

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Dopravní a manipulační technika

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Magnetická ložiska

Autor: **Václav NOHEL**

Vedoucí práce: **Ing. Roman ČERMÁK, Ph.D.**

Akademický rok 2011/2012

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěl velmi poděkovat vedoucímu a zároveň konzultantovi mé bakalářské práce Ing. Romanu Čermákovi, Ph.D. za jeho odborné rady, zkušenosti a poskytnuté podklady, především však za jeho čas a trpělivost.

Dále bych velmi rád poděkoval své rodině za jejich podporu a zázemí, které mi po dobu studia poskytli.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Nohel	Jméno Václav	
STUDIJNÍ OBOR	B2301 „Dopravní a manipulační technika“		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Čermák, Ph.D.	Jméno Roman	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KKS		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Magnetická ložiska		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2012
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	50	TEXTOVÁ ČÁST	34	GRAFICKÁ ČÁST	16
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Bakalářská práce obsahuje základní popis a principy magnetických ložisek. Popisuje jejich základní konstrukci, výhody a nevýhody. Praktická část se zabývá návrhem uložení setrvačnicku v aktivních magnetických ložiskách. Je navrženo několik variant uložení, rozpracována vybraná varianta a provedeny nezbytné výpočty.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	<p>magnetická ložiska, aktivní magnetická ložiska, pasivní magnetická ložiska, magnetismus, magnetická levitace, snímače</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Nohel	Name Václav	
FIELD OF STUDY	B2301 "Transport and handling machinery"		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Čermák, Ph.D.	Name Roman	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Magnetic bearings		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2012
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	50	TEXT PART	34	GRAPHICAL PART	16
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The thesis deals with description and fundamental principles of magnetic bearings. It described basic designs, their advantages and disadvantages. Practical part of the thesis deals with design of flywheel in active magnetic bearings. Several variants are proposed, selected one is worked up and necessary calculations are done.
KEY WORDS	magnetic bearings, active magnetic bearings, passive magnetic bearings, magnetism, magnetic levitation, sensors

Obsah

Zkratky	9
Seznam použitých symbolů.....	10
1. Úvod.....	11
2. Základní informace o magnetických ložiskách.....	12
2.1. Obecný popis	12
2.2. Historie a vznik.....	12
2.3. Použití.....	13
3. Magnetismus	15
3.1. Popis magnetického působení	15
3.2. Magnetické pole	15
3.3. Feromagnetismus	15
3.4. Diamagnetismus	16
3.5. Paramagnetismus	16
3.6. Elektromagnetismus	16
3.7. Magnety.....	16
4. Magnetická levitace	18
4.1. Popis magnetické levitace	18
4.2. Levitace s permanentními magnety.....	18
4.3. Levitace s využitím diamagnetika	19
4.4. Levitace transformační	19
4.5. Elektromagnetická levitace - EMS	19
4.6. Elektrodynamická levitace – EDS	20
5. Přehled magnetických ložisek.....	21
5.1. Pasivní magnetická ložiska – PMB	21
5.1.1. Ložiska s permanentními magnety.....	21
5.1.2. Ložiska s vysokoteplotními supravodiči – HTS	23
5.2. Aktivní magnetická ložiska – AMB	25
5.3. Porovnání aktivních a pasivních magnetických ložisek	27
6. Detailní rozbor aktivních magnetických ložisek.....	28
6.1. Axiální magnetická ložiska	28
6.2. Radiální magnetická ložiska.....	28
6.3. Lineární magnetická ložiska.....	29
6.4. Magnetická mikroložiska	30
6.5. Řídicí systémy ložisek	31
6.5.1. Ovládací jednotka ložiska	32
6.5.2. Snímače	33
7. Navrhované konstrukce různých typů uložení.....	37
8. Výpočet aktivních radiálních magnetických ložisek	41
9. Skica konstrukce, podrobný popis	46
10. Závěr.....	48
Seznam použité literatury	49

Zkratky

PMB – Passive Magnetic Bearings

AMB – Active Magnetic Bearings

EMS – Electro – Magnetic Suspension

EDS – Electro – Dynamic Suspension

HTS – High Temperature Superconductors

LED – Light – Emitting Diode

CCD – Charge – Coupled Device

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Popis
A_c	$[m^2]$	velikost průřezu cívky
A_g	$[m^2]$	velikost průřezu vzduchové mezery
B_b	[T]	klidová magnetická indukce
B_{SAT}	[T]	saturační magnetická indukce
C	[-]	opravná konstanta
C_b	[-]	složka opravné konstanty pro magnetickou indukci
C_f	[-]	opravná konstanta síly
$C_{x,j}$	[-]	x – ová složka opravné konstanty pro j – tou cívku
$C_{y,j}$	[-]	y – ová složka opravné konstanty pro j- tou cívku
d	[mm]	průměr vodiče cívky
f	[N]	síla
f_c	[-]	faktor využití průřezu cívky samotnými vodiči
$f_{x,0}$	[N]	x – ová složka statické síly
$f_{y,0}$	[N]	y – ová složka statické síly
$f_{x,s}$	[N]	x – ová složka dynamické síly
$f_{y,s}$	[N]	y – ová složka dynamické síly
g, g_0	[mm]	velikost vzduchové mezery
I	[A]	proud
I_b	[A]	klidový proud
I_B	[-]	složka proudu pro magnetickou indukci
I_j	[A]	proud j- té cívky
I_X	[-]	složka proudu pro x – ový směr
I_Y	[-]	složka proudu pro y – ový směr
J_{max}	$[A \cdot m^{-2}]$	proud na plochu vodiče
K_i	[-]	součinitel pro nezávislé řízení cívek
l	[mm]	délka pólu
N	[-]	počet závitů cívky
N_j	[-]	počet závitů j – té cívky
n_p	[-]	počet magnetických pólů
r_1	[mm]	poloměr statorové osy
r_2	[mm]	spodní poloměr statorového plechu
r_3	[mm]	horní poloměr statorového plechu
r_4	[mm]	vnitřní poloměr rotorového plechu
r_5	[mm]	vnější poloměr rotorového plechu
S	$[mm^2]$	plocha všech vodičů v cívce
S_1	$[mm^2]$	plocha jednoho vodiče cívky
t	[s]	čas
U	[V]	napětí
w	[mm]	šířka pólu
α	[°]	roztečný úhel mezi sousedními póly
γ	[-]	součinitel rozdělení magnetického toku
ω	$[rad \cdot s^{-1}]$	úhlová rychlost
μ_0	$[N \cdot A^{-2}]$	permeabilita volného prostoru

1. Úvod

Bakalářská práce se zabývá základními principy a návrhem uložení v magnetických ložiskách.

Rešerše uvádí obecní popis, historii a samotný vznik těchto ložisek. V další kapitole je zmíněna oblast použití včetně fotek skutečných přístrojů či prostředků, kde jsou tato ložiska využívána. Následně je pozornost soustředěna na samotné principy a funkce magnetických ložisek, převážně, jaké jevy jsou s těmito ložisky spjaty. V dalších kapitolách je uveden rozbor jednotlivých druhů, včetně detailních popisů a skic. Je zde pojednáno o rozdělení, základních konstrukcích, výhodách a nevýhodách, která tato ložiska vykazují.

Další část rešerše je zaměřena na detailnější popis jednotlivých typů aktivních magnetických ložisek a také jejich řídicí a ovládací systémy.

V konečné části jsou uvedeny typy konstrukcí pro praktický příklad uložení v magnetických ložiskách a jejich popisy a skici. U každého typu jsou zmíněny výhody a nevýhody. Pro vybranou konstrukci je potom proveden výpočet, který je zaměřen na velikost radiálních ložisek. Ze zadaných a stanovených podmínek jsou vypočítány hodnoty spjaté se statorovými cívkami, rozměry statorových plechů a kontrolní výpočty týkající se silových účinků v uložení. Následuje podrobný náčrt navržené konstrukce včetně popisu. V přílohách je pak možno shlédnout výkres celé sestavy a několika dílů.

2. Základní informace o magnetických ložiskách

2.1. Obecný popis

Magnetická ložiska jsou ložiska, u kterých nedochází k téměř žádnému mechanickému tření a opotřebením pohybujících se dílů. Není proto nutné mazání. Uložení v těchto ložiskách lze dosáhnout vysokých obvodových rychlostí (až $250 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) a to jak u přímého, tak i u rotačního pohybu. Mohou pracovat ve vakuu, v agresivních prostředích, ve vodě, ale i tam, kde je třeba zajistit, aby nedošlo ke kontaminaci mazivy či částicemi z opotřebením. Nabízí také uplatnění v prostředích s vysokými či naopak nízkými teplotami (funkčnost ložiska není závislá na pracovních teplotách maziv). Díky bezkontaktnímu pohybu dochází k minimálním energetickým ztrátám a je i výrazně omezena hlučnost. Tato ložiska pracují na principu magnetické levitace, která zajišťuje, že pohyblivé a nepohyblivé části nejsou ve vzájemném kontaktu. U některých typů je však nutno dodávat elektrickou energii, jednak k napájení samotných dílů ložiska, a jednak k napájení ovládacích a řídicích prvků. Tím jsou tato ložiska poněkud dražší od klasických typů, a proto se využívají především pro náročná a přesná uložení. [1, 6]



Obr. 1 - Magnetické ložisko

2.2. Historie a vznik

Uložení pomocí magnetických sil bylo poprvé vysloveno v 19. století. První patenty pasivních magnetických ložisek – PMB (Passive Magnetic Bearings) pochází již z 20. – 30. let 20. století. Patenty aktivních magnetických ložisek – AMB (Active Magnetic Bearings) se objevují během 2. sv. války a to především za přispění vývoje atomových zbraní, kdy byla potřeba vyvinout ložiska, která by dokázala snést vysoké obvodové rychlosti při vysokých zatíženích, jež byla potřeba pro vysokootáčkové odstředivky na čištění uranu. Další poválečný vývoj se týkal především kolejové dopravy – rychlovlaků pohybujících se na tzv. magnetickém polštáři. Tento druh kolejové dopravy dostal název Maglev ze zkratky názvu magnetická levitace. Uplatnil se především v Japonsku a Německu. V roce 1987 pokračoval vývoj v Austrálii, kde byly vytvořeny zlepšovací návrhy AMB, avšak kvůli vysokým nákladům nebyly tyto návrhy uvedeny v praxi. První mezinárodní sympozium o AMB se konalo roku 1988, kdy byla založena Mezinárodní společnost Magnetická ložiska prof. Schweitzera. V roce 1992 se rozhodla společnost Revolve Technologies Inc. využívat magnetická ložiska pro digitální technologie. Později tuto firmu koupila známá švédská firma vyrábějící ložiska, a to firma SKF. Roku 1996 byla v Holandsku využita AMB k uložení hřídel velkých elektrických motorů a kompresorů k čerpání zemního plynu.

V dnešní době jsou magnetická ložiska stále zlepšována a vyvíjena a využívají se v mnoha dalších různých odvětvích, viz kapitola 2.3. Použití. [1, 3, 5]

2.3. Použití

Použití PMB s permanentními magnety není příliš rozšířené z důvodu toho, že magnetické pole těchto magnetů není říditelné a tak nelze ložisko přizpůsobovat změnám zatěžovací síly. Stablního stavu rotoru se u těchto ložisek obvykle dosahuje zajištěním alespoň jedné osy volnosti mechanickým způsobem, např. valivým ložiskem. Obecně se tato ložiska používají u uložení setrvačníků nebo různých laboratorních zařízení, kde nedochází k velkým změnám zatížení na uložení.

AMB se používají více než PMB z důvodu jejich lepšího řízení a uzpůsobování změn při pohybu. Jistě známým případem využití těchto ložisek je druh kolejové dopravy (obr. 2), kde je možno dosáhnout velmi vysokých rychlostí při zaručené bezpečnosti a kvalitě jízdy. Tyto vlaky se pohybují po tzv. magnetickém polštáři. Ten způsobuje nadnášení vlaku a zajišťuje tak posuvný pohyb bez mechanického tření.



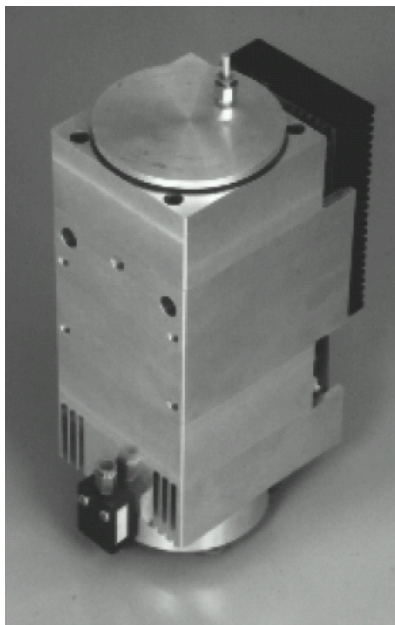
Obr. 2 – Transrapid

Další využití AMB najdeme především u vysokootáčkových zařízení či strojů. Např. vysokootáčkové brusky či frézky, viz obr. 3, které pracují s otáčkami až $80\,000\text{ min}^{-1}$. Uložení vřeten těchto strojů dokážou snést zatížení až několik tisíc Newtonů.



Obr. 3 - Vysokootáčková frézka a bruska

U vřeten pro výrobu závitů také najdeme uložení v AMB (obr. 4).



Obr. 4 - Vřeteno uložené v AMB

Dalším příkladem využití AMB jsou vysokootáčkové odstředivky, turbokompresory, ale i tzv. „turbopumpy“, kde je možno vysokými otáčkami dosáhnout vysokého tlaku či vakua. [7, 8, 21]

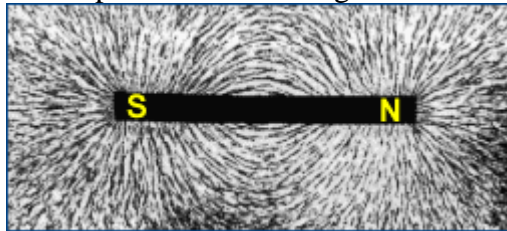
3. Magnetismus

3.1. Popis magnetického působení

Magnetismus je jev, kde dochází k silovému působení na kladně či záporně nabitě částice a to i na určitou vzdálenost. Vše je dáno tím, že v magnetickém poli se pohybují elektricky nabitě částice nebo magnetické objekty, které mezi sebou vytváří přitažlivé nebo odpudivé síly. [10, 11, 12]

3.2. Magnetické pole

Magnetické pole je pole, jehož zdrojem je pohybující se elektrický náboj. Toto pole lze najít u elektrických vodičů, kterými prochází elektrický proud, ale také u permanentních magnetů, kde tvůrcem tohoto pole jsou vázané elektrické proudy. Na obr. 5 je vidět rozložení a rozsah magnetického pole v okolí permanentního magnetu.

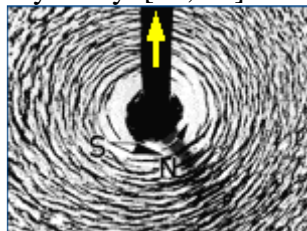


Obr. 5 - Zobrazení magnetického pole

Mezi póly S a N je magnetické pole stejnorodé, to znamená, že působí od jednoho pólu k druhému.

U elektrických vodičů, jimiž protéká elektrický proud, vypadá magnetické pole tak, jak ukazuje obr. 6. Šipka na obrázku znázorňuje tok elektrického proudu.

Pro výpočty a určení intenzity magnetického pole se používá veličina zvaná magnetická indukce, označovaná písmenem B. Jednotkou magnetické indukce je [Tesla] = [T] podle světoznámého vynálezce a génia Nikoly Tesly. [21, 13]



Obr. 6 - Magnetické pole v okolí elektrického vodiče

3.3. Feromagnetismus

Feromagnetismus je jev vykazující spontánní magnetizaci a patří mezi nejsilnější formy magnetismu. Patří mezi nejběžnější magnetické reakce v přírodě a tvoří základ pro všechny permanentní magnety, ale i pro kovy, které jsou k nim přitahovány. Látka, která vykazuje feromagnetismus, se označuje názvem feromagnetikum nebo feromagnetická látka. V těchto látkách vznikají tzv. magnetické domény. Tyto domény jsou myšlené oblasti, ve kterých jsou shodně orientovány magnetické dipóly (dipól je jakýkoliv magnet se severním a jižním pólem).

Materiály používané jako feromagnetické látky jsou železo, nikl, kobalt a některé jejich slitiny. [14]

3.4. Diamagnetismus

Diamagnetismus má tu vlastnost, že se objevuje pouze v přítomnosti vnějšího magnetického pole. Bez vnějšího magnetického působení se materiál s diamagnetickými vlastnostmi chová jako běžné nemagnetické těleso. Diamagnetické látky se skládají z částic, u kterých je výsledný magnetický moment nulový. Pokud se vloží diamagnetická látka do vnějšího magnetického pole, dochází k zeslabení tohoto pole, protože se změní uspořádání elektronových obalů atomů. Zeslabující pole mají za příčinu vzniklé magnetické dipóly, které působí proti vnějšímu magnetickému poli.

Mezi diamagnetické látky se řadí uhlík, měď, síra, zlato a např. dokonce i voda. [15]

3.5. Paramagnetismus

Paramagnetismus je taková vlastnost tělesa, která se objevuje pouze v přítomnosti vnějšího magnetického pole. Platí zde totéž, jako u diamagnetismu a to, že pokud na paramagnetické těleso nepůsobí žádné vnější magnetické pole, těleso nevykazuje magnetické působení na okolí. Oproti diamagnetickým látkám zde však nedochází k utlumování magnetických sil. Obecně lze látky vykazující paramagnetismus označit názvy paramagnetikum nebo paramagnetické látky.

Hlavní podstatou paramagnetismu je, že atomy či molekuly mají trvalý magnetický moment. Pokud ovšem nepůsobí vnější magnetické pole, je výsledný magnetický moment nulový. To je dáno tím, že v paramagnetických látkách na sebe dipóly nepůsobí a při nepřítomnosti vnějšího magnetického pole se náhodně orientují. Pokud se tedy vloží paramagnetikum do vnějšího magnetického pole, dojde k natočení dipólů ve směru tohoto pole a tím vzniká i magnetický moment.

Nejpoužívanější materiál s paramagnetickými vlastnostmi je hliník. Mezi další materiály patří baryum, vápník, mangan, platina, uran, ad. [16]

3.6. Elektromagnetismus

Elektromagnetismus je jev, kdy se projevuje vzájemná souvislost elektřiny a magnetismu. Jak již bylo nastíněno, při procházení elektrického proudu elektrickým vodičem vzniká magnetické pole. To je způsobeno pohybem elektricky nabitých částic protékajících elektrickým vodičem. V okolí vodiče vzniká elektromagnetické pole. Toto pole je však různorodé a nedá se přesně určit rozmístění pólů. Pokud vodič stočíme do spirály a pustíme do něj elektrický proud, získáváme magnet s přesně stanoveným severním a jižním pólem. Více o tomto bude pojednáno v kapitole 3.7. Magnety. [17, 21]

3.7. Magnety

Magnet je těleso, které vytváří magnetické pole. Může být ve formě permanentního magnetu nebo elektromagnetu. Permanentní magnety jsou trvalého charakteru a nepotřebují žádné vnější vlivy. Vyskytují se v přírodě v některých horninách, ale dají se vytvořit i uměle. Elektromagnety potřebují pro vytváření magnetického pole elektrický proud.

Každý magnet má alespoň dva rozdílné póly a to severní a jižní. Pokud dojde k přiblížení stejných pólů, vznikne odpuzivá síla. Naopak při přiblížení dvou rozdílných pólů bude vznikat přitažlivá síla.

Magnety jsou přitahovány či odpuzovány i jinými materiály (feromagnetickými, paramagnetickými či diamagnetickými). Stav, kdy dochází k přitahování či odpuzování tělesa od magnetu, se rozlišuje podle permeability (propustnosti). Materiály s vysokou permeabilitou jako je železo nebo ocel, jsou k magnetu silně přitahovány. Materiály s nízkou permeabilitou jsou naopak od magnetu odpuzovány. Takovým případem je voda.

Feromagnetické materiály jsou základem všech magnetů. Dochází zde k uspořádání sítě magnetického pole a tak k vytváření magnetismu. Působení magnetického pole je však vzdálenostně omezeno. S přibývajícím vzdáleností dochází ke snižování účinků magnetických sil.



Obr. 7 - Permanentní magnet

Elektromagnety jsou ve své podstatě cívky, tedy elektrické vodiče navinuté do spirály. Pokud spirálou prochází elektrický proud, vzniká magnetické pole. Vznikající pole je ovlivněno několika faktory. Jedním z těchto faktorů je počet závitů cívky a velikost protékajícího elektrického proudu. Pro zvýšení intenzity magnetického pole se do středu cívky vkládají jádra s paramagnetického nebo feromagnetického materiálu. Běžně používaný materiál je magneticky měkké železo, které velmi výrazně posílí magnetické pole cívky (stokrát až tisíckrát). [18, 19, 20]



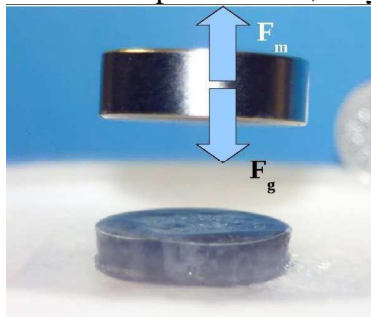
Obr. 8 - Elektromagnet

4. Magnetická levitace

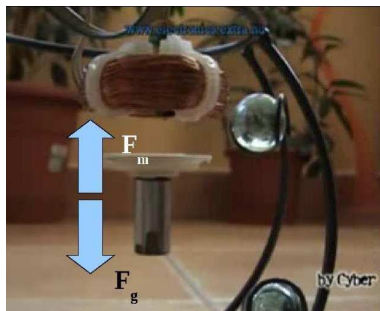
4.1. Popis magnetické levitace

Magnetická levitace je jev, při kterém dochází k vyrušení gravitačních účinků na těleso. Je to způsobeno magnetickými silami. Součet všech sil působících na těleso musí být roven nule, aby byla zajištěna stabilní poloha levitujícího tělesa. Pokud by např. byly gravitační účinky působící na těleso větší než účinky magnetických sil, došlo by k pádu tělesa.

Pro magnetickou levitaci se využívá dvou principů a to podle sil působících na levitující těleso. Jsou to síly přitažlivé a odpudivé. V případě, že se využije přitažlivých účinků, je třeba umístit magnet nad těleso, aby došlo k vyrušení účinků zemské gravitace. Pokud se využije odpudivých účinků, musí být magnet umístěn pod tělesem, tedy mezi Zemí a tělesem. [6]



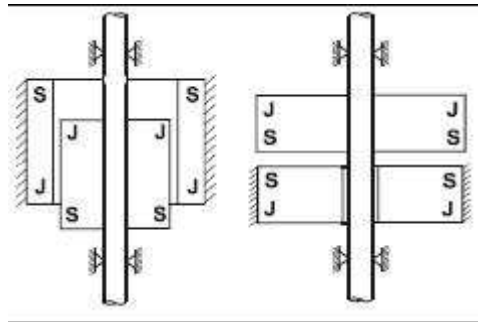
Obr. 9 - Těleso magnetem odpuzované



Obr. 10 - Těleso magnetem přitahované

4.2. Levitace s permanentními magnety

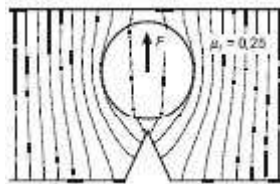
Levitace s permanentními magnety nabízí spoustu možností uložení. Využívají se zde účinky přitažlivé i odpudivé nebo jejich kombinace. Nevýhodou u této levitace je, že minimálně jedna z prostorových os musí být zajištěna mechanicky, např. uložení ve valivých ložiskách, v pevném vedení. Nejedná se zde tedy o levitaci v pravém slova smyslu. [6]



Obr. 11 - Způsob zajištění levitujících částí pomocí permanentních magnetů

4.3. Levitace s využitím diamagnetika

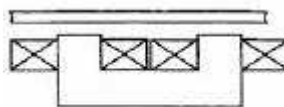
Diamagnetické látky mají tu vlastnost, že po vložení do vnějšího magnetického pole, ze sebe toto pole vytlačují a tím jsou odpuzovány. U přírodních diamagnetických materiálů (např. uhlík) je magnetické působení velmi slabé a proto i odpuzující levitační síla je malá. Naopak u supravodiče je levitační síla mnohem větší, protože ten se chová jako ideální diamagnetikum, tedy vytlačuje magnetismus z celého svého objemu. [6]



Obr. 12 – Působení magnetického pole na váleček z diamagnetika

4.4. Levitace transformační

U transformační levitace je již potřeba elektromagnetu – cívky. Do magnetického pole, které vytváří cívka, se vloží elektricky vodivé těleso. V tělese se začne indukovat napětí a toto napětí má za následek vznik vířivých proudů. Vířivé proudy vytváří magnetické pole, které působí na magnetické pole cívky. Obě magnetická pole se odpuzují a tím dochází k levitaci vloženého tělesa. [6]



Obr. 13 - Levitující měděný kotouč

4.5. Elektromagnetická levitace - EMS

Elektromagnetická levitace – EMS (Electro – Magnetic Suspension) spočívá na principu přitahování elektromagnetu a feromagnetického tělesa. Protože se jedná o přitahování, je tento typ levitace označován jako aktivní.

Pro zajištění stability využívá EMS systém zpětnovazební regulace elektrického proudu elektromagnetu. Zpětnovazební regulace zajišťuje, že magnetické pole elektromagnetu má optimální velikost nutnou pro rovnovážnou polohu feromagnetického tělesa.

Praktický příklad využití elektromagnetické levitace představuje dopravní projekt s názvem Transrapid, který vznikl v Německu. [6, 23]

4.6. Elektrodynamická levitace – EDS

Elektrodynamická levitace – EDS (Electro – Dynamic Suspension) je založena na principu odpuzování stejnosměrného elektromagnetu od pohybujícího se vodivého pásu. Tento typ levitace je tzv. repulsivní, jelikož se jedná o odpuzování. Elektromagnet, napájený stejnosměrným proudem, má za následek to, že na rozdíl od EMS zde magnetické pole nepůsobí na vodivé těleso ve statické poloze. Pro levitování je vždy nutné těleso rozpohybovat a tím zajistit vznik vířivých proudů, které vyvolají magnetické pole. Toto magnetické pole je však velmi slabé, a proto pro zajištění levitace je nutné indukovat obrovské magnetické pole z budící cívky. To se dosáhne vysokým budícím proudem a cívky vyrobené ze supravodivého materiálu. [6, 23]

5. Přehled magnetických ložisek

5.1. Pasivní magnetická ložiska – PMB

Pasivní magnetická ložiska pro svoji činnost nepotřebují napájení elektrickým proudem. Jednak proto, že ložiska nevyužívají žádné elektrické řídicí členy a také jednak proto, že nejsou složena z elektromagnetů potřebujících pro vznik magnetického pole elektrický proud.

PMB lze rozdělit do dvou skupin podle magnetů, jež využívají. Jsou to ložiska s permanentními magnety a ložiska s vysokoteplotními supravodiči – HTS. [1, 6, 8]



Obr. 14 - Ukázka radiálního PMB

5.1.1. Ložiska s permanentními magnety

Tato ložiska využívají trvalých permanentních magnetů. Jedná se o nejjednodušší typ PMB. Polohu pohybujících se částí ložiska nelze během chodu měnit či přizpůsobovat změnám zatížení. Je to vysvětleno tzv. Earnshawovým teorémem, který v základě říká, že nelze, aby soustava elektricky nabitých částic setrvala v rovnovážné statické poloze pouze při působení elektrostatických sil. Tento nepříznivý jev lze však obejít několika způsoby, kterými jsou např. použití diamagnetických těles, použití elektromagnetů se zpětnovazebním regulačním obvodem, rotací levitujícího tělesa (vznik magnetického gyroskopického momentu), použitím oscilujícího elektromagnetického pole nebo také využitím ferrofluidní tekutiny.

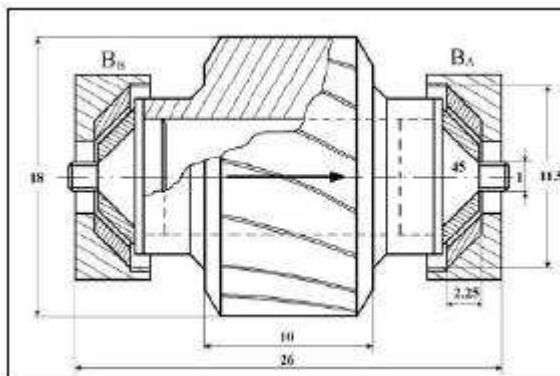
Pro zajištění levitace pohybujících částí se využívá jak přitažlivé tak i odpuzivé síly, případně jejich kombinace. Na obr. 15 jsou znázorněny některé typy uložení.



Obr. 15 - Různá uspořádání PMB

Radiální ložiska bývají nestabilní v axiálním směru a obdobně axiální ložiska bývají nestabilní v radiálním směru. Tento problém lze vyřešit, jak již bylo zmíněno, použitím

dodatečných ložisek valivých či kluzných, které zajistí stabilitu v požadovaném směru. Nabízí se však i řešení použitím výhradně magnetických ložisek s permanentními magnety, které znázorňuje obr. 16. Jelikož se jedná o kónické magnety, je zde nestabilita velmi malá a oproti stabilním silám zanedbatelná.



Obr. 16 - Průtokoměr s kónickými permanentními magnety

Materiálů využívaných pro permanentní magnety je celá řada. Významný pokrok nastal u materiálů na bázi tzv. vzácných zemin. Tab. 1 zobrazuje objemové rozměry materiálů pro vytvoření stejného magnetického pole ve vzdálenosti 10 mm od povrchu.

materiál	délka [p.j.]	průměr [p.j.]	objem [p.j.]
AlNiCo	17,33	1,9	61
ferit	5,33	3,9	79,4
SmCo, SmCoB	1,33	1,43	2,69
NdFeB	1	1	1

Tab. 1 – Materiály permanentních magnetů

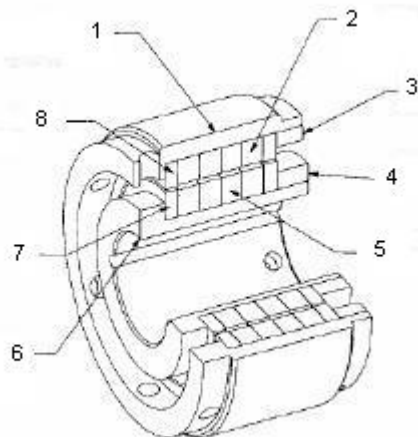
Mezi moderní permanentní magnety na bázi vzácných zemin patří tzv. neodymové magnety NdFeB a samarium – kobaltové magnety SmCo. Dle tab. 1 je vidět, že tyto dva materiály vykazují vysoké magnetické pole i při malém vlastním objemu, což vede k úspoře místa a tedy menších rozměrů ložisek.

Pokud shrneme veškeré zjištěné informace, tak hlavní výhodou těchto magnetických ložisek je nepotřeba napájení elektrickým proudem. S tím je spojena řada dalších důležitých výhod. V první řadě bezpečnost, kdy nehrozí zásah elektrickým proudem. Během provozu také nedochází k ohřívání částí ložiska, jednak protože zde nedochází ke tření, ale také především pro nepřítomnost zmíněného elektrického proudu, který má tendenci měnit část své elektrické energie procházející cívkou na energii tepelnou. Z toho dále vyplývá elektrická nezávislost těchto ložisek na vnějších podmínkách (např. při výpadku proudu). Mezi další výhody lze jistě uvést jednoduchou konstrukci a poměrně malé rozměry i při nemalých zatíženích a z toho plynoucí i nižší váha ložiska.

Nevýhody PMB s permanentními magnety jsou nemožnost přizpůsobování se změnám zatížení a obtížnější zajišťování stability pohybující se části ložiska. Další nevýhoda, která již byla zmíněna, je nutnost zajištění alespoň jedné osy volnosti jiným druhem uložení než permanentním magnetickým ložiskem (pokud se nejedná o uložení v kónicky tvarovaných magnetech).

Typická konstrukce PMB s permanentními magnety je zobrazena na obr. 17. Skládá se z nerotujícího pouzdra – 1, které tvoří obal ložiska a díky němuž je ložisko zalísáno do rámu. Podobnou funkci má pouzdro – 6, které je však rotující částí ložiska a pomocí něho se upíná ložisko na čep hřídele. Permanentní magnety jsou uloženy jednak ve statorové části – 2 a jednak v rotorové části – 5. Před naskládáním magnetů do příslušných drážek pouzder, je

třeba opatřit sestavu magnetů z každé boční strany nevodivými pouzdry – 7 a 8. Celý komplet magnetů s nevodivými pouzdry je pak axiálně zajištěn prstencovými kroužky – 3 a 4, které jsou nalisovány do pouzder statoru a rotoru.



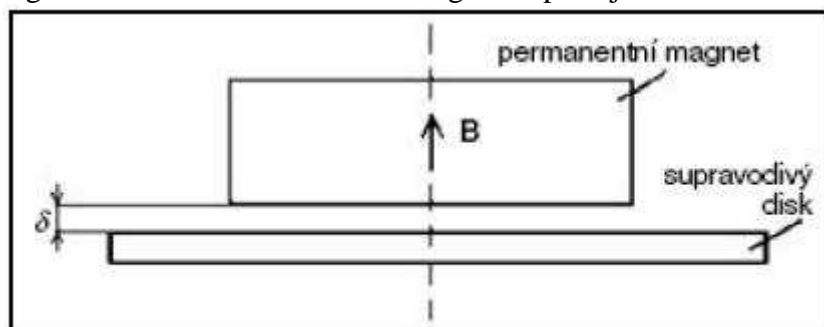
Obr. 17 - PMB s permanentními magnety

Aplikace těchto ložisek je omezena z důvodu menší únosnosti, a proto se používají především k uložení zařízení, jako jsou setrvačníky s menším výkonem, turbomolekulární čerpadla, rentgenové lampy s rotující anodou, paprskové přerušovače, odstředivky, ad. Specifickým zařízením využívají tato ložiska je tzv. ventrikulární pomocné zařízení. Jedná se vlastně o odstředivé čerpadlo nahrazující chod srdce, kde právě rotor tohoto čerpadla je uložen v magnetickém ložisku. [8, 1, 18]

5.1.2. Ložiska s vysokoteplotními supravodiči – HTS

Ložiska s vysokoteplotními supravodiči se používají v kombinaci s permanentními magnety. Vysokoteplotní supravodiče mají tu vlastnost, že ze svého objemu vytlačují magnetické pole. Pokud se tedy tento supravodič vloží do prostředí s magnetickým polem (permanentní magnet), vzniká odpuzivá síla. Některé supravodiče však dovolují pronikání magnetického pole do svého objemu, což má za následek stabilizování levitujícího tělesa v určité vzdálenosti od magnetu.

Na obr. 18 je znázorněn tok magnetického pole, který odpuzuje magnet od supravodiče. Pro větší únosnost ložiska při zachování stejných rozměrů magnetu a supravodiče je lépe permanentní magnet rozdělit na více menších magnetů oproti jednomu masivnímu celku.



Obr. 18 - Magnet levitující nad supravodičem

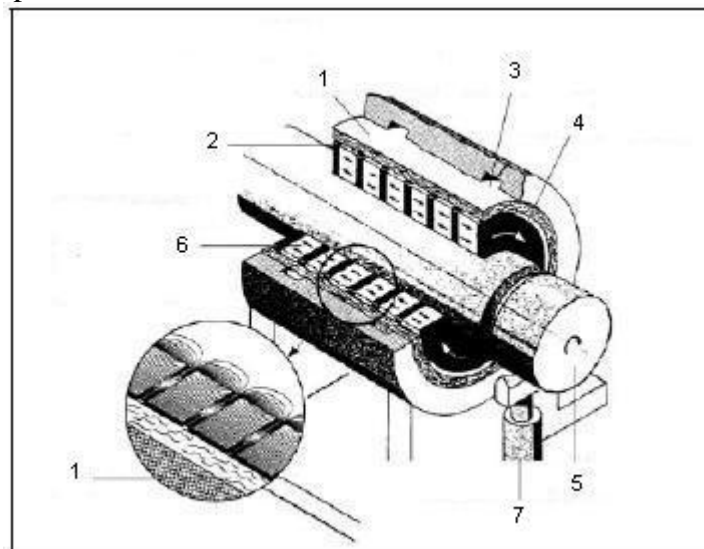
U vysokoteplotních supravodičů se jejich supravodivost projevuje až při nízkých teplotách. U dříve objevených materiálů používaných na supravodiče (NbTi, Nb₃Sn) bylo třeba je ochladit na teploty jen několik Kelvinů nad absolutní teplotní nulou. U nově vyvinutých materiálů (YBaCuO, HgBaCaCuO) postačuje ochlazení na teploty kolem -150°C. Pro výdrž supravodivosti je však potřeba tyto materiály neustále chladit. Pro vysokoteplotní vodiče není potřeba k chlazení používat drahé tekuté helium, ale pouze tekutý dusík.

Materiály používané jako supravodiče jsou synteticky vyrobené keramické látky. Přesné prvky, ze kterých se skládají, vyplývají z označení jejich názvu: NbTi, Nb₃Sn, YBaCuO, HgBaCaCuO.

Několik hlavních výhod těchto ložisek bylo již uvedeno výše a jedná se především o snadnou stabilizaci levitujícího tělesa bez nutnosti složitých úprav konstrukce. Další prakticky využitelnou výhodou je možnost zvýšení únosnosti ložiska pouze vhodnou úpravou a složením permanentního magnetu. Jelikož se jedná o další typ pasivních ložisek, odpadá zde nutnost napájení elektrickým proudem. Výhody nepotřeby napájení elektrickým proudem byly také uvedeny výše.

Velmi zásadní nevýhodou je nutnost neustálého chlazení supravodičů, což zvedá cenu ložiska a také ztěžuje jeho konstrukci. Může také dojít k úniku chladicí látky, což může mít pro obsluhu stroje, která pracuje v blízkosti stroje s těmito ložisky, nebezpečné následky. Nízká teplota má i velký vliv na materiály, kdy s klesající teplotou dochází ke křehnutí a možnosti vzniku trhlin.

Konstrukce ložiska vyrobené firmou Siemens je zobrazena na obr. 19. Na čepu hřídele – 5 jsou upevněny permanentní magnety – 6, vyrobené z materiálu NdFeB. Jednotlivé magnetické prstence odděluje železná podložka – 2. Statorové pouzdro je vybaveno kanálky – 3 pro proudění tekutého dusíku, který ochlazuje vysokoteplotní supravodiče – 1. Mezi supravodičem a rotorovými permanentními magnety je malá vzduchová mezera – 4, která zajišťuje bezkontaktní chod. Pod čepem hřídele se nachází pomocné zvedací zařízení – 7. K tomuto celku je však nutno připojit nádrž nebo zdroj tekutého dusíku a zajistit proudění a neustálé chlazení supravodičů.



Obr. 19 - Radiální magnetické ložisko s HTS

Ložiska s HTS dokážou snést větší zatížení než PMB s permanentními magnety. Příkladem může být uložení hřídele synchronního motoru s výkonem 400 kW, kde byla naměřena dynamická únosnost 2700 N a statická únosnost až 3700 N. V japonských laboratořích byla testována axiální ložiska pro uložení setrvačnicku s energetickou kapacitou

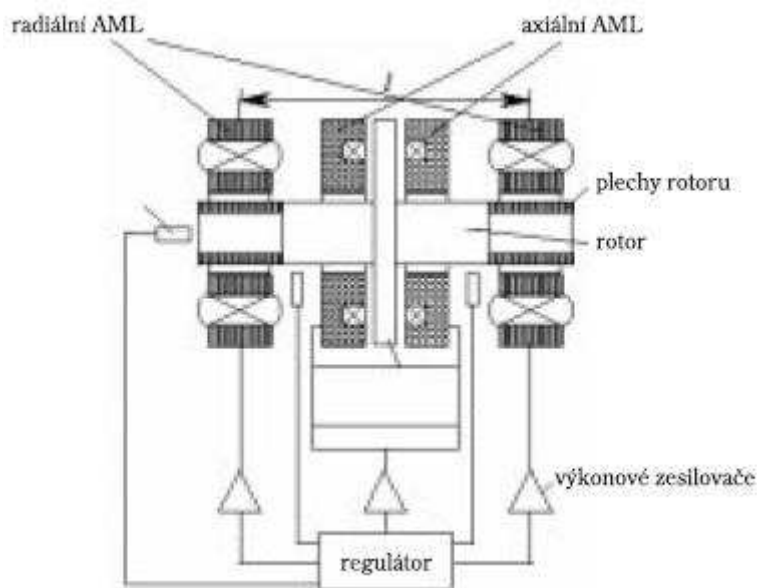
25kWh. Nosná plocha ložiska byla 0,22 m². Síla působící na rotor setrvačnicku byla 8200 N. Potvrdilo se, že únosnost ložiska s danými parametry pro toto zařízení vyhovuje.

Další použití je obdobné s použitím PMB s permanentními magnety. [1, 6, 24]

5.2. Aktivní magnetická ložiska – AMB

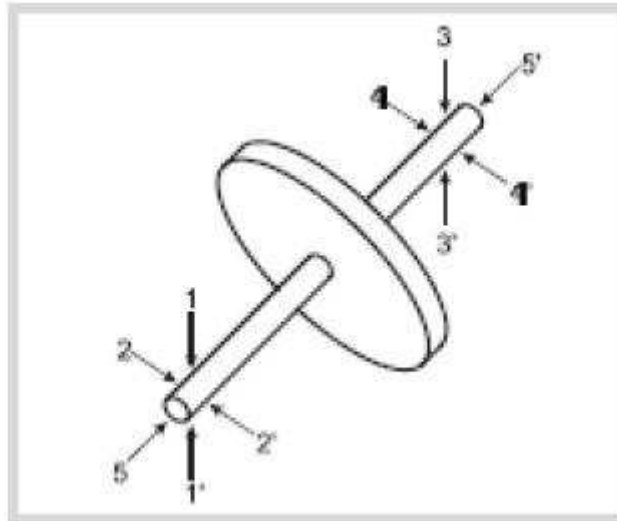
Zásadní rozdíl aktivních magnetických ložisek od předešlých uváděných typů je nutnost napájení těchto ložisek elektrickým proudem. Proud slouží nejen jako zdroj energie pro samotné ložisko, ale také napájí přídatné řídicí a regulační systémy, která se starají o správný chod ložiska. AMB využívají přitahující i odpudivé síly.

Typický způsob uspořádání je znázorněn na obr. 20. Toto uložení sestává ze dvou radiálních a dvou axiálních aktivních magnetických ložisek. Rotor je opatřen částí z feromagnetického materiálu, přesněji z plechů vyrobených z feromagnetického materiálu pro snížení hysterezních ztrát. Stator je vybaven cívkami, které jsou umístěny vždy proti sobě (po 180°). To má za následek, že při napájení jedné cívky proudem vznikne magnetické pole, které přitahuje rotor k sobě. Pokud je i protilehlá cívka napájena proudem, vzniká i zde magnetické pole, které k sobě také přitahuje rotor. Jestliže napájecí proud obou cívek je stejný a jsou stejné i jejich parametry, přitahující síly jsou stejně velké a rotor je ve stabilní poloze. Pokud je ovšem do jedné z cívek puštěný větší elektrický proud než do druhé, vznikají rozdílné přitažlivé síly a rotor je vychýlen (změna ložiskové mezery). Mezera se pohybuje v rozmezí 0,5 – 2 mm. Změnou velikosti proudu je možno, aby se ložisko přizpůsobovalo změnám zatížení rotoru a přitom nedošlo k vyosení, ale více o tom bude pojednáno dále v jiné kapitole.



Obr. 20 - Uložení v AMB s řízením polohy rotoru

Protože rotor není vůči statoru stabilní, je potřeba k ložisku připojit zpětnovazební regulační systém, který bude zajišťovat soustřednost rotoru vůči statoru. Tento systém musí spravovat hodnoty ve všech třech osách a starat se o řízení pěti stupňů volnosti rotoru, které jsou uvedeny na obr. 21. Každá dvojice elektromagnetů (1 – 1', 2 – 2', 3 – 3', 4 – 4', 5 – 5') má svojí vlastní zpětnovazební smyčku a čidlo polohy. Snímače v poloze 1-1', 3-3', 2-2' a 4-4' snímají odchylky polohy v radiálním směru. Snímače 5-5' snímají odchylky v axiálním směru. Signály ze snímačů jsou vyhodnocovány řídicím systémem a ten upravuje elektrický proud daných cívek, aby poloha rotoru byla vždy v požadované poloze.



Obr. 21 - Pět stupňů volnosti rotoru uloženém v AMB

Výhody aktivních magnetických ložisek jsou převážně v možnosti uzpůsobení změn při zatížení a z toho plynoucí možnost změny ložiskové mezery mezi statorovou a rotorovou částí. O toto se stará, jak již bylo zmíněno, řídicí systém, který vše hlídá a zajišťuje správnou polohu rotoru - hřídele. Dosahuje se vysoce přesných uložení. Je zde možno se vyhnout případným vibracím a kmitům hřídele, které by se mohly přenášet do rámu. Lze však naopak nuceně vyvolat kmitání rotorové části a zkoušet tak například dynamickou odolnost hřídelů či jiných součástí s rotorem spojených. Další neodmyslitelnou výhodou je možnost ovládání ložiska na dálku, čímž se zvětšuje možnost dalšího využití. Určení některých závad ložiska lze zjistit pomocí elektroniky a není tedy nutno rozebírat celé zařízení, v němž jsou tato ložiska zabudována.

Největší nevýhodou těchto ložisek je samozřejmě nutnost napájení elektrickým proudem a celkově větší prostorové nároky, jelikož je potřeba k ložisku připojit i řídicí systém. Samotné ložisko je z konstrukčního hlediska složitější a tedy i výrobní náklady jsou větší. Elektrický proud procházející cívkami ve statoru může celé ložisko zahřívat a toto teplo se pak může přenášet do okolního prostředí. Bez utěsnění ložiskové mezery tedy není možné použít toto uložení všude, kde přichází v úvahu (např. průtokoměry tekavých látek). Samotné dráty cívek také omezují použití ložiska a to především tam, kde hrozí velká teplota a izolace by se mohla propálit. Tím by mohlo dojít ke zkratu a nefunkčnosti ložiska. Odstranění izolace drátů cívek může způsobit i abrazivní materiál nebo materiál na bázi kyselin či zásad, který se do ložiskové mezery dostane.

Aktivní magnetická ložiska jsou ze všech druhů magnetických ložisek nejvíce využívána, což plyne z uvedených výhod, které poskytují. Využití nachází nejen u výkonných setrvačnickových systémů, ale i u turbokompresorů a turbín, kde je vyžadována velká únosnost uložení. Přesné uložení je velmi důležité u tzv. vysokorychlostního obrábění, kde tato ložiska dovolují velmi přesné obrábění a k tomu umožňují i velké obvodové rychlosti a tím zkrácení výrobních časů. Při obroušení brusného kotouče by tato ložiska také mohla najít využití a to takové, že by bylo možné změnou polohy osy vřetene vykompenzovat obroušenou část brusného kotouče a nebylo by tedy nutné mechanicky upravovat polohu vřetene nebo snad dokonce měnit brusný kotouč za nový. Proměnlivost vzduchové mezery mezi státorem a rotorem dovoluje použít tato ložiska k biologickým či farmaceutickým účelům (možnost zpracovávání živých buněk). Byť tato ložiska potřebují k provozu zdroj elektrického proudu a pořizovací náklady nejsou malé, jejich úspora energie, která by byla ztracena třením, je po dobu životnosti ložiska velká. Toto tvrzení přesně dokládá propočít, který byl proveden pro

kompresor zemního plynu, kde byla zjištěna úspora 90 000 Euro ročně pro turbosoustrojí s výkonem nad 1 MW.

[1, 6, 8, 24]

5.3. Porovnání aktivních a pasivních magnetických ložisek

Pro porovnání aktivních a pasivních ložisek je uveden seznam výhod a nevýhod aktivních magnetických ložisek vůči pasivním a obdobně seznam výhod a nevýhod pasivních magnetických ložisek vůči aktivním. [1]

Porovnání aktivních magnetických ložisek vůči pasivním:

Výhody:

- vysoká přesnost uložení
- minimální energetické ztráty
- možnost řízení mezery mezi statorovou a rotorovou částí
- omezení vibrací
- možnost diagnostiky ložiska bez nutnosti demontáže
- vysoká únosnost
- nastavitelná tuhost a tlumení

Nevýhody:

- nutnost napájení elektrickým proudem
- vysoká výrobní cena
- zahřívání
- menší spolehlivost
- větší prostorové nároky
- složitý řídicí systém

Porovnání pasivních magnetických ložisek vůči aktivním:

Výhody:

- jednoduchá konstrukce
- nízká cena
- spolehlivé
- malé nároky na prostor
- odolné vůči nízkým a vysokým teplotám
- není potřeba zdroj elektrické energie
- použití v nejrůznějších aplikacích (chemické prostředí, atd.)

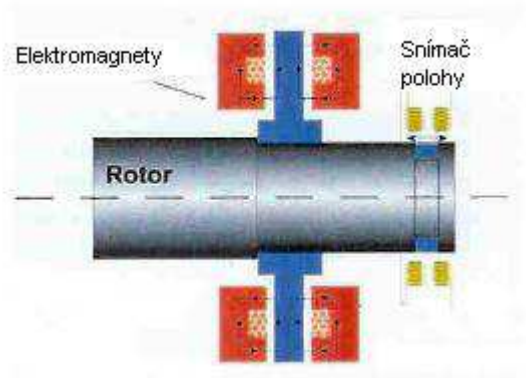
Nevýhody:

- nízká tuhost a menší tlumení
- malá únosnost
- nutnost chlazení (u HTS ložisek)

6. Detailní rozbor aktivních magnetických ložisek

6.1. Axiální magnetická ložiska

Axiální ložiska slouží k zachycení osových sil působících na rotor – hřídel. Zabraňují pouze posuvu hřídele, odebírají tedy pouze jeden stupeň volnosti. Na obr. 22 je rozkreslena základní struktura těchto ložisek.



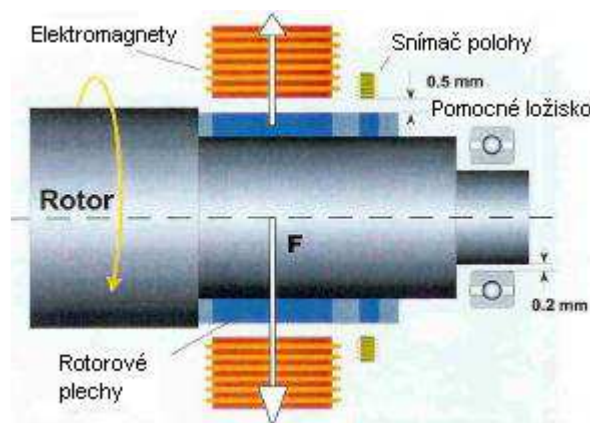
Obr. 22 - Axiální AMB

Na rotoru je zalisován kroužek s feromagnetického materiálu, který je ve formě homogenního celku. Ve statoru ložiska jsou umístěny prstencové elektromagnety, které mohou obsahovat několik vinutí. Elektromagnety jsou umístěny ve statoru po obou stranách kroužku rotoru. Dále je na rotoru umístěno snímací zařízení, které zaznamenává axiální posuv hřídele a vysílá signály do řídicího systému, který následně upraví velikost napájecího proudu v cívkách tak, aby hřídel zůstal ve správné poloze.

Pokud porovnáme tento typ axiálního ložiska s klasickými axiálními valivými ložisky, naskýtá se pár výhod, které poskytuje. Především je ložisko schopno zachytávat axiální síly v obou směrech, takže nejsou zapotřebí (jako u jednostranných kuličkových axiálních ložisek) dvě ložiska. To vede k úspoře místa a i úspoře rotujících hmot. [9, 6]

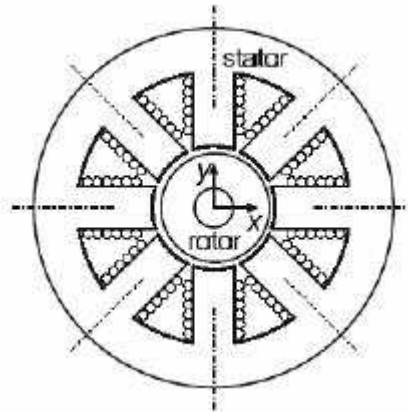
6.2. Radiální magnetická ložiska

Aktivní magnetická ložiska radiální zachycují síly, které se snaží vychýlit hřídel ze středové polohy. Odebírají čtyři stupně volnosti a to posuv ve dvou osách na sebe kolmých a dále rotaci také ve dvou osách na sebe kolmých. Obr. 23 zobrazuje zjednodušenou konstrukci těchto ložisek.



Obr. 23 - Radiální AMB

Konstrukce je obdobná konstrukci s axiálními magnetickými ložisky. Na rotoru je nalisován kroužek z feromagnetického materiálu. Ten může být ve formě jednoho kusu nebo složen z jednotlivých plechů. Ve statorové části se nachází několik elektromagnetů, které jsou po obvodu rozloženy tak, aby proti sobě byla vždy jedna dvojice (po 180°). Takových to dvojic může být ve statoru různý počet, a to 2, 3, 4, atd. Vše je závislé na únosnosti ložiska a jeho prostorových dispozicích. Existuje však případ, kdy se ve statoru nachází pouze tři elektromagnety, které jsou po obvodu rozestaveny po 120° . Jedná se o nejjednodušší typ konstrukce radiálního ložiska, které však nemá příliš velkou únosnost a jeho řízení je také obtížnější. Jako u ostatních typů aktivních magnetických ložisek i zde jsou umístěny snímače polohy, které zjišťují polohu rotoru.

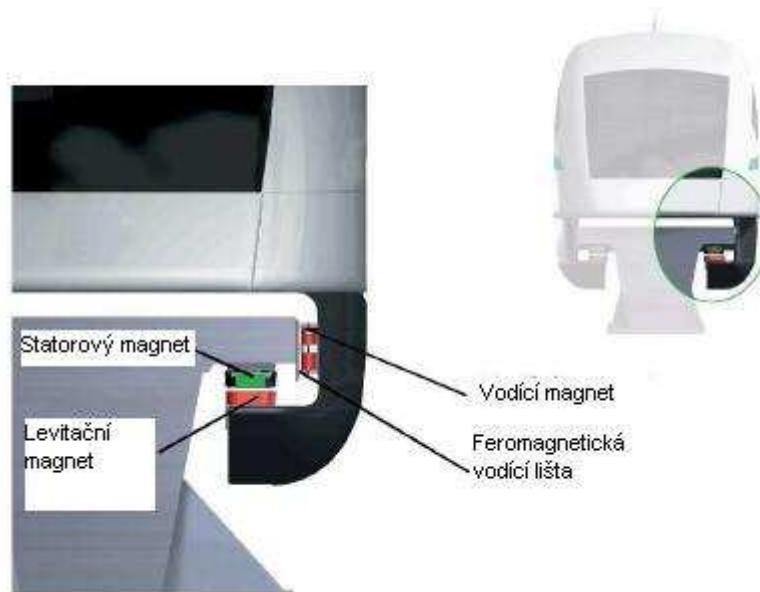


Obr. 24 - Schéma magnetického obvodu se 4 dvojicemi protilehlých cívek

Kromě samotných radiálních magnetických ložisek obsahuje konstrukce ještě tzv. podpurná radiální valivá ložiska, která svojí funkci splňují pouze v případě, že dojde k poruše magnetického ložiska nebo dojde k přerušení napájení elektrickým proudem. Pokud dojde k výpadku proudu, hřídel „spadne“ do těchto pomocných ložisek a nedojde k poničení rotorových nebo statorových částí. Na obrázku je uvedena velikost mezery mezi hřídelem a elektromagnety ve statoru (0,5 mm) a velikost mezery mezi hřídelem a pomocným ložiskem (0,2 mm). To zajišťuje stálou vzduchovou mezeru i při poruše elektromagnetické části. Jelikož se magnetická ložiska používají především u vysokootáčkových strojů, pomocná ložiska (v případě jejich použití) nedokážou vydržet takovéto dlouhodobé přetěžování (desítky tisíc ot/min) a je tedy nutné, aby při výpadku proudu či ztráty funkčnosti magnetického ložiska, došlo k zastavení stroje v co nejkratší době. [24, 6, 9]

6.3. Lineární magnetická ložiska

Tato ložiska se používají především v dopravě, případně u loží přesných měřících zařízení. Využívá se zde jak elektromagnetické levitace – EMS, tak i elektrodynamické levitace – EDS. Konkrétní příklad konstrukce těchto ložisek zobrazuje obr. 25. Tohoto principu uložení se využívá především v dopravě.



Obr. 25 - Lineární vedení pomocí AMB

Konstrukce je složena ze statorových magnetů a levitačních magnetů. Toto uložení je založeno na působení přitažlivých sil. Pro řízení bočních sil je zde použita kombinace lišty z feromagnetického materiálu a elektromagnetu. Pro boční vedení může být využita jak levitace typu EMS, tak EDS.

Pokud je lineární vedení dlouhé, pro úsporu energie se napájí elektrickým proudem statorový elektromagnet pouze v místě, kde se zrovna nachází jeho pohybující se protikus. Navíc tato lineární ložiska nemusí sloužit pouze k vedení, ale i k pohonu či brzdění pohybujícího se tělesa.

Lineární magnetická ložiska stejně jako ostatní typy aktivních magnetických ložisek velmi dobře tlumí vibrace a kmity, proto jsou využívány, jak bylo zmíněno, i u uložení přesných měřicích přístrojů. Zabrání se například tomu, aby při neopatrné manipulaci došlo k najetí do měřeného výrobku a nastalo pokřivení či poškození konstrukce měřidla a následně bylo nutné měřidlo překalibrovat. [6, 25]

6.4. Magnetická mikroložiska

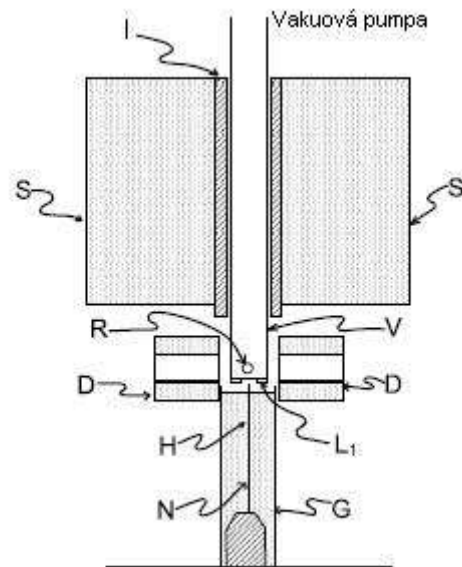
Mikroložiska jsou složena z miniaturních elektromagnetů, kde se využívá dvou hlavních typů cívek.

První typ je klasický, vodič je omotaný kolem feromagnetického jádra. Mikroložiska s těmito cívkami se používají u uložení pohonu hodiněk. Je potřeba zajistit, aby cívky měly až několik tisíc závitů, a proto se používají měděné drátky o průměru pouhých 20 mikronů, které zajistí nutný počet závitů a to při malých prostorových nárocích.

Druhý typ používaných cívek je v principu stejný jako první typ, avšak zde je vodič namotáván do tvaru rovinné spirály. Je to tedy velmi tenká cívka, která má šířku rovnou velikosti průměru vodiče. Pokud však požadujeme stejné magnetické síly jako u prvního typu, je třeba zajistit i stejný počet vinutí. Z toho vyplývá, že průměr cívky se mnohonásobně zvětší. Využití nacházejí tyto cívky u uložení čtecích nebo zapisovacích hlav pevných disků.

Magnetická mikroložiska mají oproti jiným aktivním magnetickým ložiskům jednu velkou výhodu a to je ta, že slouží k uložení velmi malých a tedy velmi lehkých rotorů či hřídelů. Dovolují proto opravdu velmi vysoké otáčky, kterých není možno dosáhnout u jiných typů uložení. Důvodem je právě fakt, že váha rotujících částí je zde nepatrná a tedy i

odstředivé účinky jsou velmi malé. Nejvyšší zjištěné otáčky dosáhly hodnoty $23 \text{ milionů min}^{-1}$ a bylo jich dosaženo u vakuové pumpy zobrazené na obr. 26.

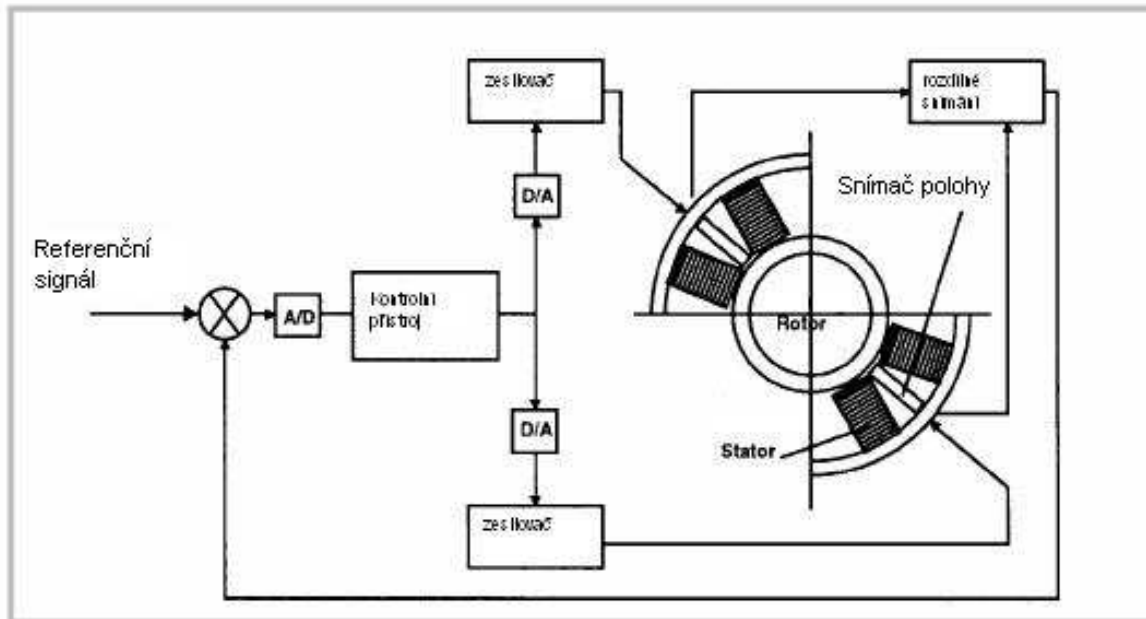


Obr. 26 - Vakuová pumpa s mikroložisky

Pumpa se skládá z rotoru – R, který je uložen v jádře – I. Kolem jádra je elektromagnet ložiska – S. Cívky – D slouží k roztočení rotoru na vysoké otáčky a drát – H pracuje jako tlumič horizontálních kmitů. Průměr rotoru se pohybuje v rozmezí 0,4 – 1 mm. [26]

6.5. Řídicí systémy ložisek

Řídicí systém ložiska je zároveň kontrolním systémem a jeho činností je regulovat velikost elektrického proudu k napájení elektromagnetů ložiska. Tím jsou přizpůsobovány velikosti magnetických sil působících v několika osách na rotor. Musí zajistit správnou polohu rotoru ve správnou chvíli. Ke zjištění přesné polohy slouží snímače, které sledují momentální polohu rotoru a vysílají signál do řídicí jednotky. Jednotka porovná skutečnou polohu rotoru s požadovanou polohou a dle potřeby pošle signál do zesilovače, který sníží či zvýší velikost proudu.



Obr. 27 - Řídicí systém magnetického ložiska

Na obr. 27 je vidět, že snímače polohy jsou umístěné mezi cívkami statoru. Neustále zaznamenávají polohu rotoru a vysílají signál do ovládací jednotky ložiska, kde se vyhodnocuje jejich velikost a tedy velikost vzduchové mezery. Z ovládací jednotky je vyslán signál do zesilovačů, které pak dále posílají proud do elektromagnetů. Každý elektromagnet statoru má svůj vlastní zesilovač. Požadavkem je, aby se rotor vždy nacházel ve správné poloze. [6]

Řídicí systém se skládá ze dvou hlavních částí:

- ovládací jednotka ložiska
- snímače

6.5.1. Ovládací jednotka ložiska

Ovládací jednotka ložiska provádí hlavní změny řízení polohy rotoru. Obsahuje řídicí algoritmus, který upravuje hodnoty elektrického proudu pro statorové elektromagnety a tím upravuje působící magnetické síly.

Ovládací jednotka ložiska se skládá z několika částí:

- elektronická část s procesorem digitálního signálu
- napájecí zdroj
- zesilovač

Elektronická část s procesorem digitálního signálu je vlastně „mozek“ celého řídicího systému ložiska. Obsahuje výše zmíněný řídicí algoritmus, který se stará o správnou polohu rotoru a tedy správný chod ložiska. Stará se o veškeré potřebné změny a není proto potřeba dodatečně na ložisko instalovat další monitorovací zařízení. Dokáže provést až 10 000 změn za sekundu, což je pro otáčky rotoru kolem statisíce ot/min dostačující. Program dokáže nejen ložisko řídit, ale i zaznamenávat a ukládat data získaná z provozu. Dokáže také sloužit jako diagnostické zařízení, kde zjistí případnou chybu či závadu na ložisku a sám na ní automaticky upozorní, případně provede potřebné změny. Obsluha ložiska také může sledovat velikosti parametrů, které momentálně ložisko produkuje, jako je velikost vibrací, počet otáček, ad.

Napájecí zdroj převádí střídavý proud na stejnosměrný, který je potřebný pro ložiskové zesilovače. Pokud je zesilovačů více nebo jsou-li použity velké zesilovače, je třeba výkonnější napájecí zdroj.

Bylo již zmíněno, že k zesílení proudu vyslaného z ovládací jednotky ložiska slouží zesilovače. Jejich počet se odvíjí od počtu elektromagnetů ložiska, kde každý elektromagnet má svůj zesilovač. Obecně platí, že čím větší ložisko, tím jsou potřebnější i větší zesilovače. [6, 2]

6.5.2. Snímače

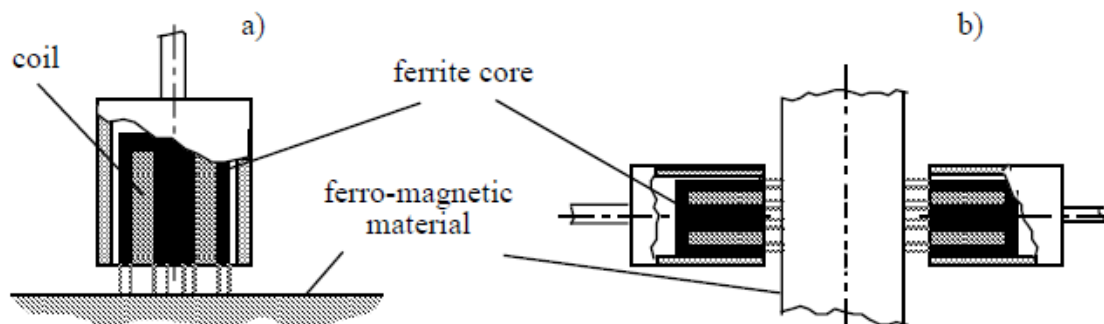
Snímače polohy rotoru jsou v podstatě „oči“ řídicího systému. Jsou proto na ně kladeny vysoké nároky. Jelikož ve statoru magnetického ložiska není mnoho volného prostoru, musí být velmi malých rozměrů, přesto však výkonné a spolehlivé. Vysoké otáčky rotoru kladou na snímače požadavek vysoké rychlosti snímání, a protože elektrický proud, procházející cívkami elektromagnetů zahřívá stator, dalším požadavkem pro snímače je i odolnost vůči teplotám.

Nejvíce využívané jsou snímače elektrické. Z hlediska jejich spolehlivosti a prostorové nenáročnosti nejvíce vyhovují. Elektrické snímače lze dále rozdělit podle principu, na němž jsou založeny, a to odporové, indukční, kapacitní, fotoelektrické, emisní, ionizační, kontaktní.

Obvykle se snímače umísťují co nejbližše magnetickým ložiskům, v případě radiálních ložisek je možno snímače zabudovat do mezer mezi cívkami. Citlivost a přesnost snímání ovlivňuje přesnost a kvalita povrchu rotoru.

Indukční snímače

Indukční snímače sestávají z feritových jader a cívek. Změnou polohy feromagnetického materiálu (rotoru) se změní mezera, což vede ke změně velikosti indukovaného proudu. Tento indukovaný proud je převeden do řídicí jednotky, kde je vyhodnocen. Je snaha zajistit lineární průběh indukovaného proudu na velikosti mezery, což umožňuje uspořádání dvou indukčních snímačů umístěných proti sobě (obr. 28 b).



Obr. 28 - Indukční snímače, a) jednoduchý indukční snímač, b) rozdílně měřící indukční snímače

Snímače pracují se vstupní signálovou frekvencí od 5 kHz do 100 kHz. Výstupní frekvence se rovná pětina až desetině vstupní hodnoty. Za normálních okolností nejsou naměřené hodnoty ovlivňovány případným okolním magnetickým polem, které by se vyskytovalo v blízkosti těchto snímačů. Mohou však být rušena systémy pracujícími se stejnými frekvencemi, které využívají tyto snímače. [6, 7, 24]

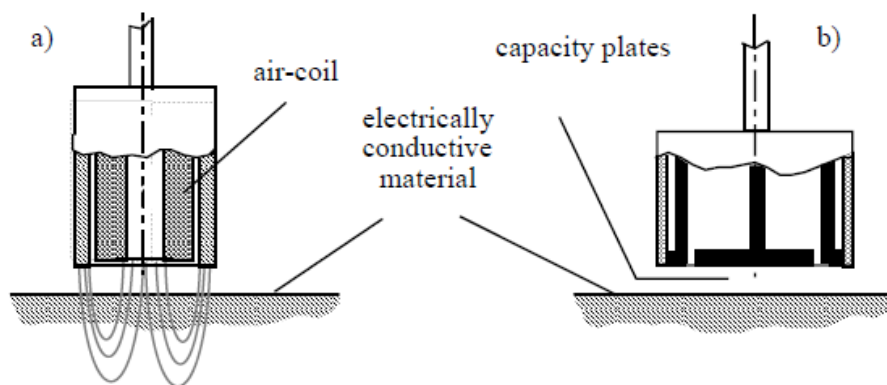
Snímač na principu vířivých proudů

Dalším typem je snímač založený na principu měření vířivých proudů. Skládá se z cívky, která vytváří magnetické pole. Toto pole přestupuje vzduchovou mezerou do magneticky vodivého materiálu a přitom vznikají vířivé proudy. Tyto proudy se vlivem různé vzdálenosti a různé velikosti amplitudy frekvence mění.

Zde se operuje s frekvencemi v rozsahu 0,5 – 2 MHz a šířka pracovního pásma se pohybuje v rozmezí frekvence 20 kHz. Nehomogenní materiál může způsobit tlumení a tedy nepřesné měření. I mezi samotnými snímači může docházet k vzájemnému rušení, a proto je nutné dodržet minimální vzdálenost, jež je uvedena v montážním návodu u každého snímače tohoto typu. [6, 7, 24]

Kapacitní snímače

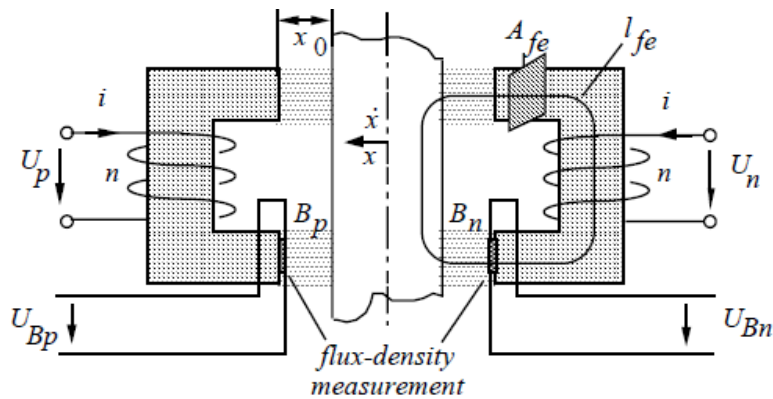
Tyto snímače pracují na bázi kondenzátorů, kde využívají především závislosti kapacity na vzdálenosti desek. Desky v případě magnetických ložisek tvoří elektroda snímače a rotor ložiska. Dokážou zaznamenat velmi malou změnu polohy rotoru (např. 0,02 μm v celkovém měřicím rozsahu 0,5 mm). Výstupní frekvence se pohybuje v rozmezí 5 kHz až 100 kHz. Snímače jsou velmi citlivé na znečištění a jejich spolehlivost a přesnost může být ovlivněna statickou elektřinou. [6, 7, 24]



Obr. 29 - a) snímač na principu vířivých proudů, b) kapacitní snímač

Magnetické snímače

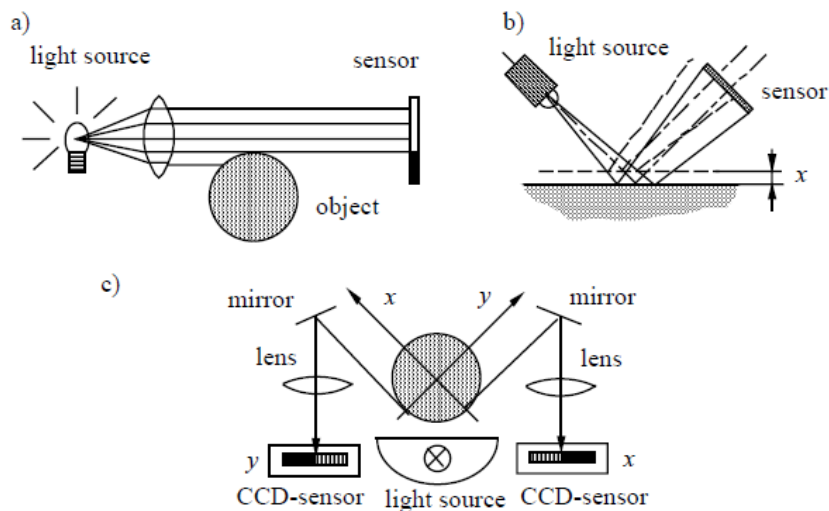
Skládají se ze dvou cívek nastavených proti sobě. Jedna z nich se napájí elektrickým proudem konstantní velikosti a vzniklé magnetické pole přechází do rotoru (je potřeba, aby byl rotor vyroben z magneticky vodivého materiálu). V druhé cívce se skrze rotor indukuje elektrický proud. Pro zjištění velikosti vzduchové mezery se porovnává elektrický proud první a druhé cívky. Tyto snímače se vykazují požadovanou lineární závislostí elektrického proudu na velikosti vzduchové mezery. Není je však možno umístit v těsné blízkosti magnetickým ložiskům, jelikož magnetické pole z ložisek by mohlo ovlivnit přesnost snímačů. [6, 7, 24]



Obr. 30 - Magnetický snímač

Optické snímače

Optické snímače mají velmi jednoduchou konstrukci, přesto dokážou měřit i velmi malé odchylky polohy. Ze zdroje je vyslán paprsek, který dopadá na rotor. Část paprsku se rotorem zastíní a zbylá část přejde do senzoru. Rozdíl velikosti světelného paprsku je převeden na elektrický signál a slouží jako měřítko pozice objektu. Tento způsob je zobrazen na obr. 31 a). Dalším možným typem měření pomocí světelného paprsku je na obr. 31 b). Tento druh senzoru využívá principu zrcadla. Část dopadajícího světelného paprsku se odrazí do prostoru a zbytek se zachytí v senzoru. Třetí typ optického snímače je zobrazen na obr. 31 c). Světelný paprsek je vyslán směrem na rotor, kde dochází k jeho rozdělení na dva paprsky a odklonění ve směru os X a Y. Každý z těchto paprsků je odražen zpět přes zrcadlo a zesílen přes čočku a převeden do CCD snímače (CCD – Charge-coupled device). CCD snímače převedou přijímané fotony světla na elektrony a výsledkem je elektrické napětí.



Obr. 31 - a) optický snímač měřící intenzitu světla

b) optický snímač měřící podle triangulace

c) optický snímač s využitím CCD - řady

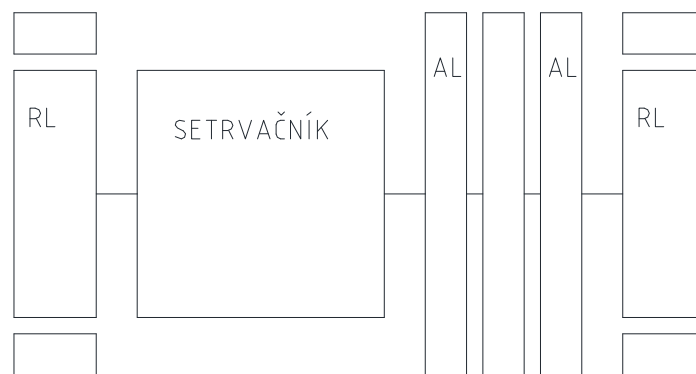
Jako přijímací senzory se používají fotodiody, fototranzistory, fotorezistory či fotoelektrické buňky. Zdroj světla musí být upraven na vlnovou délku přijímacích sensorů a nesmí být ovlivněn přírodním slunečním světlem. Jako zdroj světelného paprsku se proto používají světelné diody, např. LED (Light – emitting diode).

Přesto, že jsou tyto snímače velmi citlivé, nejsou vhodné pro mnoho oblastí využití, protože jsou náchylné na znečištění a drsnosti povrchu rotoru. Také může docházet k pohlcování světelného paprsku samotným povrchem rotoru, proto je důležité zvolit vhodnou povrchovou úpravu. [6, 7, 24]

7. Navrhované konstrukce různých typů uložení

Jako praktické konstrukční provedení bylo zvoleno uložení hliníkového setrvačnicku v radiálních a axiálních magnetických ložiskách. Na sestavě jsme pracovali s kolegou, který byl zaměřen na setrvačnickové systémy. Moje část obsahuje konstrukci radiálních magnetických ložisek, sensorovou soustavu a hlavní rám. Základním neměnným požadavkem bylo, že setrvačnick bude uložen v aktivních radiálních magnetických ložiskách. Váha setrvačnicku se bude pohybovat kolem hodnoty 2,5 kg a jeho maximální možné provozní otáčky mohou dosahovat hodnoty $10\,000\text{ min}^{-1}$. Dále byly stanoveny maximální napájecí proud ložisek $I_{\max} = 6\text{ A}$ a maximální napětí $U_{\max} = 50\text{ V}$.

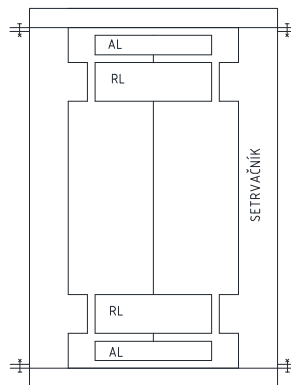
Na obr. 32 je zobrazen první konstrukční návrh uspořádání ložisek. Radiální magnetická ložiska jsou orientována na koncích nosné osy, na které je upevněn setrvačnick. Cívky radiálních ložisek se nacházejí ve vnějších prstencích. Největší zatížení zde zachytávají radiální ložiska a to ve vertikálním směru. Mezi setrvačnickem a pravým radiálním magnetickým ložiskem je zakomponováno aktivní axiální ložisko, které zachycuje osové síly v obou směrech.



Obr. 32 - Horizontální uložení setrvačnicku

RL – radiální magnetické ložisko, AL – axiální magnetické ložisko

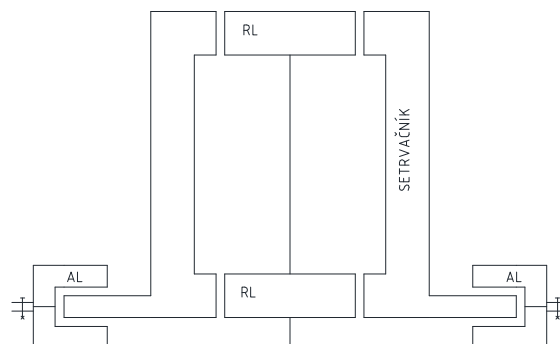
Další možné uspořádání je zobrazeno na obr. 33. U této konstrukce jsou umístěny radiální i axiální ložiska ve vnitřním prostoru. Setrvačnick tvoří „obal“ celé sestavy a je rozdělen na 3 části z důvodu montáže. Největší zatížení zde zachytávají axiální magnetická ložiska. Nevýhodou této konstrukce je obtížné seřízení dostatečné vůle mezi setrvačnickem a axiálními magnetickými ložisky, pouze za podmínky rozmontování setrvačnicku a opětovném složení.



Obr. 33 – Vertikální uspořádání – typ 1

RL – radiální magnetické ložisko, AL – axiální magnetické ložisko

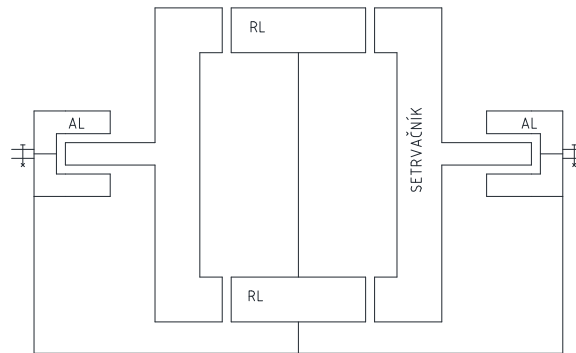
Nevýhoda seřízení vůle mezi axiálním ložiskem a setrvačником je odstraněna v konstrukci, která je na obr. 34, kde jsou axiální magnetická ložiska umístěna vně sestavy. Šroubový spoj umožňuje poměrně snadno nastavit správnou axiální mezeru pouhým použitím vymezovacích podložek. Výhodou je použití setrvačnicku jako jednoho celku, který se nasadí na radiální magnetická ložiska.



Obr. 34 – Vertikální uspořádání – typ 2

RL – radiální magnetické ložisko, AL – axiální magnetické ložisko

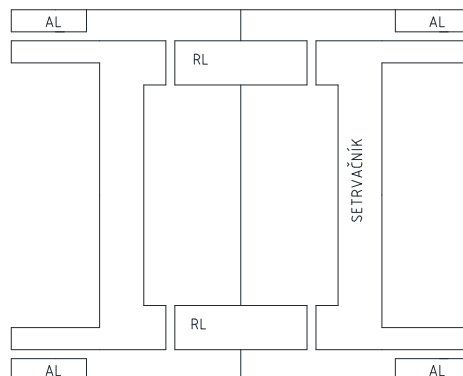
Obr. 35 je obdobou předešlé konstrukce, pouze jsou zde axiální magnetická ložiska posunuta do středu výšky setrvačnicku. Výhodou této konstrukce je snadnější dovažování, kdy průměry na obou koncích setrvačnicku jsou stejné velikosti.



Obr. 35 – Vertikální uspořádání – typ 3

RL – radiální magnetické ložisko, AL – axiální magnetické ložisko

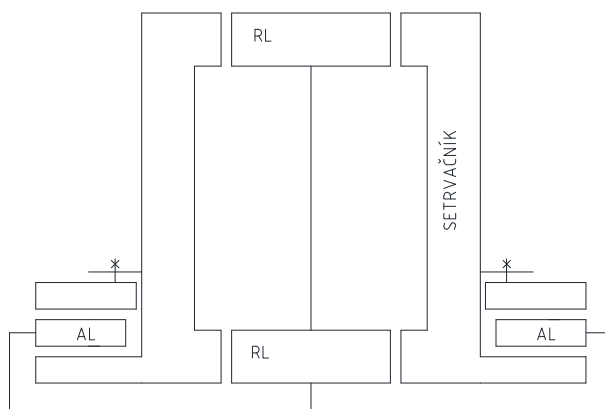
Další typ možného uspořádání uložení ukazuje obr. 36. Radiální magnetická ložiska jsou opět umístěna ve vnitřním prostoru a setrvačnick je možné vyrobit jako jeden celek. Axiální magnetická ložiska se nacházejí vně sestavy.



Obr. 36 – Vertikální uspořádání – typ 4

RL – radiální magnetické ložisko, AL – axiální magnetické ložisko

Poslední navrhovaná konstrukce je na obr. 37, která byla zároveň vybrána jako finální verze. Radiální magnetická ložiska jsou ve vnitřním prostoru na statorové ose, která je pevně spojena s rámem. Setrvačnick je složen z několika částí, avšak je zde navrhována varianta použití pouze jednoho prstence s axiálními magnetickými ložisky. Montáž se provádí stejně jako u některých předešlých typů a to tak, že nejprve se setrvačnick nasadí na radiální magnetická ložiska, potom se přidá prstenec s axiálními magnetickými ložisky a nakonec se na setrvačnick upevní prstenec. Ten uzavírá magnetický obvod axiálních magnetických ložisek.



Obr. 37 – Vertikální uspořádání – typ 5

RL – radiální magnetické ložisko, AL – axiální magnetické ložisko

8. Výpočet aktivních radiálních magnetických ložisek

Dle vybraného typu vertikálního uspořádání bylo stanoveno, že radiální magnetická ložiska budou složena z 8 pólů a vnější průměr statorových plechů bude 80 mm (včetně vzduchové mezery). Maximální dynamické radiální zatížení ve směrech os x a y bude 100 N.

Rozměry a základní parametry statorových cívek

Základní parametr cívky je potřebný napájecí proud, který se vypočte dle vztahu:

$$I = C \cdot I' = C \cdot \left| \frac{K_i^{-1} \cdot f}{I_b} \right|$$

Opravná konstanta C sestává ze dvou složek a to silové a proudové:

$$C = \left| \begin{matrix} C_f \\ C_b \end{matrix} \right|$$

Výsledný vztah pro napájecí proud tedy vychází:

$$I = C_b \cdot I_b + C_f \cdot \frac{f}{K_i}$$

Dalším důležitým parametrem cívek je nejen velikost elektrického proudu, ale také počet závitů cívky, který zjistíme ze součinnu:

$$N \cdot I = N \cdot C_b \cdot I_b + N \cdot C_f \cdot \frac{f}{K_i}$$

Pro zmíněný součin elektrického proudu a počtu závitů cívky se používá zkrácené označení:

$$I_B \equiv N \cdot C_b \cdot I_b \quad [I_x, I_y, \dots] \equiv N \cdot \frac{f}{K_i}$$

U radiálních magnetických ložisek je rozděleno silové působení pro obě osy, ve kterých síly působí, tedy pro osu x a pro osu y.

Síla ve směru osy x se určí dle vztahu:

$$f_x = f_{x,0} + f_{x,s} \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

kde $f_{x,0}$ je statická složka a $f_{x,s}$ je dynamická složka síly ve směru osy x.

Obdobný vztah platí pro sílu ve směru osy y:

$$f_y = f_{y,0} + f_{y,s} \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

kde $f_{y,0}$ je opět statická složka a $f_{y,s}$ je dynamická složka síly ve směru osy y.

Pro j-tou cívku platí:

$$N_j \cdot I_j = I_{B,j} + I_{X,j} \cdot (f_{x,0} + f_{x,s} \cdot \cos(\omega \cdot t)) + I_{Y,j} \cdot (f_{y,0} + f_{y,s} \cdot \sin(\omega \cdot t))$$

a střední hodnota se vypočte:

$$|N_j \cdot I_j| = \sqrt{(I_{B,j} + I_{X,j} \cdot f_{x,0} + I_{Y,j} \cdot f_{y,0})^2 + 0,5 \cdot (I_{X,j} \cdot f_{x,s})^2 + 0,5 \cdot (I_{Y,j} \cdot f_{y,s})^2}$$

Musí však platit:

$$|N_j \cdot I_j| \leq f_c \cdot J_{\max} \cdot A_c$$

kde J_{\max} je maximální možný proud protékající plochou vodiče. Pro měděné vodiče odpovídá hodnotě 600 A/cm². f_c je faktor využití průřezu cívky samotnými vodiči a je stanoven na velikost 0,5. A_c značí plochu cívky a platí:

$$A_{c,j} \geq \frac{\sqrt{(I_{B,j} + I_{X,j} \cdot f_{x,0} + I_{Y,j} \cdot f_{y,0})^2 + 0,5 \cdot (I_{X,j} \cdot f_{x,s})^2 + 0,5 \cdot (I_{Y,j} \cdot f_{y,s})^2}}{f_c \cdot J_{\max}}$$

Další vzorce a hodnoty už se zabývají pouze naším daným zadáním pro 8 pólová ložiska.

Statická složka síly ve směru os x a y:

$$f_{x,0} = f_{y,0} = 0N$$

Dynamická složka síly ve směru os x a y:

$$f_{x,s} = f_{y,s} = 100N$$

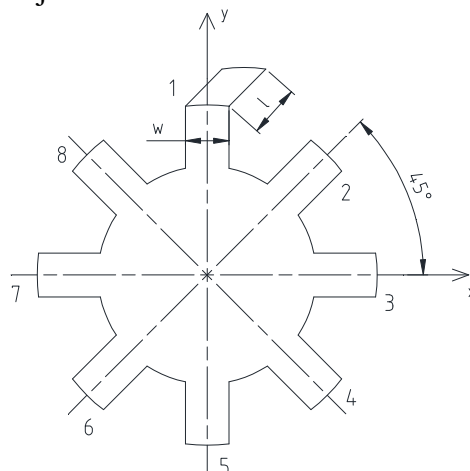
Součinitel pro nezávislé řízení cívek pro 8 pólový symetrický stator se určí:

$$K_i = \frac{4 \cdot \mu_0 \cdot N^2 \cdot A_g \cdot I_b}{g_0^2}$$

kde μ_0 značí permeabilitu, jejíž hodnota je $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$ a g_0 označuje velikost radiální vzduchové mezery. V našem výpočtu byla zvolena velikost vzduchové mezery $g_0 = 0,5 \text{ mm}$. A_g je plocha vzduchové mezery a její výpočet je:

$$A_g = w \cdot l$$

w je šířka a l je délka pólu, jak je zobrazeno na obr. 38.



Obr. 38 – Rozložení pólů

Opravná konstanta C pro 8 pólový stator:

$$C = [c_{x,j} \quad c_{y,j} \quad c_b] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -0,707 & -0,707 & -1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0,707 & -0,707 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0,707 & 0,707 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \\ -0,707 & 0,707 & -1 \end{bmatrix}$$

Minimální vyvozená síla cívkami pro 8 pólový stator se vypočte ze vztahu:

$$\min f = \frac{0,707 \cdot B_{SAT}^2 \cdot A_g}{\mu_0}$$

kde B_{SAT} je saturační magnetická indukce, která je závislá na použitém materiálu statorových plechů. Pro nízkouhlíkatou ocel se hodnota B_{SAT} pohybuje v rozmezí 1,2 – 1,6 T. Z důvodu menších zatěžujících sil byla vybrána hodnota $B_{SAT} = 1,2 \text{ T}$.

Dosadíme vybranou hodnotu za B_{SAT} a předběžně provedeme výpočet minimální síly bez znalosti plochy vzduchové mezery A_g :

$$\min f = \frac{0,707 \cdot 1,2^2 \cdot A_g}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 0,81 \cdot 10^6 \cdot A_g$$

Dle rozměrových požadavků byla stanovena hodnota šířky pólu $w = 10$ mm a zvolena délka pólu $l = 15$ mm. Výsledná plocha vzduchové mezery tedy potom je:

$$A_g = w \cdot l = 0,01 \cdot 0,015 = 0,00015 m^2$$

Minimální vyvozená síla pak vychází:

$$\min f = \frac{0,707 \cdot 1,2^2 \cdot 0,00015}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 121,5 N$$

Tímto je splněna podmínka, kdy minimální síla musí dosahovat hodnoty vyšší, než zadané, tedy vyšší hodnoty než 100 N.

Hodnota součinitele pro nezávislé řízení cívek pro 8 pólový stator pro dané hodnoty vychází:

$$K_i = \frac{4 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot N^2 \cdot 0,00015 \cdot I_b}{0,0005^2} = 0,00302 \cdot N^2 \cdot I_b$$

Dále je nutno zjistit klidovou magnetickou indukci, která se určí pomocí vztahu:

$$B_b = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I_b}{g_0} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} \Rightarrow N \cdot I_b = \frac{B_b \cdot g_0}{\mu_0} \Rightarrow \frac{1}{N \cdot I_b} = \frac{\mu_0}{B_b \cdot g_0}$$

Faktory I_B, I_X, I_Y jsou vypočteny jako:

$$I_B = 397,89 \cdot B_b \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad I_X = \frac{5}{6 \cdot B_b} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -0,707 \\ 0 \\ 0,707 \\ -1 \\ 0,707 \\ 0 \\ -0,707 \end{bmatrix} \quad I_Y = \frac{5}{6 \cdot B_b} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -0,707 \\ 1 \\ -0,707 \\ 0 \\ 0,707 \\ -1 \\ 0,707 \end{bmatrix}$$

V následující tabulce jsou uvedeny střední hodnoty součinu $N_j \cdot I_j$ a průřezy jednotlivých cívek A_v pro stanovené hodnoty klidové magnetické indukce B_b . Abychom se pohybovali v rozmezí, kde magnetická indukce dosahuje lineární závislosti na magnetické síle, byly vybrány 2 hodnoty $B_b = 0,6$ T a $B_b = 0,3$ T.

cívka	$B_b = 0,6 \text{ T}$		$B_b = 0,3 \text{ T}$	
	$ N_j \cdot I_j [\text{A}]$	$A_c [\text{cm}^2]$	$ N_j \cdot I_j [\text{A}]$	$A_c [\text{cm}^2]$
1	258,15	0,861	229,85	0,766
2	258,15	0,861	229,85	0,766
3	258,15	0,861	229,85	0,766
4	258,15	0,861	229,85	0,766
5	258,15	0,861	229,85	0,766
6	258,15	0,861	229,85	0,766
7	258,15	0,861	229,85	0,766
8	258,15	0,861	229,85	0,766

Tab. 2 – Proudové a plošné hodnoty cívek

Další výpočet je proveden ke zjištění počtu závitů každé cívky radiálního magnetického ložiska. Potřebný vztah již byl uveden dříve a jedná se o vzorec:

$$N \cdot I_b = \frac{B_b \cdot g_0}{\mu_0} \Rightarrow N = \frac{B_b \cdot g_0}{\mu_0 \cdot I_b}$$

Výsledky uvádí tabulka níže, kde jsou zobrazeny hodnoty pro různé napájecí proudy a dvě stanovené hodnoty klidové magnetické indukce.

Počet závitů 1 cívky N [-]		
$I_b [\text{A}]$	$B_b = 0,6 \text{ T}$	$B_b = 0,3 \text{ T}$
1	239	120
2	120	60
3	80	40
4	60	30
5	48	24
6	40	20

Tab. 3 - Počet závitů cívky

Z hodnot počtu cívek lze snadno vypočítat průměr měděných vodičů pro různé napájecí proudy a různé hodnoty klidových magnetických indukcí.

Uřídí se plocha samotných vodičů v celém průřezu cívky:

$$S = f_c \cdot A_c$$

následně se vypočítá plocha jednoho vodiče:

$$S_1 = \frac{S}{N_j}$$

a z této plochy se stanoví průměr měděného drátu:

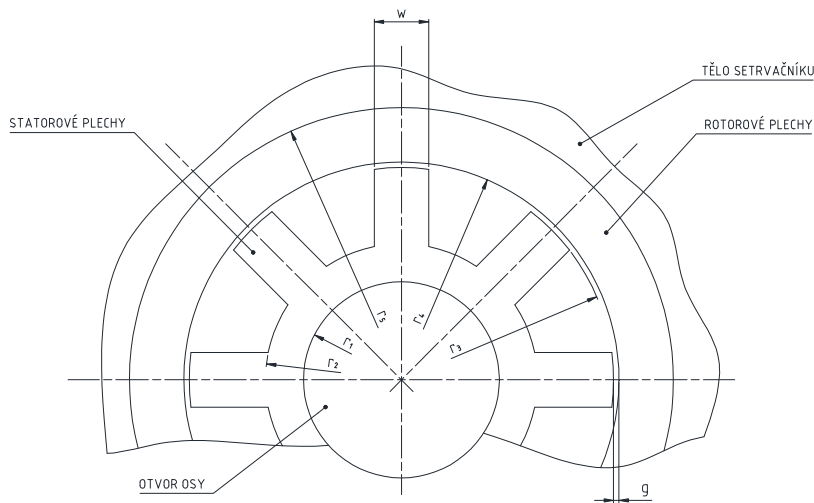
$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S_1}{\pi}}$$

Hodnoty uvádí tab. 4.

Průměr měděných vodičů cívek d [mm]		
I_b [A]	$B_b = 0,6$ T	$B_b = 0,3$ T
1	0,48	0,64
2	0,68	0,91
3	0,83	1,11
4	0,96	1,28
5	1,07	1,43
6	1,18	1,57

Tab. 4 – Průměry měděných vodičů

Základní rozměry ložiska jsou zobrazeny na obr. 39. Níže jsou pak uvedeny doplňující výpočty.



Obr. 39 – Rozměry ložiska

Zvolené nebo dané hodnoty jsou:

$$\alpha = 45^\circ, w = 10 \text{ mm}, g = 0,5 \text{ mm}, n_p = 8, r_1 = 15 \text{ mm}, r_2 = 23 \text{ mm}, r_4 = 40 \text{ mm}, r_5 = 50 \text{ mm}$$

$$r_3 = r_4 - g = 39,5 \text{ mm}$$

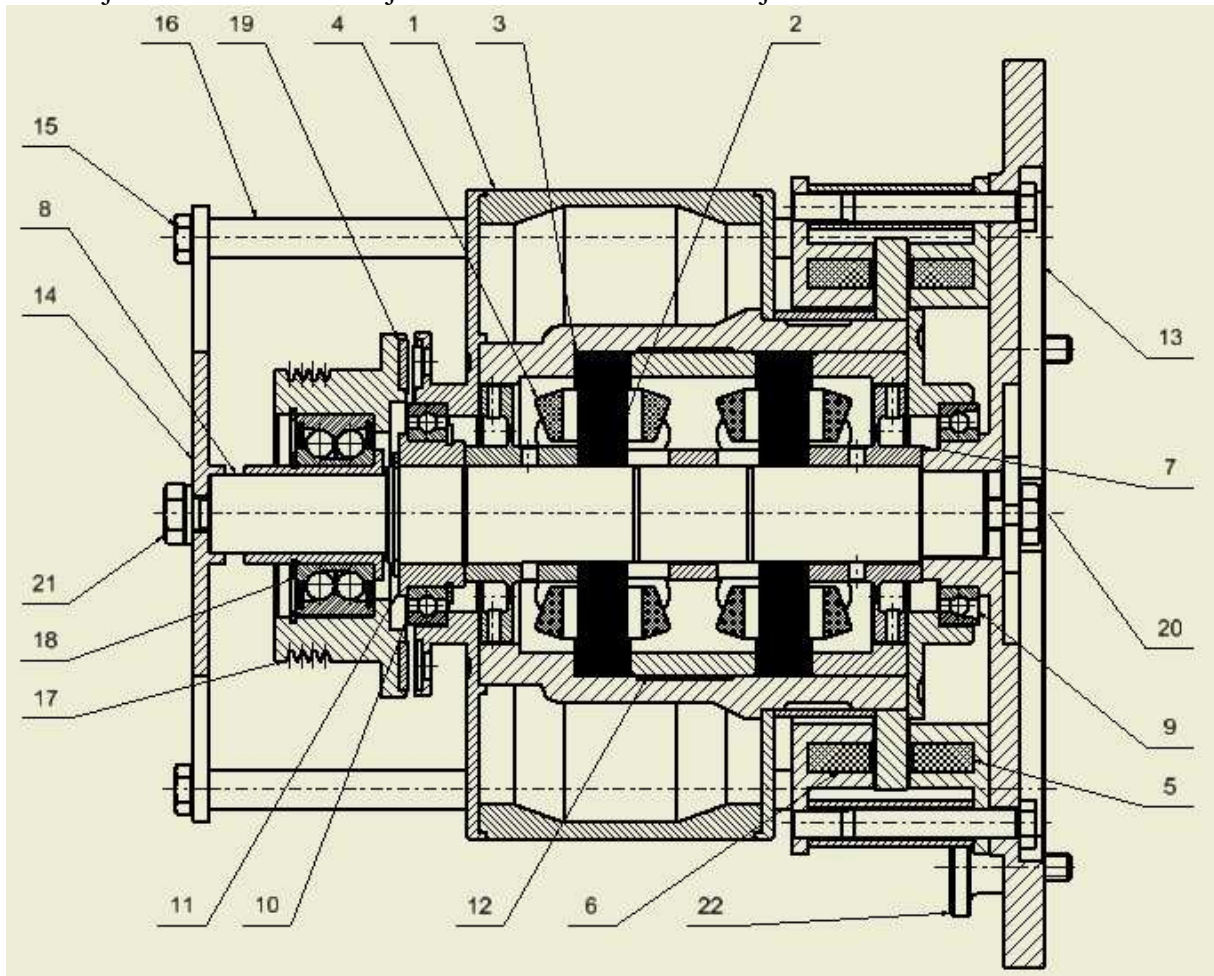
Dostatečná šířka rotorových plechů se ověří vztahem:

$$r_5 - r_4 \geq \gamma \cdot w$$

kde γ je součinitel rozdělení magnetického toku a pohybuje se v rozmezí 0,5 – 1. Pokud dosadíme hodnoty r_4 , r_5 a w do uvedeného vztahu, zjistíme, že výsledná hodnota je splněna.

9. Skica konstrukce, podrobný popis

Vybraný typ konstrukce byl již zobrazen schematicky na předchozím obrázku, na následujícím obrázku obr. 40 je zobrazeno uložení detailněji.



Obr. 40 – Skica konstrukce

Uložení sestává z hliníkového setrvačníku – 1, který je složen z několika částí. Středem prochází statorová osa – 8, která je opatřena drážkami pro vývod vodičů od cívek magnetických ložisek a vodičů od senzorů. Ve vnitřním prostoru setrvačníku jsou zalisované rotorové plechy – 3, mezi nimiž je distanční kroužek – 12. Proti rotorovým plechům jsou na ose zalisovány statorové plechy – 2 s cívkami – 4. Šířka statorových plechů je však menší než šířka rotorových plechů z důvodu možného axiálního posunu setrvačníku. Mezi statorovými plechy je opět vložen distanční kroužek, který má vyfrézované drážky pro odvod vodičů z cívek do drážek statorové osy a následné vyvedení do vnějšího prostoru. Prstence nesoucí senzory – 7 jsou zalisovány na koncích osy a jsou opět uzpůsobeny vývodu vodičů ze senzorů do drážek statorové osy. V horní části je ještě na ose zalisováno sedlo – 11 pro pomocné kuličkové ložisko – 10. Obdobou je spodní část sestavy, kde je však pomocné ložisko zalisováno do spodního rámu – 13. Zde je použito kuličkové ložisko s jednostranným kosoúhlým stykem – 9 z důvodu zachycení jak radiálních, tak i axiálních sil. Předpokladem je, že v případě výpadku magnetických ložisek dojde k dosednutí právě na spodní pomocné valivé ložisko a je tedy potřeba počítat s většími axiálními silami než v případě horního pomocného valivého ložiska. Proto bylo v horní části zvoleno pouze klasické kuličkové jednořadé ložisko. Cívky axiálních magnetických ložisek – 5,6 se nacházejí v přídatném

rámu, který je situován po spodním obvodu setrvačnicku. Přes trubky – 16 a šrouby – 15 je upevněna horní část rámu – 14. Propojení rámu se statorovou osou zajišťují dva šrouby – 20,21. Pro pohon setrvačnicku případně jeho brzdění je v horní části přidána řemenice – 17 uložená na svém valivém ložisku – 18. Řemenice má vytvořenu prstencovou drážku pro vložení magnetů – 19, které jsou též umístěny i v horním víku setrvačnicku a jejich přitahováním (odpuzováním) dojde k přenosu točivého momentu. Celý komplet spojky, ložiska a magnetů je umístěn na posuvném sedlu, které umožňuje axiální posuv a tím změnu velikosti síly mezi magnety. Celá sestava je posazena na výškově nastavitelných šroubech – 22. Pro stabilitu je potřeba pouze tří dotyků, ovšem v tomto případě zde byla sestava opatřena čtyřmi stabilizačními šrouby z důvodu složitosti spodní části rámu.

10. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo uvést základní pojednání, principy, funkce a rozdělení magnetických ložisek.

Na začátku byl uveden základní stručný popis, kde byly shrnuty především základní výhody a nevýhody tohoto uložení. Následoval popis historie a vzniku zaměřený převážně na aktivní magnetická ložiska.

Dále byl popisován základní jev - magnetismus a jeho rozdělení. O každém druhu bylo ještě více rozepsáno. Tato část také obsahovala popis o magnetickém poli a magnetech.

Další část byla zaměřena na popis levitace a jejích druhů. Jednalo se o jeden ze základních jevů, na kterém tato ložiska pracují. Levitace byla rozdělena na jednotlivé typy a každý z nich byl popsán samostatně s přiložením ukázkového obrázku.

V 5. kapitole byl zmíněn detailnější popis jednotlivých typů ložisek. Byla uvedena jejich základní konstrukce, popis a rozdělení na podtypy. Na konci bylo uvedeno porovnání výhod a nevýhod mezi jednotlivými typy.

Následující kapitola byla zaměřena na aktivní magnetická ložiska, především jejich rozdělení, které bylo podle druhu směru zatížení, jaké zachytávají, ale i podle rozměrových parametrů, jako např. mikroložiska. Dále byly popsány řídicí a snímací systémy, které jsou nedílnou součástí aktivních magnetických ložisek. Pozornost byla především zaměřena na snímače a jejich základní principy.

V poslední části byl zvolen typ konstrukce, která se podrobila detailnějšímu rozboru. Jako praktický příklad bylo zvoleno uložení setrvačnicku v magnetických ložiskách. Cílem bylo navrhnout konstrukci celé sestavy, při čemž musel být brát zřetel nejen na funkčnost celé sestavy, ale i na možnost jednoduché výroby dílů a dobré montáže. V této části sem se zaměřil na návrh radiálních aktivních magnetických ložisek a jejich zakomponování do setrvačnicku a rámu. Rám byl z hlediska konstrukce poměrně jednoduchý, a zároveň při porovnání působících sil, i robustní, proto na něj nebyla zaměřena přílišná pozornost. Výpočty se tedy týkaly pouze radiálních ložisek a jejich částí. Řídicí systém byl pro jednoduchost zvolen stejný, jaký byl k dispozici v laboratoři pana Ing. Romana Čermáka, Ph.D. Proto byly na začátku praktické části stanoveny proudové a napěťové podmínky, které vycházely právě z podmínek řídicího systému. Sensorový systém byl navržen pro senzory průměru 4 mm a délky 10 mm, byť snímače těchto rozměrů nebyly nalezeny v žádném katalogu. Důvod zvolení senzorů těchto rozměrů byl ten, že tyto senzory byly použity v jiném sensorovém prstenci, který byl opět součástí laboratoře pana Ing. Romana Čermáka, Ph.D. V přílohách je poté možno vidět několik výkresů konstrukce uložení, které byly vytvořeny v programu Autodesk Inventor Professional. Jedná se o sestavu a několik výkresů dílů týkajících se oblasti radiálních magnetických ložisek.

Seznam použité literatury

- [1] PESLAR, J.: *Aerostatická, aerodynamická a magnetická ložiska*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008.
Dostupný z WWW: <http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=647>
- [2] Prof. PAVELKA, J. DrSc.: *Magnetická ložiska – přednáška předmětu 14PO2*. Praha: ČVUT Praha, Fakulta elektrotechnická.
Dostupný z WWW:
<http://motor.feld.cvut.cz/www/materialy/X14UEP/X14UEP_pred_14.pdf>
- [3] <http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_bearing>
- [4] <http://www.skf.com/portal/skf_rev/home>
- [5] <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Maglev>>
- [6] POLÁŠEK, L.: *Speciální typy ložisek a jejich aplikace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 36 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Daniel Koutný, Ph.D.
Dostupný z WWW:
<http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28714>
- [7] TRAXLER, A., SIEGWARD, R.: *Active magnetic bearings – Basics and applications*. Mecos Traxler AG [Švýcarsko]
- [8] Prof. PAVELKA, J. DrSc.: *AT&P Journal – Technika pohonov, 2/2003*, Praha: ČVUT Praha, Fakulta elektrotechnická, 2003.
Dostupný z WWW: <<http://www.atpjournal.sk/buxus/docs/atp-2003-2-22.pdf>>
- [9] ŠIMEK, J.: *Speciální typy ložisek*. Technická zpráva TECHLAB.
Dostupný z WWW: <<http://www.techlab.cz/cs/SpecLoziska.pdf>>
- [10] <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetismus>>
- [11] <<http://www.levitron.cz/launch.php?s=page&ID=6>>
- [12] <<http://www.ucitel.net/fyzika/magnetismus>>
- [13] <<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/fyz7.htm>>
- [14] <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Feromagnetismus>>
- [15] <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Diamagnetismus>>
- [16] <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Paramagnetismus>>
- [17] <<http://ireferaty.lidovky.cz/315/4616/Elektromagnetismus>>

[18] <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnet>>

[19] <http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_36_hts.html>

[20] <<http://www.fzu.cz/popularizace/supravodivost-a-levitace>>

[21] IVÁNEK, L.: *Elektromagnetismus – učební text*. Ediční středisko VŠB – TUO. Ostrava 2007, ISBN 978-80-248-1486-5

Dostupný z WWW: <<http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/soutez/sidlo.pdf>>

[22] <http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_levitation>

[23] KADLEC, M.: *Levitační elektromagnet*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 34 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka.

Dostupný z WWW:

<http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=42342>

[24] PETRUŠEK, M.: *Realizace hardware laboratorního testovacího přípravku pro aktivní magnetické ložisko*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 36 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Houška, Ph.D.

Dostupný z WWW:

<http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=8339>

[25] VAVŘÍK, J.: *Magnetická levitace v dopravní technice – Maglevy*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, 2007. 40 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Roman Čermák, Ph.D.

[26] SCHWEITZER, G., MASLEN, E. H.: *Magnetic Bearings*. DOI 10.1007/978-3-642-00497-1 1, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009.

BLEULER, H.: *Micro Magnetic Bearings*. 12. – 14. s.