

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

AKTIVNÍ TLUMENÍ ZÁKLADŮ ELEKTRICKÝCH STROJŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

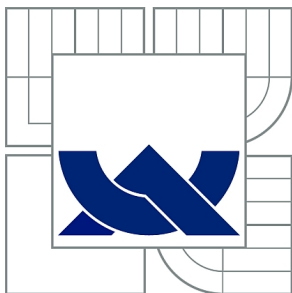
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

FRANTIŠEK VAŠKE

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

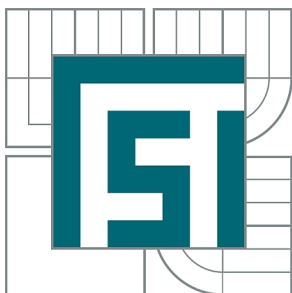
Ing. RADEK VLACH, Ph.D.

BRNO 2010



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

AKTIVNÍ TLUMENÍ ZÁKLADŮ ELEKTRICKÝCH STROJŮ

ACTIVE DAMPING OF ELECTRIC MACHINES PLATFORM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

FRANTIŠEK VAŠKE

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. RADEK VLACH, Ph.D.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): František Vaške

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:

Aktivní tlumení základů elektrických strojů

v anglickém jazyce:

Active Damping of Electric Machines Platform

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem je vytvoření experimentálního modelu a vyvinutí systému aktivního tlumení, který utlumí vibrace na dostatečně nízkou úroveň. Cílem práce v této oblasti není vytvoření systému aktivního tlumení, který by odstraňoval veškeré vzniklé vibrace.

Cíle bakalářské práce:

literární průzkum

matematický model aktivního tlumení

realizace experimentálního modelu

ověření funkce

Seznam odborné literatury:

- [1] Noskievič P. : Modelování a identifikace systémů, Ostrava 1999
- [2] Grepl R. a kol. : Mechatronika vybrané problémy , Brno 2008

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Radek Vlach, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 20.11.2009

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem experimentálního modelu aktivního tlumení základů elektrických strojů, jeho matematickým popisem a řízením pomocí počítače. Porovnává různé možnosti realizace tohoto modelu, jejich fyzikální principy a proveditelnost. Obsahuje popis vytvořeného modelu a použité řídicí metody.

Abstract

This thesis deals with a design of an experimental model of active damping of electric machinery platform, its mathematical description and control through the use of a computer. It compares various ways of construction, their physical principles and feasibility. The thesis also contains a description of the model made and of the way it is controlled.

Klíčová slova

tlumení, aktivní tlumení, elektromagnetické tlumení, tlumení základů strojů

Keywords

damping, active damping, electromagnetic damping, machinery platform damping

Poděkování

Děkuji Josefu Vejlupkovi a Františku Zelinovi za trpělivost s mými dotazy.

Čestné prohlášení

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

František Vaške, Brno, 2010

Obsah

1 Úvod	6
2 Formulace problému	7
2.1 Možné způsoby realizace aktivního tlumiče	7
2.1.1 Předepínání lineárních pružin	7
2.1.2 Pneumatický tlumič	9
2.1.3 Elektromagnet	9
3 Experimentální model	10
3.1 Mechanické prvky a parametry modelu	10
3.1.1 Hmotnost a rozměry	10
3.1.2 Motor	11
3.1.3 Pružiny	11
3.1.4 Ložiskové jednotky	11
3.1.5 Nevývaha	11
3.1.6 Hřídel	12
3.2 Elektrické prvky modelu	12
3.2.1 Real-time karta MF624	12
3.2.2 Elektromagnet	13
3.2.3 Enkodér	13
3.2.4 Akcelerometr	15
3.2.5 PWM modul	16
3.2.6 Zdroj proudu řízený napětím	17
3.3 Identifikace parametrů modelu	18
3.3.1 Identifikace indukčnosti cívky magnetu	18
3.3.2 Identifikace součinitele tlumení	19
3.3.3 Identifikace tuhosti pružin	21
4 Matematický model	22
4.1 Mechanická rovnice	22
4.1.1 Průběh budič síly	23

4.1.2	Síla elektromagnetu	23
4.2	Rovnice elektrického obvodu	24
4.2.1	Nárůst proudu emitorovým odporem	24
4.2.2	Stabilizace proudu	24
4.2.3	Konec řídicího impulsu	25
5	Simulace a řízení v programu MatLab Simulink	26
5.1	Soustava bez aktivního tlumení	26
5.2	Simulace soustavy s magnetem	27
5.2.1	Magnet jako odpor proměnlivé velikosti	27
5.2.2	Magnet spínaný podle směru kmitů	29
5.3	Řízení v Simulinku pomocí Real Time toolboxu	30
5.4	Komplexní simulace a její porovnání s naměřenými daty	31
6	Závěr	33
7	Literatura a odkazy	34
8	Použité symboly	35
9	Seznam příloh	36

1 Úvod

Vibrace představují při provozu strojních zařízení vážný problém způsobující velké materiální ztráty. Jedná se zejména o únavové namáhání jednotlivých částí stroje vedoucí k nečekaným a velmi často nebezpečným poruchám, jako jsou prasknutí rámu stroje nebo šroubů, kterými je stroj uchycen k základně. Mimo tyto zpravidla neopravitelné poruchy vibrace výrazně snižují životnost pohyblivých komponent, například ložisek, což zvyšuje náklady na provoz stroje. Dalším nezanedbatelným faktorem je také hlučnost, která znepráhňuje obsluhu stroje a ve větší míře může být i zdraví škodlivá. Hlavní motivací této práce je prozkoumat alternativy tlumení vibrační soustrojí spalovací motor - generátor vyskytujícího se například v lokomotivách. Klasickými tlumiči bývá problém utlumit vibrace v dostatečném rozsahu měnících se frekvencí, cílem této práce je tedy navrhnout a zrealizovat alternativní aktivní tlumič a zhodnotit jeho použitelnost vzhledem k výše nastíněné problematice.

2 Formulace problému

Pojem aktivního tlumení lze v zásadě chápat dvojím způsobem. Zaprvé jako snahu silově kompenzovat vnější zatížení tak, aby soustava spojená s tlumičem (například kabina automobilu) zůstávala pokud možno v klidu. Tento způsob se uplatňuje zejména tam, kde má budicí síla značně proměnlivý a nepředvídatelný charakter. Hlavní, i když v praxi nedosažitelnou, výhodou tohoto způsobu je možnost zcela odstranit účinky rázů působících na soustavu. Za nevýhodu lze, vzhledem k nutnosti reagovat na každý ráz vnějších sil, potom považovat vyšší energetickou náročnost oproti druhé metodě. Tento způsob tlumení bývá použit zejména u podvozků dopravních prostředků nebo například k aktivnímu odhlučnění. Druhým přístupem je přizpůsobení parametrů tlumicí soustavy průběhu vnějšího zatížení. Je zřejmé, že tuto metodu lze úspěšně aplikovat pouze tam, kde má budicí síla do značné míry periodický a plynule se měnící průběh. Na rozdíl od první metody je tedy potřeba akčního zásahu pouze tehdy, dojde-li ke změně periodického průběhu zatěžující síly. Je tedy řeč například o tlumení vibrační lopatek turbíny nebo, což je tématem této bakalářské práce, vibrační uložení elektromotoru spojeného hřídelí se spalovacím motorem. Je tedy zřejmé, že pro návrh účelného a efektivního aktivního tlumiče je potřeba znát charakter jeho zatěžování. Samozřejmě nelze říct, že by nešlo první variantu úspěšně použít i pro utlumení periodických dějů, ale vzhledem k tomu, že by akční zásah byl pokaždé stejný, jeví se toto řešení jako zbytečně komplikované a neefektivní.

2.1 Možné způsoby realizace aktivního tlumiče

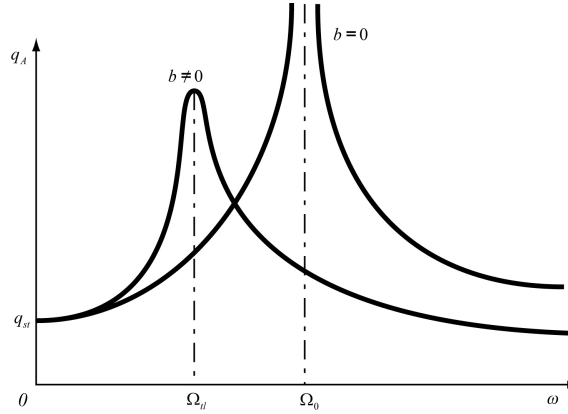
Jak již bylo předesláno, cílem této práce je realizace modelu tlumení uložení soustrojí spalovací motor - generátor. Vzhledem k charakteru zadání bude mít budicí síla zjevně periodický, plynule se měnící průběh. Jako výhodnější ze dvou výše nastíněných variant se tedy jeví přizpůsobitelný pasivní tlumič. V úvahu přicházely následující možnosti.

2.1.1 Předepínání lineárních pružin

V tomto případě princip tlumení spočívá ve snaze o udržení kmitání soustavy v pásmu co nejvzdálenějším rezonanční frekvenci. To znamená podle změřené frekvence budicí síly (snímané pomocí akcelerometru) upravovat rezonanční frekvenci soustavy podle vztahu [1]

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.1)$$

a udržovat kmitání buď v nadrezonančním, nebo podrezonančním režimu. Princip metody je dobře patrný z obrázku 2.1.1, amplitudo-frekvenční charakteristiky kmitající soustavy s jedním stupněm volnosti, kde na vodorovné ose je úhlová frekvence ω budící síly a na svislé amplituda. V případě, že je tlumení $b=0$, roste maximální výchylka nade všechny meze. To však není v praxi uskutečnitelné.



Obrázek 2.1: amplitudo-frekvenční charakteristika

Z rovnice (2.1) je patrné, že změny rezonanční frekvence soustavy lze dosáhnout buď úpravou hmotnosti nebo tuhosti pružin. Hmotnost soustavy je neměnná, nezbyvá proto než upravovat tuhost pružin. Toho lze nejsnadněji dosáhnout předepnutím pomocí matice, podobně jako například u motocyklového nebo cyklistického tlumiče.

Pohybová rovnice soustavy bez předepnutí pružin s harmonickou budící silou je podle [1]:

$$m\ddot{x}(t) = +b\dot{x}(t) + kx(t) = F_0 \sin \omega t. \quad (2.2)$$

Při předepnutí přibude do rovnice člen kx_p , kde x_p je vzdálenost, o kterou byly pružiny předepnuty. Tento člen představuje dodatečnou sílu, kterou musí buzení překonat pro rozkmitání soustavy. Dochází tedy i ke změně vlastní rezonanční frekvence soustavy a rovnice 2.2 bude mít tvar:

$$m\ddot{x}(t) = +b\dot{x}(t) + kx(t) + kx_p = F_0 \sin \omega t \quad (2.3)$$

Jak je z předchozího patrné, nelze tento systém využít pro dynamickou kompenzaci působících sil. Vlastní realizace se navíc jevila jako příliš komplikovaná z mechanického hlediska, a proto bylo od této varianty upuštěno.

2.1.2 Pneumatický tlumič

Tato varianta počítá s využitím pneumatického pístu a možností snadné změny tlaku v něm. Přepouštění stlačeného vzduchu do pístu a naopak upouštění z něj by probíhalo pomocí proporcionálního redukčního ventilu, zařízení (obr. 2.2), které je schopno podle řídicího napětí udržovat daný tlak na výstupu.



Obrázek 2.2: proporcionální redukční ventil [2]

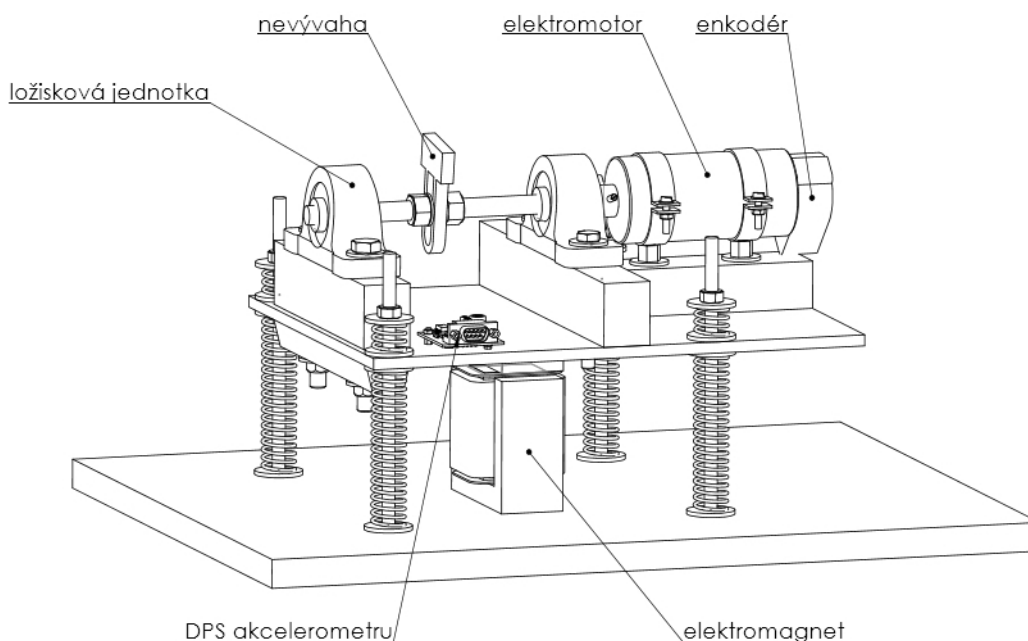
Protože se však tlak v pístu v průběhu jeho kroku mění, bylo by potřeba stejně rychle ovládat i ventil (nestačilo by upravit tlak při změně průběhu zatěžování), a to je bod, kde řešení narazilo na mezní parametry ventilů na trhu [2]. Ty mají běžně odezvu okolo 20 ms, což při předpokládané frekvenci budicí síly 20-50 Hz nestačí pro účinné řízení. Dalším problémem se ukázal být samotný píst. Pneumatické tlumiče bývají využívány pro utlumení sil v řádech stovek Newtonů působících s periodou nejméně jednotek sekund po relativně dlouhé dráze. Zadáání této práce ale spočívá v kompenzaci síly řádově menší, s kratší periodou, a výchylek nejvýše v řádu milimetrů. Velmi pravděpodobně by tedy ani nedošlo k překonání statického odporu pístu a tlumič by jako takový nefungoval. Navíc vzhledem k vysoké pořizovací ceně součástí a zjevné nelinearitě problému se toto řešení jeví jako nevhodné.

2.1.3 Elektromagnet

Další uvažovanou a nakonec i realizovanou (viz. níže) možností bylo použití elektromagnetu v kombinaci s tlačnými pružinami coby aktivního (řízeného) členu v tlumicí soustavě. Vhodně navržený elektromagnet představuje velmi účinný a dynamický akční člen. Jako jedinou z uvažovaných lze tuto variantu použít pro oba způsoby tlumení nastíněné výše. Nevýhodou je potom nutnost neustálého napájení.

3 Experimentální model

Tato kapitola obsahuje popis praktické realizace experimentálního modelu, jednotlivých jeho součástí a principů jejich funkce. Dále potom identifikaci parametrů soustavy použitých ve výpočtovém modelu a simulaci.



Obrázek 3.1: experimentální model, fotografie v příloze 7

3.1 Mechanické prvky a parametry modelu

3.1.1 Hmotnost a rozměry

- celková hmotnost (bez magnetu/s magnetem) - 6/8.3kg
- hmotnost pohyblivé části (bez magnetu/s magnetem) - 4.9/5.1kg
- výška x šířka x hloubka - 250 mm x 500 mm x 400 mm

3.1.2 Motor

Je použit stejnosměrný elektromotor firmy Transmotec s parametry [3] :

- model: PD52103-OE
- jmenovité napětí: 24 V
- otáčky na prázdno: 3600/min
- jmenovitý výkon: 52.8 W
- hmotnost s enkodérem: 930 g

Motor byl od výrobce vybaven enkodérem a planetovou převodovkou s převodovým poměrem 39/1, ta byla pro účely této bakalářské práce odstraněna.

3.1.3 Pružiny

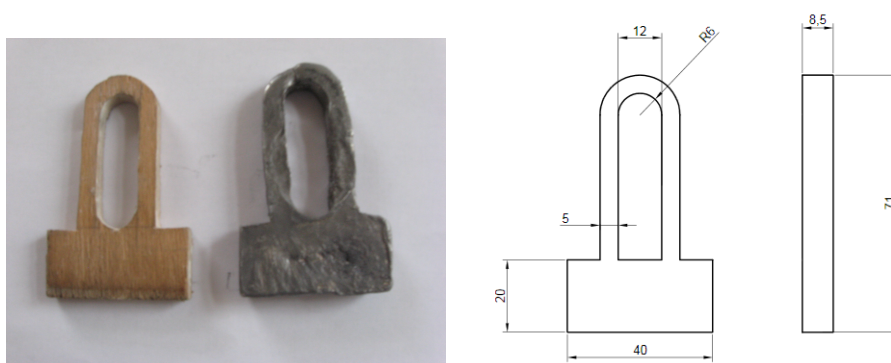
Jako pasivní prvek tlumení jsou využity čtyři stejné lineární tlačné pružiny předepjaté shora pomocí dalších čtyř pružin. Tím je do maximální výchylky odpovídající délce předepnutí zaručeno zachování odporu pružin.

3.1.4 Ložiskové jednotky

Jsou použity standardní ložiskové jednotky UCP 201 s jednořadým kuličkovým ložiskem s vnitřním průměrem 12 mm.

3.1.5 Nevývaha

Použitá nevývaha je olověný odlitek odlitý do sádrové formy. K výrobě formy posloužil dřevěný model excentru. Model i hotový excentr jsou na obrázku [3.2] vlevo.

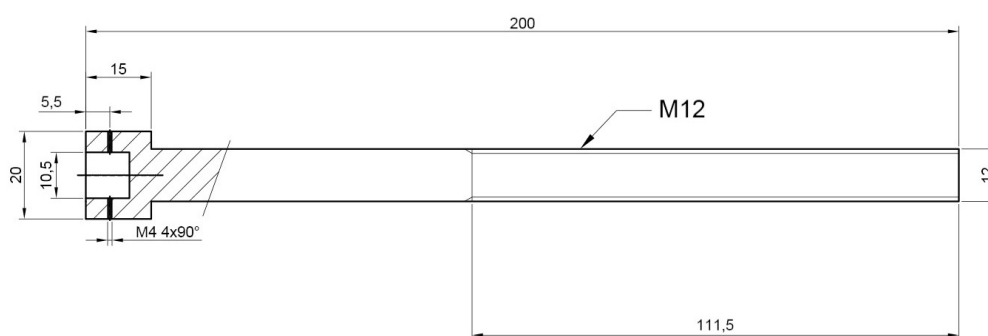


Obrázek 3.2: nevývaha

Nevývaha má hmotnost 130 g, přičemž ve spodní obdelníkové části je soustředěno 80 g. Jak je patrné z výkresu (obr. 3.2), maximální možná excentricita je 50 mm. Na modelu je nevývaha připevněna s excentricitou 35 mm.

3.1.6 Hřídel

Hřídel je vyrobena z nástrojové oceli a obrobena na soustruhu. Je nasunuta na hřídelový konec vystupující z elektromotoru a zajištěna jisticími šrouby. Závit slouží k uchycení nevývahy pomocí dvou matic.



Obrázek 3.3: výkres hřídele

3.2 Elektrické prvky modelu

3.2.1 Real-time karta MF624

Měřicí a zároveň řídicí prvek celého modelu představuje počítačová karta MF624. Real-time karta je připojená do PCI sběrnice, obsahuje řadu analogových i digitálních vstupů a výstupů společně s obvody pro zpracování a filtraci signálu v reálném čase. Karta MF624 spolupracuje s programem Simulink prostřednictvím modulu Real Time Toolbox, který obsahuje bloky pro obsluhu vstupů a výstupů karty. K realizaci modelu byly využity následující porty karty [4]:

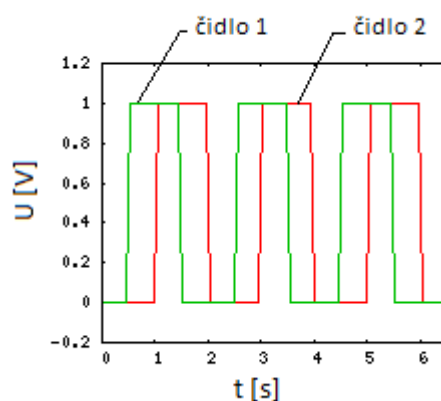
- 14bitový analogový vstup s rozsahem ± 10 V - snímání signálu z akcelerometru
- digitální výstupy s úrovněmi TTL - logické vstupy akcelerometru a spínání proudového zdroje
- enkodérový vstup - snímání otáček motoru
- výstup časovače - pro PWM řízení motoru

3.2.2 Elektromagnet

Elektromagnet je magnetický obvod se vzduchovou mezerou, kde jsou některé díly obvodu pohyblivé [10]. Magnet použitý na modelu je původně tlumivka a je pro minimalizaci ztrát vířivými proudy vyroben z transformátorových E plechů. Pohyblivá část, připevnená na pohyblivé desce, je potom z I plechů. Aktivní prvek tlumení v modelu je realizován právě prostřednictvím tohoto elektromagnetu. Z hlediska chování magnetu v elektrickém obvodu i mechanické soustavě je jeho jediným důležitým parametrem indukčnost, jejíž identifikace je popsána níže.

3.2.3 Enkodér

Enkodér je snímač polohy rotujících součástí (hřídelů, kol atd.). Principem měření je zjišťování přítomnosti nebo nepřítomnosti libovolného snadno detekovatelného prvku (reflexní plocha, otvor, magnet). Při průchodu tohoto prvku kolem pevně uchyceného snímače vzniká obdelníkový (digitální) signál (napětí), ze kterého lze, při znalosti počtu impulzů na otáčku, získat informaci o natočení kola [5]. Je-li potřeba získat kromě polohy informaci o směru otáčení, umísťuje se na enkodér druhý snímač umístěný čtvrtinu otáčky od prvního. Signál z něj je potom posunut o polovinu délky impulsu (obr. 3.4). Z pořadí těchto signálů je možné určit směr otáčení kola.



Obrázek 3.4: výstupní signál enkodéru [5]

Enkodéry používané v průmyslové praxi bývají nejčastěji magnetické nebo optické. Magnetické enkodéry mají po obvodu rotující části pravidelně rozmístěny permanentní magnety a jako senzor Hallovu sondu. Vzhledem k fyzickým rozměrům magnetů je však nelze vytvořit s více než desítkami pulzů na otáčku, což často pro

přesné řízení nestačí. Optické enkodéry nejčastěji využívají k detekci světelného paprsku fototranzistor. Existují dvojího druhu. Odrazivé (obr. 3.5), které mají na rotujícím kotouči rozmístěny reflexní plošky a senzor mají tedy umístěn na stejné straně jako zdroj světla. Vzhledem k tomu, že při odrazu dochází nezbytně k rozptylu světla, nelze ani u tohoto typu enkodéru vytvořit příliš jemný vzor detekovaných prvků. Nejjemnější rozlišení a tedy i největší přesnosti při řízení dosahují štěrbinové optické enkodéry. Ty mají po obvodu rotujícího disku úzké štěrbiny, které v závislosti na natočení buď propouštějí, nebo stíní světelný paprsek, jehož zdroj se nachází na opačné straně disku než detekční fototranzistor. Tohoto druhu je i enkodér použitý na experimentálním modelu. Výše uvedené typy představují tzv. inkrementální enkodéry, jsou schopné určit jen přírůstek natočení oproti výchozí poloze. Vedle nich existují i tzv. absolutní enkodéry, které udávají polohu v rámci jedné otáčky kola. Ty mají detekované prvky umístěny v několika úrovních tak, že každá jejich kombinace představuje jednu pozici natočení. Na obrázku 3.5 je kotouč absolutního reflexního enkodéru pro osm poloh a tři senzory. Je patrné, že absolutní enkodéry potřebují oproti inkrementálním vyšší počet čidel odpovídající požadovanému rozlišení.



Obrázek 3.5: absolutní odrazivý enkodér [5]

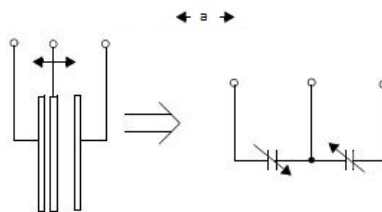
Enkodér použitý na modelu je typ dodaný výrobcem společně s motorem. Vybrané parametry [3]:

- štěrbinový optický enkodér
- 1000 pulzů za otáčku
- fázový posun 90°
- maximální frekvence 25 kHz
- napájení 5 V
- konektor Canon 9 F

Zapojení enkodéru ke kartě MF624 je v *Příloze 1*.

3.2.4 Akcelerometr

Akcelerometr je čidlo využívající setrvačnosti hmoty pro měření rozdílu mezi kinematickým zrychlením (vzhledem k určitému inerciálnímu prostoru) a gravitačním zrychlením. Jeho princip si lze představit jako hmotu připevněnou na pevně uchycené pružině, která svým pohybem reaguje na působící zrychlení. Napnutí pružiny potom poskytuje údaj o velikosti zrychlení. V konstrukci akcelerometrů jsou nejčastěji využívány dva principy, piezoelektrický a kapacitní. Existují i další, například indukční nebo laserové akcelerometry, nicméně první dva druhy výrazně převažují. Snímače využívající piezoelektrického jevu obsahují nejčastěji křemíkový monokrystal schopný při vnějším zatížení (stlačení) generovat napětí. Pro zvýšení citlivosti obsahuje často jeden akcelerometr několik paralelně spojených krystalů. Kapacitní akcelerometr, který je použit pro tento model, si lze představit jako mechanickou konstrukci z polovodičových materiálů, kdy se mezi dvěma pevnými plochami pohybuje volně deska reagující na zrychlení (obr. 3.6 [6]). Jak se mění velikost jednotlivých mezer, mění se zároveň i elektrická kapacita mezi nimi, a tím i měřitelné napětí [7].

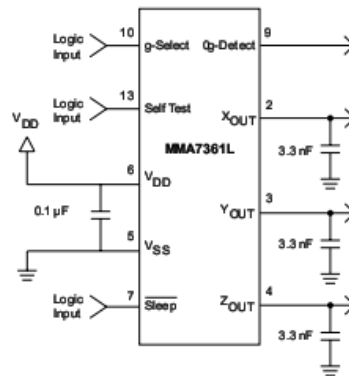


Obrázek 3.6: princip kapacitního akcelerometru

Na modelu je akcelerometr využíván k určení směru pohybu a jako zdroj referenčních dat o účinnosti tlumení. Je použit typ MMA7361L od firmy Freescale semiconductor v katalogovém zapojení [6]. Schéma (obr. 3.7) je upraveno pro napájení 5 V, které poskytuje měřicí karta. Logické vstupy mají předřazeny odporové děliče pro použití logických úrovní TTL. Narozdíl od nich totiž senzor vyžaduje logickou 1 v rozmezí 0.7- U_{cc} (3.3V).

Akcelerometr není do desky s ostatními obvody napevno zaletován, ale je umístěn na vlastní malé DPS, která je zasunuta v desetipinové zásuvné patici (*Příloha 2*). To v případě potřeby umožňuje snadnou výměnu čidla s nutností výměny minima součástek. Piny 1, 2 a 3 jsou napěťové výstupy pro jednotlivé osy X, Y a Z. Piny 7 až 10 jsou logické vstupy pro vypnutí sleep modu, nastavení rozsahu měření (1.5 g, nebo 6 g) a self test [6]. Deska plošných spojů, seznam použitých součástek a zapojení DPS ke kartě MF624 se nachází v *Příloze 2*.

Signál získávaný z akcelerometru je bohužel zatížen poměrně velkým šumem, který bylo možno jen obtížně filtrovat, protože má přibližně stejný kmitočet jako signál samotný.



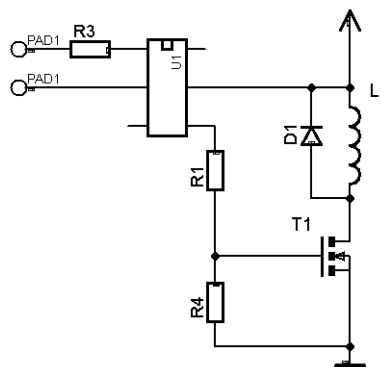
Obrázek 3.7: katalogové zapojení akcelerometru

3.2.5 PWM modul

Pulzní šířková modulace (Pulse Width Modulation) je metoda přenosu úrovně analogového signálu pomocí obdelníkových napěťových pulzů konstantní velikosti s proměnlivým poměrem délky zapnutí a periody (střídou). Přenesený signál potom odpovídá rovnici (3.1)

$$\frac{t_{on}}{T} = \frac{U_{sig}}{U_{max}}. \quad (3.1)$$

Hlavní výhodou PWM je možnost řídit stejnosměrný elektromotor, kde je rychlost otáček úměrná velikosti napájecího napětí, logickým signálem s využitím počítače a spínacích prvků (MOSFET). Tohoto principu je využito i na tomto experimentálním modelu. Vzhledem k charakteru úlohy není potřeba řídit směr otáček ani motor brzdit. Proto postačí prosté zapojení s jedním tranzistorem MOSFET namísto kompletního H-můstku (obr. 3.8).



Obrázek 3.8: schéma PWM modulu

Jako zdroj signálu slouží výstup časovače karty MF624. Optočlen U1 je použit pro galvanické oddělení zemí počítače a napěťového zdroje jako ochrana před zemními smyčkami. Obvod funguje tak, že při průchodu signálu přes optočlen LED dioda v něm otevře fototranzistor. Díky tomu vznikne úbytek napětí na odporu R2, které je zároveň i na GS přechodu MOSFET tranzistoru T1. To způsobí jeho plné otevření a umožní průchod proudem motorem.

Příloha 3 obsahuje desku plošných spojů, seznam použitých součástek a zapojení DPS ke kartě MF624.

3.2.6 Zdroj proudu řízený napětím

Síla, kterou je elektromagnet schopen vyvinout, je [11]:

$$F_m = \frac{\partial W}{\partial d} . \quad (3.2)$$

Energie ve vzduchové mezeře W je závislá na indukčnosti cívky magnetu a procházejícím proudem:

$$W = -L(d) \cdot i^2 . \quad (3.3)$$

Je tedy zřejmé, že má-li magnet působit danou silou, je lepší k jeho napájení využít zdroje konstantního proudu místo zdroje napětí. Zdroj proudu je obvod, který je schopen dodávat i při proměnlivé velikosti zátěže definovaný proud. Použitý zdroj (obr. 3.9) pracuje na jednoduchém principu [8], kdy je referenční (řídící) napětí připojeno na bázi tranzistoru, a tedy paralelně k přechodu BE a emitorovému odporu. Musí tedy platit:

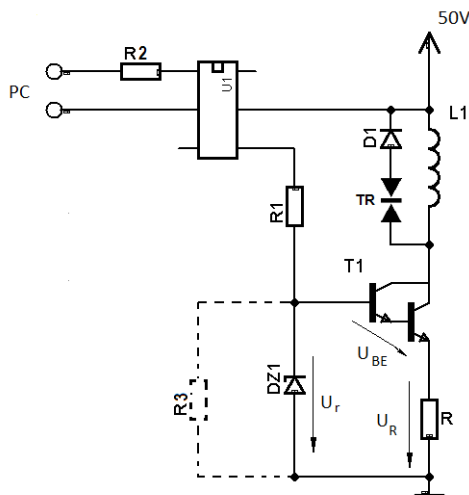
$$u_r = u_{BE} + u_E \quad (3.4)$$

A protože u_r je konstantní, je tranzistor nucen se při měnící se zátěži otvírat a zavírat tak, aby udržel konstantní i úbytek napětí u_R , a tedy i emitorový proud. Při zanedbání bázevého proudu lze psát:

$$i_C \cong i_E = \frac{u_r - u_{BE}}{R} \quad (3.5)$$

Napájecí napětí bylo zvoleno 50 V, jedná se o maximální bezpečné stejnosměrné napětí. Zdroj byl navržen tak, aby dodával kolektorový proud $I_c = 1A$, vzhledem k hodnotám exitujících součástek je však skutečná hodnota $I_c = 0.96$. Naznačený rezistor R3 přispívá k rychlému odeznění řídícího napětí, v reálném zapojení však není použit, protože Darlingtonův tranzistor obsahuje rezistor plnící obdobnou funkci [9]. Transil TR umožňuje rychlé odeznění proudu cívkou a tím přibližuje jeho průběh žádanému obdelníkovému průběhu (viz 4.2).

Seznam použitých součástek a DPS jsou v *Příloze 4*.



Obrázek 3.9: zdroj proudu

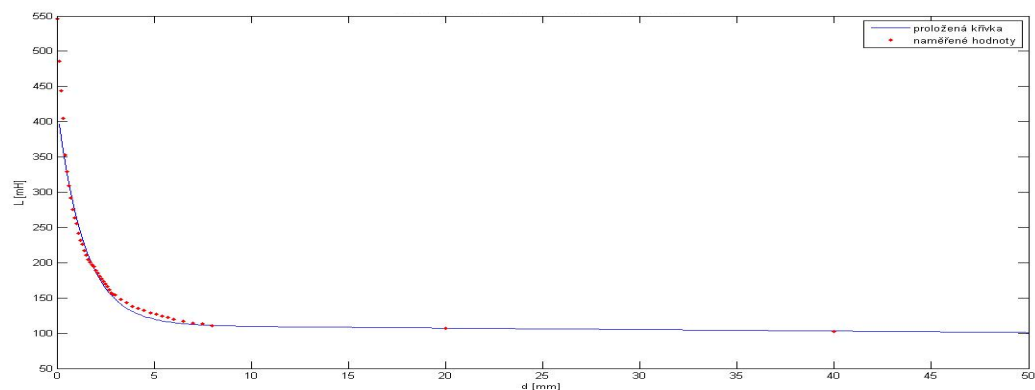
3.3 Identifikace parametrů modelu

Aby bylo možné sestavit odpovídající matematický model je potřeba znát všechny potřebné parametry popisované soustavy. Pro mechanický oscilátor jsou to hmotnost, tuhost pružin a součinitel tlumení. Hmotnost kmitající části byla změřena na běžné domácí váze (viz. 3.1.1). Tuhost pružin a velikost součinitele tlumení byly určeny pomocí průběhů kmitů získaných pomocí akcelerometru, karty MF624 a Simulinku. Měřící schéma bylo obdobné jako schéma použité pro řízení soustavy (viz. 5.7). Ke zjištění indukčnosti, která je důležitá pro popis síly elektromagnetu, byl použit digitální měřič indukčnosti.

3.3.1 Identifikace indukčnosti cívky magnetu

Pro výpočtový model je potřeba znát chování indukčnosti cívky magnetu v závislosti na velikosti vzduchové mezery. Naměřená data byla získána pomocí měřiče indukčnosti při postupném zvětšování vzduchové mezery. Hodnoty byly potom proloženy křivkou pomocí nástroje Curve Fitting tool v programu MatLab. Tato funkce představuje závislost velikosti indukčnosti na velikosti vzduchové mezery, nemá však žádnou fyzikální podstatu a její platnost je omezena na rozsah naměřených dat. Rovnice proložené křivky je:

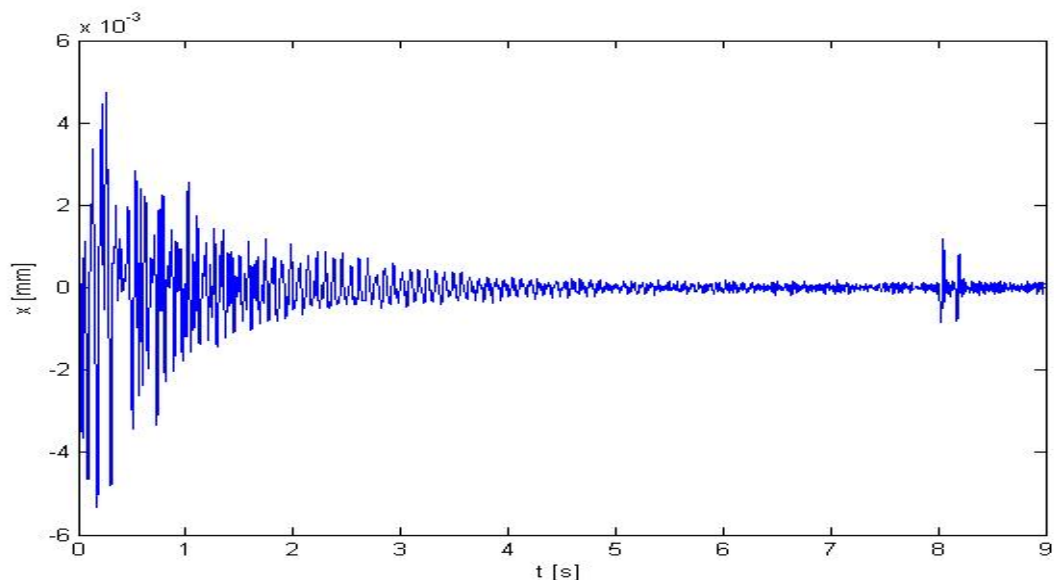
$$L = \frac{857d(t) + 3.25}{d^2(t) + 10390d(t) + 5.8} \quad (3.6)$$



Obrázek 3.10: závislost indukčnosti na velikosti vzduchové mezery

3.3.2 Identifikace součinitele tlumení

Protože se reálná soustava nechová jako ideální oscilátor a není-li buzena, kmitání je postupně utlumené, je potřeba pro simulaci určit v rovnici (2.2) koeficienty představující pasivní odpory. Graf (obr. 3.11) reprezentuje doznívání kmitů soustavy. Výchylka byla naměřena pomocí akcelerometru. Z grafu je patrné, že útlum má přibližně exponenciální průběh a je ho tedy možné reprezentovat pomocí viskózního tlumení $b\dot{x}$ [1].



Obrázek 3.11: doznívání kmitů

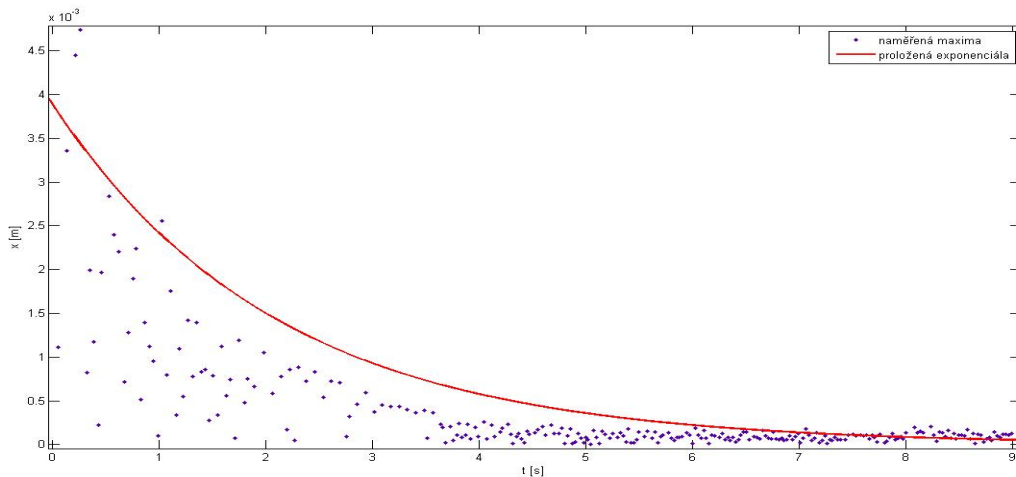
Podle [1] lze součinitel tlumení b určit z rovnice obálky křivky zatlumených kmitů, která má (pro horní část) tvar:

$$x = k \cdot e^{-\delta \cdot t} . \quad (3.7)$$

Kde δ je součinitel doznívání definovaný jako:

$$\delta = \frac{b}{2m_b} . \quad (3.8)$$

Pokud lze proložit maximy křivky na grafu (obr. 3.11) exponenciální funkci, je možné z rovnice (3.7) odvodit velikost součinitele tlumení b . Pomocí skriptu v MatLabu (Příloha 6) byla vybrána kladná maxima z grafu (obr. 3.11) a pomocí nástroje Curve Fitting tool v Matlabu jimi byla proložena exponenciála (obr. 3.12). Hodnoty výchylek mají váhu odpovídající jejich druhé mocnině, protože měření větších odchylek je méně zatíženo šumem a tyto hodnoty jsou tedy reprezentativnější. Měření proběhlo před přimontováním elektromagnetu, ve výpočtu tedy není jeho hmotnost uvažována.



Obrázek 3.12: exponenciální obálka kmitů

Proložená křivka má rovnici:

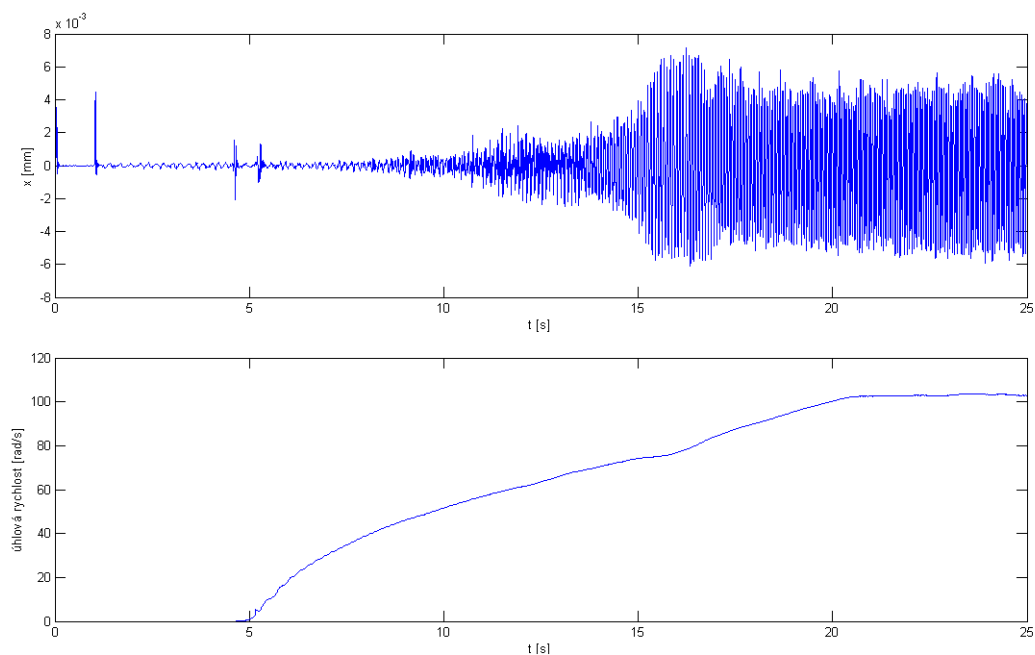
$$x = 7.9 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-1.3 \cdot t} \quad (3.9)$$

a součinitel tlumení je po dosazení vztahů (3.7) a (3.8) do (3.9):

$$b = 2 \cdot m_b \cdot 1.3 = 2 \cdot 4.9 \cdot 1.3 = 12.74 \frac{N}{ms^{-1}} . \quad (3.10)$$

3.3.3 Identifikace tuhosti pružin

Celková tuhost soustavy pružin byla určena experimentálně ze vztahu (2.1). Grafy (obr. 3.13) znázorňují průběh měření rezonanční frekvence, kdy byla postupně zvyšována úhlová rychlost hřídele a z akcelerometru byly snímány údaje o výchylce.



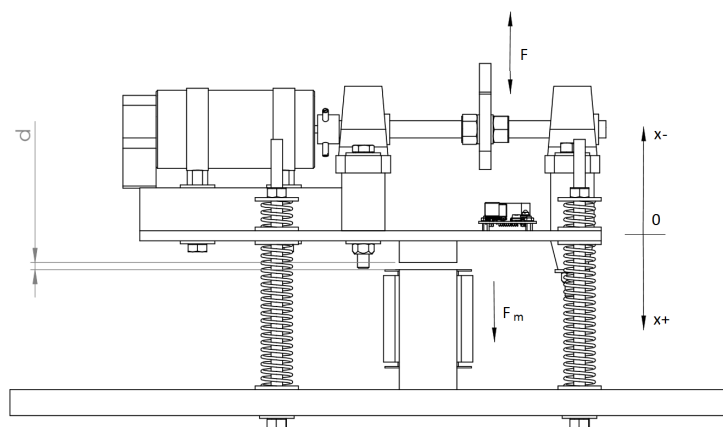
Obrázek 3.13: průběh měření rezonanční frekvence

Největší výchylky soustava dosahovala při úhlové frekvenci budicí síly $\omega = 80 \text{ rad/s}$. Při hmotnosti pohyblivé části 4.9 kg bude tedy tuhost soustavy pružin ze vztahu (2.1)

$$k = \Omega_0^2 \cdot m_b = 80^2 \cdot 4.9 = 31360 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \quad (3.11)$$

4 Matematický model

Na obrázku 4.1 je znázorněn směr souřadnic použitých v rovnicích a směry některých působících sil.



Obrázek 4.1: zavedení souřadného systému

Matematický popis soustavy sestává ze dvou diferenciálních rovnic, pro mechanickou a elektrickou část modelu. Rovnice pro mechanickou část předpokládá kmitající soustavu s jedním stupněm volnosti, rovnice jejího pohybu je podle [1].

$$m \cdot \ddot{x}(t) + b \cdot \dot{x}(t) + k \cdot x(t) = F(t) + F_m(t) \quad (4.1)$$

Pro chování soustavy je klíčový proud, respektive napětí, cívky magnetu, jejichž vztah reprezentuje rovnice:

$$u_m(t) = R_L \cdot i(t) + L \cdot \frac{di}{dt} . \quad (4.2)$$

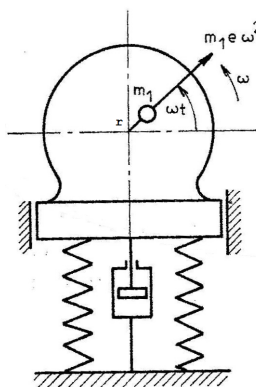
4.1 Mechanická rovnice

Jednotlivé koeficienty rovnice 4.1 byly určeny výše, zbývá tedy určit budicí sílu F a sílu elektromagnetu F_m .

4.1.1 Průběh budicí síly

Jak již bylo zmíněno, zdrojem budicí síly je nevývaha rotující definovanou úhlovou rychlostí v určité vzdálenosti od osy rotace hřídele. Podle [1] má rovnice takovéto síly tvar:

$$F(t) = m_1 \cdot r \cdot \sin \omega^2(t) \sin(\omega(t) \cdot t) . \quad (4.3)$$



Obrázek 4.2: vznik budicí síly [1]

4.1.2 Síla elektromagnetu

Síla vyvinutá elektromagnetem je závislá na velikosti proudu a vzduchové mezery, která je proměnlivá. Po dosazení rovnic [3.3] a [3.6] do [3.2], je vztah pro tuto sílu:

$$F_m(d) = -\frac{\partial W}{\partial d(t)} = -\frac{\partial}{\partial d(t)} L(d(t)) \cdot i^2(t) = -\frac{\partial}{\partial d(t)} \frac{857d(t) + 3.25}{d^2(t) + 10390d(t) + 5.8} \cdot i^2(t) \quad (4.4)$$

$$F_m = -\frac{-857d^2(t) - 6.5d(t) - 337675}{(d^2(t) + 10390d(t) + 5.8)^2} \cdot i^2 \quad (4.5)$$

Konečný tvar rovnice popisující pohyb mechanické části tedy je:

$$m \cdot \ddot{x}(t) + b \cdot \dot{x}(t) + k \cdot x(t) = m_1 \cdot e \cdot \sin \omega^2(t) \sin(\omega(t) \cdot t) - \frac{-857d^2(t) - 6.5d(t) - 337675}{(d^2(t) + 10390d(t) + 5.8)^2} \cdot i^2 \quad (4.6)$$

4.2 Rovnice elektrického obvodu

Elektrickou část soustavy představuje pouze zdroj proudu, protože akcelerometr nezasahuje do dynamiky a motor s PWM modulem vytváří budicí sílu popsanou výše. Při návrhu proudového zdroje byla použita rovnice [3.5] popisující velikost proudu procházejícího přes cívku magnetu. Tuto rovnici však lze považovat pouze za orientační, protože uvažuje pouze ohmickou zátěž. Elektromagnet však představuje zátěž zejména indukční, navíc časově proměnlivou, proto je potřeba obvod (obr. [3.9]) popsat pomocí jiné rovnice. Použití tranzistoru s dostatečně velkým zesílením umožňuje zanedbat bázevý proud (ve fázi, kdy se obvod chová jako zdroj proudu) oproti kolektorovému a emitorovému (v tomto případě $\beta = 750$ [9]). Je tudíž možné psát $i_C \doteq i_E \doteq i$.

Chování obvodu s tranzistorem (obr. [3.9]) v režimu, kdy je spínán napětím obdelníkového průběhu (viz [5.7]), je potřeba rozdělit do tří fází:

- od začátku řídicího impulsu do chvíle, než dostatečně naroste proud skrze emitorový odpor R_E
- fáze, kdy se obvod chová jako zdroj proudu
- fáze po skončení řídicího impulsu

4.2.1 Nárůst proudu emitorovým odporem

V případě realizovaném v této práci je tato fáze ve srovnání délkou řídicího impulsu velmi krátká. Lze ji popsat rovnicí:

$$U_{cc} = R \cdot i(t) + R_L \cdot i(t) + u_{CE} - L \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (4.7)$$

a trvá, dokud je napětí na na emitorovém odporu a přechodu BE menší než napětí na diodě ZD, tedy:

$$(u_E(t) - u_{BE}) < u_{ZD} . \quad (4.8)$$

V tomto časovém úseku je třeba uvažovat bázevý proud o velikosti $i_b = \frac{U_{cc}}{R1}$, který otvírá tranzistor až do saturace. Napětí u_{CE} je tedy saturační.

4.2.2 Stabilizace proudu

V této fázi se obvod chová způsobem popsaným v kapitole [3.2.6], tedy tak, že tranzistor je nucen otvírat se a zavírat tak, aby udržel úbytek napětí na emitorovém odporu U_R a přechodu U_{BE} rovný napětí na Zenerově diodě mezi bází a zemí U_{ZD} . V případě konstantního proudu se neuplatňuje indukčnost cívky a lze psát:

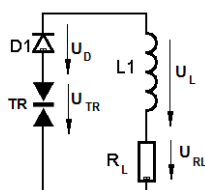
$$U_{cc} = u_{CE}(t) + R_L \cdot i + R \cdot i . \quad (4.9)$$

Napětí u_{CE} se mění tak, aby kompenzovalo změny indukčnosti cívky a zachovalo konstantní proud.

$$u_{CE} = U_{cc} - (u_{RL} + u_E) - i \cdot \frac{dL}{dt} \quad (4.10)$$

4.2.3 Konec řídícího impulsu

Po skončení řídícího impulsu je žádoucí, aby napětí na cívce co nejrychleji kleslo a proud odezněl. V okamžiku uzavření tranzistoru lze uvažovat obvod (obr. 3.9) zredukovaný pouze na část na obrázku 4.3.



Obrázek 4.3: vybíjení cívky magnetu

Napěťové poměry v obvodu popisuje rovnice:

$$U_D + U_{TR} = -u_L t - u_{RL}(t) . \quad (4.11)$$

Změnu indukčnosti můžeme oproti požadované změně proudu zanedbat, a potom platí vztah:

$$u_L(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} . \quad (4.12)$$

Aby tedy byla doba vybíjení cívky přibližně stejně dlouhá jako doba nabíjení, je třeba vinutí vybit do obdobného napětí, jakým byla nabita. Proto je v elektromagnetu paralelně připojena sériová kombinace diody a tranzistoru tak, aby platila rovnice 4.11.

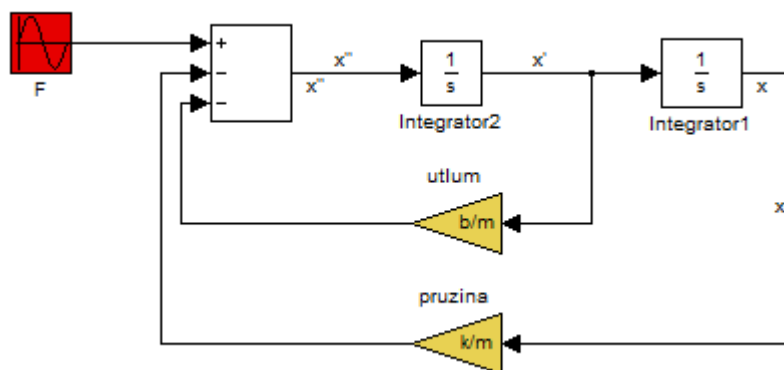
5 Simulace a řízení v programu MatLab Simulink

V kapitole 3.2.1 je popsáno vybavení použité k simulaci a řízení modelu. Simulována je rovnice 4.6 v různých variantách a proudový zdroj. Cílem simulace je ověření vhodnosti matematického modelu, správnosti identifikace parametrů soustavy a získání podkladů pro návrh řízení akčního členu.

Všechny simulace používají výchozí nastavení Simulinku a řešič ode45. Jednotlivé veličiny jsou určeny v m.file (Příloha 6).

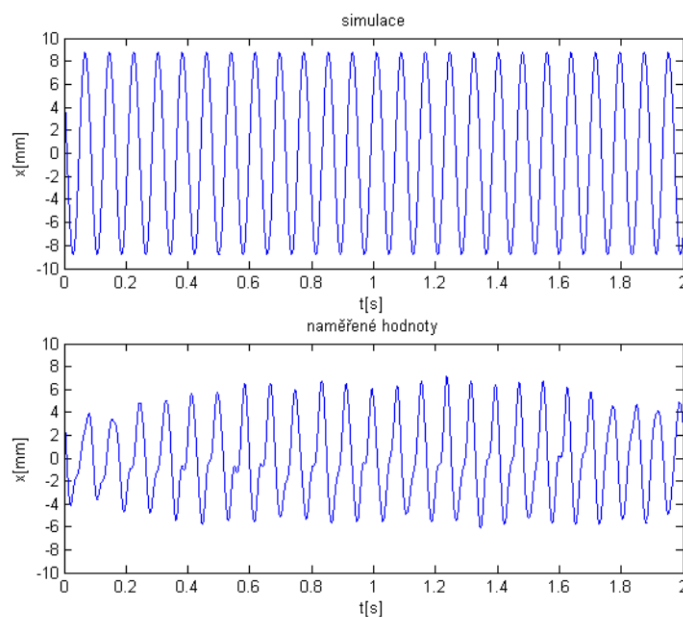
5.1 Soustava bez aktivního tlumení

Simulace soustavy bez aktivního tlumiče slouží k určení správnosti identifikace parametrů hmotnosti, tuhosti pružin a součinitele tlumení. Jedná se o simulaci rovnice 4.6 bez členu F_m . Blok F představuje budící sílu podle kapitoly 4.1 o frekvenci $\omega = 80 \text{ rad s}^{-1}$, což je frekvence rezonanční. Reálné hodnoty jsou částí křivky z grafu pro určení tuhosti pružin (obr. 3.13) v místě maximálních výchylek, tedy také rezonance.



Obrázek 5.1: simulační schéma bez aktivního tlumiče

Graf (obr. 5.2) zobrazuje průběhy simulované a naměřené výchylky. Přestože skutečný model koná vzhledem k nedokonalosti uchycení poměrně komplikovaný pohyb, je z grafu vidět, že si frekvence a amplitudy přibližně odpovídají. Jednotlivé parametry jsou tudíž určeny přibližně správně.



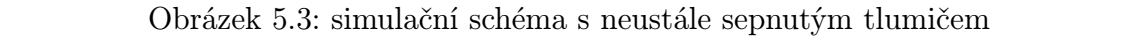
Obrázek 5.2: simulovaná a naměřená rezonance

5.2 Simulace soustavy s magnetem

Smyslem těchto simulací je určit vhodný režim řízení elektromagnetu tak, aby byla minimalizována amplituda kmitů soustavy. Jak bylo zmíněno výše (kapitola 2), elektromagnet lze použít k tlumení v režimu aktivní kompenzace jednotlivých rázů, stejně jako odpor nastavitelný podle periodického průběhu budicí síly. Jedná se o simulaci rovnice 4.6 a ideálního zdroje.

5.2.1 Magnet jako odpor proměnlivé velikosti

Použít magnet jako nastavitelný odpor proti pohybu soustavy se na první pohled jeví jako snazší ze dvou uvažovaných variant (viz. 5.2.2). Simulace však prokázala, že tímto způsobem nelze, ani teoreticky, nikdy dosáhnout úplného zatlumení kmitů. Důvodem je, že elektromagnet může silově působit pouze jedním směrem.

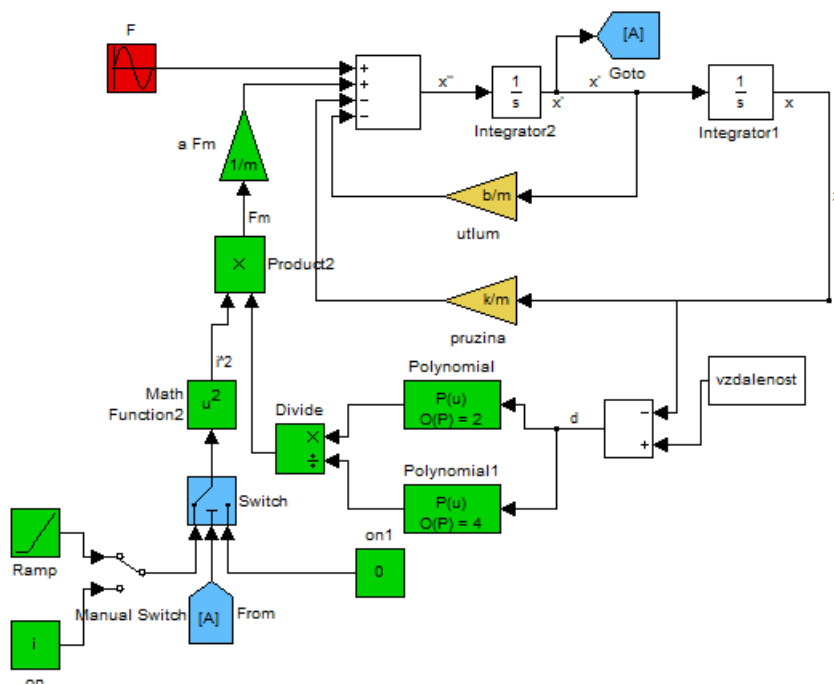


Graph showing the deflection x [mm] (Y-axis, scaled by $\times 10^{-3}$) versus the current i [A] (X-axis) for a magnetic field $B = 0.05$ T. The deflection is highly oscillatory and decays towards zero as the current increases.

29

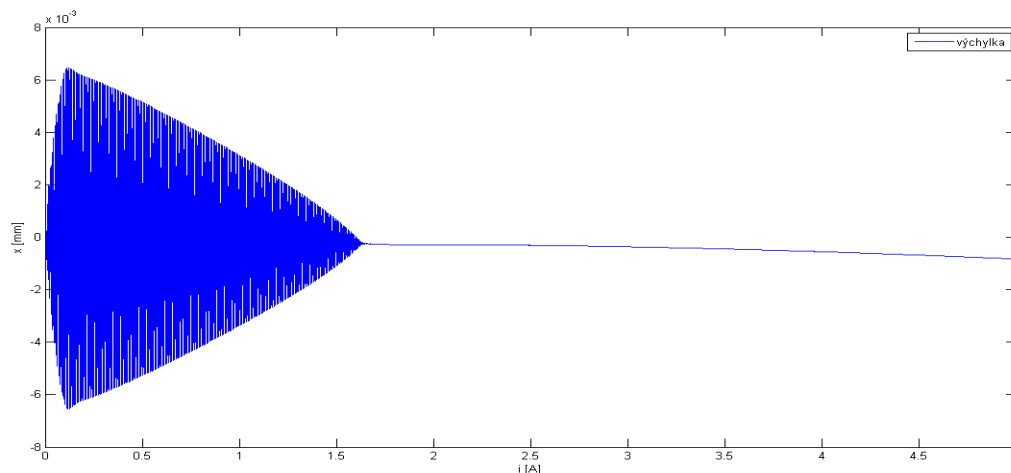
5.2.2 Magnet spínaný podle směru kmitů

Tento způsob tlumení předpokládá, že i pokud síla magnetu působí jen jedním směrem, ale je možné zaručit, že bude vždy v protifázi ke směru pohybu soustavy, soustava se tolik nerozkmitá. Je-li soustava uspořádána podle obr. 4.1, pružiny tlumí pohyb dolů, kdežto magnet naopak nahoru.



Obrázek 5.5: simulační schéma se spínaným tlumičem

Simulace ukázala tuto metodu tlumení jako výrazně účinnější (obr. 5.6) oproti předchozí uvažované variantě (obr. 5.4). Přibližně na hranici 1.6A by mělo dokonce dojít k téměř dokonalému zatlumení kmitů, tento předpoklad však nebylo možno vzhledem dostupným technickým prostředkům ověřit. Docházelo by navíc k přenašení silových rázů do konstrukce v plném rozsahu, což není žádoucí. Nezanedbatelná výhoda tohoto řešení je také energetická úspora, protože proud prochází magnetem jen v jedné půlperiodě kmitu. Zmíněné faktory jsou důvodem, proč byla prakticky realizována tato varianta řízení.

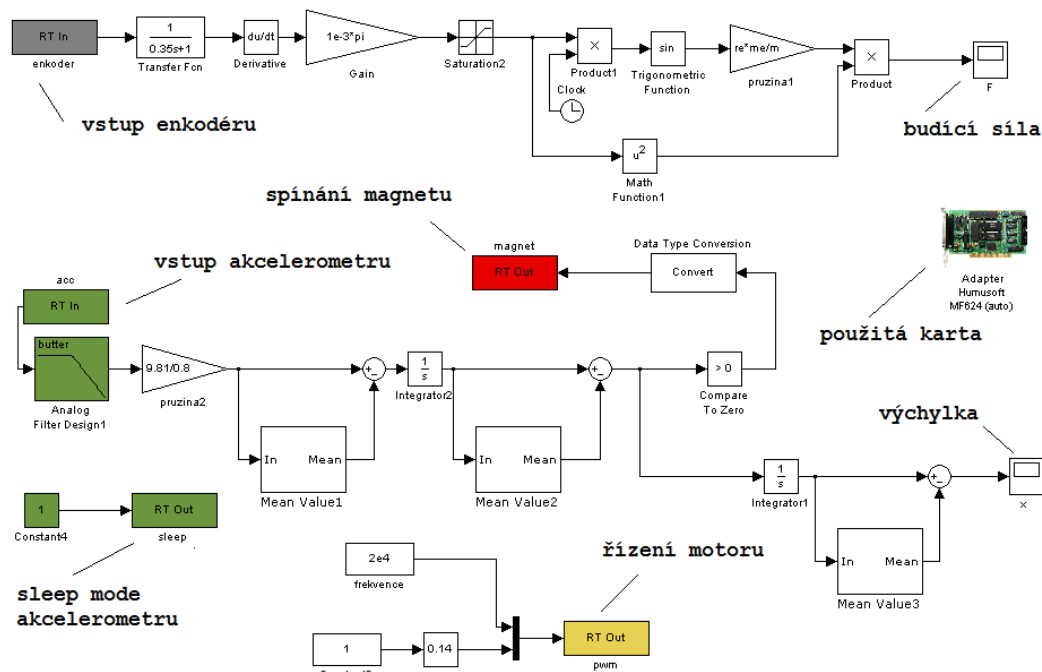


Obrázek 5.6: závislost výchylny na zvyšovaném spínaném proudu magnetem

5.3 Řízení v Simulinku pomocí Real Time toolboxu

Vzhledem k velké nelinearitě průběhu síly magnetu (rovnice 4.5) nelze použít stavového řízení ani jiných metod běžně používaných pro lineární systémy. Dalším problémem se ukázal být přenos stejnosměrné úrovně řídicího napětí za dodržení nutné podmínky oddělení zemnění real-time karty a výkonového obvodu. Proto byla realizována jednoduchá varianta řízení, kdy je použita konstantní velikost proudu a magnet je spínán na základě údajů o směru pohybu soustavy z akcelerometru (viz. 5.2.2). O použití tohoto způsobu bylo rozhodnuto také podle simulací popsanych v předchozích dvou částech. Neměnná velikost proudu sice omezuje možnosti regulace i rozsah velikosti budicí síly, kterou je možno vyvinout, nicméně tento způsob postačuje pro prokázání použitelnosti elektromagnetu coby aktivního tlumiče.

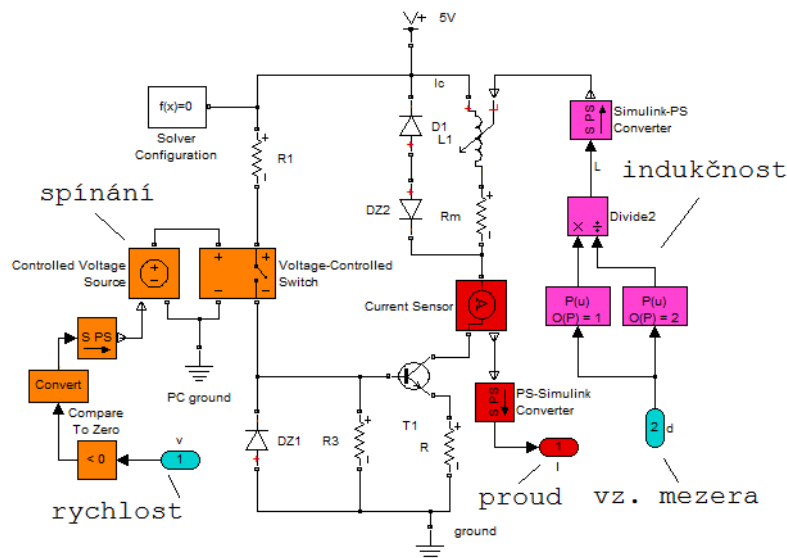
Řídicí model v programu Simulink obsahuje vstup enkodéru, který byl ve spojení se vstupem akcelerometru použit k nalezení rezonanční frekvence, a umožňuje výpočet velikosti budicí síly. Vstup akcelerometru poskytuje informaci o směru pohybu soustavy, podle kterého je na základě srovnání s nulou vyslán impuls do digitálního výstupu (respektive vstupu zdroje proudu). Aby integrovaný signál nedivergoval, je od něj potřeba odečítat jeho střední hodnotu. Dále je nutné logickým signálem probudit akcelerometr ze *sleep modu*. Poslední částí schématu je řízení motoru pomocí PWM.



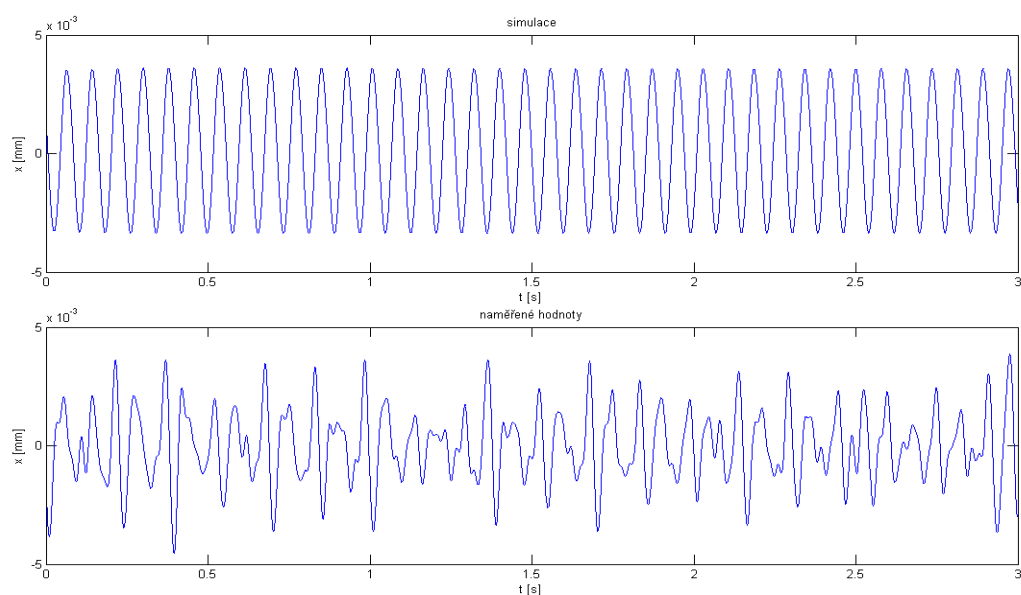
Obrázek 5.7: řídicí schéma

5.4 Komplexní simulace a její porovnání s naměřenými daty

Na rozdíl od předchozích simulací, kdy byl předpokládán ideální zdroj proudu, obsahuje tato model zdroje sestávající z reálných součástí. Je tedy pevně dána velikost napájecího napětí, je uvažována indukčnost cívky a náběh proudu magnetem není nekonečně rychlý. Model je vytvořen pomocí modulu Simulinku jménem Simscape - Simelectronics, který umožňuje napojení elektrického schématu na bloky klasického Simulinku. Mechanická část i výpočet síly F_m v modelu jsou identické jako v předchozích případech [5.2.1] a [5.2.2]. Jediným rozdílem je omezení maximální velikosti výchylky v kladném směru, které zohledňuje fyzickou přítomnost magnetu (doraz). Na (obr. 5.8) je simulační schéma zdroje, jehož vstupy jsou rychlost a velikost vzduchové mezery, výstupem je proud. Spínání probíhá na základě přiřazení logické hodnoty rychlosti (1 pro záporný směr, 0 pro kladný). Velikost vzduchové mezery slouží k výpočtu indukčnosti elektromagnetu podle vzorce uvedeného výše [3.10]. Označení součástek odpovídá schématu zdroje v kapitole 3.2.6. Ověření správnosti simulace v případě, že není aktivní tlumení zapnuto, bylo provedeno v části 5.1. V grafu (obr. 5.9) jsou vyneseny simulovaný a naměřený průběh výchylky při rezonanční frekvenci a se spínaným magnetem. Jak bylo zmíněno výše, reálná soustava má



Obrázek 5.8: simulační schéma zdroje



Obrázek 5.9: simulovaná a naměřená výchylka se zapnutým tlumičem

oproti matematickému modelu tři stupně volnosti, což má vliv nejen na samotný pohyb soustavy, ale ovlivňuje i velikost síly elektromagnetu. Mění se vzájemná poloha pólů v horizontální rovině a tím i magnetický tok, na kterém je síla závislá [11]. Skutečný průběh výchylky se tedy může simulované pouze blížit. Amplitudy a frekvence křivek si však přibližně odpovídají.

6 Závěr

V této práci se podařilo realizovat experimentální i matematický model a navrhnout systém aktivního tlumení vibrací. Zároveň se podařilo dokázat, že elektromagnet je pro tento účel použitelný. Vzhledem k technickým omezením však nebylo možné experimentálně potvrdit simulované chování soustavy v plném rozsahu. Navržený regulátor je nejjednodušší možný, pro ověření principu a správnosti matematického modelu však postačuje. S vhodněji navrženým regulátorem by jistě šlo dosáhnout lepších výsledků jak po stránce utlumení kmitů, tak energetické náročnosti. To by ale vyžadovalo složitější napájecí zdroj, což by výrazně zkomplikovalo matematický popis tohoto obvodu a v důsledku i ztížilo posouzení správnosti výpočtů. Samotná nelinearita chování magnetu v okolí pracovního bodu také znemožňuje použití běžných způsobů řízení a bylo by potřeba navrhnout regulátor na základě pokročilejších metod.

Tlumení pomocí elektromagnetu se ukázalo poměrně energeticky náročné, příkon zdroje proudu byl téměř takový jako příkon elektromotoru na modelu. Vhodnost použití by však bylo potřeba posuzovat podle konkrétní aplikace, a nelze tedy tlumení pomocí elektromagnetu považovat za nepraktické.

7 Literatura a odkazy

- [1] KRATOCHVÍL C., SLAVÍK J.: *Mechanika těles: Dynamika*, ISBN 80-214-0946-0, 1977
- [2] FESTO: *VPPE valves*, datasheet, 2009
- [3] TRANSMOTEC: *Motors Planetary Gear DC Catalogue 25W-500W*, datasheet, 2009
- [4] HUMUSOFT: *MF 624 Multifunction I/O card*, uživatelská příručka, 2006
- [5] ROBOTIKA.CZ:, <http://robotika.cz/guide/encoders>, 2010-4
- [6] FREESCALE SEMICONDUCTOR: *MMA7361L*, datasheet, 2008
- [7] HALLIDAY D., RESNICK R., WALKER J.: *Fyzika*, ISBN 80-214-1868-0, 2000
- [8] VOREL P., PATOČKA M.: *Průmyslová elektronika*, elektronické skriptum, 2007
- [9] ST MICROELECTRONICS: *BDX53C*, datasheet, 1999
- [10] CIGÁNEK L., BAUER M.: *Elektrické stroje a přístroje*, SNTL, Praha, 1957
- [11] BOL' B.K.: *Elektrické přístroje*, SNTL, Praha, 1977

8 Použité symboly

b	součinitel tlumení	$\left[\frac{N}{ms^{-1}}\right]$
d	velikost vzduchové mezery	$[m]$
e	Eulerovo číslo	$[]$
F	budicí síla	$[N]$
F_0	amplituda budicí síly	$[N]$
F_m	silá vyvolaná magnetem	$[N]$
i	elektrický proud	$[A]$
i_C	kolektorový proud	$[A]$
i_E	emitorový proud	$[A]$
k	tuhost soustavy pružin	$[N \cdot m^{-1}]$
L	indukčnost cívky	$[H]$
m	celková hmotnost pohyblivé části	$[kg]$
m_1	hmotnost nevývahy	$[kg]$
m_b	hmotnost pohyblivé části před připevněním magnetu	$[kg]$
R	velikost emitorového odporu	$[\Omega]$
R_L	ohmický odpor cívky magnetu	$[\Omega]$
r	excentricita nevývahy	$[m]$
T	celková perioda	$[s]$
t	čas	$[s]$
t_{on}	čas sepnutí	$[s]$
U_{sig}	napěťová úroveň přeneseného signálu	$[V]$
U_{max}	maximální napětí, použité pro PWM	$[V]$
U_{cc}	napájecí napětí	$[V]$
U_r	řídící napětí	$[V, rad \cdot s^{-1}]$
U_R	napětí na emitorovém odporu	$[V]$
u_{BE}	napětí báze-emitor	$[V]$
u_D	napětí na diodě	$[V]$
u_{TR}	napětí na transilu	$[V]$
u_{ZD}	napětí na Zenerově diodě	$[V]$
u_L	napětí naindukované na cívce magnetu	$[V]$
u_{RL}	napětí na ohmickém odporu vinutí	$[V]$
W	magnetická energie ve vzduchové mezeře	$[J]$
x	souřadnice polohy	$[m]$
β	zesílení tranzistoru	$[]$
δ	součinitel doznívání	$[s-1]$
Ω_0	rezonanční úhlová rychlost	$[rad \cdot s^{-1}]$
ω	úhlová rychlost	$[rad \cdot s^{-1}]$

9 Seznam příloh

- Příloha 1** Zapojení enkodéru ke kartě MF624
- Příloha 2** Deska plošných spojů, seznam použitých součástek
a zapojení ke kartě MF624 akcelerometru
- Příloha 3** Deska plošných spojů, seznam součástek
a zapojení ke kartě MF624 modulu PWM
- Příloha 4** Deska plošných spojů a seznam použitých součástek zdroje proudu
- Příloha 5** Parametry simulací (m.file)
- Příloha 6** Výběr maxim pro identifikaci koeficientu tlumení (m.file)
- Příloha 7** Fotografie modelu

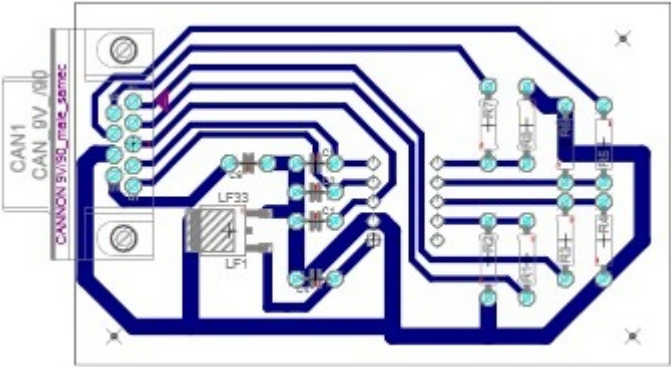
Příloha 1

Zapojení enkodéru ke kartě MF624

Enkodér		MF624	
číslo pinu	funkce	číslo pinu	funkce
5,8	GND	29	GND
6	signál A-	2	IRC0A-
7	signál B-	4	IRC0B-

Příloha 2

Deska plošných spojů, seznam použitých součástek a zapojení ke kartě MF624 akcelerometru

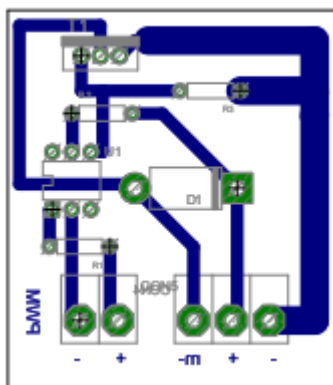


označení	součástka
MMA7361L	akcelerometr
LF33	napěťový stabilizátor 3.3V
CAN 9V/90	devítipinový konektor Canon do DPS
R1,R3,R5,R7	rezistory 180R
R2,R4,R6,R8	rezistory 330R
C1,C2,C3	filtrační kondenzátory 3n3
C4,C5	stabilizační kondenzátory 100n

DPS		MF624 X1	
číslo pinu	funkce	číslo pinu	funkce
1	0g detect	33	DOUT3
2	sleep	30	DOUT0
3	osa X	2	AD1
4	osa Z	1	AD0
5	osa Y	3	AD2
6	self test	31	DOUT1
7	g select	32	DOUT2
8	GND	29	GND
9	+5V	28	+5V

Příloha 3

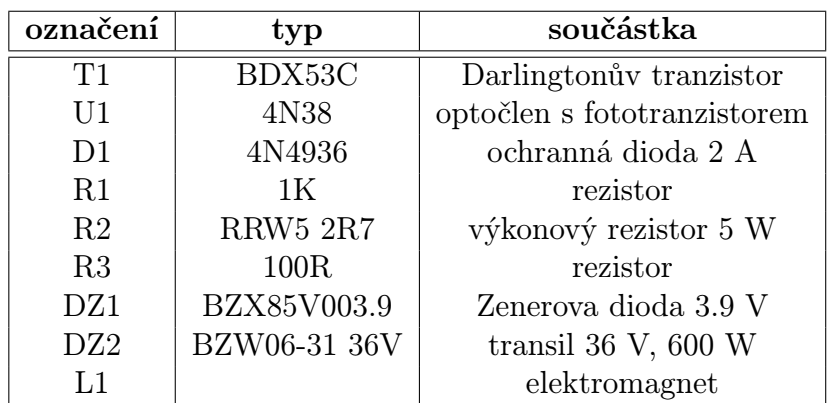
Deska plošných spojů, seznam součástek a zapojení ke kartě MF624 modulu PWM



označení	typ	součástka
T1	IRF730	MOSFET
U1	4N35	optočlen s fototranzistorem
D1	1N5339	ochraná dioda 2 A
R1	560R	rezistor
R2, R3	5K1	rezistory

svorka	zapojení
PWM +	MF624 X2 pin 31 TOUT2
PWM -	MF624 X2 pin 31 TOUT2
m -	GND svorka motoru
+	+24V zdroje
-	GND zdroje

Deska plošných spojů a seznam použitých součástek zdroje proudu



Příloha 5

Parametry simulací (m.file)

```
%pružina a tlumič
clc;
clear all;
OMG=80; %rezonancni frekvence [rad/s]
m = 5.1; %hmotnost soustavy [kg]
k = m*OMG^2; %tuhost pružiny [N/m]
disp(['rez. frek: ', num2str(OMG)]);
b = 12.74; %tlumení
delta2 = b/(2*m); %doznívání;

%excentr
e = 3.5*10^-2; %excentricita
me = 40*10^-3; %hmotnost

%magnet
i=1; %proud [A]
vzdalenost=6e-3; %vzduchová mezera [mm]
R=5; %ohmický odpor [Ohm]
U=40; %napájecí napětí[V]
k1=-857; %koeficienty čitatele Fm
k2=-6.5;
k3=-28796.90;
m1=3; %koeficienty jmenovatele Fm
m2=20780;
m3=1.079521116*10^8;
m4=1.205240*10^5;
m5=33.6;
%indukčnost
p1=[857,3.25]; %koeficienty čitatele Fm
p2=[1,10390,5.8]; %koeficienty jmenovatele
```

Příloha 6

Výběr maxim pro identifikaci koeficientu tlumení (m.file)

```
clc;
clear all;
Z=open('nej.mat');
%omezeni mnoziny namerenych hodnot na spravny cas
for i=1100:length(Z.Z.time)
    t(i-1099)=(i-10999)*1e-3;
    z(i-1099)=Z.Z.signals.values(i)*10;
end;
plot(t,z);
%vyber maxim
for i=3:length(t)
    if (z(i)<z(i-1) && z(i-1)>z(i-2) && z(i)>0)
        z2(i)=z(i-1);
    end;
end;
%srovnani delky t a z3
z3=[0,0,0,z2];
i=length(t);
plot(t,z3);
j=0;
%odstraneni nulovych hodnot a tvorba vah
for i=1:length(t)
    if z3(i)~=0
        j=j+1;
        z4(j)=z3(i);
        T(j)=t(i);
        vz(j)=z4(j)*z4(j);
    end;
end;

cftool;
```

Příloha 7

Fotografie modelu

