

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

REALIZACE HARDWARE LABORATORNÍHO
TESTOVACÍHO PŘÍPRAVKU PRO AKTIVNÍ MAGNETICKÉ
LOŽISKO

TITLE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MAREK PETRUŠEK

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

ING. PAVEL HOUŠKA Ph.D

student: Marek Petrušek

který studuje v bakalářském studijním programu

obor: Inženýrská informatika a automatizace (3902R001)

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:

Realizace hardware laboratorního testovacího přípravku pro aktivní magnetické ložisko

v anglickém jazyce:

Realisation hardware of laboratory test instruments for active magnetic bearing

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výhodou aktivního magnetického ložiska (AML) je že umožňuje snížit tření v uložení na minimum. Pro svou činnost ale potřebuje kvalitní řízení, které umožní hřídeli v ložisku levitovat. V rámci spolupráce mezi FSI a FEKT vznikl prototyp AML. Pro další vývoj AML je nutné zhotovit přípravek na jeho testování a realizovat elektroniku pro jeho řízení, jejíž parametry vyplynuly z předchozích výzkumů. Úkolem práce je na základě pokynů vedoucího práce navrhnout a realizovat testovací přípravek a navrhnout a realizovat elektroniku pro řízení AML.

Cíle bakalářské práce:

- 1\ Prostudujte problematiku aktivního magnetického ložiska;
- 2\ Seznamte se s existujícím laboratorním modelem aktivního magnetického ložiska;
- 3\ Navrhněte testovací přípravek pro uchycení a testování laboratorního modelu aktivního magnetického ložiska;
- 4\ Navrhněte a realizujte elektroniku pro řízení aktivního magnetického ložiska;
- 5\ Řešení zhodnoťte;

Licenční smlouva
poskytovaná k výkonu práva užit školní dílo
uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Marek Petrušek

Bytem: Pražská 63/M, Znojmo, 66902

Narozen/a (datum a místo): Šařa-SK / 6. 9. 1983

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta strojního inženýrství

se sídlem Technická 2896/2, 616 69 Brno

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

.....

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Realizace hardware laboratorního testovacího přípravku pro aktivní magnetické ložisko

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Pavel Houška, PhD.

Ústav: Ústav automatizace a informatiky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

- tištěné formě – počet exemplářů
- elektronické formě – počet exemplářů

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem a realizací hardware pro aktivního magnetického ložiska a také samotného přípravku pro jeho upevnění. Hardware je navržen tak, aby byl schopen kvalitně řídit aktivní magnetické ložisko, realizuje odečet otáček rotoru a jejich následné zpracování. Výstupem snímačů jsou informace o poloze rotoru aktivního magnetického ložiska.

V rešeršní části práce je rozbor co už ve světě existuje a jaké jsou poznatky. Následuje průřez již zakoupenými snímači pro aktivní magnetické ložisko. Další část práce se věnuje výkonovým prvkům. V praktické části je popsáno vlastní realizované ložisko, měření polohy, výkonová část, chování hardware v reálném zapojení a také v zapojení přímo na přípravku. V poslední části je uveden rozbor práce.

Abstract

The work is focused on the designing the active magnetic bearing and the construction of its fixing system. Hardware is designed to control the active magnetic bearing; it measures the rotation speed and does the following processing. The sensors produce the information about the magnetic bearing rotor location.

The next part was dedicated to the development, which has been done in this field of interest. The used parts were mentioned with their characteristics and the function of power blocks was discussed. In the practical part, the realization of this magnetic bearing and the measurement of its location, power blocks and hardware behavior in the real design are described. The last part summarize all the work that was done.

Klíčová slova

Aktivní magnetické ložisko, měření polohy

Keywords

Active magnetic bearing, situation measurement,

Bibliografická citace mé práce:

PETRUŠEK, M. *Realizace hardware laboratorního testovacího přípravku pro aktivní magnetické ložisko*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. XY s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Houška, Ph.D.

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Houškovi. Ph.D. Za rady, houževnatost, ochotu vždy pomoci a přátelský přístup, který v průběhu vzniku této práce projevoval. Chtěl bych také poděkovat svým rodičům, kteří mě během studia jak morálně tak finančně podporovali.

OBSAH:

1. ÚVOD	11
2. MAGNETICKÁ LOŽISKA DĚLÍME NA DVA ZÁKLADNÍ TYPY	13
2.1. Aktivní Magnetické ložisko	13
2.2. Pasivní magnetické ložisko	13
2.2.1. Magnetické ložisko s permanentním magnetem	13
2.2.2. Magnetická ložiska s permanentním magnetem a supravodičem	15
2.3. Magnetická ložiska můžeme dále dělit	15
2.3.1. Axiální magnetická ložiska	15
2.3.2. Radiální magnetická ložiska	16
2.3.3. Části radiálního ložiska	16
2.3.4. Bez senzorová ložiska	17
3. MAGNETICKÁ LEVITACE	18
3.1.1. Principy magnetické levitace	18
3.1.2. Levitace s permanentními magnety	19
3.1.3. Levitace s využitím diamagnetismu	19
3.1.4. Levitace transformační	19
3.1.5. Elektromagnetická levitace EMS, EDS	19
3.1.6. Využití magnetické levitace	20
4. ŘÍZENÍ AKTIVNÍCH MAGNETICKÝCH LOŽISEK	21
4.1. Snímače polohy	21
4.1.1. Snímače polohy	21
4.1.2. Volba snímače	24
5. MECHANICKÁ KONSTRUKCE PŘÍPRAVKU PRO AKTIVNÍ MAGNETICKÉ LOŽISKO	25
6. REALIZACE ELEKTRONIKY PRO ŘÍZENÍ AML	27
6.1. Elektronika pro připojení snímačů polohy rotoru AML	27
6.2. Výkonová elektronika pro ovládání elektromagnetů statoru AML	28
7. VÝSLEDEK PRÁCE	30
8. ZÁVĚR	31
9. LITERATURA	32
SEZNAM PŘÍLOH	33

1. Úvod

Celá tato kapitola vychází ze zdrojů [1], [2],

Myšlenka využít magnetické pole k podepření předmětu se poprvé objevila již v polovině devatenáctého století. V uplynulých dvou desetiletích umožnil technický pokrok ekonomickou realizaci mnoha uložení s magnetickými ložisky. V současné době jsou vyvíjeny velmi pokrokové softwarové algoritmy a řízení, které napomáhají dosáhnout dříve naprosto nemyslitelných výkonů. Tento vývoj vytváří nové příležitosti pro odolné, hospodárné a energeticky úsporné konstrukce s těmito univerzálními ložisky [1].

Vývoj magneticky levitovaných ložisek započal v polovině 20. století. Dnes se tyto ložiska již běžně vyrábějí v širokém sortimentu. Obecně se dá říci, že magnetické ložisko je mechanické ložisko, které využívá principy magnetické levitace. Pevná a rotující část jsou v prostoru udržovány magnetickým polem ve stále poloze, aniž by se navzájem dotýkaly. U klasických kluzných ložisek vzniká mezi pánví a hřídelí olejový film (je možné hovořit o hydrodynamické levitaci).

Podle toho, zda ke své funkci vyžadují nebo nepotřebují napájení elektrickou energií a řízení, se rozlišují magnetická ložiska na pasivní a aktivní.

Magnetická ložiska mají ve srovnání s klasickými (valivými nebo kluznými) výhodné vlastnosti: minimální odpor, při jejich provozu nevzniká hluk, nedochází ke ztrátám tření a k následnému oteplení. Mají dlouhou životnost, neboť se neopotřebávají. Mohou pracovat v extrémních podmínkách (např. při rychlostech nad 100 000 min⁻¹; nebo při nízkých i vysokých teplotách od 250 do 500° C), v chemicky agresivním prostředí, v páře i ve vakuu či v tlakovém prostředí a také tam kde je nepřijatelná kontaminace mazacími oleji.

Magnetická ložiska mají ve srovnání s klasickými ložisky i jisté nevýhody: menší měrnou nosnost a dynamickou tuhost. Aktivní magnetická ložiska jsou složitější, mají vyšší spotřebu energie a potřebují elektronické řízení, což snižuje jejich spolehlivost. Zabírají více prostoru a jejich cena je podstatně vyšší [2].



Obr 1. Magnetická ložiska

Magnetická ložiska zahrnují tři odlišné části (Obr. 1) a s nimi spojené technologie: hnací (řídící) člen; senzory polohy a kontrolní systém. [1] Řídící člen a senzory, jsou elektromechanickým hardwarem, ze kterého se snímá vstupní signál a přenáší se silovým zatížením na stroj, na kterém jsou nainstalovány. Kontrolní systém zajišťuje signální úpravu a korekci sil a dává výsledné pokyny silovému zesilovači pro každou kontrolovanou osu. Kontrolní algoritmus je softwarový program, používaný kontrolním systémem. Podle toho, zda ke své funkci potřebují (resp. nepotřebují) dodávat elektrickou energii [1].

Magnetická ložiska mají široké uplatnění: od mikropřístrojů až po zařízení vyžadující velkou nosnost (u aktivních ložisek až několik tun). Používají se pro speciální účely, např. pro gyroskopy, pro rotační akumulátory mechanické energie a rovněž v kosmickém inženýrství [2].

Ústav automatizace a informatiky obdržel hotový stator a rotor aktivního magnetického ložiska (AML) v rámci spolupráce s Ústavem výkonové elektrotechniky a elektroniky z Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně. Úkolem této práce je navrhnout přípravek pro provoz tohoto AML a navrhnout a realizovat potřebnou elektroniku pro řízení tohoto ložiska.

2. Magnetická ložiska dělíme na dva základní typy

Celá tato kapitola vychází ze zdrojů [1], [2],

- Aktivní: pro svou činnost vyžadují napájení elektrickou energií a vyžadují řízení
- Pasivní: pro svou činnost nepotřebují napájení ani řízení

2.1. Aktivní Magnetické ložisko

Aktivní magnetická ložiska se vyznačují tím, že pro svůj provoz potřebují dodávku elektrické energie. Princip jejich funkce se shoduje s běžnými elektromagnety. Ve statoru ložiska je umístěno pole cívek (Obr. 2), ve kterých se při průchodu elektrického proudu indukuje magnetické pole, které přitahuje rotor z feromagnetického materiálu. Vzduchová mezera mezi státorem a rotorem se pohybuje v rozmezí 0,5-2 mm [2]. Poloha rotoru musí být snímána a řízena tak, aby nedocházelo k mechanickému kontaktu mezi státorem a rotorem ložiska.

Největší komplikací týkající se aktivního magnetického ložiska je fakt, že poloha rotoru v ložisku není stabilní. Celý systém proto musí být vybaven zpětnovazebním regulačním obvodem. Ten se skládá ze snímačů polohy, napájecího zdroje a elektronické řídicí jednotky, která neustále vyhodnocuje polohu rotoru a v závislosti na ní upravuje velikost elektrického proudu v jednotlivých cívkách a tím samozřejmě i sílu vyvolanou magnetickým polem [2].



Obr 2. Umístění cívek ve statoru ložiska [2]

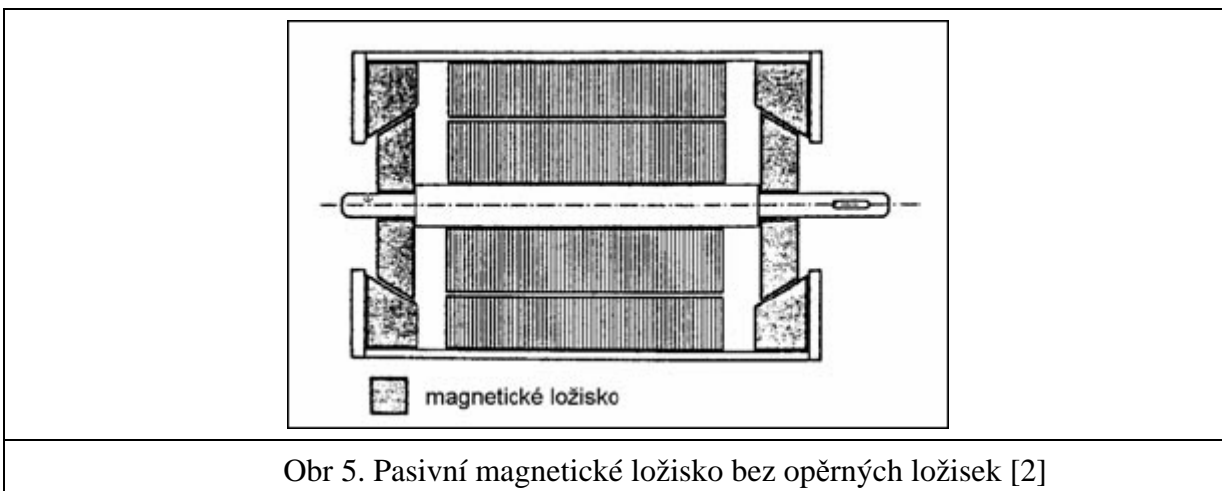
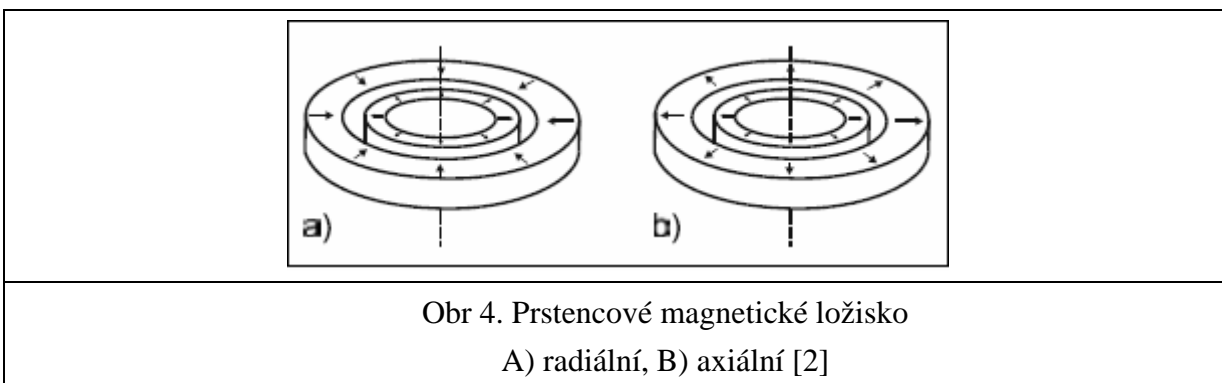
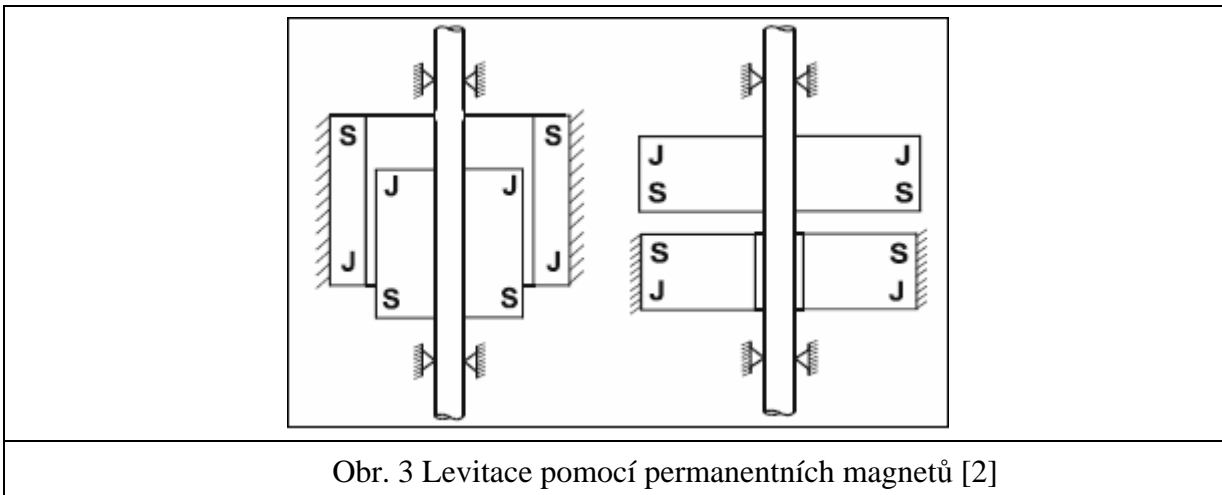
2.2. Pasivní magnetické ložisko

Jedná se o ložiska, které ke svému provozu nevyžadují přísun elektrické energie.

2.2.1. Magnetické ložisko s permanentním magnetem

Na obrázku (Obr. 3) jsou dva typy axiálních magnetických ložisek s permanentními magnety, které jsou založeny na odpuzování stejnojmenných a přitahování opačných pólů magnetů. Na obrázku (Obr. 4), je radiální a axiální ložisko se dvěma prstencovými

permanentními magnety; obě ložiska se od sebe liší způsobem zmagetování vnějšího prstence. Nedostatkem ložisek s permanentními magnety je jejich nestabilita. Radiální ložisko není axiálně stabilní a axiální ložisko není radiálně stabilní. Nestabilitu lze odstranit přidáním opěrných mechanických ložisek (Obr. 3) nebo vhodnou konstrukcí celého zařízení (Obr. 5). Magnetická ložiska s permanentními magnety jsou poměrně levná, jednoduchá a spolehlivá [2].

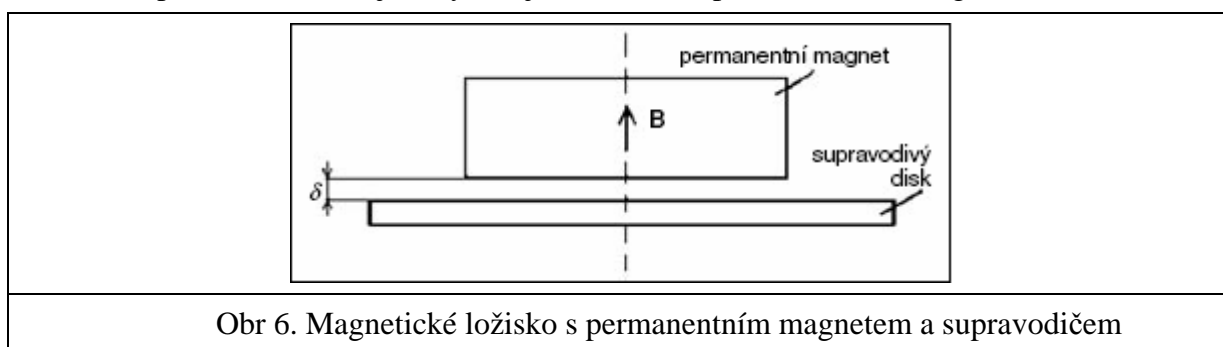


2.2.2. Magnetická ložiska s permanentním magnetem a supravodičem

Magnetické ložisko s permanentním magnetem a supravodičem (Obr. 6) je založeno na principu Meissnerova efektu. Pro tento typ ložisek lze dosáhnout stabilní levitace (na rozdíl od magnetických ložisek, která mají pouze permanentní magnety a vyžadují vodící ložiska). Základní uspořádání ložisek tvoří permanentní magnet ve tvaru válečku. Ten je souose umístěn nad kotoučem ze supravodiče.

Ukazuje se, že nosnost a tuhost ložiska se výrazně zvýší, pokud permanentní magnet není masivní, ale pokud je složen z n částí: z válečku a z $n-1$ prstenců, které jsou na váleček navlečeny. Tyto díly jsou zmagnetizovány tak, aby vzniklo n pólů a jejich směr magnetizace byl otočen o 180° .

Nosnost ložiska se zvýší, pokud je směr magnetizace jednotlivých částí pootočen o 90° (tento problém samozřejmě vyžaduje větší dělení permanentního magnetu) [1].



2.3. Magnetická ložiska můžeme dále dělit

- Axiální magnetická ložiska
- Radiální magnetická ložiska
- Bez senzorová ložiska

Magnetická ložiska jsou velmi slibnou technologií ve strojních aplikacích, pracují s řízením vzduchové mezery. Některé způsoby využívají přímo vzduchovou mezeru, například jsou to procesory, které vyžadují průtok procesní kapaliny nebo materiálu [1].

Magnetická ložiska je možné hermeticky utěsnit, díky tomuto 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 aplikovatelná v hygienických citlivých procesech, například v potravinářském průmyslu [1].

Systémy magnetických ložisek se skládají ze tří hlavních částí:

- Ovládací jednotka ložiska (Hardware)
- Snímače
- Řídící algoritmus

2.3.1. Axiální magnetická ložiska

Axiální magnetické ložisko má masivní ocelový kotouč (Obr. 7) připojen k hřídeli a po obou stranách umístěn prstencový stator. Stator může mít jedno nebo dvě vinutí, která vytvářejí magnetický tok. Axiální stator rozšiřuje šířku pásma odezvy síly. Ve strojích, v nichž působí nepřilíš velké axiální zatížení, lze radiální ložiska nahradit kuželovými ložisky, která mohou vykonávat pohyb v radiálním i axiálním směru. Takové řešení nahrazuje axiální ložisko a přispívá ke zmenšení celkové délky stroje [1].

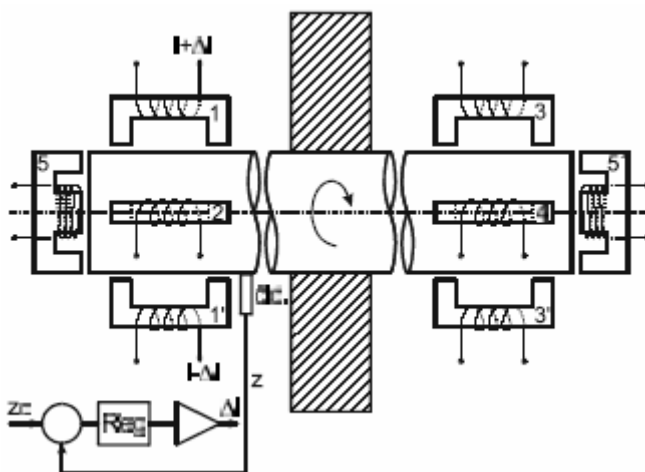


Obr 7. Axiální magnetické ložisko

2.3.2. Radiální magnetická ložiska

Podobají se elektromotoru, avšak místo točivého momentu vytváří přitažlivou sílu, která zvedá hřídel. Stator tohoto ložiska se typicky skládá ze čtyř oddělených ovládacích jednotek. Každá z těchto jednotek je tvořena dvěma póly, na nichž je navinuta cívka (Obr. 8). Při průchodu elektrického proudu cívkou vzniká přitažlivá síla, která působí na feromagnetický rotor. Vzduchová mezera mezi státorem a rotorem je zpravidla 0,5 až 2mm [2].

Signál, který řídí budící proudy, je rozdíl mezi zaměřenou polohou hřídele a jeho požadovanou polohou. Snímače, 11' a 33' kontrolují 2 stupeň volnosti rotoru: rotaci a translaci. Stejně tak i snímače 2-2' a 44'. Pár snímačů 5-5' kontroluje pouze translaci[2].



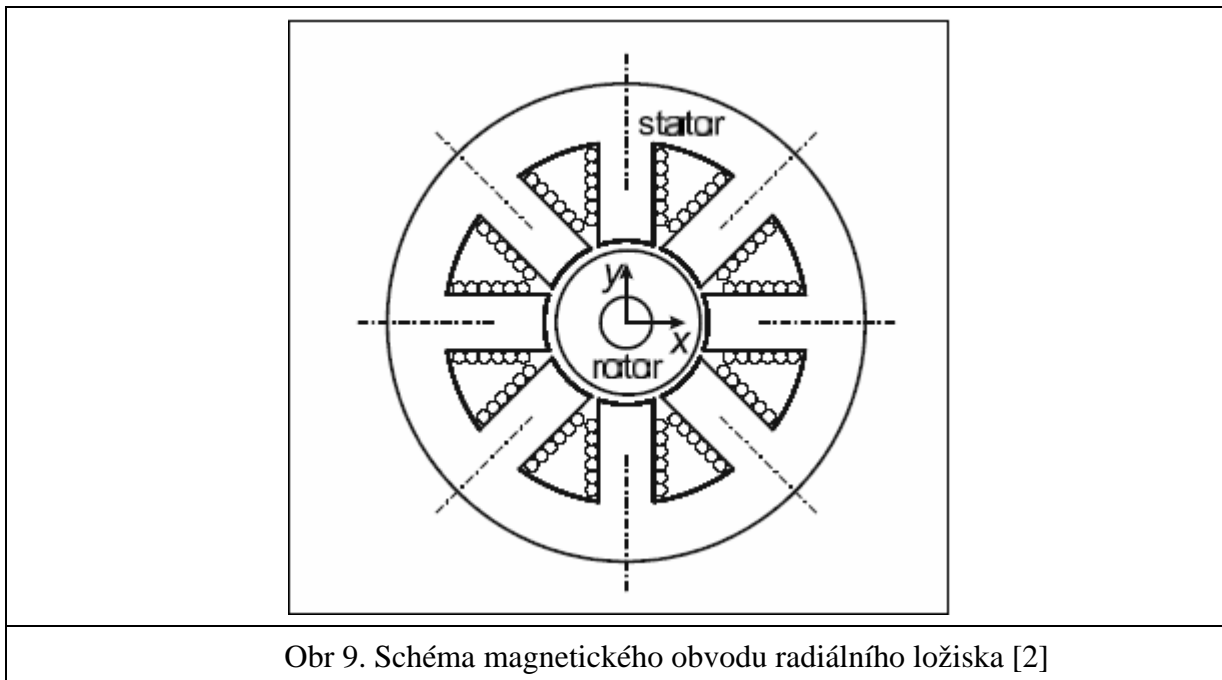
Obr 8. Stabilizace polohy rotoru radiálního ložiska [2]

2.3.3. Části radiálního ložiska

Radiální ložisko má tyto části (Obr. 9):

- Stator se soustavou elektromagnetů
- Rotor z feromagnetika
- Snímače polohy rotoru

- Regulátor-reguluje prostřednictvím výkonové části (měniče) proud elektromagnetů statoru a tím i jejich přitažlivou sílu



Obr 9. Schéma magnetického obvodu radiálního ložiska [2]

2.3.4. Bez sensorová ložiska

Bez sensorové (samokontrolně) ložisko je typ magnetického ložiska, který nevyžaduje žádné externí snímače polohy. Informace o poloze se získává ze vzduchové mezery, závislé na vlastnostech elektromagnetu. Hlavní výhodou je redukce výrobních výdajů o snímače polohy rotoru.

Bez sensorová ložiska mají mnoho rysů, které je činí zajímavými pro řešení různých technických problémů. Absence snímačů polohy zjednodušuje konstrukci, montáž a údržbu systému magnetických ložisek. Dvě rozdílné koncepce samokontrolných ložisek byly navrženy a realizovány v ICMB (International Center of Magnetic Bearing) [1].

3. Magnetická levitace

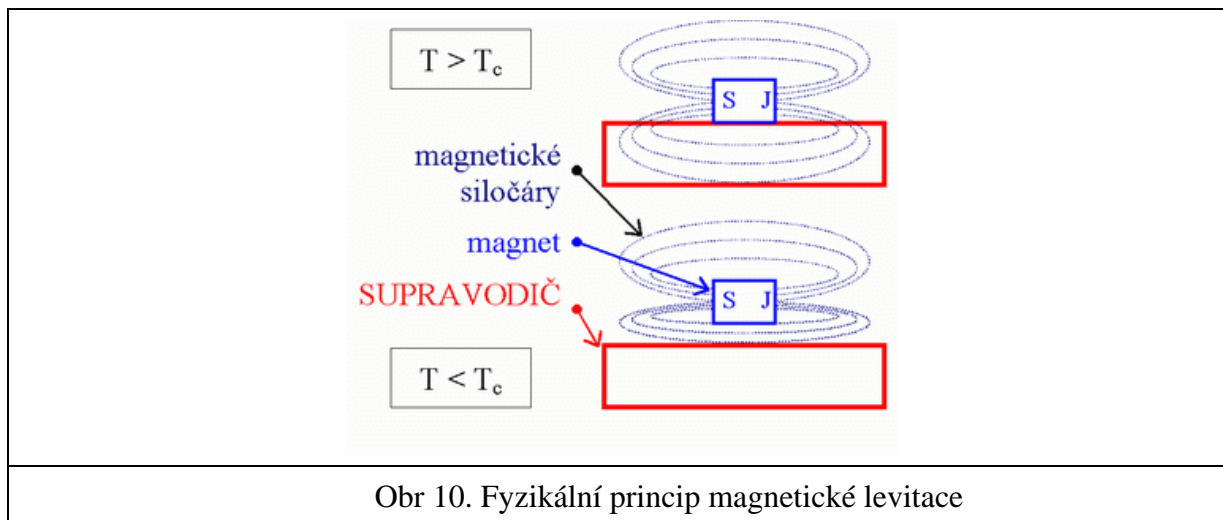
Celá tato kapitola vychází ze zdrojů [1], [3], [7],

Magnetická levitace je proces, ve kterém se objekt vznáší pouze za pomoci magnetického pole [1]. Elektromagnetická síla je využita k rušení vlivu síly gravitační. Zkoumáním vlastností elektromagnetického pole se zjistilo, že levitaci lze realizovat několika způsoby [1].

3.1.1. Principy magnetické levitace

Zařízení, které umožňuje stabilně umístit těleso v prostoru, aniž by mělo kontakt s pevnou podložkou, můžeme nazvat levitační systém [1]. Fyzikální princip magnetické levitace využívá takzvaného Meissnerova efektu. To je, že supravodivé materiály mají nejen nulový elektrický odpor, ale rovněž mají schopnost dokonale vytlačovat magnetické pole z celého svého objemu.

- H. K. Onnes v roce 1911 zjistil, že u rtuti pod tzv. kritickou teplotu $T_c = 4,2$ K se měrný odpor snižuje řádově na $\rho \cong 4 \cdot 10^{-25} \Omega \text{ m}$ což efektivně nula, neboť to je 10^{16} méně než je hodnota při pokojové teplotě. V současnosti jsou vyvinuty materiály na bázi Y [7], které mají kritickou teplotu $T_c \cong 160$ K. Tyto keramické látky jsou za normální teploty nevodivé, zatímco u dobrých vodičů nelze dosáhnout supravodivosti při žádné teplotě. Při teplotách, $T < T_c$ vymizí elektrický odpor. Magnetická indukce je uvnitř při $T < T_c$ kromě povrchové vrstvy nulová a vzorek je ideální diamagnetikum. Tloušťka této vrstvy roste při přibližování teploty k T_c . V blízkosti T_c se mění také měrná tepelná kapacita [7].



Obr 10. Fyzikální princip magnetické levitace

Supravodivý elektromagnet, po ochlazení pod kritickou teplotu T_c , vytlačuje siločáry magnetického pole ze svého objemu (Obr. 10). Konkrétně k tomu dochází proto, že vnější magnetické pole indukuje na povrchu supravodivé proudy, které vytvoří magnetické pole stejné velikosti jako vnější pole, ale opačného znaménka. Tím se magnetické pole uvnitř supravodiče zcela vyruší. Jestliže je magnetické pole vytvářeno magnetem umístěným blízko supravodiče, dochází k jejich vzájemnému odpuzování.

Na rozdíl od odpuzování mezi dvěma magnety, ke kterému dochází pouze, jsou-li natočeny souhlasnými póly, v případě magnetu a supravodiče dochází k odpuzování nezávisle na natočení magnetu [3]. Některé supravodiče nevykazují úplný Meissnerův jev, ale dovolují částečné pronikání magnetických siločar do svého objemu. Pak dochází k tomu, že magnet

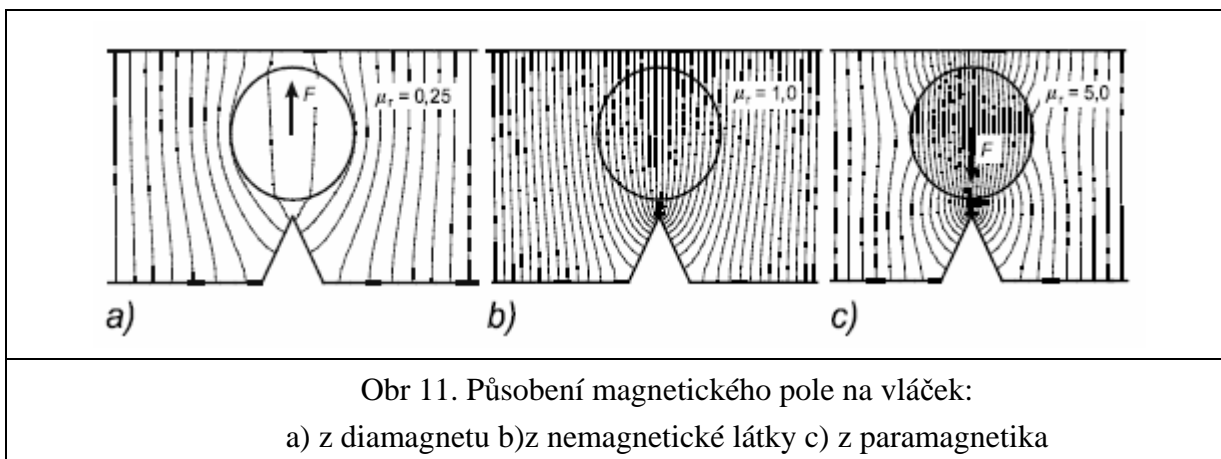
umístěný nad supravodičem je nejen odpuzován, ale zároveň udržován ve stabilní poloze v určité vzdálenosti od supravodiče (levitace). Takto může být magnet udržován i zavěšen pod supravodičem (magnetický závěs). Levitující magnet se může točit bez tření, zpomalovaný pouze odporem vzduchu, to znamená, že ve vakuu by se točil nekonečně dlouho [1].

3.1.2. Levitace s permanentními magnety

Na obrázku (Obr. 3) jsou uvedeny dva způsoby, které využívají odpuzivé síly stejných pólů permanentních magnetů. Tímto způsobem lze například realizovat magneticky levitovaná ložiska. Avšak tato zařízení přesně nesplňují podmínku levitace, neboť poloha rotoru ložiska je zajištěna vodícími ložisky a je tudíž spjata se zemí (podložkou).

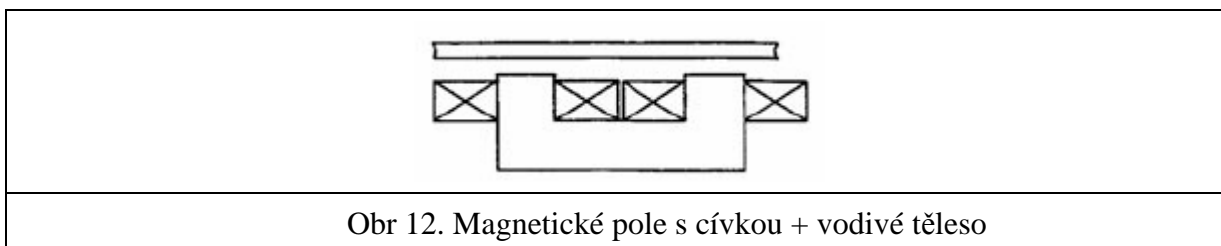
3.1.3. Levitace s využitím diamagnetismu

Diamagnetické látky (Obr. 11), vytlačují částečně ze svého objemu magnetické pole. Mnoho látek má diamagnetické vlastnosti, ale jejich efekt je velmi slabý, a obvykle je překonán vlastnostmi paramagnetickými nebo feromagnetickými. Materiál, jenž je převážně diamagnetický bude odpuzován magnetem (zatímco materiály paramagnetické a feromagnetické budou přitahovány). Tento jev může být využit pro levitaci lehkých kousků grafitu či bismutu nad mírně silným permanentním magnetem. Toto se zdá být téměř nevyužitelné pro praxi [1]. Mnohem větší levitující síla bude působit na supravodič, ten se chová jako ideální diamagnetikum.



3.1.4. Levitace transformační

Pokud vybudíme magnetické pole cívkou a vložíme do něj elektricky vodivé těleso, začne se v něm indikovat napětí (Obr. 12), které vyvolá vířivé proudy [1]. Tyto proudy jsou svým magnetickým polem v interakci s magnetickým polem budící cívky a levitují toto vodivé těleso.



3.1.5. Elektromagnetická levitace EMS, EDS

EMS (Elektromagnetická levitace) je označení pro levitaci přitahováním. Je založena na přitahování feromagnetického tělesa elektromagnetem [1]. Nestabilní EMS: přitažlivá síla

je buď větší, nebo menší než je hmotnost tělesa. Pokud platí: $F < m$ – těleso odpadne; $F > m$ – těleso se přitáhne. Pro dosažení stabilní levitace je třeba zavést zpětnovazební regulaci budícího proudu elektromagnetu. Tato regulace pracuje tak, že nastavuje takový budící proud, aby magnetický tah byl stále v rovnováze s hmotností tělesa.

EDS (Elektrodynamická levitace) je označení pro levitaci odpuzováním. Zakládá se na principu odpuzování stejnosměrného elektromagnetu od pohybujícího se vodivého pásu. Např. cívka uložená nad vodivým pásem.

Aby byla levitační síla dostatečně velká, musí cívka indukovat extrémně silné magnetické pole (toho lze dosáhnout, pokud bude cívka ze supravodiče) [1].

3.1.6. Využití magnetické levitace

Využití magnetické levitace v praxi zahrnuje řadu aplikačních oblastí:

- stavba moderních dopravních prostředků (např. vysokorychlostní železnice)
- speciální zařízení (bezkontaktní ložiska)
- rafinace kovů (bezkontaktní tavení)
- kosmický průmysl

4. Řízení aktivních magnetických ložisek

Celá tato kapitola čerpá ze zdrojů [1], [4], [5]

Řízení aktivního magnetického ložiska spočívá v řízení polohy rotoru vůči statoru ložiska. Řízení měří aktuální polohu rotoru a na základě odchylky od požadované polohy, ovládá jednotlivé elektromagnety ložiska tak, aby rotor zaujímal polohu co nejbližší poloze požadované [1].

Aktuální polohu rotoru je možné buď měřit přímo snímači polohy, nebo nepřímou určovat z intenzity magnetického pole ve vzduchové mezeře. Ovládání elektromagnetů může být realizováno buď řízením napětí pomocí PWM modulace (napěťový zdroj) nebo řízením proudu (proudový zdroj). Řízení proudu lze realizovat proporcionalně nebo pomocí PWM modulace s nadřazenou proudovou smyčkou. V současnosti je proporcionalní řízení proudu energeticky nepřijatelné díky velkým ztrátám.

4.1. Snímače polohy

Na snímače polohy, jsou kladeny vysoké nároky, které musí splňovat tyto kritéria: odolnost vůči vibracím, malé rozměry, vysoká rychlost snímání, teplotní odolnost a stále vzrůstající citlivost spolu s přijemnou cenou [4].

Rozvoj výroby snímacích technologií postupně zmenšují nedůvěru a začínají převládat požadavky využívající specifických možností magnetických snímačů. Podobný je i vývoj patrný i v oblasti lineárních a úhlových snímačů s vysokým a velmi vysokým rozlišením.

Snímače polohy můžeme rozdělit na základní typy:

- Mechanické
- Pneumatické a hydraulické
- Elektrické

Elektrické snímače můžeme dále rozdělit na: odporové, indukčnostní, kapacitní, fotoelektrické, emisní, ionizační, kontaktní.

Obvykle se používají indukční snímače, které měří indukčnost v mezeře mezi senzorem a rotorem [1].

Snímače jsou umístěny na okraji statoru, obvykle uvnitř jako kroužek nebo samostatně („trubičkové snímače“) připevněné tak aby přiléhaly k řídicímu členu. Snímací kroužky poskytují dobré upevnění, které nevyžaduje pozdější úpravu instalace. Tento jejich rys, při kombinaci s jejich malou velikostí, jim umožňuje instalaci v zařízeních, kam není možno instalovat trubičkové. Na druhou stranu „trubičkové“ snímače dovolují nastavit citlivost a ofset během jejich instalace na zařízení, čímž poskytují efektivnější a levnější údržbu [1].

4.1.1. Snímače polohy

Indukční řadové polohové snímače od firmy Balluff [10]:

Vlastnosti:

- Spolehlivost indukčního principu
- Všechny snímače jsou vybaveny indikační led
- Jsou použity upevňovací rozměry standardních mechanických pouzder
- Snadná kombinace se sběrníkovými systémy nebo živitelem specifikovanými konektory

Řadový polohový snímač (Obr. 13) pro standardní použití, typová řada 650 – 11

- Použitelné v extrémních podmínkách jako jsou vibrace, teplotní výkyvy
- Spolehlivost srovnatelná se standardními indukčními snímači

Tab. 1 Technické údaje řadového polohového snímače	
• Typ	• Řadový polohový snímač
• Rozteč snímacích jednotek	• 8 mm
• Typové označení	• BNS 816-B__-__-__-650-11-__
• Materiál pouzdra	• Hliníkový odlitek odolný proti korozi s eloxovaným povrhem
• Druh připojení	• Kabelová vývodka se závitem M16x1,5 nebo konektor
• Teplota okolí	• -25...+ 70 C
• Krytí podle IEC 60529	• IP 67
• Indikace funkce	• LED
• Rázové zatížení	• Max. 100 g
• Vibrace	• 10...55 Hz

Řadový polohový snímač s indikací výstupní funkce

- Indukční snímací jednotky jsou zásadně vybavovány led indikací, světlo viditelné na víku pouzdra




Obr 13. Řadový polohový snímač
Typová řada H2 a H3


Snímače od firmy Applied Measurements Ltd. (UK) [11]:

- Miniaturní snímače LVDT (Tab. 2)


Tab. 2 Technické údaje miniaturního snímače LVTD

Série AML/M	
Rozsahy	Od 0.25 mm do 75 mm
Výstup	od 34mV/V do 350mV/V AC @ 3kHz
Přesnost	±0.50%
Rozsah pracovních teplot	-30 to +85°C Standardní
Průměr pouzdra	9,53 mm
Krytí	IP40

- Standardní snímač LVDT (Tab. 3)

Tab. 3 Technické údaje standardního snímače LVDT	
Série AML/E	
Rozsahy	±0.5mm do ±550mm
Výstup	mV/VAC,0-5Vdc,0-10Vdc,±2.5Vdc,4-20mA
Přesnost	±0.50%
Rozsah pracovních teplot	-30 to +85°C Standardní
Průměr pouzdra	20,6 mm
Krytí	IP54

- Snímač LVDT (Tab. 4)

Tab. 4 Technické údaje snímače LVTD	
Série AML/IE	
Rozsahy	od ±0.5mm do ±550mm
Výstup	mV/V,AC,0-5Vdc,0-10Vdc,±2.5Vdc,4-20mA
Přesnost	±0.50%
Rozsah pracovních teplot	-30 to +85°C Standardní
Průměr pouzdra	22,2 mm

Krytí	IP65 nebo IP68
-------	----------------

Snímač od firmy Baumer Elektronik:

- Indukčnostní snímač IWRM 08I9501/S35

Tab. 5 Technické údaje a schéma zapojení snímače IWRM 08I9501/S35 [6]

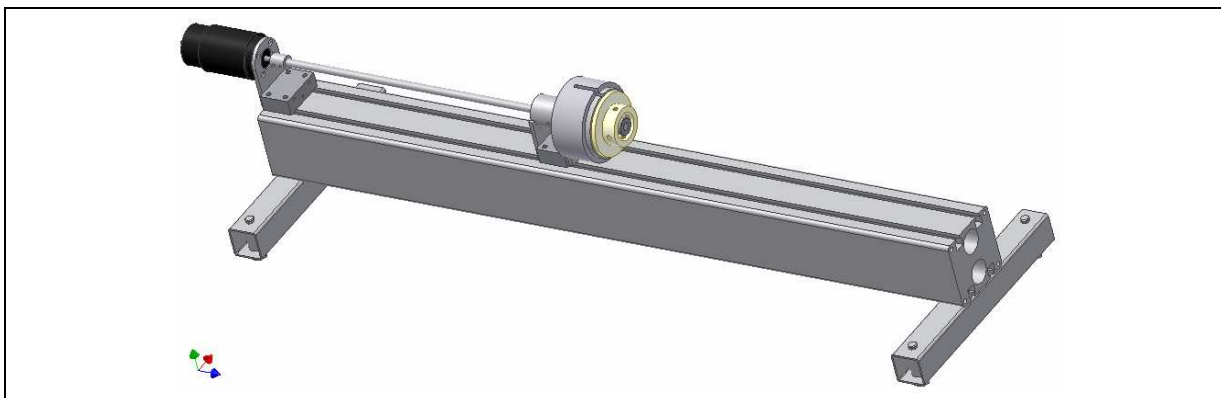
Technické údaje a Schéma zapojení	
Rozlišení	0...2mm
Opakovatelnost	<0,001mm(stat.), <0,005mm(dynam.)
Chyba linearity	<0,02mm
Teplotní proud	±100μm
Doba odezvy (± 5% (Full Scale)
Měřicí rozsah +Vs	<0,5ms
Spotřeba proudu max.	15...30VDC
Výstupní obvod	35mA
Výstupní signál	Aktuální výstup
Zatěžovací odpor +Vs min.	0... 10 mA
Zatěžovací odpor +Vs max.	<910Ohm
Jištění proti zkratu	<2400Ohm
Obrácená ochrana polarity	ano
Typ	ano
Materiál	Válečkovitý se závitem
Dimenze	Nerezová ocel
Délka	8 mm
Spojovací typ	46mm
Provozní teplota	spojka M8
Třída ochrany	10...+60°C
Rozlišení	IP 67

4.1.2. Volba snímače

Pro snímání polohy byl zvolen IWRM 08I9501/S35. Snímač má proudový výstup 0 až 10mA. Pro měření pomocí AD převodníku bude realizováno jednoduché zapojení, které převede proudový signál na napětí v požadovaném rozsahu.

5. Mechanická konstrukce přípravku pro Aktivní magnetické ložisko

Pro provoz Aktivního magnetického ložiska, které vlastní Ústav automatizace a informatiky je nutné realizovat přípravek, který umožní uchycení statoru ložiska, motoru pohánějícího rotor ložiska a vhodné spojení rotoru ložiska s rotorem motoru. Dále je nutné navrhnout přípravek tak, aby jednoduše umožnil měnit vzdálenost motoru od statoru a i výměnu motoru za jiný typ (Obr. 14). To vychází z charakteru experimentů s ložiskem, kdy v první fázi je potřeba se naučit řídit ložisko při nízkých otáčkách (cca. Do 5000min^{-1} , postupně pak přejít na otáčky vyšší (cca $100\,000\text{min}^{-1}$). Požadovaná maximální délka rotoru je $1\,000\text{mm}$, čemuž bude odpovídat i celková délka přípravku.



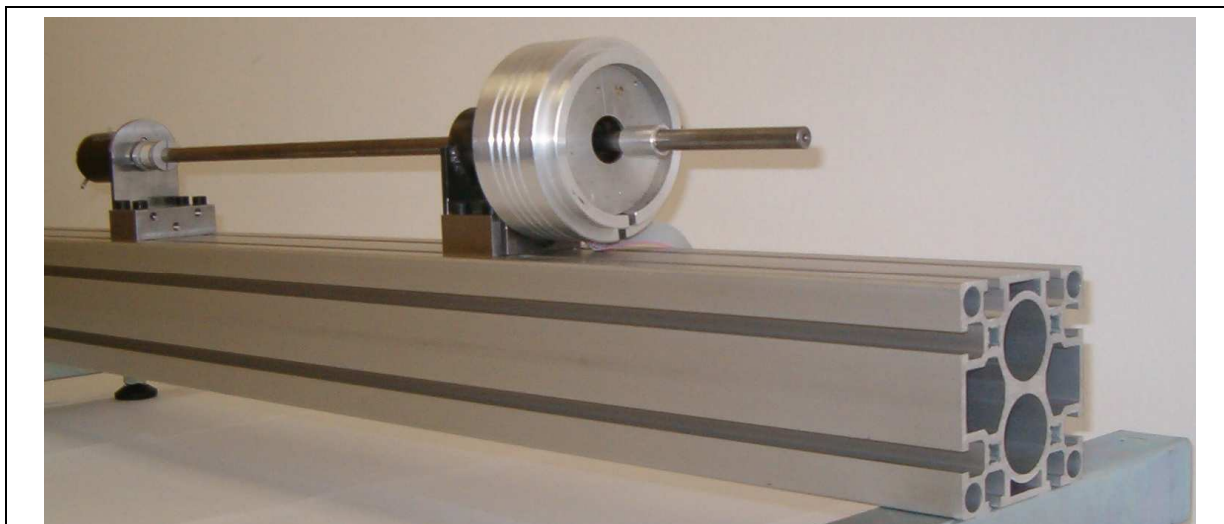
Obr 14. Navržená konstrukce zkušební přípravku

Pro spojení rotoru motoru a rotoru AML byla použita pružná spojky celokovová vlnková spojka (bez torzních vůlí, svěrné náboje-přenos kroutícího momentu), (Obr. 15). Přes tuto spojku se na rotor motoru přenáší i vibrace vznikající při rotaci rotoru AML, vibrace jsou přenášeny přes ložiska motoru dále na zkušební přípravek. Přípravek musí být schopen zachytit i síly, které vznikají při rozběhu a doběhu ložiska a které mohou, vzniknou při poruše řízení.



Obr. 15 Držák motoru s pružnou spojkou

Realizovaný zkušební přípravek je na (Obr. 16).



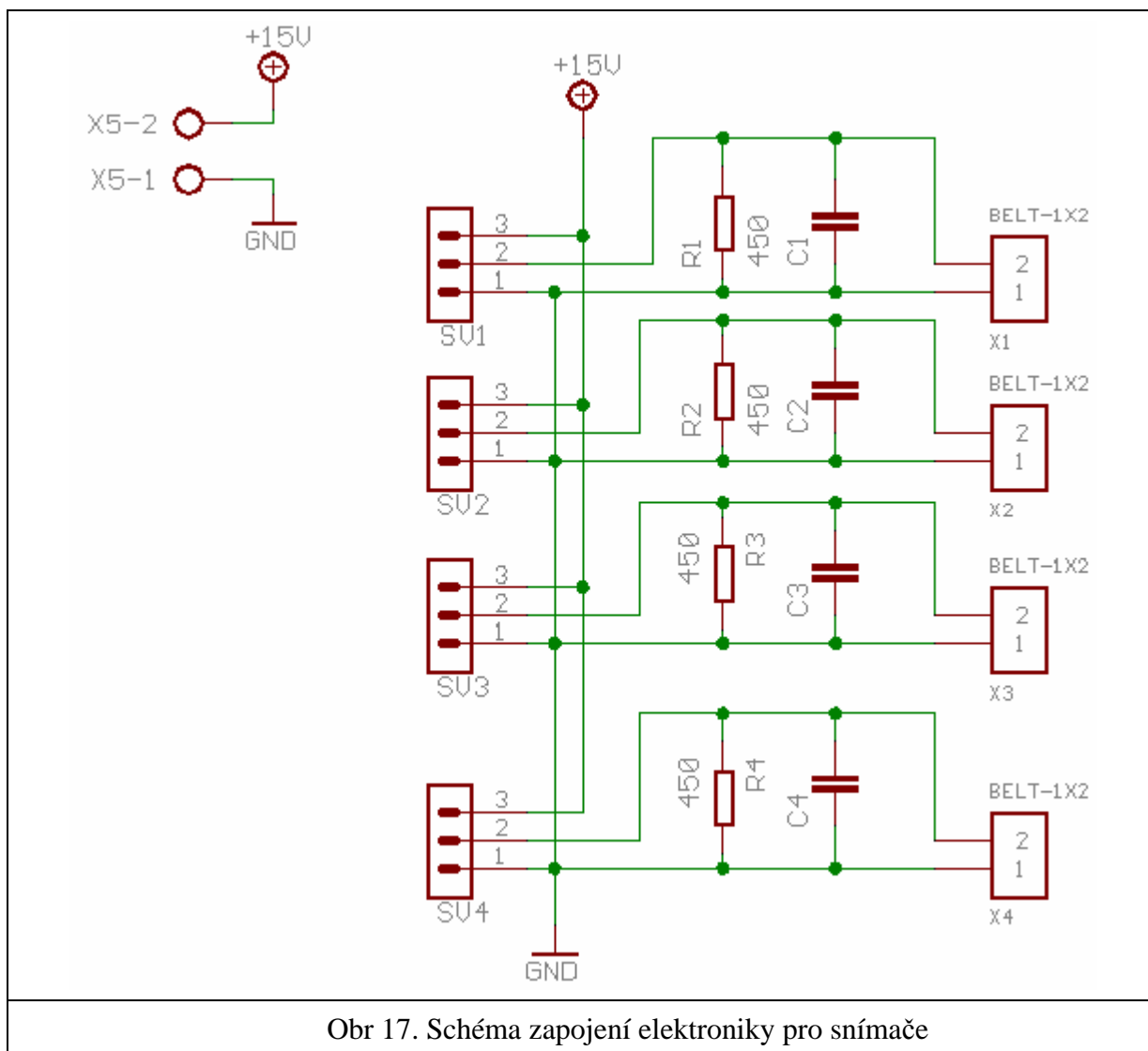
Obr 16. Realizovaný zkušební přípravek

6. Realizace elektroniky pro řízení AML

Pro potřeby řízení AML je potřeba realizovat elektroniku pro připojení snímačů polohy rotoru AML a výkonovou elektroniku pro ovládání elektromagnetů statoru AML. Obě elektroniky budou připojeny ke svorkovnici DAQ karty, pomocí které se má ložisko řídit.

6.1. Elektronika pro připojení snímačů polohy rotoru AML

Pro snímání polohy rotoru byli zvoleny čtyři snímače s proudovým výstupem 0 až 10mA, napájené 15 až 30V, maximální odběr 35mA. Pro připojení snímačů k DAQ kartě, která je schopná měřit pouze napětí ± 10 , je nutné převést proud na napětí. Dále je nutné snímače napájet požadovaným napětím.



Obr 17. Schéma zapojení elektroniky pro snímače

Navržené schéma zapojení je na obrázku 17. Velikost rezistorů je vypočítána z Ohmova zákona (1.1), maximální hodnota napětí na analogovém vstupu měřící karty je 10V, pro výpočet je uvažováno napětí o 10% menší, z důvodu zaručení měřitelného rozsahu.

Vypočet:

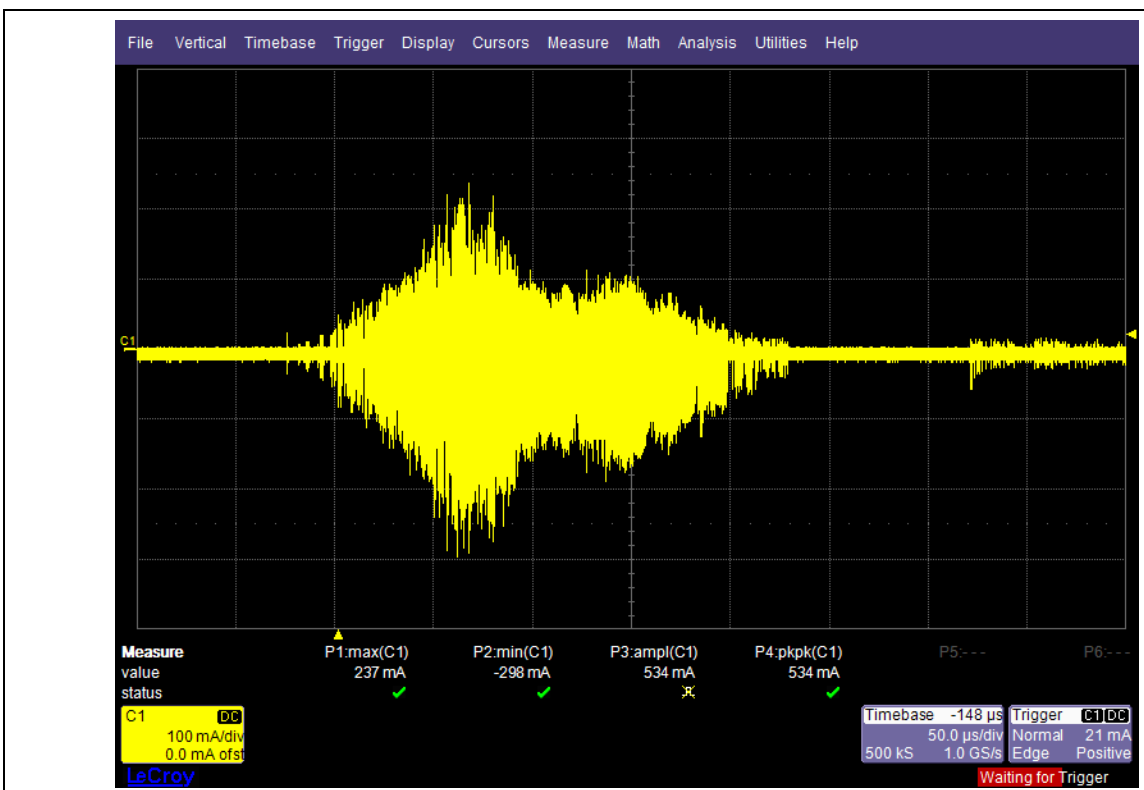
$$I = \frac{U}{R} \Rightarrow R = \frac{U}{I} \tag{1.1}$$

$$R = \frac{9V}{0,010A} = 900\Omega$$

Rezistor s hodnotou 900Ω není v základní řadě rezistorů, volím hodnotu 820Ω.

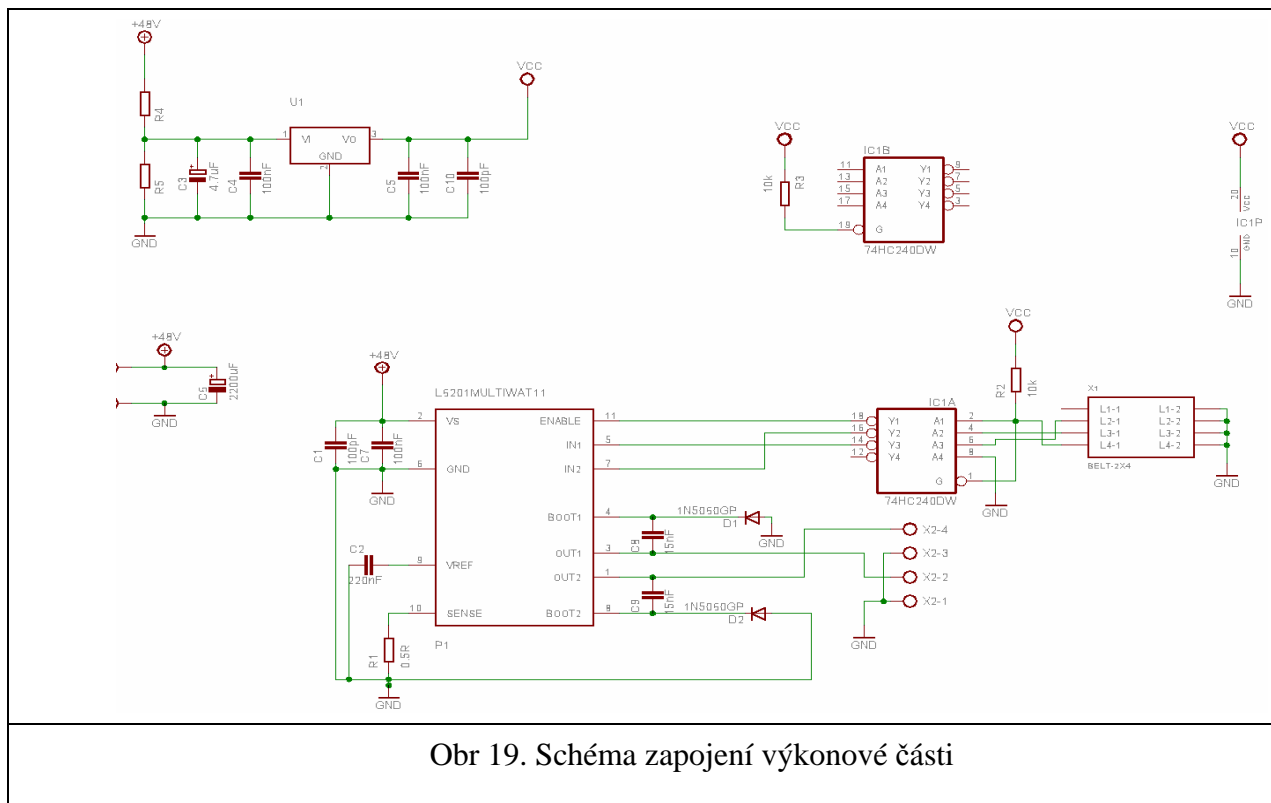
6.2. Výkonová elektronika pro ovládání elektromagnetů statoru AML

Vynutí cívek AML jsou realizována pro napětí 48V, odpor vinutí je 270Ω, indukčnost je 1,34H. Indukčnost vinutí je závislá na poloze a rychlosti pohybu rotoru AML. Proud byl experimentálně odměřen (obr. 18), jeho maximální hodnota byla naměřena při odpojení napájení a je 237mA, maximální amplituda je 534mA.



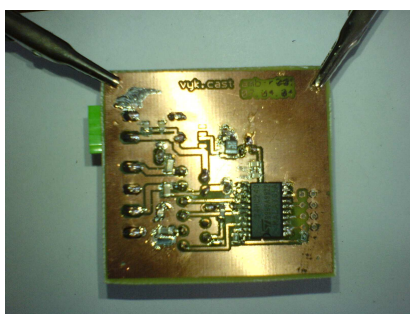
Obr 18. Průběh proudu cívkou AML při odpojení napájení

Navržené schéma zapojení výkonové elektroniky je na (obr. 19).



Obr 19. Schéma zapojení výkonové části

Výkonová elektronika byla navržena s využitím výkonového obvodu L6203 do firmy SG Thomson [8], který splňuje výše uvedené parametry. L6203 obsahuje dva poloviční H-mosty, které jsou nezávisle ovladatelné. To umožňuje použít jeden výkonový obvod pro dvě cívky AML. Vypnutí výkonových výstupů L6203 je realizováno pomocí signálu ENABLE, který je vypnut v logické úrovni 0. Proto je nutné zajistit, aby signál ENABLE byl automaticky v 0, když není aktivní ovládání. To je řešeno pomocí hradla NOT (74HCT240) a pull-up rezistoru 10kΩ. Další dvě hradla NOT byla použita pro inverzi ovládacích signálů IN1 a IN2, aby byly zaručeny vždy stejné podmínky pro jejich ovládání. Napájení 74HCT240 a pull-up rezistoru je realizováno pomocí stabilizátoru 7805 z napájecího napětí 48V a odporového děliče, který snižuje napětí na vstupu stabilizátoru na přípustnou hodnotu.

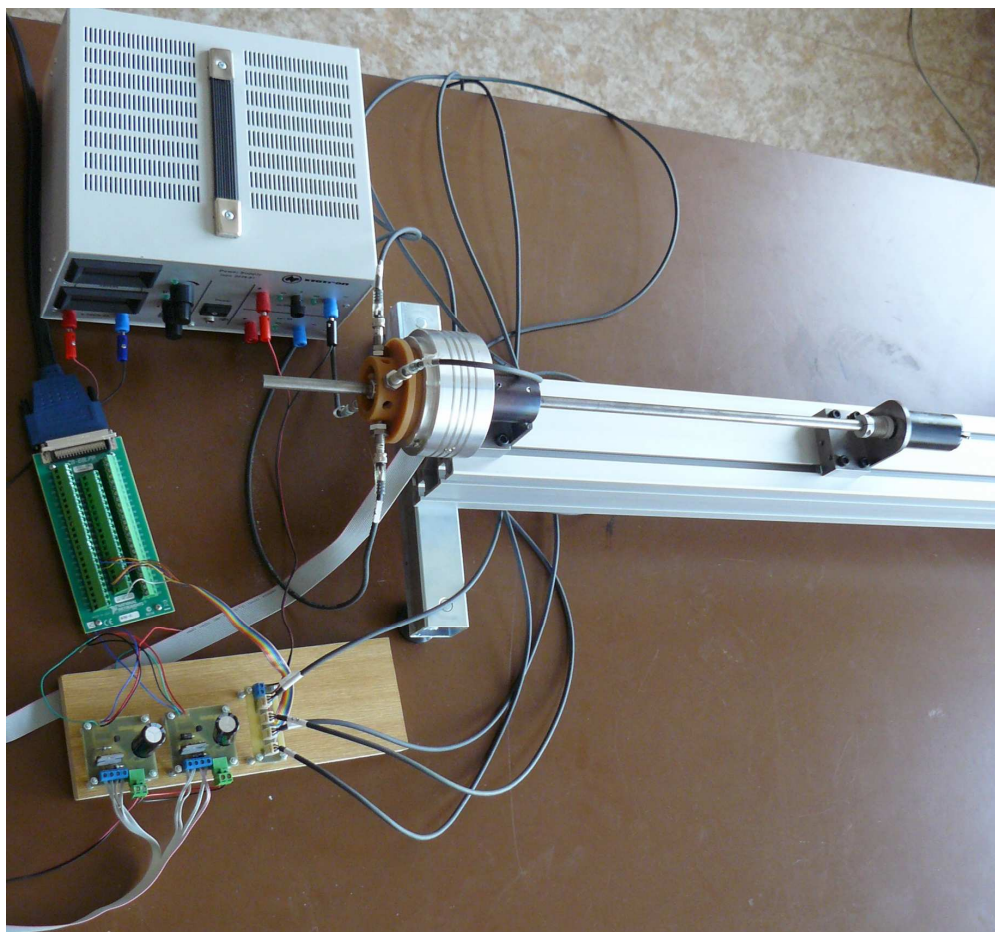


Obr 20. Praktická realizace výkonové části [8]

Pro AML byly realizovány dvě výkonové elektroniky, pro dvě cívky, jedna je (Obr. 20).

7. Výsledek práce

Výsledkem práce je realizovaný zkušební přípravek pro AML, elektronika pro připojení snímačů ke svorkovnici DAQ karty a dvě výkonové elektroniky pro ovládání cívek AML, připojitelné ke svorkovnici DAQ karty. AML upevněné na zkušební přípravku s připojenými snímači a realizovanými elektronikami je na (Obr. 21).



Obr 21. Realizovaný zkušební přípravek pro AML a elektronika

8. Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout a implementovat elektroniku a mechanickou konstrukci zkušební přípravky pro aktivní magnetické ložisko. V řešení části práce je rozebráno dělení magnetických ložisek. Následuje popis způsobů magnetické levitace. V další části práce je rozebrán problém snímání polohy rotoru aktivního magnetického ložiska. Následuje analýza různých typů snímačů a metod snímání polohy rotoru ložiska. Práce se zabývá také novou koncepcí zkušební přípravky pro uchycení a snadnou manipulaci s aktivním magnetickým ložiskem.

Během, řešení této práce, byla navržena mechanická koncepce zkušební přípravky pro upevnění a uchycení aktivního magnetického ložiska a elektronika pro ovládání aktivního magnetického ložiska, pomocí kterého je možné řídit magnetické ložisko. Nepostradatelnou součástí elektroniky pro aktivní magnetické ložisko jsou snímače polohy rotoru, bez nich by nebylo možné správně řídit aktivní magnetické ložisko a mohlo by dojít i k poškození ložiska. Tyto snímače byly převzaty z předchozího vývoje aktivního magnetického ložiska.

Navržené řešení zkušební přípravky a elektroniky je poměrně univerzální, umožňuje jednoduchou výměnu použitého magnetického ložiska, snadnou manipulaci v laboratoři a nastavení snímačů. Realizovaná metoda ukazuje velký potenciál tohoto řešení a nabízí se témata na další práce, zabývající se tímto řešením jak pro zpřesňování řízení, tak pro měření a uchycení aktivního magnetického ložiska či další podobné aplikace.

9. Literatura

[1] Šamánek, O. - Magnetická Ložiska; UK FSI VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno, Česká republika < http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=531>, (22. 5. 2008)

[2] Pesar, J. – Aerostatická, aerodynamická a magnetická ložiska, UK FSI VUT v Brně, Technická 2 616 69 Brno < http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=647>, (22. 5. 2008)

[3] TUREK, M. – Teze 11, Inteligentní řídicí člen aktivního magnetického ložiska; Brno, 4. prosince 2006

[4] <<http://www.mmspektrum.com/clanek/magneticke-a-opticke-snimace-polohy>> Internetový dokument (21. 5. 2008)

[5]<<http://www.larm.cz/CZ/katalogy/snimace/ABSOLUTNI%20SNIMACE%20ARC4xx.pdf>> Internetový dokument > (20. 5. 2008)

[6]<http://sensor.baumerelectric.com/productnavigator/scripts/product.php?pid=IWR_M_08I9501_S35&cat=CONFInduktive_Sensoren&psg=&language=de&r=1&ptk=&country=CZ&header=Czech+Republic+%2F+AJP-tech+spol.+s+r.o.> Internetový dokument (21. 5. 2008)

[7] STEINHART, M – Elektrická vodivost ve vodičích 06 036, ext. 6029 15. 07. 2007 < http://webak.upce.cz/~stein/fIIP/fIIP_03.ppt>, (23. 5. 2008)

[8] Žák, R.; Design and development of an autonomous minirobot – mikromouse. Dostupné z <http://www.feec.vutbr.cz/EEICT/2003/fsbornik/99-CD/02-Mgr/03-Cybernetics_Control_and_Measurements/02-zak_radek.pdf> (23. 5. 2008)

[9] Hoder, K.; Magnetické ložisko. Blansko: ve spolupráci s FSI. 23. 7. 2002

[10] < http://www.balluff.cz/Download/katalogy/BNS/BNS_3.pdf>, (23. 5. 2008)

[11] < <http://www.sitall.cz/produkty.php?kategorie=1113&sekce=1038>>, (23. 5. 2008)

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1. Disk CD-ROM s obsahem:

- Elektronická podoba této práce (Petrušek.pdf)
- Výkresová dokumentace mechanické konstrukce přípravku pro aktivní magnetické ložisko

