



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

# ŘÍDICÍ SYSTÉM AKTIVNÍHO MAGNETICKÉHO LOŽISKA

CONTROL DESIGN OF ACTIVE MAGNETIC BEARING

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

*AUTOR PRÁCE*  
AUTHOR

*Bc. FRANTIŠEK KOLAŘÍK*

*VEDOUCÍ PRÁCE*  
SUPERVISOR

*Ing. PAVEL HOUŠKA, Ph.D.*

BRNO 2011

---

## **Abstrakt**

Práce se zabývá návrhem a realizací řídicího systému pro řízení levitace aktivního magnetického ložiska (AML), jehož prototyp vznikl ve spolupráci mezi FSI a FEKT VUT Brno. V práci je popsána obecná problematika AML, vytvořeny nástroje pro komunikaci s prototypem a vytvořen jeho matematický model. Za pomoci tohoto modelu je pak navrženo řízení, které je experimentálně ověřeno.

## **Abstract**

Thesis deals with active magnetic bearing (AMB) levitation control design. Its prototype was done in FSI collaboration with FEKT VUT Brno. The research is focused on communication tools and mathematical model making as well as general AMB issues. Based on this the control design is done an experimentally verified.

## **Klíčová slova**

Aktivní magnetické ložisko, AML, NI LabVIEW, řízení

## **Keywords**

Active magnetic bearing, AMB, NI LabVIEW, control



## **Bibliografická citace**

KOLAŘÍK, F. Řídicí systém aktivního magnetického ložiska. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky, 2011. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Houška, Ph.D.



## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího Ing. Pavla Houšky, Ph.D. a s použitím uvedených zdrojů.

V Brně dne 25. května 2011

Podpis .....



---

## **Poděkování**

Děkuji své ženě Lence za podporu, vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Houškovi, Ph.D. za příkladné vedení a oběma pak za obětavost a nezměrnou trpělivost, kterou se mnou při vytváření této práce museli projevit.





## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>Aktivní magnetická ložiska.....</b>	<b>17</b>
2.1	Typy aktivních magnetických ložisek .....	18
2.1.1	Radiální ložiska .....	19
2.1.2	Axiální ložiska.....	20
2.1.3	Kuželová ložiska .....	20
2.2	Řízení AML.....	21
2.2.1	Snímače.....	21
2.2.2	Regulátor.....	23
2.2.3	Výkonové zesilovače .....	23
2.2.4	Záložní systém.....	23
2.3	Vlastnosti aktivních magnetických ložisek .....	24
2.4	Průmyslová využití .....	25
<b>3</b>	<b>Laboratorní model aktivního magnetického ložiska.....</b>	<b>27</b>
3.1	PAC pro řízení ložiska .....	28
3.2	Výkonový modul AML.....	30
3.2.1	I/O moduly PAC pro výkonový modul AML .....	30
3.2.2	Snímače proudu.....	31
3.3	Modul měření polohy rotoru ložiska .....	32
3.3.1	I/O moduly PAC pro měření polohy ložiska.....	32
3.3.2	Snímače polohy rotoru.....	32
3.4	Modul řízení DC motoru.....	33
3.4.1	I/O moduly PAC pro řízení DC motoru.....	34
<b>4</b>	<b>Získání matematického modelu AML pro návrh řízení.....</b>	<b>35</b>
4.1	Analytický model AML .....	35
4.1.1	Model hřídele .....	35
4.1.2	Model magnetické síly .....	37
4.2	Volba vzorkovací periody .....	40
4.3	Identifikace parametrů .....	40
4.3.1	Identifikace konstanty K .....	41
<b>5</b>	<b>Řídicí systém aktivního magnetického ložiska .....</b>	<b>43</b>
5.1	Koncepce řídicího systému .....	43
5.2	Návrh řídicího systému .....	43
5.3	Návrh a realizace software pro úroveň ovládání periférií.....	44
5.3.1	Měření polohy rotoru .....	44
5.3.2	Měření proudu tekoucího elektromagnety .....	45

---

5.3.3	Měření natočení a rychlosti hřídele .....	45
5.3.4	Ovládání elektromagnetů AML .....	46
5.3.5	Ovládání motoru.....	47
5.4	Návrh a realizace řídicího SW na cRIO .....	47
5.4.1	TCP/IP rozhraní .....	49
5.5	Návrh a realizace software pro vzdálené ovládání.....	51
5.6	Kalibrace snímačů .....	51
5.6.1	Kalibrace snímačů polohy .....	52
5.6.2	Kalibrace snímačů proudu .....	53
5.7	Ověření řídicího systému .....	54
<b>6</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>55</b>
<b>7</b>	<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>57</b>
	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>59</b>

## 1 Úvod

Během posledních 30 let se aktivní magnetická ložiska (AML) dostávala do popředí zájmu a v současné době jsou již nainstalována v širokém spektru průmyslových aplikací v turbosoustrojích, ve vakuových technologiích a energetickém průmyslu. Díky absolutní bezkontaktnosti při svém provozu poskytují AML speciální vlastnosti, které nemohou být nahrazeny jinými ložiskovými technologiemi. Mezi nejdůležitější z nich pak patří bezmazivovost a s ní spojený nekontaminující provoz, schopnost pracovat při velmi vysokých rychlostech a možnost aktivní kontroly vibrací (tlumení mechanických oscilací, kompenzace nevyvážených sil atd.). K tomu navíc, vzhledem k tomu, že jsou z podstaty vybavena snímači a aktivními řídicími prvky, mohou AML poskytovat zabudované kontrolní a inspekční systémy a to bez potřeby dodatečné instrumentace. To otevírá nové možnosti pro včasnou diagnostiku poruch a preventivní údržbu, odkud plyne i jejich označení jako „chytré stroje“ (smart machines).

Aktivní magnetická ložiska jsou typickým mechatronickým zařízením. To znamená, ve smyslu porozumění, vývoje a použití této technologie, že chování každé jednotlivé součásti systému (rotor, ložisko, snímač, regulátor atd.) a různorodé vztahy mezi nimi musí být nejdřív prozkoumány. Těžiště této diplomové práce je prozkoumat více do detailů nejdůležitější složku všech AML systémů – levitaci. Zde se diplomová práce omezí na rotující systémy – rotory. U nich elektromagnety umístěné v ložiskovém statoru vytvářejí magnetické pole, jehož přitažlivá síla udržuje rotor vznášející se v žádané poloze uprostřed vzduchové mezery. Vzhledem k nestabilitě tohoto procesu je důležitá regulace tohoto magnetického pole a právě na ni se v této práci v několika krocích zaměříme.

Na začátku práce bude prostudována obecná problematika aktivního magnetického ložiska. Budou shrnuty základní principy fungování AML a zhodnocen současný stav technologie.

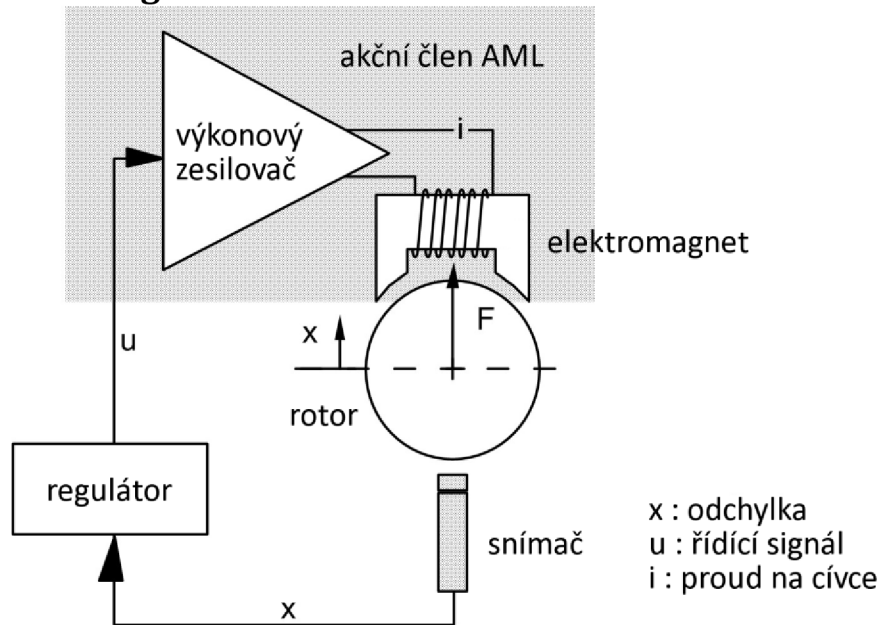
Dále se seznámíme s existujícím laboratorním modelem, experimentálním AML, jehož stator a rotor vznikl v rámci spolupráce mezi Ústavem automatizace a informatiky Fakulty strojního inženýrství (FSI) a Ústavem výkonové elektroniky a elektrotechniky Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií (FEKT) Vysokého učení technického Brno (VUT Brno). Při tom budou za pomoci softwarových nástrojů vývojového prostředí National Instruments (NI) LabVIEW vytvořeny a popsány základní hardwarové a softwarové nástroje nezbytné pro komunikaci, chod a další práci s tímto experimentálním AML.

Následně provedeme identifikaci tohoto experimentálního AML. Budou získána, zformátována, a zpracována surová data získaná z tohoto AML, na jejichž základě bude vytvořen matematický model. Jeho platnost bude ověřena a na jeho základě pak opět ve vývojovém prostředí NI LabVIEW za pomoci Control Design and Simulation Module navrhne řídicí systém vhodný k řízení tohoto ložiska.

Tento systém v dalším kroku experimentálně ověříme a následně pak všechny dosažené výsledky zhodnotíme.



## 2 Aktivní magnetická ložiska



Obr. 1 Princip funkce AML [2]

Pod pojmem aktivní magnetické ložisko (AML) rozumíme podporu pro rotor tvořenou bez jakéhokoliv mechanického kontaktu za užití pouze přitažlivých magnetických sil zpětnovazebně řízených za pomoci snímačů, elektromagnetů, výkonových zesilovačů a regulátoru (Obr. 1) [1]. Systém AML pak sestává z rotoru, snímačů a dalšího vybavení pro zjištění pozice rotoru, regulátoru/ů, výkonového zesilovače a elektromagnetů nutných pro levitaci a podporu rotoru přitažlivými magnetickými silami magnetického pole.

Základní funkční princip systému AML je stručně popsán na Obr. 1. Elektromagnet vytváří magnetické pole, které silou  $F_{mag}$  působí na feromagnetický rotor [2]. Základní vztah pro výpočet síly  $F_{mag}$  často používaný v mnoha pracích zabývajících se návrhem AML je [3] [4]:

$$F_{mag} = K \left( \frac{i}{s} \right)^2, \forall s > 0 \text{ kde } K = \frac{1}{4} \mu_0 \mu_v N_C^2 A_I \quad (1)$$

kde síla  $F_{mag}$  je přímo úměrná kvadrátu proudu  $i$  tekoucího cívkou a nepřímo úměrná kvadrátu vzdálenosti  $s$  mezi elektromagnetem a rotorem.  $K$  pak představuje konstantu závislou na materiálu a geometrii elektromagnetu, kde  $N_C$  značí počet závitů na cívce,  $\mu_0$  permeabilitu vakua,  $\mu_v$  relativní permeabilitu vzduchu a  $A_I$  průřez elektromagnetu. To vše za předpokladu že:

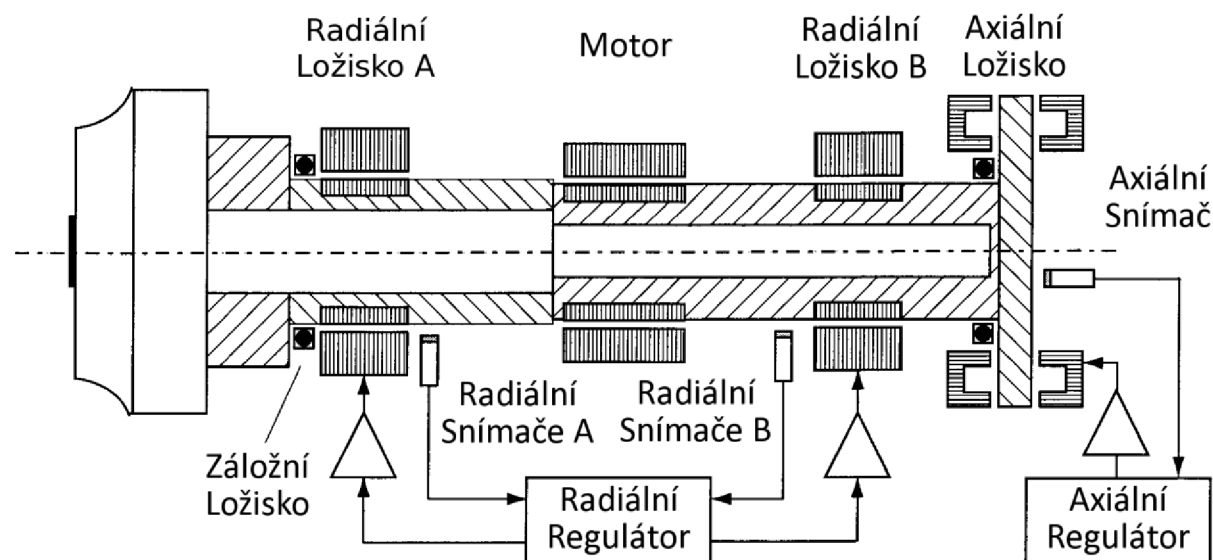
- je nekonečně velká permeabilita  $\mu_r$  feromagnetického materiálu
- nejsou uvažovány indukční ztráty
- nedochází ke ztrátám vířivými proudy
- nedochází k magnetickému nasycení

Díky tomu, že přirozenou tendencí elektromagnetu je přitahovat rotor až do doby, kdy dojde ke kontaktu, což vede k nestabilitě, je potřeba řízení, které by přizpůsobovalo sílu magnetického pole a udržovalo tak rotor v žádané pozici, většinou nacházející se uprostřed vzduchové mezery [2]. Proto měří snímač polohy posunutí  $x$  podporovaného rotoru od žádané polohy. Regulátor využívá informaci ze snímače k tomu, aby z ní vyvodil vhodný

řídící signál  $u$ , podle něž pak výkonový zesilovač reguluje proud v cívce elektromagnetu. Proud pak společně s feromagnetickým materiálem jádra elektromagnetu způsobuje magnetickou sílu, která zpětně působí na rotor. Elektromagnetická síla je přitom regulátorem určena tak, aby rotor zůstal v jeho předdefinované a stabilní levitační poloze. Příkladem může být stav, kdy se rotor pohybuje směrem dolů (na Obr. 1 v důsledku gravitace): snímač pak produkuje signál indikující výchylku vedoucí ke zvýšení kontrolního proudu. Rostoucí elektromagnetická síla pak táhne rotor zpět do jeho jmenovité pozice.

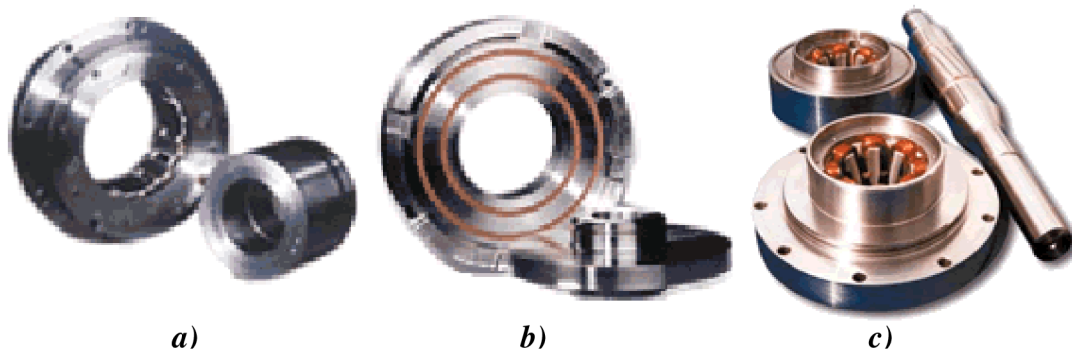
Vzhledem k tomu, že elektromagnety mohou využívat pouze svých přitažlivých sil, je v praxi pro každou osu regulace polohy nutný pár elektromagnetů umístěných v ose proti sobě [3]. Zvýšení proudu v jedné cívce a současně snížení proudu ve druhé pak dovoluje měnit směr i velikost výsledné síly působící na rotor.

## 2.1 Typy aktivních magnetických ložisek



Obr. 2 Rotační sestava se dvěma axiálními a jedním radiálním AML a motorem [4]

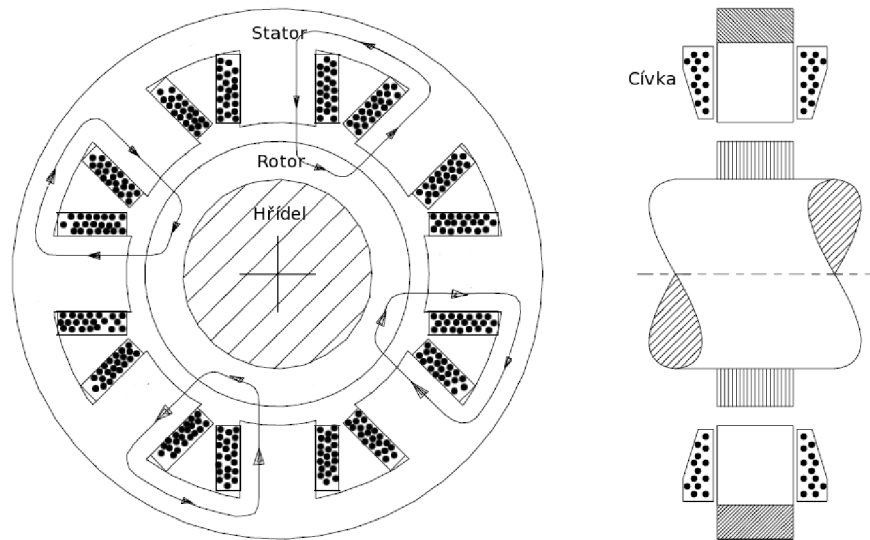
Typické rotační stroje očekávají podporu jak v obou radiálních tak v axiálním směru, celkem je tedy nutno zachytit 5 stupňů volnosti (šestý pak, úhlová poloha rotoru, bývá řízen motorem) [5]. Typicky se proto užívá pětiosá orientace ložisek zahrnující dvě radiální a jedno axiální ložisko, jak je ukázáno na Obr. 2. Osazení motoru přímo na hřídeli umožňuje její rotaci bez jakéhokoliv kontaktu mezi pevnými a rotujícími částmi stroje.



Obr. 3 AML: a) radiální b) axiální c) kuželové [7]

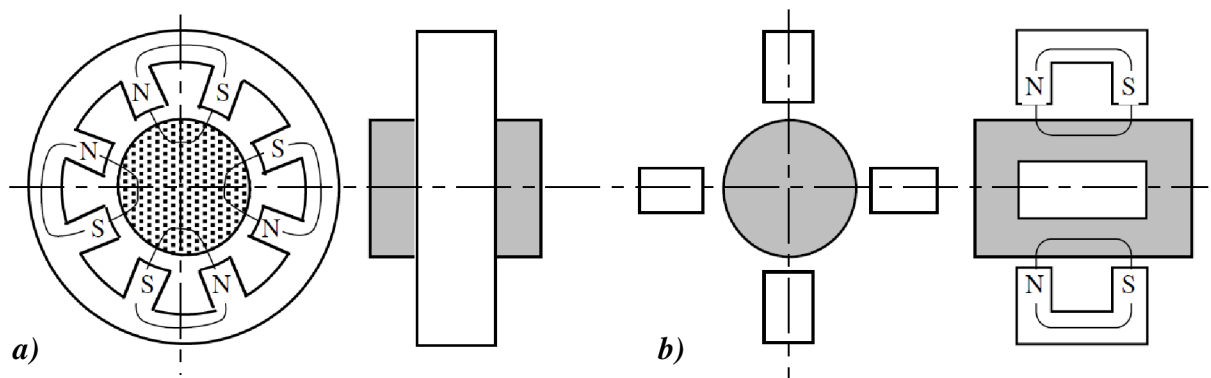
Na Obr. 3 můžeme vidět fotografie tří základních typů AML, lišících se jak tvarem, tak funkcí a z ní vyplývajícím způsobem použití. Jejich charakteristiky budou rozebrány v následujících podkapitolách.

### 2.1.1 Radiální ložiska



Obr. 4 Radiální heteropolární 8 – pólové AML [9]

Na Obr. 4 vidíme nákras typického heteropolárního radiálního AML. Magnetický obvod tohoto typu ložiska se podobá elektromotoru, avšak místo točivého momentu vytváří přitažlivou sílu, která zvedá hřídel [6]. Konstrukčně může být navržen jako heteropolární nebo homopolární, jak je vidět na Obr. 5, případně v [7 str. 132].



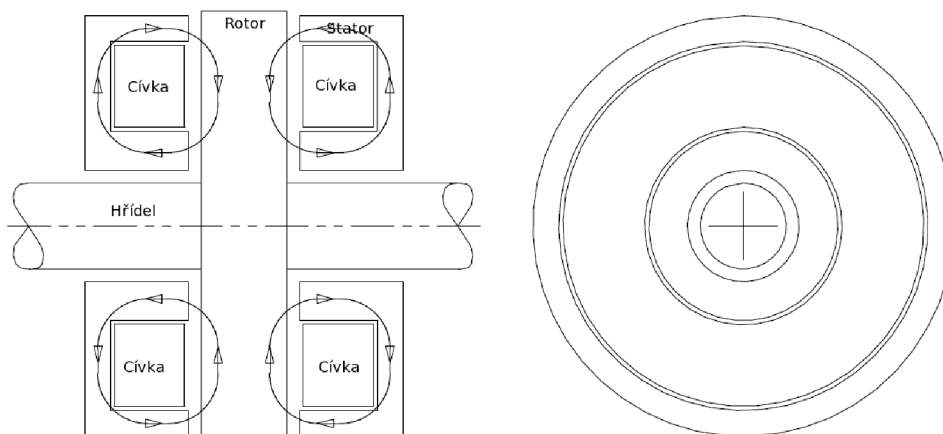
Obr. 5 Konstrukční řešení radiálního AML. a) Siločáry kolmé na osu rotace (heteropolární uspořádání). b) Siločáry rovnoběžné s osou rotace (homopolární uspořádání)

Radiální AML sestává ze statoru a senzového systému namontovanými nad feromagnetickým rotorem instalovaným na hřídeli. Rotor je tvořen svazkem lamel ve tvaru prstence nasazených na vhodné objímce pro hřídel. Lamely jsou vystříženy z elektroplechu proto, aby se snížily ztráty vířivými proudy (hysterezní ztráty) a zlepšila se odezva ložiska. Většinou se z plechů vyrábí i statorová část, stator se pak sestává z jejich svazku ve tvaru prstenců s póly umístěnými na jeho vnitřním průměru. Cívky jsou navinuty kolem každého z pólů tak, že je jimi ložisko rozděleno na čtyři díly. Cívky v každé čtvrtině ložiska jsou zapojeny tak, že z každé čtvrtiny vytváří jeden elektromagnet. Různé způsoby zapojení těchto cívek můžeme najít v literatuře, např. v [7 stránky 133 - 135]. Protilehlé kvadranty vytvářejí osu, a proto může být radiální ložisko popsáno dvěma osami. Typicky pak u horizontálních strojů bývají tyto osy navíc natočeny o  $45^\circ$  od vertikály, což zvyšuje zatížitelnost a stabilitu ložiska. Co nejbližší k ložisku je namontována sada snímačů.



Radiální AML jsou vyráběna v různých provedeních určených svými parametry. Například firma SKF Magnetic bearings nabízí akční členy svých ložisek pro zatížení v rozmezí 50 až 25000 N, při průměrech hřídelí od 9 do 230 mm [8]. Tyto jsou pak instalovatelné na strojích s maximálními rychlostmi otáčení od 1800 do 100000 otáček za minutu. Zároveň můžou být dodávány v hermeticky zapouzdřených provedeních pro hermeticky uzavřené aplikace a v provedeních pro vysoké teploty do 220 °C. Na Obr. 3 a) pak vidíme akční člen radiálního ložiska turbokompresoru navržený pro zatížení 4500 N, maximální otáčky 12000 otáček za minutu a průměr hřídele 120 mm.

### 2.1.2 Axiální ložiska



Obr. 6 Axiální 4 - pólové AML [9]

Na Obr. 6 vidíme náčrt typického axiálního AML. Skládá se z masivního feromagnetického rotoru ve tvaru disku pevně spojeného s hřídelí, po jehož obou stranách je umístěn prstencový stator spojený se základnou [6]. Ten je rovněž tvořen z masivní oceli, případně z pevných ocelových klínů s paprskovitými štěrbinami vyplněnými laminací pro zlepšení odezvy ložiska. Ve statoru se pak nachází jedna nebo dvě kruhové drážky vyplněné cívkami vytvářející magnetické pole nutné pro chod ložiska. Díky tomu, že je stator umístěn po obou stranách rotoru, může toto ložisko eliminovat axiální síly v obou směrech.

Axiální AML jsou vyráběna v různých provedeních určených svými parametry. Například firma SKF Magnetic bearings nabízí akční členy svých ložisek pro zatížení v rozmezí 130 až 24500 N, při průměrech hřídelí od 9 do 130 mm [8]. Tyto jsou pak instalovatelné na strojích s maximálními rychlostmi otáčení od 1800 do 100000 otáček za minutu. Zároveň můžou být dodávány jako hermeticky zapouzdřená provedení pro hermeticky uzavřené aplikace a v provedeních pro vysoké teploty do 220 °C. Na Obr. 3 c) pak vidíme akční člen axiálního ložiska turbokompresoru navržený pro zatížení 17000 N, maximální otáčky 12000 otáček za minutu a průměr hřídele 120 mm.

### 2.1.3 Kuželová ložiska

Ve strojích, v nichž působí nepříliš velké axiální zatížení, lze radiální ložiska nahradit kuželovými ložisky, která mohou zachytávat pohyb v radiálním i axiálním směru [9]. Takové řešení nahrazuje axiální ložisko a přispívá ke zmenšení celkové délky stroje.

Kuželová AML jsou vyráběna v různých provedeních určených svými parametry. Například firma SKF Magnetic bearings nabízí akční členy svých ložisek schopné zachytit souběžnou zátěž až do 8900 N v radiálním a 17800 N axiálním směru [8]. Na Obr. 3 d) pak

vidíme akční člen kuželového ložiska o kapacitě 350 N v radiálním a 450 N v axiálním směru pro vakuovou pumpu pracující na 38500 otáčkách za minutu.

## 2.2 Řízení AML

Jak již bylo uvedeno výše, poloha rotoru ložiska je přirozeně nestabilní, a proto je nutná její zpětnovazební regulace [6]. Řídicí systém dovoluje na základě informace o pozici hřídele kontrolovat proud v ložisku. Jsou-li informace o pozici z jednoho senzoru využívány pouze k řízení proudu odpovídajícího příslušné ose, jedná se o řízení magnetického ložiska s jedním vstupem a jedním výstupem (SISO). Oproti tomu v případech, kdy je vyžadována vyšší úroveň řízení nebo mezi osami očekávána významná křížová vazba, bývají řídicí systémy provedeny jako vícevstupové s více výstupy (MIMO). Řídicí systém AML sestává ze snímače polohy s doprovodnou elektronikou, regulátoru a výkonového zesilovače.

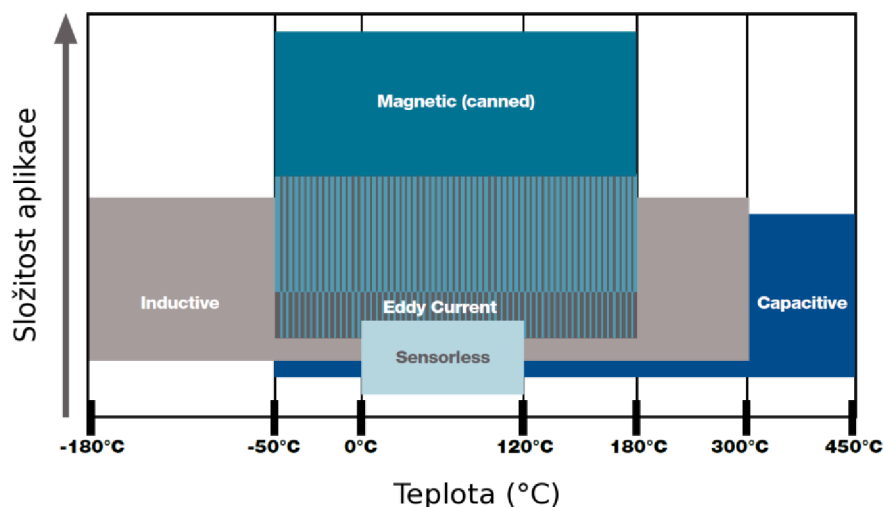
### 2.2.1 Snímače

Mezi hlavní požadavky kladené na snímače polohy můžeme zahrnout [10]:

- Bezkontaktnost
- Lineárnost a prostost přenosové funkce
- Rozsah musí bezpečně a dostatečně přesně pokrýt požadavky měření, obzvláště s ohledem na pracovní frekvence a podmínky uložení snímače, jako jsou vzdálenost, ze které je měřeno, a provozní okolí (chemické prostředí, ve kterém je snímač uložen, a okolní magnetické pole)
- Pro komerční využití pak životnost, stabilitu a nízké finanční náklady
- Často pro eliminaci tepelného a jiných namáhání možnost diferenciálního zapojení

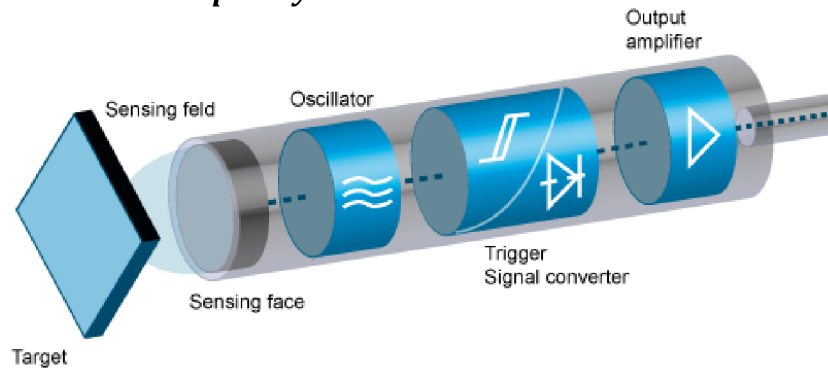
Snímače bývají často kalibrovány na produkci nulové hodnoty výstupu v žádané poloze hřídele [6]. Nachází-li se pak hřídel nad touto polohou, produkují výstup kladný, v opačném případě záporný.

Snímače použité v systémech AML musí měřit polohu bezkontaktním způsobem [2]. Ve většině případů jsou užívány snímače založené na indukčním principu. Z jiných možností můžeme uvést kapacitní, optické a akustické snímače, Hallovy snímače, snímače založené na hustotě elektromagnetického toku či přímý výpočet pozice z proudu a napětí na cívkách (tzv. samo-snímané ložisko). Vhodnost nasazení konkrétní technologie pro snímač polohy AML lze posoudit z Obr. 7.



Obr. 7 Vhodnost typu snímače v závislosti na typu nasazení (Waukesha Bearings) [26]

### 2.2.1.1 Indukční snímače polohy



Obr. 8 Indukční snímač polohy [18]

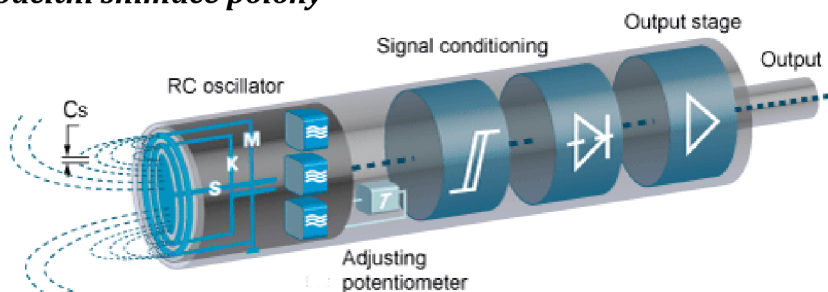
Princip indukčního snímače je založen na vzájemném působení mezi kovovými vodiči a střídavým elektromagnetickým polem. V kovovém snímaném materiálu jsou snímačem indukovány vířivé proudy, které odebírají energii z pole a snižují tak velikost oscilační amplitudy. Tato změna je indukčním snímačem vyhodnocována, jak je ukázáno na Obr. 8 [11].

Mezi hlavní výhody indukčních snímačů patří zejména:

- bezkontaktní snímání
- odolnost vůči znečištění prostředí
- vysoká mechanická odolnost
- vysoká životnost

Hlavní nevýhodou indukčních snímačů polohy je pak omezení použití pouze na snímání elektricky vodivých materiálů.

### 2.2.1.2 Kapacitní snímače polohy



Obr. 9 Kapacitní snímač polohy [18]

Kapacitního snímače polohy pracují na principu kondenzátoru s proměnnou kapacitou. Aktivní plocha snímače obsahuje dvě koncentricky uspořádané kruhové elektrody. Díky nim dokáže senzor určit dielektrické charakteristiky prostředí, protože permeabilita zkoumané zóny se mění v závislosti na vzdálenosti a materiálu zkoumaného objektu.

Mezi hlavní výhody kapacitních snímačů patří zejména:

- bezkontaktní snímání
- možnost použití téměř pro všechny druhy snímaného materiálu
- vhodné i pro použití za vysokých teplot
- vysoká mechanická odolnost

Hlavní nevýhodou kapacitních snímačů polohy je pak citlivost na znečištění prostředí, které může ovlivnit přesnost nebo zcela znehodnotit měření.

### 2.2.2 Regulátor

Funkce regulátoru, sestávajícího většinou z antialiasingových filtrů, A/D převodníků, digitálního signálového procesoru a generátorů pulzní šířkové modulace (PWM), spočívá zejména v [6] [10]:

- Koordinaci převodu signálů ze senzorů
- Sběru ostatních parametrů vyžadovaných řídicím algoritmem
- Tvorbě požadavků na řízený proud (nebo magnetický tok), což obstarává řídicí algoritmus
- Koordinaci změn a předpětí na výkonových zesilovačích

Mezi další úkoly regulátoru pak můžeme zařadit [10]:

- Umožnění modifikace řídicího algoritmu
- Implementaci diagnostických funkcí

Aby se odstranil vysokofrekvenční šum ze signálu, který může znepřesnit reprezentaci polohy hřídele, prochází signál ze snímačů polohy nejdříve antialiasingovými filtry. Regulátor totiž následně pro své zpracování tento signál pravidelně vzorkuje a některá z vysokofrekvenčních informací by se mu mohla falešně jevit jako informace nízkofrekvenční. Tedy poté, co je antialiasingovými filtry odstraněna vysokofrekvenční složka signálu reprezentujícího informaci o poloze, je tento vzorkován analogově-digitálním převodníkem (A/D). Ten napěťový signál diskretizuje a mění jej tak do formy, která může být zpracována digitálním signálovým procesorem (DSP). DSP produkuje výstup úměrný množství proudu potřebného k opravení regulační odchylky polohy hřídele. Tento je srovnáván s aktuálním proudem v ložisku, rovněž zjišťovaným, filtrovaným a vzorkovaným. Rozdíl mezi aktuálním a žádaným proudem slouží k charakterizaci PWM signálu zasílaného výkonovým zesilovačem. Předání požadavku na regulační proud musí nastat ještě předtím, než je pořízen další vzorek polohy hřídele.

Axiální řízení bývá obvykle odděleno od kanálů radiálního a může být navrhováno odděleně (SISO), jak je vidět na Obr. 2 [2].

### 2.2.3 Výkonové zesilovače

Každá z ložiskových os má pár zesilovačů poskytujících proud cívkám ložiskových elektromagnetů, který působí přitažlivou silou opravující pozici podél těchto specifických os [6]. Proudové výkonové zesilovače jsou velmi podobné regulátorům elektromotorů a stejně jako ony využívají ke své činnosti buď spojitě (lineární) nebo spínané techniky [2]. Pro požadavky vysokých výkonů převažují pro své nižší ztráty převážně spínané techniky, jako je pulzně šířková modulace (Pulse Width Modulation, PWM).

### 2.2.4 Záložní systém

V situaci, kdy je magnetickému ložisku přerušeno napájení, ztrácí schopnost levitovat. Proto se po stranách AML nachází záložní ložiska, obvykle valivá nebo kluzná (Obr. 10), schopná přestat několik zachycení rotoru v plné rychlosti [5]. Ty zároveň tvoří podporu rotoru v případě vypnutí systému nebo při jeho přetížení a jsou vidět na Obr. 2. Zatímco vzduchová mezera mezi elektromagnety a rotorem bývá v rozmezí 0,2 – 2 mm, mezi záchytným ložiskem a rotorem pak 0,05 – 1 mm. Obecně tedy bývá světlost záchytného ložiska oproti magnetickému poloviční. Jde tedy hlavně o ochranu přesných statorových a rotorových funkčních ploch AML, stejně jako zamezení nadměrným průhybům rotoru či poškození jakýchkoliv rotujících či stacionárních součástí soustrojí. Více informací

společně s výhodami a nevýhodami jednotlivých koncepčních řešení záložních ložisek lze nalézt např. v [12].

Pro zvýšení spolehlivosti může být záchytný systém vybaven záložním napájecím zdrojem (UPS) poskytujícím AML energii pro podporu rotoru při jeho setrvačném zpomalování [6]. V některých případech může být tento zdroj navržen jako bezbateriový a to tehdy, lze-li přepnout synchronní motor obsažený v sestavě do funkce generátoru. Ten pak využívá setrvačné energie rotoru k získání energie potřebné k napájení systémů AML. Rotor je tak aktivně brzděn a až do doby jeho dostatečného zpomalení je mu také poskytnuta podpora pomocí AML. Samotná záchytná ložiska se pak do kontaktu s rotorem dostanou až při značně menších obvodových rychlostech oproti vysokým pracovním rychlostem strojů vybavených systémy AML, což pozitivně ovlivňuje jejich namáhání a tedy i životnost.



**Obr. 10 Záložní radiální ložisko RDS  
firmy Waukesha určené pro velký  
motorový kompresor [26]**

### 2.3 Vlastnosti aktivních magnetických ložisek

Z výše popsaného magnetického principu a jeho řízení, na němž je činnost AML založena, vyplývají jeho specifické vlastnosti, jimiž se často velmi podstatně odlišuje od konvenčních ložiskových systémů. Jsou jimi zejména [9]:

- **Bez mazivový provoz.** Díky tomu, že magnetická ložiska není třeba mazat, jsou obzvláště vhodná pro stroje, které pracují ve vzduchoprázdnu, při vysokých nebo nízkých (kryogenních) teplotách nebo v agresivních kapalinách. V zásadě lze magnetická ložiska využít v jakémkoliv stroji, v němž nesmí dojít ke kontaminaci mazivy nebo částicemi ořezu, resp. není-li používání maziv slučitelné s výrobním procesem. Takové požadavky jsou charakteristické např. pro linky na výrobu polovodičů, v potravinářském nebo farmaceutickém průmyslu. Provoz bez maziv však také znamená úsporu nejen provozních (maziva a údržba), ale i pořizovacích nákladů, neboť odpadá nákup nezbytných pomocných zařízení, která souvisejí s provozem mazacího systému (např. čerpadla a filtry).
- **Nízké rotační ztráty hřídele.** Je tedy možné například zvolit motor s nižším výkonem a dosáhnout vyšší účinnosti. Nízké ztráty napovídají, že provozní teploty jsou zpravidla nižší než u ložisek jiných typů (např. valivých či hydrodynamických), a jsou tedy kladeny nižší nároky na chlazení celého zařízení.
- **Bezkontaktnost.** Magnetická ložiska pracují s řízením vzduchové mezery. Některé způsoby použití přímo využívají vzduchovou mezeru – např. procesy, které vyžadují průtok procesní kapaliny nebo materiálu. Využití k biologickým a farmaceutickým účelům, včetně zpracování živých buněk, představují jen dva případy možných aplikací. Magnetická ložiska je možné hermeticky utěsnit, díky

čemuž budou vhodná pro použití v technologických procesech založených na agresivních kapalinách, které by jinak mohly poškodit vinutí nebo vrstvení. Ložiska lze rovněž ponořit do procesních kapalin pod tlakem, aniž by bylo nutné je utěšňovat – jsou tedy aplikovatelná v hygienicky citlivých procesech (např. v potravinářském průmyslu).

- Vysoké obvodové rychlosti. Rychlost otáčení je omezena pouze vlastnostmi materiálu rotoru (odstředivé síly) [2]. Na rozdíl od valivých nebo hydrodynamických ložisek dosahují magnetická ložiska mnohem vyšších obvodových rychlostí, a to až 250 m/s [9]. To odpovídá otáčkovému číslu 4,5 milionů  $n \times d$  (kde  $n$  jsou otáčky za minutu a  $d$  průměr hřídele v mm). Díky takovému rychlostem je možné realizovat mnoho nových aplikací, jako např. vysokorychlostní vřetena obráběcích strojů či vodíkový cirkulátor.
- Elektromagnetické ložisko je aktivní prvek, který umožňuje přesné uložení součástí a který velmi usnadňuje svou integraci do procesu řízení kontroly výroby. Můžou být aktivně tlumeny vibrace rotoru. Je taky možné nechat rotor otáčet kolem své hlavní osy setrvačností a vyrušit tak dynamické síly způsobené nevyvážeností.

Díky zabudovaným sensorům a akčním členům může zároveň programové vybavení regulátoru nabízet některé jedinečné vlastnosti, jež u konvenčních ložiskových systémů nejsou dostupné, mezi něž patří zejména [9] :

- Kompenzace nevyváženosti hřídele. Lze jí dosáhnout dvěma způsoby. Jeden způsob je založen na otáčení hřídele kolem geometrické osy a druhý na přesném řízení hřídele, které odstraní házení vyvolané nevyvážeností. Tento způsob je používán v uloženích s vysokými nároky na přesnost, např. v obráběcích strojích. Alternativně lze vyvolat otáčení hřídele okolo těžiště, a tím snížit vibrace přenášené do skříně (na méně než 0,01  $\mu\text{m}$ ). To je neobyčejně důležitá vlastnost pro turbo molekulární čerpadla a jiná zařízení používaná ve výrobě polovodičů.
- Modulování síly v ložisku. Systémy magnetických ložisek mohou být používány jako budič, který moduluje sílu v ložisku se záměrem vyvolat vibrace. Budicí síla působí na rotor bezdotykovým způsobem. Navíc ji lze přesně měřit. Proto jsou magnetická ložiska neobyčejně cenným nástrojem pro navrhování, vývoj a testování zařízení, jakož i pro výzkum dynamického chování rotorů.
- Změna polohy hřídele. Schopnost regulovat šířku vzduchové mezery umožňuje měnit polohu hřídele a dokonce vyvolat i její oscilaci. Tato vlastnost nachází uplatnění například při kompenzaci opotřebení brusného kotouče nebo nastavení vzdálenosti válců papírenských strojů.
- Bezdemontážní diagnostika. Magnetická ložiska jsou vybavena vlastním systémem bezdemontážní diagnostiky, který obsluze dovoluje přístup ke komplexní diagnostice stroje bez požadavku na další přístrojové vybavení. Za pomoci dodatečného softwarového vybavení mohou být zobrazovány informace o poloze a aktuální data v různých formátech, umožňující přesné seřízení ložiska a diagnostiku stroje.
- Servisní flexibilita. Magnetická ložiska mohou být seřizena a upravena přímo na místě. Zejména je možné nastavit jejich tuhost a parametry tlumení což umožňuje bezpečně překonat kritické otáčky a kritické ohybové momenty.

## 2.4 Průmyslová využití

Výhody uvedené výše, zejména pak bezmazivový provoz, možnost extrémních pracovních podmínek, vysoká spolehlivost a účinnost, vedou k velké rozmanitosti oblastí

---

využívajících technologií AML. A to ať už se jedná o petrochemický, energetický, farmaceutický nebo potravinářský průmysl. Mezi jejich typické aplikace patří [5]:

- Kompresory
- Turbíny
- Turboexpandéry
- Centrifugy
- Turbomolekulární pumpy
- Vysokootáčkové generátory
- Obráběcí stroje
- Vřetena textilních strojů

### 3 Laboratorní model aktivního magnetického ložiska

Jak již bylo popsáno v úvodu, v rámci spolupráce mezi FSI a FEKT VUT Brno vznikl prototyp radiálního magnetického ložiska. Pro jeho provoz byl pak vytvořen přípravek umožňující uchycení jeho statorové části a motoru pohánějícího hřídel soustrojí spojenou s rotorem AML, jak je vidět na Obr. 11. Spojení mezi motorem a hřídelí je realizován pružnou plastovou spojkou. AML s řídicím systémem a elektronikou je Obr. 12.



Obr. 11 Osazený zkoušecí přípravek AML

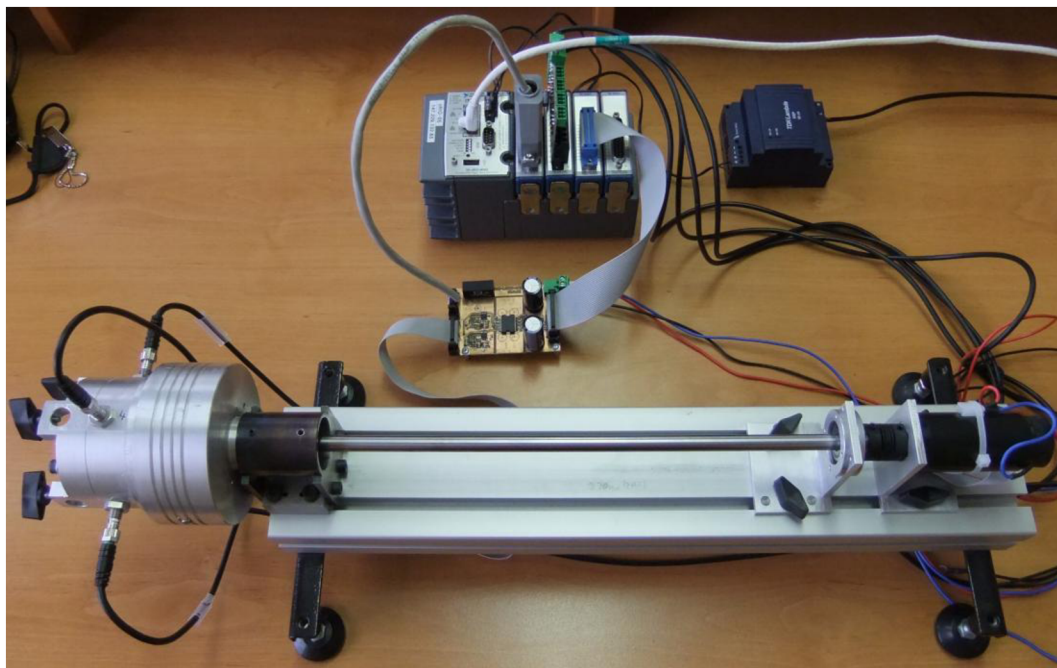
Parametr	Popis	Hodnota	Jednotky
$m$	Hmotnost rotoru	0.365	$kg$
$l$	Délka rotoru	0.5	$m$
$l_m$	Vzdálenost ložiska od uchycení rotoru	0.4	$m$
$l_s$	Vzdálenost senzorů od uchycení rotoru	0.445	$m$
$r$	Poloměr rotoru	0.005	$m$
$I_o$	Moment setrvačnosti rotoru vzhledem k ose procházející uchycením a kolmé na osu souměrnosti (viz Obr. 21)	$15723 \cdot 10^{-6}$	$kg \cdot m^2$
$I_z$	Moment setrvačnosti k ose z (viz Obr. 21)	$8106 \cdot 10^{-6}$	$kg \cdot m^2$

Tab. 3-1 Vlastnosti mechanické části AML

Parametr	Popis	Hodnota	Jednotky
$d$	Velikost vzduchové mezery	0.0014	$m$
$R$	Odpor vinutí elektromagnetů	266	$\Omega$
$L$	Indukčnost elektromagnetů	0.87	$H$
$U_{max}$	Maximální velikost budícího napětí	48	$V$
$K$	Parametr modelu magnetické síly	$4.0970 \cdot 10^{-4}$	$Nm^2/A^2$

Tab. 3-2 Vlastnosti elektromagnetické části experimentálního zařízení





Obr. 12 Pracoviště AML

### 3.1 PAC pro řízení ložiska

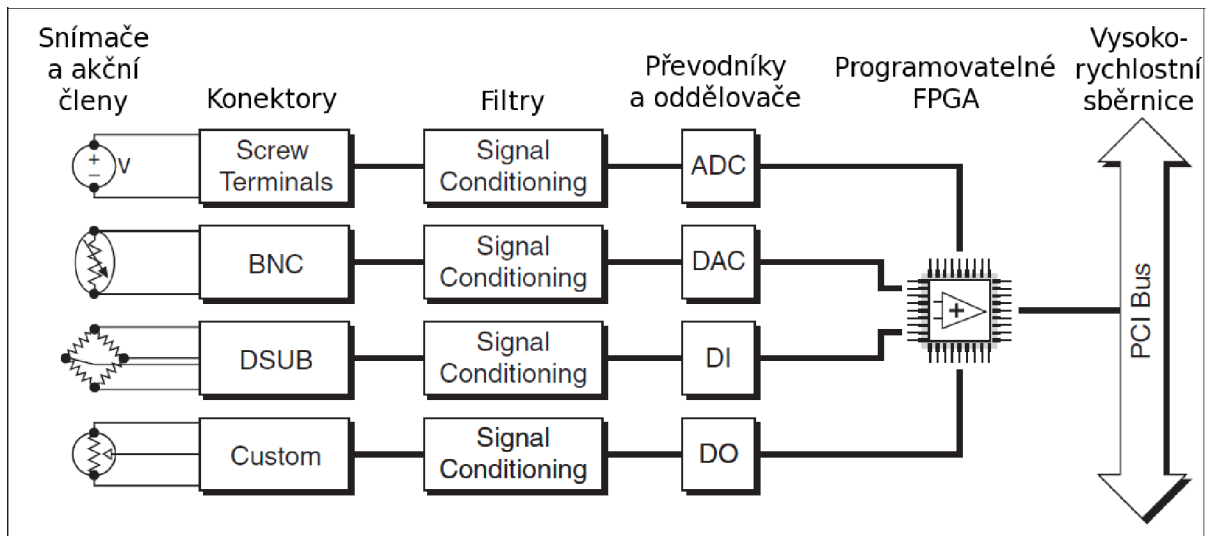
S cílem vyhovět narůstajícím požadavkům na vývoj řízení strojů a průmyslových řídicích systémů vytvořily vůdčí společnosti zabývající se automatizací novou třídu průmyslových řídicích kontrolérů známých jako PAC (Programmable Automation Controller). Systémy PAC kombinují odolnost programovatelného automatu (Programmable Logic Controller, PLC) s funkcí počítače s otevřenou, flexibilní softwarovou architekturou. S PAC je možné vytvářet softwarové systémy umožňující pokročilé řízení, komunikaci, zápis dat a zpracování signálů. Odolný hardware pak umožňuje vykonávat logické operace, řízení pohybu, řízení procesů nebo zpracování obrazu. [13]



Obr. 13 NI cRio: 1) Kontrolér 2) Chassis 3) I/O Moduly (zleva Slot 1 – 4)

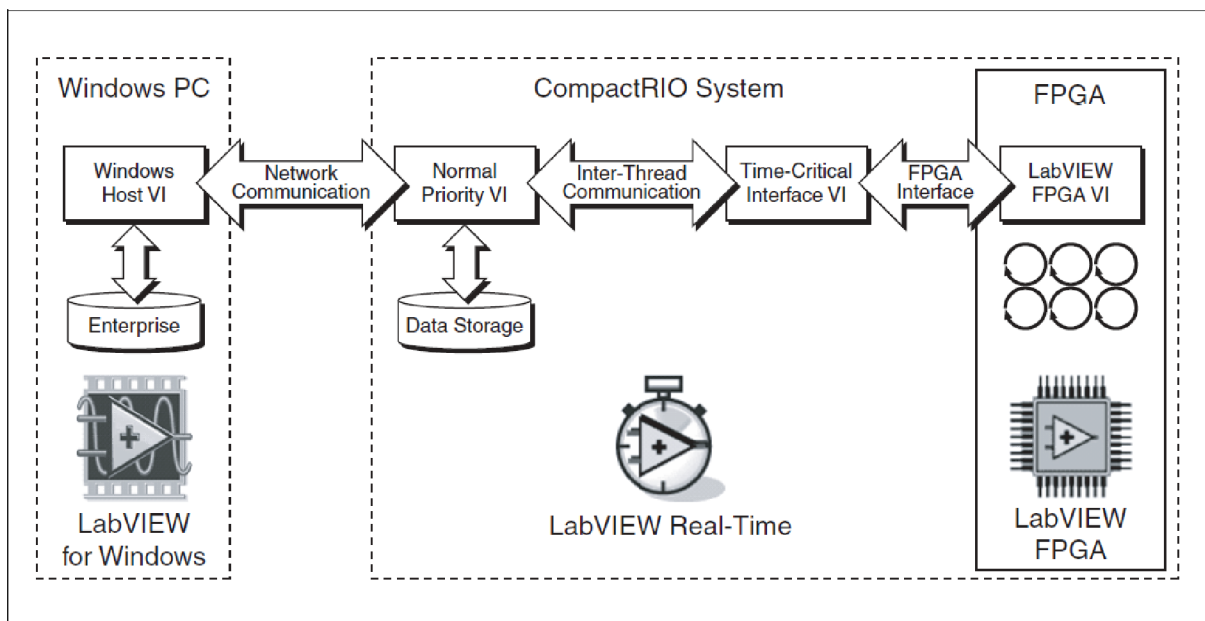
Jedním z takových kontrolérů je i systém CompactRIO (cRIO) společnosti National Instruments (NI) použitý jako hlavní platforma pro řízení AML (Obr. 13). NI cRIO je malý

robustní reálnotimový průmyslový řídicí a akviziční systém obsahující technologii programovatelného hradlového pole (Field-programmable gate array, FPGA). Jeho hardwarová část sestává ze tří základních částí: víceslotového chassis, kontroléru a I/O modulů.



Obr. 14 Architektura I/O Modulů [12]

Kovové víceslotové chassis obsahuje od jednoho do tří milionů hradel FPGA (v závislosti na typu), slot pro kontrolér, sloty pro I/O moduly a sběrnici PCI pro komunikaci mezi FPGA a reálnotimovým procesorem. Čip FPGA je přitom přímo napojen na I/O Moduly jak ukazuje obrázek Obr. 14. Kontrolér je pak kromě průmyslového floating-point procesoru vybaven 10/100 Mb/s ethernetovým portem a integrovaným webovým (HTTP) a souborovým (FTP) serverem. [14]



Obr. 15 Aplikační architektura cRIO [12]

Celá typická aplikační architektura cRIO sestávající z FPGA, kontroléru a Windows PC je zobrazena na Obr. 15. Kontrolér cRIO využívá ke svému chodu operační systém reálného času LabVIEW Real-Time OS, PC pak operačního systému Windows. Kód běžící na FPGA ke svému chodu žádný operační systém nevyužívá, protože je do něj přímo hardwarově implementován.

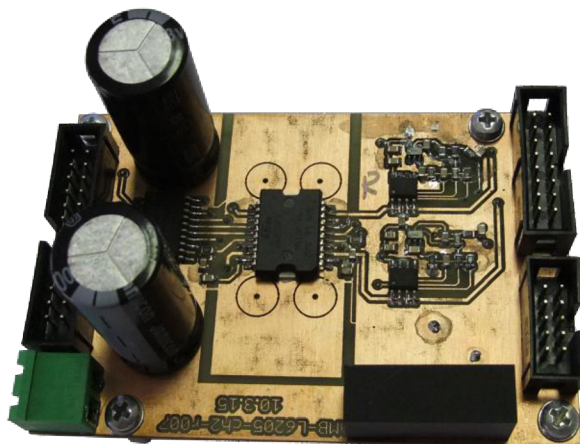
K účelu experimentů s AML byly vybrány tyto komponenty systému cRIO:

- Chassis cRIO 9111. Jedná se o čtyřslotové chassis osazené FPGA jednotkou Virtex-5 LX30. Bližší informace o tomto chassis lze nalézt např. v [15] nebo na stránkách výrobce [16].
- Kontrolér NI cRIO-9022. Jedná se o malý robustní reálnový kontrolér poskytující k výpočtům 533MHz procesor MPC8347, 256MB operační paměti DDR2 a 2 GB úložného prostoru pro programy a záznam dat. Bližší informace o tomto kontroléru lze nalézt v [17] nebo na stránkách výrobce [16]. Osazení kontroléru ve vybraném systému cRIO je vidět na Obr. 13.

### 3.2 Výkonový modul AML

Ovládací elektronika AML sestává ze tří modulů. První z nich plní funkci výkonového zesilovače a obsahuje obvody pro měření proudu (Obr. 16). Připojuje se k I/O modulům cRIO NI9205 a NI9401 zasunutým do slotů 2 a 3 v chassis. Tyto moduly jsou podrobněji popsány níže.

Funkce výkonového zesilovače je zajištěna pomocí střidače, který na základě vstupu ve formě digitálního signálu připojuje na elektromagnety AML pulsně-šířkově modulované napětí. Rozptylová indukčnost cívek elektromagnetů se pak chová jako dolnofrekvenční propust, takže proud na nich je spojitý.



Obr. 16 Modul výkonového zesilovače s obvody pro měření proudu

#### 3.2.1 I/O moduly PAC pro výkonový modul AML

- Slot 1: NI9205. Jedná se o 32kanálový multiplexovaný  $\pm 200$  mV –  $\pm 10$  V analogový napěťový vstupní modul série C s vzorkovací periodou 250 kS/s a rozlišením 16 bitů, zakončený standardním průmyslovým 27pinovým D-Sub konektorem. Zapojení jednotlivých kanálů je patrné z Tab. 3-3. Vstupní rozsah byl u všech kanálů nastaven na  $\pm 5$  V s měřením napětí v referenčním zapojení (RSE). Minimální čas mezi změnami na vstupech byl nastaven na 8  $\mu$ s. Bližší informace o tomto modulu lze nalézt např. v [18] nebo na stránkách výrobce [16]. Osazení modulu ve vybraném systému cRIO je vidět na Obr. 13.
- Slot 3: NI9401. Jedná se o 8kanálový 5V/TTL vysokorychlostní obousměrný digitální I/O modul série C zakončený standardním průmyslovým 25pinovým D-Sub konektorem. Zapojení jednotlivých kanálů je patrné Tab. 3-4. V zapojení je využito šest jeho kanálů jako digitální TTL výstup, z čehož první čtyři kanály DIO0

– DIO3 slouží k nastavení šířky pulzu pro příslušný kanál výkonového zesilovače AML a zbývající dva DIO4 – DIO5 k zapínání proudu do magnetů příslušných os AML. Bližší informace o tomto modulu lze nalézt např. v [19] nebo na stránkách výrobce [16]. Osazení modulu ve vybraném systému cRIO je vidět na Obr. 13.

Kanál	Typ	Název	Význam
16	Napěťový vstup	Proud_Up	Vstup z horního snímače proudu
17	Napěťový vstup	Proud_Down	Vstup ze spodního snímače proudu
18	Napěťový vstup	Proud_Left	Vstup z levého snímače proudu
19	Napěťový vstup	Proud_Right	Vstup z pravého snímače proudu

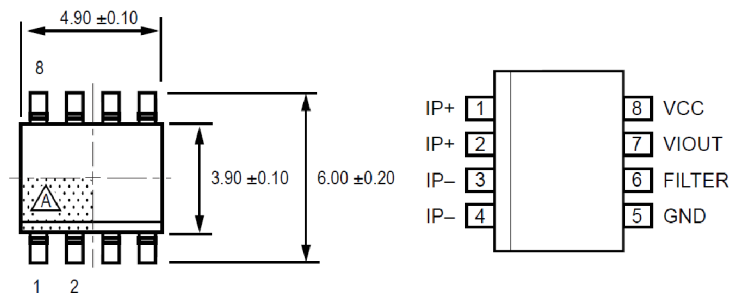
Tab. 3-3 Slot 1

Kanál	Typ	Název	Význam
DIO0	TTL výstup	OUT_Right	PWM výstup pro pravý kanál
DIO1	TTL výstup	OUT_Left	PWM výstup pro levý anál
DIO2	TTL výstup	OUT_Down	PWM výstup pro spodní kanál
DIO3	TTL výstup	OUT_Up	PWM výstup pro horní kanál
DIO4	TTL výstup	EN1	Vypínání Osy X
DIO5	TTL výstup	EN2	Vypínání Osy Y

Tab. 3-4 Slot 3

### 3.2.2 Snímače proudu

K měření proudu tekoucí jednotlivými cívkami byl použit snímač Allegro ACS712ELCTR-05B-T (Obr. 17). Jedná se o plně integrovaný lineární snímač proudu snímající na principu Hallova jevu. Jeho hlavní parametry jsou uvedeny v Tab. 3-5. Další informace o tomto snímači lze nalézt v [20] nebo na stránkách výrobce [21].



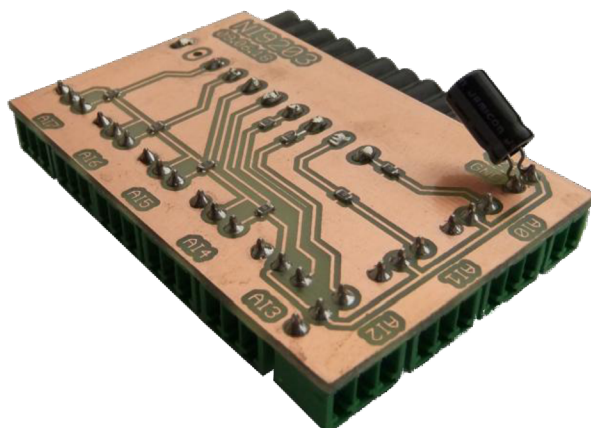
Obr. 17 ACS712ELCTR-05B-T [22]

Parametr	Hodnota
Optimalizovaný měřicí rozsah $I_p$	-5 – 5 A
Citlivost $Sens$	185 mV/A (typ. v celém rozsahu $I_p$ )
Šum $V_{NOISE(PP)}$	21 mV
Výstupní odchylka $E_{TOT}$	$\pm 1,5\%$

Tab. 3-5 Hlavní parametry ACS712ELCTR-05B-T

### 3.3 Modul měření polohy rotoru ložiska

Druhý modul plní funkci napájení indukčních snímačů polohy a připojuje tyto k I/O modulu NI9203 zasunutého do slotu 2 v chassis. Je zobrazen na Obr. 18.



Obr. 18 Napájecí modul snímačů polohy

#### 3.3.1 I/O moduly PAC pro měření polohy ložiska

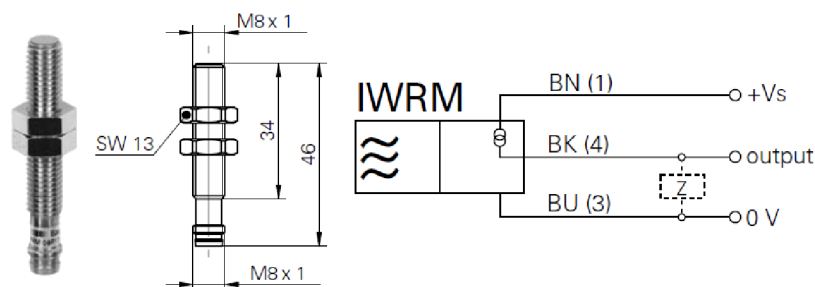
- Slot 2: NI9203. Jedná se o 8kanalový multiplexovaný  $\pm 20$  mA analogový proudový vstupní modul série C s vzorkovací periodou 200 kS/s a rozlišením 16 bitů, zakončený univerzálním 9pinovým konektorem. Zapojení jednotlivých kanálů je patrné z Tab. 3-6. Měřicí rozsah byl u všech kanálů nastaven na 0 – 20 mA. Minimální čas mezi změnami na vstupech byl nastaven na 5  $\mu$ s. Bližší informace o tomto modulu lze nalézt např. v [22] nebo na stránkách výrobce [16]. Osazení modulu ve vybraném systému cRIO je vidět na Obr. 13.

Kanál	Typ	Název	Význam
AI0	Proudový vstup	Poloha_Left	Vstup z levého snímače polohy
AI1	Proudový vstup	Poloha_Right	Vstup z pravého snímače polohy
AI2	Proudový vstup	Poloha_Down	Vstup ze spodního snímače polohy
AI3	Proudový vstup	Poloha_Up	Vstup z horního snímače polohy

Tab. 3-6 Slot 2

#### 3.3.2 Snímače polohy rotoru

K měření polohy rotoru AML byl použit snímač Baumer IWRM 08I9501/S35 (Obr. 19). Jedná se o lineární indukční snímač vzdálenosti s vysokým rozlišením a rychlou odezvou opatřený proudovým výstupem. Jeho hlavní parametry jsou uvedeny v Tab. 3-7. Více o indukčních snímačích bylo uvedeno kapitole 2.2.1.1. Další informace o tomto snímači lze nalézt v [23] nebo na stránkách výrobce [24].



Obr. 19 IWRM 08I9501/S35 [23]

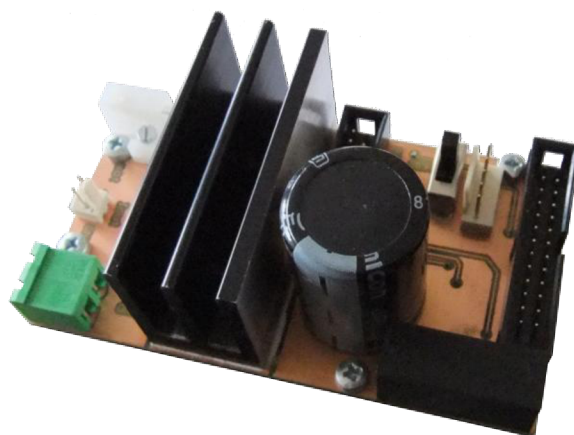
Parametr	Hodnota
Měřicí rozsah $S_d$	0 – 2 mm
Rozliše $i$	< 0,001 mm (stat.), < 0,005 mm (dynam.)
Přesnost při opakování	< 0,02 mm
Nelinearita	$\pm 100 \mu\text{m}$
Teplotní drift	$\pm 5 \%$ (celý rozsah)
Odezva (tovární charakteristika)	0,5 ms
Výstupní signál	0 – 10 mA

Tab. 3-7 Hlavní parametry IWRM 08I9501/S35

Poloha rotoru ložiska vzhledem ke každé z os byla měřena dvěma těmito snímači zapojenými v diferenciálním zapojení. Toto způsob zapojení umožnil eliminovat vliv zaoblení statoru při posunu rotoru v ose kolmé na měřenou osu, kdy by při použití pouze jednoho snímače docházelo k milnému zjištění změny výchylky. Celkem tedy bylo k měření polohy rotoru použito čtyř těchto snímačů, jak je ukázáno na Obr. 26.

### 3.4 Modul řízení DC motoru

Druhý modul obstarává řízení motoru, nese označení cRIO-16205-DC-r002 a je zobrazen na Obr. 20. Jedná se o modul používaný k laboratorním úlohám na ÚAI. Je určen k řízení stejnosměrných motorů pomocí PWM napětí a obsahuje též podpůrnou elektroniku pro enkodér polohy. Modul se připojuje k I/O modulu NI9401 zasunutému do slotu 4 v chassis.



Obr. 20 Modul obvodů pro řízení motoru

**3.4.1 I/O moduly PAC pro řízení DC motoru**

- Slot 4: NI9401. Teno modul byl již podrobněji popsán dříve v kapitole 3.2.1. Zapojení jednotlivých jeho kanálů pro modul řízení DC motoru je patrné z Tab. 3-8.

Kanál	Typ	Název	Význam
DIO0	TTL výstup	motor/EN	Zapínání PWM motoru
DIO1	TTL výstup	motor/PWM	PWM výstup pro motor
DIO2	TTL výstup	motor/DIR	Ovládání směru otáčení motoru
DIO4	TTL vstup	encoder/CH-A	Vstup kanálu A z enkodéru
DIO5	TTL vstup	encoder/CH-B	Vstup kanálu B z enkodéru

Tab. 3-8 Slot 4

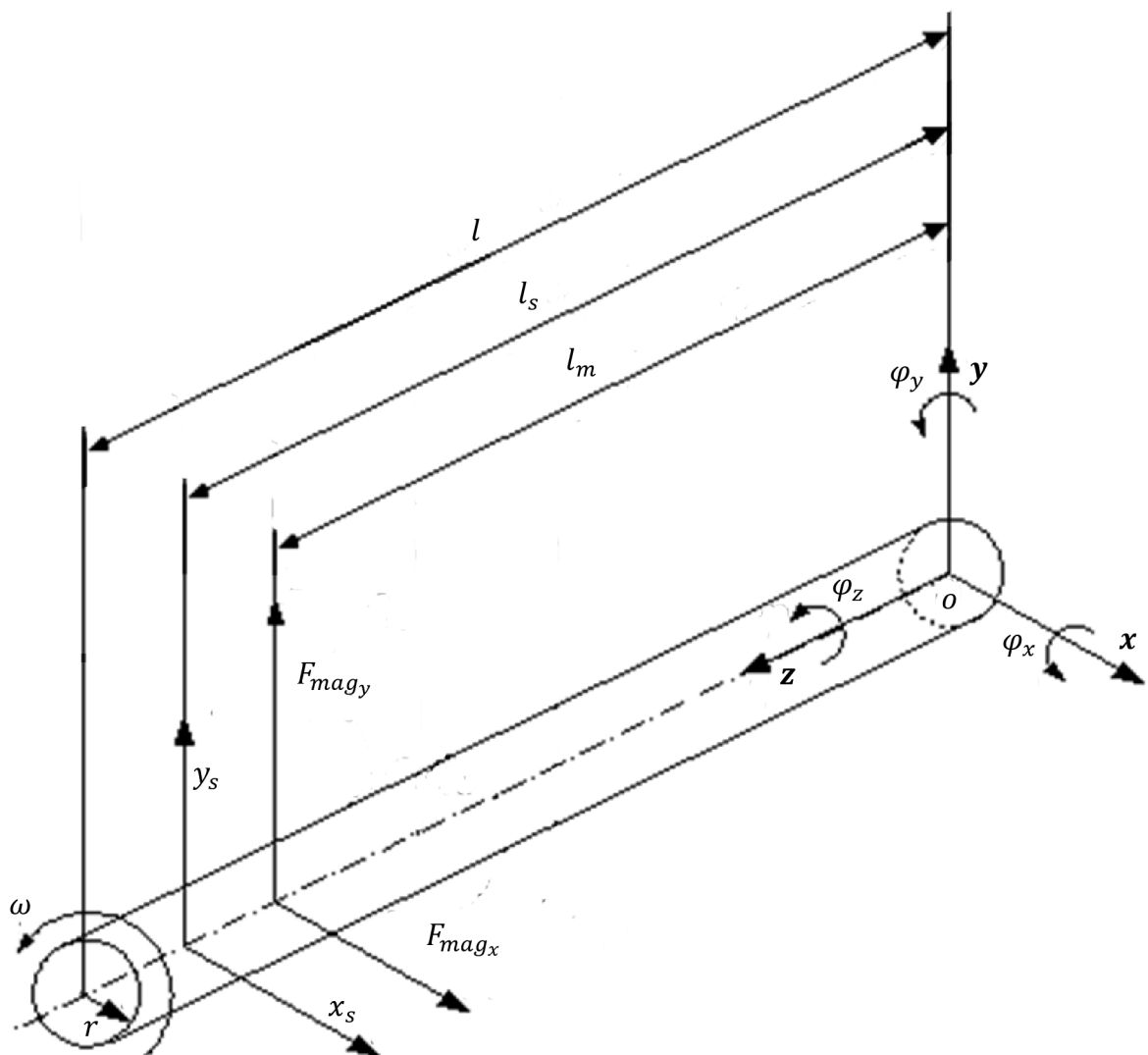
## 4 Získání matematického modelu AML pro návrh řízení

### 4.1 Analytický model AML

Pro vytvoření analytického modelu AML, který bude dále použit pro návrh řízení, je potřeba vytvořit model rotoru, reprezentovaného v našem případě hřídele a model samotné magnetické síly vytvářené ložiskem.

#### 4.1.1 Model hřídele

Zjednodušený model hřídele představuje tenký dlouhý válec na jedné straně pružně přichycený k elektromotoru a na straně druhé uchyceným v AML, jak ukazuje Obr. 21. Zavedeme kartézský souřadný systém s počátkem v uchycení  $o$  a osou  $z$  rovnoběžnou s geometrickou osou hřídele. Hodnoty parametrů tohoto modelu jsou uvedeny v Tab. 3-1.



Obr. 21 Model hřídele

Z momentové rovnováhy pak lze odvodit rovnici

$$I\ddot{q} = m^o \quad (2)$$



popisující závislost mezi natočením hřídele kolem os  $\mathbf{x}$  a  $\mathbf{y}$  a silovým zatížením působícím na hřídel, přičemž matice  $\mathbf{I}$  představuje matici momentů setrvačnosti

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_o & 0 & 0 \\ 0 & I_o & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

kde  $I_o$  představuje moment setrvačnosti hřídele k osám otáčení procházejících uchycením a kolmým ke geometrické ose hřídele o velikosti

$$I_o = \frac{1}{3}ml^2 + \frac{1}{4}mr^2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2] \quad (4)$$

a  $I_z$  představuje moment setrvačnosti hřídele ke své geometrické ose (ose  $\mathbf{z}$  v zavedeném souřadném systému) o velikosti

$$I_z = \frac{1}{2}mr^2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2] \quad (5)$$

přičemž  $m$  značí hmotnost hřídele,  $l$  její délku a  $r$  její poloměr.  $\mathbf{q}$  značí vektor natočení

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \varphi_x \\ \varphi_y \\ \varphi_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

kde  $\varphi_x$  představuje úhel natočení vzhledem k ose  $\mathbf{x}$ ,  $\varphi_y$  představuje úhel natočení vzhledem k ose  $\mathbf{y}$  a  $\varphi_z$  představuje úhel natočení vzhledem k ose  $\mathbf{z}$ .  $\mathbf{m}^o$  představuje vektor momentů hřídele k ose uchycení

$$\mathbf{m}^o = \begin{bmatrix} M_x^o \\ M_y^o \\ M_z^o \end{bmatrix} \quad (7)$$

kde jeho složky  $M_x^o$ ,  $M_y^o$ ,  $M_z^o$  vyjadřují momenty k příslušným osám  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{y}$ ,  $\mathbf{z}$  o velikostech

$$M_x^o = -F_{mag_y}l_m + \frac{1}{2}mgl + I_o\alpha_{res}^x \quad (8)$$

$$M_y^o = F_{mag_x}l_m - I_o\alpha_{res}^y \quad (9)$$

$$M_z^o = M_{motor} \quad (10)$$

přičemž  $F_{mag_x}$  je magnetická síla působící v ose  $\mathbf{x}$  a  $F_{mag_y}$  magnetická síla působící v ose  $\mathbf{y}$ ,  $l_m$  je délka ramene na kterém působí tyto magnetické síly,  $g$  je tíhové zrychlení a  $\alpha_{res}$  Resalovo zrychlení generující nám společně s  $I_o$  přídavný moment (gyroskopický moment) Velikost Resalova zrychlení lze vypočítat jako

$$\overrightarrow{\alpha_{res}} = \overrightarrow{\dot{\varphi}_{un}} \times \overrightarrow{\dot{\varphi}_{rel}} \quad (11)$$

tedy pak v našem případě

$$\alpha_{res}^x = \dot{\varphi}_x \dot{\varphi}_z \quad (12)$$

a

$$\alpha_{res}^y = \dot{\phi}_y \dot{\phi}_z \quad (13)$$

Výchylky hřídele v místě snímačů lze spočítat jako

$$\mathbf{d} = \mathbf{L}_s \times (\tan \mathbf{q}) \quad (14)$$

kde  $\mathbf{d}$  značí vektor výchylek

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} \quad (15)$$

přičemž  $x_s, y_s$  značí výchylky hřídele v místě snímačů ve směru příslušných os a matice  $\mathbf{L}_s$

$$\mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} l_s & 0 \\ 0 & -l_s \end{bmatrix} \quad (16)$$

představuje matici vzdáleností, ve které je  $l_s$  vzdálenost snímačů polohy hřídele od jejího uchycení. Pro malé velikosti úhlů kdy  $\tan x \doteq x$  lze rovnici (14) zjednodušit do tvaru

$$\mathbf{d} \approx \mathbf{L}_s \times \mathbf{q} \quad (17)$$

Z rovnice **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** pak za užití rovnice (17) můžeme vyjádřit magnetické síly  $F_{mag_x}$  a  $F_{mag_y}$  jako

$$F_{mag_x} = \frac{I_o \left( \frac{\ddot{x}_s}{l_s} \right) + I_o \left( \frac{\dot{y}_s}{l_s} \right) \omega}{l_m} \quad (18)$$

$$F_{mag_y} = - \frac{I_o \left( \frac{\ddot{y}_s}{l_s} \right) - \frac{1}{2} mgl - I_o \left( \frac{\dot{x}_s}{l_s} \right) \omega}{l_m} \quad (19)$$

Za předpokladu, že je výchylka hřídele měřena v místě působení magnetické síly elektromagnety působí silou na konci hřídele, tedy  $l_m = l_s = l$ , můžeme, rovnice (18) a (19) zjednodušit do tvaru

$$F_{mag_x} = \frac{I_o}{l^2} \ddot{x}_s + \frac{\sum M_{Zx}}{l} \quad (20)$$

$$F_{mag_y} = \frac{I_o}{l^2} \ddot{y}_s + \frac{\sum M_{Zy}}{l} \quad (21)$$

kde  $M_{Zx}$  a  $M_{Zy}$  značí statické a dynamické zátěžné momenty v příslušných osách.

Tyto síly budou při řízení polohy hřídele v jednotlivých osách požadovanými silami  $F_p$  a jejich vytvořením pomocí elektromagnetů se budeme zabývat v následující podkapitole.

#### 4.1.2 Model magnetické síly

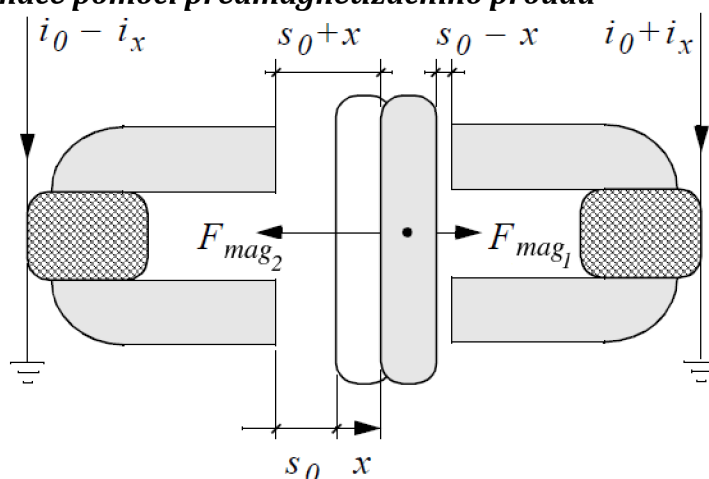
V předchozí podkapitole jsme z rovnice dynamiky rotoru vyjádřili žádané magnetické síly  $F_p$  nutné pro kompenzaci statických a dynamických účinků rotoru ložiska. Nyní se budeme zabývat jejím vytvořením za pomoci elektromagnetu.

Jak již bylo zmíněno výše, elektromagnety mohou vytvářet pouze přitažlivou sílu. Z (1) vyplývá, že pro jeden elektromagnet má velikost proudu  $i$  vytvářejícího na elektromagnetu požadovanou sílu  $F_p$  odvozenou v předchozí podkapitole velikost:

$$i = s \sqrt{\frac{F_p}{K}} \quad [A] \quad (22)$$

Tento vztah je ale nelineární, což komplikuje návrh řízení. Existuje však několik způsobů, jak se s touto skutečností vypořádat [3] [4]. Patří mezi ně aproximace pomocí předmagnetizačního proudu, a nelineární kompenzace.

#### 4.1.2.1 Aproximace pomocí předmagnetizačního proudu



Obr. 22 Diferenciální schéma dvou elektromagnetů [3]

Při ní je k řídicím proudům na cívkách přidán konstantní předmagnetizační proud  $i_0$ , jak můžeme vidět na Obr. 22. Proud na první z cívek má pak velikost  $i_0$  minus řídicí proud  $i_x$  závislý na posunutí hřídele  $x$  z její nominální polohy  $s_0$  (zde pro  $x > 0$  nabývá  $i_x$  záporných hodnot). Obdobně pak velikost proudu na druhé z cívek  $i_0 + i_x$ . Celková magnetická síla působící na hřídel je pak rozdílem sil od obou elektromagnetů:

$$F_{mag} = F_{mag_1} - F_{mag_2} = K \left( \frac{(i_0 + i_x)^2}{(s_0 - x)^2} - \frac{(i_0 - i_x)^2}{(s_0 + x)^2} \right) \quad [N] \quad (23)$$

Jak již bylo uvedeno, bývají magnetická ložiska často provozována v jedné nominální poloze (na Obr. 22  $x = 0$  a hřídel se nachází uprostřed mezi dvěma magnety). Pro malé výchylky  $x$  a malé proudy  $i_x$  je rovnice (23) linearizována okolo  $s_0$  a  $i_0$  jako

$$F_{mag,lin} = k_i i_x + k_s x \quad [N] \quad (24)$$

kde  $k_i$  značí proudovou konstantu definovanou jako

$$k_i = \left. \frac{\partial F_{mag}}{\partial i_x} \right|_{i_x=0} = 4K \frac{i_0}{s_0^2} \quad \left[ \frac{N}{A} \right] \quad (25)$$

a  $k_s$  značí výchylkovou konstantu definovanou jako

$$k_s = \left. \frac{\partial F_{mag}}{\partial x} \right|_{x=0} = 4K \frac{i_0^2}{s_0^3} \quad \left[ \frac{N}{m} \right] \quad (26)$$

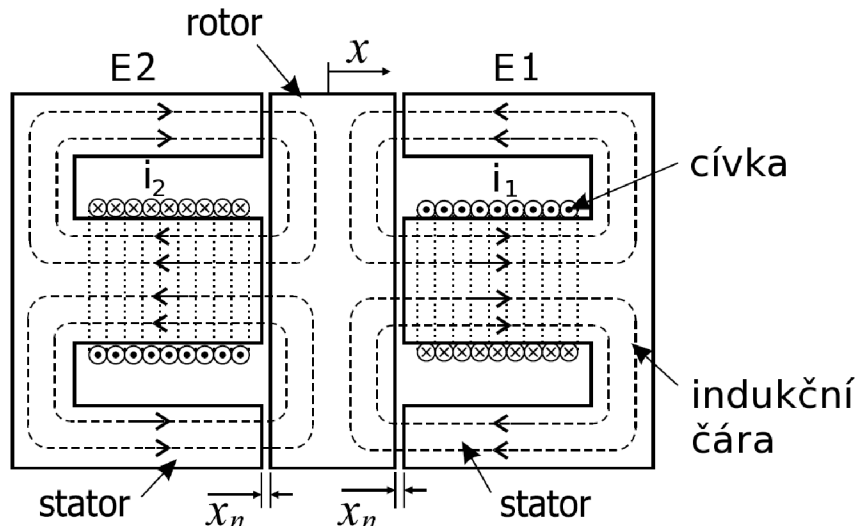
Tento způsob linearizace s pomocí přídavného proudu  $i_0$  přináší několik nevýhod:

- Malý pracovní rozsah – aproximace za pomoci (24) je dostatečně přesná, pokud se rotor nachází ve své nominální poloze, ale při vychýlení z ní svou přesnost rychle ztrácí. Jako důsledek pak se vzrůstající výchylkou z nominální polohy ztrácí regulace svou přesnost, což může vést k nestabilitě systému.
- Výkonové ztráty

#### 4.1.2.2 Nelineární kompenzace

Na Obr. 23 vidíme dva elektromagnety zachycující jeden stupeň volnosti AML.  $x$  zde značí výchylku rotoru a  $x_n$  nominální vzduchovou mezeru; tedy v případě, že je žádanou polohou střed mezi elektromagnety

$$x_n = \frac{d}{2} \quad (27)$$



Obr. 23 Dva elektromagnety zachycující jeden stupeň volnosti [25]

Nelineární kompenzátor (NC) může být navržen různými způsoby. V našem případě pracuje NC při požadavku na sílu  $F_p$  následovně:

- Požadovaná síla  $F_p > 0$ , pak požadovanou sílu může vytvářet pouze elektromagnet E1 a velikost proudu  $i_1$  vytvářejícího tuto sílu může být vypočtena podle (22). Proud  $i_2$  na druhém z elektromagnetů má nulovou velikost.

$$F_p > 0: i_1 = s \sqrt{\frac{F_p}{K}}, i_2 = 0 [A] \quad (28)$$

- Požadovaná síla  $F_p < 0$ , pak požadovanou sílu může vytvářet pouze elektromagnet E2 a velikost proudu  $i_2$  vytvářejícího tuto sílu může být vypočtena podle (22). Proud  $i_1$  na druhém z elektromagnetů má nulovou velikost.

$$F_p < 0: i_2 = s \sqrt{\frac{F_p}{K}}, i_1 = 0 \text{ [A]} \quad (29)$$

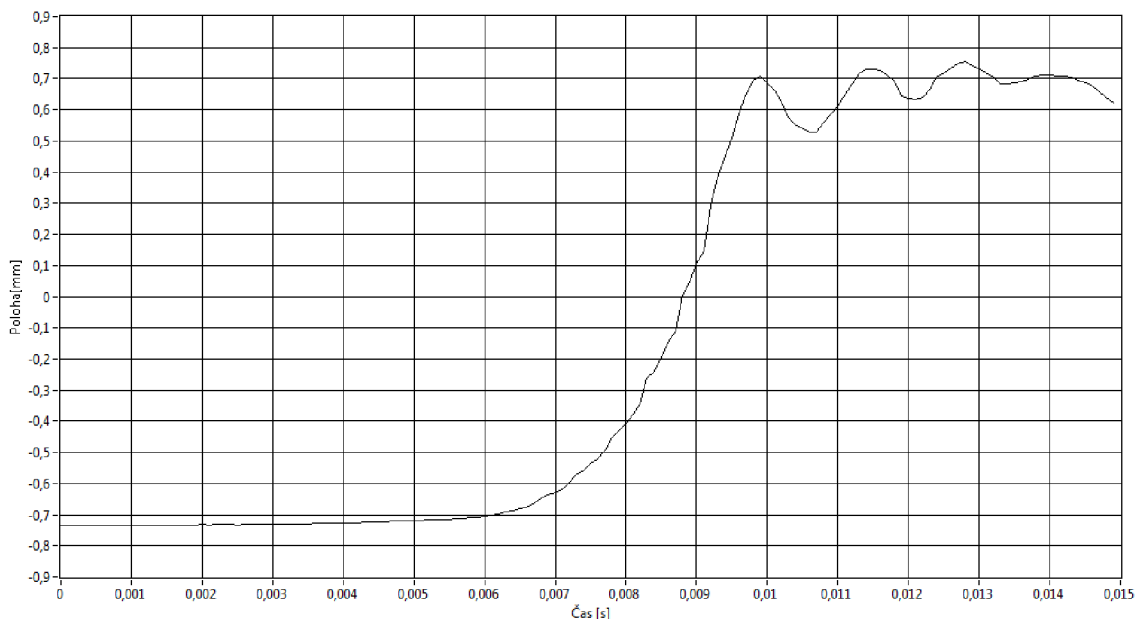
Přítom v rovnicích (28) a (29) značí  $s$  vzdálenost mezi elektromagnetem a hřídelí. V našem případě tedy pro

$$F_p > 0: s = x_n - x \quad (30)$$

$$F_p > 0: s = x_n + x \quad (31)$$

## 4.2 Volba vzorkovací periody

Pro návrh a realizaci diskrétního řízení je nutná volba vzorkovací periody. Měla by být tak malá, aby vzorkovaný signál dostatečně přesně popisoval chování rotoru. Zároveň ale dostatečně velká na to, aby byl regulátor schopen výpočtů nutných pro řízení. Na Obr. 24 vidíme polohovou odezvu rotoru, je-li na elektromagnet přivedeno maximální napětí. Je z ní patrné, že rotor dosáhne své nominální polohy zhruba za 6 ms. Zároveň je vidět zpoždění náběhu způsobené velkou indukčností cívek. Vzorkovací perioda řízení byla při experimentech zvolena na 1ms.



Obr. 24 Polohová odezva rotoru při přivedení max. napětí na elektromagnet

## 4.3 Identifikace parametrů

Pod pojmem identifikace systému rozumíme nalezení matematického modelu daného procesu vhodného pro daný účel [25]. Vychází-li toto hledání z matematicko-fyzikální analýzy, označujeme ho jako analytickou identifikaci. Naopak, je-li zdrojem hledání matematického modelu měření na systému (experiment), označujeme ho jako identifikaci experimentální. Jsou-li v průběhu experimentální identifikace data nejprve zaznamenána a teprve následně vyhodnocována, mluvíme o off-line identifikaci. Naopak, je-li realizováno přímé spojení mezi počítačem a zkoumaným systémem a vyhodnocování získaných dat probíhá v periodických intervalech, mluvíme o online identifikaci.

Matematický model můžeme charakterizovat jako matematické vyjádření podstatných vlastností existujícího nebo konstruovaného systému, které popisuje znalosti o systému v použitelné formě [25]. Matematické modely dělíme na parametrické a neparametrické:

- Parametrické modely – z matematického hlediska představují rovnice, jejich soustavy, nebo algebraické vztahy, které explicitně obsahují koeficienty těchto rovnic a vztahů. Tyto koeficienty obecně označujeme jako parametry modelu.
- Neparametrické modely – zpravidla reprezentují funkční závislost mezi zvoleným vstupním a jemu odpovídajícím výstupním signálem. Tato závislost pak bývá vyjadřována buď graficky pomocí záznamu měření odezvy, nebo tabulkově. Neparametrické modely nejčastěji graficky vyjadřují přechodovou, váhovou nebo frekvenční charakteristiku. Hodnoty parametrů modelu jsou pak implicitně obsaženy v těchto funkčních závislostech a lze je získat až jejich následným vyhodnocením pro zvolenou strukturu modelu.

V modelech magnetické síly popsaných v kapitole 4.1.2 vystupuje jako neznámý parametr konstanta  $K$ . Jejím určením se budeme zabývat v následující podkapitole.

#### 4.3.1 Identifikace konstanty $K$

Při identifikaci parametru  $K$  budeme vycházet z momentové rovnováhy magnetické síly horního elektromagnetu vyvolané proudem  $i$  a tíhové síly působící na rotor v ose  $y$ . Vyjdeme-li z (19) a (22), je tento vztah popsán rovnicí

$$i = -s \sqrt{\frac{mgl}{2l_m K}} \quad (32)$$

Získaná hodnota parametru  $K$  je uvedena v Tab. 3-2.



## 5 Řídicí systém aktivního magnetického ložiska

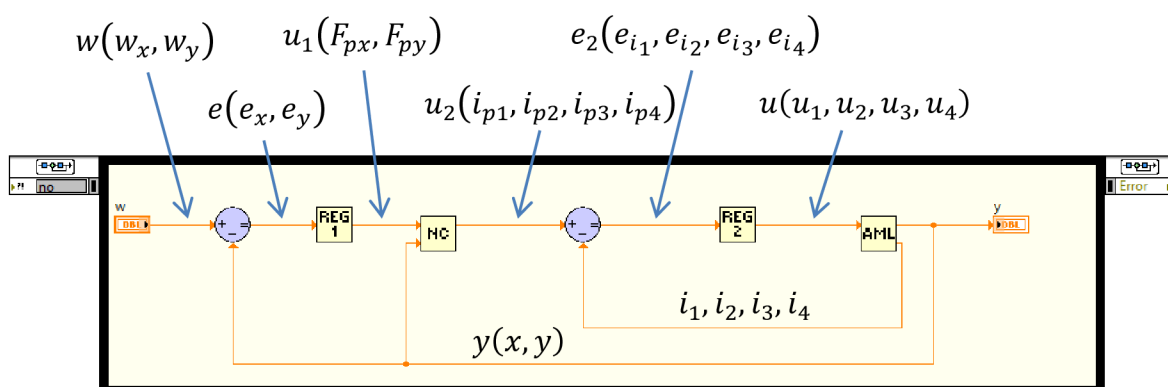
### 5.1 Koncepce řídicího systému

Jak bylo popsáno v kapitole 3.1, je k řízení AML použit systém NI cRIO. Řízení je rozděleno na dvě úrovně – úroveň ovládání periférií, která běží na hradlovém poli (FPGA) a úroveň regulátoru AML, který běží na real-time systému cRIO. Zásahy do chování regulátoru AML je možné realizovat z libovolného zařízení přes TCP/IP rozhraní a sdílené síťové proměnné. V tomto případě je pro tento účel použito PC, na kterém je řešena i problematika určení kalibrace snímačů a ladění regulátorů.

Přitom je řídicí systém navrhován tak, aby kód běžící na jednotlivých úrovních zajišťoval následující úkoly:

- Úroveň ovládání periférií (FPGA)
  - Hardwarově řízené časování snímání polohy hřídele a proudu tekoucího jednotlivými cívkami AML
  - Nízkoúrovňové zpracování signálu ze snímačů polohy a proudu (filtry, kalibrační přepočty atd.)
  - Snímání rychlosti hřídele a jejího natočení kolem osy  $z$
  - Ovládání PWM výkonového zesilovače AML a motoru pohánějícího hřídel s rotorem ložiska
- Úroveň regulátoru AML (cRIO real-time)
  - Další zpracování dat získaných z FPGA
  - Záznam dat a práce s nimi za účelem kalibrace a identifikace AML
  - Nastavování a práce s parametry procesů běžících na FPGA (koeficienty kalibračních polynomů atd.)
  - Řízení AML
- Vzdálené ovládání (Windows PC)
  - Vyhodnocování naměřených dat za účelem kalibrace snímačů a identifikace AML
  - Komunikace s procesy běžícími na kontroléru

### 5.2 Návrh řídicího systému



Obr. 25 blokové schéma regulačního obvodu

Na Obr. 25 vidíme blokové schéma navrženého regulačního obvodu. Je tvořen polohovým regulátorem REG1, nelineárním kompenzátozem NC, proudovým regulátorem REG2 a regulovanou soustavou AML:

- Regulátor REG1. Vstupem do polohového regulátoru REG1 je regulační odchylka žádané veličiny  $w$  a regulované veličiny  $y$ , výstupem z něho pak akční veličina  $u_1$ .



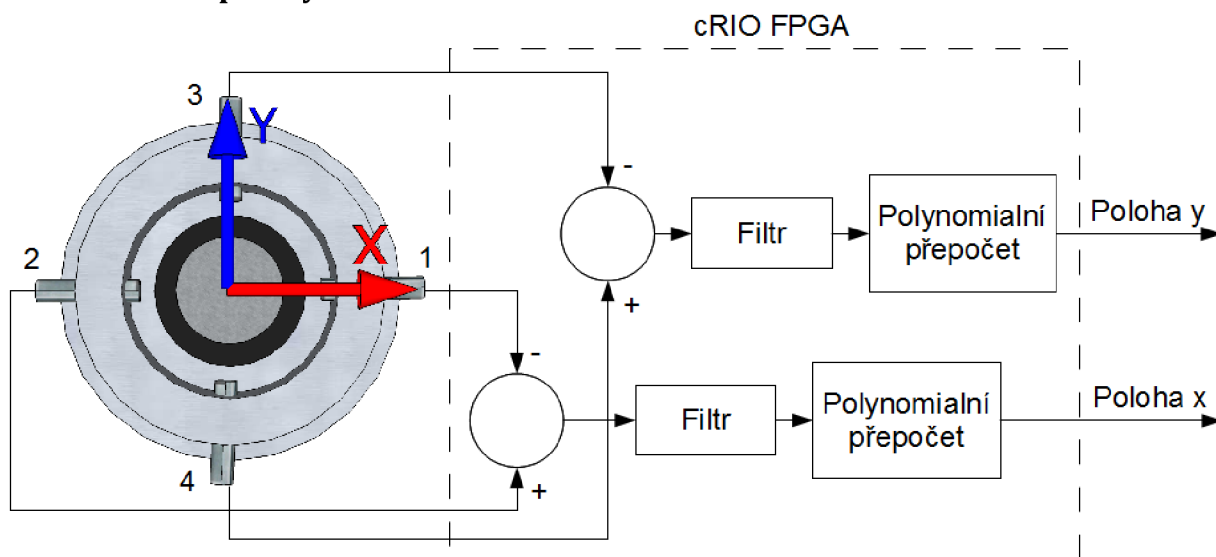
Žádanou hodnotu  $w$  stejně jako regulovanou veličinu  $y$  představují odchylky od nominální polohy v příslušných osách  $x$  a  $y$ , akční veličinu  $u_1$  pak představují žádané síly  $F_{Px}$  a  $F_{Py}$ . Regulátor je tvořen jako diskretní PID regulátor a bude implementován na úrovni regulátoru AML (cRIO real-time).

- Nelineární kompenzátor NC. Vstupy do nelineárního kompenzátoru NC jsou akční veličina  $u_1$ , regulovaná veličina  $y$ , výstupem z něho je pak akční veličina  $u_2$ . Tu představují žádané proudy  $i_{P1}, i_{P2}, i_{P3}, i_{P4}$ . Nelineární kompenzátor bude implementován na úrovni regulátoru AML (cRIO real-time).
- Regulátor REG2. Vstupem do proudového regulátoru REG2 je regulační odchylka  $e_2$ , výstupem z něho pak akční veličina  $u$ . Regulační odchylka  $e_2$  je tvořena rozdílem akční veličiny  $u_2$  a aktuálních proudů  $i_1, i_2, i_3, i_4$  tekoucích elektromagnety AML. Regulátor je tvořen jako diskretním PD regulátor. Regulátor je tvořen jako diskretní PI regulátor a bude implementován na úrovni regulátoru AML (cRIO real-time).

### 5.3 Návrh a realizace software pro úroveň ovládání periférií

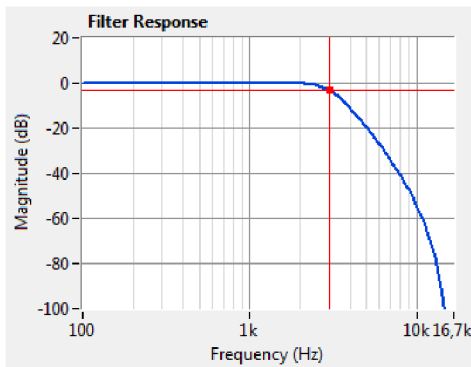
Na této úrovni je prováděno měření polohy rotoru, proudu protékajícího cívkami statoru ložiska a měření natočení rotoru v ose  $z$  (natočení a rychlost motoru). Je prováděno ovládání jednotlivých magnetů na statoru ložiska a ovládání motoru.

#### 5.3.1 Měření polohy rotoru



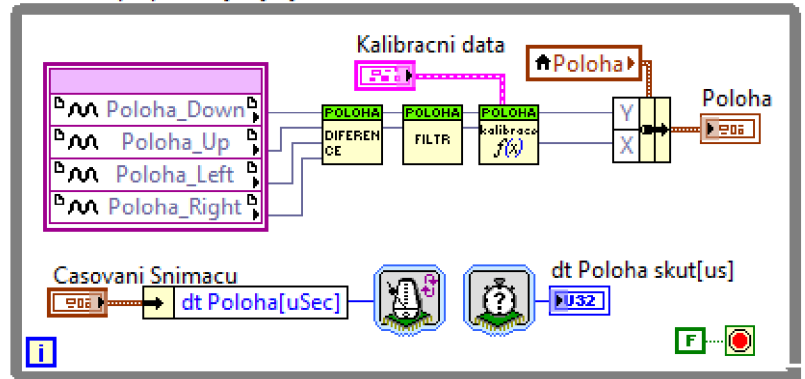
Obr. 26 Blokové schéma měření polohy

Signál z protilehlých snímačů je odečten. Je tak získána odchylka hřídele od střední polohy mezi oběma snímači. Signál následně prochází filtrem. Ten je tvořen Butterworthovým filtrem čtvrtého stupně typu dolní propust' s mezní frekvencí nastavenou na 3kHz. Jeho amplitudo-frekvenční charakteristiku můžeme vidět na Obr. 28. Takto upravený signál je následně přepočítán pomocí kalibračního polynomiálního přepočtu. Při něm je pomocí polynomu třetího stupně s vhodnými koeficienty odstraněna nelinearita signálu a zajištěno hodnotové uzpůsobení. Výstupem tak je poloha hřídele v ose  $x$  a  $y$  v mm s bodem 0 v nominální poloze hřídele. Zpracování signálu ze snímačů polohy na FPGA je zobrazeno na Obr. 28.



Obr. 28 Amplitudo frekvenční charakteristika filtru

Snímání a prepočet vychylky hřídele

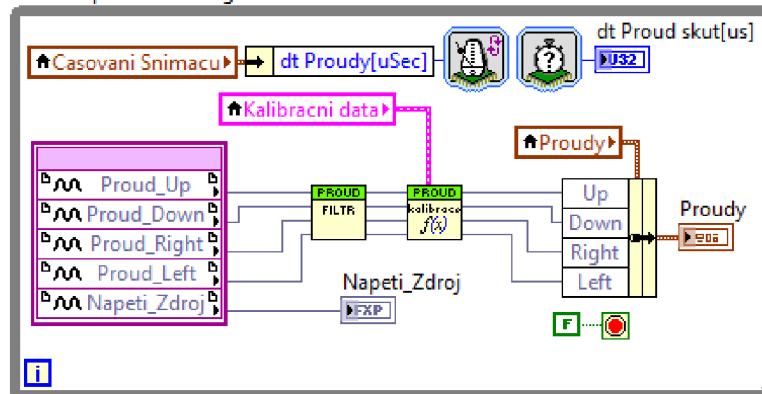


Obr. 28 Zpracování polohy hřídele na FPGA

### 5.3.2 Měření proudu tekoucího elektromagnety

Napěťový výstup proudových snímačů popsaných v kapitole 3.2.2 je pomocí napěťového modulu NI9205 digitalizován a přiveden na FPGA, kde prochází vstupním filtrem. Ten pomocí aritmetického průměru z deseti posledních vzorků odstraňuje ze signálu šum. Takto upravený signál je následně přepočítán pomocí kalibračního polynomiálního přepočtu. Při něm je pomocí polynomu prvního stupně s vhodnými koeficienty zajištěno hodnotové uzpůsobení. Výstupem je tak proud tekoucí jednotlivými cívkami AML v mA. Zpracování signálu ze snímačů polohy na FPGA je zobrazeno na Obr. 29.

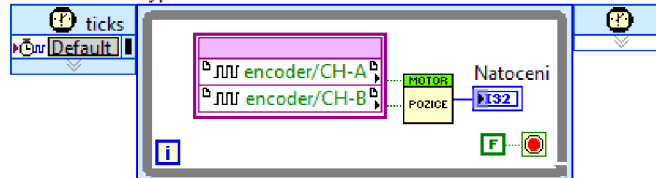
Snímání proudu na magnetech



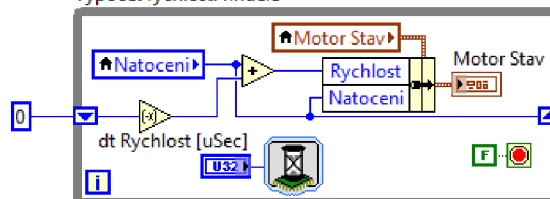
Obr. 29 Zpracování proudu tekoucího cívkami AML na FPGA

### 5.3.3 Měření natočení a rychlosti hřídele

Vypočet natočení hřídele



Vypočet rychlosti hřídele



Obr. 30 Měření polohy a natočení hřídele na FPGA

Na Obr. 30 vidíme blokové schéma měření natočení a rychlosti rotoru AML. Děje se tak za pomoci VI z knihovny Motor(FPGA).lvlib, viz kap. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..** Z výstupních dat enkodéru polohy získaných prostřednictvím modulu NI9401 přes modul cRIO-16205-DC-r002 je získáno natočení hřídele v jednotkách dílků enkodéru. Toto je pak přepočítáno na rychlost v jednotkách dílky za sekundu.

### 5.3.4 Ovládání elektromagnetů AML

Pro účely ovládání byly vytvořeny dvě knihovny, a to AML(FPGA).lvlib a Motor(FPGA).lvlib. První z nich má za úkol poskytnout VI vhodné k obsluze elektromagnetů AML v prostředí cRio FPGA, a to zejména FPGA\_AML\_PWM.vi. Druhá z knihoven má pak za úkol poskytnout VI vhodné k obsluze elektromotoru pohánějícího hřídel s rotorem AML v prostředí cRio FPGA, a to zejména Motor\_PWM.vi a Motor\_Natoceni.vi.

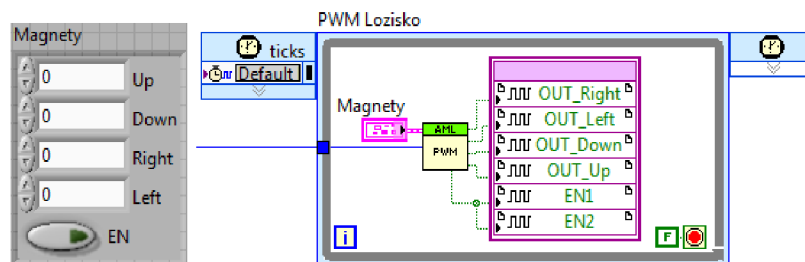
FPGA\_AML\_PWM.vi: Jedná se o VI zajišťující funkci střídače upravujícího požadavky na napětí ve formě celočíselné šířky pulzu v rozsahu 0 až MAX do tvaru vhodném pro zpracování pomocí modulu výkonového zesilovače (viz kap.3.2), přičemž

$$MAX = \frac{\text{Frekvence FPGA [Hz]}}{\text{Perioda PWM [Hz]}} \quad (33)$$

Zároveň je umožněno pomocí log. úrovně parametru EN zcela odpojit elektromagnety AML od napětí.

Motor\_PWM.vi: Jedná se o VI zajišťující funkci střídače upravujícího požadavky na napětí ve formě celočíselné šířky pulzu v rozsahu -MAX až MAX do tvaru vhodném pro zpracování pomocí modulu cRIO-16205-DC-r002 (viz kap.3.4), přičemž význam znaménka parametru MAX rozhoduje o směru otáčení elektromotoru. Zároveň je umožněno pomocí log. úrovně parametru EN zcela odpojit motor od napětí.

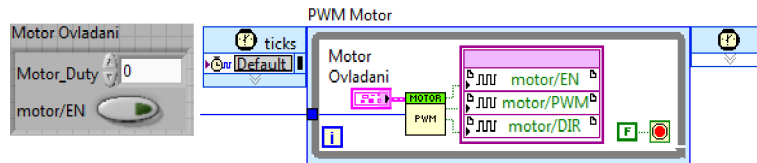
Motor\_Natoceni.vi: Jedná se o VI zajišťující na základě logických výstupů enkodéru polohy z modulu cRIO-16205-DC-r002 funkci jejich dekodéru do výstupního tvaru ve formátu natočení [°] a rychlosti [ot/s].



Obr. 31 Ovládání AML na FPGA

Na Obr. 31 vidíme blokové schéma ovládání napětí na cívkách elektromagnetů AML. Děje se tak pomocí pulzně šířkové modulace napětí za pomoci VI z knihovny AML(FPGA).lvlib. Perioda PWM byla v průběhu experimentů s AML nastavena na 20 kHz.

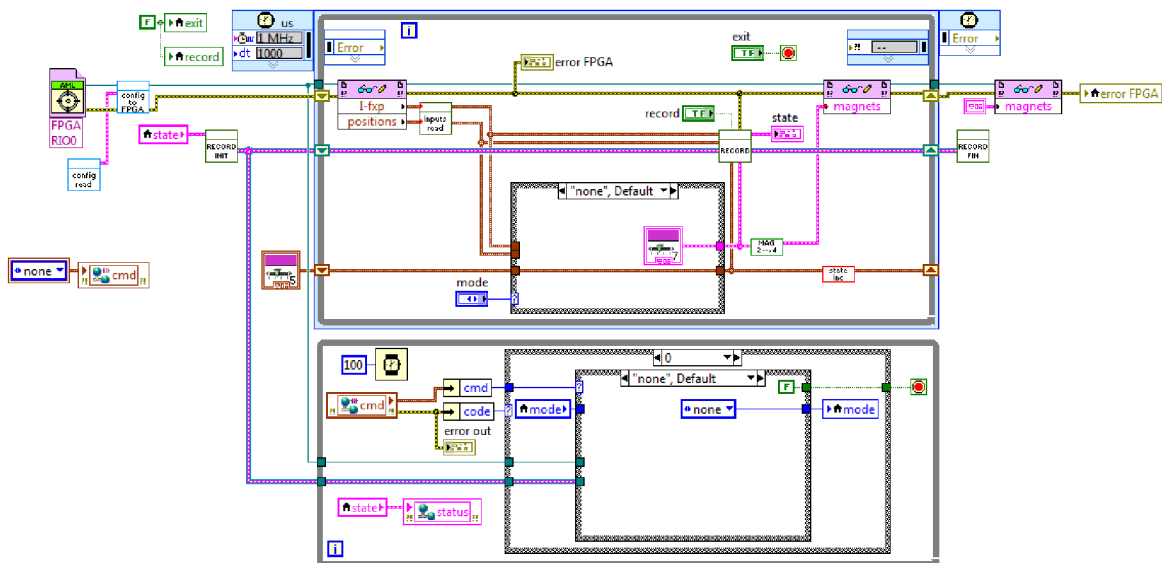
### 5.3.5 Ovládání motoru



Obr. 32 Ovládání motoru na FPGA

Na Obr. 32 vidíme blokové schéma ovládání elektromotoru otáčejícího hřídelí s rotorem AML. Děje se tak pomocí pulzně šířkové modulace napětí za pomoci VI z knihovny AML(FPGA).lvlib. Perioda PWM byla v průběhu experimentů s AML nastavena na 20 kHz.

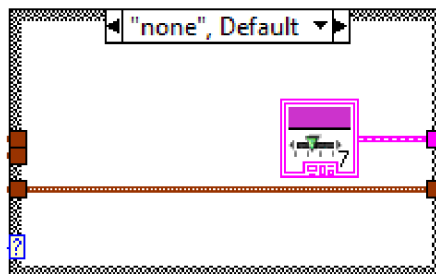
## 5.4 Návrh a realizace řídicího SW na cRIO



Obr. 33 Blokový diagram řídicího software na cRIO real-time

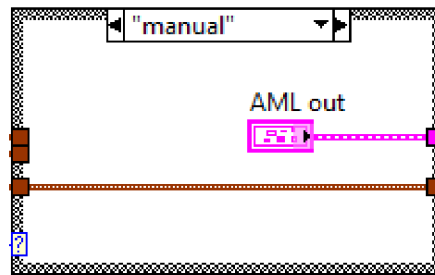
Řídicí software na cRIO real-time, jehož blokový diagram vidíme na Obr. 33, je realizován jako stavový automat s následujícími stavy:

- Stav *none*. Na Obr. 34 vidíme část blokového diagramu řídicího software na cRIO real-time pro stav *none*. Tento stav nastavuje AML do defaultního stavu.

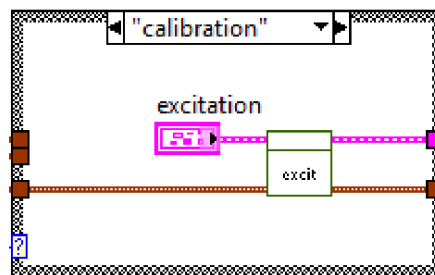


Obr. 34 Stav *none*

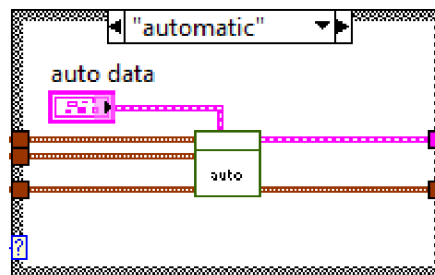
- Stav *manual*. Na Obr. 35 vidíme část blokového diagramu řídicího software na cRIO real-time pro stav *manual*. Tento stav zajišťuje umožnění ručního nastavení parametrů AML.

Obr. 35 Stav *manual*

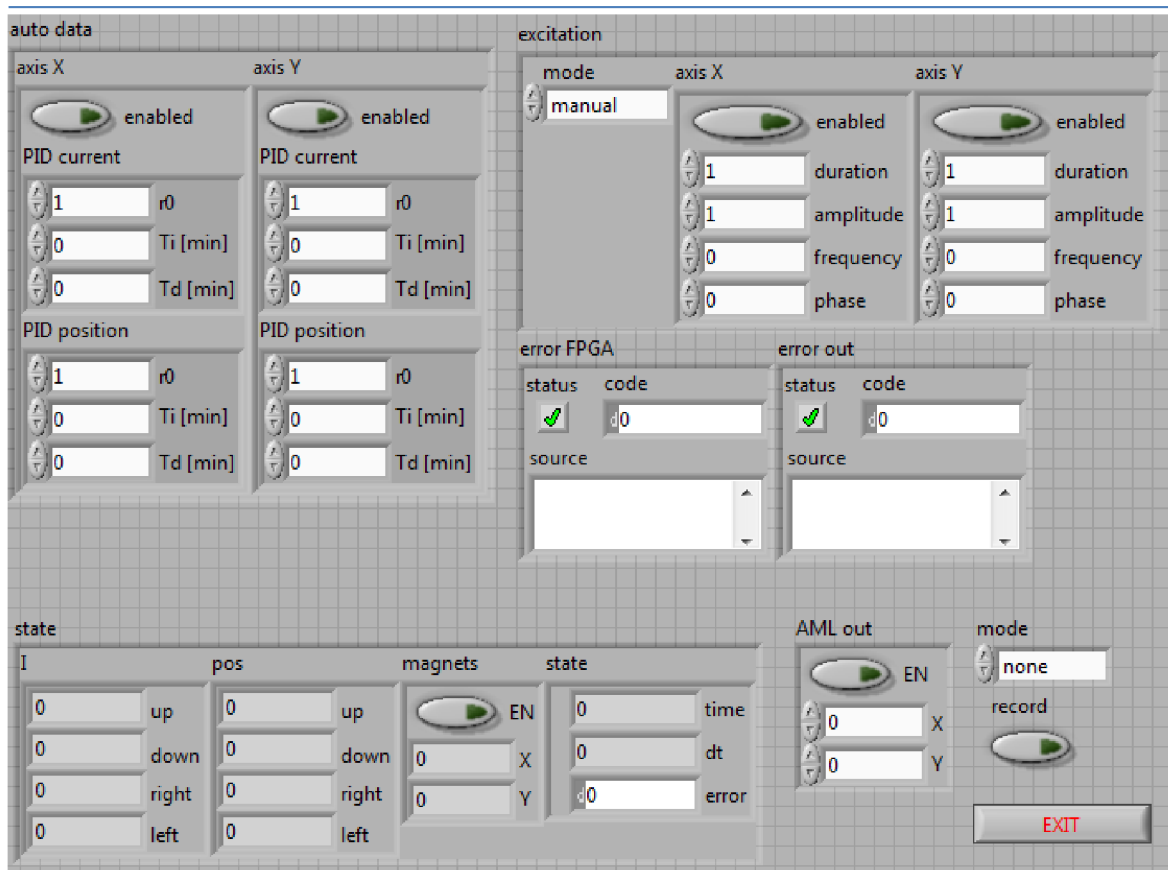
- Stav *calibration*. Na Obr. 36 vidíme část blokového diagramu řídicího software na cRIO real-time pro stav *calibration*. Tento stav umožňuje AML vybudit signálem ve tvaru obdélníku, sinusoidy, šumu nebo signálem o konstantní amplitudě.

Obr. 36 Stav *calibration*

- Stav *automatic*. Na Obr. 37 vidíme část blokového diagramu řídicího software na cRIO real-time pro stav *automatic*. Tento stav umožňuje AML za pomoci polohového a proudového regulátoru automaticky řídit.

Obr. 37 Stav *automatic*

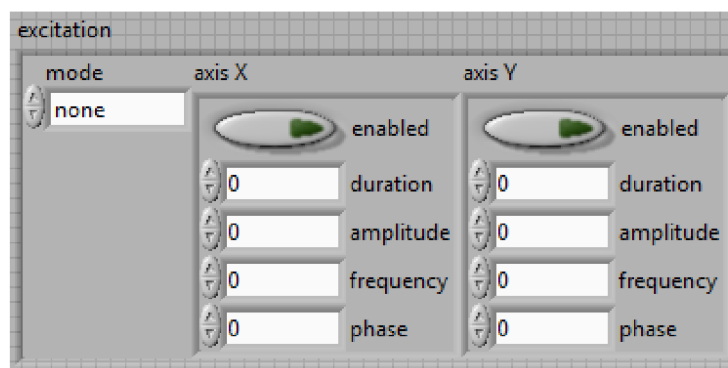
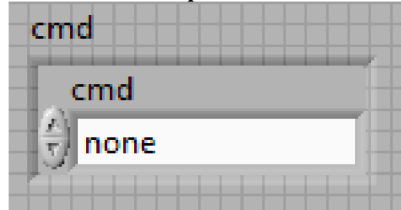
Jeho rozhraní pak můžeme vidět na čelním panelu, ukázaném na Obr. 38.

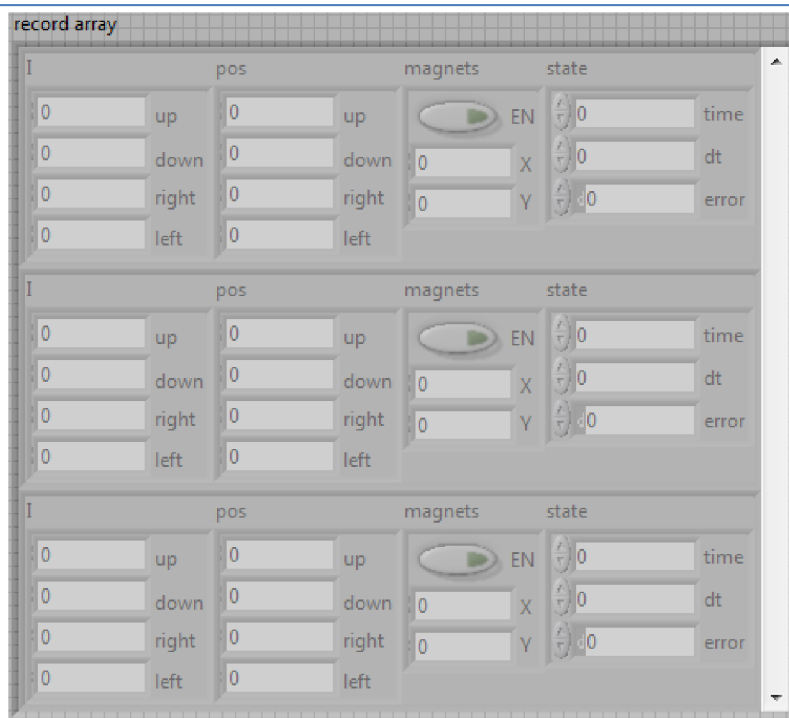


Obr. 38 Čelní panel řídicího software na cRIO real-time

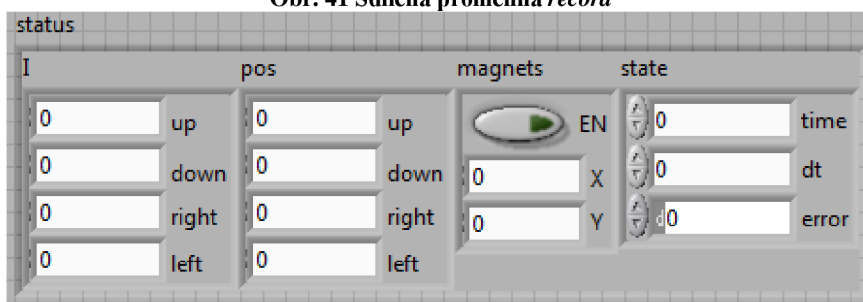
#### 5.4.1 TCP/IP rozhraní

Zásahy do chování regulátoru AML je možné realizovat z libovolného zařízení přes TCP/IP rozhraní. Děje se tak za pomoci sdílených síťových proměnných *cmd* (Obr. 40), *config* (Obr. 43), *excitation* (Obr. 39), *record* (Obr. 41), a *status* (Obr. 42) z knihovny *amb-shared.lvlib*. Jejich význam je přitom patrný z obrázků jejich čelních panelů.

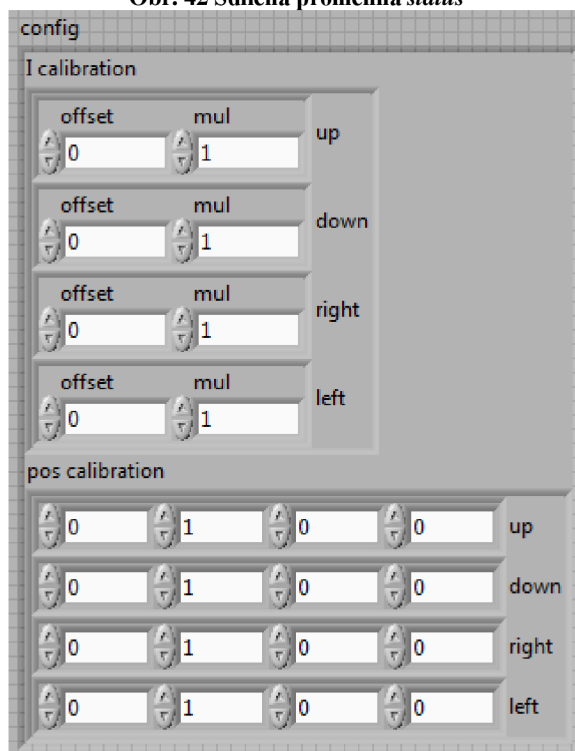
Obr. 39 Sdílená proměnná *excitation*Obr. 40 Sdílená proměnná *cmd*



Obr. 41 Sdílená proměnná *record*



Obr. 42 Sdílená proměnná *status*



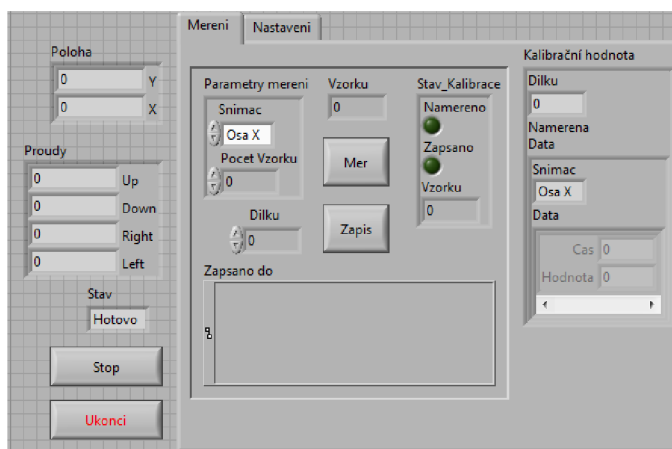
Obr. 43 Sdílená proměnná *config*

## 5.5 Návrh a realizace software pro vzdálené ovládání

Jak již bylo popsáno v kapitole 5.4.1, je pomocí TCP/IP rozhraní umožněno vzdálené ovládání řídicího software na cRIO. V prostředí windows PC byla vytvořena aplikace, která této vlastnosti využívá a umožňuje jak toto vzdálené ovládání realizovat, tak kalibrovat jednotlivé snímače nutné pro chod AML.

## 5.6 Kalibrace snímačů

Jak bylo v předchozích kapitolách popsáno, je pro účely řízení AML potřeba měřit polohu a rychlost hřídele a proud tekoucí jednotlivými elektromagnety. Na rozdíl od měření rychlosti hřídele, která je získávána přímo, je třeba údaje o poloze rotoru a proudech tekoucích elektromagnety kalibrovat. Pro účely kalibrace snímačů polohy a proudu AML byly vytvořeny dvě knihovny, a to Kalibrace(cRio).lvlib a Kalibrace(PC).lvlib. První z nich má za úkol poskytnout virtuální nástroje (Virtual Instruments, VI) vhodné k obsluze kalibrace snímačů v prostředí cRIO, a to zejména cRio\_Kalibrace\_Main.vi.

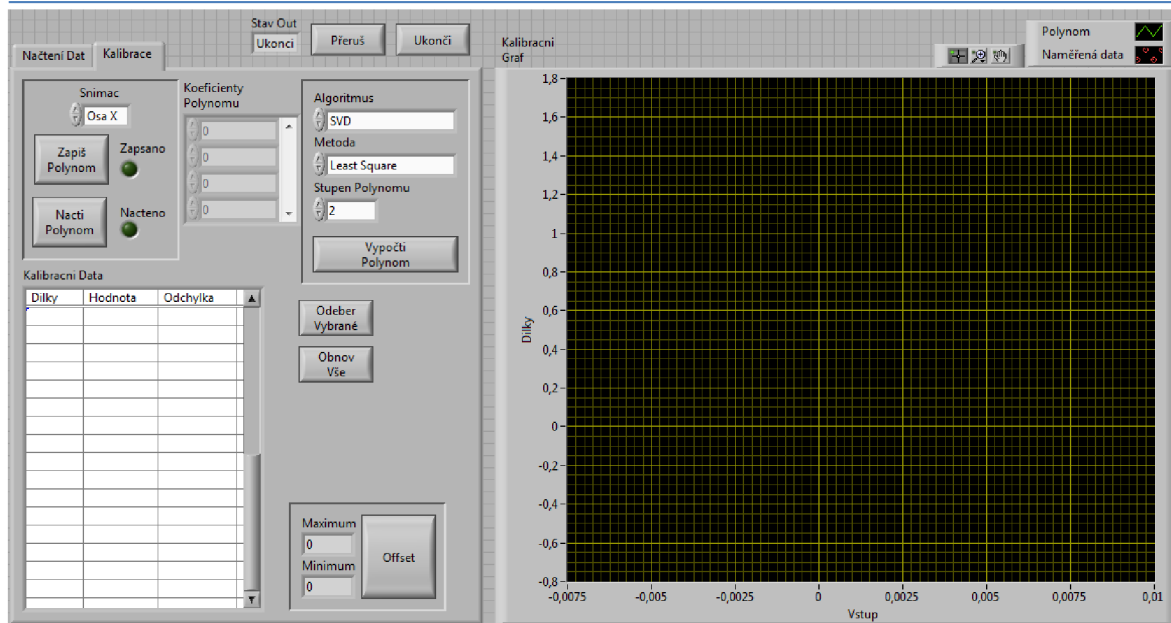


Obr. 44 Čelní panel cRio\_Kalibrace\_Main.vi

cRio\_Kalibrace\_Main.vi: Jedná se o stavový automat zajišťující obsluhu měření a záznam dat příslušných snímačů ve tvaru vhodném pro další zpracování pomocí nástrojů knihovny Kalibrace(PC).lvlib na PC. Jeho čelní panel vidíme na Obr. 44. Po stisku tlačítka „Mer“ je na vybraném snímači odměřen nastavený počet vzorků. Po stisknutí tlačítka „Zapis“ jsou pak naměřená data ohodnocena nastaveným počtem dílků, reprezentujícím skutečnou hodnotu, zapsána do podadresáře AML/Kalibrace v uživatelském adresáři.

Druhá z knihoven, Kalibrace(PC).lvlib, má za úkol poskytnout VI vhodné k obsluze kalibrace v prostředí PC, a to zejména PC\_Kalibrace\_Main.vi.





Obr. 45 Čelní panel PC\_Kalibrace\_Main.vi

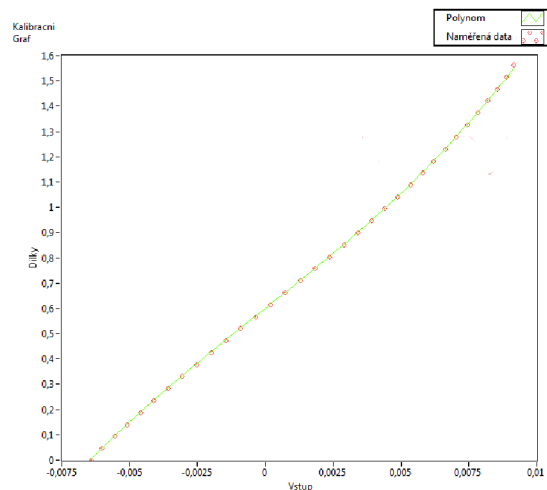
PC\_Kalibrace\_Main.vi: Jedná se o stavový automat zajišťující výpočet kalibračních polynomů příslušných snímačů z dat zaznamenaných pomocí nástrojů z knihovny Kalibrace(cRio).lvlib. Jeho čelní panel vidíme na Obr. 45. Po stisku tlačítka „Vypočti Polynom“ je podle nastavených parametrů vypočten z předem načtených dat kalibrační polynom. Po načtení dat krajních poloh kalibrovaného rozsahu je možno po stisku tlačítka „Offset“ tento polynom upravit tak, aby jeho nulová hodnota odpovídala střední hodnotě rozsahu. Stiskem tlačítka „Zapiš Polynom“ je pak tento polynom zapsán do souboru vhodného pro zpracování pomocí cRio\_KalibraceCti.vi z knihovny Kalibrace(cRio).lvlib.

### 5.6.1 Kalibrace snímačů polohy



Obrázek 5-1 Postup kalibrace snímačů polohy

Postup kalibrace snímačů polohy je zachycen na Obr. 1. Na AML je nainstalován kalibrační přípravek. Osa hřídele je při vypnutých magnetech AML nastavena do kalibrované osy přičemž celá hřídel se nachází v její krajní poloze. Zároveň je mechanicky zabráněno jejímu posuvu v ose kolmé na kalibrovanou osu. Postupně je pak pomocí šroubu hřídel posouvána po 0,05 mm směrem k opačnému konci kalibrované osy tak, že správná vzdálenost je odečítána na elektronickém kapacitním úchylkoměru Mitutoyo ID-C112XB. Ten dosahuje mezní chyby měření 0.003 mm s číslicovým krokem 0.001 mm. Při dosažení žádané polohy je odměřeno a zapsáno soubor o 300 vzorcích. Následně je pak necháno hřídel pomocí elektromagnetů příslušících kalibrované ose přitáhnout do jejích krajních poloh, ve kterých jsou rovněž odměřeny a zapsány soubory o 300 vzorcích.



**Obr. 46 Kalibrační křivka snímačů polohy v ose X**

Na obrázku Obr. 46 vidíme polohovou kalibrační křivku snímačů polohy jedné z os AML z PC\_Kalibrace\_Main.vi. Je z ní jasně patrné její nelineární nasycení s nelinearitou větší než výrobcem udávaných  $\pm 100 \mu\text{m}$  pro snímač. To může být částečně způsobeno nestandardním tvarem a materiálem snímané plochy, pro který je pak nutno lineární rozsah snímače korigovat korekčním faktorem. Parametry snímače jsou totiž udávány pro destičku tloušťky minimálně 1 mm o minimálně 3x větším průměru než je průměr aktivní plochy snímače, vyrobenou z materiálu FE 360 (referenční vzorek), což zde nebylo splněno. Naměřenými daty byl proto proložen polynom třetího stupně a snímače polohy jednotlivých os AML tak byly linearizovány s nelinearitou  $\pm 1 \mu\text{m}$  do vzdálenosti 0,6 mm od střední polohy snímače.

### 5.6.2 Kalibrace snímačů proudu

Na AML je nainstalován kalibrační přípravek. Osa hřídele je při vypnutých magnetech AML nastavena do nominální polohy, přičemž je mechanicky zabráněno jejímu posuvu. Na elektromagnet příslušný snímači proudu, přičemž ostatní elektromagnety jsou vypnuty, je pak postupně zvyšováno napětí pomocí zvýšení šířky pulzu PWM o 100 dílků, což se projevuje zvýšením proudu v obvodu elektromagnetu. Ten je odečítán pomocí proudové sondy LeCroy CP030 na osciloskopu LeCroy Wavesurfer 44Xs. Při dosažení žádaného napětí je odměřeno a zapsáno soubor o 300 vzorcích.

Z kalibrační křivky snímačů proudu z PC\_Kalibrace\_Main.vi je jasně patrná její linearita. Naměřenými daty byl proto proložen polynom prvního stupně.

### **5.7 Ověření řídicího systému**

Navržený řídicí systém AML popsany v kapitole 5 byl experimentálně ověřen. Za pomoci navrženého software pro vzdálenou správu z windows PC bylo ověřeno vzdálené ovládání řídicího systému na cRIO real-time, byly zkalibrovány snímače polohy a proudu a ověřeno řízení. Jeho ne zcela uspokojivé výsledky v oblasti přesnosti regulace můžeme částečně přičíst implementaci proudového regulátoru, kterou by bylo v budoucnu možno oddělit od smyčky proudového regulátoru a přemístit do prostředí cRIO FPGA.

## 6 Závěr

V práci byla řešena problematika řízení aktivních magnetických ložisek. V úvodní části je analyzován aktuální stav problematiky ve světě. V další části jsou popsány parametry řešeného funkčního vzorku AML. Následně je odvozen matematický model tohoto ložiska a je navržena struktura řídicího systému. V poslední části je popsána implementace řízení AML.

Důležitou částí práce je identifikace parametru  $K$  magnetického obvodu ložiska. Tento parametr byl identifikován experimentálně. Dále byl na základě dat získaných z AML vytvořen matematický model, jeho platnost byla ověřena a na jeho základě pak ve vývojovém prostředí National Instruments (NI) LabVIEW za pomoci Control Design and Simulation Module navrhnout řídicí systém vhodný k řízení tohoto ložiska. Zároveň byly vytvořeny softwarové nástroje nezbytné pro komunikaci, chod a další práci s tímto experimentálním AML.

Řídicí systém byl nakonec experimentálně ověřen a následně pak dosažené výsledky zhodnoceny. Vzhledem k ne zcela uspokojivým výsledkům v oblasti regulace polohy by v budoucnu mohlo dojít k oddělení regulace proudu od smyčky polohové regulace, kdy by byl proudový regulátor implementován do cRIO FPGA. Zároveň by přesnosti regulace pomohla hardwarová úprava výkonového modulu v oblasti snímání proudu, kdy by návrhem vhodnější implementace snímání proudu došlo ke zlepšení přesnosti jeho měření, což by opět pomohlo ke zvýšení přesnosti a spolehlivosti celého systému.



## 7 Seznam použité literatury

- [1] **Matsushita, Osami.** *ISO Standardization for Active Magnetic Bearing Technology.* [pdf] místo neznámé, Japan : National Defense Academy, 2005. 2002IS002.
- [2] **Larsonneur, Rene.** *Modeling and Analysis of Dynamic Mechanical Systems.* [pdf] Winterthur, Switzerland : Mecos Traxler AG, 7. Květen 2006.
- [3] **Aeschlimann, Beat.** *Control aspect oh hi precisionactive magnetic bearings.* [pdf] Lausanne : École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Département de Microtechnique, 2002.
- [4] **Jabben, Leon.** *Mechatronic Design of a Magnetically Suspended Rotating Platform.* [Dokument pdf] Delft : Technische Universiteit Delft, 2007. Dostupný z: repository.tudelft.nl/assets/uuid:d2f37bb8.../3me\_jabben\_20071210.pdf. ISBN 978-90-9022523-4.
- [5] **Lösch, Florian.** *Identification and Automated Controller Design for Active Magnetic Bearing Systems.* [pdf] Zürich : Swiss Federal Institute of Technology, 2002. Diss. ETH No. 14474.
- [6] **SKF Magnetic Bearings.** How they work. *SKFmagneticbearings.com/Technology.* [Online] SKF Group Headquarters. [Citace: 21. Prosinec 2010.] [http://www.skf.com/portal/skf\\_rev/home/technology](http://www.skf.com/portal/skf_rev/home/technology).
- [7] **Traxler, Alfons.** *Eigenschaften und Auslegung von Berührungsfreien elektromagnetischen Lagern.* [pdf] Zuerich : Eidgenoessischen Technischen Hochschule Zuerich, 1985. Diss. ETH Nr. 7851.
- [8] **SKF Magnetic Bearings.** Magnetic Bearings and Sensors. *SKFmagneticbearings.com/Products.* [Online] SKF Group Headquarters. [Citace: 6. Leden 2011.] [http://www.skf.com/portal/skf\\_rev/home/products](http://www.skf.com/portal/skf_rev/home/products).
- [9] **Harris, Tim.** Magnetická ložiska SKF – od inovace k osvědčeným řešením. *ELEKTRO.* 2005, Sv. 04.
- [10] **Maslen, Eric.** *Magnetic Bearings.* [pdf] [prod.] Aerospace, and Nuclear Engineering Department of Mechanical. Charlottesville, Virginia, USA : University of Virginia, 5. Červen 2000.
- [11] **Baumer Holding AG.** What are measuring sensors? *Baumer Wiki.* [Online] Baumer Holding AG. [Citace: 4. Duben 2011.] <http://www.baumer.com/services/knowledge-technology/measuring-sensors/en.html>.
- [12] **Penfield, Scott R a Rodwell, Ed.** *Auxiliary bearing design.* [Dokument pdf] Carthage : Technology Insights, 2001. Dostupný z: [http://www.iaea.org/inisnkm/nkm/aws/htgr/fulltext/gtpcs\\_14.pdf](http://www.iaea.org/inisnkm/nkm/aws/htgr/fulltext/gtpcs_14.pdf).
- [13] **National Instruments Corporation.** Programovatelné řídicí kontrolery (PAC). *National Instruments Česká Republika a Slovensko.* [Online] [Citace: 31. Březen 2010.] [http://digital.ni.com/worldwide/czech.nsf/web/all/951AD9A642B5C29086257043005A30C1?OpenDocument&node=202268\\_cs](http://digital.ni.com/worldwide/czech.nsf/web/all/951AD9A642B5C29086257043005A30C1?OpenDocument&node=202268_cs).

- [14] **National Instruments Corporaion.** CompactRIO and LabVIEW Development Fundamentals Course Manual. s.l. : NationalInstruments Corporaion, 2008. September 2008 Edition. 324516C-01.
- [15] **Technical Communications.** *CompactRIO Reconfigurable Embedded Chassis Installation Instructions.* [pdf] s.l. : National Instruments Corp., August 2009. Dostupný z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/375079b.pdf>. 375079B-01.
- [16] **National Instruments Corp.** Test, Measurement, and Embedded Systems. *National Instruments.* [Online] National Instrumenss Corp. <http://www.ni.com/>.
- [17] **Technical Communications.** *CompactRIO NI cRIO-9022 Operating Instructions and Specifications.* [pdf] s.l. : National Instruments Corp., June 2010. Dostupný z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/375102d.pdf>. 375102D-01.
- [18] **Technical Communications.** *NI 9205 Operating Instructions and Specifications.* [pdf] s.l. : National Instruments Corp., June 2008. Dostupný z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374188d.pdf>. 374188D-01.
- [19] **Technical Communications.** *NI 9401 Operating Instructions and Specifications.* [pdf] s.l. : National Instruments Corp., June 2008. Dostupný z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374068d.pdf>. 374068D-01.
- [20] **Allegro MicroSystems, Inc.** *ACS712.* [Dokument pdf] Worcester, Massachusetts, U.S.A : Allegro MicroSystems, Inc., 2010. Dostupný z: [http://www.allegromicro.com/en/Products/Part\\_Numbers/0712/0712.pdf](http://www.allegromicro.com/en/Products/Part_Numbers/0712/0712.pdf). ACS712-DS, Rev. 13.
- [21] —. *Allegro MicroSystems, Inc.* [Online] Allegro MicroSystems, Inc., 2011. [Cited: Květen 19, 2011.] <http://www.allegromicro.com/en/>.
- [22] **Technical Communications.** *NI 9203 Operating Instructions and Specifications.* [pdf] s.l. : National Instruments Corp., February 2008. Dostupný z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374070c.pdf>. 374070C-01.
- [23] **Baumer.** *IWRM 08I9501/S35.* [pdf] místo neznámé : Baumer Holding AG, 16. Prosinec 2010. data sheet. Dostupný z: [http://sensor.baumer.com/sensor/products/downloads/Produkte/PDF/Datenblatt/Induktive\\_Sensoren/IWRM\\_08I9501\\_S35\\_web\\_EN.pdf](http://sensor.baumer.com/sensor/products/downloads/Produkte/PDF/Datenblatt/Induktive_Sensoren/IWRM_08I9501_S35_web_EN.pdf).
- [24] **Baumer Holding AG.** Baumer - Passion for Sensors. [Online] [Citace: 5. Duben 2011.] <http://www.baumer.com/en.html>.
- [25] **Modrlák, Osvald.** *Úvod do identifikace.* [Dokument pdf] Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2004. Dostupný z: [http://www.fm.vslib.cz/~krtsub/fm/tr1/tar1\\_zid.pdf](http://www.fm.vslib.cz/~krtsub/fm/tr1/tar1_zid.pdf).
- [26] **Waukesha Magnetic Bearings.** *Active Magnetic Bearings.* [pdf] Dover : Waukesha Magnetic Bearings, 2011. Dostupný z: <http://www.waukbearing.com/Files/KnowledgeBase/ItemDownload/en/activemag-inserts-english.pdf>.

## Seznam obrázků

Obr. 1 Princip funkce AML [2] .....	17
Obr. 2 Rotační sestava se dvěma axiálními a jedním radiálním AML a motorem [4] .....	18
Obr. 3 AML: a) radiální b) axiální c) kuželové [7] .....	18
Obr. 4 Radiální heteropolární 8 – pólové AML [9].....	19
Obr. 5 Konstrukční řešení radiálního AML. a) Siločáry kolmé na osu rotace (heteropolární uspořádání). b) Siločáry rovnoběžné s osou rotace (homopolární uspořádání) .....	19
Obr. 6 Axiální 4 - pólové AML [9] .....	20
Obr. 7 Vhodnost typu snímače v závislosti na typu nasazení (Waukesha Bearings) [26]...21	
Obr. 8 Indukční snímač polohy [18].....	22
Obr. 9 Kapacitní snímač polohy [18].....	22
Obr. 10 Záložní radiální ložisko RDS firmy Waukesha určené pro velký motorový kompresor [26] .....	24
Obr. 11 Osazený zkoušecí přípravek AML.....	27
Obr. 12 Pracoviště AML .....	28
Obr. 13 NI cRio: 1) Kontrolér 2) Chassis 3) I/O Moduly (zleva Slot 1 – 4) .....	28
Obr. 14 Architektura I/O Modulů [12] .....	29
Obr. 15 Aplikační architektura cRIO [12] .....	29
Obr. 16 Modul výkonového zesilovače s obvody pro měření proudu.....	30
Obr. 17 ACS712ELCTR-05B-T [22] .....	31
Obr. 18 Napájecí modul snímačů polohy.....	32
Obr. 19 IWRM 08I9501/S35 [23] .....	33
Obr. 20 Modul obvodů pro řízení motoru.....	33
Obr. 21 Model hřídele.....	35
Obr. 22 Diferenciální schéma dvou elektromagnetů [3].....	38
Obr. 23 Dva elektromagnety zachycující jeden stupeň volnosti [25].....	39
Obr. 24 Polohová odezva rotoru při přivedení max. napětí na elektromagnet.....	40
Obr. 25 blokové schéma regulačního obvodu .....	43
Obr. 26 Blokové schéma měření polohy .....	44
Obr. 28 Amplitudo frekvenční charakteristika filtru .....	45
Obr. 28 Zpracování polohy hřídele na FPGA .....	45
Obr. 29 Zpracování proudu tekoucího cívkami AML na FPGA.....	45
Obr. 30 Měření polohy a natočení hřídele na FPGA .....	45
Obr. 31 Ovládání AML na FPGA.....	46
Obr. 32 Ovládání motoru na FPGA.....	47
Obr. 33 Blokový diagram řídicího software na cRIO real-time .....	47
Obr. 34 Stav <i>none</i> .....	47
Obr. 35 Stav <i>manual</i> .....	48
Obr. 36 Stav <i>calibration</i> .....	48
Obr. 37 Stav <i>automatic</i> .....	48
Obr. 38 Čelní panel řídicího software na cRIO real-time .....	49
Obr. 41 Sdílená proměnná <i>excitation</i> .....	49
Obr. 39 Sdílená proměnná <i>cmd</i> .....	49
Obr. 42 Sdílená proměnná <i>record</i> .....	50
Obr. 43 Sdílená proměnná <i>status</i> .....	50
Obr. 40 Sdílená proměnná <i>config</i> .....	50
Obr. 44 Čelní panel cRio_Kalibrace_Main.vi.....	51
Obr. 45 Čelní panel PC_Kalibrace_Main.vi .....	52
Obr. 46 Kalibrační křivka snímačů polohy v ose X .....	53



