloupnosti hodnot (opakovací perioda) rovna

$$N = 2^n - 1, \quad (2.6)$$

kde $n = 6$ je počet bitů generátoru PNBS. Opakovací perioda generátoru je

$$T_G = NT = 63 \cdot 3 = 189 \text{ s.} \quad (2.7)$$

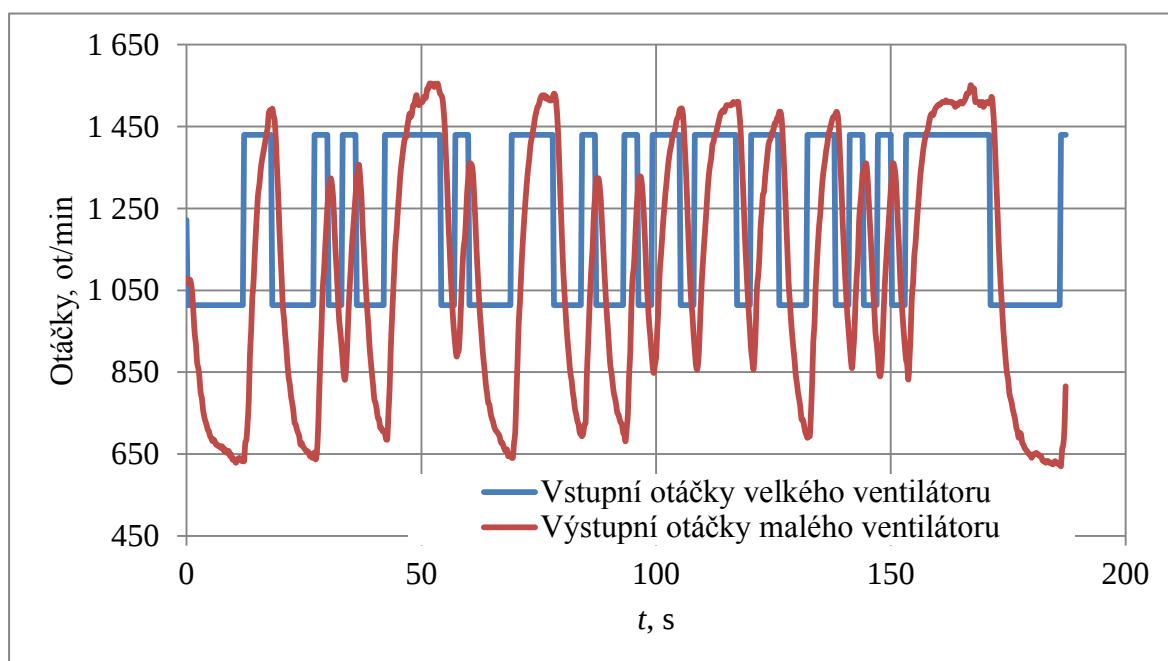
T je nejkratší časový úsek, po kterém může dojít ke změně hodnoty signálu. Tato hodnota byla zvolena na 3 s z důvodu, aby měřená odezva obsahovala úseky umožňující získat informaci o zesílení (chování soustavy na nízkých frekvencích). Dosazením do rovnice (1.14) bylo zjištěno frekvenční pásmo, na kterém bude soustava buzena přibližně stejným výkonem

$$f_{\min} = \frac{1}{189} < f < f_{\max} = \frac{31}{189}, \quad (2.8)$$

kde $f_{\min}$ a $f_{\max}$ je minimální a maximální frekvence, Hz.

Následně byla provedena měření (reakce soustavy na pseudonáhodný binární vstupní signál PNBS s touto periodou) pro tři pracovní body.

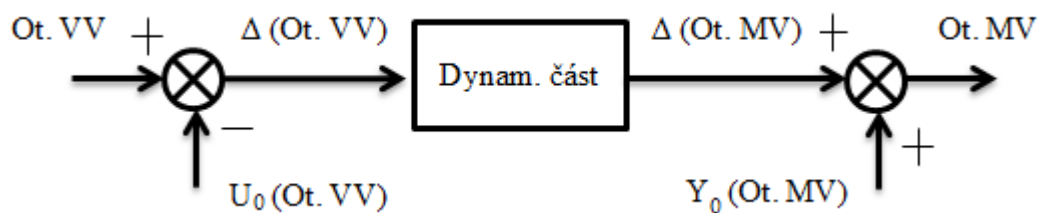
Pracovní body byly zvoleny tak, aby obsáhly většinu rozsahu, kdy se již malý ventilátor točí sám v reakci na otáčkách velkého ventilátoru. První pracovní bod byl zvolen na hodnotě 1 221 ot/min, což odpovídá vstupnímu napětí 2 V. Změny otáček od pracovního bodu byly ± 208 ot/min, které odpovídají změně vstupního napětí o $\pm 0,5$ V. Další dva pracovní body byly zvoleny na hodnotě 1 637 a 2 054 ot/min (3 a 4 V), opět se změnou otáček ± 208 ot/min od pracovního bodu. Na následujícím obr. 2.9 je zobrazena reakce systému na vstupní signál v pracovním bodě 1 221 ot/min. Následné dva obrázky, pro rozdílné pracovní body, by byly velmi obdobné.



Obr. 2.9 – Reakce soustavy na PNBS signál

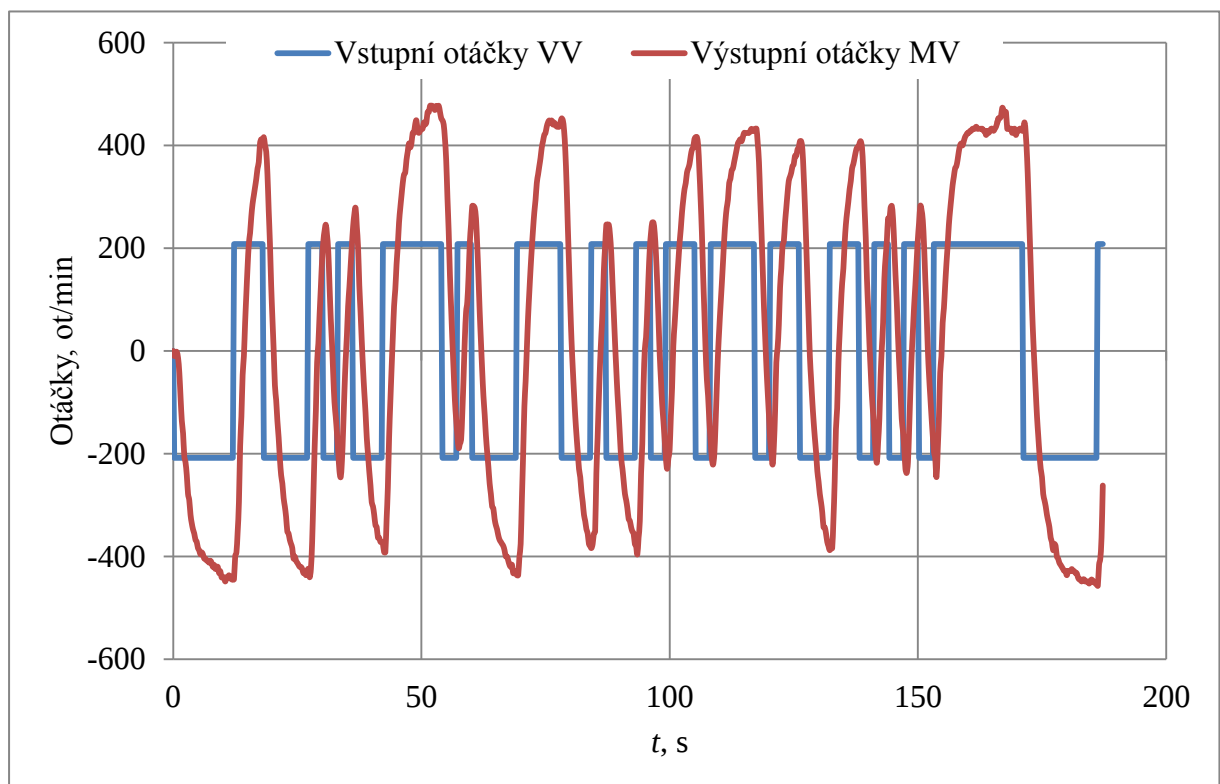
2.4.6 Transformace vstupních a výstupních dat

Při identifikaci lineární dynamické části je potřeba zajistit definované počáteční podmínky. Pokud začneme experiment z ustáleného stavu a pro vyhodnocení použijeme odchylkový tvar, pak jsou zajištěny nulové počáteční podmínky. Odchylkový tvar dostaneme odečtením hodnot ustáleného stavu od vstupu i výstupu. Toto opatření se dělá z důvodu, aby počáteční podmínky byly nulové, tedy i hodnoty derivací se rovnaly nule. Po identifikaci dynamické části je opět třeba tyto počáteční podmínky přičíst, jak je vidět na obr. 2.10.



Obr. 2.10 – Převod dat na odchylkový tvar pro identifikaci

Připravená data pro identifikaci (s posunem do počátku) je možné vidět na následujícím obrázku 2.11.



Obr. 2.11 – Posunutí dat do pracovního bodu (počátečních podmínek)

3 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

3.1 ROZVRH EXPERIMENTU

Po získání dat pro jednotlivé pracovní body mohlo dojít k jejich vyhodnocení. Vyhodnocení spočívalo v nalezení optimálního matematického modelu reálné soustavy, popsané lineární diferenciální rovnicí s derivací pravé strany s možností zahrnutí dopravního zpoždění. Parametry diferenciální rovnice zvoleného řádu se určovaly na základě „co nejlepší“ shody, vypočítaného průběhu diferenciální rovnice s naměřenými daty, posuzované pomocí kritéria sumy kvadrátů odchylek.

K určení parametrů byl využit výpočtový software MATLAB, ve kterém se vytvořil skript pro vyhodnocení parametrů zvolené diferenciální rovnice, popisující shodu s naměřenými daty.

3.2 VOLBA PŘENOSU PRO IDENTIFIKACI PARAMETRŮ

Pro identifikaci a následné nalezení optimálního matematického modelu byly zvoleny kombinace řádů popsané přenosy G_1 až G_6 . Pro tyto přenosy se pomocí skriptu sepsaného v prostředí MATLAB našly optimální parametry na základě kritéria. V následujících tab. 3.1 až tab. 3.3 jsou kromě parametrů jednotlivých modelů i hodnoty kritéria a zesílení, které slouží pro vyhodnocení nejlepšího modelu. U modelů se testovalo i případné zlepšení hodnoty kritéria přidáním dopravního zpoždění. Tab. 3.1 obsahuje hodnoty parametrů modelů pro první pracovní bod. Následující tab. 3.2 a tab. 3.3 zahrnují hodnoty parametrů pro druhý a třetí pracovní bod.

$$G_1(s) = \frac{b_0}{s + a_0} e^{-D_i s} \quad (3.1)$$

$$G_2(s) = \frac{b_0}{s^2 + a_1 s + a_0} e^{-D_i s} \quad (3.2)$$

$$G_3(s) = \frac{b_1 s + b_0}{s^2 + a_1 s + a_0} e^{-D_i s} \quad (3.3)$$

$$G_4(s) = \frac{b_0}{s^3 + s^2 + a_1 s + a_0} e^{-D_i s} \quad (3.4)$$

$$G_5(s) = \frac{b_1 s + b_0}{s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} e^{-D_i s} \quad (3.5)$$

$$G_6(s) = \frac{b_1 s + b_0}{s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} e^{-D_i s} \quad (3.6)$$

Kritérium bylo ve tvaru sumy kvadrátů odchylek (změřených otáček MV a otáček vypočítaných z modelu) v n bodech. Z důvodu, že se hodnoty kritéria pohybovaly v řádech statisíců, byla zavedena korekce, což dokládá i následující rovnice výpočtu kritéria pro jednotlivé modely

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n [y_i^{\text{data}} - y_i^{\text{model}}]^2}{100\,000}. \quad (3.7)$$

Tab. 3.1 – Vyhodnocení dat pro první pracovní bod

	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6
	$U_0 = 1\,221\text{ ot/min}, Y_0 = 1\,077\text{ ot/min}, \Delta U = \pm 208\text{ ot/min}, D_i = 0$					
a_0	0,33	0,68	1,00	3,06	4,97	0,00
a_1		1,63	2,30	7,76	12,12	0,63
a_2				4,43	6,14	2,03
a_3						1,06
b_0	0,80	1,45	2,12	6,53	10,58	-0,01
b_1			-0,44		-1,03	1,33
Z	2,41	2,13	2,12	2,14	2,13	4,87
K	37,12	5,04	3,94	3,83	3,78	26,11
	$U_0 = 1\,221\text{ ot/min}, Y_0 = 1\,077\text{ ot/min}, \Delta U = \pm 208\text{ ot/min}, D_i = Tvz$					
a_0	0,39	1,11	1,26	20,84	-0,01	0,78
a_1		2,52	2,81	47,59	0,80	9,39
a_2				18,68	1,75	19,19
a_3						6,94
b_0	0,90	2,37	2,68	44,33	-0,02	1,48
b_1			-0,12		1,65	16,62
Z	2,31	2,13	2,13	2,13	2,88	1,89
K	17,79	3,82	3,78	3,78	3,86	5,19
	$U_0 = 1\,221\text{ ot/min}, Y_0 = 1\,077\text{ ot/min}, \Delta U = \pm 208\text{ ot/min}, D_i = 2Tvz$					
a_0	0,46	2,88	1,19	23 064 094 000,00	-0,01	2 087,89
a_1		6,01	2,69	48 156 863 000,00	1,34	82 589,47
a_2				8 015 510 300,00	2,74	166 296,96
a_3						26 662,87
b_0	1,01	6,12	2,52	49 093 365 000,00	-0,03	4 249,64
b_1			0,57		2,76	167 783,17
Z	2,21	2,13	2,12	2,13	3,02	2,04
K	6,59	4,13	3,95	4,13	4,94	4,07

Tab. 3.2 – Vyhodnocení dat pro druhý pracovní bod

	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6
	$U_0 = 1\,637\text{ ot/min}, Y_0 = 1\,969\text{ ot/min}, \Delta U = \pm 208\text{ ot/min}, D_i = 0$					
a_0	0,40	0,85	1,15	5,69	10,04	-0,05
a_1		1,75	2,26	12,13	20,69	0,83
a_2				6,59	10,21	1,88
a_3						1,91
b_0	0,93	1,78	2,39	11,90	20,97	-0,09
b_1			-0,36		-1,55	1,62
Z	2,35	2,09	2,08	2,09	2,09	1,71
K	34,74	2,92	2,33	2,32	2,30	66,35
	$U_0 = 1\,637\text{ ot/min}, Y_0 = 1\,969\text{ ot/min}, \Delta U = \pm 208\text{ ot/min}, D_i = Tvz$					
a_0	0,47	1,49	1,27	1 020 012 600,00	-0,01	890,13
a_1		2,83	2,47	1 945 073 000,00	1,42	75 939,17
a_2				686 701 800,00	2,72	145 169,42
a_3						50 476,05
b_0	1,05	3,10	2,65	2 129 447 700,00	-0,02	1 738,98
b_1			0,16		2,98	155 993,78
Z	2,26	2,09	2,09	2,09	2,34	1,95
K	14,62	2,35	2,30	2,35	2,12	2,38
	$U_0 = 1\,637\text{ ot/min}, Y_0 = 1\,969\text{ ot/min}, \Delta U = \pm 208\text{ ot/min}, D_i = 2Tvz$					
a_0	0,56	5,07	0,75	170 984 800,00	-0,02	1 281,52
a_1		8,77	1,69	294 894 140,00	4,91	8 162,81
a_2				31 105 610,00	8,58	10 536,19
a_3						777,60
b_0	1,21	10,62	1,56	356 503 250,00	-0,06	2 722,76
b_1			0,96		10,36	12 900,19
Z	2,15	2,09	2,07	2,08	2,55	2,12
K	4,61	3,32	2,76	3,35	3,04	3,72

Tab. 3.3 – Vyhodnocení dat pro třetí pracovní bod

	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6
	$U_0 = 2\,054\text{ ot/min}, Y_0 = 2\,820\text{ ot/min}, \Delta U = \pm 208\text{ ot/min}, D_i = 0$					
a_0	0,49	1,28	1,69	11,56	-0,01	-0,06
a_1		2,21	2,80	20,47	1,26	0,63
a_2				8,95	2,19	1,77
a_3						1,07
b_0	1,07	2,52	3,32	22,73	-0,03	-0,10
b_1			-0,37		2,52	1,28
Z	2,17	1,96	1,96	1,97	1,98	1,64
K	24,63	2,82	2,49	2,50	2,81	95,19
	$U_0 = 2\,054\text{ ot/min}, Y_0 = 2\,820\text{ ot/min}, \Delta U = \pm 208\text{ ot/min}, D_i = Tvz$					
a_0	0,60	2,73	1,75	3 633 063 200,00	25,93	-0,09
a_1		4,25	2,89	5 650 831 200,00	45,48	1,26
a_2				1 329 639 300,00	19,26	2,54
a_3						1,11
b_0	1,24	5,37	3,44	7 137 258 300,00	50,80	-0,15
b_1			0,43		11,89	2,47
Z	2,07	1,96	1,96	1,96	1,96	1,73
K	8,38	2,68	2,52	2,68	2,52	80,58
	$U_0 = 2\,054\text{ ot/min}, Y_0 = 2\,820\text{ ot/min}, \Delta U = \pm 208\text{ ot/min}, D_i = 2Tvz$					
a_0	0,74	194,54	0,44	460,41	1 406 906 300,00	31,17
a_1		261,00	1,29	617,34	3 115 336 900,00	320,82
a_2				9,64	1 797 708 500,00	375,90
a_3						5,41
b_0	1,46	381,25	0,86	900,60	2 729 253 100,00	61,57
b_1			1,41		2 500 751 800,00	547,08
Z	1,96	1,96	1,93	1,96	1,94	1,98
K	3,99	3,99	3,86	3,96	3,86	3,88

4 VYHODNOCENÍ

Z tab. 3.1 až tab. 3.3 byla na základě kritéria sumy kvadrátů odchylek a zesílení vybrána jako nejlepší struktura modelu diferenciální rovnice druhého řádu s derivací pravé strany (vstupního signálu) s jedním krokem dopravního zpoždění ($T_{vz} = 0,25$ s). Tato rovnice se může uvést ve tvaru přenosu

$$G_3(s) = \frac{b_1s + b_0}{s^2 + a_1s + a_0} e^{-Ds}. \quad (4.1)$$

Výsledné parametry modelů pro tři pracovní body jsou v následující tab. 4.1.

Tab. 4.1 – Přehledová tabulka optimálních modelů

Přenos	K	U_0 , ot/min	Y_0 , ot/min	Z	T_1	T_2
$G_{31}(s) = \frac{-0,12s + 2,68}{s^2 + 2,81s + 1,26} e^{-0,25s}$	3,78	1 221	1 077	2,13	0,44	1,78
$G_{32}(s) = \frac{0,16s + 2,65}{s^2 + 2,47s + 1,27} e^{-0,25s}$	2,30	1 637	1 969	2,09	0,57	1,37
$G_{33}(s) = \frac{0,43s + 3,44}{s^2 + 2,89s + 1,75} e^{-0,25s}$	2,52	2 054	2 820	1,96	0,49	1,15

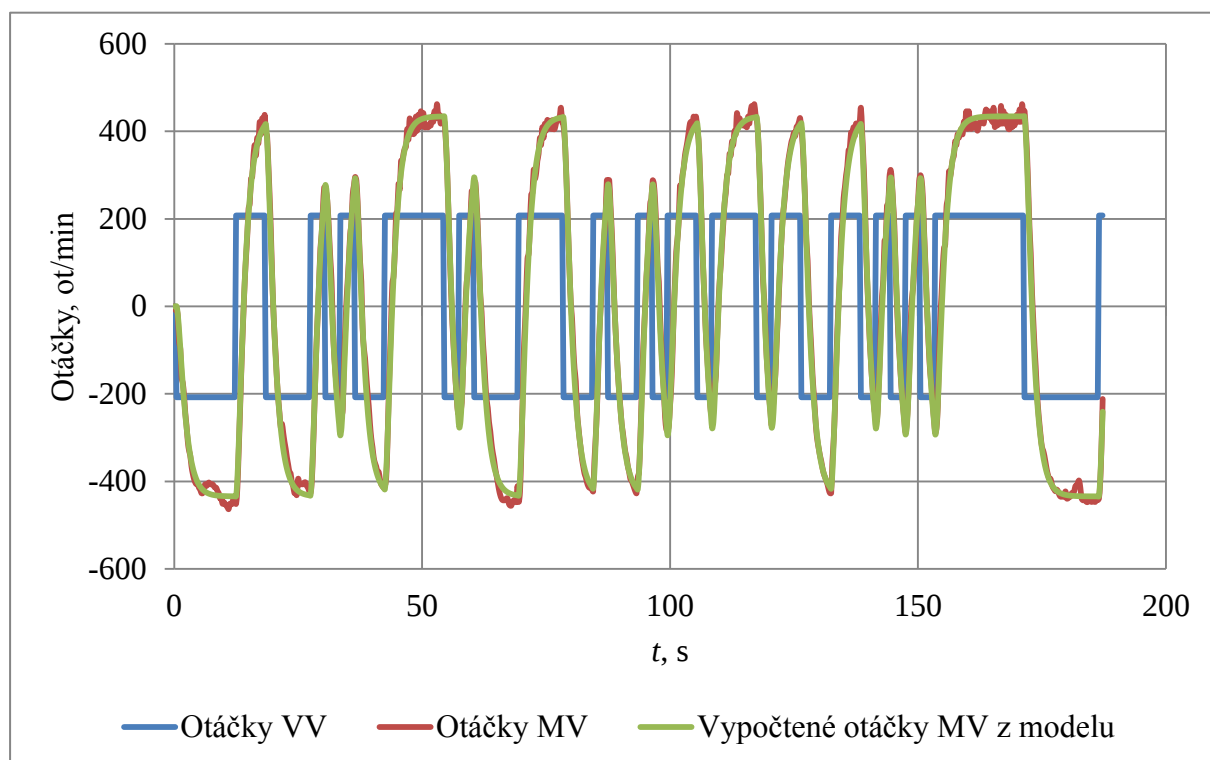
Na základě dat z tab. 4.1 pro všechny tři pracovní body se zdá, že se systém závislosti otáček MV na žádaných otáčkách VV (s regulací otáček PI regulátorem nastavující příkon) chová lineárně v zesílení (Z) a dynamika vyjádřená časovými konstantami (T_1 a T_2) se mění. Změna zesílení je v rozsahu +1,9 % a -6,2 %, tj. mírně klesá a časové konstanty se mění významněji, první v rozsahu -22 % a -14 % a druhá v rozsahu +30 % a -16 %. Linearita v zesílení byla způsobena s největší pravděpodobností zapojením regulátoru vstupních otáček VV.

Podle kritéria byl přenos G_{32} z tab. 4.1 vybrán jako nejlepší. Pro ověření tohoto tvrzení byl proveden test s tímto modelem „na celém rozsahu“ (pro každý pracovní bod), kde se vyhodnocovala hodnota kritéria pro jednotlivé pracovní body. Pro porovnání výsledků byl tento postup proveden i pro další dva modely. Vyhodnocení matematických modelů je v tab. 4.2, kde se potvrdilo, že přenos G_{32} měl nejmenší odchylku od naměřených dat a hodnot získaných z modelu pro celý rozsah hodnot.

Tab. 4.2 – Vyhodnocení modelů pro celý rozsah

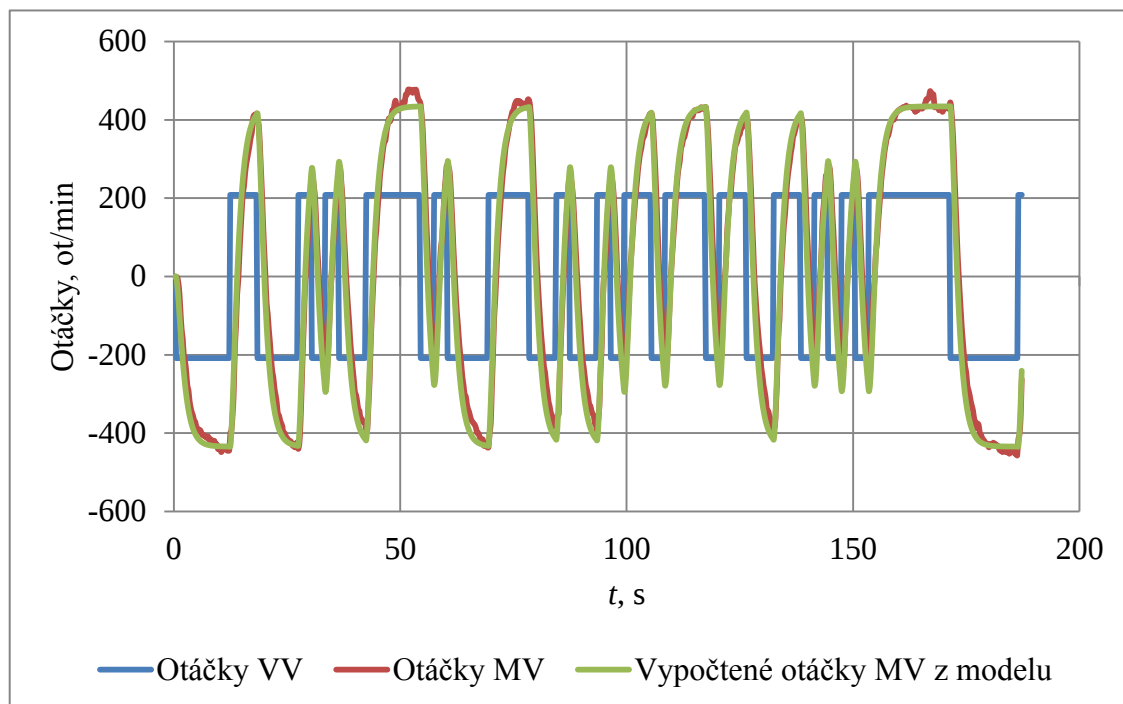
Přenos	Prac. bod	K	
G_{31}	1.	3,78	
	2.	11,12	
	3.	43,89	
G_{32}	1.	12,92	obr. 4.2
	2.	2,30	obr. 4.1
	3.	16,86	obr. 4.3
G_{33}	1.	45,26	
	2.	16,51	
	3.	2,52	

Na následujícím obr. 4.1 je zobrazen průběh odezvy identifikovaného matematického modelu, popsaného přenosem G_{32} , a skutečných dat na stejný vstupní signál v druhém pracovním bodě.

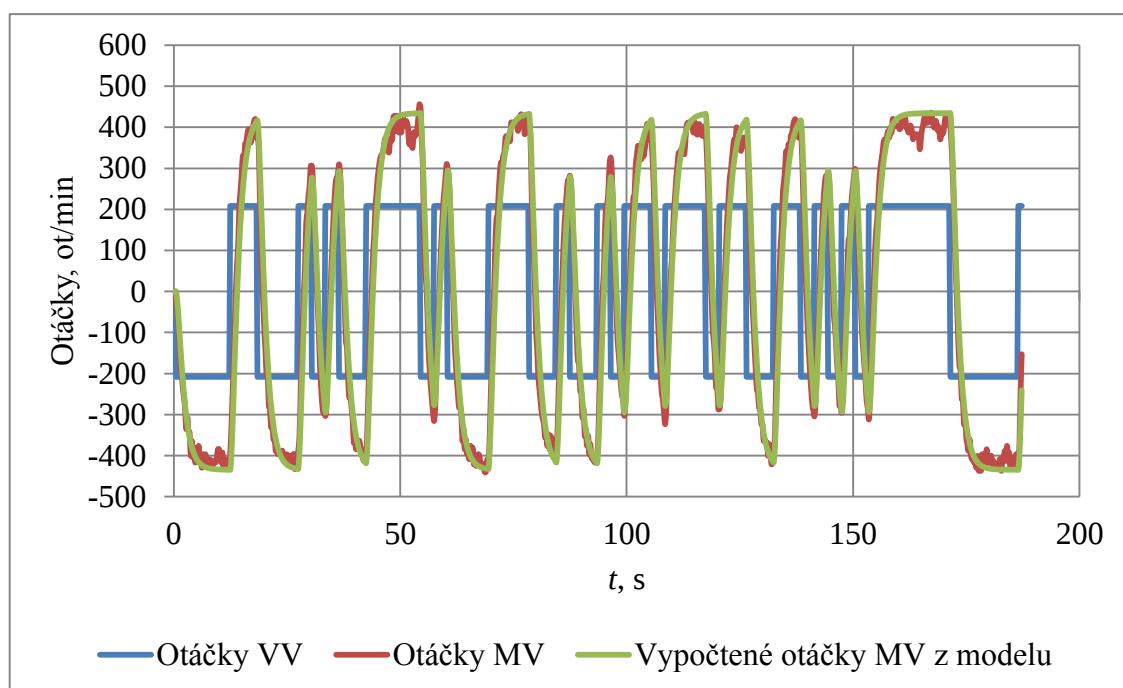


Obr. 4.1 – Reakce G_{32} modelu na vstupní signál v druhém pracovním bodě

Na obr. 4.2 a obr. 4.3 je zobrazena odezva modelu popsaného přenosem G_{32} pro data pořízená v prvním a třetím pracovním bodě, pro ověření, že je model použitelný.



Obr. 4.2 – Reakce G_{32} modelu na vstupní signál v prvním pracovním bodě



Obr. 4.3 – Reakce G_{32} modelu na vstupní signál ve třetím pracovním bodě

5 ZÁVĚR

Byl nalezen matematický model pneumatického systému závislosti otáček malého ventilátoru na žádaných otáčkách velkého ventilátoru (s regulací otáček PI regulátorem, nastavujícím příkon otáček velkého ventilátoru). Po vyhodnocení vlastností vyšetřovaného systému se ukázalo, že se tento systém chová lineárně ve statické části, ale v dynamické části se mění. Pro tento případ není rozdělení na nelineární statickou část a lineární dynamickou část, pomocí Hammersteinova modelu, vhodný.

Nalezený matematický model systému je popsán diferenciální rovnicí druhého řádu s derivací pravé stany (s první derivací vstupního signálu) a dopravním zpožděním 0,25 sekundy. Matematický model i s vyhodnocenými parametry ve formě přenosu má tvar

$$G_{32}(s) = \frac{0,16s + 2,65}{s^2 + 2,47s + 1,27} e^{-0,25s}.$$

Z důvodu, že má systém lineární statickou charakteristiku, nebyl hledán nelineární popis statické části.

Bohužel pro vyhodnocení druhého matematického modelu závislosti otáček malého ventilátoru na příkonu vstupního napětí na velký ventilátor (bez PI regulátoru regulujícího příkon na vstup velkého ventilátoru), který se jevil jako nelineární, nezbyl dostatek času.

Tento matematický model může být nadále využit pro návrh efektivního řízení pneumatického systému, např. LQ regulátorem, nebo jako podklad pro identifikaci druhého modelu, protože v teoretické části je rozebráno řešení identifikace nelineárních systémů pomocí Hammersteinova modelu.

LITERATURA

- BABÍK, Z. 2012. Využití Hammersteinova a Wienerova modelu při diskretním adaptivním řízení nelineárních procesů. *Odborný vědecký časopis Trilobit* [online]. **2012**(2) [cit. 2016-04-10]. ISSN 1804-1795. Dostupné z: http://trilobit.fai.utb.cz/vyuziti-hammersteinova-a-wienerova-modelu-pri-diskretnim-adaptivnim-rizeni-nelinearnich-procesu_079aeb04-15a5-45a1-9413-8cbcde4eb93c
- BALÁTĚ, J. 2004. *Automatické řízení*. 2. přepracované vydání. Praha: BEN, 2004. ISBN 80-7300-148-9.
- BRÁZDIL, M. 2011. Identifikace a řízení nelineárního systému pomocí Hammersteinova modelu. *Posterus* [online]. 2011,4(4), 1 – 8 [cit. 2016-04-10]. ISSN 1338-0087. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=10422&output=pdf>.
- DOSTÁL, P.; GAZDOŠ F. 2006. *Řízení technologických procesů* [online]. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, 2006 [cit. 2016-04-09]. Dostupné z: <http://rtp.webzdarma.cz/>. Studijní materiály.
- DUŠEK, F.; HONC, D. 2005. *Matlab a Simulink: úvod do používání*. Vyd. 1. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2005. ISBN 80-719-4776-8.
- DUŠEK, F. 2009. Přímé použití sdílených knihoven. In: *Proceedings of the 17th Annual Conference Proceedings of Technical Computing Prague 2009*. Kongresové centrum ČVUT, Praha, s. 24 - 38. ISBN 978-80-7080-733-0.
- PETERKA, Václav. 1969. Použití pseudonáhodných binárních signálů k identifikaci dynamických soustav. In: *Kybernetika*. Vol. 5. Praha: Institute of Information Theory and Automation AS CR, 1969, (113)-134. ISSN 1805-949X.

Seznam příloh

A - CD

Příloha k diplomové práci

**IDENTIFIKACE MATEMATICKÉHO MODELU PNEUMATICKÉ
Soustavy**

Jan Brett

CD

Obsah

- 1 Text diplomové práce ve formátu PDF
- 2 Adresář zdrojových kódů pro sběr dat pro identifikaci (data)
- 3 Adresář zdrojových kódů pro vyhodnocení dat (vyhodnoceni)