

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Magnetická ložiska

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na rozdělení a popis magnetických ložisek, jejich základními vlastnostmi a rozdělením. Dále se zabývá snímači, které jsou důležitou součástí aktivního magnetického ložiska a nakonec specifikací návrhu aktivního magnetického ložiska.

Klíčová slova

Magnetické ložisko, elektromagnet, řídicí systém, snímače.

Abstract

This bachelor thesis is focused on the distribution and the description of the magnetic bearings, their basic characteristics and distribution. Then it also deals with the sensors, which are an important part of the active magnetic bearing, and finally with the design specifications of the active magnetic bearing.

Key words

Magnetic bearing, Electromagnet, control system, sensors.

Prohlášení

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

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 5.6.2017

David Pavlas

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Šobrovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| OBSAH | 7 |
| SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK | 8 |
| ÚVOD..... | 10 |
| 1 MAGNETICKÁ LOŽISKA | 11 |
| 2 PASIVNÍ MAGNETICKÁ LOŽISKA..... | 13 |
| 2.1 PASIVNÍ LOŽISKA S PERMANENTNÍMI MAGNETY | 14 |
| 2.2 PASIVNÍ LOŽISKA S VYSOKOTEPLTNÍM SUPRAVODIČEM A MAGNETEM..... | 15 |
| 2.3 PRINCIP ČINNOSTI A APLIKACE PASIVNÍHO MAGNETICKÉHO LOŽISKA | 16 |
| 3 AKTIVNÍ MAGNETICKÉ LOŽISKO..... | 17 |
| 3.1 APLIKACE AKTIVNÍCH MAGNETICKÝCH LOŽISEK | 20 |
| 3.2 AXIÁLNÍ MAGNETICKÁ LOŽISKA..... | 20 |
| 3.3 RADIÁLNÍ MAGNETICKÁ LOŽISKA | 21 |
| 3.4 ŘÍDÍCÍ SYSTÉM LOŽISEK..... | 21 |
| 3.4.1 Ovládací jednotky ložiska | 22 |
| 3.4.2 Snímače | 22 |
| 3.4.3 Řídící jednotka, řídicí algoritmus..... | 25 |
| 4 POROVNÁNÍ S VALIVÝMI A KLUZNÝMI LOŽISKY | 26 |
| 4.1 POROVNÁNÍ S VALIVÝMI LOŽISKY | 26 |
| 4.2 POROVNÁNÍ S KLUZNÝMI LOŽISKY | 28 |
| 5 SPECIFIKACE NÁVRHU AKTIVNÍHO MAGNETICKÉHO LOŽISKA | 29 |
| 5.1 VÝBĚR MATERIÁLU PRO AKTIVNÍ MAGNETICKÉ LOŽISKO..... | 30 |
| 5.2 NÁVRH STATORU | 31 |
| 6 ZÁVĚR..... | 39 |
| SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ | 1 |

Seznam symbolů a zkratek

| Symbol | Jednotka | Popis |
|------------------------|---------------------|--|
| A..... | [m ²] | průřez vzduchové mezery |
| B..... | [T] | magnetická indukce |
| B _g | [T] | magnetická indukce ve vzduchové mezeře |
| c..... | [m ²] | šířka plochy cívky |
| D _c | [m ²] | plocha průřezu cívky |
| d _{Cu} | [m ²] | průměr drátu bez izolace |
| f..... | [m ³] | poměr ocele k prostoru cívky |
| F | [N] | síla |
| f _c | [-] | faktor využití průřezu cívkou |
| F _{x,0} | [N] | x - ová složka statické síly |
| F _{x,s} | [N] | x - ová složka dynamické síly |
| F _{y,0} | [N] | y - ová složka statické síly |
| F _{y,s} | [N] | y - ová složka dynamické síly |
| H..... | [A/m] | intenzita magnetického pole |
| I | [A] | proud |
| I _{B,n} | [A] | magnetizační proud |
| I _{max} | [A/m ²] | maximální proud na plochu vodiče |
| I _n | [A] | proud n - té cívky |
| I _R | [A] | rozdílový proud |
| I _x | [-] | složka proudu pro x - ový směr |
| I _{x,n} | [-] | složka proudu pro n - tý x-ový směr |
| I _y | [-] | složka proudu pro y - ový směr |
| I _{y,n} | [-] | složka proudu pro n - tý y - ový směr |
| k | [-] | konstanta |
| l | [m] | délka |
| L _c | [m ²] | velikost průřezu cívky |
| L _{c,n} | [m ²] | velikost průřezu n - té cívky |
| N..... | [-] | počet závitů |
| N _n | [-] | počet závitů n - té cívky |
| R _m | [Ω] | magnetický odpor |

| | | |
|----------------|--------------|------------------------|
| R_A | [Ω] | odpor vzduchové mezery |
| R_{Fe} | [Ω] | odpor jádra |
| s | [m] | délka vzduchové mezery |
| U_m | [V] | magnetické napětí |
| α | [$^\circ$] | úhel |
| ω | [rad/s] | úhlová rychlost |
| μ_0 | [H/m] | permeabilita vakua |
| μ_r | [-] | permeabilita materiálu |
| ϕ | [Wb] | magnetický tok |

Úvod

V 19. století vznikl první nápad k použití magnetické síly k zachycení objektů nebo rotorových částí stroje. Poté se uskutečnilo několik experimentů, ale až od druhé poloviny minulého století byla teorie prakticky realizována. V posledních desetiletích umožnil pokrok magnetických ložisek s mnoha uloženími technický a ekonomický rozvoj.

Magnetická ložiska jsou stále více atraktivnější řešení klasických problémů ložiskových v oblasti dynamiky stroje. Oblasti použití magnetických ložisek jsou následující: vakuové techniky, turbo stroje, obráběcí stroje, elektrické pohony, textilní stroje, akumulace energie, aplikace i ve vakuu, identifikace a zkoušení v rotoru dynamiky.

Ložiska se skládají ze dvou kroužků a jedné mezi části, jež závisí na druhu daného ložiska, a po které se ložiska pohybují. Je uzpůsobena k zmenšení vzájemného tření kroužků. Druh ložiska je pojmenován dle způsobu vzájemného pohybu kroužků. V současné době existuje několik druhů ložisek:

- kluzná ložiska
- valivá ložiska
- hydrostatická ložiska
- hydrodynamická ložiska
- aerostatická ložiska
- aerodynamická ložiska
- magnetická ložiska

[1], [2]

1 Magnetická ložiska

Magnetická ložiska přináší několik výhod, díky nimž jsou vhodné pro umístění do různých typů pohonů a do různých prostředí. Magnetická levitace vytváří mezi pevnou a rotující částí magnetického ložiska vzduchovou mezeru, kterou generuje síla magnetického ložiska. Vzhledem k jejich bezkontaktnímu pohybu, který utvářejí magnetické síly, nepotřebují mazat. Nedochozí u nich totiž ke tření, a proto u nich také odpadá hlučnost, mají minimální odpor, téměř nulové mechanické opotřebení i tepelné ztráty během provozu. A prodlužuje se životnost.

Mezi hlavní nevýhody, které přináší oproti klasickým ložiskům, patří cena a některé technické parametry. Jsou dražší, mají menší měrnou dynamickou tuhost a nosnost a některé navíc potřebují pro svůj provoz větší dodávku energie, případně i řídicí systémy, proto mohou zabírat také více místa.

Magnetická ložiska se dělí na dva základní typy:

- Pasivní magnetické ložisko
- Aktivní magnetické ložisko

[1], [2], [3]



Obr. 1 magnetické ložisko

Vlastnosti magnetického ložiska:

- nemaže se
- není zdrojem kontaminace nečistotami ani částicemi otěru
- umožňuje měření síly
- umožňuje ovládání polohy hřídele
- vysoká obvodová rychlost
- nízká spotřeba energie
- velmi nízké vibrace
- spolehlivost
- přesnost

Výhody

- vysoké otáčky rotoru
- vysoká přesnost uložení
- možnost pracování v různých podmínkách jako je podtlak (i vakuum), přetlak, ve znečištěném prostředí a různém rozsahu teplot
- tlumení vibrací a rázů, možnost změny tuhosti a tlumení rotoru za provozu
- tuhost rotoru ložiska, maximální nosná síla a tlumení vibrací i při nulových otáčkách
- žádné mazání (nekontaminuje své okolí mazivem)
- minimální ztráty (5-20x nižší než u konvenčních ložisek)
- neopotřebovávají se, nízké nároky na údržbu, možnost vyosení rotoru a ponechání jej otáčet se kolem své osy setrvačnosti – kompenzace nevyváženosti.

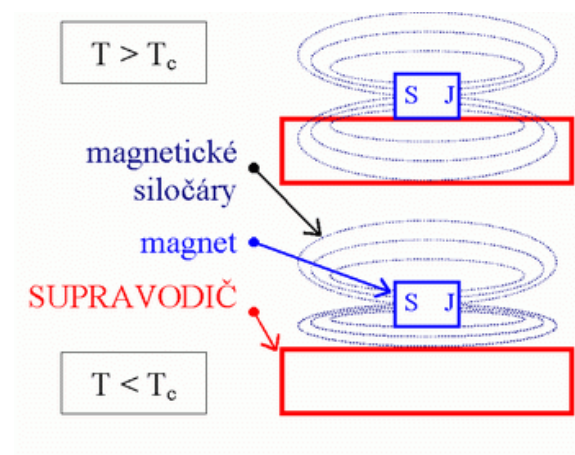
Nevýhody:

- vysoká cena
- nároky na prostor pro celý systém aktivního magnetického ložiska
- nižší nosnost vztahená na plochu ložiska
- nežádoucí generování tepla ve statoru a rotoru díky vířivým proudům
- nežádoucí zahřívání cívek statoru

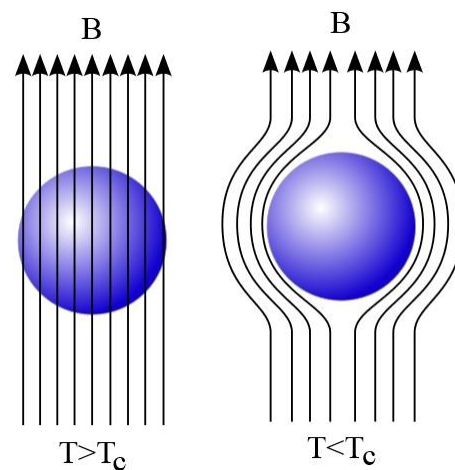
[1], [4]

2 Pasivní magnetická ložiska

Vyznačují se tím, že pro svůj provoz nepotřebují dodat elektrickou energii, není zde potřeba budících cívek, a tak jsou pasivní ložiska konstrukčně menší. Nicméně pasivnímu magnetickému ložisku chybí aktivní řídicí schopnost a obecně poskytuje nízký útlum a omezenou nosnost v porovnání s aktivním magnetickým ložiskem. Pasivní magnetická ložiska dělíme na dva druhy. Na ložiska s permanentním magnetem, která jsou typově nejjednodušší mezi magnetickými ložisky, a na ložiska s vysokoteplotními supravodiči. Tato magnetická ložiska s vysokoteplotními supravodiči jsou založena na principu Meissnerova efektu (můžeme vidět na obr. 2 a obr. 3).



Obr. 2 Meissnerův efekt



Obr. 3 Vytlačování siločar ze supravodiče

Tento efekt nastává, když supravodič ochladíme na námi požadovanou teplotu, při které se daný materiál stává supravodivým. Následně dokáže ze svého objemu vytlačit magnetické pole v závislosti na svém typu - stane se ideálním diamagnetikem. Můžeme u něj dosáhnout stabilní levitace. Permanentní magnety mají tvar válečků, které jsou umístěny nad kotoučem ze supravodiče.

[1], [2], [5], [6]

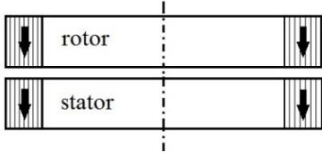
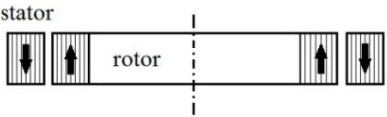
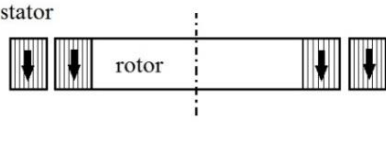
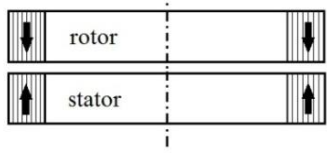
2.1 Pasivní ložiska s permanentními magnety

Tento druh ložisek, který se zdá být tím nejjednodušším a cenově nejdostupnějším, nebyl detailněji prozkoumán jako ostatní druhy ložisek. Pasivní ložiska nenašla široké uplatnění v oblasti pohonů, a to z důvodu nízké tuhosti a tlumení. Hodnoty tuhosti jsou určeny geometrickou konfigurací ložiska a jeho materiálovými vlastnostmi. Samotné ložisko poskytuje tlumení blízké nule, které zpravidla musí být doplněno elektrodynamickými nebo jinými tlumícími prvky. Jejich výhody jsou ty, že nepotřebují žádnou elektrickou energii pro svůj provoz, dále pak jednoduchost konstrukce a cena.

Došlo také k vývoji lepších materiálů pro permanentní magnety, a to hlavně materiálů na bázi tzv. vzácných zemin.

Na obr. 4 je vidět uspořádání jak pro axiální magnetické ložisko, tak i radiální.

[4], [7]

| | Radiální ložisko | Axiální ložisko |
|-------------|--|---|
| Přitahování |  |  |
| Odpuzování |  |  |

Obr. 4 Uložení pasivních magnetických ložisek

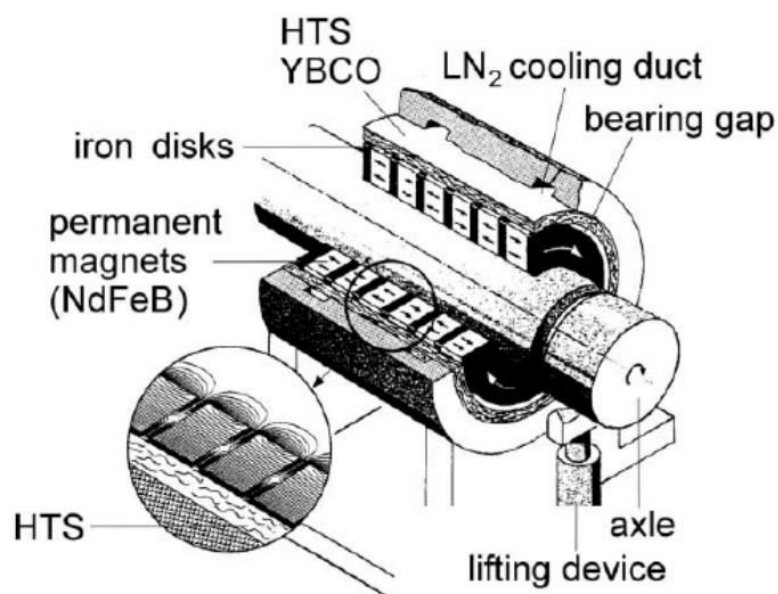
2.2 Pasivní ložiska s vysokoteplotním supravodičem a magnetem

Vysokoteplotní supravodiče (High-Temperature Superconductors - HTS) byly použity do magnetických ložisek po roce 1986, kdy se podařilo navýšit kritickou teplotu na 100 K (ochladit látku na tuto teplotu lze tekutým dusíkem). Prvně objevené materiály potřebovaly k přechodu na supravodiče teploty nad 0 K. Abychom materiály udrželi během provozu stále v supravodivém stavu, musíme je stále chladit, což zvyšuje nároky na konstrukci a cenu ložiska.

U HTS využíváme té vlastnosti, že dokážou ve svém okolí udržet magnetické pole, které do nich zavedeme. V kombinaci s permanentním magnetem tedy vznikají odpudivé síly, které způsobí levitaci v určité vzdálenosti mezi magnetem a HTS. Pro docílení větší nosnosti a tuhosti ložiska se použije permanentní magnet rozdělený na více částí a směr magnetických sil pootočený o 180°.

Na obr. 5 je vidět řez ložiska od společnosti Siemens. Ložisko se skládá z HTS YBCO (High-Temperature Superconductor tvořený sloučeninou Yttrium barium copper oxide), LN₂coolingduct (chladicí kanálek, pro tekutý dusík), bearing gap (vzduchová mezera ložiska), axle (čep hřídele), lifting device (zdvihací zařízení hřídele), HTS (vysokoteplotní supravodič), permanent magnets (válečky permanentních magnetů) a iron disk (železná vložka, která odděluje jednotlivé magnety).

[8], [9], [10], [11], [12]



Obr. 5 Radiální magnetické ložisko s HTS

2.3 Princip činnosti a aplikace pasivního magnetického ložiska

Jak již bylo řečeno výše, je to ložisko, které pro svoji funkci nepotřebuje žádný řízený akční člen. U pasivních magnetických ložisek pro získání jejich potřebných sil využíváme působení přitažlivého a odpudivého účinku sil dvou permanentních magnetů, které na sebe navzájem působí.

Na obr. 4 můžeme vidět schematické naznačení pro axiální a radiální dvojice kroužkových ložisek a jejich čtyři možná uspořádání. Pro větší nosnost a tuhost, které můžeme od ložisek vyžadovat, lze navýšit počet dvojic, a tím i umožnit větší zatížení dvojice kroužků.

Využití pasivního magnetického ložiska (vzhledem k fyzikálním vlastnostem magnetických materiálů) je omezeno pouze na menší zatížení. Nejvíce jsou ložiska využívána, jakožto i ostatní magnetická ložiska, jako setrvačníky. Dále se používají jako turbomolekulární čerpadla, odstředivky a paprskové přerušovače.

[4], [7]

Tab.1 Výhody pasivních a „supravodivých“ magnetických ložisek

| Výhody | Nevýhody |
|--|--|
| Jednoduchost | Nutnost chladicího systému (HTS) |
| Nízká cena | Nízká tuhost |
| Spolehlivost | Malé tlumení |
| Malé konstrukční nároky | Menší únosnost (u permanentních magnetů) |
| Není třeba zdroj elektrické energie | |
| Stálost při nízkých i vysokých teplotách | |
| Využití ve zvláštních aplikacích | |

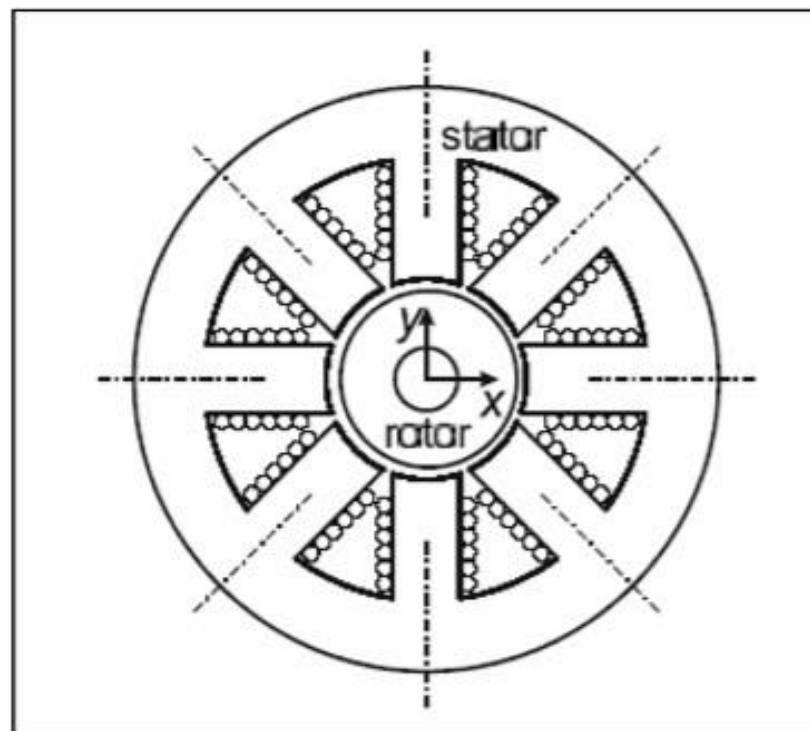
3 Aktivní magnetické ložisko

Základní část magnetického aktivního ložiska tvoří dvojice elektromagnetů, která je umístěna v jedné ose proti sobě. Pokud bude protékat cívkami elektromagnetů elektrický proud o stejné velikosti, budou se vytvářet shodné síly na elektromagnetech působících proti sobě a výsledná síla tím bude nulová.

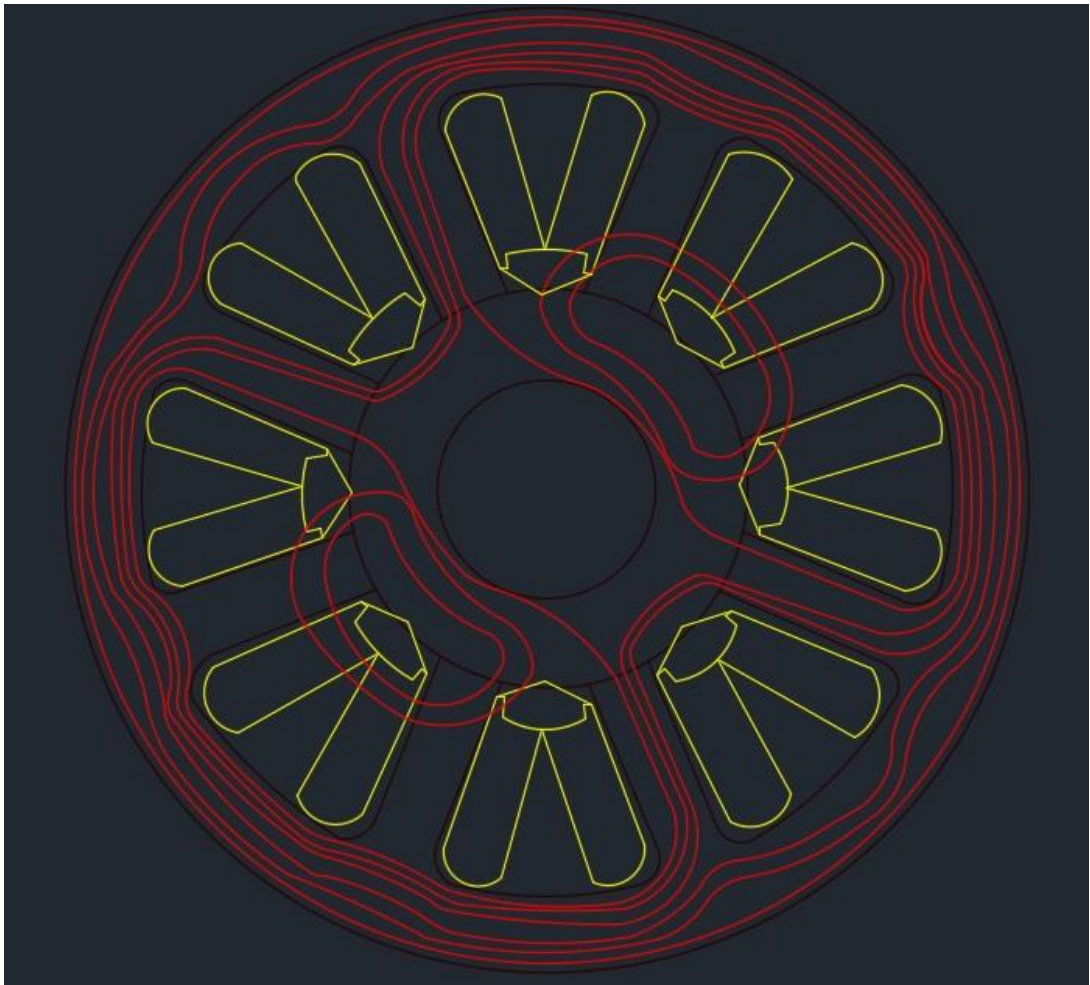
Řízení velikosti výsledné síly můžeme tedy ovlivnit velikostí protékajících proudů a jejich poměrem v protilehlých cívkách. Zvětšením proudu v jedné a snížením proudu v druhé cívice a naopak. U radiálního ložiska můžeme umístit magnetický obvod elektromagnetu buď kolmo k ose otáčení, nebo podél osy hřídele.

Magnetický obvod, který umístíme kolmo k ose hřídele, je podobný magnetickému obvodu elektromotoru a je proto snadno vyrobitelný. Abychom omezili hysterezní ztráty, musíme vyrobit rotorovou část jako laminovanou. Ve většině případů se z plechů skládá i statorová část.

Na obr. 6 je schéma obvodu magnetického ložiska a na obr. 7 je náčrt tohoto ložiska, na kterém je zobrazené rozložení siločar pro různé budící proudy. Je to nejčastější uspořádání, které je v současné době používáno.



Obr. 6. Schéma magnetického obvodu radiálního ložiska



Obr. 7 rozložení siločar v ložisku

Aktivní magnetická ložiska nahrazují v mnoha aplikacích ložiska s olejovým mazáním. Liší se tím, že pro svůj provoz potřebují dodat elektrickou energii. Jejich funkce je podobná funkci elektromagnetů, stejně tak jejich konstrukce. Ve statoru je uloženo pole cívky, ve kterém se při průchodu elektrického proudu indukuje magnetické pole, které přitahuje rotor z feromagnetického materiálu. Velikost vzduchové mezery, která je mezi rotorem a státorem, je od 0,5 do 2mm. Největší problematikou aktivních magnetických ložisek je rotorová poloha, která není stabilní. Proto musí být systém ložiska opatřen zpětnovazebním regulačním obvodem.

Obvod je znázorněn na obr. 10, a tvoří ho snímač polohy, zesilovače, filtry, měniče převodníků A/D a D/A, paměťové obvody S/H, paměť, napájecí zdroj a elektrická řídicí jednotka (DPS).

Řídicí jednotka, která ovlivňuje přitažlivou sílu vyvolanou magnetickým polem, musí během provozu stále vyhodnocovat polohu rotoru, a v závislosti na ní přizpůsobuje velikost procházejícího proudu v jednotlivých cívkách.

Podmínka pro širší využití aktivních magnetických ložisek byl pokrok v oblasti hardwaru a vývoj řídicích algoritmů. V mnoha aplikacích má toto velkou výhodu i přes to, že se jedná o komplikovaný elektrický systém.

Díky tomu, že můžeme řídit polohu, můžeme zabránit vibracím a kompenzovat nevyváženost systému. Zároveň si tím pomůžeme při omezení energetických ztrát, která jsou vhodná například u setrvačnicků. Toto využití můžeme používat i obráceně, a to k vybuzení vibrací, a tím ověřovat dynamické chování rotorů.

[1], [3], [13], [14], [15], [16]

Tab.2 Výhody a nevýhody aktivního magnetického ložiska

| Výhody | Nevýhody |
|---|--|
| Vysoce přesné uložení | Ztráta funkčnosti při výpadku napájení |
| Významné omezení vibrací | Vysoká cena |
| Nízké energetické ztráty | Menší spolehlivost |
| Možnost řízení vzduchové mezery | Větší zástavba |
| Bezdemontážní diagnostika | Velké nároky na hardware |
| Relativně vysoká únosnost | Složitý algoritmus |
| Nastavitelná tuhost a parametry tlumení | Zahřívání ložisek |

3.1 Aplikace aktivních magnetických ložisek

Použití magnetických aktivních ložisek vychází z jejich výhod. Jejich typické použití je ve výkonových setrvačnicích, ale používají se i turbokompresorech a turbínách pro jejich velkou únosnost. Možnost řízení velikosti vzduchové mezery nám je umožňuje použít k biologickým a farmaceutickým účelům, na výrobu polovodičů a v potravinářském průmyslu. Magnetická ložiska lze využít v jakémkoliv stroji kde není vhodné užít ložisek s mazivy a částmi otěru, aby nekontaminovali okolí. Využívají se i pro strojní části, které pracují ve vakuu.

3.2 Axiální magnetická ložiska

Axiální ložisko můžeme vidět na obr. 8. Je složeno z masivního ocelového kotouče připojeného k hřídeli a prstencového statoru, jenž je umístěný po obou stranách. Stator se může skládat z jednoho, nebo dvou vinutí, která vytvářejí magnetický tok. Stator se skládá z plechů, nebo je tvořen z jednoho celku.

[2], [3], [17]



Obr. 8 axiální magnetické ložisko

3.3 Radiální magnetická ložiska

Jsou podobná elektromotoru, ten však vytváří točivý moment, kdežto ložiska přitažlivou silou, která působí na feromagnetický rotor. Přitažlivá síla, která v ložisku působí, zvedá a udržuje rotor v rovnovážné poloze. Stator je složený z n oddělených ovládacích jednotek. Jednotky jsou tvořeny dvěma póly, na nichž jsou navinuté cívky. Rotor může být skládaný z plechů, nebo masivního ocelového kotouče. Na obr. 9 můžeme vidět radiální magnetické ložisko se čtyřmi ovládacími jednotkami.

[2], [3], [17]



Obr. 9 radiální magnetické ložisko

3.4 Řídicí systém ložisek

Pro řízení magnetických ložisek využíváme tři hlavních systémových částí, a to ovládací jednotky ložiska, snímače a řídicí jednotky řídicího algoritmu. Řídicí systém aktivního magnetického ložiska koriguje velikost vzduchové mezery, a tudíž polohu rotoru vůči statoru.

[3], [18]

3.4.1 Ovládací jednotky ložiska

Na obr. 9 je vidět radiální magnetické ložisko, které má 4 ovládací jednotky. Každá jednotka je tvořena ze dvou oddělených pólů, na kterých jsou navinuté cívky. Přitažlivá síla, která vzniká při průchodu proudu, působí na feromagnetický rotor. Rotorová část může být z jednoho kusu, jak je vidět na obr. 9, nebo se může skládat z většího množství plechů. Jak již bylo řečeno u aktivního magnetického ložiska, rozmezí vzduchové mezery bývá mezi 0,5 mm a 2 mm.

[4], [13], [14], [15]

3.4.2 Snímače

Snímače jsou v magnetických ložiscích umístěny tak, aby měřily pozici rotoru, a mohly jeho polohu předávat řídicí jednotce. Zároveň musí být snímače navrženy tak, aby mohly pracovat v magnetickém poli a jeho blízkosti. Další podmínka pro jejich použití je bezkontaktní snímání, možnost pracovat ve vakuu, v prašném prostředí a při vysokých teplotách. Z hlediska konstrukce je třeba brát na vědomí umístění, velikost snímače a polohu, kde bude umístěn pro požadované měření. Jsou na ně tedy kladeny vysoké nároky.

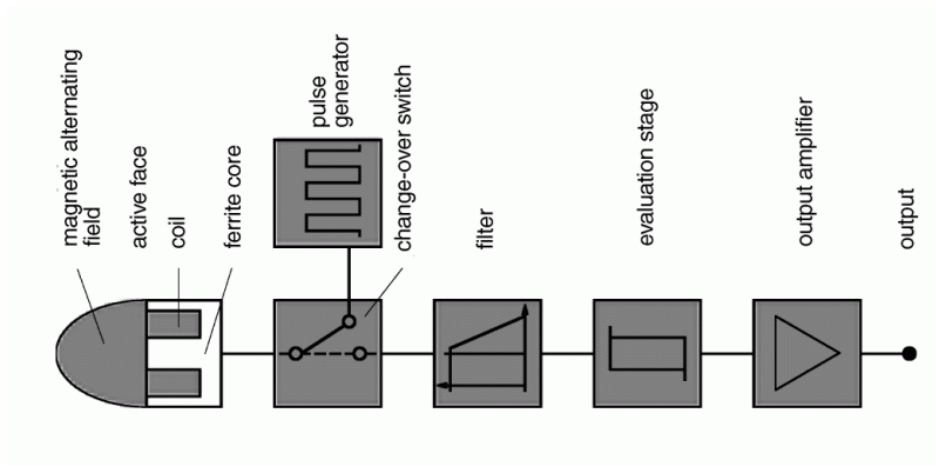
Mezi známé snímače patří indukční, kapacitní, magnetický a optický. Jejich použití záleží na ekonomickém a konstrukčním provedení ložiska, a také na umístění do daného prostředí. Poloha a typ snímače se také volí tak, aby byl co nejbližší umístěn u ložiska, aby byly co nejmenší odchylky měření.

[4], [13], [14], [15], [17]

3.4.2.1 Indukční snímače

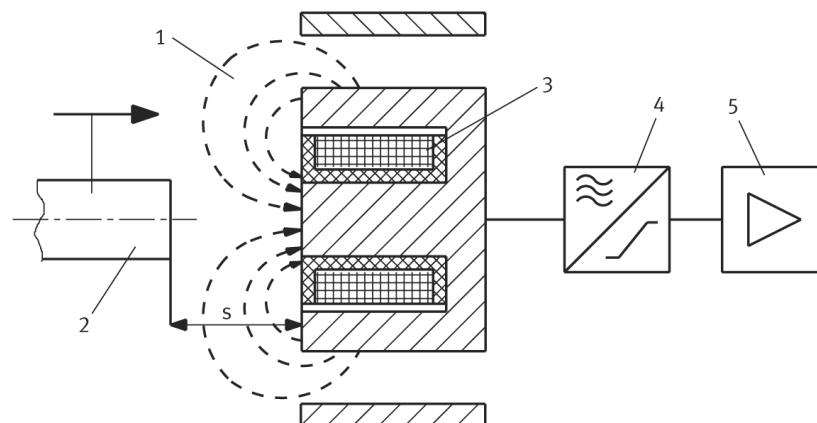
Indukční snímače polohy mohou být tvořeny cívkou (systémem cívek) s feromagnetickým jádrem, neferomagnetickým elektrickým vodivým jádrem. Změnou polohy jádra k cívce, působením neelektrických veličin, dojde k vyvolání změny velikosti proudu protékajícího obvodem. Tato změna je převedena na signál pro řídicí jednotku, která jí vyhodnotí.

Indukční snímače jsou také tvořeny elektrickými bloky obvodů, které pracují v posloupnosti. Takovýto snímač je zobrazen na obr. 10.



Obr. 10 řazení bloků uvnitř běžného válcového snímače.

I v tomto případě, je hlavním prvkem obvodu cívka, které spolu s kondenzátorem v paralelně rezonančním obvodu tvoří oscilátor. Oscilátor generuje vysokofrekvenční střídavý proud, který protéká cívkou. Ta je umístěná na jádru feritového hrníčku. Na obr. 11 je vidět konstrukce takovéto cívky. Díky tomu vytváří magnetické pole. Pokud v blízkosti pole nachází nebo se k němu přiblíží vodivý materiál, dojde k deformaci magnetického pole.



Obr. 11 konstrukce cívky 1 - mag. pole, 2 - el. vodivý materiál, 3 - cívka, 4 - oscilátor, 5 - zesilovač

3.4.2.2 Magnetické snímače

Můžeme použít jednu cívku v ložisku, ve které při udržování konstantního proudu v cívce zjistíme velikost vzduchové mezery v závislosti na magnetické indukci. Na tento způsob měření může být použita Hallovo sonda. Však to není přímé měření polohy rotoru, a měření je náchylné na okolí magnetického pole. Proto není tento způsob moc používaný. Výhoda jedné cívky je v tom, že není zapotřebí další součásti sestavy v uložení rotoru.

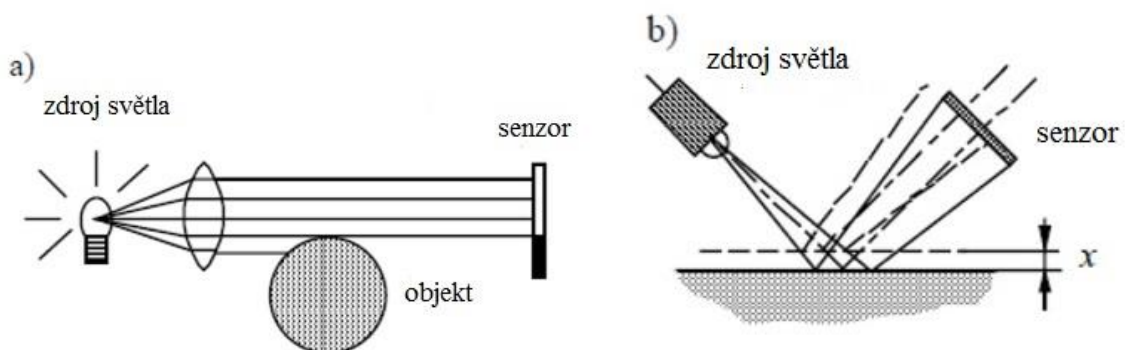
Jako magnetický snímač jdou použít dvě cívky nastavené proti sobě. První cívku napájíme proudem o konstantní velikosti. Druhá cívka indukuje prou přes rotor, do kterého přechází magnetické pole vzniklé z první cívky. Abychom zjistili velikost vzduchové mezery, musíme porovnat velikosti proudu obou cívek. Magnetické pole z ložiska může ovlivnit přesnost snímačů, a proto je nelze umístit v těsné blízkosti.

[17], [19], [20]

3.4.2.3 Optické snímače

Optické snímače se vyznačují jednoduchou konstrukcí, a přesto mají nejpřesnější měření ze všech snímačů. Zvládají měřit i velice malé odchylky polohy. Nejčastější využití laseru, zároveň to je však nejdražší snímač, na který se však kladou větší nároky na umístění. Polohu rotoru lze pomocí optického snímače měřit dvěma způsoby. Oba jsou znázorněné na obr. 12. Ze světelného zdroje je vyslán paprsek, který je přerušovaný odchylkou rotoru a zakrývá tak senzor. Druhá možnost je odraz paprsku od rotoru, a využívá principu zrcadla odrazení světelného paprsku do prostoru senzoru. Optické snímače jsou sice velice přesné, ale také náročné na čistotu prostředí a opotřebení rotoru.

[4], [13], [14], [15], [17], [20]



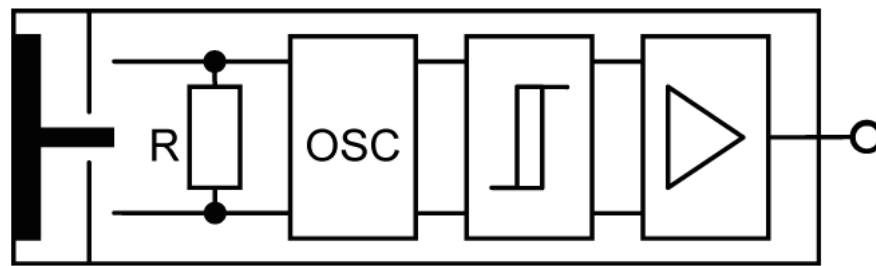
Obr. 12 a) optický snímač měřící intenzitu světla b) optický snímač měřící podle triangulace

3.4.2.4 Kapacitní snímače

Kapacitní snímače mohou na rozdíl od indukčních snímat i nevodivé materiály, které se tváří jako dielektrikum. Základní provedení kapacitního snímače obsahuje RC oscilátor, tvořený kondenzátorem a rezistorem. Blokové schéma můžeme vidět na obr. 13.

Vyhodnocovací obvod a koncový stupeň. Uvnitř snímače je umístěná elektroda, které působí jako stínění a je i jeho hlavním aktivním prvkem. Kondenzátor má díky elektrodě základní kapacitu, které je závislá na dielektriku, a tedy na přiblížení nebo oddálení detekovaného objektu.

[17], [19], [20]

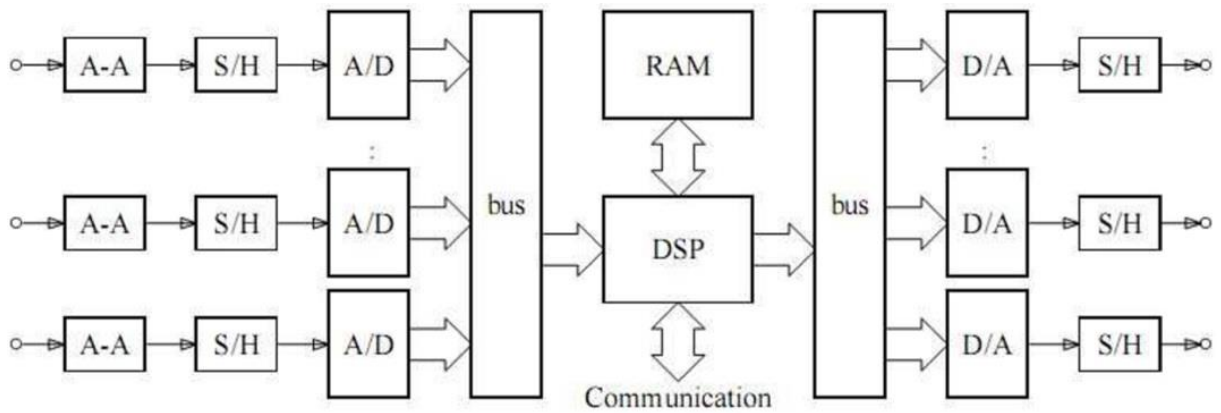


Obr. 13 řazení bloků uvnitř kapacitního snímače.

3.4.3 Řídící jednotka, řídicí algoritmus

Správný chod ložiska nám zajišťuje řídicí jednotka. Ta vyhodnocuje signály ze snímačů a upravuje velikost proudu pro dané cívky, abychom mohli řídit polohu rotoru. Máme dva základní druhy řízení. Můžeme použít analogové řídicí jednotky, které byly umístovány v aktivních magnetických ložiscích v začátcích, nebo digitální. Součástí digitálních jednotek je i mikroprocesor, nebo jednotka obsahuje paměťové obvody S/H, digitální signálový proces (DPS), A/D a D/A převodník, paměť, měnič a filtr, jak bylo řečeno výše. Díky tomu je digitální jednotka dražší, složitější, má větší možnost selhání a je složena z většího počtu součástí.

[4], [17], [21],



Obr. 14 blokové schéma digitální řídicí jednotky

4 Porovnání s valivými a kluznými ložisky

4.1 Porovnání s valivými ložisky

Rozdíl mezi valivými a magnetickými ložisky je vidět na první pohled. Oba druhy ložisek mají vnější kroužek a vnitřní část. Liší se v kluzné mezi částí. Na obr. 1 je vidět magnetické ložisko s vnitřní částí hřídele a na obr. 9 je znázorněn vnitřní kroužek ložiska.

Různé druhy valivých ložisek můžeme vidět na obr. 15. Jsou složeny z vnějšího kroužku, vnitřního kroužku, valivých tělísek (válečky, kuličky, jehly, soudky a kužele) a klece, která drží valivá tělíska ve stejné poloze vůči sobě.

Valivá ložiska jsou v dnešní době jedny z nejlépe využívaných druhů uložení ložisek. Musejí se však mazat a náročnost na mazání závisí na druhu ložiska, nosnosti v dané aplikaci a rychlosti otáček. Některá ložiska mohou dosahovat rychlosti řádově okolo 1 500 otáček za sekundu. Při této rychlosti nejenže mazivo zvětšuje kluznost, ale také chladí ložisko při vysoké změně teploty.

[18]



Obr.15 valivá ložiska

Tab.3 Výhody a nevýhody valivých ložisek

| Výhody | Nevýhody |
|--|---|
| Jednoduchá konstrukce | Musí se mazat |
| Jsou levné | Při zahřátí mají větší ztráty a menší účinnost |
| Dokážou snést rázy a občasné přetížení | Nebezpečí zadření při velké zátěži a špatném mazání |
| | Vyměňená ložisková pouzdra se musí zaběhnout |

Magnetická ložiska, jak bylo řečeno již výše, se pohybují díky magnetické levitaci. Oproti valivým ložiskům nepotřebují mazat, neopotřebovávají se třením, a tak nehrozí riziko zadření ložiska. Zmenšuje se i hlučnost, oteplení a zvětšuje se přesnost uložení ložiska.

Navíc aktivní magnetická ložiska pro svůj provoz potřebují další konstrukční část, ve které je uložen řídicí systém ložiska. Pasivní ložiska s HTS potřebují pro svůj provoz chlazení například tekutým dusíkem. Cena magnetických ložisek je kvůli tomu vyšší.

[1], [3], [18]

4.2 Porovnání s kluznými ložisky

Kluzná ložiska jsou nejlevnější, konstrukčně nejjednodušší a mají nejmenší prostorové nároky. Vyznačují se tím, že nemají mezi část, která by jim pomáhala zmenšit součinitel smykového tření kromě maziv. Jejich montáž je jednoduchá a zvládnou velkou zátěžovou nosnost. Kluzná ložiska snesou velké teploty, při kterých pracují, a dokážou tlumit mechanické rázy a vibrace. Mezi částmi ložiska, nebo ložiskem a hřídelí, je pouze mazivo, které plní stejný princip jako u valivých ložisek. Různé druhy kluzných ložisek můžeme vidět na obr. 16.



Obr. 16 kluzná ložiska

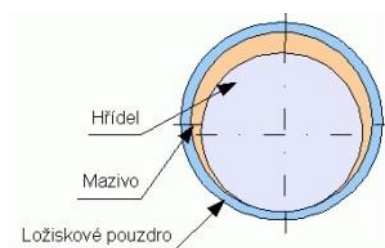
Kluzná ložiska mají mít buď suché tření, polosuché tření, nebo kapalinové tření.

Suché tření je znázorněno na obr. 17. Při tomto styku dochází ke vzájemnému kontaktu součástí. Není mezi nimi žádné mazivo a dochází tedy k uvolňování částeczek materiálu ložiska a hřídele při provozu, hrozí nebezpečí zadření. Součinitel smykového tření je v tomto případě 0,1 až 0,25.

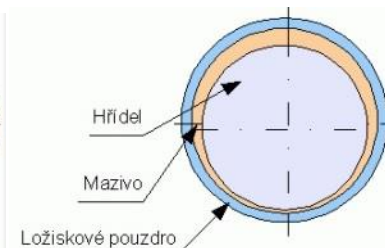
Polosuché tření vzniká při nízkých otáčkách. Stává se tak během rozběhu nebo zastavení hřídele stroje. Množství maziva není dostatečné k tomu, aby vytvořilo mazací film uvnitř ložiska. Znázorněné je to na obr. 18, kde je vidět částečné nanesení maziva. Součinitel smykového tření je zde 0,1 až 0,01.

Poslední způsob tření, ke kterému dochází u ložisek, je kapalinový. Ten nastane, pokud se otáčky hřídele dostávají k maximálním hodnotám, a mazivo utvoří v ložisku rovnoměrný film, ve kterém vnitřní součást ložiska plave. Toto je znázorněno na obr. 19. Ložisko je nejméně opotřebováváno a stroj dosahuje největší účinnosti. V tomto případě dosahuje součinitel smykového tření 0,01 až 0,001.

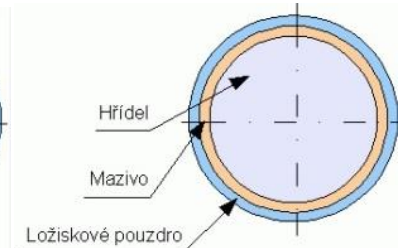
[1], [3], [18]



Obr. 17 suché tření



Obr. 18 polosuché tření



Obr. 19 kapalinové tření

5 Specifikace návrhu aktivního magnetického ložiska

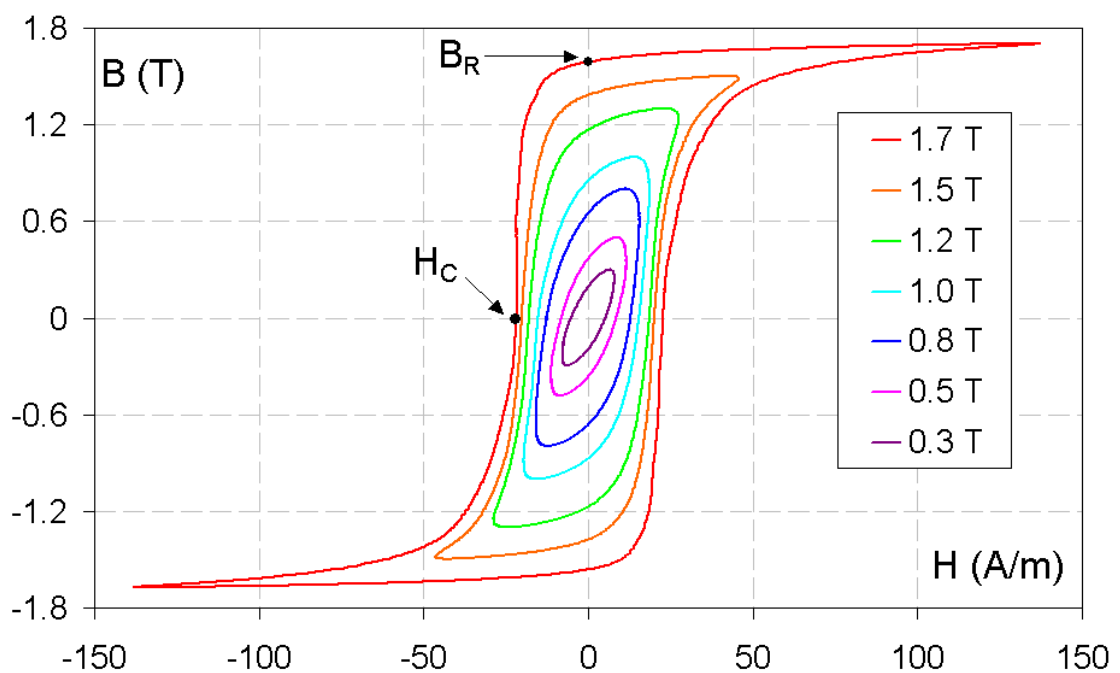
Pokud chceme navrhnout aktivní magnetické ložisko, tak nás nejvíce zajímá strojní část ložiska, za tu považujeme stator a rotor ložiska, a částečně navržení zesilovače. Rotor je tvořený z hřídele, která nemusí být vyrobena z materiálu s vysokou permeabilitou. Na hřídeli jsou kroužky, které už musí mít vysokou permeabilitu a vyrábí se z válcovaných plechů, které se lisují na hřídel a izolují se. Díky tomu se také zmenší ztráty vířivými proudy. U magnetických ložisek nedochází ke ztrátám kvůli třením, ale mají ztráty zaviněné odporem prostředí, Jouleovy ztráty, hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy. Pevnost rotoru ovlivňuje maximální otáčky ložiska. Ty jsou omezené mezí kluzu. Při jejím překročení se mohou deformovat a oddělovat kroužky. Mez kluzu, a tedy maximální otáčky na jaké bude ložisko dimenzováno, se určí materiálem a průměrem jak hřídele, tak kroužku, a i způsobem nalisování kroužků.

[1], [2], [22]

5.1 Výběr materiálu pro aktivní magnetické ložisko

Výběr vhodného materiálu, který použijeme pro aktivní magnetické ložisko, by měl splňovat určité vlastnosti, jež jsou typické pro magneticky měkké materiály. Mezi tyto vlastnosti patří co nejmenší remanence, co největší permeabilita a co největší sytná magnetická indukce. Remanence je zbytková magnetizace, kterou si podrží feromagnetický materiál, když na něj přestane působit vnější magnetické pole. Remanenci nám charakterizuje úzká hysterezní smyčka. Čím je hysterezní smyčka užší, tím jsou menší hysterezní ztráty. Relativní permeabilita se označuje jako podíl permeability daného materiálu a permeability vakua. Velká sytná magnetická indukce a relativní permeabilita zajistí nosnost magnetického ložiska. Na obr. 20 jsou znázorněné hysterezní křivky.

[22], [23], [25]



Obr. 20 hysterezní křivky

Aby ložisko správně pracovalo jsou důležité další vlastnosti. Pro dosažení maximálních otáček při určitém průměru je třeba, aby měl materiál rotoru co největší mez kluzu. Míra deformace od napětí vzniklého vysokými otáčkami je vyjádřena modulem pružnosti. Ten by měl být co největší. I přes minimalizování hysterezních ztrát se kvůli hysterezním ztrátám ložisko otepluje. Rotor se ochlazuje díky své rotaci, pokud však nepracuje ve vakuu. Jako další vlastnost materiálu se uvádí korozní odolnost. Na tuto vlastnost se musí brát ohled při navrhování ložiska do různých prostředí. Nejčastějším materiálem, který se používá u magnetických ložisek, je uhlíková ocel. Jediná její vlastnost, která není splněna z výše uvedených, je nízká mez kluznosti. Mezi její další výhody patří cena, snadná zpracovatelnost a dostupnost.

Materiál běžně používaný k výrobě cívek je měď. Pokud chceme pracovat při vyšších teplotách, můžeme použít např. stříbro, avšak při častějším vystavování vyšší teplotě cívka ztrácí své vlastnosti. Stříbro má také o maličko lepší vodivost než měď.

[2], [3], [21], [24], [25]

Faktory ovlivňující velikost a únosnost ložiska:

- počet pólů a jejich rozměry
- materiál statoru a rotoru
- počet závitů drátu
- vzduchová mezera
- maximální proud
- vnější průměr hřídele

5.2 Návrh statoru

Pro návrh statoru je důležité určit kolika pólové ložisko chceme, na jaké zatížení budeme ložisko dimenzovat a jaký bude mít průměr hřídel v daném ložisku. Nejméně používaná jsou třípólová heteropolární ložiska. Mezi nejběžnější patří dvanáctipólové ložisko, avšak pro nejjednodušší ovládání se používá osmipólové ložisko. Čím má ložisko více pólů, tím více usnadňuje stálý provoz i pokud vypadne zesilovač nebo jedna z cívek. Počet pólů je určován průměrem ložiska, při větším průměru však klesají otáčky, na které se dá ložisko dimenzovat.

Cívky elektromagnetu, které jsou umístěny v ložisku, generují magnetomotorickou sílu. Elektromagnet je složený z cívky, která je navinutá na jádře. Poměr mědi, který je kolem jádra, zůstane stejný pokud použijeme měděný vodič z tenčího drátu, který bude mít více závitů, anebo silnější drát, který bude mít méně závitů. Při použití slabšího drátu bude i celkový průřez vodiče menší díky tenčí izolaci. Tento poměr bývá 0,5 maximálně 0,75. Nesmíme však zapomenout, že při malých průřezech měděného vodiče je kvůli možnému přehřívání tohoto vodiče doporučena maximální proudová hustota [$6\text{A}/\text{mm}^2$].

Když známe počet pólů, které bude ložisko obsahovat, můžeme odvodit plochu průřezu cívky z obvodu rotoru. Musíme rozdělit obvod rotoru počtem pólů do kterého se musí vejít dvojnásobný počet cívek a šířka příslušného pólu:

$$c = \frac{\pi * D * (1 - f)}{2 * n} \quad (5.1)$$

c je tedy šířka plochy cívky, f je poměr prostoru pro cívku a množství dané ocele. Pokud zvolíme velké f , tak se nám zmenší prostor pro možný počet závitů a celkovou velikost cívky. Při malém počtu závitů bychom nemuseli dosáhnout dostatečné magnetické indukce. Pokud však zvolíme malé f , bude ložisko delší, aby byla zachována plocha pólů.

Obecný vztah jak dostat šířku pólu ložiska je:

$$w = \frac{\pi * D * f}{n} \quad (5.2)$$

Pokud však budeme chtít spočítat počet závitů, musíme brát v potaz, že šířka plochy cívky c je menší vlivem izolací a navinutím. Skutečná plocha průřezu cívky je $D_c = 0,5-0,75$.

Pro výpočet počtu závitů na cívce pak použijeme vztah:

$$N = \frac{4 * D_c}{\pi * d_{Cu}} \quad (5.3)$$

kde d_{Cu} bude průměr drátu bez izolace.

Při dodržení maximální proudové hustoty $6 \text{ [A/mm}^2\text{]}$, které je možno dosáhnout, lze vypočítat maximální proud, který může vodičem protékat:

$$I_{max} = \frac{3}{2} * \pi * d_{Cu} \quad (5.4)$$

Ampérův zákon je předpokladem pro výpočet sil jednotlivých částí magnetického obvodu:

$$\oint \vec{H} * d\vec{l} = N * I \quad (5.5)$$

Vzorec (5.5) je intenzita magnetického pole $H \text{ [A/m]}$ derivovaná podle délky $l \text{ [m]}$ v uzavřené smyčce, která je rovna součinu počtu závitů na cívce $N \text{ [-]}$ a proudu který protéká cívkou $I \text{ [A]}$. Výpočet magnetické indukce $B \text{ [T]}$ je součin relativní permeability materiálu $\mu_r \text{ [-]}$, permeability vakua $\mu_0 \text{ [H/m]}$ a intenzity magnetického pole $H \text{ [A/m]}$.

Velikost permeability vakua je $\mu_0 = 4 * \pi * 10^{-7} \text{ [H/m]}$.

$$B = \mu_r * \mu_0 * H \quad (5.6)$$

Určením magnetického toku získáme výpočet síly v jednom magnetickém obvodu, který je složený ze dvou pólů. Při zjednodušeném výpočtu předpokládáme, že je magnetický tok v celé smyčce konstantní a průřez ve vzduchové mezeře je rovný průřezu v jedné části magnetického obvodu.

$$\phi = B * A \quad (5.7)$$

Rovnice pro výpočet magnetického obvodu:

$$U_m = R_m * \phi \quad (5.8)$$

Rovnice popisující celý magnetický odpor jednoho elektromagnetu je složena z magnetického jádra odporu R_{Fe} a magnetického odporu vzduchové mezery R_A :

$$R_m = R_A + R_{Fe} \quad (5.9)$$

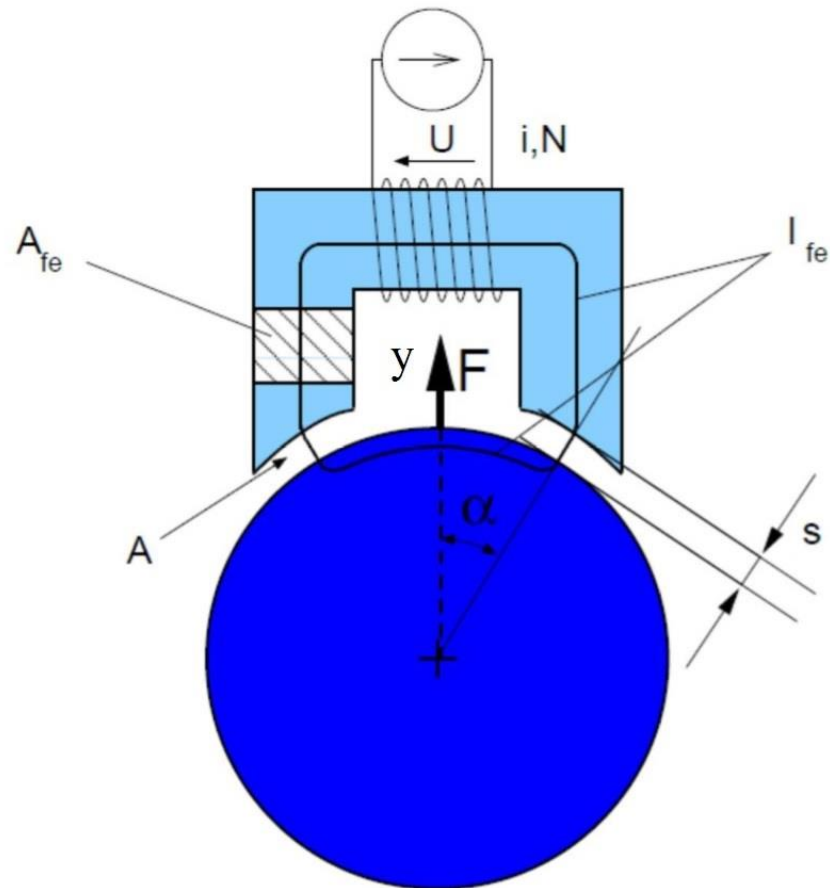
Velikost magnetického toku ϕ [Wb] je rovna součinu magnetické indukce B [T] a velikosti vzduchové mezery A :

$$N * \phi = L * I \quad (5.11)$$

Obecný vztah pro výpočet indukčnosti, do kterého použijeme předešlé vztahy (5.3) a (5.9):

$$L = \frac{N^2}{R_m} \quad (5.12)$$

K určení velikosti magnetického toku potřebujeme znát indukčnost cívky a maximální velikost protékajícího proudu, které známe ze vztahů (5.4) a (5.12).



Obr. 21 jeden magnetický obvod (dva póly)

Obvod lze rozdělit na dvě části, jedna část je ve vzduchové mezeře a druhá část je ta, která prochází magnetickým materiálem. Pak můžeme dosadit do Ampérova zákona:

$$N * I = H * l + H_A * 2s \quad (5.13)$$

H_A je intenzita magnetického pole ve vzduchové mezeře, s je velikost vzduchové mezery.

Po dosazení do předešlých výpočtů dostaneme vzorec pro magnetickou indukci:

$$B = \mu_0 \frac{N * I}{\left(\frac{l}{\mu_r} + 2s\right)} \quad (5.14)$$

Budeme-li předpokládat vysokou relativní permeabilitu feromagnetika je

$$\frac{l}{\mu_r} \cong 0 \quad (5.15)$$

a pak tedy upravený vzorec:

$$B = \mu_0 \frac{N * I}{2A} \quad (5.16)$$

Buď přepočtením energie v mezeře pak lze dostat vztah pro sílu od pólu:

$$F = \frac{B^2 * A}{\mu_0} \quad (5.17)$$

Velikost úhlu, pod kterým je síla vyvozená, můžeme vypočítat z počtu pólů. Musíme zde předpokládat, že máme póly se stejnou velikostí, které jsou rovnoměrně umístěné podél celého obvodu, a cívky mají stejný počet závitů:

$$\alpha = \frac{360^\circ}{2 * n} \quad (5.18)$$

Velikost vzduchové mezery A je závislá na souřadnici y konstantním úhlu α , který odpovídá našemu konstrukčnímu řešení jádra elektromagnetu:

$$A = \frac{y}{\cos \alpha} \quad (5.19)$$

Nebo dosadíme indukci do vzorce a síla nám pak vyjde :

$$F = k * \frac{I^2}{A^2} * \cos \alpha \quad (5.20)$$

kde k je konstanta:

$$k = \frac{1}{4} * \mu_0 * N^2 * A \quad (5.21)$$

U 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 podle vztahu:

$$F_x = F_{x,0} + F_{x,s} * \cos(\omega * t) \quad (5.22)$$

F_x je síla ve směru osy x , statická složka je $F_{x,0}$ a dynamická složka síly, která působí ve směru osy x je $F_{x,s}$.

Síla, která působí ve směru osy y , je obdobná:

$$F_y = F_{y,0} + F_{y,s} * \cos(\omega * t) \quad (5.23)$$

kde F_y je síla ve směru osy y , $F_{y,0}$ je statická složka a $F_{y,s}$ dynamická složka síly působící ve směru osy y .

Pro n -tou cívku pak platí vztah:

$$N_n * I_n = I_{B,n} + I_{x,n} * (F_{x,0} + F_{x,s} * \cos(\omega * t)) + I_{y,n} * (F_{y,0} + F_{y,s} * \cos(\omega * t)) \quad (5.24)$$

výpočet pro střední hodnotu:

$$|N_n * I_n| = \sqrt{(I_{B,n} + I_{x,n} * F_{x,0} + I_{y,n} * F_{y,0})^2 + 0,5 * (I_{x,n} * F_{x,s})^2 + 0,5 * (I_{y,n} * F_{y,s})^2} \quad (5.25)$$

podmínka, která musí platit, při výpočtu střední hodnoty:

$$|N_n * I_n| \leq f_c * I_{max} * L_c \quad (5.26)$$

I_{max} je maximální proud, který může protékat plochou vodiče. Ten je u měděných vodičů 6A/mm^2 . L_c je velikost průřezu cívky a f_c je faktor využití průřezu cívky.

Pro L_c značící plochu cívky platí vztah:

$$L_{c,n} \geq \frac{\sqrt{(I_{B,n} + I_{x,n} * F_{x,0} + I_{y,n} * F_{y,s})^2 + 0,5 * (I_{x,n} * F_{x,s})^2 + 0,5 * (I_{y,n} * F_{y,s})^2}}{f_c * I_{max}} \quad (5.27)$$

[26], [27], [28]

6 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo uvést rozdělení jednotlivých magnetických ložisek, popsat jejich princip, jaké mají výhody oproti ložiskům valivým a kluzným, a nakonec specifikovat návrh jednoho ložiska.

Na začátku práce je uveden stručný popis historie od první myšlenky, až k její realizaci a využití v různých odvětvích. Dále bylo obecně popsáno magnetické ložisko, jeho složení a výhody a nevýhody, které přináší.

Další kapitola obsahuje popis pasivního magnetického ložiska. Je zde také popsán Meissnerův jev, na jehož principu pracují ložiska se supravodiči. Nechybí zde ani popis ložisek s permanentními magnety, které nejsou tak využívány v praxi.

V 3. kapitole je popsáno aktivní magnetické ložisko a v práci je mu věnována nejdelší část hlavně díky tomu, že je v dnešní době nejvíce využíváné. Především se věnuji popisu jeho rozdělení podle druhu směru zatížení. Dále je zde popsán řídicí a snímací systém ložiska, bez kterého by se aktivní magnetické ložisko neobešlo. Velká pozornost je také věnována snímačům, jejich principům a rozdělení.

Předposlední kapitola je věnovaná porovnání a základním rozdílům mezi a) magnetickými a valivými a b) magnetickými a kluznými ložisky.

Poslední kapitola se zabývá specifikací návrhu aktivního magnetického ložiska, popisem vhodného materiálu a následně vlastnostmi tohoto materiálu. Je zde návrh statoru, jakožto hlavní části aktivního magnetického ložiska, také to, co je třeba znát před samotným návrhem a obecné výpočty nezbytné pro jeho sestavení a zrealizování.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] HARRIS, Tim, WIDBRO, Linda, Magnetic bearings – a new world opens for design engineers. In WorldPumps, 2003.
- [2] Pesar, J. – Aerostatická, aerodynamická a magnetická ložiska, [online], Ústav konstruování, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně 2008 [cit. 17.2.2016], Dostupné z http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=647
- [3] Šamánek, O., Magnetická Ložiska, [online], UK FSI VUT v Brně, [cit. 10.2.2016] Dostupné z http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=531
- [4] SCHWEITZER, G., BLEULER, H., TRAXLER, A., Active Magnetic Bearings, Vdf Hochschulverlag 1994, ISBN 3 7281 2132 0.
- [5] JAYAWANT, B., V., Electromagnetic Levitation and Suspension Techniques. London, E. Arnold Ltd
- [6] By Piotr Jaworski, PioM EN DE PL, POLAN/Poznań - Inspiration Image EXPULSION.png, Domena publiczna
- [7] EARNSHAW., S., On the Nature of the Molecular Forces. Trans. Cambridge Philosophical Society, 1842.
- [8] Nagaya, S., Kashima, N., Kawashima, H., Kakiuchi, Y., Hostino, A., Isobe, S., Development Of The Axial gap type motor/generator for the fly wheel with superconducting magnetic bearings, Physica C., Superconductivity, 2003.
- [9] KUMMETH, P., et al. development of superconducting magnetic bearings. In Elsevier. Physica C., 2002.
- [10] Demachi, K., Masaie, I., Ichihara, T., Kita M., Rotation speed degradation of superconducting magnetic bearing made of unsymmetrical shaped YBCO bulks, Physica C.: Superconductivity, Volumes 426-431, Part 1, 1 October 2005, Pages 826-833.
- [11] Matveev, V., Nizhelskiy, N., Poluschenko O., Force and stiffness characteristics of superconducting bearing prototype, Physica C., Superconductivity, 2004.
- [12] Masaie, I., Demachi, K., Matsunaga, K., Uesaka M.: numerical evaluation of rotation speed degradation of SMB in the 100 kW h superconducting flywheel, Physica C: Superconductivity, 2004.
- [13] YANG, Xu, et al. Design aspects and achievements of active magnetic bearing research for HTR-10GT. In Elsevier. Nuclear engineering and design. 2008.
- [14] MASLEN, Eric. Magnetic bearings, [online], Charlottesville, Virginia: University of Virginia; Department of Mechanical, Aerospace and Nuclear Engineering, 2000,

- [cit. 20.10.2015], Dostupné z
http://people.virginia.edu/~ehm7s/courses/magnetic_bearings/mag_brgs.pdf
- [15] BURDET, L., Active magnetic bearing design and characterization for high temperature applications, [online], Lausanne: EPFL, École polytechnique fédérale de Lausanne, 2006, [cit. 5.10.2015], Dostupné z
http://biblion.epfl.ch/EPFL/theses/2006/3616/EPFL_TH3616.pdf
- [16] SCHWEITZER, G., MASLEN, E., Magnetic bearings: Theory, Design and Application to Rotating Machinery, Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 2009. ISBN 978-3-642-00496-4.
- [17] Tim Harris, Magnetická ložiska SKF, [online], SKF GROUP 2005, [cit. 31.8.2015], Dostupné z <http://www.odbornecasopisy.cz>
- [18] SKF GROUP, Katalog ložisek [online], SKF GROUP 2016, [cit. 13.5.2016], Dostupné z <http://www.skf.com>
- [24] AUTOMATIZACE, Antonín Vojáček, [cit. 5.4.2017], Dostupné z
<http://automatizace.hw.cz/komponenty-mereni-a-regulace/bezkontaktni-kapacitni-senzory-priblizeni-obecny-popis.html>
- [25] ZEHNULA, K. Čidla robotů, 1. vyd. Praha: SNTL, 1990. 370 s. Automatizace a robotizace, ISBN 80-03-00563-9
- [21] TRAXLER, Alfons a Roland SIEGWART, MECOS TRAXLER AG. Active Magnetic Bearings: Basic and Applications. Winterthur, Switzerland, 1994.
- [22] C. R. Knospe, "Active magnetic bearings for machining applications," Control Eng. Pract., 2007.
- [23] L. Li. "On-line tuning of AMB controllers using genetic algorithms". in Proc. 6th Int. Symp. Magnetic Bearings. Cambridge, MA: Mass. Inst. Technol., 1998.
- [24] Hysterezní Křivka, [cit. 21.5.2016], dostupné z
https://cs.wikipedia.org/wiki/Hysterezn%C3%AD_k%C5%99ivka
- [25] Zureks – Vlastní dílo, CC BY-SA 3.0, [cit. 3.6.2016], Dostupné z
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=797050>
- [26] Prof. Y. PERRIARD, Prof. R. SIEGWART, Dr B. AESCHLIMANN, Prof. G. SCHWEITZER, Prof. H. BLUELER, Active Magnetic Bearing Design and Characterization for High Temperature Applications, [cit. 23.11.2016], dostupné z
<http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5691177/>
- [27] BARTOŇ, Lukáš. Znalostní podpora pro návrh systému aktivního magnetického ložiska, Západočeská univerzita v Plzni, [cit. 14.3.2017], Dostupné z

<https://otik.uk.zcu.cz/handle/11025/5835>

[28] PAVEL MACEK, Návrh a Analýza Elektromagnetu, [cit. 19.5.2017], dostupné z

https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39665