VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO ZAŘÍZENÍ ŘÍZENÉHO Z PROSTŘEDÍ MATLAB-SIMULINK PRO MĚŘENÍ STATICKÝCH CHARAKTERISTIK AKCELEROMETRU.

A DESIGN OF AN EXPERIMENTAL DEVICE CONTROLED VIA METLAB-SIMULINK FOR AN ACCELEROMETER STATIC CHARAKTERISTICS MEASUREMENT.

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR´S THESIS

AUTOR PRÁCE ANTONÍN MALINA
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE ING. PAVEL ŠVEJDA
SUPERVISOR

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Antonín Malina

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906R001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh experimentálního zařízení řízeného z prostředí Matlab-Simulink pro měření statických charakteristik akcelerometru.

v anglickém jazyce:

A design of an experimental device controled via Matlab-Simulink for an accelerometer static charakteristics measurement.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Seznámení se s možnostmi použití karty MF624 a Real Time Toolboxu, měření a simulace v prostředí Matlab-Simulink.

Cíle bakalářské práce:

- seznamte se s možnostmi karty MF624 a naučte se používat Real Time Toolbox
- seznamte se s problematikou krokových motorů
- s použitím krokového motoru sestrojte experimentální zařízení pro měření statických charakteristik akcelerometru
- navrhněte jednoduché řízení
- změřte a vyhodnoťte statické charakteristiky akcelerometru

Seznam odborné literatury:

[1] Karban, P.: Výpočty a simulace v programech Matlab a Simulink, Computer Press, 2006
[2] Real Time Toolbox for use with Simulink, ver.4.0, User's Manual, Humusoft, 2006
[3] MF 624 Multifunction I/O card, User's Manual, Humusoft, 2006
[4] Zaplatílek, K. - Doňar, B.: MATLAB tvorba uživatelských aplikací, BEN, 2004

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Švejda

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 5.11.2008

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc. Ředitel ústavu	doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc. Děkan fakulty

Poděkování

Mé upřímné poděkování patří vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Švejdovi za mnohé rady a připomínky v celém průběhu zpracovávání bakalářské práce.
Poděkování patří také mé nejbližší rodině za dosavadní podporu během studia.

Abstrakt

Cílem této práce je návrh experimentálního zařízení pro měření statických charakteristik akcelerometru řízeného z prostředí Matlab-Simulink. Tím se rozumí zpětná informace z akcelerometru o náklonu plošinky ve stupních a vyobrazení prostorových histogramů. Zařízení je realizováno jako rotační plošinka z jedné strany rotačně uložena na hřídelce krokového motoru a z druhé strany na hřídelce aritmetického potenciometru.

Mezi dílčími úkoly práce bylo seznámení se s kartou MF624, Real Time Toolboxem a řízením krokových motorů.

Abstract

The aim of the work is a design of an experimental device for an accelerometer static charakteristics measurement via Matlab-Simulink. That means a feedback from accelerometer with a tilt in degrees and display threedimensional histograms. The device is realized as a rotary platform hold on a shaft of stepper engine by one side and by the second side on a shaft of arithmetical potenciometer.

Between the partial objective of the work was the acquainting with a card MF624, Real Time Toolbox and controling stepper engines.

Bibliografická citace

MALINA, A. Návrh experimentálního zařízení řízeného z prostředí Matlab-Simulink pro měření statických charakteristik akcelerometru.. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Švejda.

Čestné prohlášení

Čestně prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a pod vedením vedoucího BP.
Antonín Malina, Brno, 2009

……
Podpis

Obsah

1 Úvod ... 10
1.1 Akcelerometry jako senzory pohybu a vibrací ... 10
1.2 Real-Time řízení ... 10
1.3 Cíle práce ... 11

2 Použitý software a hardware ... 12
2.1 MATLAB-SIMULINK ... 12
2.2 Real-Time Toolbox ... 12
2.3 Multifunkční měřící a řídící karta MF624 ... 12

3 Použité technické příslušenství pro realizaci a řízení plošinky ... 14
3.1 Krokový motor ... 14
3.1.1 Princip činnosti a vlastnosti krokových motorů ... 14
3.1.2 Parametry použitého krokového motoru ... 16
3.2 Potenciometr ... 16
3.3 Galvanické oddělení ... 17
3.3.1 Optočlen KB837 ... 17
3.3.2 Napěťový stabilizátor L7805 ... 17
3.3.3 Schéma zapojení galvanického oddělení ... 18
3.4 Řídící jednotka DSM 03 ... 19
3.4.1 Konektory jednotky ... 19
3.5 Akcelerometr ... 21
3.5.1 Princip činnosti akcelerometru ... 21
3.5.2 Vlastnosti použitého akcelerometru ADXL330 ... 21
3.5.3 Kalibrace akcelerometru ... 22

4 Experimentální určení závislosti zrychlení-rychlost krokového motoru ... 23
4.1 Technické provedení ... 23
4.2 Roztočení motoru s nulovým zrychlením ... 23
4.3 Roztočení motoru s konstantním zrychlením ... 24
4.3 Filtrování signálu ... 25
4.3.1 Plovoucí průměr ... 25
4.3.2 Filtr typu dolní propusť ... 28
4.4 První a druhá derivace, zpracování signálu ... 30
4.5 Závěr úlohy ... 32

5 Měření na akcelerační plošince ... 33
5.1 Úkol ... 33
5.2 Technické provedení ... 33
5.3 Měření ... 33
5.4 Výsledky měření ... 34
5.4.1 Získání náklonu pomocí dat z akcelerometru ... 34
5.4.2 Vykreslení histogramů ... 35
5.5 Závěr úlohy ... 37

6 Závěr ... 38

7 Literatura a odkazy 39

8 Seznam symbolů 40

A Přílohy 41
A.1 Zapojení konektorů X1 na kartě MF624 41
A.2 Zapojení konektorů X2 na kartě MF624 42
A.3 Model pro měření polohy potenciometrem 43
A.4 stat_char_acc_SIMULACE.m 44
A.5 Model pro měření statických charakteristik akcelerometru 46
A.6 Konstrukce plošinky 47

B Seznam příloh na CD 48

1 Úvod

1.1 Akcelerometry jako senzory pohybu a vibrací

Vývoj akcelerometrů si vyžádala potřeba snímání pohybu, vibrací a otřesů.

Snímání pohybovými senzory by se mohlo rozdělit na dvě období. Před a po zavedení technologie MEMS. První vzorky akcelerometrů vyrobené touto technologií jsou datovány v roce 1991. Vyrobila je tehdy americká firma Analog Devices. Dostupné na trhu jsou tyto akcelerometry od roku 1993. (MEMS zjednodušeně znamená komplexní systém integrovaný na jednom čipu.) Vývoj této technologie byl důležitý hlavně z toho důvodu, že dosavadní akcelerometry neměly úplně ideální parametry pro použití ve všech oblastech průmyslu.

Touto technologií vyrobené akcelerometry vyhovovaly z komerčního hlediska asi nejdůležitější oblasti použití. Tou je vhodnost pro automobilový průmysl, například pro systémy airbagů. Do zavedení technologie MEMS v praxi, se například senzory pro systémy airbagů realizovaly tak, že samotné akcelerometry byly umístěny v deformačních zónách vozu a řídící elektronika byla odděleně v „bezpečnější“ části vozu.

Jak je známo, automobilový průmysl je silným pohonem mnoha ekonomik světa a to zaručuje rychlý a efektivní vývoj všech technologií a komponent používaných v tomto odvětví. U akcelerometrů používaných v již zmíněných airbazích, jsou nejdůležitějšími parametry chybovost a životnost. Z těchto dvou vlastností plyne bezpečnost systému.

Senzory zrychlení nacházejí v praxi využití například v následujících oblastech a aplikacích. V automobilismu jako senzory nárazu, odbočení, převrácení, stability, detekce vibrací a přetížení (u transportů zásilek). Také pro brzdové systémy a alarmy. V PC technice pro monitorování vibrací komponent (např.: pevných disků). Zajímavou oblastí je i detekce zemětřesení a otřesů půdy. Uplatnění se najde i v audio technice u aktivních subwooferů. Stále více se rozmáhá také využití v „zábavní“ sféře, jako jsou počítačové hry, mobilní telefony nebo notebooky. Další oblastí je sport, kde se využívají jako krokoměry nebo systémy na monitorování spotřeby kalorií lidského organizmu.

1.2 Real time řízení

Real-Time karta umožňuje propojení „virtuálního“ prostředí PC s okolním světem. Tímto do něho zasahovat-řídit ho, získávat z něho informace a s těmi dále pracovat. Možnost proniknutí do této problematiky byla mým hlavním důvodem pro zažádání si o přidělení této bakalářské práce. Ovšem je to oblast poměrně široká, která začíná u odesílání a přijímání dat z PC do karty či naopak a postupuje na zasahování a měnění parametrů systémů a modelů v reálném čase. To vše musí probíhat s co nejmenším zpožděním. V této práci neproniknu do problematiky real time řízení úplně. Půjde o seznámení se s problematikou a získání cenných zkušeností pro další práci.

1.3 Cíle práce

Cílem této práce bude tedy využití akcelerometru jako snímače náklonu, naměření jeho statických charakteristik a jejich grafické zpracování. Bude potřeba sestrojit „akcelerační plošinku“ (dále jen plošinka), tedy jakousi nosnou konstrukci pro akceletometr, pomocí které tyto charakteristiky naměříme. Ta se bude skládat na jedné straně z krokového motoru, který zde bude figurovat jako pohon soustavy a jeho řízení bude realizováno kartou MF624 a Real Time Toolboxem. Na plošince bude pevně umístěna destička akcelerometru. Druhá strana plošinky bude rotačně uložena na aritmetickém potenciometru, jehož data bude snímat rovněž karta MF624.

Cílem mojí práce tedy bude seznámení se se všemi komponenty potřebnými pro sestavení a řízení takového zařízení. Samotné řízení bude realizováno v prostředí Matlab&Simulink.

2 Použitý software a hardware

2.1 MATLAB-SIMULINK

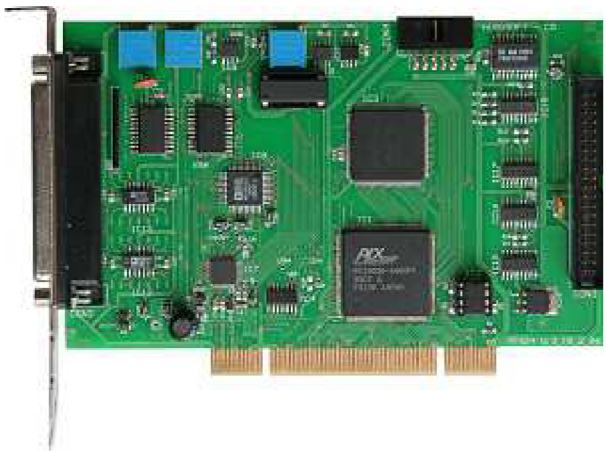
Prostředí MATLAB je silným univerzálním softwarovým nástrojem pro technické aplikace, jako jsou například technické výpočty, návrhy řídicích a výpočetních algoritmů, zpracování signálů, měření, simulace a vizualizace získaných dat. MATLAB obsahuje výkonné výpočetní jádro s matematickými funkcemi.

Důležitým rozšířením MATLABu je prostředí SIMULINK, které umožňuje propojováním předem vytvořených, ale i vlastně definovaných bloků sestavit i velmi složité modely soustav. K SIMULINKu lze doinstalovat velké množství knihoven (toolboxů), které možnosti práce s tímto softwarovým nástrojem ještě více rozšiřují.

2.2 Real-Time Toolbox

Jedna z knihoven, která díky předdefinovaným funkcím umožňuje integraci karty do prostředí MATLAB-SIMULINK se nazývá Real-Time Toolbox. Tato knihovna obsahuje bloky reprezentující jednotlivé vstupy a výstupy karty MF624. Knihovna byla vyvinuta českou firmou HUMUSOFT.

2.3 Multifunkční měřící a řídící karta MF624



Obr. 2.1: Multifunkční měřící a řídící karta MF624, zdroj: [3]

Pokud bychom měli k dispozici některou verzi MATLABu, tak bychom mohli pracovat pouze s daty, které se odsimulujeme na našem počítači nebo s daty, které importujeme do prostředí MATLABu. Pokud by nám šlo například o řízení nějaké mechatronické soustavy, tak narážíme na problém. Chybí nám reálné propojení MATLABu s okolním prostředím - světem.

Tato multifunkční měřící a řídící PCI karta nám umožňuje odstranění výše zmíněného nedostatku (zpracovávání pouze importovaných či odsimulovaných dat) a umožňuje propojení prostředí MATLAB-SIMULINK s reálným světem - zařízeními.

Karta podporuje ovladače Windows, C programování, Real Time Toolbox, Real Time Windows Target a xPC Target.

Vlastnosti karty (zdroj: [5])

- Osm single-ended 14-bitových analogových vstupů
- Osm 14-bitových analogových výstupů
- Krátká doba převodu
- 8 digitálních vstupů, 8 digitálních výstupů
- 4 vstupy inkrementálních snímačů (diferenciální)
- 4 čítače/časovače
- Nízká spotřeba
- ± 12 V, + 5 V

Aplikace karty

Mezi zajímavými aplikacemi karty může být zmíněno například měření stejnosměrných napětí, simulace v reálném čase, připojení převodníků a snímačů, snímání a analýza průběhů, PWM, generování pulzů/frekvence a čítání impulzů.

Technické parametry karty

Odběr proudu	500 mA @ +5 V
	150 mA @ +12 V
Pracovní teplota	0 - 50 °C
Konektory	DB-37 F
Sběrnice	PCI 5V nebo 3.3V

Tab. 2.1: Parametry karty MF624

3 Použité technické příslušenství pro realizaci a řízení plošinky

3.1 Krokový motor

3.1.1 Princip činnosti a vlastnosti krokových motorů

Krokový motor pracuje synchronně se vstupními impulsy, je to tedy v podstatě synchronní stroj. Vytváří se v něm po krocích otáčející se magnetické pole, v takovém směru, v jakém jsou napájena jeho vinutí. Rotor tedy s každým vstupním impulsem vykoná jeden krok a poté zůstane ve této stabilní poloze až do příchodu dalšího impulsu. Rotor se tedy točí přímo úměrně s frekvencí vstupních impulsů. Aby si motor udržel svou stabilní polohu, musí cívkami stále procházet proud, takže má nepřetržitý proudový odběr.

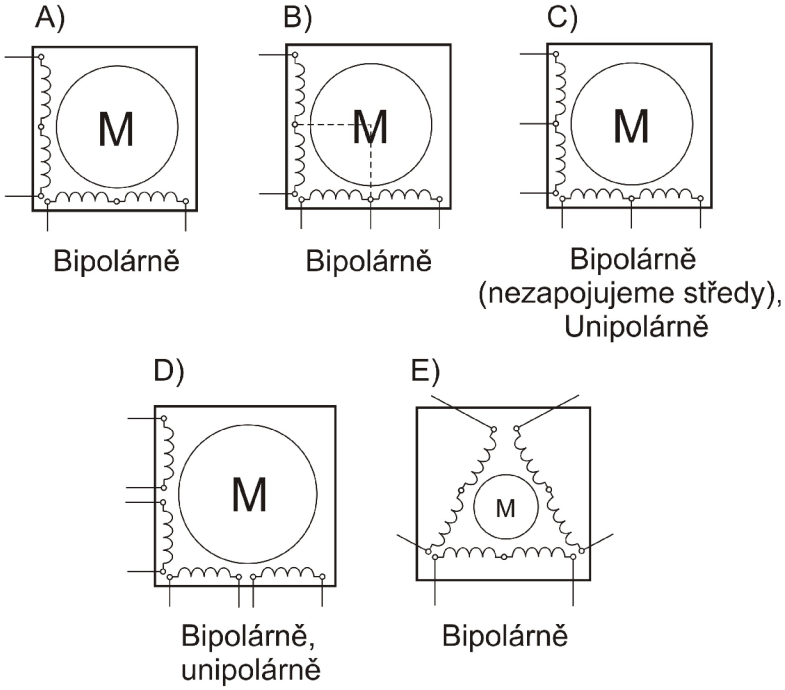
Výše popsaná vlastnost o přímé úměře mezi impulsy a vykonanými kroky je také hlavním důvodem rozšíření a využívání krokových motorů. V praxi to znamená, že pro určení počtu otáček není potřeba žádné zpětné vazby. Stačí pouze čítat vstupní impulsy a jejich frekvenci a máme přesnou představu o poloze a otáčkách motoru.

Problém ovšem nastává, pokud je motor vystaven nadměrnému zatížení. Poté nastávají ztráty kroků a také se motor s velkou pravděpodobností může přestat točit úplně, protože se dostane do nestabilního stavu. Takovým stavům je tedy nutné předcházet.

Nutno podotknout, že krokový motor v dnešní době nepředstavuje jedinou variantu s výše popsanými vlastnostmi. Jsou k dispozici i jiné-modernějším alternativy. Například synchronní stroje s regulovatelnými otáčkami pomocí měničů frekvence napájecího napětí. Nicméně pro používání krokového motoru stále hovoří jeho pořizovací cena (na čemž se značnou měrou podílí také to, že se nemusí pořizovat žádné snímače polohy nebo otáček).

Krokové motory by se mohly rozdělit podle účelu použití na dvě skupiny. A to z kvůli použité řídící jednotce, která umí pracovat pouze s bipolárně zapojenými motory.

Bipolární zapojení je vhodné pro modernější motory. Je o cca 40% účinnější než unipolární zapojení, ale nutná elektronika je poněkud dražší. K tomuto zapojení lze použít čtyř, šesti a osmi vývodové motory (zapojení viz. obrázek 3.1).
Druhým typem je unipolární zapojení. Toto zapojení je elektronicky snazší – levnější. Účinnost motoru je u nižších otáček podobná s motory v bipolárním řízení, ale u vyšších otáček již vyvstávají slabiny. Starší typy krokových motorů lze budit jen tímto způsobem (zapojení viz. obrázek 3.1).



Obr. 3.1: Schémata zapojení základních typů krokových motorů

Důležitým úkonem před samotným zapojením krokového motoru je zjištění pořadí cívek motoru. Toto zjištění je důležité pro správnou funkci motoru. Aby se rotor motoru otáčel, musí být cívky napájeny přesně v pořadí v jakém následují za sebou.

Experimentální zjištění pořadí cívek motoru

U čtyř vývodového motorku zjistíme pořadí cívek tak, že na jeden vývod motorku přiložíme záporný vývod zdroje napětí a poté postupně připojujeme kladný vývod na zbylé tři vývody motorku. Pokud se rotor pootočí (nebo „cukne“), našli jsme druhý vývod cívky. Tento postup opakujeme u dalších cívek, dokud nemáme přesnou představu o pořadí vývodů motoru.

U šesti vývodového motoru je postup jak zjistit pořadí cívek za pomoci multimetru následující:

1. Přepneme multimetr na měření odporu.
2. Proměříme všechny dvojce vývodů a dostáváme výsledek typu: odpor dvojice: A - B = 3 Ω, B - C = 3 Ω, A - C = 6 Ω.
3. Určíme uskupení cívek: vývody A a C jsou konce cívek, B je jejich střed.
4. Obdobně postupujeme i u dalších cívek.

3.1.2 Parametry použitého krokového motoru

Výběr krokového motoru byl zúžen omezeními řídící jednotky, která pracuje pouze s motory v bipolárním zapojení. Použit byl následující krokový motor firmy SHINANO KENSHI:

Úhel natočení o plný krok	3,8°
Úhel natočení o poloviční krok	1,9°
Napájecí napětí	12 V
Odpor vinutí	150 Ω
Hmotnost	0.35 Kg

Tab. 3.1: Parametry použitého krokového motoru

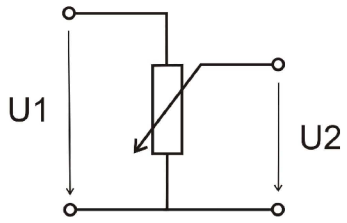
Pin 1	modrý
Pin 2	červený
Pin 3	žlutý
Pin 4	bílý

Tab. 3.2: Zapojení vývodů motoru ke konektoru 3 řídící jednotky

3.2 Potenciometr

Potenciometr je dělič napětí s proměnným dělícím poměrem. Odporová dráha, kterou je potenciometr tvořen, je buďto přímá-potenciometry posuvné nebo kruhová-potenciometry otočné. Další hledisko dělení odporové dráhy je dle toho, jak se mění odpor na potenciometru. Varianty jsou: lineární, logaritmické a exponenciální.

Potenciometry pro velmi přesná nastavování odporu se nazývají aripoty. Jsou to spirálové, obvykle desetiotáčkové potenciometry.



$$Přenos - A = \frac{U_2}{U_1}$$

Obr. 3.2: Schéma potenciometru

3.3 Galvanické oddělení

Protože nemáme k dispozici dokumentaci k řídícím jednotkám DSM 03, tak nevíme s jistotou, jestli má řídící jednotka galvanicky odděleny své konektory propojující, v mém případě, kartu MF624 a krokový motor. Proto jsme vzhledem k bezpečnosti práce s kartou použili, pro jistotu úplného galvanického oddělení, zapojení s optočlenem.

Galvanické oddělení zajišťuje oddělení zemí obvodů. V našem případě jím zabezpečujeme kartu například před zkratem či chybě v zapojení. Tady tato rizika nám tedy optočlen ošetří.

Součásti zapojení galvanického oddělení je i napěťový stabilizátor. Ten nám napájí výstupní obvod optočlenu napětím hladiny TTL.

3.3.1 Optočlen KB837

3.3.1.1 Princip činnosti optočlenu

Optočlen je složen ze vstupního obvodu (LED) a výstupního obvodu (fototranzistor). Pracuje tak, že při přivedení malého proudu potřebného pro rozsvícení LED se začne rozsvěcovat, tím se začne fototranzistor otevírat. Čím vyšší proud, tím více LED svítí a tím více je tranzistor otevřen. Po dosažení určitého proudu procházejícího diodou se pak přechod mezi emitorem a kolektorem tranzistoru otevře úplně.

3.3.1.2 Parametry použitého optočlenu KB837

Vstupní obvod	
Propustný proud	I_F = 50mA
Zpětné napětí	U_R = 6V
Ztrátový výkon	P = 70mW
Výstupní obvod	
Napětí kolektor-emitor	U_{CE} = 35V
Napětí emitor-kolektor	U_{EC} = 6V
Proud kolektorem	I_C = 50mA
Ztrátový výkon kolektoru	P_C = 150mW

Tab. 3.3: Parametry optočlenu KB837

3.3.2 Napěťový stabilizátor L7805

3.3.2.1 Princip činnosti napěťového stabilizátoru

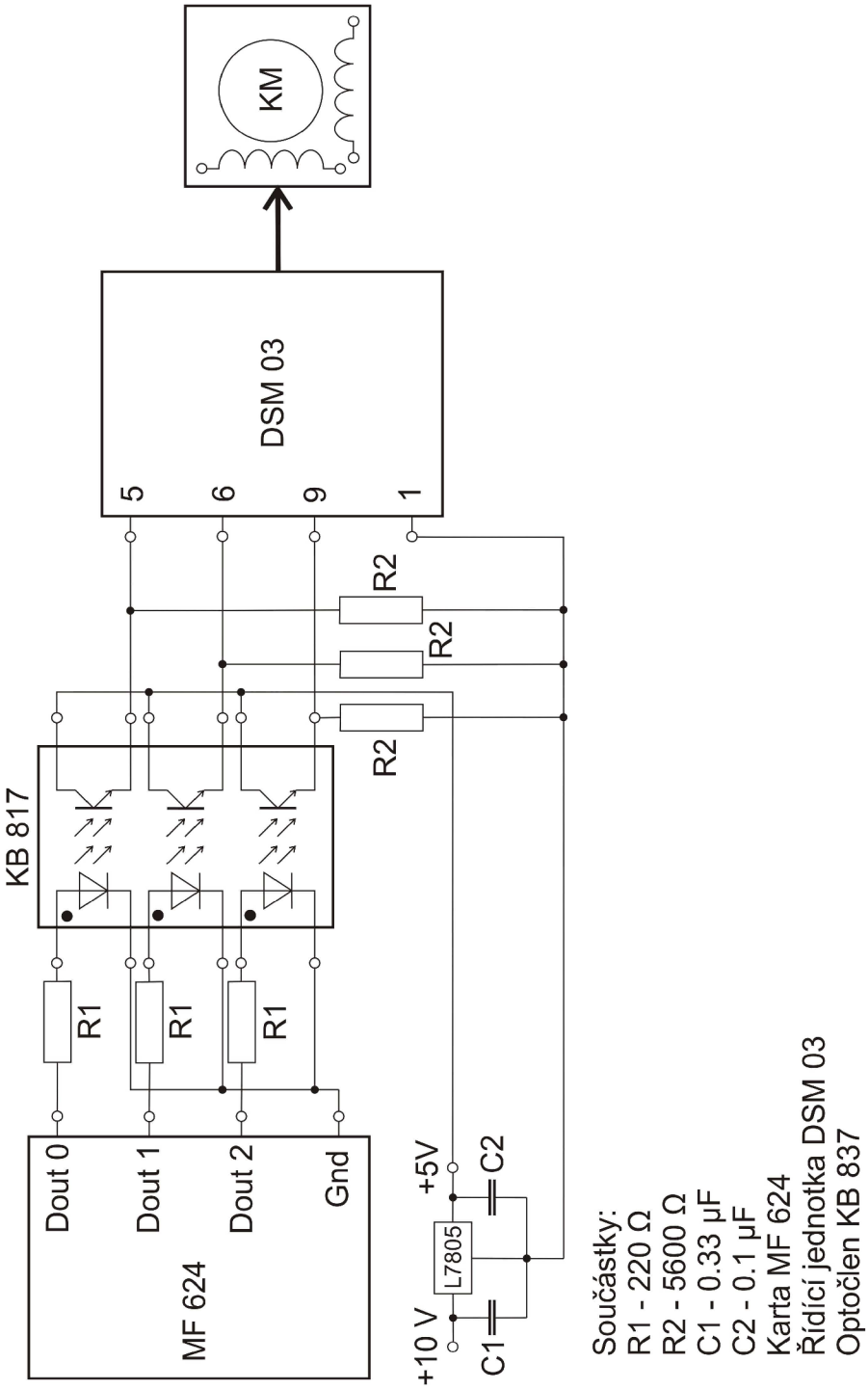
Úkolem napěťového stabilizátoru je udržovat stále konstantní hladinu napětí na jeho výstupu a to při jakékoliv změně napájecího napětí nebo zatěžovacího proudu. Napětí na napěťovém stabilizátoru nahrazuje napětí přicházející z RT karty. Zapojení se dvěma kondenzátory je převzato z datasheetu výrobce.

3.3.2.2 Parametry použitého napěťového stabilizátoru

Vstupní napětí	U_I = 8-20V
Výstupní napětí	U_O = 4,65–5,35V
Zatěžovací proud	I_O = 5mA-1A

Tab. 3.4: Parametry stabilizátoru napětí L7805

3.3.3 Schéma zapojení galvanického oddělení



Obr. 3.3: Kompletní zapojení galvanického oddělení a napěťového stabilizátoru

3.4 Řídící jednotka DSM 03

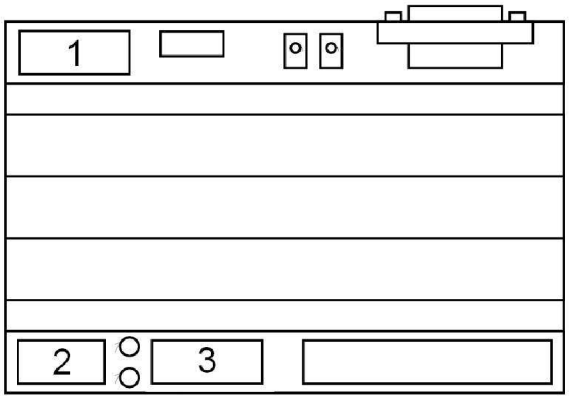
Výrobcem řídící jednotky DSM 03 je firma ESB Blansko. Jednotka má více modů činnosti. Dá se s ní pracovat pomocí předdefinovaných funkcí a procedur, lze ji také programovat v jazyce Pascal a také lze použít pouze její výkonovou část. Potom jednotka funguje tak, že přijímá příkazy odeslané RT kartou a zprostředkovává je krokovému motoru. Jednotka pracuje s plným nebo polovičním krokem, ale pouze v bipolárním zapojení.

Vstupní proud	0-2,5A
Vstupní napětí	10-40V
Rozsah otáček	0-10000 kroků/s
Jištění	Reversibilní pojistka 2,5A

Tab. 3.5: Parametry řídící jednotky DSM 03

3.4.1 Konektory jednotky

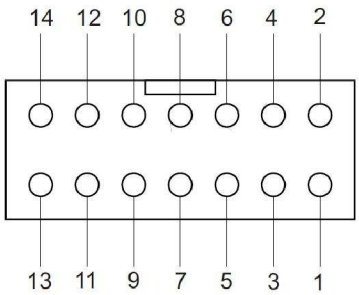
Při použití pouze výkonové části jednotky, jsou důležité pouze konektory 1, 2, 3.



Obr. 3.4: Používané konektory jednotky DSM 03, zdroj: [1]

3.4.1.1 Konektor 1 – interní propojení

Je konektor interního propojení. Ovládá výkonovou část jednotky pomocí signálů na úrovni TTL.



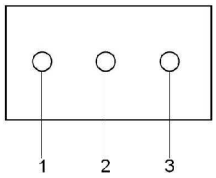
Obr. 3.5: Konektor interního propojení (pozn.: pohled shora na jednotku), zdroj: [1]

Jednotlivé piny:

- **pin 1: společná zem**
- pin 2: +5V
- pin 3: reset driveru (0)
- pin 4: reset interního počítače
- **pin 5: směr otáčení**
- **pin 6: krok**
- pin 7: zapnutí výkonové části
- pin 8: volba proudu RUN/STOP
- **pin 9: plný/poloviční krok**
- pin 10: externí rezistor pro nastavení generátoru pulsů
- pin 11: externí rezistor pro nastavení generátoru pulsů
- pin 12: výstup generátoru pulsů
- pin 13: NC

V této práci jsou využity jen piny 1, 5, 6 a 9.

3.4.1.2 Konektor 2 - napájení

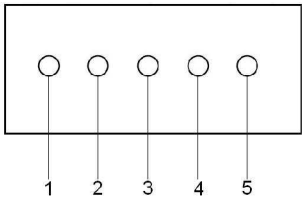


Obr. 3.6: Konektor napájení (pozn.: pohled shora na jednotku)

Jednotlivé piny:

- pin 1: stínění
- pin 2: zem
- pin 3: +10-40V

3.4.1.3 Konektor 3 – připojení motoru



Obr. 3.7: Připojení motoru (pozn.: pohled shora na jednotku)

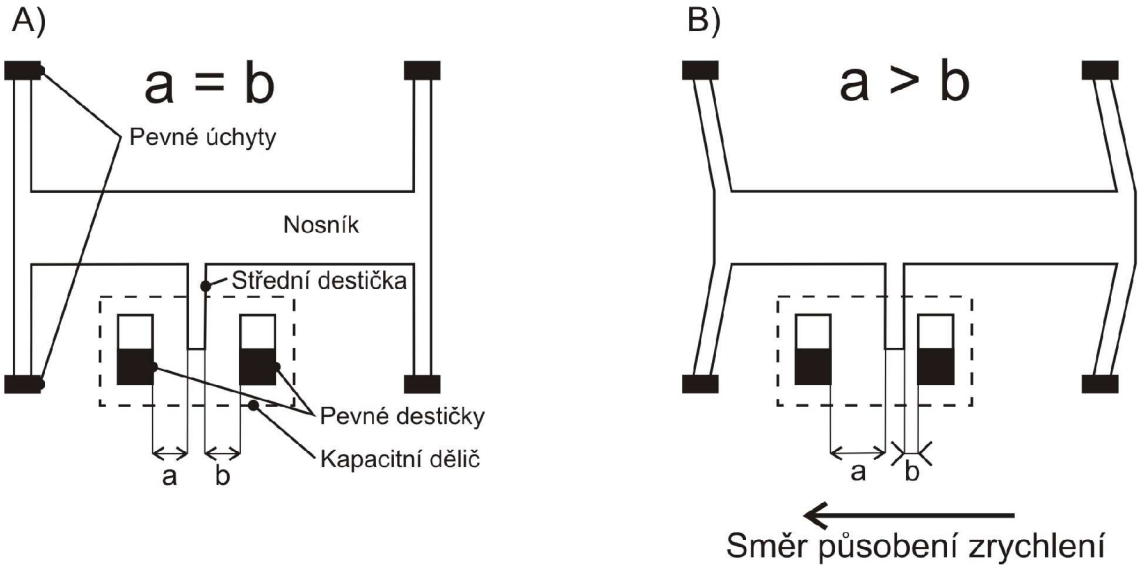
Jednotlivé piny:

- pin 1: motor
- pin 2: motor
- pin 3: motor
- pin 4: motor
- pin 5: stínění

3.5 Akcelerometr

3.5.1 Princip činnosti akcelerometru

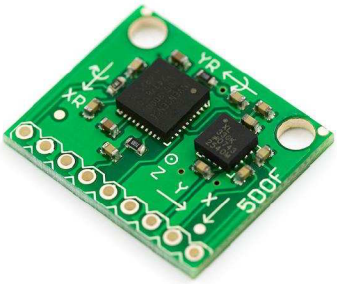
Akcelerometr je senzor vibrací nebo zrychlení, který využívá setrvačnosti hmoty pro měření rozdílu mezi kinematickým zrychlením a gravitačním zrychlením. Dříve používané mechanické senzory jsou v dnešní době nahrazeny senzory vyrobenými technologií MEMS (mikro-elektromechanické), které jsou po rozměrové, energetické a cenové stránce výhodnější. Sféra použití je široká. Od automobilového průmyslu – např. senzory airbagů, po senzory zaznamenávající a varující před zemětřesením.



Obr. 3.8: Principielní schéma akcelerometru. Obr. A znázorňuje senzor v klidu, obr. B senzor pod vlivem zrychlení

3.5.2 Vlastnosti použitého akcelerometru ADXL330

Jedná se o 3-osý akcelerometr s analogovými výstupy od firmy Sparkfun ADXL330, který je integrován na jedné destičce společně s gyroskopem, to však využito nebude. Je to moderní typ akcelerometru, který vyniká mimořádně nízkým rušením a nízkou spotřebou.



Obr. 3.9: Destička akcelerometru ADXL330, zdroj: [7]

Vstupní napětí	2.0 – 3.6 V
Vstupní proud	200 - 320 µA
Rozsah senzoru	±3g

Tab. 3.6: Parametry akcelerometru ADXL330

3.5.3 Kalibrace akcelerometru

Před začátkem používání je potřeba každý akcelerometr kalibrovat. To provádíme, protože chceme přesně přepočítávat hodnoty zrychlení ve voltech na hodnoty náklonu vůči zemskému povrchu ve stupních. Postup je následující. Akcelerometr proměříme v pozicích jak ukazuje obrázek 3.10. Dostáváme hodnoty elektrického napětí pro -1g a +1g, tab.: 3.7. Hodnotu pro 0g poté dostaneme následujícím rozdílem.

$$+1g + (-1g) = 0g$$

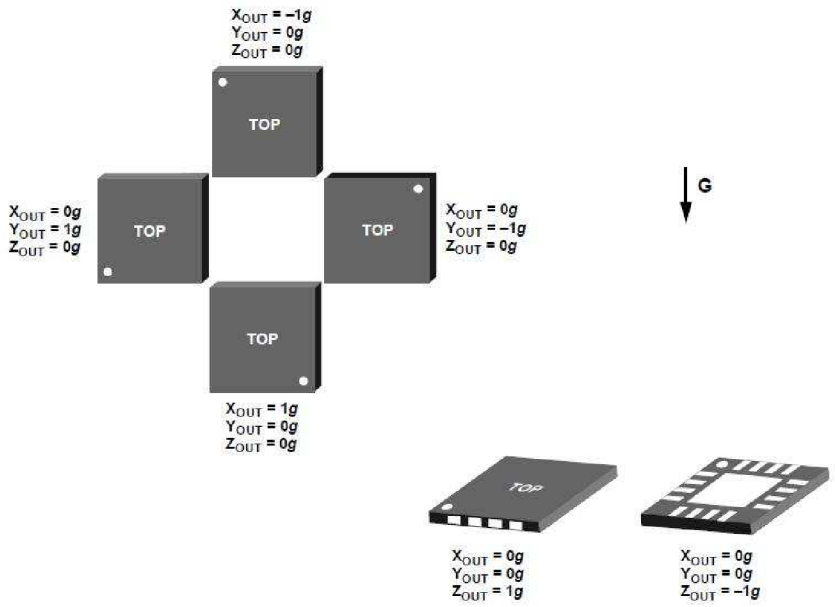
	-1g	0g	+1g
U_x [V]	0.6900	0.3126	1.0026
	0.6919	0.3136	1.0055
U_y [V]	0.6854	0.3227	1.0081
	0.6865	0.3221	1.0086
U_z [V]	0.7590	0.3183	1.0773
	0.7588	0.3182	1.0770

Tab. 3.7: Kalibrační konstanty akcelerometru

Údaj náklonu je vůči tíhovému zrychlení nelineární. A proto i když platí, že náklon pro hodnoty 0g je 0°, +1g je 90° a -1g je -90°, tak neplatí, že pro 0.5g je náklon 45°. Přepočet se provádí pomocí funkce arcus sinus. Konečný převod vypadá následovně:

$$\arcsin(x - 0g) = \arcsin(1.8 - 1.5) = 17,5°$$

Kde x je naměřená hodnota napětí.



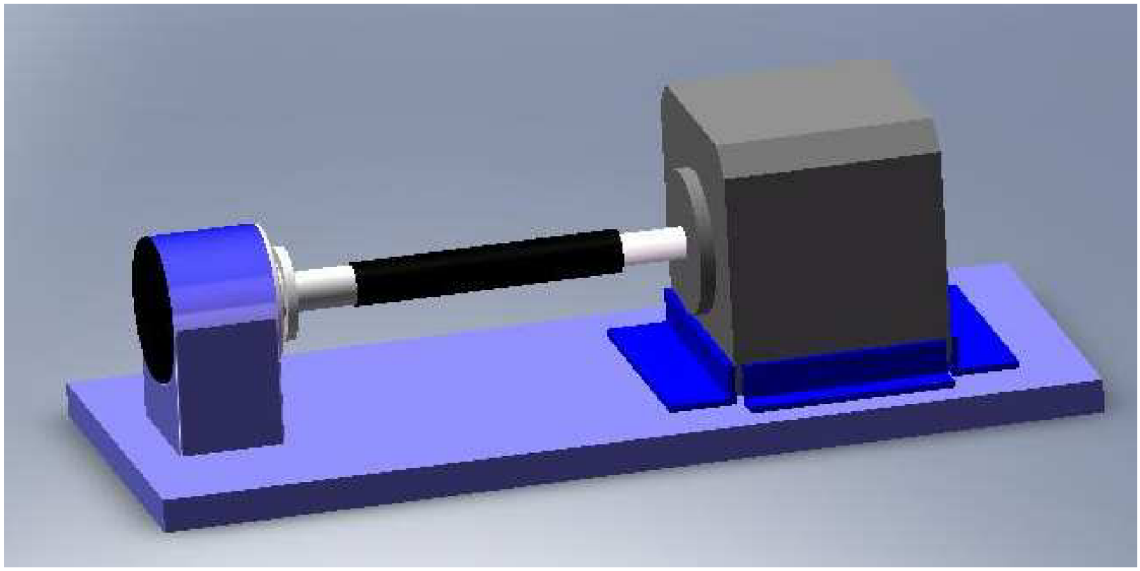
Obr. 3.10: Určení hodnot +1g a -1g akcelerometru, zdroj: [7]

4 Experimentální určení závislosti zrychlení-rychlost krokového motoru

Cílem této úlohy je experimentální zjištění závislosti zrychlení-rychlost krokového motoru. Provedl jsem sérii měření, s postupně se zvyšující frekvencí budícího signálu PWM. Zároveň to bylo mé první řízení motoru přes RT kartu MF624 a Real-Time toolbox.

4.1 Technické provedení

Měřící aparát se skládá ze čtyř částí. Pohonem soustavy je krokový motor a zpětnovazebním prvkem desetiotáčkový aritmetický potenciometr. Konstrukčními členy je uchycovací aparát vyrobený z plechu, zamezující pohybu a vibracím krokového motoru a potenciometru. Dále také spojka mezi motorem a potenciometrem. Pro tento účel byla použita pryžová hadička nasunutá na hřídelky obou zařízení. Tento způsob spojení byl upřednostněn před pevným spojením hřídelí, protože je to spojení do jisté míry pružné (ovšem ne tak, aby byly ovlivněny výsledky měření) a při nechtěném přetočení potenciometru, hřídelka proklouzne. Nedojde tak k jeho poškození. Zpětnou vazbu tedy dostávám z potenciometru. Díky průběhu napětí, jím zaznamenaném, mám přesně zachycen průběhu chodu motoru.



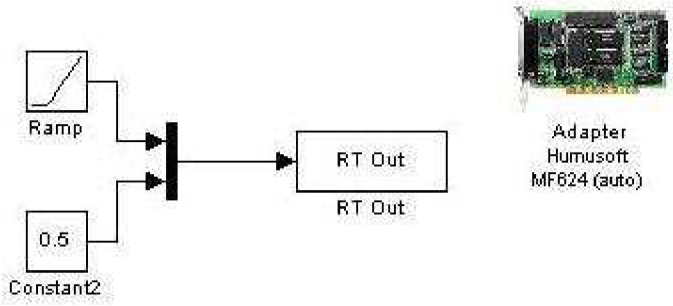
Obr. 4.1: Návrh technického provedení měřícího aparátu v SolidWorks

4.2 Roztočení motoru s nulovým zrychlením

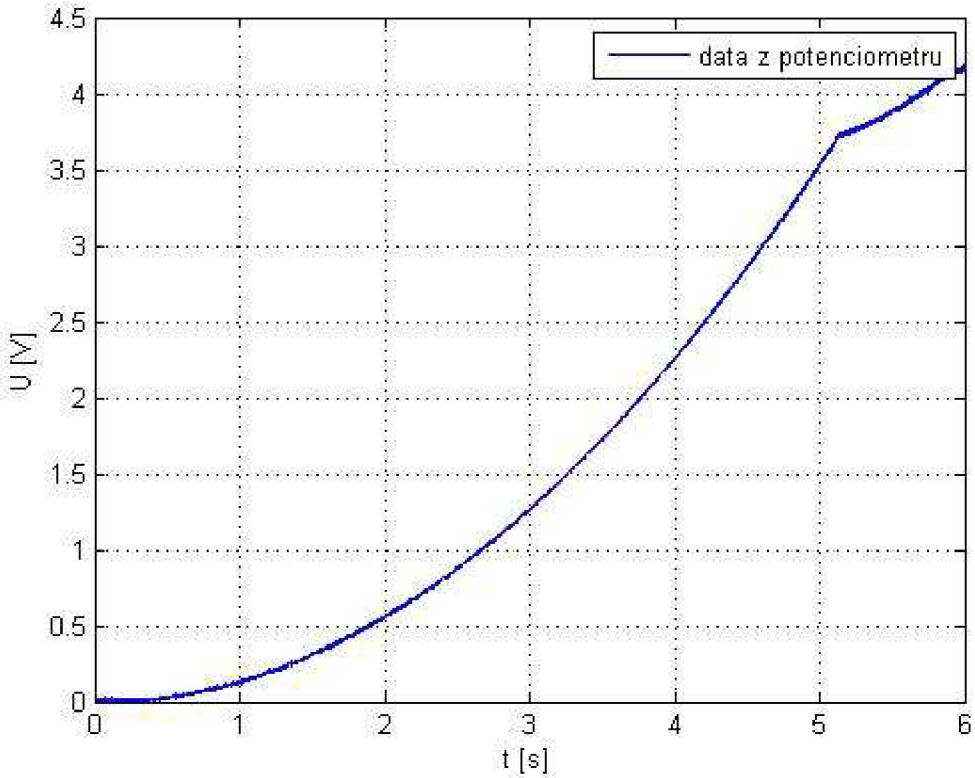
Jako buzení motoru je použit zdroj obdélníkového signálu. Motor se poté točí takovou rychlostí s jakou frekvencí přicházejí pulsy ze zdroje obdélníkového signálu. (Měření je realizováno modelem v příloze A.3.)

4.3 Roztočení motoru s konstantním zrychlením

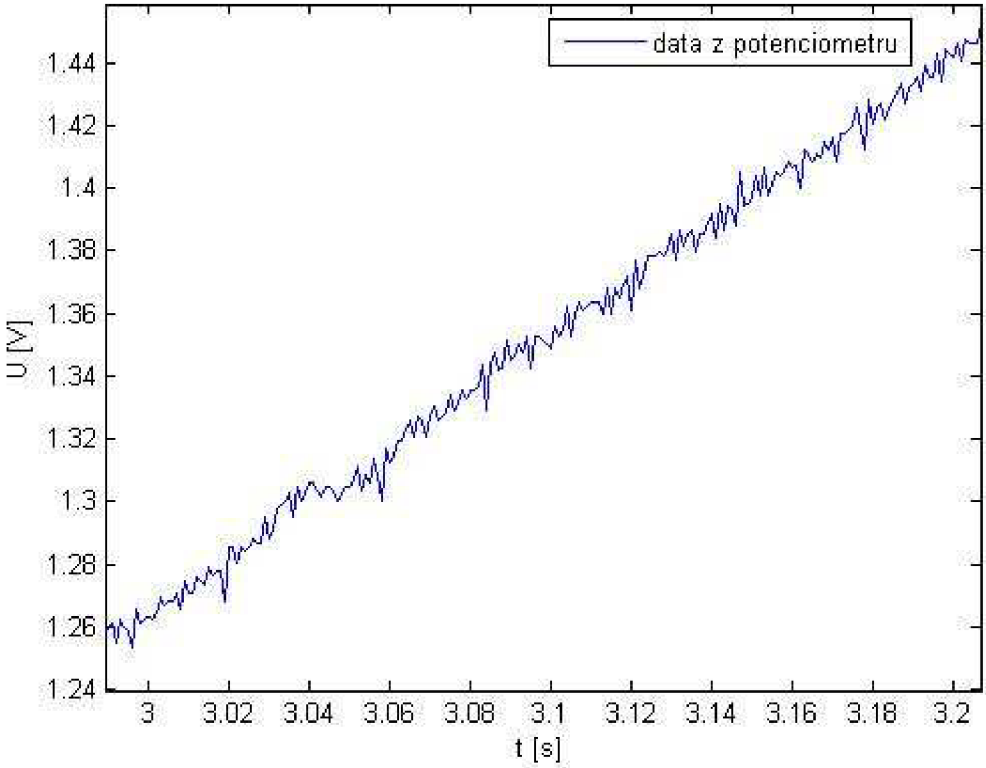
Jako zdroj buzení motoru je použito PWM, které generuje výstup timer/counter na portu X2 karty MF624. Tímto způsobem se motor roztáčí z nulové počáteční rychlosti s konstantním zrychlením. K zastavení chodu motoru může dojít dvěma způsoby. Může být dosažena maximální rychlost motoru, po níž nastane na motoru nestabilní stav. Čas počátku nestabilního stavu je zřejmý díky zpětné vazbě z potenciometru (vypadnutí motoru ze synchronismu je patrné z obrázku 4.3, kde nastává nestabilní stav přibližně v čase t ≈ 5.1 s). Druhou příčinou je automatické zastavení motoru, které jsem zavedl do modelu. To nastane, pokud motor dosáhne desetiotáčkového limitu potenciometru. (Měření je realizováno modelem v příloze A.3.)



Obr. 4.2: Generátor PWM signálu



Obr. 4.3: Graf znázorňující vypadnutí motoru ze synchronismu



Obr. 4.4: Graf znázorňující detail signálu

4.3 Filtrování signálu

U výše zobrazeného grafu (4.4) je patrný šum. Ten vzniká zejména nespojitým krokováním motoru, ale vzniká také v celém měřícím a řídícím řetězci. Pokud by se zobrazovala pouze tato naměřená závislost polohy na čase, tak by mohly být získané výsledky dostačující. Avšak cílem tohoto měření je získat závislost zrychlení na rychlosti. Rychlost a zrychlení se získají první a druhou derivací naměřené polohy. A protože derivaci „špičkovitého“ průběhu nelze provádět, je nutné z původního signálu špičky odstranit.

Vybíráme ze dvou hlavních kategorií filtrů. Buďto filtry reálné, kde signál prochází přes elektronické součástky a tím je šum odfiltrován. Sem patří například RC filtry. Druhou kategorií jsou filtry softwarové. To jsou filtry, které jsou naprogramovány uživatelem, nebo jsou již předdefinovány v MATLABu. V mé práci byla zvolená právě druhá varianta, tedy filtry softwarové a to z důvodu získání praktických zkušeností programování a aplikace takových skriptů v MATLABu.

4.3.1 Plovoucí průměr

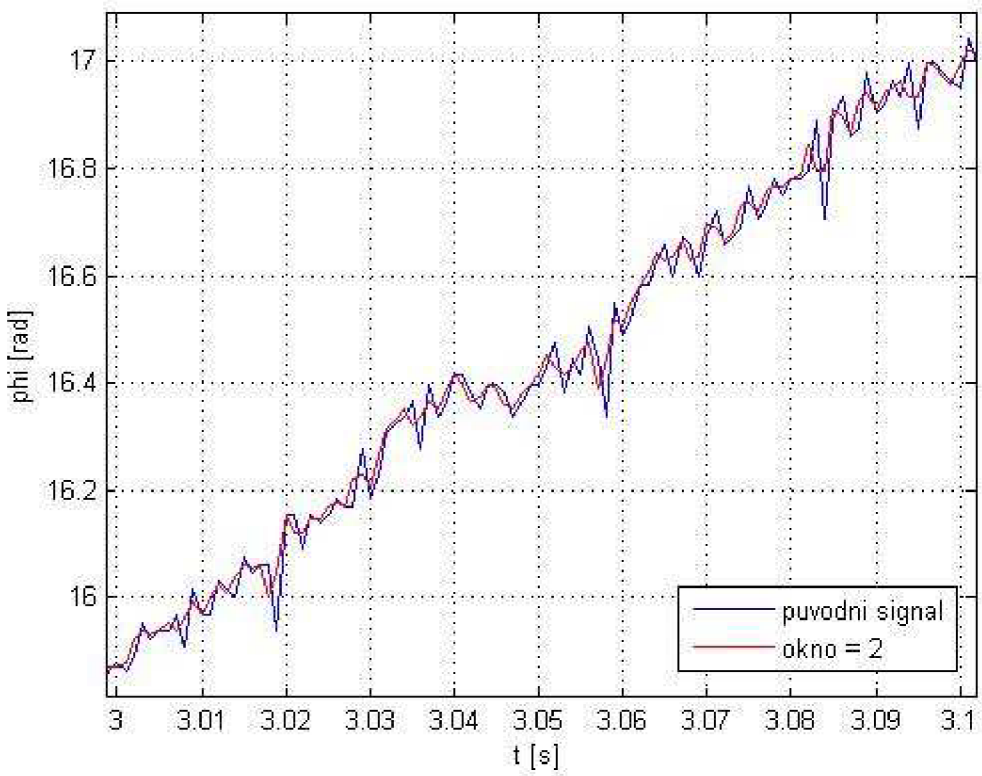
Pokud se měřená veličina mění, nestačí filtrování pouze průměrem (pozn.: typ filtru spíše pro konstantní signály). A protože mnou měřené signály (např. rozběh motoru, brzdění motoru) jsou signály poměrně rychle se měnící, je výhodnější použít tzv. plovoucí průměr. Plovoucí průměr je aritmetickým průměr z několika posledních hodnot, jejichž množství si sami nastavujeme.

Filtr vypočítá vždy průměr z okna posledních hodnot a v dalším kroku od součtu posledních hodnot odečte nejstarší měření, naopak přičte nové měření a z nového součtu udělá opět průměr. Plovoucí průměr tedy prokládá posledními měřeními-oknem vodorovnou přímku.

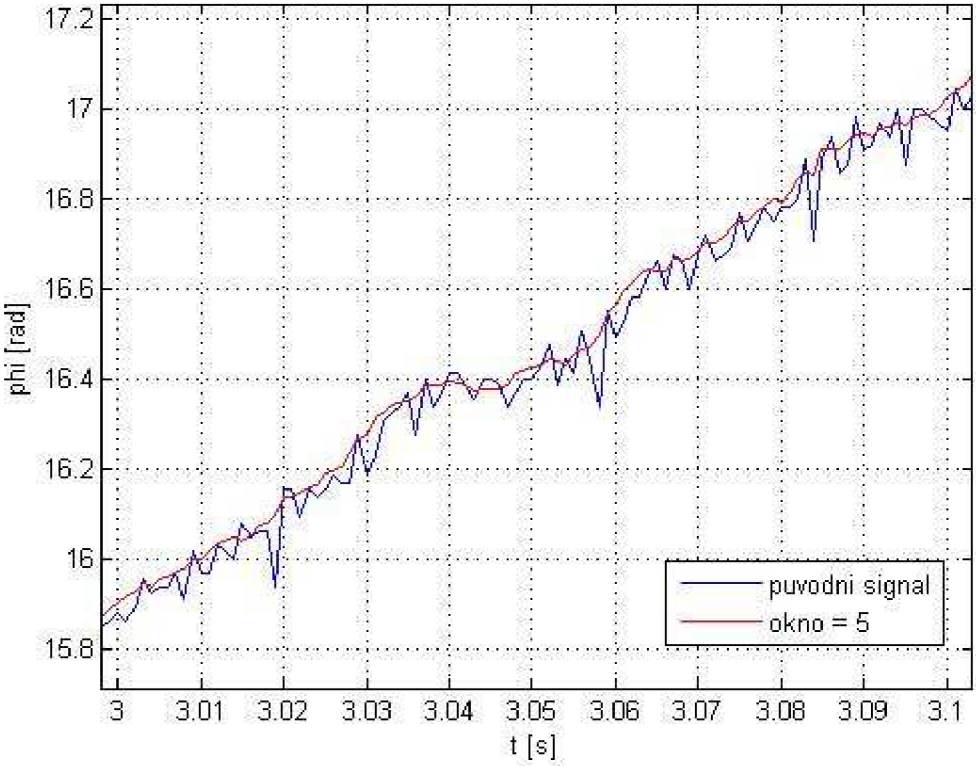
Ukázka vyhodnocovacího skriptu Plovoucího průměru:

```
%%Plovouci prumer
orig = simout.signals.values; %objem filtrovanych dat
k = 2;                        %okno
avg = orig;
time = length(orig);          %delka simulace
for j = 1 : (time - k)        %samotny vypocet noveho prumeru
        avg(j) = mean (avg (j : j + k - 1));
end;
%%
```

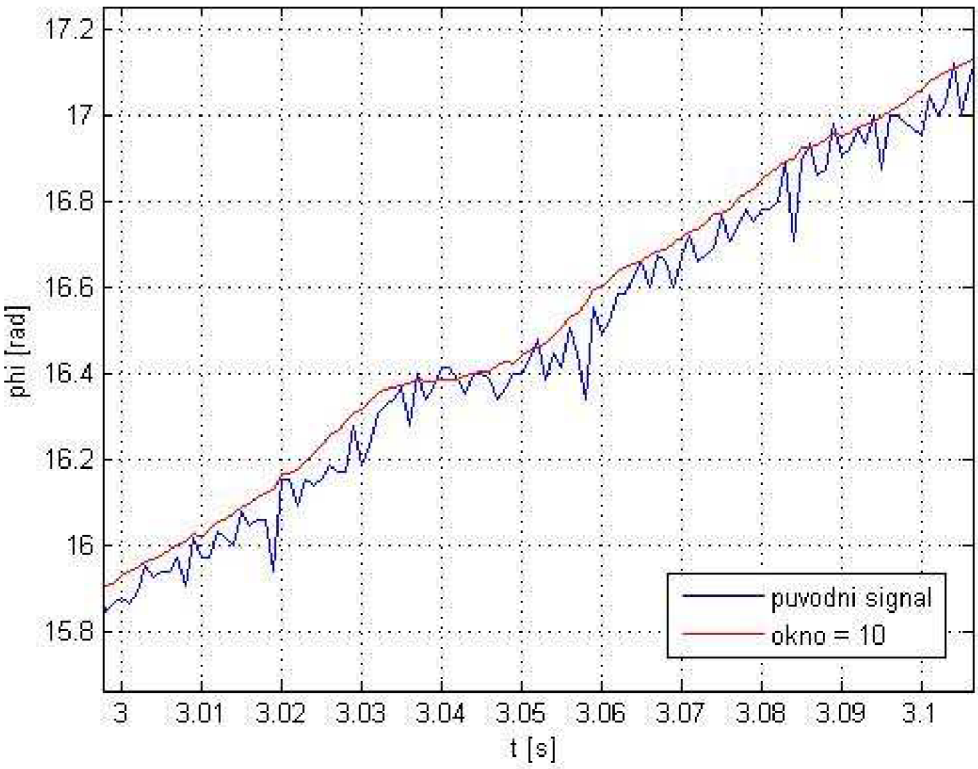
Čím větší okno, tím více se zašumělá funkce vyhlazuje. Jak už tomu ale bývá, musíme hledat kompromis. Velikost okna má totiž samozřejmě také negativní vliv na výsledný signál. Zejména časový posun oproti původnímu signálu. To je zřejmé z obrázku 4.7, kde je vidět, jaký posun signálu zapříčinilo zdvojnásobení okna oproti obrázku 4.5. Pokud je okno příliš široké, tak nám také znehodnocuje určité množství posledních naměřených dat.



Obr. 4.5: Vliv velikosti okna na filtrovaný signál



Obr. 4.6: Vliv velikosti okna na filtrovaný signál

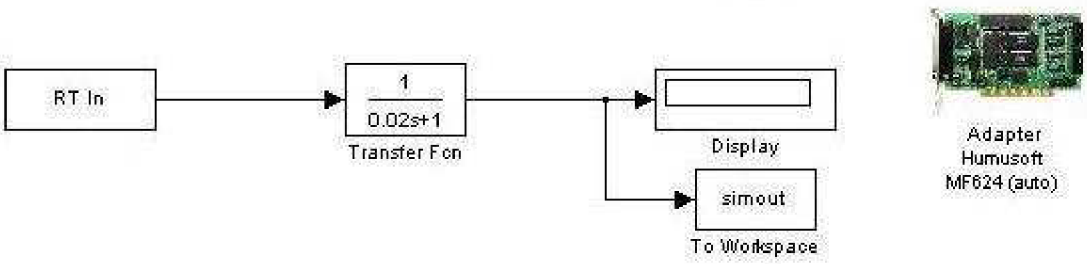


Obr. 4.7: Vliv velikosti okna na filtrovaný signál

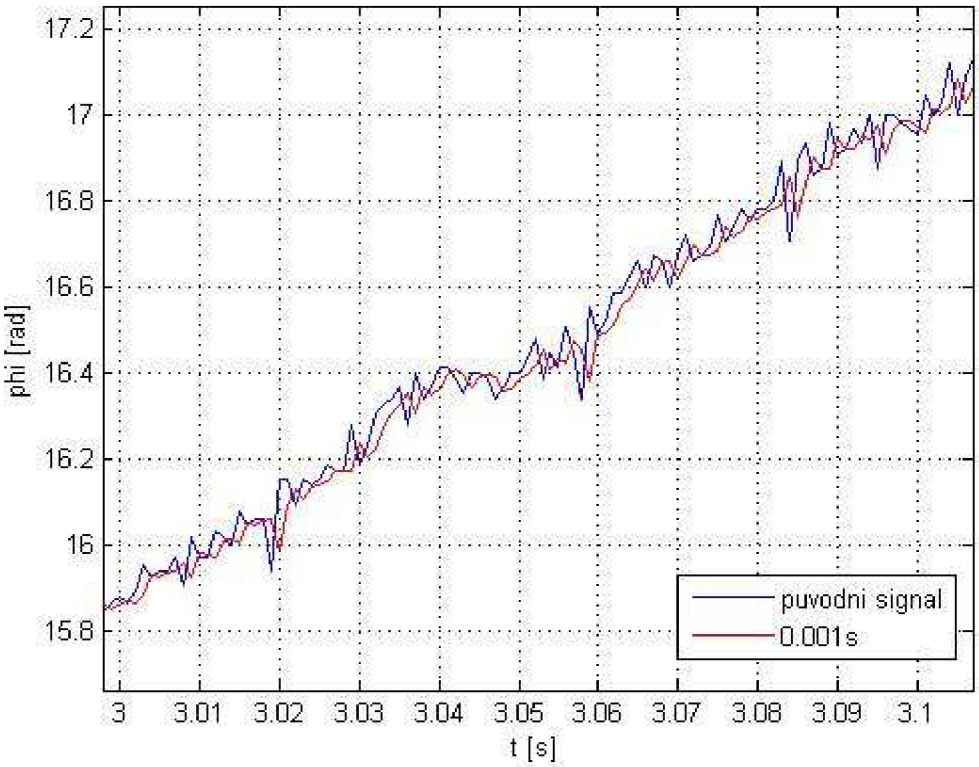
4.3.2 Filtr typu dolní propusť

Tímto názvem bývá v elektronice označován filtr, který nepropouští signál o vyšších frekvencích.

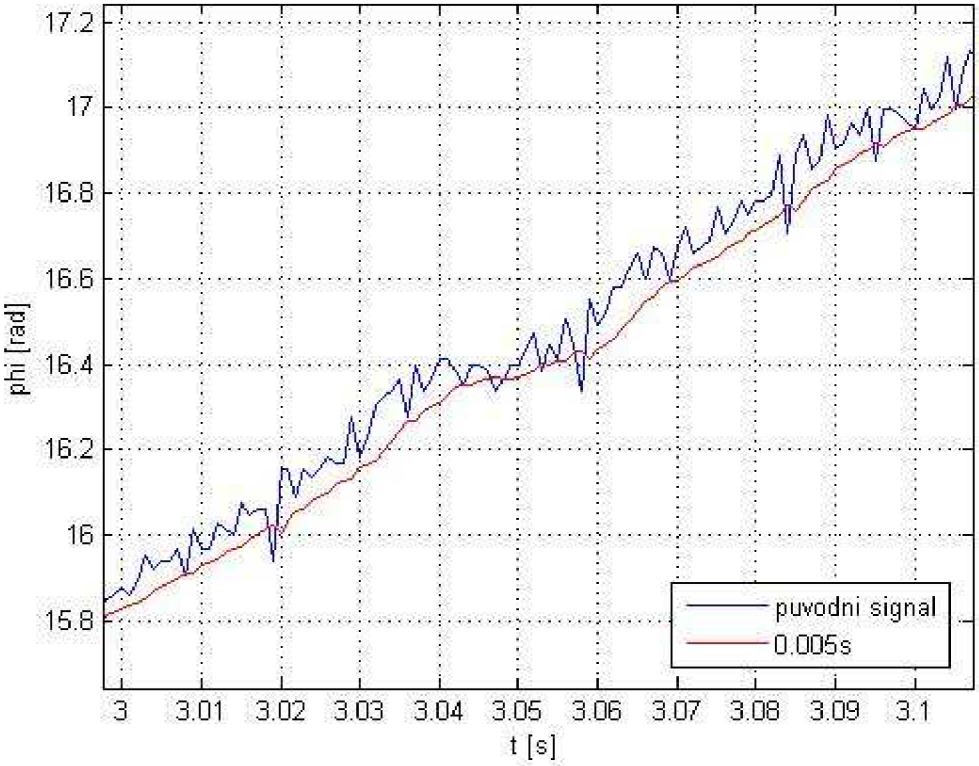
V Simulinku je tento filtr realizován blokem 'Transfer Fcn'. V tomto bloku se nastavuje proměnná s na určitou hodnotu. Ukázky, jak se filtrace mění v závislosti na oné konstantě jsou na obrázcích níže (4.9, 4.10, 4.11).



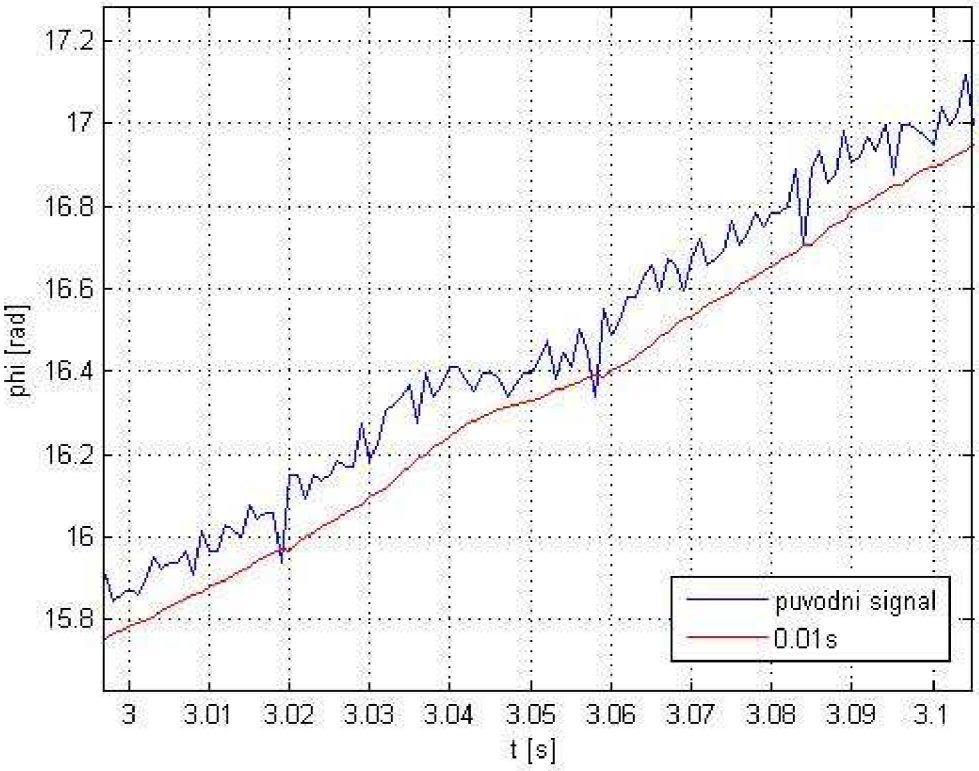
Obr. 4.8: Realizace dolní propusti v SIMULINKu blokem Transfer Fcn



Obr. 4.9: Graf porovnávající filtrovaný a nefiltrovaný signál



Obr. 4.10: Graf porovnávající filtrovaný a nefiltrovaný signál



Obr. 4.11: Graf porovnávající filtrovaný a nefiltrovaný signál

4.4 První a druhá derivace, zpracování signálu

Finální postup převodu polohy na zrychlení byl takový, že naměřený signál byl profiltrován plovoucím průměrem a poté derivován. Tím byla získána rychlost motoru. Ta byla opět profiltrována a derivována, tím jsme dospěli ke zrychlení. Do výsledného grafu byla vynesena na x-ovou osu rychlost a na y-ovou osu zrychlení. Tento graf je zobrazen na obrázku 4.14.

Převod naměřených dat z potenciometru ve voltech na radiány

Na potenciometru měřím napětí ve voltech. Potenciometr je napájen 5-ti volty a je desetiotáčkový. Potom tedy platí následující přepočty (požadovanou jednotkou jsou radiány):

$$5 \quad V \quad ... \quad 10 \quad ot. \quad \Rightarrow$$

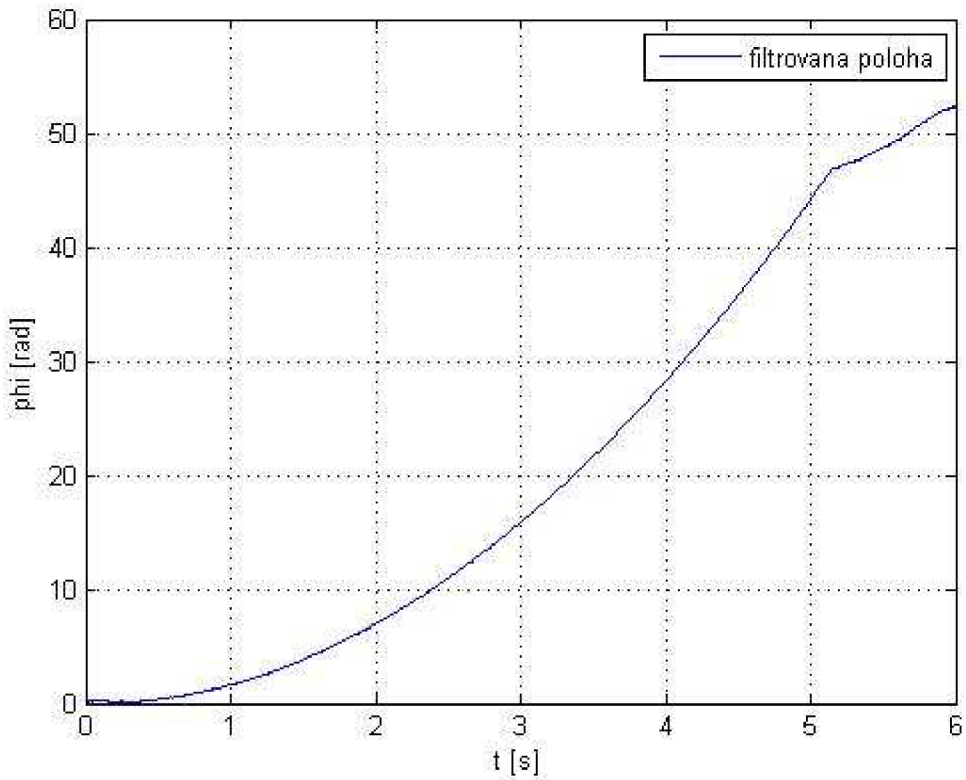
$$0.5 \quad V \quad = \quad 1 \quad ot. \quad = \quad 360° \quad = \quad 2\pi \quad rad$$

$$0.5 \quad V \quad ... \quad 2\pi \quad rad$$

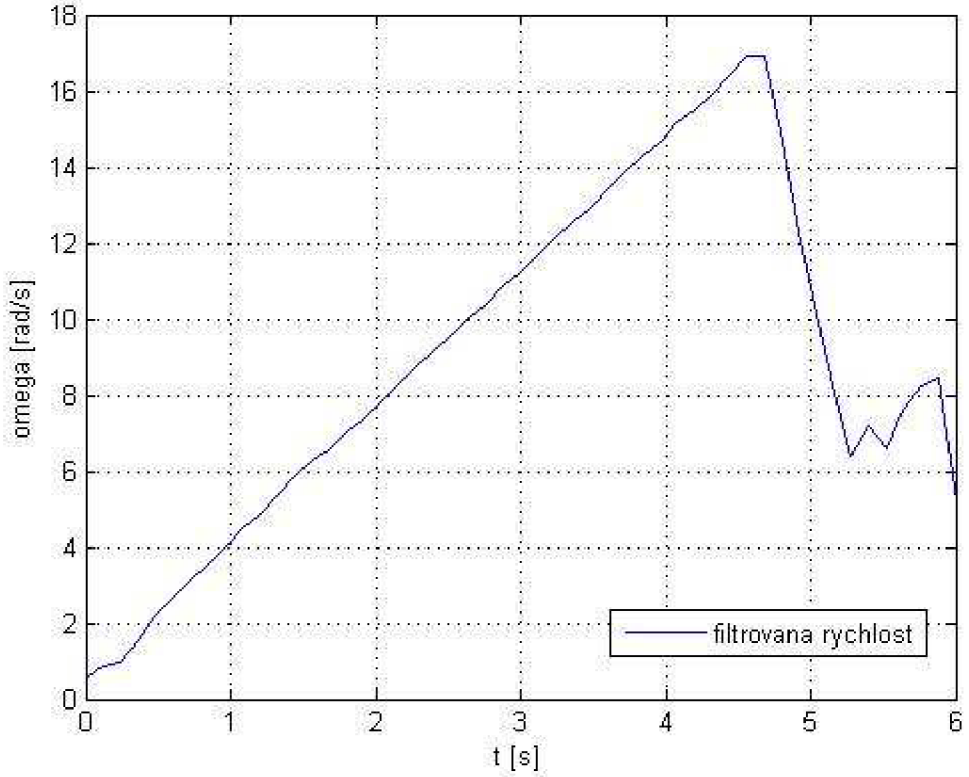
$$1.0 \quad V \quad ... \quad x \quad rad$$

$$x = \frac{2\pi * 1}{0.5} = 4\pi$$

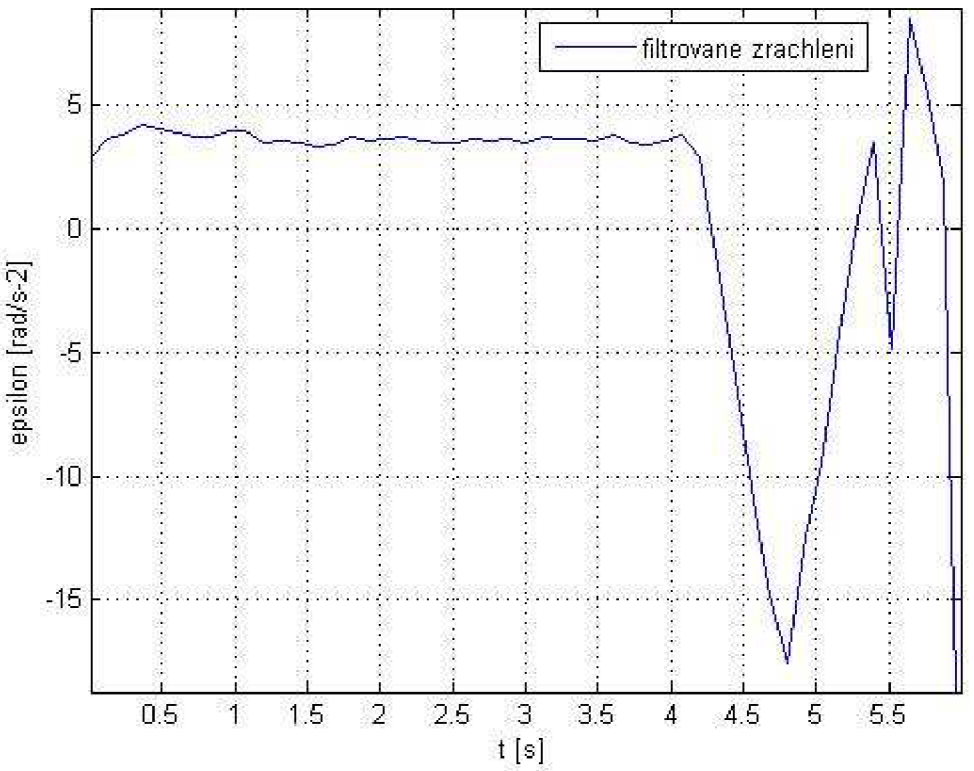
Pokud se tedy budou data z potenciometru násobit hodnotou $x = 4\pi$, jednotky se z voltů převedou na radiány.



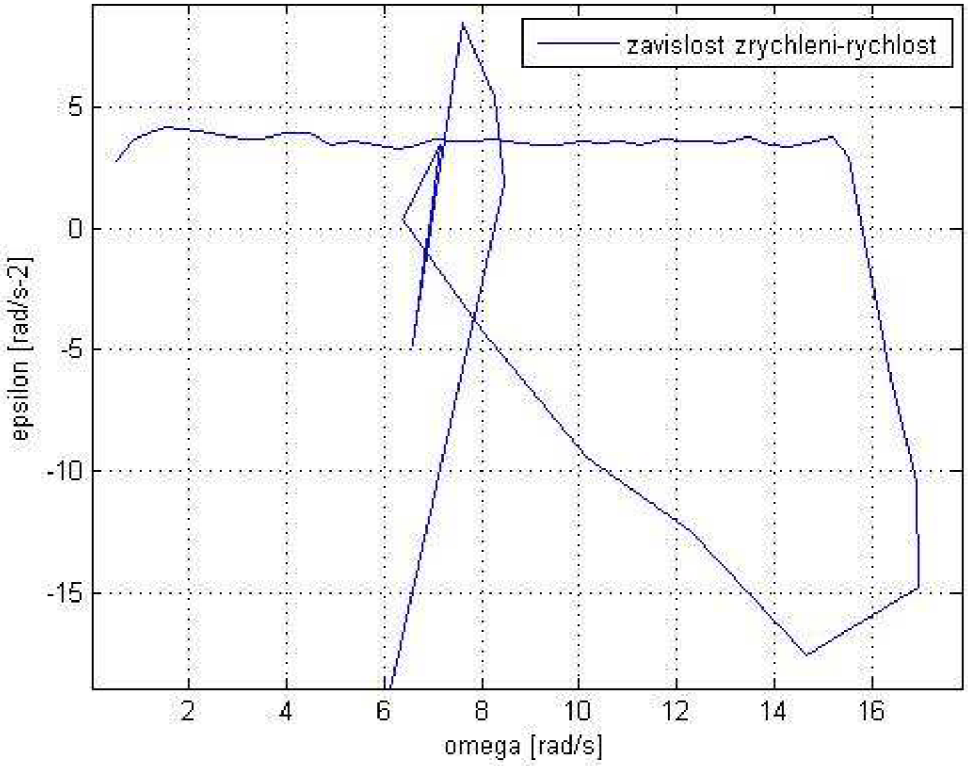
Obr. 4.12: Graf ukazující běh motoru s konstantním zrychlením. V čase t ≈ 5.1 s motor vypadl ze synchronismu.



Obr. 4.13: Graf průběhu rychlosti motoru (derivace polohy). Od času t ≈ 4.8 s je motor v nestabilním stavu.



Obr. 4.14: Graf zrychlení motoru (derivace rychlosti).



Obr. 4.15: Graf zrychlení-rychlost (pozn.: přímá část grafu značí stabilní stav motoru, v části kde průběh ‚ustřelí' motor upadl do nestabilního stavu)

4.5 Závěr úlohy

Původní cíl úlohy byl v zobrazení několika desítek měření a v očekávání vyobrazení výsledného grafu se zajímavou závislostí mezi zrychlením a rychlostí. Ovšem tyto předpoklady nebyly správné. Ve výsledku se zvyšovalo pouze zrychlení se zvyšující se frekvencí PWM generátoru. Dosažená maximální rychlost, před upadnutím motoru do nestabilního stavu, se prakticky neměnila. Ovšem i tak se dá měření považovat za velmi užitečné a prospěšné díky zkušenostem získaným pro další práci s kartou MF624 a krokovými motory.

Maximální dosažená rychlost motorku byla v režimu plného kroku ω_{max} = 110 rad/s, což pro představu odpovídá 17,5 ot/s. Zrychlení, při takto dosažené rychlosti, bylo ε_{max} = 916 rad/s^2. Maximální dosažená rychlost v režimu polovičního kroku byla ω_{max} = 103 rad/s. Zrychlení, při takto dosažené rychlosti, odpovídalo ε_{max} = 312 rad/s^2. Nutno zdůraznit, že výše uvedené výsledky nejsou maximálními pro použitý typ krokového motoru. Velké omezení bylo v nutnosti dosažení maximální rychlosti během deseti otáček potenciometru.

Úloha by se mohla tedy spíše označit, jako měření polohy, rychlosti a zrychlení krokového motoru.

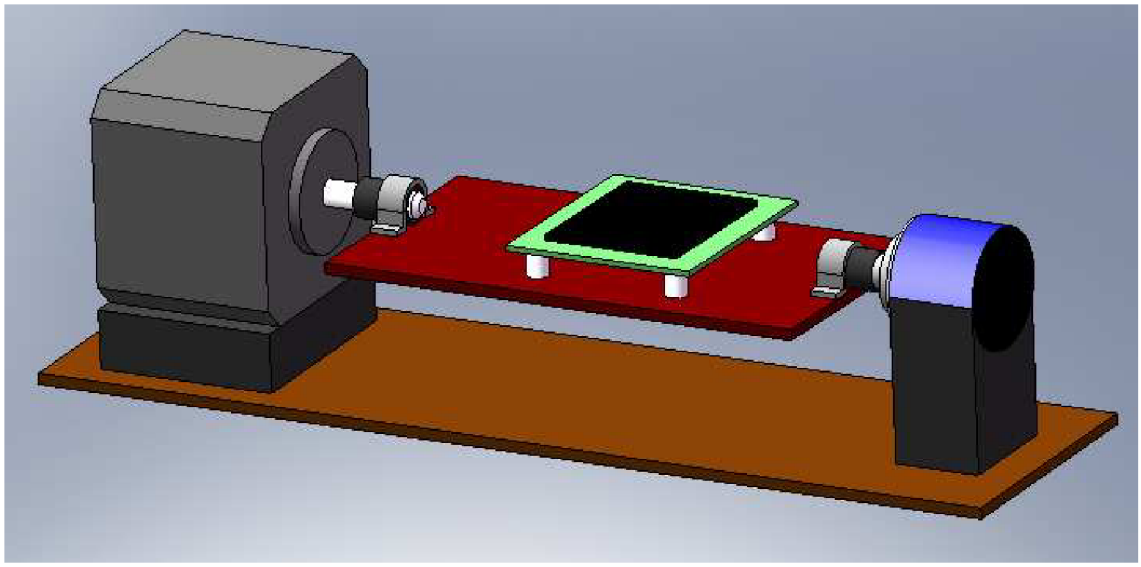
5 Měření na akcelerační plošince

5.1 Úkol

Cílem této úlohy je naprogramovat skript, který naměří a vyhodnotí statické charakteristiky akcelerometru. Protože akcelerometr v této úloze figuruje jako zpětnovazební prvek, můžeme díky němu, po převodních úpravách sledovat náklon plošinky v kterémkoliv okamžiku měření. Další cílem úlohy je vyobrazení prostorových histogramů pro každou ze sledovaných os akcelerometru.

5.2 Technické provedení

Nákres provedení je na následujícím obrázku 5.1. Krokový motor je zde pohonem soustavy. Na jeho hřídelce je uchycena rotační plošinka, která nese destičku plošného spoje s akcelerometrem. Druhá strana rotační plošinky je rotačně uchycena na hřídelce potenciometru. Akcelerometr a potenciometr slouží jako zpětnovazební prvky. Akcelerometr je uložen na ose rotace osy y. Tím pádem tato osa nebude měřena.



Obr. 5.1: Návrh měřícího aparátu v SolidWorks. Reálné provedení je příloze A.6

5.3 Měření

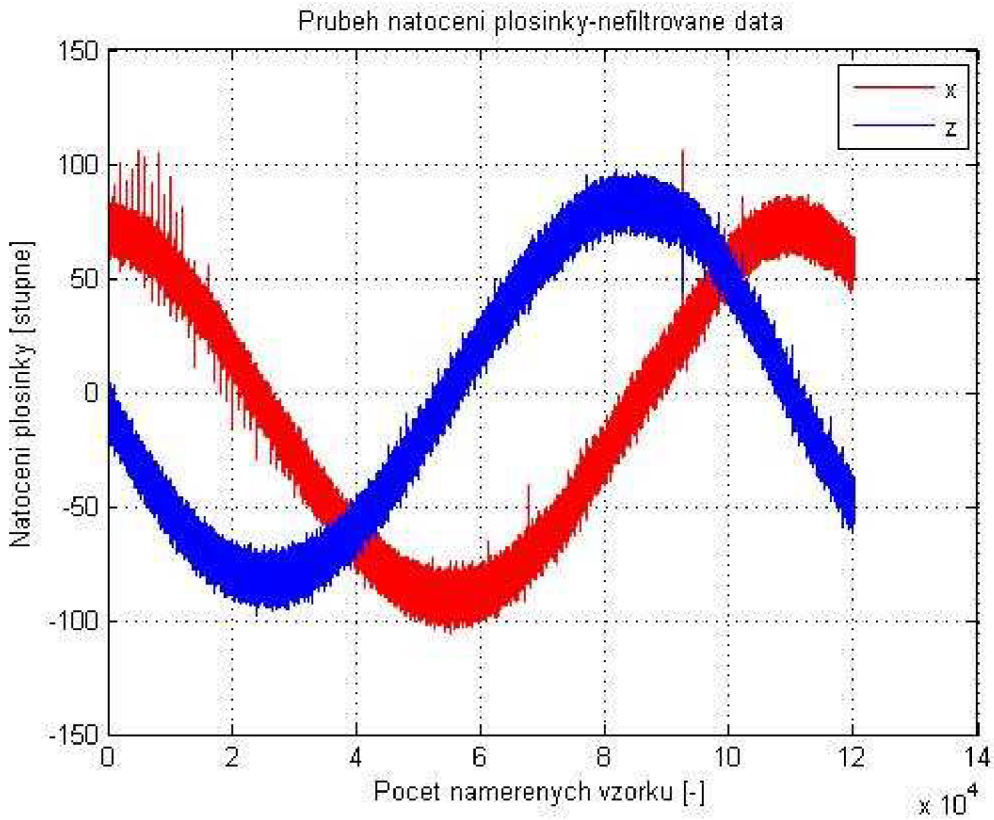
Bude se postupovat tak, že budou pro každý krok motoru naměřeny x-ové a z-ové průběhy zrychlení na akcelerometru. Každý krok se tímto způsobem bude měřit po určitou dobu tak, aby hodnoty zrychlení po jednotlivých krocích motoru byly naměřeny v co možná nejklidnějším stavu, tzn.: bez vibrací způsobených nespojitým krokováním motoru. Takové měření každého kroku nám také dá dostatečný počet vzorků pro přesnou představu o chování akcelerometru v klidovém stavu. Poté je nutné výstupní data z akcelerometru ve voltech převést pomocí kalibračních konstant (kap.: 3.5.3) na hodnoty náklonu ve stupních. Ze získaných dat se pro každou osu vyobrazí prostorové histogramy.

Pokud je MATLAB připojen k plošince s akcelerometrem, tak se může skript spustit ze souboru stat_char_acc_SIMULACE.m (soubor uložen v příloze na CD a zkopírován v kapitole A.4), který nám data nejprve naměří a následně vyhodnotí.

5.4 Výsledky měření

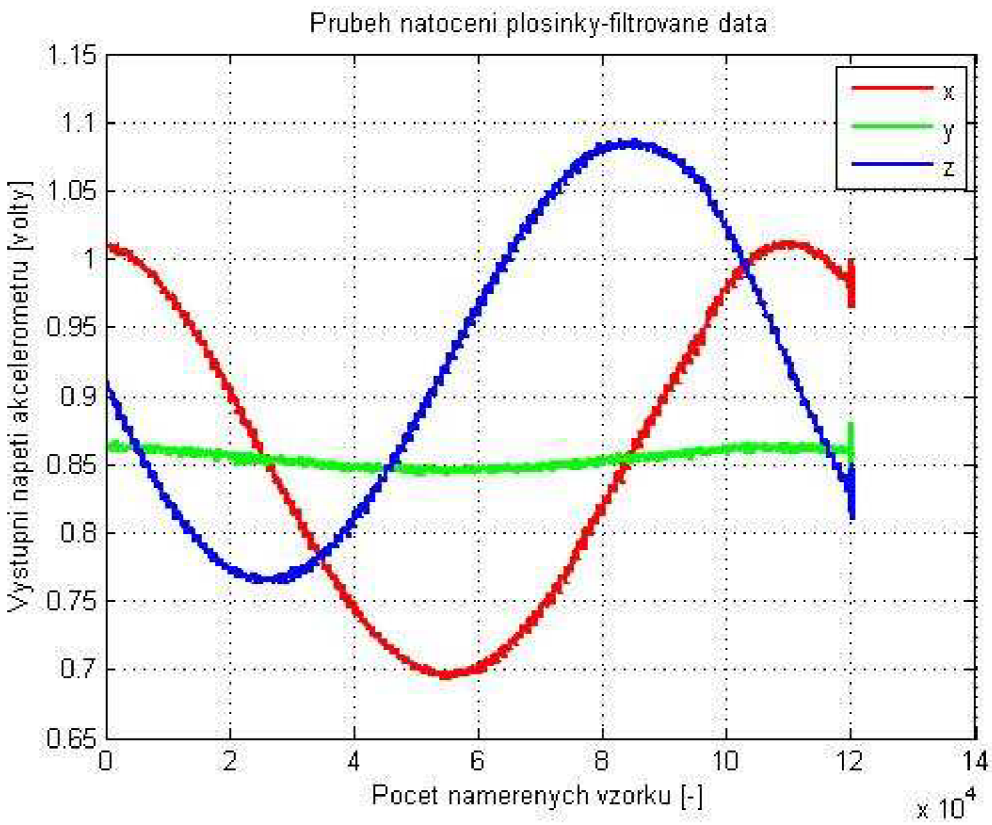
5.4.1 Získání náklonu pomocí dat z akcelerometru

Byl proměřen celý rozsah motoru, tedy >100 kroků (100 * 3.6° = 360°), každý po dobu t = 60 s. Tím se získaly průběhy zrychlení na osách akcelerometru ve voltech (obr.: 6.3 kde je signál navíc profiltrován, aby byl detailněji vidět jeho průběh). Ty byly následně pomocí akceleračních konstant převedeny na náklon ve stupních. Výsledky jsou vyobrazeny na následujícím grafu (Obr.: 5.2).



Obr. 5.2: Naměřené hodnoty náklonu plošinky akcelerometrem

Takto naměřené průběhy signálu jsou poměrně nepřehledné, proto jsem data pro detailnější náhled na průběhy signálu profiltroval. Výsledek je na následujícím grafu (Obr.: 5.3).

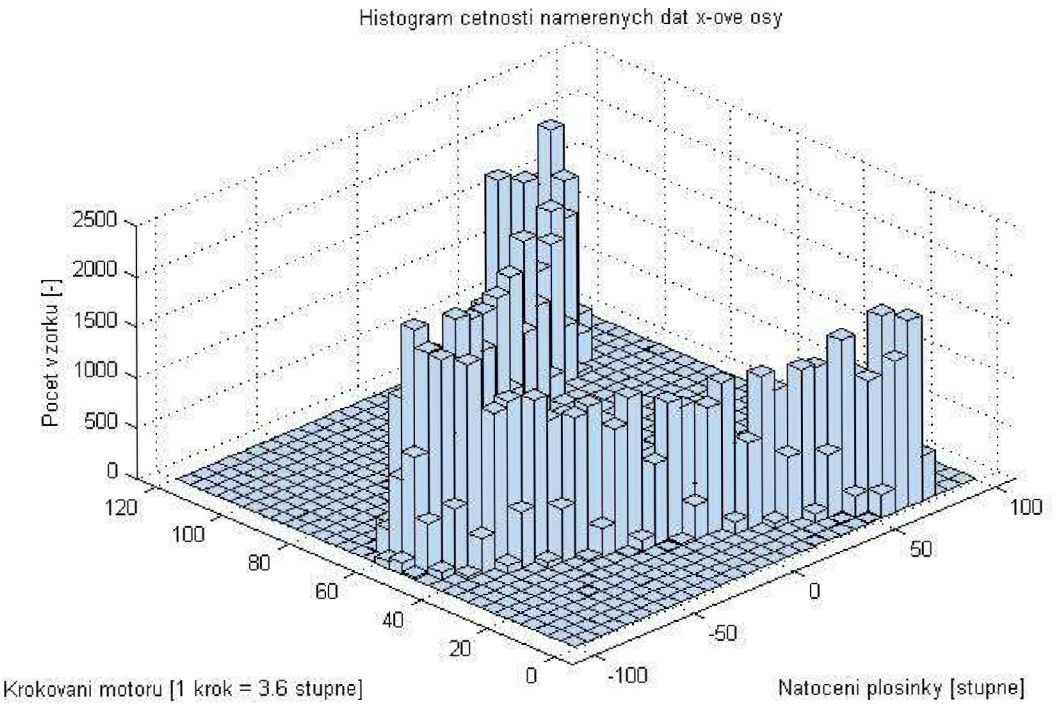


Obr. 5.3: Profiltrované hodnoty zrychlení na akcelerometru

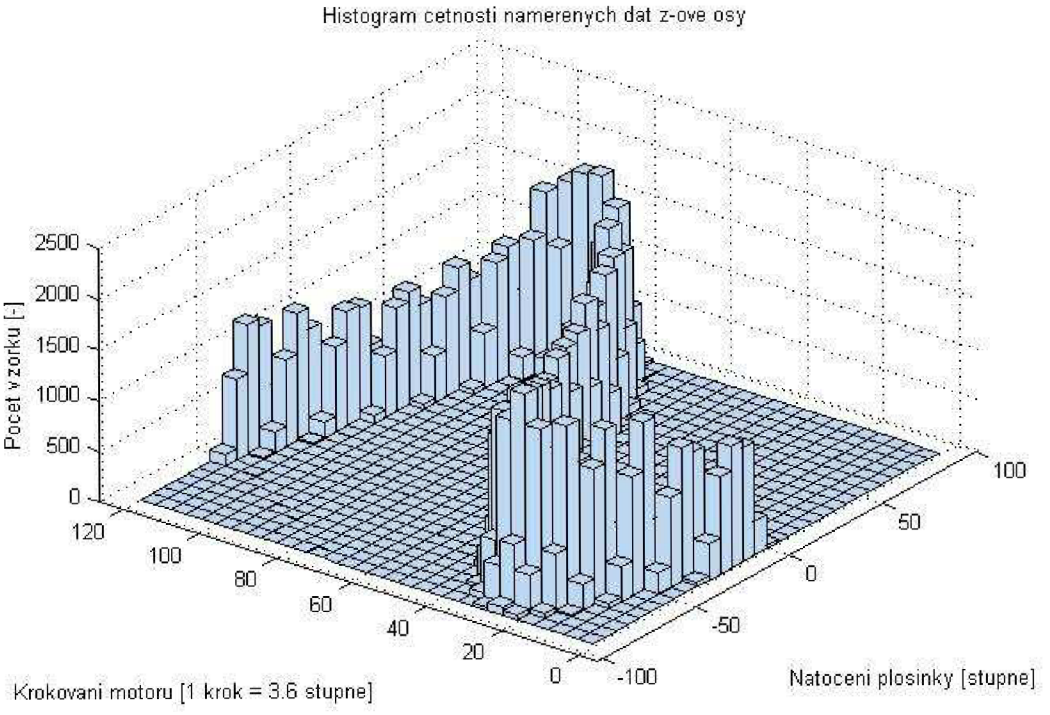
5.4.2 Vykreslení histogramů

Následují prostorové histogramy. Histogramy zobrazují závislost mezi náklonem plošinky v jednotlivých osách a postupným krokováním krokového motoru.

Jak už bylo zmíněno, byla snaha akcelerometr uložit na osu rotace osy y. Kdyby se toto podařilo naprosto přesně, tak by průběhy zrychlení na ose y byly konstantní. Jak je ale vidět z grafu 5.3, tak se to úplně přesně nepodařilo. Nicméně, s touto osou se již dále nepracovalo, její vypovídací hodnota je nulová.



Obr. 5.4: Histogram náklonu pro osu x



Obr. 5.5: Histogram náklonu pro osu z

5.5 Závěr úlohy

Výsledky úlohy jsou vyobrazeny v grafech na obrázcích 5.2, 5.4, 5.5.

Při bližším zkoumání grafu 5.2 jsou výstupní průběhy akcelerometru hodně zašumělé. A vzhledem k tomu, že máme k dispozici moderní typ akcelerometru, u kterého by se daly čekat velmi dobré přenosové vlastnosti, tak by zdrojem šumu neměl být samotný akcelerometr. Proto jsem porovnal tyto hodnoty s hodnotami získanými při kalibraci akcelerometru, kde jsem akcelerometr měřil samostatně. Zjistil jsem, že hodnoty šumu se poměrně liší. Velký šum na signálu při měření s motorkem je s velkou pravděpodobností způsobený vibracemi rotorku, které vznikají i když se motor neotáčí, protože vinutími motoru prochází i v klidovém stavu proud. A akcelerometr jako zařízení určené, mimo jiné, na snímání vibrací, tyto jemné vibrace zaznamenává.
Tento problém se dá řešit několika způsoby. Mohli bychom například hledat společnou frekvenci vibrací na rotorku (funkcí „ftt“ v Matlabu) a tu pak pásmovou zádrží odstranit. Mohli bychom problém řešit také konstrukční cesto. Navržením mechanické brzdy, která by vytvářela odpor na rotorku, ten by se i přes odpor mohl pohybovat, ale vibrace by byly utlumeny. V mé práci se ale návrhem tohoto řešení z důvodu časové tísně už nebudu zabývat.

6 Závěr

Závěry jednotlivých měření jsou vždy umístěny v závěrech kapitol, ve kterých se měření nacházejí. Jsou to tedy podkapitoly 4.5 pro měření polohy, rychlosti a zrychlení krokového motoru a 5.5 pro měření statických charakteristik akcelerometru.

Celkově bych práci zhodnotil velmi kladně. Pronikl jsem do zadané problematiky a získal řadu komplexních znalostí a zkušeností, které bych v denní výuce získával jen těžce. Nabral jsem praktické zkušenosti, jako je například navrhování a konstrukce desek plošných spojů, elektronické měření nebo konstrukce měřících aparátů. Zmínil bych také práci s krokovými motory a akcelerometrem. Získal jsem rovněž řadu teoretických znalostí a zkušeností, jako je práce s real-time kartou, což je dle mě velmi zajímavá a perspektivní oblast. Také jsem si prohloubil mé znalosti práce s Matlabem a dalšími softwarovými nástroji.

7 Literatura a odkazy

[1] JÍRA, R., *Bezsenzorové řízení mostového jeřábu ve dvou osách*.. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006. 61 s. Diplomová práce

[2] ŠVEJDA, P., *Modelování dynamiky a řízení dvoukolového nestabilního transportního prostředku*.. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. 66 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Robert Grepl, Ph.D.

[3] MACHALA, J., *Regulace výšky levitujícího míčku v prostředí Matlab&Simulink*.. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2008. 79 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Štěpán Ožana, Ph.D.

[4] Filtrování signálu, [online] dostupné z: <http://robotika.cz/guide/filtering/en>

[5] HUMUSOFT, Karta MF624, [online] dostupné z: <http://www.humusoft.cz/produkty/datacq/mf624/index.php?lang=cz&p1=1&p2=6&p3=1>

[6] HUMUSOFT: MF624 - Multifunction I/O Card, User's Manual, 2006

[7] Sparkfun, [online] dostupné z: <http://www.sparkfun.com/commerce/product_info.php?products_id=741>

[8] Karban, P.: Výpočty a simulace v programech Matlab a Simulink, Computer Press, 2006

[9] Zaplatílek, K. - Doňar, B.: MATLAB tvorba uživatelských aplikací, BEN, 2004

8 Seznam symbolů

a	Zrychlení	[m/s^2]
A	Přenosová konstanta	
DSM03	Řídící jednotka	
I	Elektrický proud	[A]
LED	Light emited diode, světlo vyzařující dioda	
MF624	Multifunkční řídicí a měřicí karta firmy Humusoft	
P	Elektrický výkon	[W]
PC	Personal computer (osobní počítač)	
PCI	Peripheral Component Interconnect, počítačová sběrnice	
PWM	Pulse width modulation, anglická zkratka PŠM	
t	Čas	[s]
TTL	Tranzistor-Tranzistor Logic, typ technologie integrovaných obvodů	
U	Elektrické napětí	[V]
v	Rychlost	[m/s]
ε	Úhlové zrychlení	[rad/s^2]
ω	Úhlová rychlost	[rad/s]

A Přílohy

A.1 Zapojení konektorů X1 na kartě MF624

AD0	1	20	DA0
AD1	2	21	DA1
AD2	3	22	DA2
AD3	4	23	DA3
AD4	5	24	DA4
AD5	6	25	DA5
AD6	7	26	-12 V
AD7	8	27	+12 V
AGND	9	28	+5 V
DA6	10	29	GND
DA7	11	30	DOUT0
DINO	12	31	DOUT1
DIN1	13	32	DOUT2
DIN2	14	33	DOUT3
DIN3	15	34	DOUT4
DIN4	16	35	DOUT5
DIN5	17	36	DOUT6
DIN6	18	37	DOUT7
DIN7	19		

Tab. A.1: Rozmístění I/O signálů na konektoru X1 karty MF624, zdroj: [6]

Vysvětlivky zkratek uvedených v tab. A.1:

AD0 - AD7	analogové vstupy
DA0 - DA7	analogové výstupy
DIN0 - DIN7	digitální vstupy
DOUT0-DOUT7	digitální výstupy
+12 V	napájení + 12 V, výstup
-12 V	napájení - 12 V, výstup
+5 V	napájení + 5 V, výstup
AGND	analogová zem, výstupy
GND	digitální zem, výstup

A.2 Zapojení konektorů X2 na kartě MF624

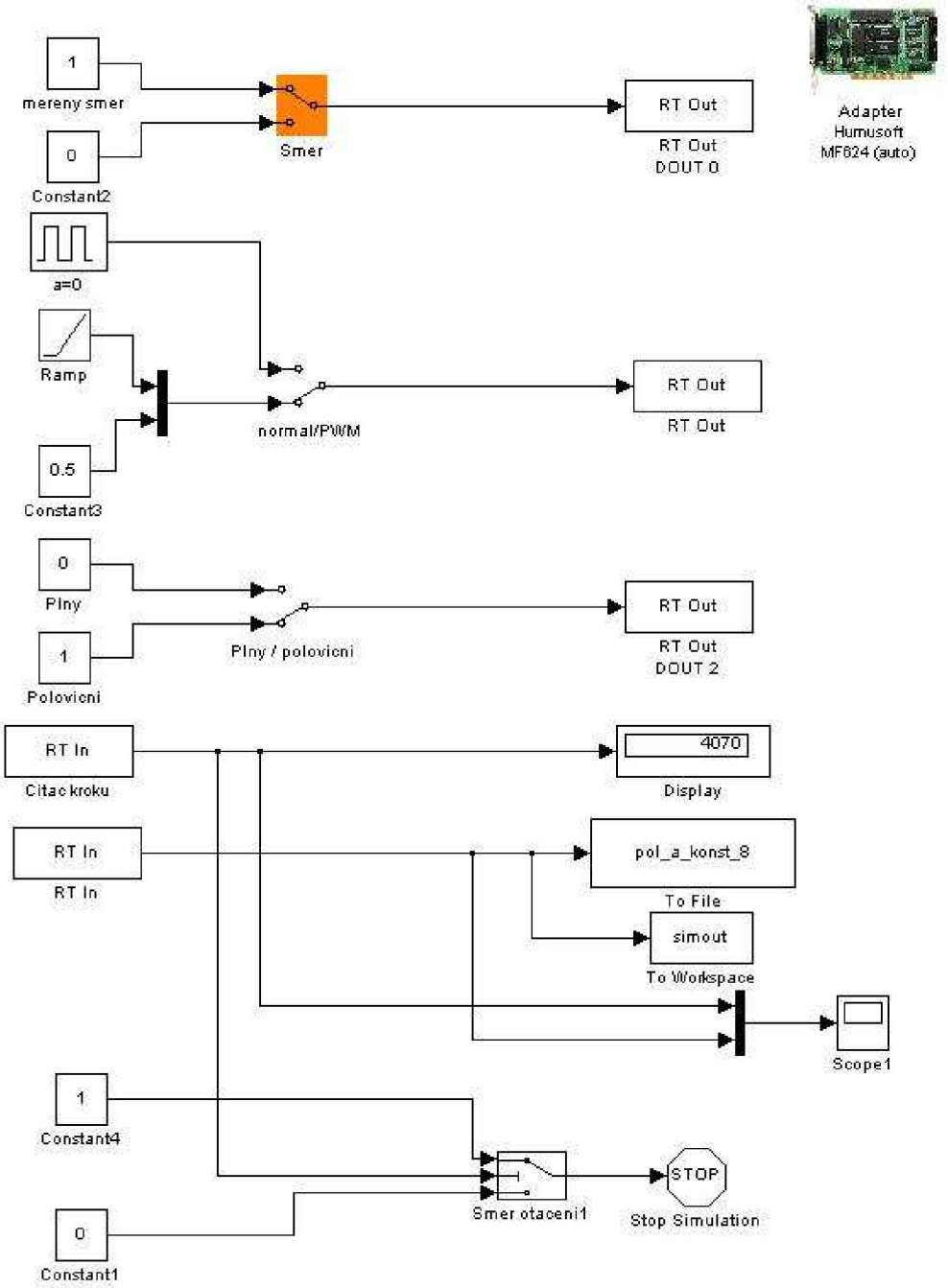
IRC0A+	1	20	IRC3A+
IRC0A-	2	21	IRC3A-
IRC0B+	3	22	IRC3B+
IRC0B-	4	23	IRC3B-
IRC0I+	5	24	IRC3I+
IRC0I-	6	25	IRC3I-
IRC1A+	7	26	TRIG
IRC1A-	8	27	
IRC1B+	9	28	+5 V
IRC1B-	10	29	GND
IRC1I+	11	30	Count0 (T0IN)
IRC1I-	12	31	T0OUT
IRC2A+	13	32	Count1 (T1IN)
IRC2A-	14	33	T1OUT
IRC2B+	15	34	Count2 (T2IN)
IRC2B-	16	35	T2OUT
IRC2I+	17	36	Count3 (T3IN)
IRC2I-	18	37	T3OUT
GND	19		

Tab. A.2: Rozmístění I/O signálů na konektoru X2 karty MF624, zdroj: [6]

Vysvětlivky zkratek uvedených v tab. A.2:

IRC0 - IRC3	kvadraturní a indexové vstupy pro inkrementální snímače polohy
T0IN - T3IN	vstupy čítačů Count0 až Count3
T0OUT - T3OUT	výstupy časovačů Timer0 až Timer3
+5 V	napájení + 5 V, výstup
GND	digitální zem, výstup

A.3 Model pro měření polohy potenciometrem



Obr. A.1: model_graf_a_v.mdl

A.4 stat_char_acc_SIMULACE.m

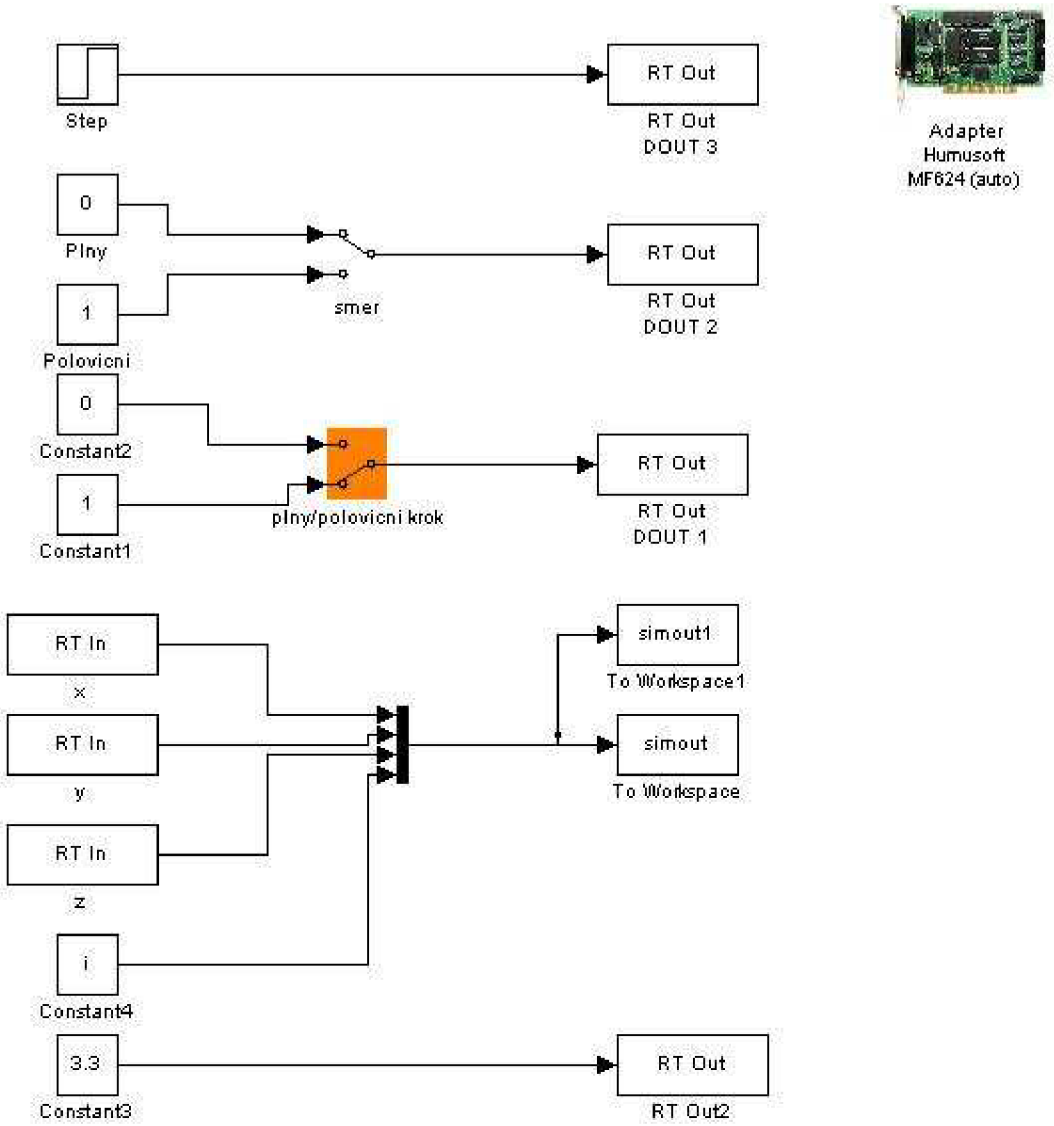
Tento skript slouží pro odsimulování a vyhodnocení statických charakteristik akcelerometru.

```
% stat_char_acc_SIMULACE.m
%%
%namereni dat
clc,clear;close all;
vystup=[];
for i=1:110, %smyčka kolikrát se bude opakovat simulace
 'Probiha mereni cislo:'
 i
 vstup=i;
 sim('model_stat_char_acc.mdl',[0,60]);%% délka simulace [t_0,t_stop]
 vystup=[vystup; simout];
end;
save vystup
'data jsou namerena, bude nasledovat zpracovani a vizualizace'
%%
%kalibrace
x_g0=0.3131;%kalibrace x-ove osy
y_g0=0.3224;%kalibrace y-ove osy
z_g0=0.31825;%kalibrace z-ove osy
 %prevod z voltu na stupne
a=vystup(:,1);%x-ova osa
for i=1:length(a)
    vystup(i,1)=vystup(i,1)-x_g0;
    vystup(i,1)=asind(vystup(i,1));
end
b=vystup(:,2);%y-ova osa
for i=1:length(b)
    vystup(i,2)=vystup(i,2)-y_g0;
    vystup(i,2)=asind(vystup(i,2));
end
c=vystup(:,3);%z-ova osa
for i=1:length(c)
    vystup(i,3)=vystup(i,3)-z_g0;
    vystup(i,3)=asind(vystup(i,3));
end
%%
%filtrovani (jen pro nahled na signal bez sumu)
krok=vystup(:,4);
orig=vystup(:,1);
okno=100;
avg1=orig;
time=length(orig);
   for k=1:(time-okno);
       avg1(k)=mean(avg1(k:k+okno-1));
   end;
orig=vystup(:,2);
okno=100;
avg2=orig;
time=length(orig);
```

```
   for k=1:(time-okno);
       avg2(k)=mean(avg2(k:k+okno-1));
   end;
orig=vystup(:,3);
okno=100;
avg3=orig;
time=length(orig);
   for k=1:(time-okno);
       avg3(k)=mean(avg3(k:k+okno-1));
   end;
%%
%prirazeni promennych
xf=avg1; yf=avg2; zf=avg3;%filtrovana data
xnf=vystup(:,1);ynf=vystup(:,2);znf=vystup(:,3);%nefiltrovana data
xnfkrok=[xnf krok];ynfkrok=[ynf krok];znfkrok=[znf krok];%vytvoreni 2-
elementovych ciselnych vektoru
%%
%zobrazeni grafu
plot(xf,'r')
hold on
plot(yf,'g')
hold on
plot(zf,'b')
grid on
legend('x','y','z');
xlabel('Pocet namerenych vzorku [-]');
ylabel('Natoceni plosinky [stupne]');
title('Prubeh natoceni plosinky-filtrovane data');
figure
plot(xnf,'r')
hold on
plot(ynf,'g')
hold on
plot(znf,'b')
grid on
legend('x','y','z');
xlabel('Pocet namerenych vzorku [-]');
ylabel('Natoceni plosinky [stupne]');
title('Prubeh natoceni plosinky-nefiltrovane data');
%%
%zobrazeni histogramu
figure
hist3(xnfkrok,[30 30])
xlabel('Natoceni plosinky [stupne]');
ylabel('Krokovani motoru [1 krok = 3.6 stupne]');
zlabel('Pocet vzorku [-]');
title('Histogram cetnosti namerenych dat x-ove osy');
figure
hist3(ynfkrok,[30 30])
xlabel('Natoceni plosinky [stupne]');
ylabel('Krokovani motoru [1 krok = 3.6 stupne]');
zlabel('Pocet vzorku [-]');
title('Histogram cetnosti namerenych dat y-ove osy');
figure
hist3(znfkrok)
xlabel('Natoceni plosinky [stupne]');
```

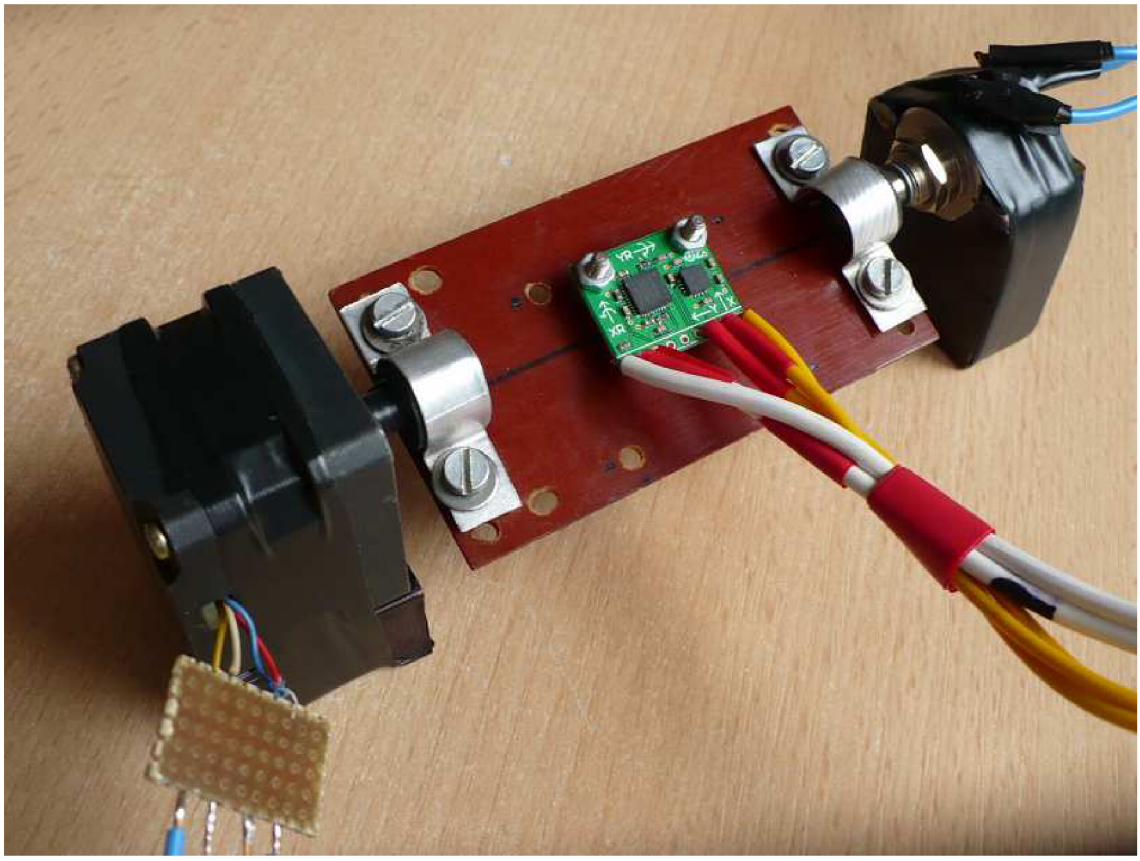
```
ylabel('Krokovani motoru [1 krok = 3.6 stupne]');
zlabel('Pocet vzorku [-]');
title('Histogram cetnosti namerenych dat z-ove osy');
```

A.5 Model pro měření statických charakteristik akcelerometru

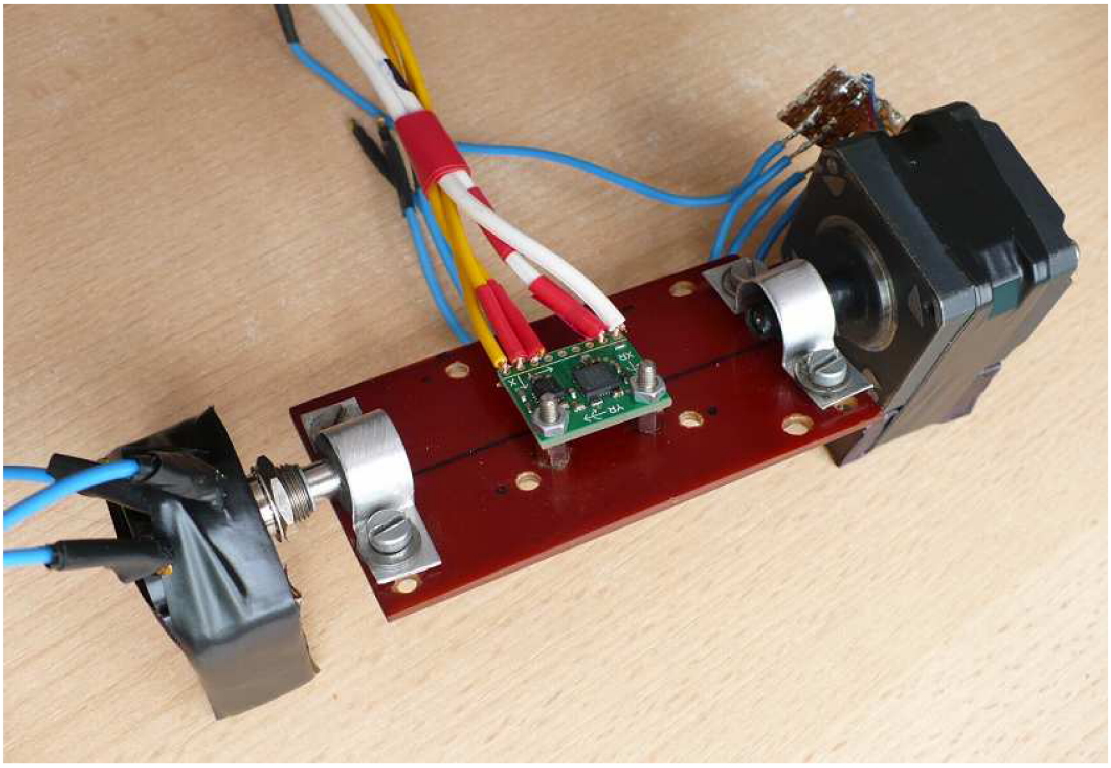


Obr. A.2: model_stat_char_acc.mdl

A.6 Konstrukce plošinky



Obr. A.3: Fotografie konstrukce plošinky



Obr. A.4: Fotografie konstrukce plošinky

B Seznam příloh na CD

Složka *Malina_BP_2009* obsahuje následující soubory:

- stat_char_acc_SIMULACE.m
- model_stat_char_acc.mdl
- stat_char_acc_IMPORT.m
- import_data.mat
- Malina_BP_2009.pdf