

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: P2301 **Strojní inženýrství**
Studijní obor: 2302V019 **Stavba strojů a zařízení**

DIZERTAČNÍ PRÁCE

Znalostní podpora pro návrh systému aktivního magnetického ložiska

Autor: Lukáš BARTOŇ

Vedoucí práce: Doc. Ing. Jaromír HORÁK, CSc.

Akademický rok 2011/2012

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne: 30. 3. 2012

Lukáš Bartoň

Anotace:

Předkládaná dizertační práce se zabývá shromážděním báze znalostí o magnetických ložiskách, porovnání způsobů uložení rotorů s důrazem na uložení v magnetickém poli. Práce popisuje jednotlivé části systému aktivního magnetického ložiska, které lze využít při tvorbě znalostního systému. Hlavní část práce je věnována návrhu metody postupu výpočtů pro aktivní radiální heteropolární magnetické ložisko. Výpočty se především týkají návrhu rotoru a statoru a výpočtu nosné síly. V závěru je popsán výběr materiálu pomocí materiálové databáze a popsán testovací znalostní aplikace, vytvořená na základě návrhu výpočtů z této práce.

Annotation:

This thesis is concerned with assembling a knowledge base about magnetic bearings. It compares way of mounting rotors with the accent on mounting in a magnetic field. This thesis describes individual parts of magnetic bearings systems and this knowledge can be used for a knowledge system. The main part of the thesis deals with the proposal of a computational method for active radial heteropolar magnetic bearings. The computational method is mainly about the stator, rotor and calculation of supporting force. The thesis concludes with a section about selection of materials and about the testing knowledge application based on the computations described in this thesis.

OBSAH

0.	Úvod a cíle práce.....	6
1.	Druhy uložení:	7
1.1.	Kluzná ložiska.....	7
1.2.	Valivá ložiska	7
1.3.	Hydrostatická ložiska (HSL).....	8
1.4.	Hydrodynamická ložiska (HDL).....	9
1.5.	Uložení v magnetickém poli	10
1.5.1.	Ložiska s permanentními magnety.....	11
1.5.2.	Diamagnetická ložiska (typ 4)	13
1.5.3.	Supravodivá ložiska (typ 4).....	14
1.5.4.	Aktivní magnetická ložiska (AML).....	17
1.5.5.	Hybridní ložisko	22
2.	Části systému aktivního magnetického ložiska	23
2.1.	Senzory.....	23
2.1.1.	Indukční senzor	24
2.1.2.	Kapacitní.....	25
2.1.3.	Optický.....	25
2.1.4.	Magnetostatický	26
2.1.5.	Porovnání senzorů.....	26
2.2.	Řízení a řídicí jednotka	28
2.3.	Zesilovač	29
2.4.	Ztráty v ložisku	31
2.4.1.	Ztráty hysterezí.....	31
2.4.2.	Ztráty vířivými proudy	31
2.4.3.	Ztráty odporem prostředí.....	32
2.4.4.	Jouleovy ztráty	33
3.	Pevnostní výpočet rotoru.....	34
4.	Výpočet nosnosti radiálního heropolárního ložiska – návrh statoru	41
4.1.	Osmipólové ložisko	46
4.2.	Dvanáctipólové ložisko.....	50
4.3.	Šestnáctipólové ložisko	54

4.4.	n-pólové ložisko.....	58
4.5.	Zesílení a tuhost ložisek.....	67
5.	Velikost ložiska.....	69
6.	Saturace.....	73
7.	Výběr materiálu pro aktivní magnetické ložisko	76
7.1.	Výběr materiálu vhodných magnetických vlastností.....	77
7.2.	Materiál rotoru - zohlednění meze kluzu.....	80
7.3.	Výběr perspektivních materiálů	80
7.4.	Materiál cívký	82
8.	Vlastní znalostní systém pro návrh AML.....	85
8.1.	Výběr programu	87
8.1.1.	Výběr varianty:.....	87
8.2.	Popis jednotlivých částí tvorby programu:	87
8.2.1.	Úvod.....	87
8.2.2.	Rotor.....	88
8.2.3.	Rozměry ložiska.....	92
8.3.	Ověření výsledků aplikace	94
9.	Závěr	96
9.1.	Zhodnocení a doporučení na pokračování.....	98
10.	Zdroje a použitá literatura.....	99

0. ÚVOD A CÍLE PRÁCE

Předkládaná dizertační práce v první a druhé kapitole obsahuje rešerši současného stavu. První kapitola se týká druhů uložení rotorů obecně. Druhá kapitola se týká popisu systému aktivního magnetického ložiska. Některé údaje popsané v kapitole dvě mohou již být součástí znalostního systému. Třetí až devátá kapitola je již samostatnou prací, která popisuje postupy a výpočty pro znalostní podporu pro aktivní heteropolární radiální magnetické ložisko. Záměrem celé práce je splnění následujících pěti dílčích cílů:

Cíl 1 – Vytvoření báze znalostí o systémech aktivních magnetických ložisek. Popsání jednotlivých stavebních prvků systému a zmapování aktuálního stavu. Popis užívaných uložení s důrazem na uložení v magnetickém poli.

Cíl 2 – Vytvoření výpočtového postupu při návrhu aktivního radiálního heteropolárního magnetického ložiska.

Cíl 3 – Vytvoření základní verze jednoduché výpočtové aplikace, která bude „user friendly“ a s jejíž pomocí lze navrhnout parametry rotoru a statoru pro ložiska do šestnácti pólů.

Cíl 4 – Ověření správnosti výpočtů a funkčnosti aplikace.

Cíl 5 – Analýza používaných materiálů pro magnetická ložiska a případný návrh nových materiálů.

1. DRUHY ULOŽENÍ:

V současnosti existuje několik způsobů uložení rotoru:

- kluzná ložiska
- valivá ložiska
- hydrostatická, aerostatická ložiska
- hydrodynamická, aerodynamická ložiska
- uložení v magnetickém poli

1.1. KLUZNÁ LOŽISKA

Kluzná ložiska představují levnější a konstrukčně nejjednodušší uložení hřídele s nejmenšími nároky na prostor, za cenu vysokých ztrát třením. Poskytují snadnou montáž s přesným uložením hřídele a až extrémně vysokou zátěžovou nosnost. Jsou schopná tlumit rázy a vibrace a dají se použít i při extrémních teplotách, s ohledem na mazivo. Jsou vysoce chemicky odolná a korozivzdorná. Ložiska s tekutým mazivem, povětšinou bronzová pouzdra, vyžadují dostatečné a kvalitní mazání. Ložiska s pevným mazivem, povětšinou bronzová pouzdra s grafitovými hnízdy, už přívod maziva nepotřebují. Pouzdra z kompozitu nevyžadují žádný způsob mazání a spolu s pouzdry s pevným mazivem je lze použít tam, kde je vyžadován provoz bez údržby a kde může dojít k nedostatečnému mazání.

1.2. VALIVÁ LOŽISKA

Valivá ložiska s ocelovými elementy jsou v současné době jedním z nejpoužívanějších druhů uložení. Jsou díky hromadné výrobě levná, s relativně malým třením, dostatečně přesná na uložení hřídele bez vůle, poskytují vysokou nosnost a v závislosti na typu ložiska a jeho průměru mohou dosahovat až 100 000 otáček za minutu. Jsou však náročná na mazání, obzvláště při vysokých otáčkách, při vysoké změně teploty se změní jejich kinematika, jsou náročná na těsnící systém proti nečistotám zvenčí, netlumí vibrace a rázy. Kuličková ložiska nezajišťují vysokou tuhost rotoru.

Pro zlepšení tlumení vibrací a rázů lze zkombinovat valivé ložisko s hydrostatickým, popřípadě s hydrodynamickým ložiskem.

Pro zlepšení vlastností ložiska lze nahradit ocel keramickými materiály a to buď v celém ložisku (celokeramická), v rotačních elementech (hybridní) nebo v jednom z jeho elementů.

Celokeramická ložiska jsou vyrobena povětšinou z nitridu křemíku (Si_3N_4). Mají vyšší tvrdost, vyšší pevnost v tlaku, nižší součinitel tření, nižší hmotnost, nižší teplotní roztažnost a vyšší cenu než ocelová ložiska. Hybridní ložiska mají kroužky z ložiskové ocele a valivá tělesa z nitridu křemíku. Měrná hmotnost nitridu křemíku dosahuje 40% hodnoty ložiskové ocele. Díky tomu a lepším pevnostním vlastnostem lze vyrobit ložisko s menšími rozměry a hmotností, tím pádem menší setrvačností, což dává možnost použití při vyšších otáčkách. Keramická ložiska lze vyrobit s těsněním a s náplní plastického maziva, které vydrží celou dobu trvanlivosti a není třeba dalšího mazání. V ocelovém ložisku lze vyměnit jen jeden z elementů za keramický, který následně slouží k čištění dráhy a ložisko je schopno pracovat v horších podmínkách.

Tabulka srovnání mezních otáček podle valivého elementu dle [3]:

ložisko	průměr [mm]	mezní otáčky [1/min]	maximální obvodová rychlost [m/s]
jednořadé kuličkové ložisko	20	28 000	30
dvouřadé kuličkové ložisko	20	13 000	13,6
jednořadé kuličkové ložisko s kosoúhlým stykem	20	19 000	20
dvouřadé kuličkové ložisko s kosoúhlým stykem	20	14 000	14,6
válečkové ložisko	20	19 000	20
jehličkové ložisko	20	22 000	23
soudečkové ložisko	20	17 000	18
hybridní ložisko s těsněním a s náplní plastického maziva	20	32 000	33,5

1.3. HYDROSTATICKÁ LOŽISKA (HSL)

[2] Hydrostatická ložiska jsou plně zatížitelná i při nulových otáčkách, což je zajištěno externím zdrojem tlakového média. Nosná síla ložiska nezávisí na viskozitě maziva ani na kluzné rychlosti. Protože u hydrostatických ložisek nedochází k žádnému kontaktu hřídele a pouzdra, vykazují nulové opotřebení. Další výhodou těchto ložisek je tichý chod, který zajišťuje olejová vrstva tlumící kmitání. Tuhé uložení je zajištěno obvodově předepnutým čepem. Volbou vyhovujících parametrů HSL lze dosáhnout vysoké energetické účinnosti. Při provozu nezáleží na smyslu kluzné rychlosti a ložiska jsou vhodná pro častý rozběh a doběh.

Naproti tomu potřeba hydraulického obvodu zvyšuje pořizovací náklady, hydrostatická ložiska jsou konstrukčně složitá, jejich údržba je komplikovaná a vykazují poměrně vysokou poruchovost.

Při konstrukci hydrostatických ložisek se dbá zejména na vysokou únosnost, tuhost a tlumení. Při výpadcích dodávky tlakového oleje přechází HSL téměř okamžitě do hydrodynamického režimu a následně může i dosednout na stěnu pouzdra, což většinou vede ke kolizi systému. Proto je nutno zajistit systém nevázaný na tento výpadek. HSL nacházejí uplatnění především u vysokorychlostních obráběcích strojů, dle [5] lze dosáhnout až 30 000 ot./min.

Aerostatická uložení [5] využívající jako nosné médium vzduch mohou být použita v rozsahu otáček 10 000 až 200 000 min⁻¹. Jsou však vhodná pouze pro malé průměry a malé silové zátěže. Nesnesou ani krátkodobá silová přetížení.

1.4. HYDRODYNAMICKÁ LOŽISKA (HDL)

Základní typ hydrodynamického ložiska s kruhovým průřezem je konstrukčně jednoduché a levné řešení uložení. S požadavkem větších otáček se ale musí volit složitější tvary průřezů (víceplochá ložiska), jejichž kluzná plocha se skládá ze dvou nebo více kluzných ploch. Tyto plochy mohou být nepohyblivé (fixní geometrie), nebo jsou v případě ložisek s naklápěcími segmenty pohyblivé. Zlepšení vlastností HDL změnou geometrie je výrobně složitější a z toho plyne i výrazně vyšší cena.

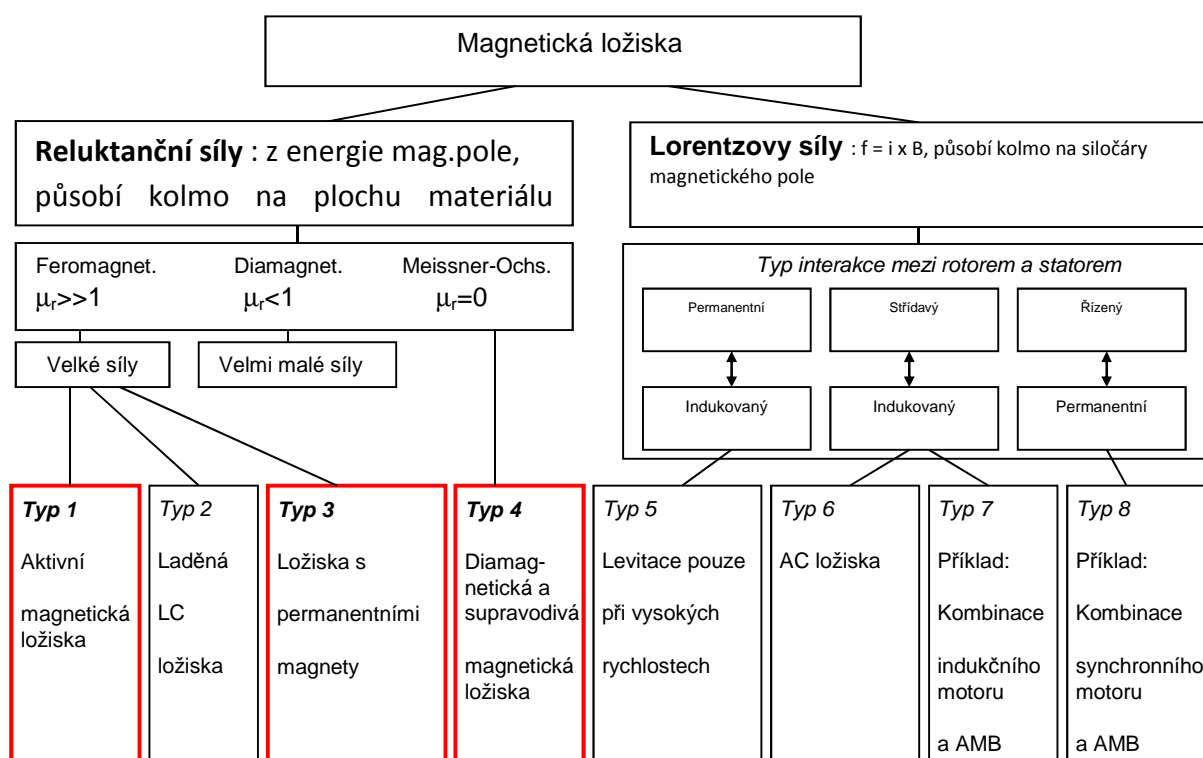
Dle [4] základním atributem všech ložisek pro rychloběžné aplikace je tzv. předpětí, které vzniká posunutím středu křivosti kluzných ploch mimo střed ložiska (např. u citronového ložiska ve svislém směru, u přesazeného ložiska ve vodorovném směru). Tím v ložisku vzniká síla, která působí na čep směrem do středu ložiska i v případě, že se čep nachází ve středu ložiska. Na rozdíl od ložiska kruhového průřezu, které má nulové předpětí a v němž je tedy středová poloha čepu nestabilní, v ložiskách s předpětím mohou pracovat rotory i při svislé ose rotace, kdy nejsou ložiska zatížena statickou silou a střed čepu je proto ve středové poloze. Ložiska s fixní geometrií mohou dosahovat 10 000 ot. min⁻¹ a otáčky ložiska s naklápěcími segmenty jsou omezené max. teplotou v olejovém filmu [4]. Velkou nevýhodou hydrodynamických ložisek je nemožnost zatížení při nulových nebo velice malých otáčkách. Nejsou vhodná pro velký otáčkový rozsah a jsou citlivá na vzrůstající teplotu [6].

Aerodynamická ložiska mají větší problémy se stabilitou, než hydrodynamická. Je to dáno dynamickou viskozitou plynů, která je ve srovnání s oleji o tři řády nižší. Ložiska tak mají velmi malou únosnost, nízkou tuhost a útlum. Aerodynamická ložiska s jednoduchou fixní geometrií jsou velmi těžko použitelná. Využití mají hlavně ložiska

s naklápěcími segmenty. Na rozdíl od ložisek mazaných kapalinou, kde je vůle v ložisku dána přesností výroby všech dílů, u aerodynamických ložisek je nutným předpokladem úspěšné funkce ložiska možnost nastavení vůle při montáži a určitá samoregulační schopnost. Díky malým tlumícím účinkům není možné přejíždět kritické otáčky rotoru [4].

1.5. ULOŽENÍ V MAGNETICKÉM POLI

Uložení v magnetickém poli odstraňuje jednu z největších nevýhod typů uložení – existenci mechanického nebo zprostředkovaného (tekutinou s vysokou viskozitou) kontaktu mezi vzájemně se pohybujícími částmi ložiska. Přestože je fyzikální příčina magnetismu stejná, mohou být magnetická ložiska rozdělena do dvou skupin: ložiska založená na Lorentzových silách (elektrodynamická) a na ložiska založená na reluktančních silách (ložiska s permanentními magnety, elektromagnety a supravodivá ložiska) [7]:



Dále je možno ložiska rozdělit podle zdroje magnetického pole na:

- aktivní
- pasivní
- hybridní.

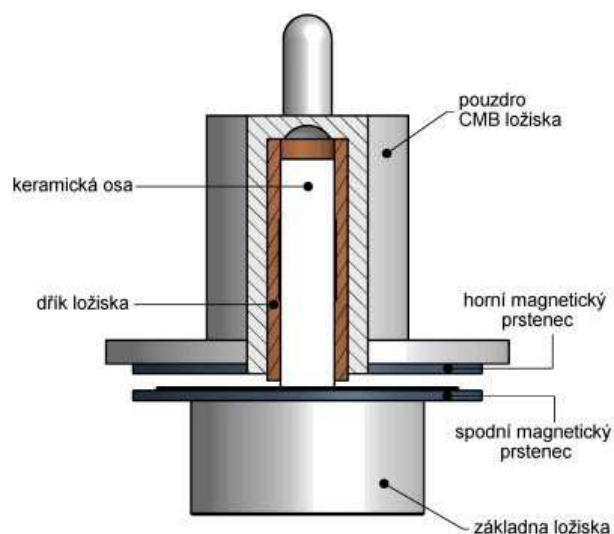
Aktivním ložiskem se rozumí systém vybavený zpětnou vazbou, který je schopen cíleně přizpůsobit svoje chování (proud, napětí, magnetický tok) tak, aby eliminoval výchylku levitujícího tělesa z požadované polohy. Pasivním ložiskem se rozumí systém, který tohoto chování schopen není. Hybridním pak kombinace obou přístupů.

Ložiska založená na reluktančních silách (typ 1 až typ 4) lze pak rozdělit podle chování rotoru v magnetickém poli a to je-li:

- rotor magnetickým polem přitahován
- rotor magnetickým polem odpuzován.

1.5.1. LOŽISKA S PERMANENTNÍMI MAGNETY

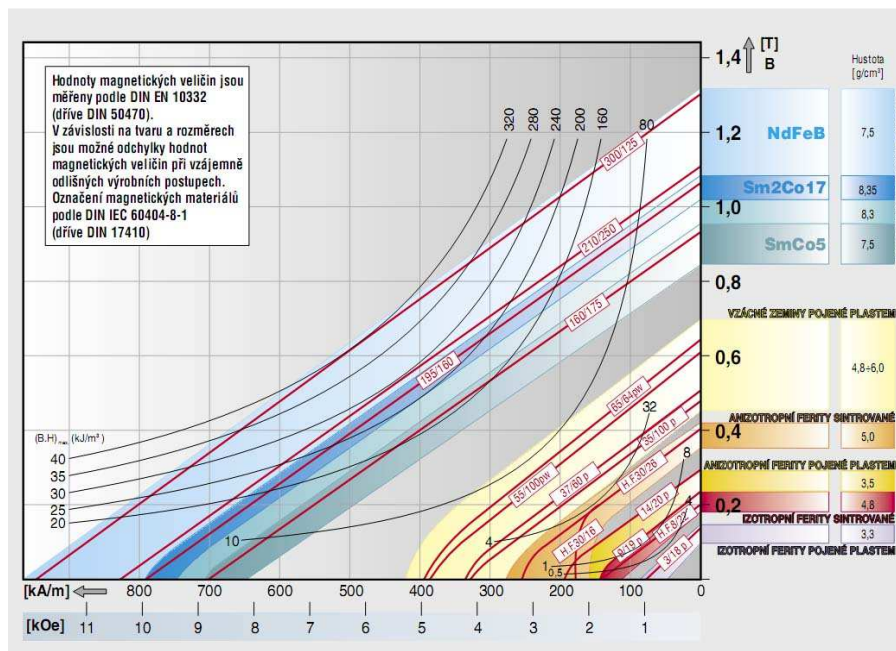
Jedná se o typ 3. Permanentní magnety jsou součástí rotoru i statoru a fungují na principu vzájemného odpuzování dvou shodných pólů od sebe. Výhodou použití permanentních magnetů je jednoduchý princip ložiska, nízká komplexnost zařízení a možnost generování velkých sil. Značnou nevýhodou byla vždy nízká tuhost a tlumení a neschopnost ložisek zajistit stabilní levitaci tělesa ve všech stupních volnosti. Magnetická ložiska musí tak být kombinována s jiným druhem ložisek, která jim zajistí stabilizaci.



Obr. 1.01 – gramofonový trn s keramicko-magnetickým ložiskem. [23]

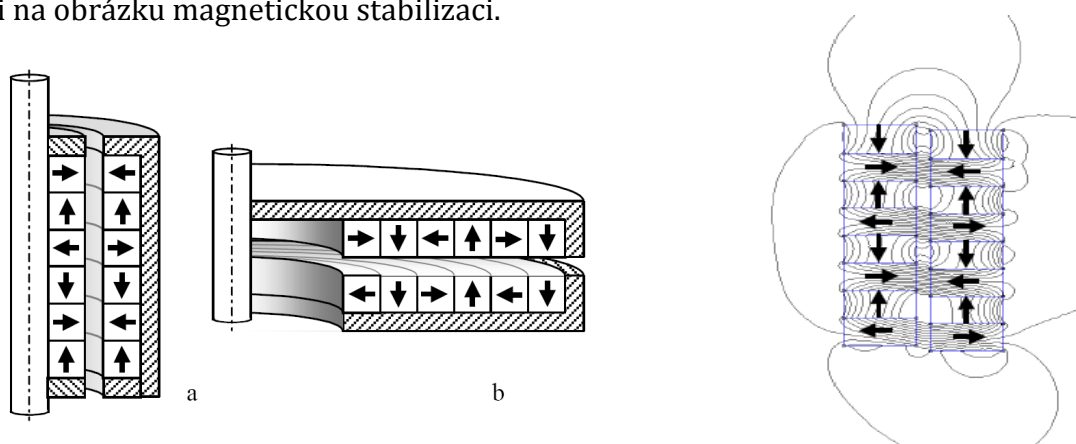
Kupříkladu keramicko-magnetické ložisko gramofonového trnu na obrázku. Dvě souosá magnetická pole se shodnou polarizací umístěná nad sebou se vzájemně odpuzují v malé homogenní vzduchové mezeře a nesou hlavní axiální zatížení. Svislá keramická osa dokonale zapadá do bronzového ložiska s olejem a slouží k radiální stabilizaci. Toto keramicko-magnetické ložisko v porovnání s ostatními ložisky pro gramofonové trny vykazuje jedno z nejnižších konstrukčně dosažitelných tření a nejnižší měřené úrovně rušení.

Nevýhodou ložisek s permanentními magnety byly malé síly od feritických magnetů. Zlepšení došlo s příchodem permanentních magnetů ze vzácných zemin, které jsou schopny generovat větší magnetické pole, než feritické magnety obr. 1.02.



Obr. 1.02 - graf závislosti remanentní magnetické indukce a koercitivní intenzity magnetického pole[13].

K řešení problému přispěl i fyzik Klaus Halbach, který v roce 1985 navrhl uspořádání permanentních magnetů, jímž docílil mimořádně silného magnetického pole. V polovině 90. let minulého století byla sestrojena první pasivní magnetická ložiska s Halbachovou soustavou permanentních magnetů [8]. Ta poskytují výrazně vyšší nosnost a jak je vidět i na obrázku magnetickou stabilizaci.



Obr. 1.03 – ložisko s permanentními magnety uspořádanými do Halbachova pole. Vlevo schéma, vpravo průběh magnetického pole. [24]

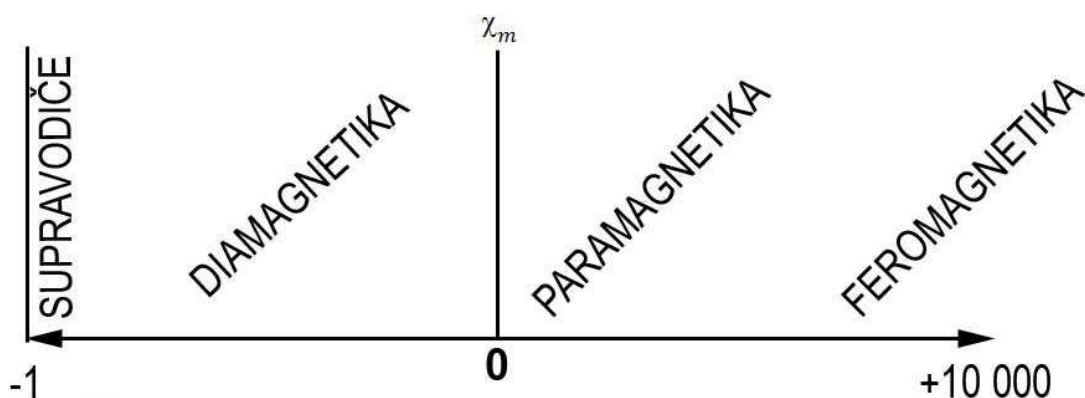
1.5.2. DIAMAGNETICKÁ LOŽISKA (TYP 4)

Některé materiály mají relativní permeabilitu menší než jedna. Jejich celková permeabilita je tak menší než permeabilita vzduchu (respektivě vakua). To způsobuje vypuzování magnetického pole z objemu materiálu. Na materiál tak působí síla s opačným směrem než je zdroj magnetického pole. Tato síla je přímo úměrná relativní permeabilitě a síle magnetického pole. Síla se vypočte ze vzorce:

$$\vec{f} \prec \frac{1}{2\mu_0} \chi_m \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(B^2)$$

Kde χ_m je relativní susceptibilita, což je bezrozměrná materiálová konstanta jejíž záporná hodnota určuje velikost „diamagnetizace“. Relativní susceptibilita je odvozená z relativní permeability.

$$\chi_m = \mu_r - 1$$



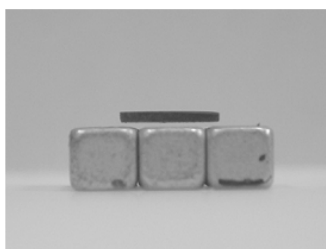
Obr. 1.04 - Graf přehledu magnetické vodivosti materiálů.

Tabulka s několika druhy diamagnetik:

materiál	$\chi_m (\times 10^{-6})$ [-]
voda	-9
bismut	-150
grafit	-160
pyrolitický grafit	-450
supravodič	-10^6

Tabulka přehledu některých diamagnetických materiálů. [25]

Z tabulky lze vidět, že materiál, který nejvíce vytlačuje magnetické pole ze svého objemu, je supravodič. Ty však zatím neexistují za pokojové teploty (viz následující kapitola). Nejsilnější známé a volně přístupné diamagnetikum za pokojové teploty je pyrolitický grafit. Výhodou diamagnetické levitace je, že lze v Halbachovo poli dostat stabilní magnetickou levitaci bez zdroje energie a bez chlazení. Nevýhoda je, že kupříkladu levitující disk o průměru 20mm unese zátěž pouze několik gramů. Diamagnetická ložiska tak nemají v průmyslu velké využití.



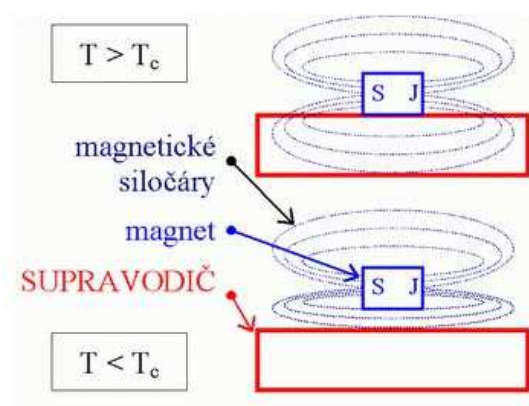
Obr. 1.05 – levitující diamagnetický disk z pyrolitického grafitu nad permanentními magnety. [25]

1.5.3. SUPRAVODIVÁ LOŽISKA (TYP 4)

[9] Jev supravodivosti objevil roku 1911 holandský fyzik Heike Kammerlingh Onnes. V roce 1908 se mu podařilo zkapalnit helium na teplotu 4 K. Při sledování odporu čisté rtuti pozoroval náhlé vymizení elektrického odporu při teplotě 4 K. Onnes sám prohlásil: „rtuť přešla do nového stavu, který na základě jeho neobyčejných elektrických vlastností

lze nazývat supravodivým stavem“. V roce 1913 obdržel za tyto objevy Nobelovu cenu. Do roku 1933 byly supravodiče považovány jen za látky s nulovým elektrickým odporem. Tohoto roku Walther Meissner a R. Ochsenfeld objevili, že supravodiče mají rovněž schopnost dokonale vytlačovat magnetické pole ze svého objemu. Tento jev se nazývá „ideální diamagnetismus“, nebo po svém objeviteli Meissnerův efekt.

[10] Meissnerův efekt (obr. 1.06) je vedlejším efektem supravodivosti. Je-li jakýkoliv vodivý materiál vložen do magnetického pole, vytváří se v materiálu vířivé proudy. Ty se v každém materiálu díky elektrickému odporu změny na teplo. Supravodič ale žádný odpor nemá a tak vířivé proudy v něm neustále kolují. Tyto vířivé proudy mají vlastní elektromagnetické pole opačné polarity, než pole, které je vygenerovalo. Po vložení do elektromagnetického pole brání v průniku siločar svým objemem. Díky tomu lze docílit efektu nazvaného zamknutí supravodiče v magnetickém poli. Získá-li materiál supravodivé schopnosti uprostřed magnetického pole, tak se brání nejen průniku siločar mezi ním a magnetem, ale i průniku siločar, které jdou nad ním. Magnetické pole ho pak drží na místě a poloha supravodiče je stabilizovaná. Zároveň mu umožňuje pohyb v poli se shodným potenciálem.



Obr. 1.06 – chování supravodiče v magnetickém poli. Nahoře za teploty větší, než je teplota kritická a dole za teploty nižší, než je teplota kritická. [9]a[22]

V roce 1960 byl materiál s nejvyšší teplotou přechodu do supravodivého stavu (tzv. kritickou teplotou T_c) slitina niobu a germania (Nb_3Ge) s $T_c = 23 \text{ K}$. V roce 1986 Georg Bednorz a Alex Müller, pracující v IBM v Curychu, připravili první z řady tzv. keramických supravodičů. Jimi připravený supravodič měl $T_c = 35 \text{ K}$. Následně byly připraveny další supravodiče tohoto typu s vyššími kritickými teplotami. Již rok nato byl

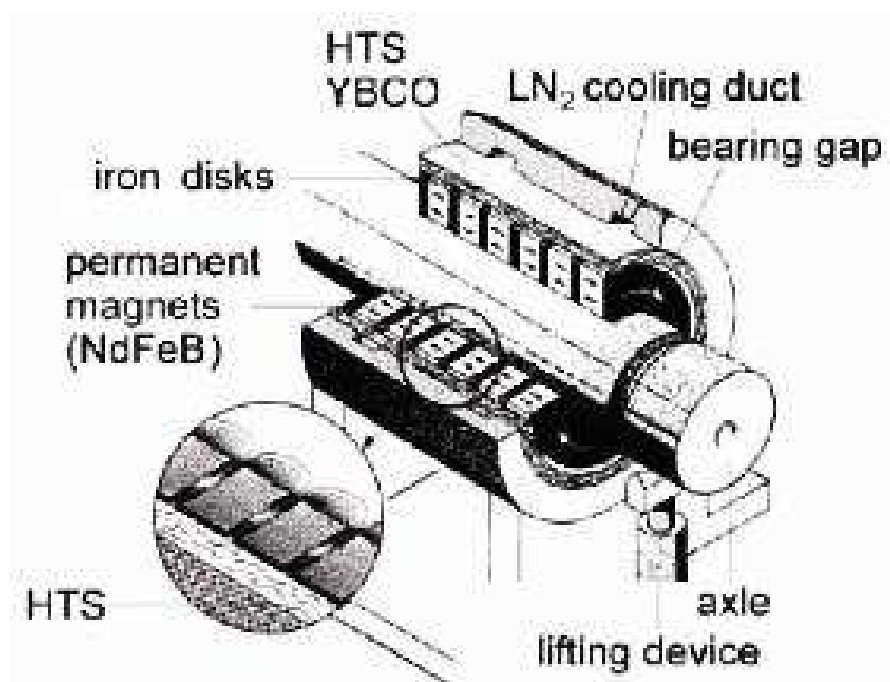
připravena látka s $T_c = 90$ K . Důležitost tohoto objevu vyplyne ze srovnání s teplotou kapalného dusíku, která je 77 K . Díky snadné dostupnosti a nízké ceně kapalného dusíku ve srovnání s kapalným heliem, bylo dosažení supravodivého stavu u těchto materiálů mnohem jednodušší. Tím byla zahájena éra tzv. „vysokoteplotních supravodičů“. Současná nejvyšší dosažená kritická teplota je 138 K.

Materiál	Kritická teplota
MgCNi ₃	08,0 K
Nb _{0,6} Ti _{0,4}	09,5 K
NbN	16,1 K
PuCoGa ₅	18,5 K
V ₃ Ga	14,5 K
Ta ₃ Pb	17,0 K
V ₃ Si	17,1 K
Nb ₃ Sn	18,1 K
Nb ₃ Si	19,0 K
Nb ₃ Ge	23,2 K
(La _{1,85} Ba _{1,15})CuO ₄	30 K
Pb ₂ (Sr,La) ₂ Cu ₂ O ₆	32 K
(La,Ba) ₂ CuO ₄	35-38 K
(La _{1,85} Sr _{0,15})CuO ₄	40 K
(La,Sr,Ca) ₃ Cu ₂ O ₆	45 K
GaSr ₂ (Y, Ca)Cu ₂ O ₇	70 K
La ₂ Ba ₂ CaCu ₅ O ₉₊	79 K
Sn ₂ Ba ₂ (Y _{0,5} Sr _{0,5})Cu ₃ O ₈	86 K
Yb _{0,9} Ca _{0,1} Ba _{1,8} Sr _{0,2} Cu ₄ O ₈	86 K
Y ₂ Ba ₄ Cu ₇ O ₁₅	93 K
TmBa ₂ Cu ₃ O ₇	90-101 K
Ca _{1-x} Sr _x CuO ₂	110 K
Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O ₉	110 K
Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	110 K
Bi _{1,6} Pb _{0,6} Sr ₂ Ca ₂ Sb _{0,1} Cu ₃ O _y	115 K
HgBa ₂ Ca _{1-x} Sr _x Cu ₂ O ₆₊	123 - 125 K
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₈	133 - 135 K
Hg _{0,8} Tl _{0,2} Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{8,33}	138 K

Tabulka přehledu supravodivých materiálů a jejich kritické teploty.[9]

Oproti pyrolitickému grafitu má supravodič mnohem větší nosnou sílu. Kotouč o průměru 20 mm unese břemena v řádech kilogramů, zatímco pyrolitický grafit jen

v řádech gramů. Pasivní magnetická ložiska na principu supravodivosti se již hodně používají například v setrvačnickových stanicích, kde lze očekávat ještě hojnější využití. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena supravodičů a vysoká provozní cena díky nutnosti chlazení tekutým dusíkem.



Obr. 1.07 – experimentální radiální ložisko se supravodiči od firmy Siemens. Součástí rotoru jsou permanentní magnety (NdFeB) s alternující orientací jejich magnetických pólů. Součástí statoru je válec ze supravodivého materiálu ($YBa_2Cu_3O_7$) s T_c při 123 K. Pro průměr magnetických nákrůžků 50 mm a šířku ložiska 50 mm byla zjištěna tuhost okolo 150 Nmm^{-1} . [11],[12]

1.5.4. AKTIVNÍ MAGNETICKÁ LOŽISKA (AML)

AML fungují na principu přitahování feromagnetického materiálu ke zdroji elektromagnetického pole. U jednoduchých aplikací axiálního ložiska, lze místo feromagnetického materiálu použít permanentní magnet, který zvýší nosnou sílu aktuátoru.

AML lze rozdělit na:

- radiální

- heteropolární
- homopolární
- axiální
- radiálně axiální

Oproti konvenčním ložiskům jsou magnetická ložiska náročnější na výrobu, náklady a prostor, přičemž nedosahují stejných nosných vlastností. Magnetická ložiska se nevyplatí navrhovat do běžných strojů, ve kterých mohou bez problémů fungovat běžná ložiska. Systémy s magnetickými ložisky se vyplatí navrhovat pro své speciální vlastnosti, které ostatní ložiska nemají.

Výhody AML:

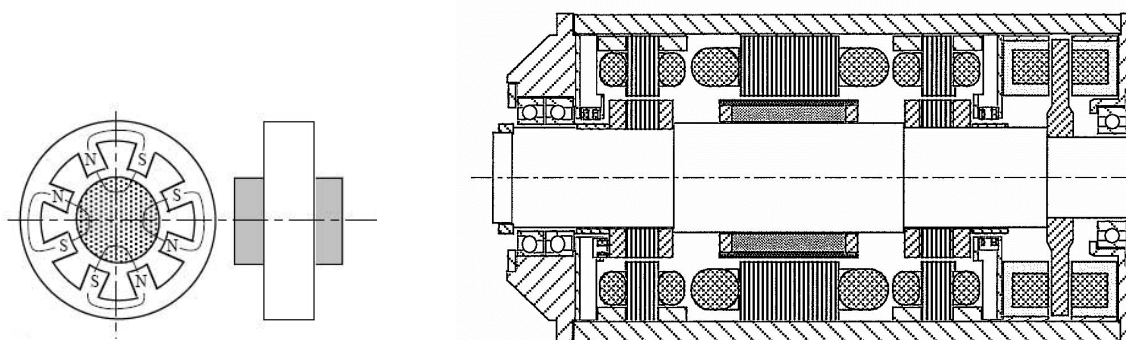
- vysoké otáčky rotoru ([1] dosažitelná obvodová rychlost až 300ms^{-1})
- vysoká přesnost uložení
- možnost pracování v různých podmínkách jako je podtlak (i vakuum), přetlak, ve znečištěném prostředí a různém rozsahu teplot
- tlumení vibrací a rázů, možnost změny tuhosti a tlumení rotoru za provozu
- 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 [15])
- neopotřebovávají se, nízké nároky na údržbu
- možnost vyosení rotoru a nechat rotor otáčet kolem své osy setrvačnosti – kompenzace nevyváženosti

Nevýhody AML:

- vysoká cena (zejména díky kusové výrobě)
- nároky na prostor pro celý systém AML
- nižší nosnost vztážená na plochu ložiska ([14] AMB – 40 Ncm⁻², hydrostatická ložiska – 300 Ncm⁻²).
- nežádoucí generování tepla ve statoru a rotoru díky vířivým proudům.
- nežádoucí zahřívání cívek statoru
- v případě poruchy některé části řídicí smyčky dojde k dosednutí rotoru na záchytná valivá ložiska, která v žádném případě nesplňují požadavky na ideální uložení rotoru
- aktivní magnetické ložisko je bez zpětné vazby nestabilní. Pokud se tedy během provozu změni parametry rotoru nebo ložiska, řídicí systém s pevnou strukturou a parametry nemusí reagovat adekvátně a může dojít ke ztrátě stability, a tím i k poškození některých částí zařízení.

1.5.4.1. RADIÁLNÍ HETEROPOLÁRNÍ AML

Jedná se o nejjednodušší a nejčastěji používané radiální AML. Magnetické pole se uzavírá mezi dvěma póly v příčném řezu na směr osy rotace rotoru. Na obr. 1.08 lze vidět uložení rotoru ve dvou radiálních ložiskách a jednom axiálním.

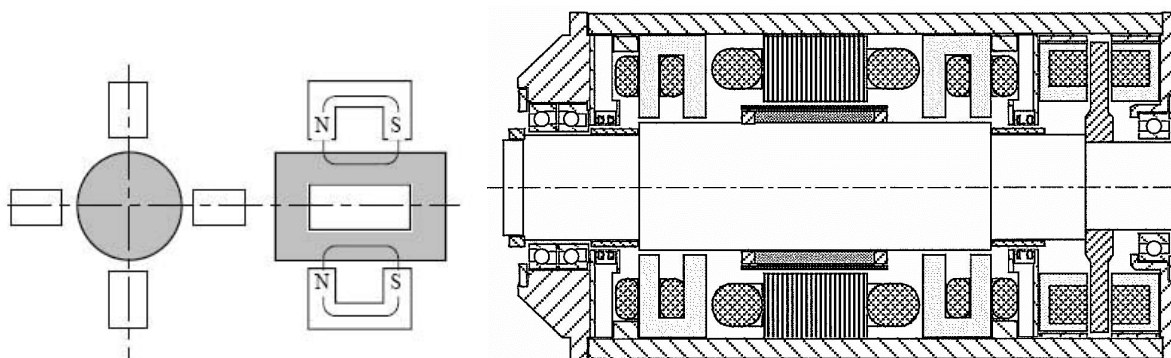


Obr. 1.08 – uložení hřídele v radiálních heteropolárních ložiskách. V pravé části uložení s axiálním ložiskem a ve středu s motorem. Po stranách záchytná kuličková ložiska. [1]

Uložení vřetena stroje lze navrhnout přímo i s pohonem, čímž odpadá spojka. Docílí se tak konstrukčně složitějšího ale dynamicky vyváženějšího návrhu. Dalším aspektem uložení jsou záchytná ložiska, která musí být schopna nahradit AML a zachytit rotor v případě poruchy magnetického ložiska. Záchytná ložiska jsou nejčastěji navrhována valivá kuličková. Záchytné ložisko není při běžném provozu nijak zatěžováno. Při větším vychýlení rotoru z rovnovážné polohy (v řádech desetin milimetrů), nebo při poruše magnetického ložiska, rotor dosedne na záchytná ložiska, kde dojde ke kontaktu stojícího kroužku záchytného ložiska a rotoru.

1.5.4.2. RADIÁLNÍ HOMOPOLÁRNÍ AML

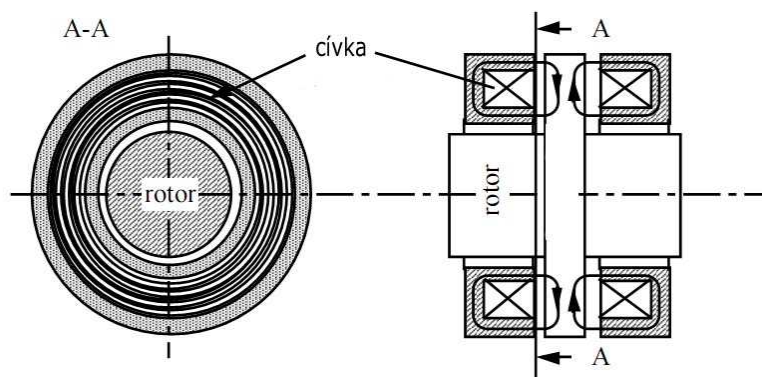
Jedná se o méně používanou variantu radiálních ložisek. Magnetické pole se uzavírá mezi jedním pólem v podélném řezu se směrem osy rotace rotoru. Na obr. 1.09 lze vidět uložení rotoru ve dvou radiálních ložiskách a jednom axiálním.



Obr. 1.09 – uložení hřídele v radiálních homoopolárních ložiskách. V pravé části uložení s axiálním ložiskem a ve středu s motorem. Po stranách záchytná kuličková ložiska. [1]

1.5.4.3. AXIÁLNÍ AML

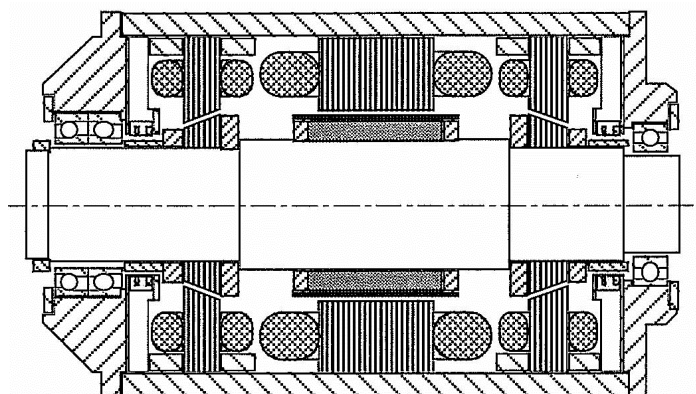
Axiální AML mají navinutou cívku po svém obvodu (obr. 1.10). Uložení ve stroji je možné vidět na obrázkách č. 1.08 a č. 1.09 v pravé části.



Obr. 1.10 – schéma axiálního ložiska.[1]

1.5.4.4. RADIÁLNĚ-AXIÁLNÍ AML

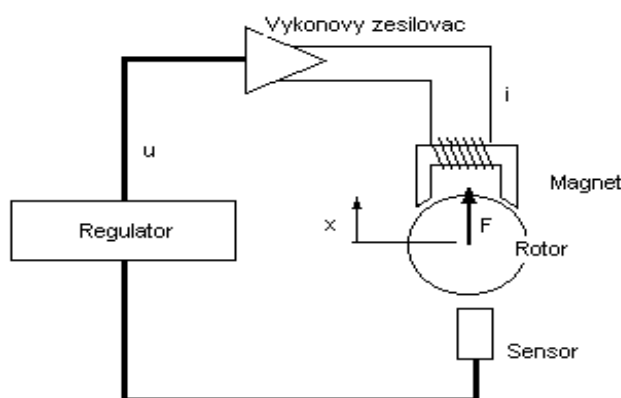
Radiálně-axiální AML vzniknou úpravou geometrie radiálních ložisek. Stejně jako radiální mohou být homopolární nebo heteropolární. Oproti použití řešení na obr. 1.08 má toto řešení menší nosnou sílu a je náročnější na řízení, protože radiální i axiální složka síly je řízena najednou. Pokud nepůsobí obě ložiska na hřídel stejně, na jedné straně rotoru je větší radiální výchylka, tak jedno AML způsobí nežádoucí axiální sílu, která musí být kompenzována druhým ložiskem.



Obr. 1.11 – uložení rotoru v radiálně-axiálních ložiskách. Uprostřed motor a po stranách záchytná kuličková ložiska.

2. ČÁSTI SYSTÉMU AKTIVNÍHO MAGNETICKÉHO LOŽISKA

Znalostní systém AML lze rozdělit na části shodné s částmi systému aktivního magnetického ložiska. AML je mechatronickým systémem. Jedná se o zařízení propojující odvětví strojního inženýrství, elektroniky a kybernetiky. Za strojní část lze označit na magnetickém ložisku uložení rotoru a statoru, prostorové řešení a částečně navržení zesilovače, zejména jeho nadimenzování. Hlavně touto částí se bude zabývat předložený znalostní program. Další části spadající spíše do oblasti elektroniky a kybernetiky jsou popsány pouze obecně, i když jsou s částí rotoru a statoru vzájemně propojeny. Jedná se především o senzory, řídicí jednotku a druh zesilovače.



Obr. 2.01- [14] Systém aktivního magnetického ložiska

2.1. SENZORY

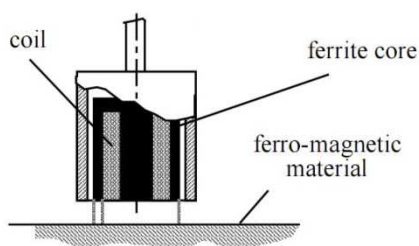
Senzor polohy je v systému magnetického ložiska důležitou součástí. Měří pozici rotoru a tento údaj podává řídicí jednotce. Nároky na senzor jsou vysoké. Senzor musí být bezkontaktní a musí fungovat v magnetickém poli nebo jeho blízkosti, při vysokých teplotách, nebo v prašném prostředí či vakuu. Senzor musí snímat polohu rotoru jak v klidu, tak při vysokých otáčkách a to s velmi velkou přesností a ve velmi krátkém čase. Velkou výhodou je, pokud má senzor lineární charakteristiku měření. Jeden z nejdůležitějších aspektů senzoru pro konstruktéra je i velikost a místo měření. Každý senzor má jiné nároky na umístění v systému ať už z hlediska prostoru a umístění do stroje, tak i z hlediska zajištění přesnosti měření.

Pro řízení magnetického ložiska je potřebujeme znát polohu rotoru v místě ložiska. Poloha senzoru je volena co nejbližší místu ložiska, aby docházelo k co nejmenším

chybám určení polohy. Z toho důvodu je nutné vybrat senzor, který je minimálně ovlivňován magnetickým polem od ložiska.

2.1.1. INDUKČNÍ SENZOR

Senzor je určen pro měření krátkých vzdáleností. Indukční senzory pracují na principu vysokofrekvenčního elektromagnetického pole, které je zatlumováno snímaným předmětem. U standardních indukčních senzorů je toto pole tvořeno LC rezonančním obvodem s jednou cívkou a feritickým jádrem. Kvůli feritickému jádru jsou indukční senzory silně ovlivnitelné magnetickým polem a jejich umístění blízko u ložiska je podmíněno odstíněním od magnetického pole. Lze je také úspěšně použít, pokud se frekvence měření sladí s frekvencí zesilovače. Nový princip tří-cívkového systému bez feritického jádra je již odolný vůči magnetickému poli, snímá vzdálenost všech kovů stejně jako oceli a lze kompenzovat rušivý vliv okolních kovů [18].



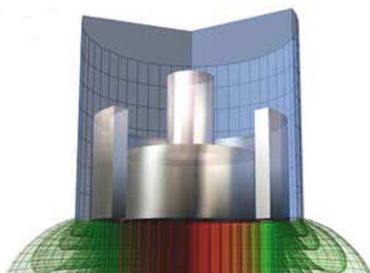
Indukční senzory jsou sériově vyzkoušené technologie, stabilní vůči okolnímu prostředí (nečistota, vlhkost) a nevyžadují údržbu. Mají kompaktní konstrukční provedení a dobrý poměr ceny k výkonu.

Obr. 2.02 – schéma principu indukčního senzoru. [1]

Jedním z nejvíce využívaných indukčních senzorů, hlavně díky ceně, je indukční senzor na základě vířivých proudů. Princip činnosti senzoru spočívá ve změně impedance cívky přiblížením kovového předmětu k jejímu čelu. Cívka je součástí LC oscilátoru, který po připojení napájecího napětí začne kmitat a vytvoří vysokofrekvenční elektromagnetické pole. Toto pole je soustředěno feritovým jádrem před aktivní plochu senzoru. V elektricky vodivém materiálu před aktivní plochou působením elektromagnetického pole vzniknou vířivé proudy. Ty mají rovněž za následek vznik elektromagnetického pole, které působí proti poli budící cívky a způsobuje změnu její impedance. Změna impedance cívky se projeví útlumem amplitudy oscilací.

Vysokou výhodou je velmi malá velikost senzorů, necitlivost vůči znečištění a velice dobrý poměr ceny k výkonu.

2.1.2. KAPACITNÍ



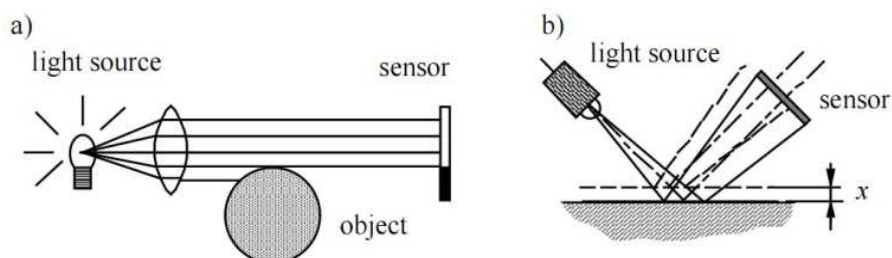
Obr. 2.03 – schéma principu kapacitního senzoru.[18]

Kapacitní senzory jsou zkonstruovány tak, že poloha rotoru ovlivňuje jejich kapacitní charakteristiku a tím pádem jsou schopny měřit jeho vzdálenost od senzoru. Tyto senzory nemají tak dobrý poměr ceny k výkonu jako indukční senzory, zato mají výjimečné měřicí vlastnosti. V měřícím rozsahu půl milimetru jsou schopny měřit s citlivostí dvou desetín mikrometru. Kapacitní senzor lze také umístit v části rotoru, která není magneticky ani elektricky vodivá. To má ale také vliv na kvalitu prostředí měření, které musí být čisté a suché. Oproti indukčním sensorům mohou ale pracovat i za vyšších teplot.

Při měření elektricky vodivých materiálů lze dosáhnout lineární charakteristiku měřícího signálu bez nutnosti dodatečné linearizace. Kapacitní senzory jsou citlivé na elektrostatický náboj rotoru, proto měřené objekty musí být uzemněny. Při použití dvou kapacitních senzorů není nutné měřený rotor uzemňovat. Toto je velkou výhodou hlavně u rotorů pro magnetická ložiska, kde je rotor i nadále uložen bezdotykově.

2.1.3. OPTICKÝ

Nejpřesnější měření ze všech senzorů, nejčastěji využívající laseru. Zároveň ale také jeden z nejdražších senzorů, který navíc vyžaduje větší nároky na umístění. Měření není ovlivněno magnetickým polem. Polohu rotoru lze měřit dvěma způsoby. Buď je snímán paprsek, který je přerušován výchylkou rotoru, nebo je snímán paprsek z odrazu od rotoru. Oba způsoby jsou velice přesné, ale také velice náročné na čistotu měřeného prostředí a povrch rotoru.



Obr. 2.04 - schéma principu optických senzorů. [1]

2.1.4. MAGNETOSTATICKÝ

Zatím moc nevyužívaný způsob měření polohy rotoru. Je-li proud v cívce ložiska konstantní, velikost magnetické indukce je závislá na velikosti vzduchové mezery. Intenzita od cívky může být měřena Hallovo sondou. Jedná se o nepřímé měření polohy rotoru a tudíž i dosud nejméně přesné. Tento způsob měření je velice náchylný na okolní magnetické pole. Velkou výhodou je, že senzorem je samotná cívka a není potřeba další samostatné součásti v sestavě uložení rotoru.

2.1.5. POROVNÁNÍ SENZORŮ

Tabulka - porovnání senzorů firmy $\mu\epsilon$ [18] k roku 2009:

princip měření	senzor	Rozsah měření(mm)	Rozlišení	Linearita
kapacitní	capaNCDT 6500 Vícekanálový systém měření vzdálenosti s vysokým rozlišením - Pro všechny elektricky vodivé měřené objekty	0,05 - 10	0,000075 % r.m.	$\pm 0,05$ % r.m.
vířivé proudy	eddyNCDT 3300 Kompaktní jednocanálový systém měření s vířivým proudem	0,4 - 80	0,005 % r.m.	$\pm 0,2$ % r.m.
vířivé proudy	induNCDT IWS -Senzory induNCDT na měření vzdálenosti jsou speciálně navrženy pro bezdotykové měření vzdálenosti a odstupu vůči feritické oceli. - Vynikající poměr ceny a výkonu	3 - 16	0,5 % r.m.	± 2 % r.m.
vířivé proudy	eddyNCDT 3700 Kompaktní jednocanálový/dvoukanálový systém	1 - 6	0,000018 % r.m.	± 5 % r.m.

	měření vzdálenosti			
indukční	induSENSOR série LVDT měřící snímače	1 - 25	-	± 0,15 % r.m.
laserové	optoNCDT 2220 – 20kHz -Nejrychlejší přizpůsobení měnícím se povrchům	2 - 200	0,0015 % r.m.	± 0,03 % r.m.
optické	Konfokálně chromatické snímače optoNCDT IFD 2402	0,4 - 10	0,004 % r.m.	± 0,08 % r.m.

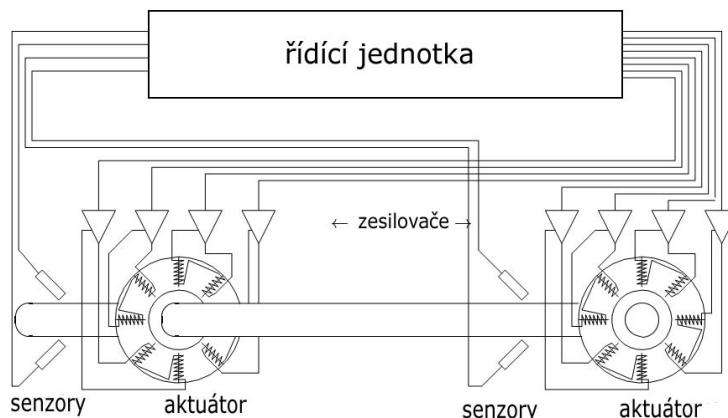
Tabulka - Porovnávací tabulka vhodnosti senzorů (1- dobré, 4-špatné):

	indikční	vířivé proudy	kapacitní	magneto-statické	optické
přesnost	3	3	1	4	1
odolnost proti mag. poli	3 (1*)	3		4**	1
odolnost proti nečistotám	1	1	4	1	4
cena	1	1	2	4	4
prostor v uložení	2	1	3	1	4

* - třícívkový senzor bez feritického jádra

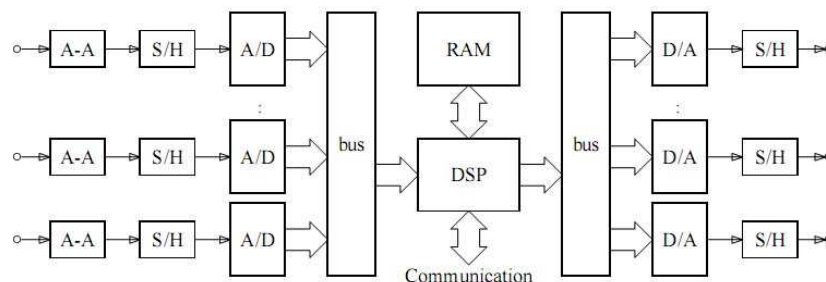
** - vůči vnějšímu magnetickému poli

2.2. ŘÍZENÍ A ŘÍDÍCÍ JEDNOTKA



Obr. 2.04 – zapojení řídicí jednotky se systému AML. [7]

Řídící jednotka zajišťuje chod ložiska. Vstupem do této jednotky jsou signály ze senzorů a výstupem z této jednotky je informace pro zesilovač, jaký proud do cívky pustit. Jsou dva základní druhy řízení – analogové a digitální. Analogové řídicí jednotky byly navrhovány v počátcích existence systémů AML (sedmdesátá a osmdesátá léta). Od počátku devadesátých let začínají systémům AML dominovat digitální jednotky. Tento přechod byl umožněn díky rychlému vývoji v elektronice (mikroprocesory, analogové-digitální a digitální-analogové měniče, atd.).



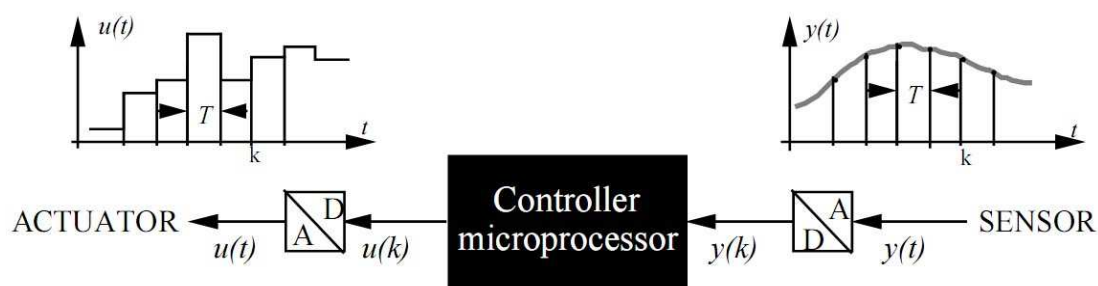
Obr. 2.05 - Zjednodušené schéma digitální řídicí jednotky. [7]

Digitální jednotka obsahuje mikroprocesor nebo digitální signálový procesor (DSP), A/D a D/A měniče, filtry, paměť, S/H paměťové obvody a další menší součásti. Systém může být osazen jen jedním mikroprocesorem, který ale musí splňovat všechny požadavky, jako víceprocesorová jednotka, která má jeden procesor pro každý proces (samotná

levitace, generování šířky pulsu signálu pro zesilovače, zpracování dat z monitorování nebo řízení integrovaného motoru).

Vzhledem k tomu, že senzory mají povětšinou výstupní signál analogový, musí být signál převeden na digitální. K tomu slouží analogově-digitální měnič, který spolupracuje s S/H obvodem (sample and hold). S/H paměťový obvod před A/D měničem ustálí jednu hodnotu z analogového signálu a podá jí dál. Stejně tak S/H paměťový obvod za D/A měničem ustálí hodnotu z D/A měniče pro zesilovač, který také potřebuje analogový signál.

Signály nejsou digitální jednotkou zpracovávány kontinuálně, ale jen v časových úsecích T (obr. 2.07). Důležitým parametrem řídicích jednotek je maximální vzorkovací frekvence $f = 1/T$, která dle [1] může dosahovat až frekvence 20 kHz. Čím je frekvence vyšší, tím je výstupní křivka napětí „hladší“.



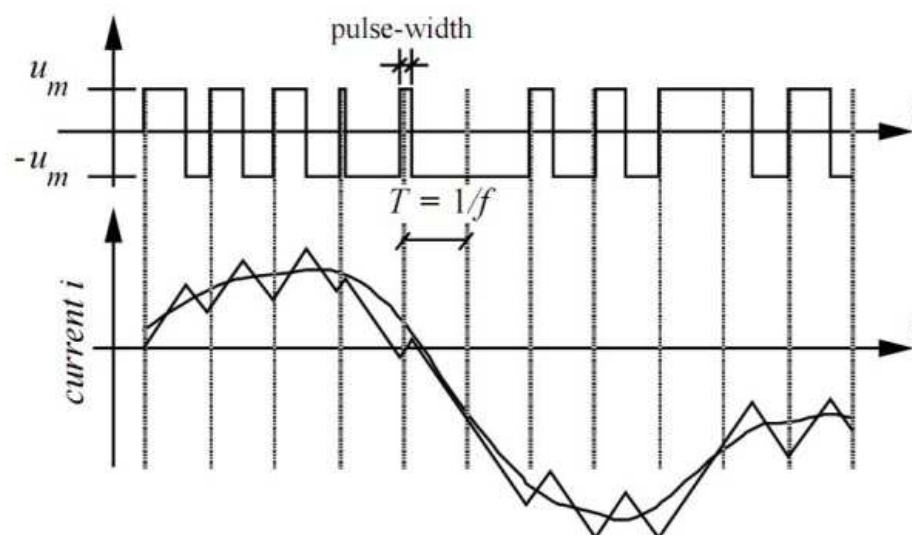
Obr. 2.07 – reakce řídicího napětí u na sledovanou proměnnou y . [1]

Digitální jednotky jsou oproti analogovým elektrotechnicky složitější, zejména díky převodům analogového signálu na digitální a zpět, z čehož plyne i vyšší cena a možnost výskytu selhání některé ze součástí.

2.3. ZESILOVAČ

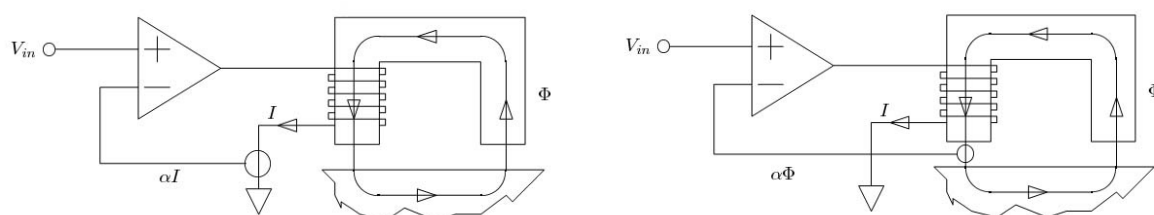
Zesilovač samotný je již součástí aktuátoru a musí být dimenzován konstruktérem. Jedná se o často limitní součást celého AML systému a poměr cena k výkonu je zásadní. Výkonový zesilovač na základě kontrolního signálu napájí cívku proudem. Ve speciálních případech může být kontrolní veličinou i napětí nebo magnetická intenzita v mezeře

ložiska. Jsou základní dva druhy výkonových zesilovačů – analogový a přepínací. Analogové zesilovače určují velikost proudu tranzistorem, díky kterému má tento zesilovač vysoké ztráty odporem. Spínací zesilovač reguluje křivku proudu pulsy napětí. Na obr. 2.08 je vidět průběh regulace proudu zesilovačem s dvěma spínači. Nezáleží-li na směru toku proudu, stačí použít zesilovač pouze s jedním spínačem. Frekvence spínání je konstantní mezi 20kHz a 100kHz [1]. Vyšší frekvence spínání znamená hladší průběh proudu. Výpočtem ztrát v analogovém zesilovači dostaneme pro hodnoty vstupního napětí 150V, maximální výstupní napětí pro proud 6A a odpor vedení 2Ω výkonové ztráty 828W, zatímco spínací zesilovač při stejných hodnotách má ztráty pouze 30W. Spínací zesilovače dominují použití v systémech AML a při výkonech systému přes 0,6 kVA jsou používány výhradně. Nevýhodou spínacích zesilovačů je kmitání proudu, které způsobuje ztráty hysterezí v ložisku (viz kapitola 2.4).



Obr. 2.08 – graf průběhu regulace proudu spínacího zesilovače. [1]

Zesilovače jsou navrhovány se zpětnou vazbou, ale v některých případech mohou být i bez ní. Ve většině případů jsou navrhovány se zpětnou vazbou měření výstupního proudu (transconductance) pro dosažení správného proudu dle řídicí jednotky. Dle [15, 19] změna zpětné vazby z proudu na magnetický tok v mezeře aktuátoru (transpermeance) může zlepšit chod aktuátoru.



Obr. 2.09 – schéma obvodů měřících zpětné vazby proudu a magnetického toku.[19]

Výkon aktuátoru je vyšší, je-li zpětná vazba měřením magnetického toku, než je-li odhadována měřením proudu, protože závislost proudu na síle, je závislá ještě na dalších veličinách, jako je nasycení materiálu, ztráty vířivými proudy, hysterezi atd. a otevřená smyčka tuhosti není stabilní. Vazba mezi magnetickým tokem a silou není závislá na žádné z předchozích veličin a tvoří tak uzavřenou smyčku tuhosti. Měření magnetického toku ale vyžaduje umístění Hallovy sondy do magnetického ložiska. Pokud není v ložisku

Hallova sonda, magnetický tok lze pouze odvodit z měření proudu $B = \frac{\mu_0 N}{2(s_0 \pm x)} i$, nebo z

měření napětí cívky a její integrací $B = \int \frac{1}{NA} (u - iR) dt$. První způsob je dobrý pouze pokud známe přesnou polohu rotoru a druhý způsob má problém při velmi nízkých frekvencích, kde je chyba numerické integrace velká. [19]

2.4. ZTRÁTY V LOŽISKU

Ačkoli magnetická ložiska díky levitaci rotoru nemají konvenční ztráty třením, tak nejsou úplně bezztrátové. Ztráty v aktivních magnetických ložiskách lze rozdělit do čtyř skupin.

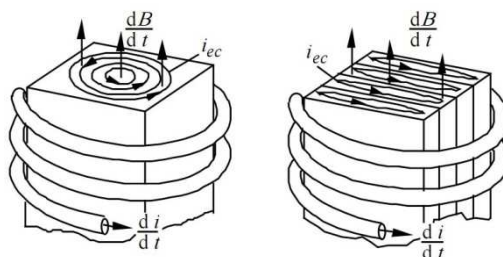
2.4.1. ZTRÁTY HYSTEREZÍ

V grafu závislosti magnetické indukce a intenzity na obr. 6.01 lze vidět hysterezi, která způsobuje ztrátu rychlosti. Rotor je touto ztrátou přibrzdován konstantně, bez ohledu na rychlost otáček. Ztráty hysterezi jsou však jedny z nejmenších ztrát.

2.4.2. ZTRÁTY VÍŘIVÝMI PROUDY

Změnou indukce v materiálu, nebo pohybem materiálu v magnetickém poli dochází k tvorbě vířivých proudů. Brzdící moment od vířivých proudů je lineárně úměrný

otáčkám rotoru. Ztráty vířivými proudy lze omezit rozdělením jádra na více částí, které od sebe budou elektricky izolovány. Pohybující jádro v magnetickém poli se pak nechová jako jedna cívka a je generován v součtu menší vířivý proud. Vířivé proudy se v rotoru přeměňují na teplo.

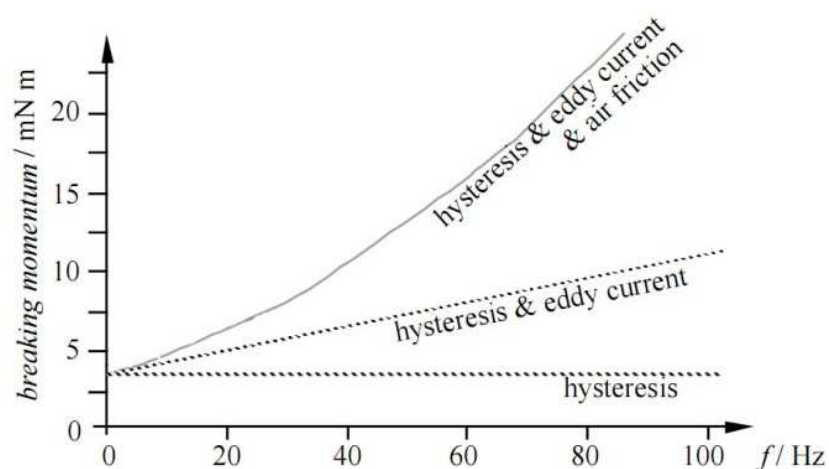


Obr. 2.10 – rozdělení jádra na několik izolovaných segmentů za účelem snížení ztrát vířivými proudy. [1]

2.4.3. ZTRÁTY ODPOREM PROSTŘEDÍ

Ztráty odporem prostředí vznikají odporem vzduchu. Čím členitější je povrch rotoru, tím je větší odpor prostředí proti pohybu. Tyto ztráty rostou geometricky s nárůstem rychlosti. Při nízkých otáčkách jsou v porovnání s předešlými ztrátami zanedbatelné a při vysokých otáčkách tvoří hlavní část brzdného momentu. Zmenšení těchto ztrát lze docílit optimalizací proudění v ložiskách, nebo odstraněním vzduchu z místa uložení úplně. Odstraněním vzduchu z místa uložení sice dosáhneme nulových ztrát odporem prostředí, ale zároveň musíme zajistit dostatečné chlazení aktuátoru.

Porovnání jednotlivých odporů proti pohybu:



Obr. 2.11 – závislost brzdícího momentu na otáčkách rotoru. [15]

2.4.4. JOULEOVY ZTRÁTY

Tyto ztráty jediné nemají vliv na ztrátu rychlosti. Spolu s vířivými proudy se ale přeměňují na teplo, které je potřeba z místa uložení odvést. Navržené ložisko je tedy nutné spočítat na oteplení a v případě vysokého oteplování je nutné do uložení navrhnout chlazení.

Výpočet ztrát v cívce:

$$P_R = R \cdot i^2$$

$$R = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{l}{A}$$

Ztráty v cívce jsou závislé na měrné vodivosti materiálu cívky (většinou měď), délce drátu, průřezu drátu a druhé mocnině procházejícího proudu.

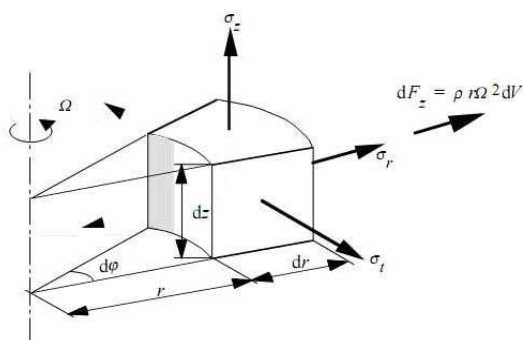
Dalšími velmi významnými ztrátami jsou ztráty v zesilovači (viz kapitola zesilovače).

3. PEVNOSTNÍ VÝPOČET ROTORU

Při návrhu aktivního magnetického ložiska pomocí vytvořeného znalostního systému se řeší především část rotoru, statoru a výchozí hodnoty pro nadimenzování zesilovače.

Rotor je sestaven ze samotného hřídele (vřetena), na kterém jsou nalisované kroužky z válcovaného plechu s vysokou permeabilitou. Samotný hřídel nemusí být z materiálu s vysokou permeabilitou. Nalisované izolované kroužky taktéž slouží ke zmenšení ztrát vířivými proudy (viz kapitola 2.4).

Samotný aktuátor dovoluje uložení bez kontaktu a nijak neomezuje maximální otáčky. Maximální rychlost je omezena pevností rotoru. Odstředivá síla působící na rotor vyvolává tečné a radiální napětí v materiálu rotoru. Zejména se jedná o pevnost nalisovaných kroužků na hřídeli. Při určitých otáčkách se nalisované kroužky začnou oddělovat od hřídele, případně se mohou zdeformovat trvale, pokud napětí v nich přesáhne mez kluzu. Na výši maximálních otáček mají vliv průměr hřídele a kroužků, použitý materiál a velikost nalisování.



Obr. 3.01 – element rotoru a napětí, které na něj působí. [16]

Dle [29] se napětí v nalisovaných kroužkách na rotoru vypočte:

$$\sigma_t = C_1 + \frac{C_2}{r^2} - \frac{1 + 3 \cdot \mu}{8} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot r^2$$

a

$$\sigma_r = C_1 - \frac{C_2}{r^2} - \frac{3 + \mu}{8} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot r^2$$

kde μ je Poissonovo číslo, ω je úhlová rychlost $\omega = 2\pi n$ a r je obecný poloměr na kotouči.

Zbývá určit konstanty C_1 a C_2 , které určíme z okrajových podmínek pro náš konkrétní rotor magnetického ložiska.

Za předpokladu, že $r = R_1$, pak radiální napětí je rovno $\sigma_r = -p$, tlaku od nalisování.

Za předpokladu, že $r = R_2$, pak radiální napětí je rovno $\sigma_r = \frac{F_i}{S}$, napětí od nosné síly ložiska.

$$F_i = \frac{\text{celková nosná síla}}{\text{počet nalisovaných kroužků}}$$

Vzhledem k tomu, že napětí od nosné síly je výrazně menší (až stonásobně) než napětí vzniklé od rotujícího kotouče, můžeme toto napětí zanedbat a radiální napětí na obvodu kotouče položit rovno nule.

Po dosazení okrajových podmínek:

$$-p = C_1 - \frac{C_2}{R_1^2} - \frac{3 + \mu}{8} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot R_1^2$$

$$0 = C_1 - \frac{C_2}{R_2^2} - \frac{3 + \mu}{8} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot R_2^2$$

Vytknutím z první rovnice

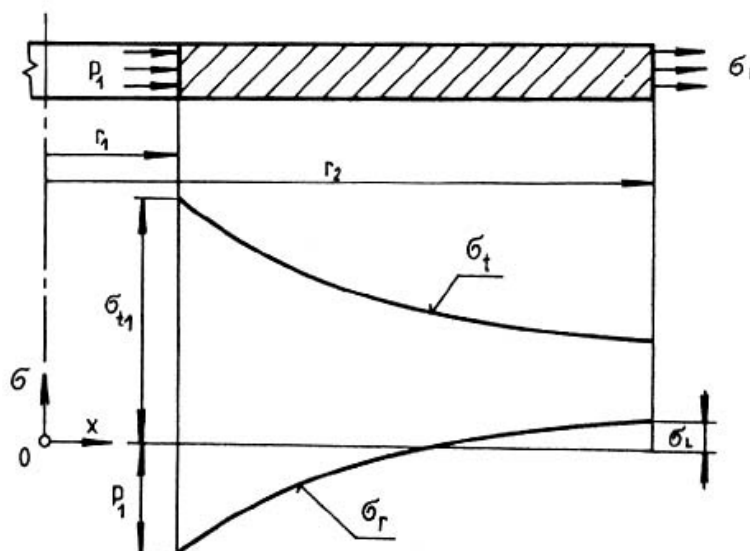
$$C_1 = \frac{C_2}{R_1^2} + \frac{3 + \mu}{8} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot R_1^2 - p$$

a dosazením do druhé rovnice po úpravě dostaneme

$$C_2 = p \frac{R_1^2 \cdot R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} + \frac{3 + \mu}{8} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot R_1^2 \cdot R_2^2$$

po zpětném dosazení dostaneme

$$C_1 = p \left(\frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \right) + \frac{3 + \mu}{8} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot (R_2^2 + R_1^2) - p$$

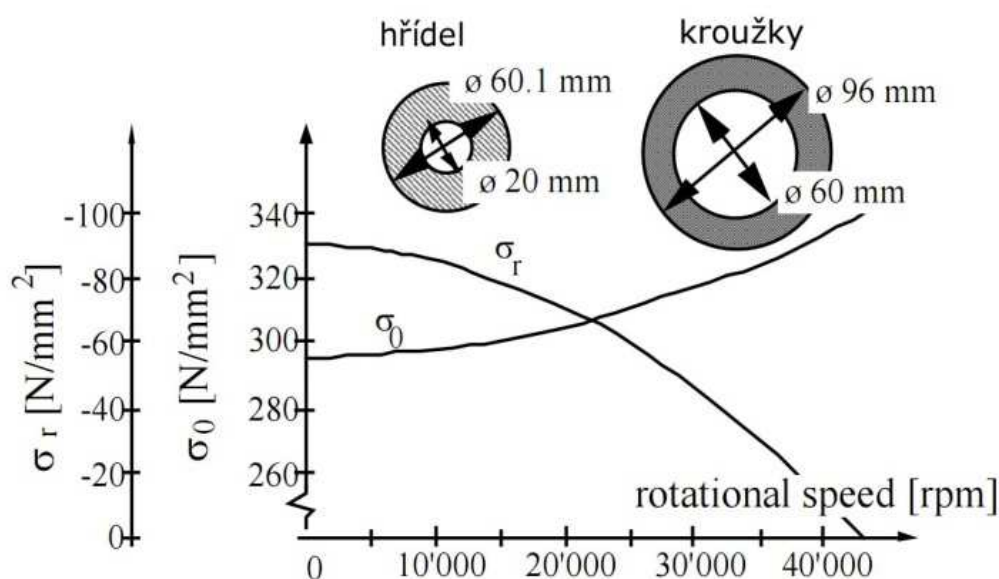


Obr. 3.02 – Průběh napětí v rotující kotouči [29]

Z obrázku 3.02 je patrný průběh napětí na kotouči při konstantních otáčkách. Nejvíce namáhaný je vnitřní povrch kotouče. Pevnostní podmínka podle teorie maximálního smykového napětí pak je:

$$\sigma_{red} = \sigma_{t1} - \sigma_{r1} = \sigma_{t1} + p \leq \sigma_D$$

Na obrázku 3.03 lze vidět graf závislosti radiálního napětí a obvodového napětí na otáčkách. V tomto případě se jedná o rotor s průměrem 60 mm v místě nalisování. Na hranici 45 000 otáček za minutu dochází k vyrovnání radiálního napětí a tlaku z nalisování. V radiálním směru tak již nepůsobí žádná síla, která drží kroužky pevně na hřídeli. Zároveň obvodové napětí na stejném poloměru dosahuje u kroužků meze dovoleného namáhání. Volba velikosti předepnutí je v tomto případě vyvážená s pevností kroužků.



Obr. 3.03 - průběh radiálního napětí σ_r v místě nalisování a tečné (obvodové) napětí σ_0 vnitřního průměru kroužku v závislosti na otáčkách. [1]

Tlak z nalisování lze spočítat z přesahu průměrů pro nalisování. S narůstajícími otáčkami se však vnitřní průměr kroužků deformuje a průměr se tak zvětšuje. V momentě, kdy deformace dosáhne hodnoty přesahu pro nalisování, dojde k odlehnutí kroužků od rotoru.

Odlehnutí samo o sobě není vážným problémem, protože kroužky nepřenášejí žádný krouticí moment. Vlivem odlehnutí by mohlo dojít ke tření mezi kroužky a rotorem a rotor by se tak začal zahřívat. O trochu vážnější problém by mohl nastat, když by odlehnutí nabývalo větších hodnot, protože osa hřídele by pak nebyla vystředěná s osou kroužků. Z hlediska bezpečnosti je proto nutné navrhovat nalisování tak, aby byl vždy zaručen tlakový spoj pro maximální otáčky.

Při výpočtu proto zvolíme minimální a maximální tlak od nalisování, který požadujeme při maximálních otáčkách. Z těchto tlaků pak lze vypočítat minimální a maximální přesah při maximálních otáčkách.

$$\delta R_1 = R_1 \cdot p \cdot \left(\frac{1 - \mu_1}{E_1} + \frac{CN_2 - \mu_2}{E_2} \right)$$

kde

$$CN_2 = \frac{d_2^2 + d_1^2}{d_2^2 - d_1^2}$$

Deformace vnitřního průměru kroužku [29]:

$$\Delta R_1 = \frac{R_1}{E} (\sigma_{t1} - \mu \sigma_{r1})$$

Deformace na vnějším průměru R_2 je zase nebezpečná z důvodu zmenšení vzduchové mezery.

$$\Delta r_2 = \frac{R_2}{E} (\sigma_{t2} - \mu \sigma_{r2})$$

Stejný výpočet jako pro deformaci na kroužku lze použít pro hřídel:

$$\Delta r = \frac{R_1}{E} (\sigma_{t1} - \mu \sigma_{r1})$$

zde však je potřeba zjistit tečné a radiální napětí na hřídeli. Pro výpočet obou napětí se lze použít vztah z [29] při zanedbání vlivu délky hřídele:

$$\sigma_t = C_1 - \frac{1 + 3\mu}{8} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot r$$

a

$$\sigma_r = C_1 - \frac{3 + \mu}{8} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot r$$

Zbývá určit konstantu C_1 , kterou určíme z okrajové podmínky pro náš konkrétní rotor magnetického ložiska.

Za předpokladu, že $r = R_1$, pak radiální napětí je rovno $\sigma_r = +p$, tlaku od nalisování.

$$C_1 = p + \frac{3 + \mu}{8} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot R_1^2$$

Na hřídeli pod kroužky dochází k tomu, že tlak od nalisování působí proti deformaci hřídele v radiálním směru.

Výsledná změna přesahu nalisování je pak rozdíl deformace kroužků mínus deformace hřídele:

$$\Delta = \Delta d_1 - \Delta d$$

Z přičtení Δ k minimálnímu a maximálnímu přesahu při nejvyšších otáčkách, pak dostaneme přesahy pro nalisování za klidu.

Další pevnostní kontrola se týká samotného hřídele, který je obvykle vyroben z jiného materiálu, než rotorové kroužky, případně pokud má osazení pro axiální magnetické ložisko, je nutné provést pevnostní kontrolu na tomto nejkritičtějším průměru. Pro výpočet se použije předchozí vzorec pro výpočet tečného napětí, které musí být menší, než dovolené napětí:

$$\sigma_t = C_1 - \frac{1 + 3\mu}{8} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot r^2 < \sigma_D$$

kde při určení C_1 předpokládáme okrajovou podmínku na maximálním průměru DH (respektive poloměru RH) s radiálním napětím rovné nule.

$$C_1 = \frac{3 + \mu}{8} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot RH^2$$

Maximální zatím dosažené otáčky tělesa v magnetickém poli docílil již roku 1946 J. Beams. [15] Kulička o průměru 0,795 mm uložená v magnetickém poli a téměř ve vakuu (1.333×10^{-8} bar) byla roztočena na 23 160 000 otáček za minutu. Rotující kulička se vlivem odstředivých sil roztrhla.

4. VÝPOČET NOSNOSTI RADIÁLNÍHO HEROPOLÁRNÍHO LOŽISKA – NÁVRH STATORU

Základním předpokladem pro určení velikosti radiálního heteropolárního ložiska je určení počtu pólů. Musíme vycházet z předběžného průměru rotoru. Za nejnižší počet pólů lze považovat tří-pólové heteropolární ložisko, které ale není moc využíváno. Z hlediska řízení je nejjednodušší použít osmipólové ložisko, které má umístěné dva lokální magnetické obvody (LMO) proti sobě v obou řídicích osách. Tendence ve výrobě ložisek však nejvíce preferují dvanáctipólové ložisko, které má výhodu stálého provozu i za situace selhání jedné z cívek nebo zesilovače. Pro více pólová ložiska však musí být rotor dostatečně velkého průměru. Zvětšování průměru rotoru však zmenšuje možné maximální otáčky.

Magnetomotorická síla:

Pro výpočet síly celého ložiska je nutné ho rozdělit na jednotlivé části (lokální magnetické obvody LMO) a vypočítat sílu od těchto LMO. Zároveň výpočet síly od jednoho LMO musí být zjednodušen.

Předpokladem pro výpočet síly od LMO je Ampérův zákon:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = N \cdot I$$

kde H [A/m] je intenzita magnetického pole, l [m] délka uzavřené smyčky, N [-] počet závitů v cívkce a I [A] je protékající proud cívkou.

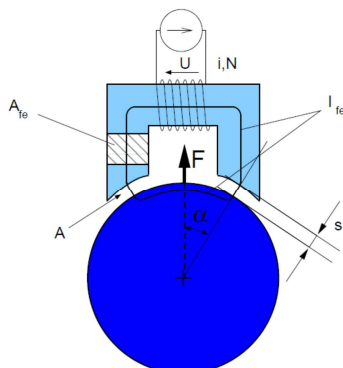
Magnetická indukce B [T] je dána vztahem:

$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H$$

kde μ_r je relativní permeabilita materiálu a μ_0 je permeabilita vakua.

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ [H/m]}$$

Výpočet síly od jednoho LMO:



Obr. 4.01 Aktuátor s jedním LMO = dva póly.

Pro výpočet síly je potřeba určit magnetický tok:

Pro zjednodušení výpočtu se předpokládá, že magnetický tok je konstantní v celé smyčce a průřez v LMO je rovný průřezu v mezeře.

$$\Phi = B \cdot A$$

Obvod lze rozdělit na dvě části a dosadit do Ampérova zákona. Jedna část, která prochází magnetickým materiálem a druhá část ve vzduchové mezeře.

$$Ni = H_{pev} \cdot l_{pev} + H_g \cdot 2g$$

kde g je velikost vzduchové mezery a l_{pev} je délka celé smyčky LMO bez mezery. Dosazením do předchozích vztahů dostaneme výraz pro magnetickou indukci:

$$B = \mu_0 \frac{NI}{\left(\frac{l_{pev}}{\mu_r} + 2g \right)}$$

s předpokladem vysoké konstantní relativní permeability feromagnetika je $\frac{l_{pev}}{\mu_r} \cong 0$,

upravený výraz je tedy:

$$B = \mu_0 \frac{NI}{2g}$$

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

$$F = \frac{B_g^2 \cdot A_g}{\mu_0}$$

Úhel, pod kterým je síla vyvozená lze vypočítat z počtu pólů. Zde je nutný předpoklad, že póly jsou rovnoměrně umístěny po obvodu.

$$\alpha = \frac{360^\circ}{2 \cdot n}$$

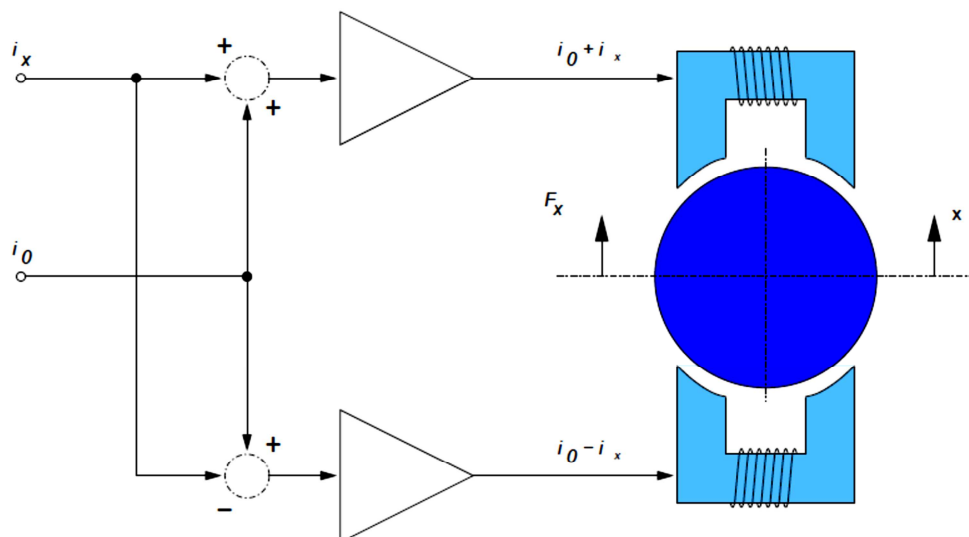
n je počet pólů v ložisku. Dosazením indukce do vzorce pro sílu pak vyjde:

$$F = \frac{1}{4} \mu_0 N^2 A \frac{I^2}{g^2} \cos \alpha$$

$$F = k \frac{I^2}{g^2} \cos \alpha$$

kde k je konstanta. $k = \frac{1}{4} \mu_0 N^2 A$

Pro protilehlé uspořádání



Obr. 4.02 - Protilehlé uspořádání dvou LMO = čtyři póly.

V tomto případě síla F_x reprezentuje rozdíl sil mezi plusovým a minusovým směrem. V tomto případě zapojení jsou proudy rozděleny na i_0 , což je předmagnetizační proud a i_x , což je rozdílový proud. Na LMO v kladném směru je rozdílový proud přičítán ke předmagnetizačnímu proudu a na LMO v záporném směru je rozdílový proud odečítán od předmagnetizačního proudu. Rozdílový proud musí být menší, než předmagnetizační proud. x je výchylka rotoru.

$$F_x = F_1 - F_2 = \frac{1}{4} \mu_0 N^2 A \frac{(i_0 + i_x)^2}{(g_0 + x)^2} \cos \alpha - \frac{1}{4} \mu_0 N^2 A \frac{(i_0 - i_x)^2}{(g_0 - x)^2} \cos \alpha$$

$$F_x = F_1 - F_2 = \frac{1}{4} \mu_0 N^2 A \left[\frac{(i_0 + i_x)^2}{(g_0 + x)^2} - \frac{(i_0 - i_x)^2}{(g_0 - x)^2} \right] \cdot \cos \alpha$$

$$F_x = k \left[\frac{(i_0 + i_x)^2}{(g_0 + x)^2} - \frac{(i_0 - i_x)^2}{(g_0 - x)^2} \right] \cdot \cos \alpha$$

$$k = \frac{1}{4} \mu_0 N^2 A$$

při podmínce, že výchylka je daleko menší než rozměr vzduchové mezery a rozdílový proud daleko menší než předmagnetizační proud, tak podle [28] dostaneme:

$$F_x = \frac{4ki_0}{g_0^2} \cdot \cos \alpha \cdot i_x + \frac{4ki_0^2}{g_0^3} \cdot \cos \alpha \cdot x$$

$$F_x = K_i \cdot i_x + K_x \cdot x$$

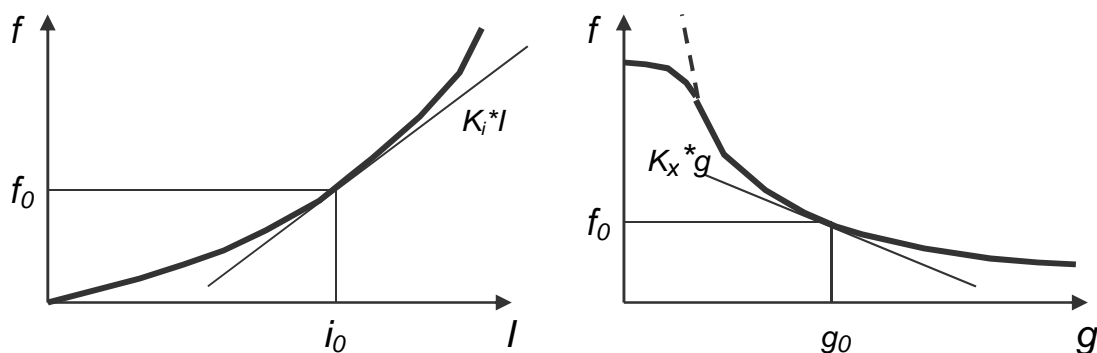
Koeficient $K_x = K_i \cdot \frac{i_0}{g_0}$ je tuhost otevřené smyčky. Tato tuhost je přirozeně negativní, a čím více se zvětšuje, tím je systém méně stabilní. Koeficient K_i je zesílení aktuátoru.

zesílení aktuátoru

$$K_i = \left. \frac{\partial f}{\partial i_x} \right|_{x=0, i_x=0} = \dots = \frac{\mu_0 N^2 A_g}{2g_0^2} i_0$$

tuhost otevřené smyčky

$$K_x = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=0, i_x=0} = \dots = \frac{\mu_0 N^2 A_g}{2g_0^3} i_0^2$$

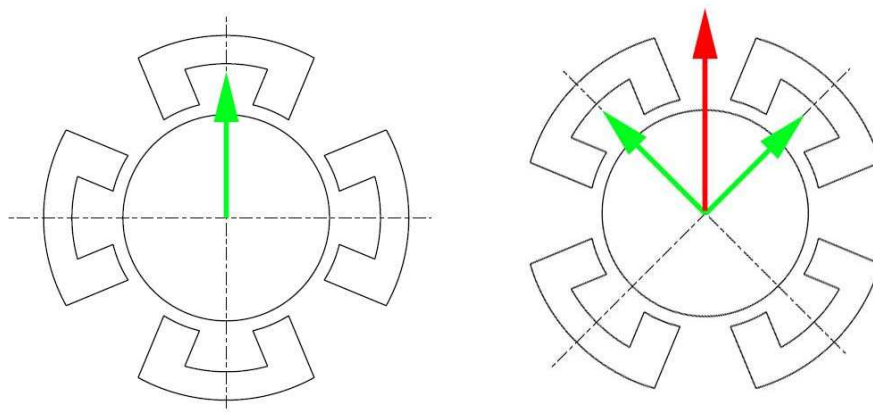


Obr. 4.03 – Závislost síly na proudu a na vzduchové mezeře. [19]

Pro výpočet skutečného ložiska ve znalostním programu je nutné vycházet z jednotlivých řídicích os. Každá osa má dvě protilehlé uspořádané LMO. Ačkoliv je možné řídit již ložisko se třemi LMO, tak z hlediska řízení a spolehlivosti je za základ považováno osmi pólové ložisko se čtyřmi LMO a dvěma osami řízení.

4.1. OSMIPÓLOVÉ LOŽISKO

U osmipólového ložiska hraje roli jeho natočení. Pokud bude výchylka ve směru jedné osy, bude veškerá síla na rotor vyvozována vytvářena jedním LMO. Pokud ovšem bude výchylka ve směru mezi osami, pootočená o 45° od každé osy řízení, lze sepnout dva LMO najednou a rotor bude přitahován silou rovnající se výslednici od obou os. Výsledná síla bude tedy $\sqrt{2}$ krát větší. Proto u horizontálně uložených rotorů, kde se za největší zatěžující sílu uvažuje především vlastní váha rotoru, je voleno uložení os statoru do X než do +.



Obr. 4.04a a 4.04b – Osmipólové ložisko, dva druhy natočení (do + a do X).

Ačkoliv lze uspořádání do X zatížit ve směru gravitační síly více, jako maximální zatížení se bere maximální síla v tom nejhorším směru, tedy pouze v jedné ose.

$$F_x = F_1 - F_2 = k \left[\frac{(i_0 + i_x)^2}{(g_0 + x)^2} - \frac{(i_0 - i_x)^2}{(g_0 - x)^2} \right] \cdot \cos 22,5^\circ$$

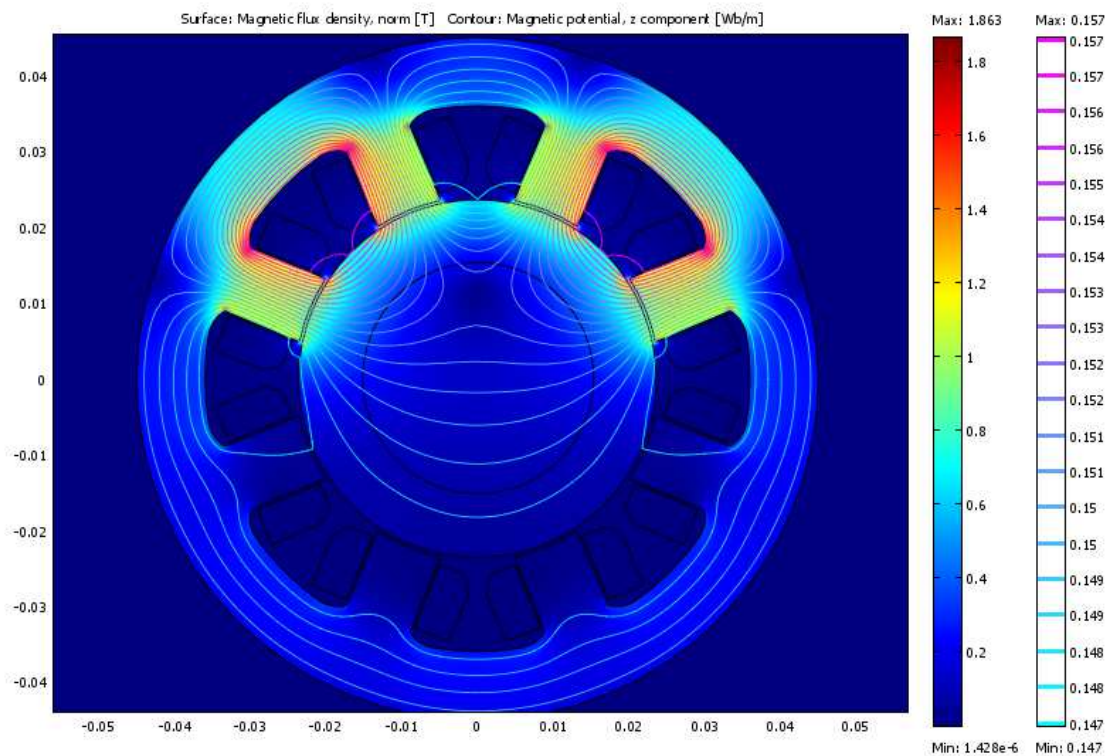
K vyjádření proudů se může použít předpoklad, že i_x nemůže být větší než i_0 , takže:

$$i_0 = \frac{i_{max}}{2}$$

$$i_{max} = i_0 + i_x$$

Maximální proud je odvozen od proudu, při kterém dojde k nasycení materiálu magnetickým polem. Maximální dosažitelná intenzita v materiálu je B_{sat} viz kapitola 6.

Model osmipólového ložiska:



Obr. 4.05 – model osmipólového ložiska při maximálním proudu.

Parametry použité pro model:

Ocel	11 373
Průměr rotoru	47,2 mm
Vnitřní průměr ložiska	48 mm
Vnější průměr ložiska	90 mm
Vzduchová mezera	0,4 mm
Šířka ložiska	20 mm
Šířka jádra pólů	9 mm
Počet závitů v cívkách	50
Proud	6 A

Ložisko je modelováno ve stavu, kdy $i_x = i_0$, což znamená, že dolní póly jsou zcela bez proudu a na horních pólech je maximální proud.

Maximální síla za předpokladu nulové výchylky a maximálního proudu ($i_x = i_0$):

$$F_{max,x=0} = \frac{\cos 22,5^\circ}{4} \mu_0 N^2 A \frac{i_{max}^2}{g_0^2}$$

Maximální síla za předpokladu maximálního proudu a nenulové výchylky ve směru nosné síly:

$$F_{max} = \frac{\cos 22,5^\circ}{4} \mu_0 N^2 A \frac{i_{max}^2}{(g_0 + x)^2}$$

Maximální síla jako reakce na gravitační sílu u uložení tvaru X za předpokladu nulové výchylky a maximálního proudu ($i_x = i_0$):

$$FG_{max} = \sqrt{2} \frac{\cos 22,5^\circ}{4} \mu_0 N^2 A \frac{i_{max}^2}{g_0^2}$$

Pro výpočet FG_{max} s nenulovou výchylkou se musí uvažovaná výchylka ve směru FG rozložit na výchylky ve směrech jednotlivých dílčích sil. Vzduchovou mezeru ve směru jedné síly lze vypočítat jako:

$$g = \sqrt{g_0^2 + x^2 - 2 \cdot g_0 \cdot x \cdot \cos \gamma}$$

kde pro $x \geq 0$ je $\gamma = 135^\circ$ a pro $x < 0$ je $\gamma = 45^\circ$.

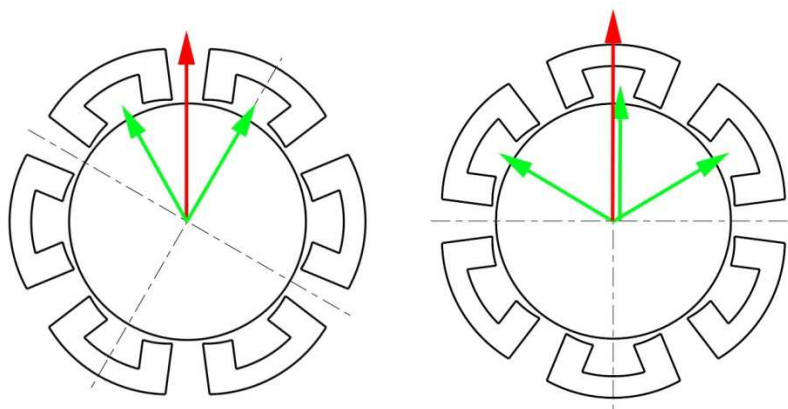
Maximální síla FG_{max} za předpokladu maximálního proudu a nenulové výchylky ve směru nosné síly:

$$FG_{max} = \sqrt{2} \frac{\cos 22,5^\circ}{4} \mu_0 N^2 A \frac{i_{max}^2}{g^2}$$

Vzhledem k vyosení rotoru je tento výpočet zkreslený a platí pouze, pokud je přibližně $x < \frac{g_0}{2}$, zvláště pokud má výchylka minusové hodnoty.

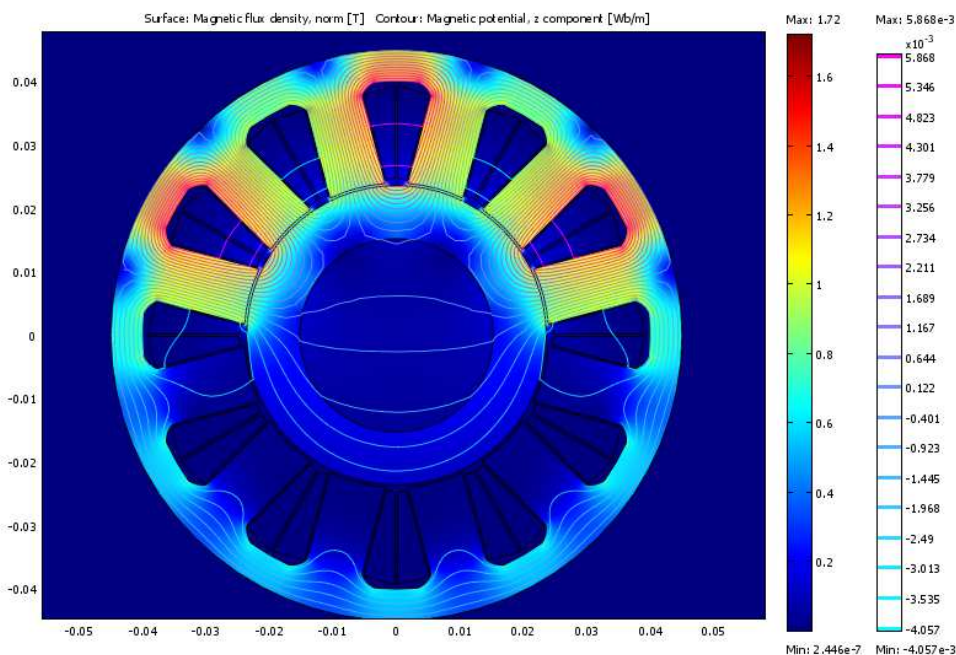
4.2. DVANÁCTIPÓLOVÉ LOŽISKO

U dvanáctipólového ložiska lze předpokládat dva okrajové případy natočení.



Obr. 4.06a a 4.06b - Dvanáctipólové ložisko, dva druhy natočení.

U případu natočení 4.06a je výsledná složka síly rovna vektorovému součtu dvou sil, které mezi sebou svírají úhel 60° . Tato složka je rovna F_{max} a jedná se o případ nejmenší maximální síly vlivem natočení. K největší maximální síle vlivem natočení dojde v případě natočení na obr 4.06b. Tato varianta natočení je nejčastěji používaná.



Obr. 4.07 - Model dvanáctipólového ložiska při maximálním proudu.

Maximální síla dle obr. 4.06a podle sinové věty:

$$F_{max} = \frac{F_1}{\sin 30^\circ} \cdot \sin 120^\circ$$

kde F_1 je maximální síla od jednoho LMO:

$$F_1 = k \left[\frac{(i_0 + i_x)^2}{(g_0 + x)^2} - \frac{(i_0 - i_x)^2}{(g_0 - x)^2} \right] \cdot \cos 15^\circ$$

Maximální síla za předpokladu nulové výchylky a maximálního proudu ($i_x = i_0$):

$$F_{max,x=0} = \frac{\frac{\cos 15^\circ}{4} \mu_0 N^2 A \frac{i_{max}^2}{g_0^2}}{\sin 30^\circ} \cdot \sin 120^\circ$$

Maximální síla za předpokladu nenulové výchylky a maximálního proudu ($i_x = i_0$):

$$F_{max} = \frac{\frac{\cos 15^\circ}{4} \mu_0 N^2 A \frac{i_{max}^2}{g^2}}{\sin 30^\circ} \cdot \sin 120^\circ$$

kde se g rovná:

$$g = \sqrt{g_0^2 + x^2 - 2 \cdot g_0 \cdot x \cdot \cos \gamma^\circ}$$

kde pro $x \geq 0$ je $\gamma = 150^\circ$ a pro $x < 0$ je $\gamma = 30^\circ$.

Vzhledem k vyosení rotoru je tento výpočet zkreslený a platí pouze, pokud je $x < \frac{g_0}{2}$, zvláště pokud má výchylka mínusové hodnoty.

Maximální síla v případě dle obrázku 4.06b je pak vektorovým součtem třech sil ve směru prostřední síly F_2 :

$$FG_{max} = F_2 + (F_1 \times F_3)$$

Vzhledem k tomu, že mezi silami F_1 a F_3 je úhel 120° , je jejich vektorový součet roven velikosti jedné ze sil (pouze při $x=0$).

$$FG_{max} = F_2 + F_{13} = 2F$$

Maximální síla za předpokladu nulové výchylky a maximálního proudu ($i_x = i_0$):

$$FG_{max;x=0} = \frac{\cos 15^\circ}{2} \mu_0 N^2 A \frac{i_{max}^2}{g_0^2}$$

Maximální síla za předpokladu nenulové výchylky a maximálního proudu ($i_x = i_0$):

$$FG_{max} = \frac{\cos 15^\circ}{4} \mu_0 N^2 A i_{max}^2 \left(\frac{1}{(g_0 + x)^2} + \frac{1}{g^2} \right)$$

kde se g rovná:

$$g = \sqrt{g_0^2 + x^2 - 2 \cdot g_0 \cdot x \cdot \cos \gamma^\circ}$$

kde pro $x \geq 0$ je $\gamma = 120^\circ$ a pro $x < 0$ je $\gamma = 60^\circ$.

Pro případ řízení, kdy se nedosáhne maximální síly, je vhodné maximálně využít LMO elektromagnetu přímo v ose a teprve po dosažení její maximální síly zvyšovat proud na okolních elektromagnetech. Jeli proud na i_{x2} jiný než proudy $i_{x1} = i_{x3}$, pak je síla rovna:

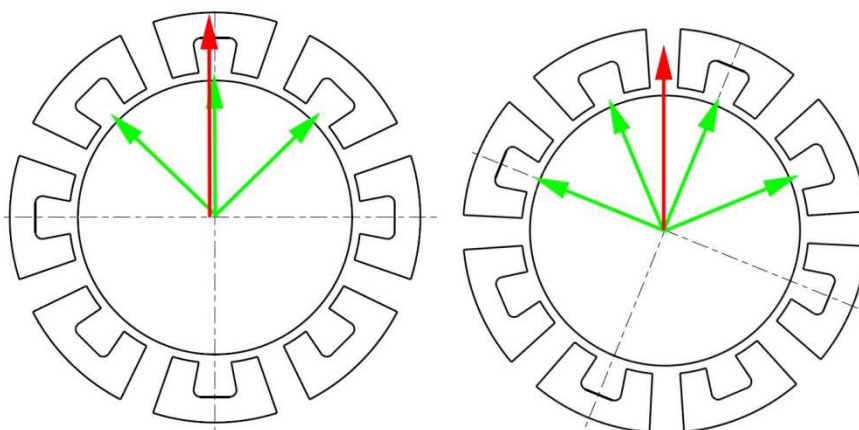
$$FG_x = \frac{\cos 15^\circ}{4} \mu_0 N^2 A \left\{ \left[\frac{(i_0 + i_{x2})^2}{(g_0 + x_2)^2} - \frac{(i_0 - i_{x2})^2}{(g_0 - x_2)^2} \right] + \left[\frac{(i_0 + i_{x1})^2}{(g_0 + x_1)^2} - \frac{(i_0 - i_{x1})^2}{(g_0 - x_1)^2} \right] \right\}$$

obdobně lze dosadit do rovnice pro F_x :

$$F_x = \frac{\mu_0 N^2 A \cos 15^\circ}{4 \cdot \sin 30^\circ} \cdot \sin 120^\circ \cdot \left[\frac{(i_0 + i_x)^2}{(g_0 + x)^2} - \frac{(i_0 - i_x)^2}{(g_0 - x)^2} \right]$$

4.3. ŠESTNÁCTIPÓLOVÉ LOŽISKO

U šestnáctipólové ložiska lze také předpokládat dva druhy natočení, i když rozdíl mezi nimi je díky vysokému počtu ložisek minimální.



Obr. 4.08a a 4.08b - Šestnáctipólové ložisko, dva druhy natočení.

V případě natočení dle obr. 4.08a je výsledná F_{max} rovna součtu prostřední síly a vektorového součtu dvou krajních sil. V tomto případě se jedná o nejmenší možnou F_{max} vlivem natočení.

$$F_{max} = F_2 + (F_1 \times F_3)$$

vzhledem k tomu, že síly F_1 a F_3 mezi sebou svírají úhel 90° , je:

$$F_{max} = F_2 + \sqrt{2} \cdot F_2 = (1 + \sqrt{2})F_2$$

$$F_{max} = (1 + \sqrt{2}) \frac{\cos 11,25^\circ}{4} \mu_0 N^2 A \frac{i_{max}^2}{g_0^2}$$

V případě natočení dle obr. 4.08b je výsledná síla vektorovým součtem všech čtyř sil. Rozkladem můžeme dostat výslednou sílu jako součet dvou vektorových součtů.

$$FG_{max} = (F_1 \times F_4) + (F_2 \times F_3)$$

$$FG_{max} = F_{14} + F_{23}$$

Mezi F_1 a F_4 je svírán úhel 45° a mezi F_2 a F_3 je svírán úhel 135° :

$$FG_{max} = \frac{F}{\sin 22,5^\circ} \cdot \sin 135^\circ + \frac{F}{\sin 67,5^\circ} \cdot \sin 45^\circ$$

$$FG_{max} = \frac{\cos 11,25^\circ}{4} \mu_0 N^2 A \frac{i_{max}^2}{g_0^2} \cdot \left(\frac{\sin 135^\circ}{\sin 22,5^\circ} + \frac{\sin 45^\circ}{\sin 67,5^\circ} \right)$$

$$FG_{max} = 2,613 \frac{\cos 11,25^\circ}{4} \mu_0 N^2 A \frac{i_{max}^2}{g_0^2}$$

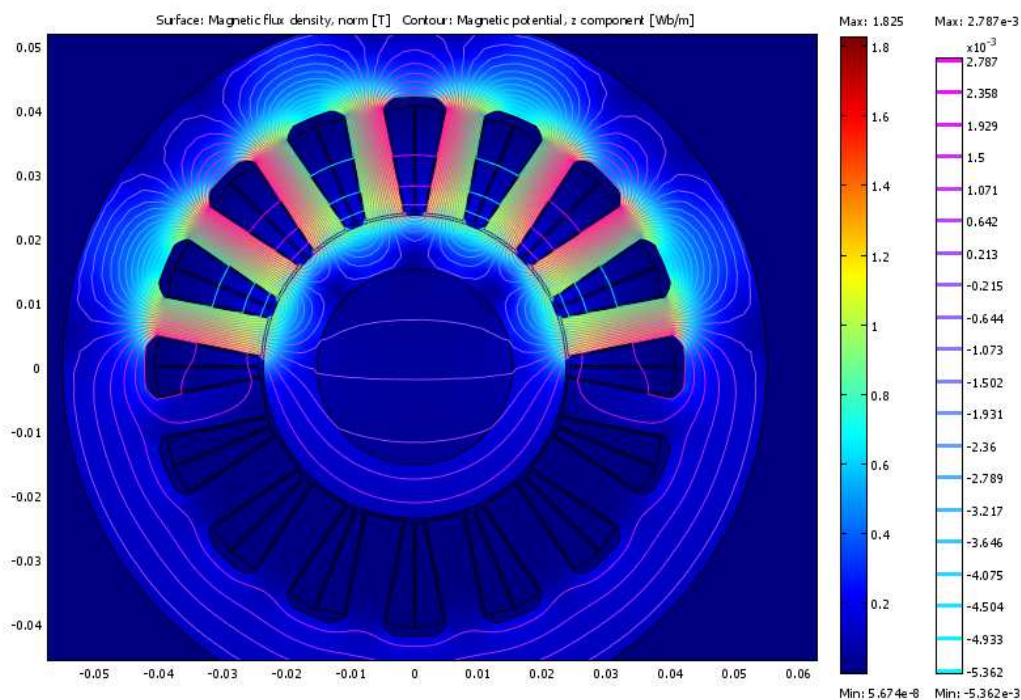
Porovnáním FG_{max} a F_{max} je vidět, že:

$$FG_{max} > F_{max}$$

$$2,613F > 2,414F$$

tedy, že FG_{max} je o 8,2% vyšší než F_{max} .

Model šestnáctipólového ložiska:



Obr. 4.09 - Model šestnáctipólového ložiska při maximálním proudu.

Pro případ řízení, kdy se nedosáhne maximální síly, je vhodné maximálně využít dva LMO elektromagnetu u svislé osy a teprve po dosažení jejich maximální síly zvyšovat proud na okolních elektromagnetech. Dojde-li k vychýlení rotoru z rovnovážné polohy a je-li proud na $i_{x1} = i_{x4}$ jiný než proudy $i_{x2} = i_{x3}$, $x_1 \neq x_2$, pak je síla rovna:

$$FG_x = F_{14} + F_{23}$$

$$FG_x = \frac{F_{x1}}{\sin 22,5^\circ} \cdot \sin 135^\circ + \frac{F_{x2}}{\sin 67,5^\circ} \cdot \sin 45^\circ$$

$$FG_x = \frac{\cos 11,25^\circ}{4} \mu_0 N^2 A \left(\begin{array}{l} \left[\frac{(i_0 + i_{x1})^2}{(g_0 + x_1)^2} - \frac{(i_0 - i_{x1})^2}{(g_0 - x_1)^2} \right] \cdot \sin 135^\circ + \\ \left[\frac{(i_0 + i_{x2})^2}{(g_0 + x_2)^2} - \frac{(i_0 - i_{x2})^2}{(g_0 - x_2)^2} \right] \cdot \sin 45^\circ \end{array} \right) \cdot \sin 22,5^\circ + \sin 67,5^\circ$$

Maximální síla za předpokladu nenulové výchylky a maximálního proudu ($i_x = i_0$):

$$FG_{max} = \frac{\cos 11,25^\circ}{4} \cdot \mu_0 \cdot N^2 \cdot A \cdot i_{max}^2 \cdot \left(\frac{1}{g_{23}^2} \cdot \frac{\sin 135^\circ}{\sin 22,5^\circ} + \frac{1}{g_{14}^2} \cdot \frac{\sin 45^\circ}{\sin 67,5^\circ} \right)$$

kde se g_{14} a g_{23} rovná:

$$g_{14} = \sqrt{g_0^2 + x^2 - 2 \cdot g_0 \cdot x \cdot \cos \gamma^\circ}$$

$$g_{23} = \sqrt{g_0^2 + x^2 - 2 \cdot g_0 \cdot x \cdot \cos \delta^\circ}$$

kde pro $x \geq 0$ je $\gamma = 157,5^\circ$ a $\delta = 112,5^\circ$ a pro $x < 0$ je $\gamma = 22,5^\circ$ a $\delta = 67,5^\circ$

obdobně i pro F_x kde $F_1 = F_3$:

$$F_x = F_2 + (F_1 \times F_3)$$

$$F_x = F_2 + \sqrt{2} \cdot F_1$$

$$F_x = \frac{\cos 11,25^\circ}{4} \mu_0 N^2 A \left(\left[\frac{(i_0 + i_{x2})^2}{(g_0 + x_2)^2} - \frac{(i_0 - i_{x2})^2}{(g_0 - x_2)^2} \right] + \sqrt{2} \cdot \left[\frac{(i_0 + i_{x1})^2}{(g_0 + x_1)^2} - \frac{(i_0 - i_{x1})^2}{(g_0 - x_1)^2} \right] \right)$$

Maximální síla za předpokladu nenulové výchylky a maximálního proudu ($i_x = i_0$):

$$F_x = \frac{\cos 11,25^\circ}{4} \mu_0 N^2 A i_{max}^2 \left(\frac{1}{(g_0 + x)^2} + \frac{\sqrt{2}}{g^2} \right)$$

kde g je:

$$g = \sqrt{g_0^2 + x^2 - 2 \cdot g_0 \cdot x \cdot \cos \gamma^\circ}$$

kde pro $x \geq 0$ je $\gamma = 135^\circ$ a pro $x < 0$ je $\gamma = 45^\circ$.

4.4. N-PÓLOVÉ LOŽISKO

Obecný výpočet více pólového ložiska, lze rozdělit na ložiska, jejichž počet pólů je dělitelný osmi a na ložiska, jejichž počet pólů není dělitelný osmi, ale je dělitelný čtyřmi. Příkladem ložiska, jehož počet pólů je dělitelný osmi je šesnácipólové ložisko. Při výpočtu maximální síly je uvažováno natočení, kde v horizontální ose jsou umístěny dva LMO a celková síla je tak vytvářena z LMO umístěných nad nimi. Obdobně, jako je to na obrázku 4.08a. poloha jedné LMO bude vždy ve středu a poloha ostatních LMO v horní úvratí bude záviset na počtu pólů. V horní úvratí vznikne kromě osové síly počet silových dvojic rovný $i = \frac{n}{8} - 1$, které mezi sebou budou svírat úhel $\beta_i = \sum_1^i i \cdot 8\alpha$. Součet všech sil ve směru svislé osy pak bude roven síle ložiska F_x respektivě F_{max} .

$$F_{x_{celková}} = F_{x_1} + \sum_{i=1}^{i=\frac{n}{8}-1} \frac{F_{x(i+1)}}{\sin(i \cdot 4\alpha)} \cdot \sin(180 - i \cdot 8\alpha)$$

kde $\alpha = \frac{360^\circ}{2n}$, takže po dosazení síly a úhlu dostaneme výpočet celkové síly ložiska:

$$F_{x_{celková}} = \frac{1}{4} \mu_0 N^2 A \left[\frac{(i_0 + i_{x_1})^2}{(g_0 + x_1)^2} - \frac{(i_0 - i_{x_1})^2}{(g_0 - x_1)^2} \right] \cdot \cos \frac{360^\circ}{2n} +$$

$$+ \sum_{i=1}^{i=\frac{n}{8}-1} \frac{\frac{1}{4} \mu_0 N^2 A \left[\frac{(i_0 + i_{x(i+1)})^2}{(g_0 + x_{i+1})^2} - \frac{(i_0 - i_{x(i+1)})^2}{(g_0 - x_{i+1})^2} \right] \cdot \cos \frac{360^\circ}{2n}}{\sin(i \cdot 4 \cdot \frac{360^\circ}{2n})} \cdot \sin(180 - i \cdot 8 \cdot \frac{360^\circ}{2n})$$

Celková síla nám bude působit proti největší výchylce, kterou je výchylka x_1 . Vzhledem k tomu, že výchylka není tedy u všech pólů stejná $x_{i+1} \neq x_1$, lze jí vyjádřit jako funkci největší výchylky.

$$x_{i+1} = x_1 \cdot \cos(i \cdot 4\alpha)$$

$$x_{i+1} = x_1 \cdot \cos\left(4 \cdot i \cdot \frac{360^\circ}{2n}\right)$$

Za předpokladu nulové výchylky $x_1 = 0$ a maximálních proudů $i_0 = i_x$ na všech pólech v horní úvratí, dostaneme obecnou rovnici pro maximální sílu od ložiska:

$$F_{max} = \frac{1}{4} \mu_0 N^2 A \frac{(i_0 + i_{x1})^2}{g_0^2} \cdot \cos \frac{360^\circ}{2n} \cdot \left[1 + \sum_1^i \frac{1}{\sin(i \cdot 4 \cdot \frac{360^\circ}{2n})} \cdot \sin(180 - i \cdot 8 \cdot \frac{360^\circ}{2n}) \right]$$

Síla FG, pak u ložisek s více póly nebude nabývat daleko vyšších hodnot, protože póly mezi sebou svírají velmi malý úhel. Největší sílu vlivem natočení lze spočítat obdobně, jako v předchozím případě. Tentokrát však neuvažujeme LMO v horizontální ose, ale že polovina všech LMO zabírá v horní úvrati, obdobně, jako je to na obrázku 4.08b. Počet spolu zabírajících silových dvojic je tedy $i = \frac{n}{8}$, kde první dvojice svírá mezi sebou úhel

$$\beta_1 = 4\alpha$$

a obecně pak úhel:

$$\beta_i = 4\alpha + \sum_0^{i-1} (i-1) \cdot 8 \cdot \alpha.$$

Celková síla je pak vektorovým součtem všech sil, neboli je součtem výslednic silových dvojic:

$$FG_x = \frac{F_{x1}}{\sin \frac{\beta_1}{2}} \cdot \sin(180 - \beta_1) + \sum_2^i \frac{F_{xi}}{\sin \frac{\beta_i}{2}} \cdot \sin(180 - \beta_i)$$

$$FG_x = \frac{F_{x1}}{\sin 2\alpha} \cdot \sin(180 - 4\alpha) +$$

$$+ \sum_2^i \left[\frac{F_{xi}}{\sin \frac{4\alpha + \sum_{i-1}^0 (i-1) \cdot 8 \cdot \alpha}{2}} \cdot \sin(180 - 4\alpha + \sum_0^{i-1} (i-1) \cdot 8 \cdot \alpha) \right]$$

Celková síla nám bude působit proti největší výchylce, kterou je obecná výchylka x . Vzhledem k tomu, že výchylka není tedy u všech pólů stejná $x_i \neq x$, lze jí vyjádřit jako funkci největší výchylky.

$$x_i = x \cdot \cos \left(2\alpha + \sum_2^i i \cdot 4 \cdot \alpha \right)$$

$$x_i = x \cdot \cos \left(\frac{360^\circ}{n} + \sum_2^i i \cdot 4 \cdot \frac{360^\circ}{2n} \right)$$

$$\begin{aligned}
 FG_x = & \\
 & \frac{1}{4} \mu_0 N^2 A \left[\frac{(i_0 + i_{x1})^2}{\left(g_0 + x \cdot \cos \frac{360^\circ}{n}\right)^2} - \frac{(i_0 - i_{x1})^2}{\left(g_0 - x \cdot \cos \frac{360^\circ}{n}\right)^2} \right] \cdot \cos \frac{360^\circ}{2n} \\
 = & \frac{\left[\frac{(i_0 + i_{x1})^2}{\left(g_0 + x \cdot \cos \frac{360^\circ}{n}\right)^2} - \frac{(i_0 - i_{x1})^2}{\left(g_0 - x \cdot \cos \frac{360^\circ}{n}\right)^2} \right] \cdot \cos \frac{360^\circ}{2n}}{\sin \frac{360^\circ}{n}} \cdot \sin \left(180 - 2 \frac{360^\circ}{n}\right) \\
 & + \sum_2^i \left[\frac{\left\{ \frac{(i_0 + i_{xi})^2}{\left(g_0 + x \cdot \cos \left(\frac{360^\circ}{n} + \sum_2^i i \cdot 4 \cdot \frac{360^\circ}{2n}\right)\right)^2} - \frac{(i_0 - i_{xi})^2}{\left(g_0 - x \cdot \cos \left(\frac{360^\circ}{n} + \sum_2^i i \cdot 4 \cdot \frac{360^\circ}{2n}\right)\right)^2} \right\}}{\sin \frac{2 \frac{360^\circ}{n} + \sum_0^{i-1} (i-1) \cdot 4 \cdot \frac{360^\circ}{n}}{2}} \right] \\
 & \cdot \frac{1}{4} \mu_0 N^2 A \cdot \cos \frac{360^\circ}{2n} \sin \left(180^\circ - 2 \frac{360^\circ}{n} + \sum_0^{i-1} (i-1) \cdot 4 \cdot \frac{360^\circ}{n}\right)
 \end{aligned}$$

Maximální síla FG pak vychází opět z předpokladu nulové výchylky $x = 0$ a maximálních proudů $i_0 = i_x$ na všech pólech v horní úvrati, dostaneme obecnou rovnici pro maximální možnou sílu od ložiska v nejlépe možném případě natočení:

$$\begin{aligned}
 FG_{max} = & \frac{\frac{1}{4}\mu_0 N^2 A \frac{(i_0 + i_x)^2}{g_0^2} \cdot \cos \frac{360^\circ}{2n}}{\sin \frac{360^\circ}{n}} \cdot \sin \left(180 - 2 \frac{360^\circ}{n} \right) \\
 & + \sum_2^i \frac{1}{4} \mu_0 N^2 A \left[\frac{\frac{(i_0 + i_x)^2}{g_0^2}}{\sin \frac{2 \frac{360^\circ}{n} + \sum_0^{i-1} (i-1) \cdot 4 \cdot \frac{360^\circ}{n}}{2}} \right. \\
 & \left. \cdot \cos \frac{360^\circ}{2n} \cdot \sin \left(180^\circ - 2 \frac{360^\circ}{n} + \sum_0^{i-1} (i-1) \cdot 4 \cdot \frac{360^\circ}{n} \right) \right]
 \end{aligned}$$

Obecný výpočet ložiska s počtem pólů dělitelných čtyřmi, ale ne osmi. Obdobně jako v předchozím příkladu bude záviset na natočení ložiska. Velikost síly v závislosti na natočení se bude pohybovat od F_x do FG_x . V případě F_x bude ložisko natočeno tak, že jeden pár LMO bude v horizontální ose, obdobně jako je to na obr. 4.06a. Počet silových dvojic, které vzniknou v horní úvratí ložiska, bude rovný

$$i = \frac{n - 4}{8}$$

a mezi kterými bude úhel:

$$\beta_i = 4\alpha + \sum_0^{i-1} (i-1) \cdot 8 \cdot \alpha$$

$$\beta_i = 2 \frac{360^\circ}{n} + \sum_0^{i-1} (i-1) \cdot 4 \cdot \frac{360^\circ}{n}$$

Celková síla od těchto silových dvojic pak bude součtem jejich výslednic.

$$F_x = \sum_1^i \frac{F_{xi}}{\sin \frac{\beta_i}{2}} \cdot \sin(180 - \beta_i)$$

Celková síla nám bude působit proti největší výchylce, kterou je obecná výchylka x . Vzhledem k tomu, že výchylka není tedy u všech pólů stejná $x_i \neq x$, lze jí vyjádřit jako funkci největší výchylky.

$$x_i = x \cdot \cos \left(2\alpha + \sum_2^i i \cdot 4 \cdot \alpha \right)$$

$$x_i = x \cdot \cos \left(\frac{360^\circ}{n} + \sum_2^i i \cdot 2 \cdot \frac{360^\circ}{n} \right)$$

Po dosazení do původní rovnice vyjde síla F_x :

$$F_x = \sum_1^i \left[\frac{\frac{(i_0 + i_x)^2}{\left(g_0 + x \cdot \cos \left(\frac{360^\circ}{n} + \sum_2^i i \cdot 2 \cdot \frac{360^\circ}{n} \right) \right)^2} - \frac{(i_0 - i_x)^2}{\left(g_0 - x \cdot \cos \left(\frac{360^\circ}{n} + \sum_2^i i \cdot 2 \cdot \frac{360^\circ}{n} \right) \right)^2}}{\sin \frac{2 \frac{360^\circ}{n} + \sum_0^{i-1} (i-1) \cdot 4 \cdot \frac{360^\circ}{n}}{2}} \right]$$

$$\cdot \frac{1}{4} \mu_0 N^2 A \cdot \cos \frac{360^\circ}{2n} \cdot \sin \left(180 - 2 \frac{360^\circ}{n} + \sum_0^{i-1} (i-1) \cdot 4 \cdot \frac{360^\circ}{n} \right)$$

Za předpokladu nulové výchylky $x_1 = 0$ a maximálních proudů $i_0 = i_x$ na všech pólech v horní úvrati, dostaneme obecnou rovnici pro maximální sílu od ložiska:

$$F_{x_{max}} = \frac{1}{4} \mu_0 N^2 A \sum_1^i \frac{\frac{(i_0 + i_x)^2}{g_0^2} \cdot \cos \frac{360^\circ}{2n}}{\sin \frac{2 \frac{360^\circ}{n} + \sum_0^{i-1} (i-1) \cdot 4 \cdot \frac{360^\circ}{n}}{2}} \cdot \sin \left(180 - 2 \frac{360^\circ}{n} + \sum_0^{i-1} (i-1) \cdot 4 \cdot \frac{360^\circ}{n} \right)$$

V případě druhého natočení ložiska, kdy bude v horní úvrati polovina LMO, dostaneme sílu FG_x . Jeden LMO bude vždy ve svislé ose a ve stejném směru budou působit výslednice silových dvojic, kterých bude ještě navíc:

$$i = \frac{n-4}{8}$$

svírat mezi sebou budou úhel

$$\beta_i = \sum_1^i i \cdot 8\alpha$$

$$\beta_i = \sum_1^i i \cdot 4 \cdot \frac{360^\circ}{n}$$

Součet sil pak bude roven součtu jejich výslednic:

$$FG_x = F_{x_1} + \sum_1^i \frac{F_{x(i+1)}}{\sin(i \cdot 4\alpha)} \cdot \sin(180 - i \cdot 8\alpha)$$

Celková síla FG_x nám bude působit proti největší výchylce, kterou je výchylka x_1 . Vzhledem k tomu, že výchylka není tedy u všech pólů stejná $x_{i+1} \neq x_1$, lze jí vyjádřit jako funkci největší výchylky.

$$x_{i+1} = x_1 \cdot \cos(i \cdot 4\alpha)$$

$$x_{i+1} = x_1 \cdot \cos\left(i \cdot 2 \cdot \frac{360^\circ}{n}\right)$$

kde $x_1 = x$

$$\begin{aligned} FG_x = & \\ = & \frac{1}{4} \mu_0 N^2 A \left[\frac{(i_0 + i_{x_1})^2}{(g_0 + x_1)^2} - \frac{(i_0 - i_{x_1})^2}{(g_0 - x_1)^2} \right] \cdot \cos \frac{360^\circ}{2n} \\ & + \sum_1^i \frac{\frac{1}{4} \mu_0 N^2 A \left[\frac{(i_0 + i_{x(1+i)})^2}{\left(g_0 + x_1 \cdot \cos\left(i \cdot 2 \cdot \frac{360^\circ}{n}\right)\right)^2} - \frac{(i_0 - i_{x(1+i)})^2}{\left(g_0 - x_1 \cdot \cos\left(i \cdot 2 \cdot \frac{360^\circ}{n}\right)\right)^2} \right] \cdot \cos \frac{360^\circ}{2n}}{\sin\left(i \cdot 2 \cdot \frac{360^\circ}{n}\right)} \\ & \cdot \sin\left(180 - i \cdot 4 \cdot \frac{360^\circ}{n}\right) \end{aligned}$$

Platí za předpokladu $i \geq 1$.

Za předpokladu nulové výchylky $x_1 = 0$ a maximálních proudů $i_0 = i_x$ na všech pólech v horní úvrati, dostaneme obecnou rovnici pro maximální sílu od ložiska:

$$FG_{max} = \frac{1}{4} \mu_0 N^2 A \frac{(i_0 + i_x)^2}{g_0^2} \cdot \cos \frac{360^\circ}{2n} \cdot \left[1 + \sum_1^i \frac{\sin(180 - i \cdot 4 \frac{360^\circ}{n})}{\sin(i \cdot 2 \frac{360^\circ}{n})} \right]$$

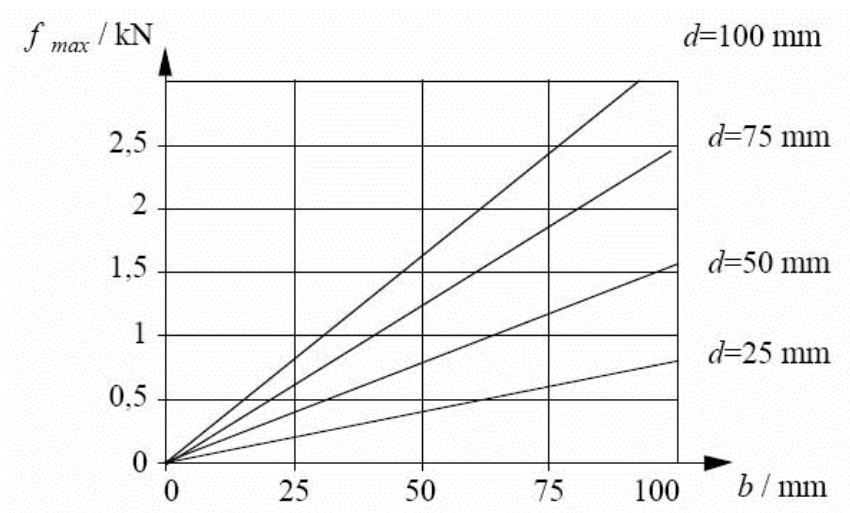
4.5. ZESÍLENÍ A TUHOST LOŽISEK

Zesílení a tuhost lze vyjádřit pro obecný počet pólů symetrického ložiska za předpokladu $x = y = i_{p,x} = i_{p,y} = 0$ [19], kde n je počet pólů:

$$K_i = \frac{n \cdot \mu_0 \cdot N^2 \cdot A \cdot i_0}{2g^2} \quad K_x = -\frac{n \cdot \mu_0 \cdot N^2 \cdot A \cdot i_0^2}{2g^3}$$

Zesílení aktuátoru je proporcionální předmagnetizačnímu proudu a inverzně proporcionální čtverci velikosti vzduchové mezery. Tuhost otevřené smyčky (tzv. negativní tuhost magnetických ložisek) se v absolutní hodnotě zvyšuje s rostoucím předmagnetizačním proudem, nebo zmenšující se vzduchovou mezerou.

Maximální nosná síla je při splnění podmínek maximálního možného magnetického toku závislá na průměru a šířce ložiska. Lze proto určit měrnou zátěžovou plochu, která se pohybuje okolo 32 N/cm². Při použití kobaltových slitin (velmi drahé) namísto oceli lze docílit ještě větší úměrné nosnosti a to až 60 N/cm²[19].



Obr. 4.11 - závislost síly na průměru ocelového ložiska a jeho šířce dle [16].

5. VELIKOST LOŽISKA

Magnetomotorická síla je generována cívkami elektromagnetu. Tyto cívky jsou navinuty okolo pevného jádra ložiska. Jestliže použijeme malý průměr drátu, tak se nám do průřezu jednoho centimetru čtverečního vejde více závitů, než když použijeme drát velkého průměru. Poměr mědi v průřezu se nám měnit nebude, ale zůstane téměř konstantní, ať použijeme větší, nebo menší průměr drátu. Dráty s menšími průměry mají totiž i tenčí izolace okolo sebe a poměr plochy mědi v řezu cívkou k poměru plochy celého řezu cívkou zůstane stejný. Tento poměr je povětšinou okolo 0,5, maximálně však 0,7. Na průměru drátu je ovšem i závislý proud, který můžeme použít. Malé průměry z tepelných důvodů nemohou vést silné proudy. Dle [1] je obecně za maximální doporučenou proudovou hustotu považováno $6 A/mm^2$ pro měděný drát.

Plochu průřezu cívky lze odvodit z obvodu rotoru. Zanedbáme-li vliv vzduchové mezery, tak obvod rotoru podělený počtem pólů dává výseč, do které se musí vejít dvakrát šířka cívky a šířka pólu.

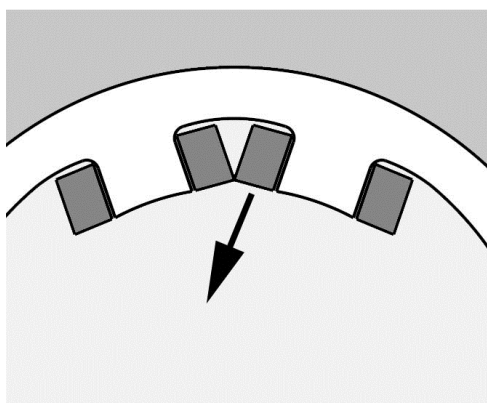
$$c = \frac{\pi \cdot D \cdot (1 - f)}{2n}$$

kde c je šířka plochy cívky. f je poměr množství ocele a prostoru pro cívku. Součinitel f je vhodné volit s uvážením, že vysoké f nedá prostor pro cívku, čímž se zmenší počet možných závitů a nedosáhne se velké magnetické indukce. Naopak nízké f sníží šířku pólu a pro zachování plochy pólu dojde k úměrnému zvětšení délky ložiska.

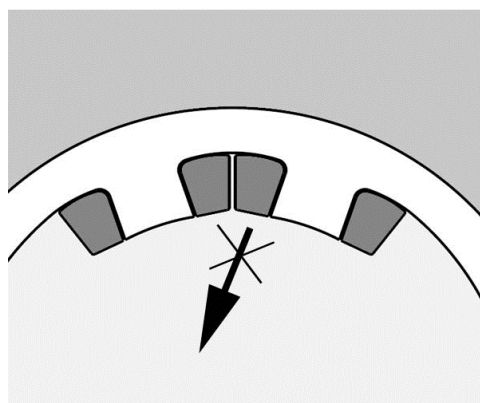
Obdobně lze dostat šířku pólu ložiska:

$$w = \frac{\pi \cdot D \cdot f}{n}$$

Pro stanovení celkové plochy cívky je nutno uvažovat, zda je cívka na pólu rozebíratelná dle obr. 5.01, nebo nerozebíratelná dle obr. 5.02.



Obr. 5.01 uložení rozebíratelné cívky

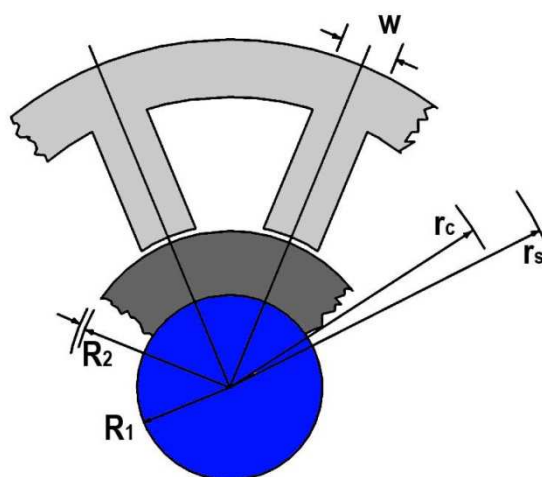


Obr. 5.02 uložení nerozebíratelné cívky

V případě rozebíratelné cívky je plocha cívky:

$$A_c = w \cdot (r_c - R)$$

kde R je vnitřní poloměr statoru a r_c poloměr nad cívku viz obr. 5.03.



Obr. 5.03 – rozměry na ložisku

V případě nerozebíratelné cívky je třeba k ploše cívky přidat i trojúhelníkovou výseč, která je u rozebíratelné cívky nevyplněná:

$$A_c = w \cdot (r_c - R_2) + \frac{(r_c - R_2)^2 \cdot \sin \frac{360}{2n}}{2}$$

Jak bylo řečeno v úvodu, skutečná plocha cívky je menší vlivem navinutí a izolace. Skutečná plocha průřezu cívky:

$$A_c^* = 0,5 \text{ až } 0,7 A_c$$

Z této skutečné plochy lze pak vypočítat počet závitů:

$$N = \frac{4 \cdot A_c^*}{\pi \cdot d_{Cu}}$$

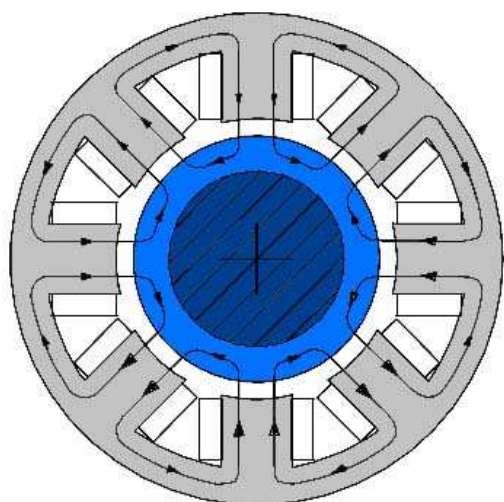
kde d_{Cu} je průměr drátu bez izolace.

Pokud je dodržen požadavek maximální proudové hustoty 6 A/mm^2 pro měděný vodič, lze vypočítat maximální použitelný proud:

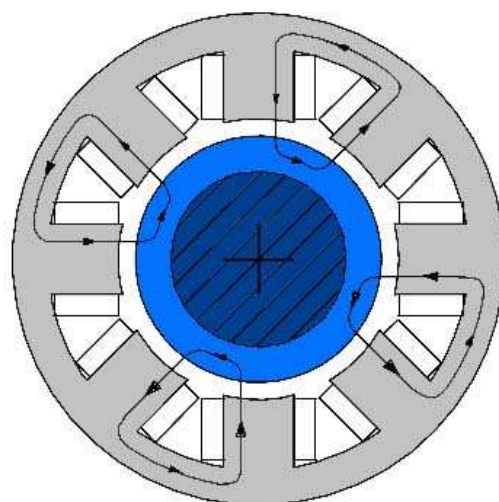
$$i_{max} = i_0 + i_x < \frac{3}{2} \cdot \pi \cdot d_{Cu}^2$$

Při použití vyššího proudu se musí začít uvažovat o aktivním chlazení statoru. V případě ložiska pro použití při vyšších teplotách se musí použít materiály pro cívku, které mají stabilní elektrické vlastnosti při těchto teplotách. [28] kupříkladu uvádí cívku zhotovenou z „thermocoaxu“ (obr. 10.06), která má dobrou elektrickou stabilitu i při 700°C a lze použít proudovou hustotu i přes 12 A/mm^2 . Tato vysokoteplotní ložiska však nemají dlouhou životnost a jsou navrhovány na omezený čas. Poté je nutné cívky vyměnit.

Další rozměry na ložisku se volí s ohledem na předchozí výpočet. Předpokladem bylo, že magnetický tok se bude uzavírat z jednoho pólu do druhého, bude nedělený (viz obr. 5.05).



Obr. 5.04 – Dělený magnetický tok [19]



Obr. 5.05 – Nedělený magnetický tok [19]

Takto navržený design má velkou výhodu v jednoduchosti řízení. Jeho nevýhoda je ale v množství materiálu ložiska. Aby nedošlo ke ztrátám magnetického toku, musí být veškeré části ložiska, kterými prochází magnetický tok, stejně široké jako je šířka pólu ložiska.

$$R_1 = R_2 - w$$

$$r_s = r_c + w$$

V případě rozloženého magnetického toku podle obr. 5.04 by došlo k uzavírání z jednoho pólu do okolních dvou a došlo by tak k výraznějšímu využití materiálu ložiska. Šířka ostatních částí by pak mohla být pouze polovina šířky pólu.

$$r_s = r_c + \frac{w}{2}$$

$$R_1 = R_2 - \frac{w}{2}$$

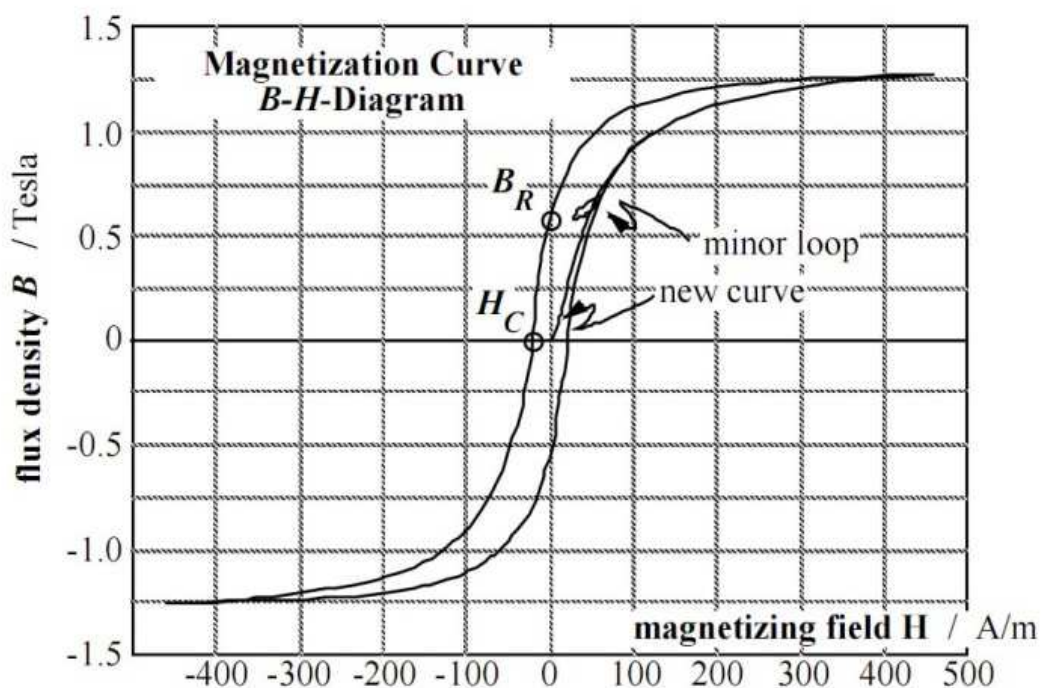
Toto řešení má však daleko složitější řízení, je vhodné při použití samostatné cívky na každý pól a tedy je nutno použít i dvojnásobný počet zesilovačů a v neposlední řadě se zvětšují ztráty vlivem vířivých proudů.

6. SATURACE

Saturace, neboli nasycení materiálu magnetickým tokem je způsobená nelineární závislostí magnetické indukce na intenzitě.

$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H$$

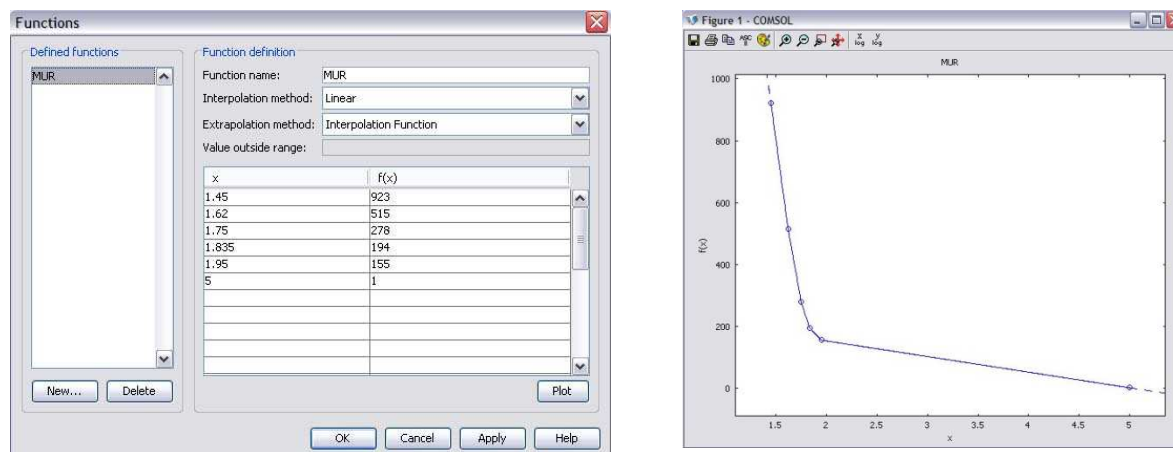
μ_r – relativní permeabilita není konstanta, ale je funkcí magnetické intenzity $\mu_r = f(\vec{B})$. S rostoucí intenzitou relativní permeabilita klesá a magnetická indukce konvertuje ke své hranici, jako je to na obrázku 6.01.



Obr. 6.01 – graf závislosti indukce a intenzity pro uhlíkovou ocel. [15]

Stator ložiska stejně jako vnější část rotoru je sestaven z lisovaných plechů, které mají zhruba desetinásobně větší relativní permeabilitu než běžná ocel. Zároveň díky vysokým proudům lze očekávat vysokou hodnotu magnetické indukce, proto již nelze použít konstantní závislost

magnetické indukce na intenzitě. Při modelování ložisek na obr. 4.05, 4.07 a 4.09 byla použita pro definování relativní permeability data na obr. 6.02.



Obr. 6.02 – zadání funkce μ_r v programu Comsol a její graf v závislosti na intenzitě.

Proměnná μ_r je definovaná pomocí interpolace jednotlivých bodů z tabulky. Tabulka byla vyplněna dle empirických hodnot z firmy ŠKODA pro ocel 11373. Tabulka uvádí závislost relativní permeability na magnetické intenzitě. V grafickém vyjádření je pak možnost vidět relativní permeabilitu jako funkci intenzity. Označení B_{sat} je označení maximální indukce, které je schopen materiál dosáhnout a pro kterou lze magnetické ložisko navrhnout. Po dosažení této hranice magnetická indukce již výrazně nenarůstá, i když magnetická intenzita nadále roste. [19] uvádí maximální intenzitu pro ložiska s uhlíkovou ocelí $B_{max} = 1,5T < B_{sat}$. Použitím lepších a dražších materiálů jakou jsou kobaltové slitiny a železná skla lze dosáhnout intenzity nasycení přes 2T (viz kapitola 7 – hledání nejvhodnějšího materiálu).

Pro výpočet maximálního proudu a počtu závitů cívky lze odvodit z energie v mezeře a za maximální hodnoty lze dosadit maximální hodnoty při nasycení.

$$B_{sat} = \frac{\mu_0 N i_{max}}{2g_0}$$

Při dosažení maximální možné indukce, kterou je indukce při nasycení a maximální možný použitelný proud, lze dopočítat počet závitů. Jedná se nutný počet závitů pro dosažení maximálních hodnot.

Za maximální proud se dosadí proud vypočtený z maximální proudové hustoty:

$$i_{max} = \frac{3}{2} \cdot \pi \cdot d_{Cu}^2$$

Pro tento proud je potřeba navrhnout zesilovače.

Potřebný počet závitů v cívce je tedy:

$$N = \frac{4}{3} \cdot \frac{g_0 \cdot B_{sat}}{\pi \cdot \mu_0 \cdot d_{Cu}^2}$$

7. VÝBĚR MATERIÁLU PRO AKTIVNÍ MAGNETICKÉ LOŽISKO

Při výběru vhodného materiálu lze za rozhodující fyzikální vlastnosti považovat:

- relativní permeabilitu μ_r (co nejvyšší)
- sytnou magnetickou indukci B_s (co nejvyšší)
- remanenci B_r (co nejnižší)

Požadované hodnoty těchto vlastností jsou charakteristické pro tzv. „magneticky měkké materiály“. Vysoká relativní permeabilita a sytná indukce zajišťují únosnost magnetického ložiska, zatímco úzká hysterezní smyčka (charakterizovaná malou hodnotou remanence) zajistí minimální ztráty hysterezí a negativní účinek zmagnetizovaného materiálu.

Pro funkční parametry a provozní charakteristiky ložiska jsou důležité další fyzikální a mechanické vlastnosti:

- mez kluzu (pro rotor – co nejvyšší)
- tepelná vodivost (pro stator)
- modul pružnosti (pro rotor – co nevyšší)
- Poissonovo číslo (pro rotor – co nejnižší)
- hustota (pro rotor – co nejnižší)
- korozní odolnost

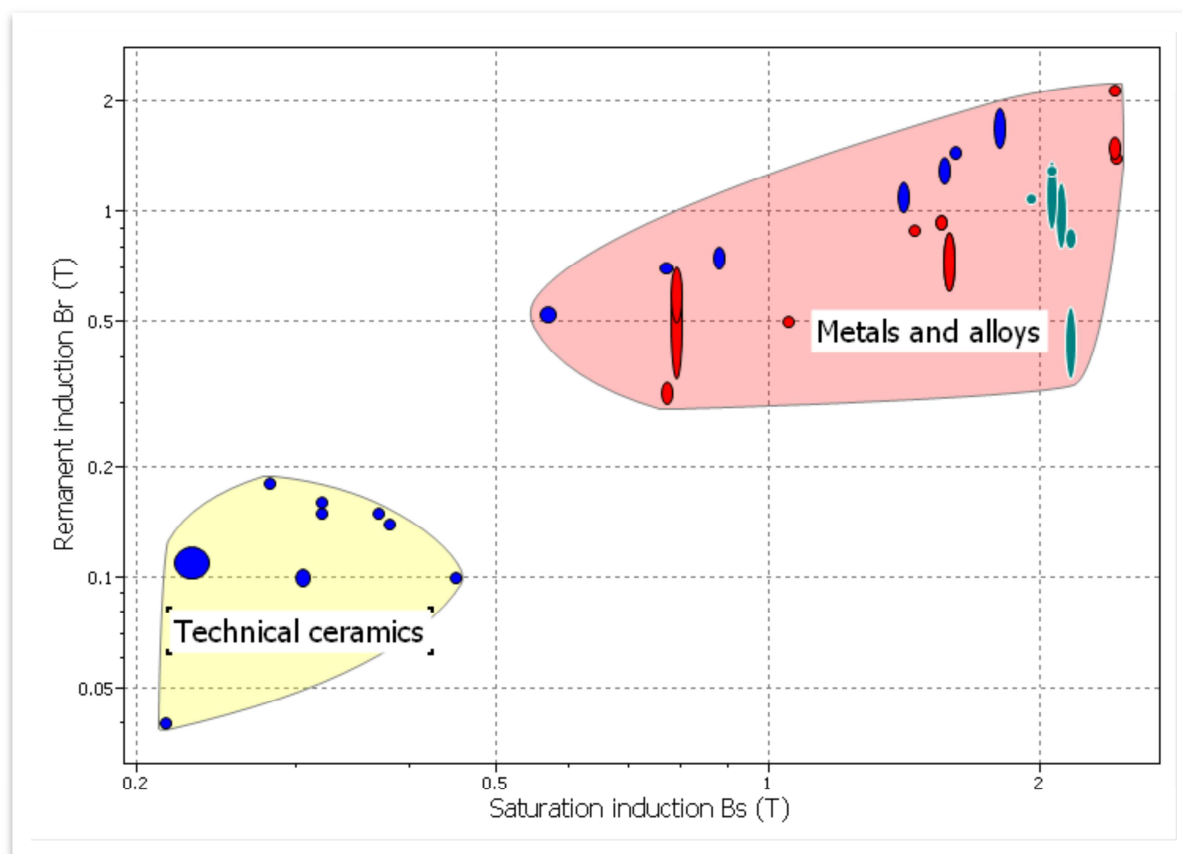
Mez kluzu materiálu rotoru je rozhodující charakteristikou pro maximální otáčky ložiska při daném průměru rotoru. Další důležitou veličinou modul pružnosti, který vyjadřuje míru deformace od napětí vzniklého vysokými otáčkami. Ve statoru i rotoru dochází k vývinu tepla z důvodu hysterezních ztrát, rotor se však samovolně díky rychlé rotaci ochlazuje vzduchem (nepracuje-li ložisko ve vakuu). Korozní odolnost materiálu určí prostředí, ve kterých ložisko může pracovat. Poissonovo číslo a hustota materiálu také ovlivňují pevnost rotoru, ale ne tak významně jako mez kluzu a modul pružnosti.

Vlastní výběr materiálů byl uskutečněn pomocí materiálové databáze CES EduPack 2010. Pro výběr materiálu je uvažováno šest charakteristik. Pro znázornění všech naráz by byla potřeba šestiřozměrný, a tedy prakticky nerealizovatelný graf. Bylo využito

tvorby 2D grafů, které umožňují přehledné porovnání vždy dvou vlastností vybraných materiálů. Proto byl výběr uskutečňován v krocích. V každém kroku byla přidána jedna či dvě vlastnosti, podle kterých se provedla selekce materiálů získaných z kroku předcházejícího.

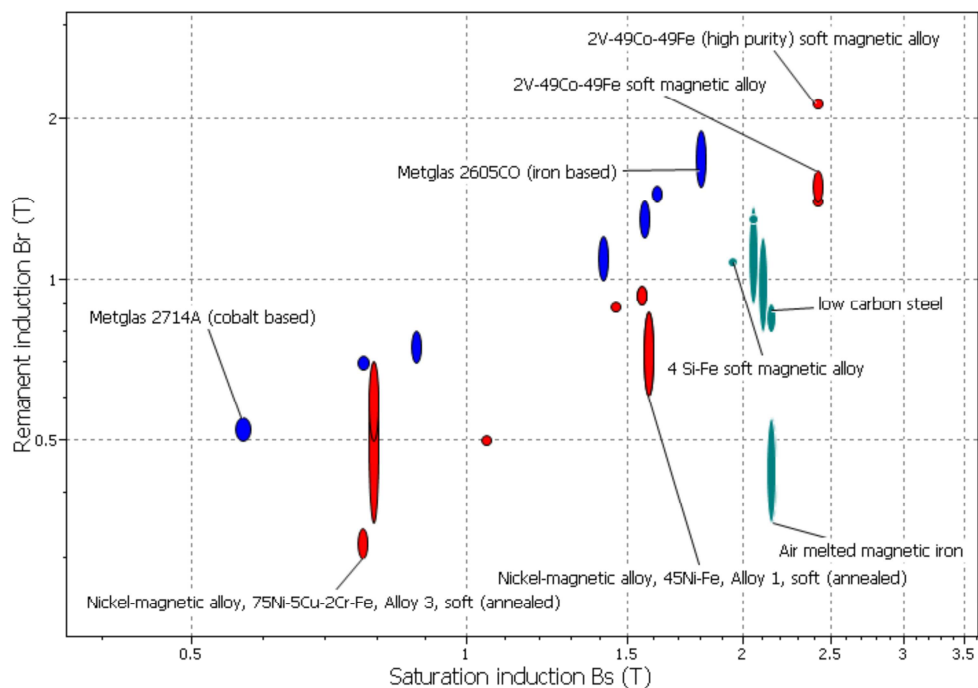
7.1. VÝBĚR MATERIÁLU VHODNÝCH MAGNETICKÝCH VLASTNOSTÍ

Prvním krokem výběru bylo znázornění saturační indukce a remanence. Ideálním materiálem by byl materiál s minimální remanentní indukcí a co nejvyšší saturační indukcí.

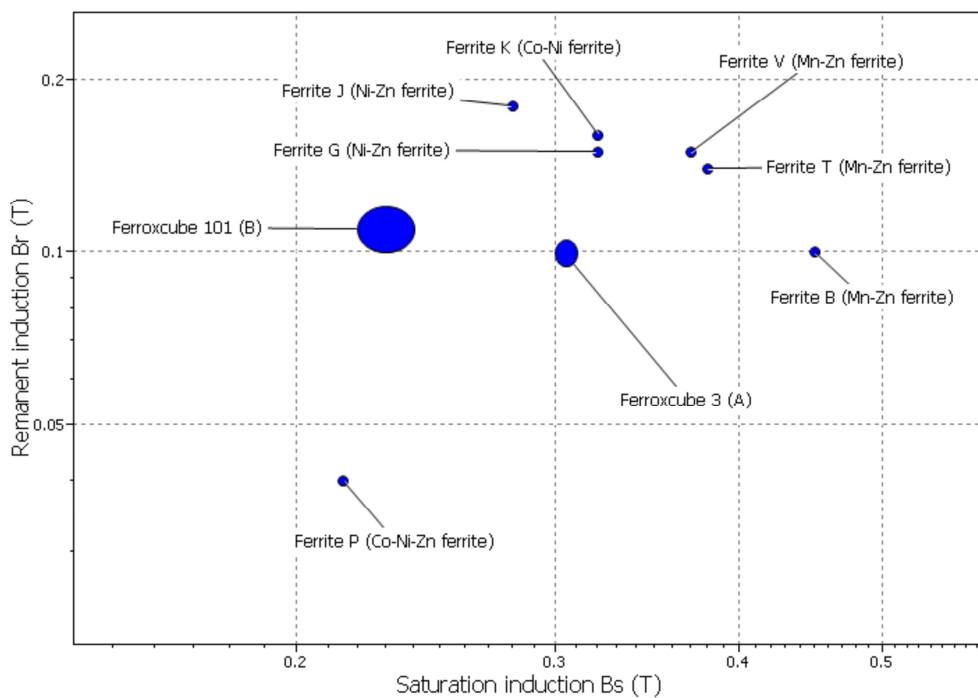


Obr. 7.01 – Materiály dle závislosti remanentní indukce a saturační indukce.

V databázi bylo nalezeno 33 záznamů, které zastupují hlavní skupiny feromagnetických materiálů. Dají se rozdělit na dvě základní skupiny, keramické materiály a kovy či jejich slitiny. Následují detaily zaměřené na obě skupiny (obr. 7.2 a 7.3).



Obr. 7.02 – Detail závislosti remanentní indukce a saturační indukce pro kovy a slitiny.



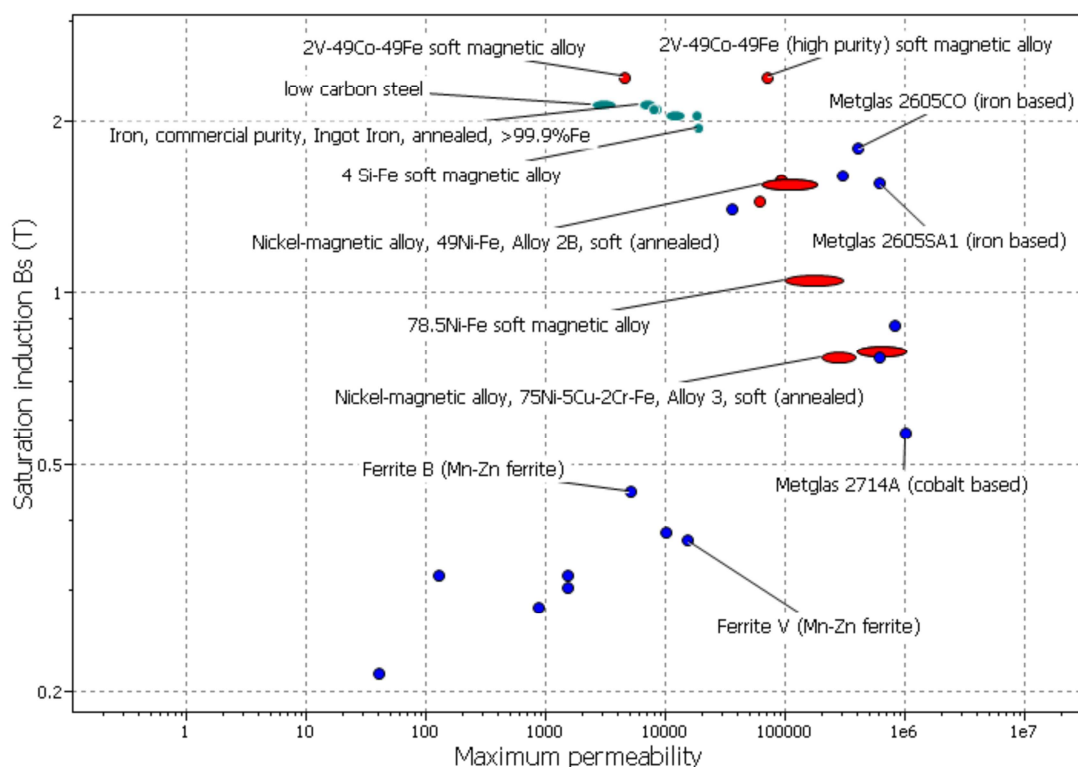
Obr. 7.03 – Detail závislosti remanentní indukce a saturační indukce pro keramické materiály.

V současné době je pro konstrukci magnetických ložisek běžně používána měkká uhlíková ocel třídy 11, zde označena jako AISI 1010. Má velmi dobrou kombinaci sytné magnetické indukce a remanence, zároveň jde o levný a snadno zpracovatelný materiál. Nevýhodou je nízká mez kluzu. Jiné nákladnější druhy feromagnetik mají šanci nahradit tuto ocel pravděpodobně pouze ve speciálních aplikacích, ve kterých bude rozhodující jeden určitý parametr.

Nejvyšších hodnot saturační indukce dosahují magneticky měkké slitiny železa a kobaltu.

Na opačném pólu stojí ferity, tedy feromagnetická keramika s nízkou sytnou indukcí (do 0,45T) ale zároveň s bezkonkurenčně nejnižší remanencí (do 0,2T). Nejvhodnější pro použití v ložisku by byl ferit B s příměsí manganu a zinku (saturační indukce 0,45T a remanentní indukce 0,1T). Hysterezní ztráty jsou však nejmenšími ze všech ztrát v ložisku, proto je jejich minimalizace nepodstatná a mohla by být relevantní pouze ve specializované aplikaci.

Dále byl použit graf saturační indukce a relativní permeability.



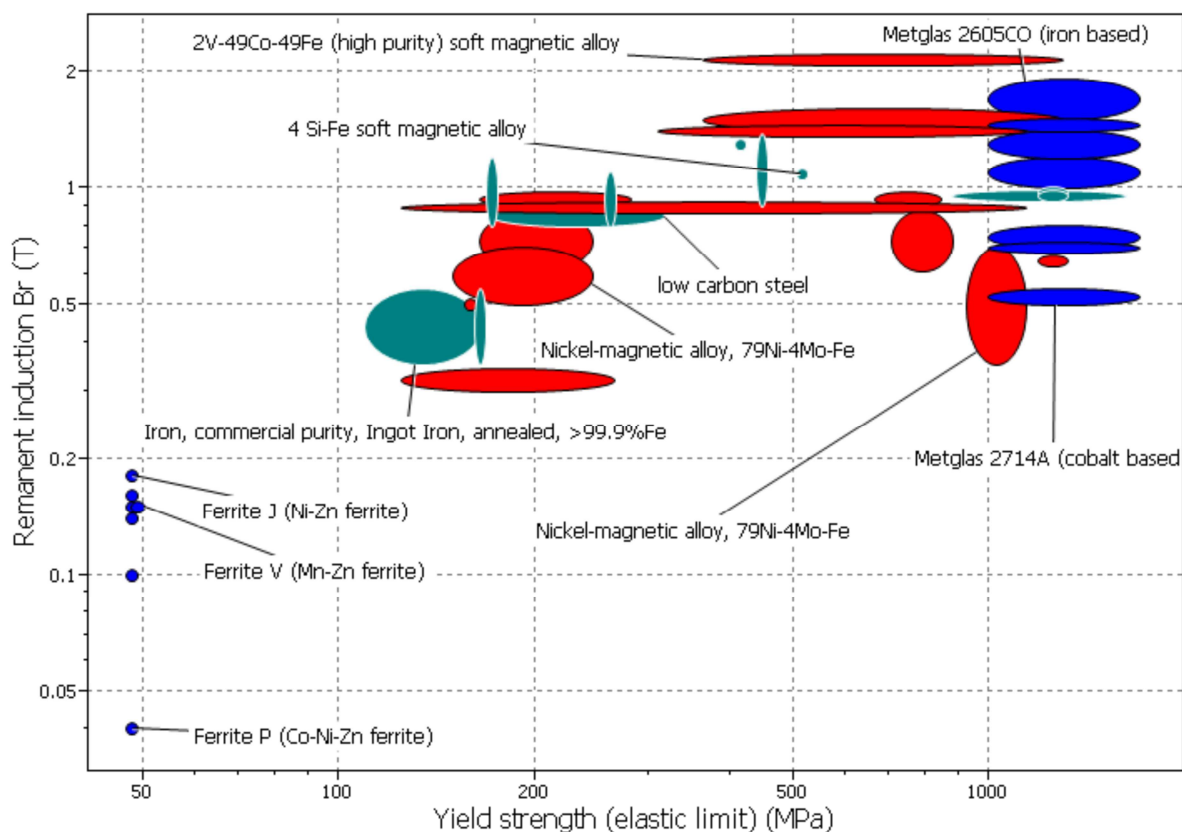
Obr. 7.04 – Kovy a slitiny v závislosti saturační indukce a relativní permeability.

Pro řízení AML je výhodná co nejvyšší permeabilita. Běžně používaná nízkouhlíková ocel má permeabilitu nižší, než magnetické slitiny železa a křemíku, železa a kobaltu a také než feromagnetická kovová skla.

7.2. MATERIÁL ROTORU - ZOHLEDNĚNÍ MEZE KLUZU

Statorové kroužky jsou na hřídel ložiska nalisovány, jsou na něm upevněny díky předpětí vyvolaném přesahem hřídele. Toto předpětí je snižováno díky odstředivé síle, která se snaží otáčející se stator roztahovat. Kritické jsou tečné napětí v rotorových kroužkách.

Feromagnetiky s nejvyšší mezí kluzu jsou kovová skla s $Re > 1000\text{MPa}$.



Obr. 7.05 – graf závislosti remanentní indukce a meze kluzu.

7.3. VÝBĚR PERSPEKTIVNÍCH MATERIÁLŮ

Měkká uhlíková ocel má velmi dobré magnetické vlastnosti a relativně vysokou teplotu použitelnosti. Její nahrazení jiným materiálem můžeme uvažovat v případě zvláštního důrazu na některou materiálovou charakteristiku.

Materiál rotoru je namáhám odstředivou silou, proto je na něj kladen požadavek mechanické pevnosti. Uhlíkovou ocel je možno nahradit pevnějším materiálem.

Nejpevnějšími feromagnetiky jsou kovová skla s mezí kluzu přes 1000MPa. Jejich nevýhodou je nižší sytná indukce a také maximální teplota použití. Kovová skla naopak vynikají svou vysokou relativní permeabilitou. Přesná hodnota teplotní vodivosti je neznámá, je však nižší, než u krystalických kovových slitin.

Vysoká mez kluzu je rovněž uváděna u slitiny o složení 2%V, 49%Co a 49%Fe (známá pod obchodním názvem Supermendur). Ideální magnetické vlastnosti této slitiny jsou však dosažitelné pouze při co nejméně narušené krystalové mřížce, tedy ve stavu s minimálním zpevněním s mezí kluzu v blízkosti dolní meze 365MPa.

Jak Supermendur, tak i kovová skla se vyrábějí v podobě pásků tloušťky maximálně několika desetin milimetru. To umožňuje sestavit rotor a stator z tenkých segmentů a tím omezit ztráty vířivými proudy.

V případě statoru není rozhodující mechanická pevnost, větší důraz je kladen na magnetickou a tepelnou vodivost (rotor se chladí díky vysokým otáčkám samovolně vzduchem, nepracuje-li ložisko ve vakuu). V tomto případě je možné použít např. železo technické čistoty 99,9%. To má jak vyšší permeabilitu, tak i vyšší teplotní vodivost.

Feromagnetickou keramiku v podobě některého druhu feritu by bylo vhodné použít pouze v případě, kdy by byl zvláštní důraz kladen na hysterezní ztráty. Sytná magnetická indukce, mechanická pevnost či relativně nízká permeabilita však tento materiál vyřazují z běžného použití.

MATERIÁL	Bs[T]	Br[T]	$\mu_r[-]$	Re [MPa]	max. tepl. [°C]	ν - Poisson	E [GPa]	hust. ρ [kg/m ³]
měkká uhlíková ocel	2,15	0,8	2420-3800	310-430	740	0,29-0,3	205- 215	7850
99,9% Fe	2,15	0,35- 0,55	6000-8000	110-165	760	0,29-0,3	204- 212	7870
4Si-Fe	1,95	1,08	18500	517	735	-	-	7850
2V-49Co-49Fe	2,4	2,14	70000	365-1300	970	-	195- 205	8120
kovové sklo 2605CO	1,8	1,5-1,9	400000	1000- 1700	125	0,4	100- 110	7560
Kovové sklo 2714A	0,56	0,5- 0,55	1000000	1300- 1700	90	0,4	100- 110	7580
Ferit B (Mn-Zn)	0,54	0,1	5000	48	165	-	124	

Tabulka teplotní vodivosti a odhadované ceny.

MATERIÁL	λ [W/m°C]	cena [Kč/kg]
měkká uhlíková ocel	50-54	13
99,9% Fe	70-81	12
4Si-Fe		14
2V-49Co-49Fe	29-31	380
kovové sklo 2605CO		129
Kovové sklo 2714A		129
Ferit B (Mn-Zn)	4,2	19

Poznámka:

Podkapitoly 7.1, 7.2 a 7.3 byly vytvořeny ve spolupráci s Ing. Dlouhým, doc. Duchkem a Ing. Mazínovou. Uvedené výsledky z těchto kapitol budou publikovány v odborném periodiku.

7.4. MATERIÁL CÍVKY

Běžně užívaným materiálem pro cívku je měď. Pro zvýšení proudové hustoty nebo pro práci při vyšších teplotách lze použít i jiné materiály jako je například stříbro nebo Thermocoax.



Obr. 7.06 – příklad použití cívek a, ze stříbra a b, z Thermocoaxu [28]

Parametry použitých cívek z obr. 7.06:

	stříbro	Thermocoax
průměr vodiče	0,8 mm	1,3 mm
tloušťka izolace	0,05 mm	0,3 mm
vliv izolace drátu a vinutí	0,64	0,42
X_v		

Stříbro má výbornou vodivost a je i oproti mědi stabilnější při vyšších teplotách. Při dlouhodobějším vystavení vysokým teplotám však trpí časovou nestálostí, kdy dochází k migraci molekul a cívka pak ztrácí časem své vlastnosti. Slídová izolace, kterou lze na stříbrný drát je tenká a dovoluje vyšší využití místa v prostoru pro cívku.

Druhy uváděný materiál Thermocoax má jednu s největších stabilit při vyšších teplotách až do 700°C, což dovoluje i vyšší použitelnou proudovou hustotu. Je cenově přijatelnější, ale má širší izolaci a tudíž i nižší využití místa v prostoru pro cívku. Obdobně jako cívka ze stříbra je cívka z Thermocoaxu při použití při vyšších teplotách časově omezená a po uplynutí určité doby se musí vyměnit.

V případě měděné cívky lze obecně uvažovat vliv izolace drátu a vinutí mezi 0,4 a 0,6.

[17] Přehledová tabulka použitelných materiálů pro cívku s relativní vodivostí vůči mědi při 20°C:

vodič	absolutní vodivost [S/m]	relativní vodivost vůči mědi [%]
Stříbro	6.30×10^7	106
Měď	5.96×10^7	100
Zlato	4.10×10^7	69
Hliník	3.5×10^7	59
Wolfram	1.79×10^7	30
Nikl	1.43×10^7	24
Železo	1.00×10^7	17
Platina	9.43×10^6	16
Cín	9.17×10^6	15
Uhlíková ocel	6.99×10^6	12
Olovo	4.55×10^6	8

izolant	absolutní vodivost [S/m]
Silikon	1.56×10^{-3}
Tvrdá guma	10^{-14}
Vzduch	3 to 8×10^{-15}
PET	10^{-21}
Teflon	10^{-25} to 10^{-23}

8. VLASTNÍ ZNALOSTNÍ SYSTÉM PRO NÁVRH AML

Expertní systém je inteligentní počítačový program, který využívá vhodně reprezentovaných znalostí a interferenčních procedur k řešení tak složitých problémů, které je schopen řešit pouze expert v dané problémové oblasti. Expert umí řešit určitou skupinu úloh, které většina lidí buď řešit vůbec neumí, nebo ne tak efektivně, spolehlivě, levně a rychle. V expertních systémech mohou být využívány znalosti expertní i znalosti obecné. V případě, že systém obsahuje pouze znalosti obecné, nazýváme jej znalostním systémem. Expertní znalosti ale představují určitou podtřídu znalostí a proto jsou pojmy expertní systém a znalostní systém zcela běžně zaměňovány a obvykle nejsou rozlišovány. Expertní systém tvoří dvě hlavní části: báze znalostí a interferenční mechanismus. [26]

Znalostní systém pro návrh AML systémů by měl obsahovat bázi znalostí nezbytných pro návrh možných řešení. Interferenční mechanismus pak interpretuje tyto znalosti konstruktérovi, který na základě poskytnutých znalostí a doporučení navrhne systém magnetického ložiska, aniž by sám měl zkušenosti s jejich návrhem. Znalosti jsou ze systému předávány konstruktérovi ve vhodném pořadí tak, aby měl konstruktér k dispozici znalosti, které zrovna v daný moment potřebuje. Komunikace mezi znalostním systémem a konstruktérem pak zaručí poskytnutí informací pro danou část úlohy, kterou konstruktér právě řeší a není tedy zbytečně zahlcován informacemi potřebnými pro jeho řešení případ nepotřebuje. Znalostní systém zároveň na základě vstupních parametrů doporučuje konstruktérovi nejvhodnější variantu pro jeho příklad a vylučuje varianty, které nejsou na základě vstupních parametrů možné.

Výhody znalostního systému:

- Redukce nákladů. Systém AML může navrhnout jakýkoliv konstruktér namísto experta.
- Trvalá a okamžitá expertíza. Expert není vždy k dispozici.
- Zvýšení spolehlivosti. Expert může udělat vlivem únavy či nepozornosti chybu.
- Detailní vysvětlení. Znalostní systém může zcela detailně a opakovaně poskytovat znalosti a vysvětlovat způsob svého uvažování, který vedl k jeho závěrům, vždy stejně a bez vlivu mnohonásobného opakování požadavku na vysvětlení.
- Rychlá odpověď. Znalostní systém může často odpovědět rychleji a obvykle je snáze dostupný než expert.
- Komplexní, neemotivní odpověď nebo rada v libovolném čase.

Rozhodovací funkce většiny znalostních systémů jsou tvořena na základě známých pravidel typu „jestliže ... → pak ...“. Na základě požadavků konstruktéra jsou pak tyto

pravidla uplatňována a poskytují závěry a doporučení k dalšímu postupu. Kupříkladu pokud se systém zeptá konstruktéra, zda mu navržená nosná síla AML vyhovuje a konstruktér požaduje větší sílu, tak se systém nadále řídí pravidlem: zvýšení šířky ložiska → zvýšení síly. Pravidel pro dosažení určitého stavu může být více, a proto musí mít tato pravidla přidělenou prioritu, nebo konstruktér těmto pravidlům prioritu přidělí (kognitivní funkce). Kupříkladu je-li více možností jak docílit zvýšení nosnosti ložiska, může konstruktér programu zadat požadavek, že nechce nadále zvětšovat šířku ložiska a znalostní systém mu navrhne další z pravidel jako je: zvýšení průměru ložiska → zvýšení síly.

Model způsobu řešení problémů člověkem založený na dlouhodobé paměti (pravidlech), krátkodobé paměti (pracovní paměti) a kognitivním procesem (inferenčním mechanismem) je základem znalostních systémů založených na pravidlech.

Kromě produkčních systémů založených na pravidlech lze použít ještě logické systémy, rámce, sémantické sítě, procedurální systémy a speciální programovací jazyky.

Co se týče způsobu reprezentace znalostí, tak pro použití pro podporu konstruování AML se více jeví deklarativní způsob prezentace jako účelnější. Procedurální způsob řešení vychází z jednoznačné algoritmizace dobře strukturovaných a zřetelně formulovaných problémů. Jeho algoritmické řešení vyhledává cíl jen s minimem nadbytečných kroků, protože postupuje podle exaktního předpisu. Zatímco procedurální řešení se zaměřuje na to JAK má být řešení dosaženo, tak deklarativní reprezentace znalostí se zaměřuje na to CO má být vyřešeno a více se hledají vnitřní zákonitosti jednotlivých úloh.

příklad procedurální reprezentace znalostí [27]:

Má-li automobil zvýšenou spotřebu pohonných hmot, ověř, zda nemá zanesený čistič vzduchu.

příklad deklarativní reprezentace znalostí:

Zanesený čistič vzduchu způsobí zvýšení spotřeby pohonných hmot.

Zatímco procedurální způsob se jeví jako vhodný pro diagnostické znalostní systémy, tak deklarativní způsob je vhodný pro náš znalostní systém pro podporu návrhu systému AML

8.1. VÝBĚR PROGRAMU

Znalostní systém může být tvořen několika způsoby. Jako uživatelsky nejpříjemnější je vhodný vlastní samo-spustitelný program. Vytvoření takového programu je však velice náročné a vyžaduje využití programátora, který sám musí pochopit způsob výpočtu a návrhu magnetického ložiska.

Dalším možným řešením by mohl být prázdný expertní systém. Naplnění prázdného expertního systému je podobné programování v jednoduchých programovacích jazycích jako je pascal nebo C++. Do systému, jako je třeba systém CLIPS, se zanesou fakta pomocí základních textových příkazů a pravidla pro jejich kombinování a přiřazování platnosti a priorit. Systém dovoluje i mnoho proměnných a samozřejmě musí řešit i možné vzniklé konflikty. Pokud nebude postačovat nějaká z předpřipravených funkcí, tak program dovoluje naprogramovat vlastní proceduru.

Další možností je využít existující program, který dovoluje využití základních výpočtů jako je třeba program Excel. Excel nám nedovoluje takové funkce jako předpřipravené expertní systémy, zato však poskytuje jak uživateli, tak zadavateli jednoduché a přehledné prostředí. Zároveň má pro výpočty snadné zadávání.

Posledním způsobem by mohla být znalostních podpora způsobem tabulek, vzorců a algoritmů v tištěné podobě. Takováto „kuchařka“ pro konstrukci ložiska by byla velice obtížná pro koncového uživatele, ale nejjednodušší řešení pro zadavatele.

8.1.1. VÝBĚR VARIANTY:

Cíle vytvářeného systému není zvládnout výpočty všech typů ložisek, ale položit základy budoucímu znalostnímu systému a ověřit předložená tvrzení v předešlých kapitolách. Je potřeba tedy vytvořit základní výpočtový program pro výpočet nosné síly ložiska do 16 pólů (kapitola 3) a pevnostní kontroly rotoru (kapitola 2). Jako nejvhodnější program byl zvolen Excel. Excel má jednoduché rozhraní, dovoluje jakékoliv výpočty na magnetickém ložisku a dají se do něj zadat tabulky s hodnotami materiálů. Program Excel je součástí balíku MS Office, jehož licence běží na většině počítačů. Jako alternativa existuje Openoffice, který je zdarma a povětšinou kompatibilní s MS Office.

8.2. POPIS JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ TVORBY PROGRAMU:

8.2.1. ÚVOD

Na úvodním listě je zadání prvních třech základních parametrů každého ložiska, což jsou:

- Požadovaná nosná síla
- Požadované maximální otáčky
- Průměr rotoru pod ložisky

Úvodní strana je doplněná o obrázek ložiska (obr. 8.01) a o základní údaje o programu.

8.2.2. ROTOR

V kapitole rotoru je v úvodu nutné zadat základní materiálové hodnoty a to jak pro rotorové kroužky, tak pro hřídel samotný. Jedná se především o hodnoty:

- označení materiálu
- Youngův modul pružnosti
- Poissonovo číslo
- mez kluzu
- hustota

Dále je nutné zadat poloměr hřídele pod kroužky a zadat tlaky od nalisování při maximálních otáčkách. Minimální tlak by měl být vyšší než 0. Maximální tlak je vhodné volit co nejvyšší tak, aby rotor pevnostně vyhovoval. Při zvolení nízké hodnoty maximálního tlaku bude sice rotor pevnostně vyhovovat lépe, ale tolerance pro nalisování musejí být vyrobitelné.

ROTOR

Volba materiálu rotorových kroužků

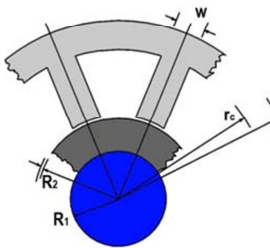
označení materiálu	2V-49Co-49Fe
Youngův modul pružnosti	E = 210000 [MPa]
poisson. č.	μ = 0,3 [-]
mez kluzu	Re = 900 [MPa]
hustota	ρ = 7800 [kg/m ³]

Volba materiálu hřídele

označení materiálu	11373
Youngův modul pružnosti	E = 210000 [MPa]
poissonovo číslo	μ = 0,3 [-]
mez kluzu	Re = 600 [MPa]
hustota	ρ = 7800 [kg/m ³]

Rozměrové hodnoty

velikost rotoru pod ložiskem - poloměr	R2 = 23,6 [mm]
poloměr hřídele pod kroužky	R1 = 15 [mm]
maximální tlak nalisování při max. otáčkách	p_{max} = 80 [MPa]
minimální tlak nalisování při max. otáčkách	p_{min} = 10 [MPa]



Obr. 8.01 Zadávání materiálových hodnot do aplikace v části Rotor.

Další část výpočtu obsahuje pevnostní výpočet rotorových kroužků. Výpočet rozdělen pro maximální a minimální tlak:

Výpočet pevnosti rotoru pro		p_{max}	p_{min}
maximální otáčky	$n = 40000$ [ot/min]	$n = 40000$ [ot/min]	$n = 40000$ [ot/min]
úhlová rychlost	$\omega = 4188,790205$ [rad/s]	$\omega = 4188,790205$ [rad/s]	$\omega = 4188,790205$ [rad/s]
$C_1 = p \left(\frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \right) + \frac{3 + \mu}{8} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot (R_2^2 + R_1^2) - p$	$C_1 = 98368277,53$	$C_1 = 50922802,17$	$C_1 = 50922802,17$
$C_2 = p \frac{R_1^2 \cdot R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} + \frac{3 + \mu}{8} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot R_1^2 \cdot R_2^2$	$C_2 = 37274,87175$	$C_2 = 10849,63979$	$C_2 = 10849,63979$
tečné napětí			
$\sigma_t = C_1 + \frac{C_2}{r^2} - \frac{1 + 3 \cdot \mu}{8} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot r^2$	$\sigma_t(R_1) = 256$ [MPa] $\sigma_t(R_2) = 147$ [MPa]	$\sigma_t(R_1) = 91$ [MPa] $\sigma_t(R_2) = 52$ [MPa]	$\sigma_t(R_1) = 91$ [MPa] $\sigma_t(R_2) = 52$ [MPa]
normálově napětí			
$\sigma_r = C_1 - \frac{C_2}{r^2} - \frac{3 + \mu}{8} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot r^2$	$\sigma_r(R_1) = -80$ [MPa] $\sigma_r(R_2) = 0$ [MPa]	$\sigma_r(R_1) = -10$ $\sigma_r(R_2) = 0$	$\sigma_r(R_1) = -10$ $\sigma_r(R_2) = 0$
redukované napětí			
$\sigma_{red}(R1) = \sigma_{t1} - \sigma_{r1} = \sigma_{t1} + p \leq \sigma_D$	$\sigma_{red}(R1) = 336$ [MPa] $\sigma_{red}(R2) = 147$ [MPa]	$\sigma_{red}(R1) = 101$ $\sigma_{red}(R2) = 52$	$\sigma_{red}(R1) = 101$ $\sigma_{red}(R2) = 52$
bezpečnost vůči mezi kluzu	$s = 1,5$ [-]		
dovolené napětí	$\sigma_D = 600$ [MPa]		
rotor pevnostně	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje

Obr. 8.02 Pevnostní výpočet v části Rotor

V další části výpočtu rotoru následuje výpočet:

potřebný přesah při maximálních otáčkách		
$CN_2 = \frac{d_2^2 + d_1^2}{d_2^2 - d_1^2}$	CN ₂ = 2,35558501	CN ₂ = 2,35558501
$\delta R_1 = R_1 \cdot p \cdot \left(\frac{1 - \mu_1}{E_1} + \frac{CN_2 - \mu_2}{E_2} \right)$	δR ₁ = 0,019174771 [mm] δd ₁ = 0,038349543 [mm]	δR ₁ = 0,002396846 [mm] δd ₁ = 0,004793693 [mm]
deformace vlivem maximálních otáček na kroužkách		
$\Delta R_1 = \frac{R_1}{E} (\sigma_{t1} - \mu \sigma_{r1})$	ΔR ₁ = 0,02 [mm] Δd ₁ = 0,04 [mm]	ΔR ₁ = 0,006714286 [mm] Δd ₁ = 0,013428571 [mm]
napětí na hřídeli		
$C_1 = p + \frac{3 + \mu}{8} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot R_1^2$	C ₁ = 92702180,87	C ₁ = 22702180,87
$\sigma_t = C_1 - \frac{1 + 3\mu}{8} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot r$	σ _t (R ₁) = 85,4 [MPa]	σ _t (R ₁) = 15,4 [MPa]
$\sigma_r = C_1 - \frac{3 + \mu}{8} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot r$	σ _r (R ₁) = 80 [MPa]	σ _r (R ₁) = 10 [MPa]
deformace vlivem maximálních otáček na hřídeli		
$\Delta r = \frac{R_1}{E} (\sigma_{t1} - \mu \sigma_{r1})$	Δr = 0,004385714 [mm] Δd = 0,008771429 [mm]	Δr = 0,000885714 [mm] Δd = 0,001771429 [mm]
celková deformace v nalisování		
$\Delta = \Delta d_1 - \Delta d$	Δ = 0,031228571 [mm]	Δ = 0,011657143 [mm]
přesah pro nalisování za klidu		
$\delta = \delta d_1 + \Delta$	δ _{max} = 0,069578114 [mm]	δ _{min} = 0,016450836 [mm]
rozdíl přesahů	δ _{max} - δ _{min}	53,1 [μm]
max. výška tolerančního pole pro hřídel i pro díru: T =		26,55 [μm]

Obr. 8.03 Výpočet přesahů pro nalisování kroužků v části Rotor

Důležitou informací, zejména pro řízení systému magnetického ložiska, je deformace vnějšího průměru kroužků rotoru. Vlivem otáček se průměr kroužků zvětšuje a tím se zmenšuje vzduchová mezera mezi rotorem a ložiskem. Jak je vidět na obr. 9.04, tak deformace může dosáhnout až 0,016 mm na poloměru, kde je mezera 0,4 mm a maximální výchylka může dosáhnout pouze 0,25 mm. Pokud se deformace vnějšího průměru rotorových kroužků neohlídá umístěním protilehlých senzorů, je třeba s ní počítat při řízení ložiska, aby nedošlo k vyosení rotoru.

deformace vnějšího průměru kroužků vlivem maximálních otáček

$\Delta R_2 = \frac{R_2}{E}(\sigma_{t2} - \mu\sigma_{r2})$	$\Delta R_2 =$ 0,01652 [mm]	$\Delta R_2 =$ 0,00584381 [mm]
	$\Delta d_2 =$ 0,03304 [mm]	$\Delta d_2 =$ 0,011687619 [mm]

Obr. 8.04 Deformace vnějšího průměru kroužků vlivem maximálních otáček v části Rotor.

Závěrečný výpočet části Rotor obsahuje pevnostní výpočet samotného hřídele (obr. 9.05), na kterém jsou nalisovány rotorové kroužky. Do výpočtu se zadává největší průměr hřídele mimo ložisko. Zpravidla se jedná o osazení hřídele pro axiální ložisko nebo pro motor. Osazení hřídele může mít větší průměr než průměr pod ložisky a může pevnostně vyhovovat, protože není namáháno tlakem od nalisování.

Kontrola hřídele na pevnost

největší průměr hřídele mimo magnetické ložisko: DHmax = [mm]
 poloměr [mm]

tečné napětí

$C_1 = \frac{3 + \mu}{8} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot RH^2$	$C_1 =$ 564541371,9
$\sigma_t = C_1 - \frac{1 + 3\mu}{8} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot RH^2$	$\sigma_t =$ 239,5 [MPa]

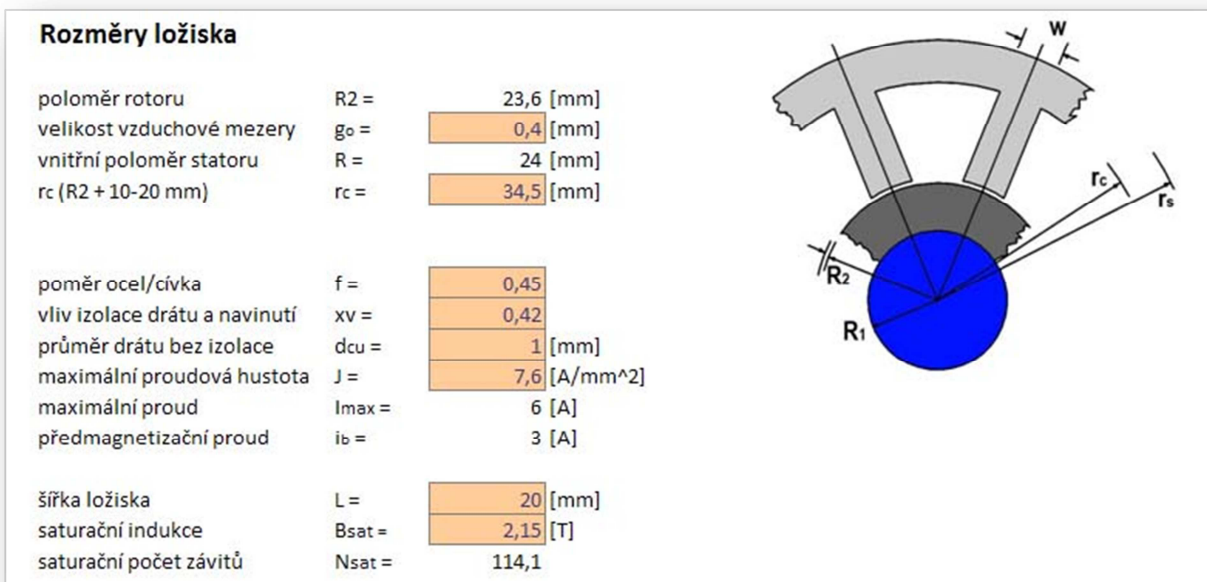
bezpečnost vůči mezi kluzu
 dovolené napětí $s =$
 $\sigma_D =$ 400 [MPa]

hřídel pevnostně: **vyhovuje**

Obr. 8.05 Pevnostní kontrola hřídele v části Rotor

8.2.3. ROZMĚRY LOŽISKA

- velikost vzduchové mezery
- r_c ($R_2 + 10-20$ mm)
- poměr ocel/cívka
- vliv izolace drátu a navinutí
- průměr drátu bez izolace
- maximální proudová hustota
- šířka ložiska
- saturační indukce



Obr. 8.06 Zadání dalších parametrů pro ložiska v části Rozměry ložiska

počet pólů	n =	8	12	16
šířka pólu	w =	9 [mm]	6 [mm]	5 [mm]
nosná plocha pólu	Ag =	180 [mm ²]	120 [mm ²]	100 [mm ²]
vnější poloměr statoru	rs =	43,5 [mm]	40,5 [mm]	39,5 [mm]
vnější průměr statoru	ds =	87 [mm]	81 [mm]	79 [mm]
plocha sundavatelné cívky	Ac =	94,5 [mm ²]	63 [mm ²]	52,5 [mm ²]
skutečná plocha	Ac* =	39,69 [mm ²]	26,46 [mm ²]	22,05 [mm ²]
počet závitů	N =	50	33	28
indukce v mezeře	Bgo =	1,88495559 [T]	1,24407069 [T]	1,05557513 [T]
k nasycení materiálu dojde na		88 %	58 %	49 %
max. síla bez výchylky	Fmax =	117,5 [N]	61,8 [N]	52,5 [N]
max. síla bez výchylky	FGmax =	166,2 [N]	71,4 [N]	56,8 [N]
výchylka	x =	0,05 [mm]		
max. síla v x	Fmax =	92,9 [N]	50,2 [N]	43 [N]
max. síla v x	FGmax =	139,4 [N]	59,5 [N]	49,5 [N]

Obr. 8.07 Výpočet únosnosti 8., 12. a 16. pólových ložisek.

8.3. OVĚŘENÍ VÝSLEDKŮ APLIKACE

Pro ověření správnosti výpočtů bylo spočítáno zakoupené ložisko, které vyrábí firma Mecos. Do aplikace byly zadány co nejuvěrnější parametry odměřené nebo odhadnuté z existujícího ložiska a vypočtená hodnota únosnosti ložiska byla porovnána s hodnotou únosnosti ložiska uváděnou výrobcem.



Obr. 8.08 Magnetické ložisko Mecos

Základní parametry, které uvádí výrobce, nebo je šlo odměřit:

Základní parametry:	ložisko Mecos	zadané do aplikace
vnitřní průměr ložiska (mm)	48	48
vnější průměr ložiska (mm)	90	90
šířka ložiska (mm)	20	20
maximální proud v elektromagnetech (A)	6	6
vzduchová mezera (mm)	0,4	0,4
indukčnost cívek (mH)	3,0	-
odpor cívek (Ω)	1,6	-
statická tuhost (pod maximálním zatížením)	∞	-
šířka ložiska (mm)	cca 9	9
průměr drátu (mm)	cca 1	1
počet závitů	cca 50	50

Odhadované parametry ložiska:

odhadované parametry	ložisko Mecos	zadané do aplikace
vliv izolace drátu a vinutí	-	0,42
saturační indukce na statoru	-	2,15

Výpočet ložiska je možné vidět na obrázcích 8.06 a 8.07.

Po výpočtu lze porovnat:

	ložisko Mecos	výsledky z aplikace $x = 0$	výsledky z aplikace $x = 0,05$
maximální síla F_{max}	120 N	117,5 N	92,9 N
maximální síla FG_{max}	-	166,2 N	139,4 N
maximální zatížení (závisí na řízení)	100 N	-	-

Maximální síla F_{max} při nulové výchylce vyšla obdobně jako hodnota uváděná výrobcem. Při výchylce 0,05 mm, což by mohla maximální dostačující výchylka, kterou senzory zachytí a celý systém zareaguje, vyšla nosná síla 92,9 N. Obdobně výrobcem maximální zatížení závislé na řízení je 100 N.

Vzhledem k tomu, že při byly použité zjednodušené výpočty, lze výsledky považovat za dostatečně přesné a shodné s realitou pro potřeby předběžného návrhu rozměrů ložiska.

9. ZÁVĚR

V kapitole 1 byly popsány konvenční druhy uložení, jako jsou kluzná ložiska (kapitola 1.1), valivá ložiska (kapitola 1.2), hydrostatická ložiska (kapitola 1.3) a hydrodynamická ložiska (kapitola 1.4). V rámci hydrostatických a hydrodynamických ložisek byla uvedena i aerostatická a aerodynamická ložiska.

V kapitole 1.5 byla rozepsána uložení v magnetickém poli a jejich rozdělení.

Stručně byly uvedeny pasivní magnetická ložiska, kterými jsou ložiska na principu permanentních magnetů (kapitola 1.5.1), na principu diamagnetického materiálu (kapitola 1.5.2) a ložiska se supravodiči, která byla popsána více, protože jejich využití má v souvislosti s materiálovým výzkumem vysoký potenciál.

Detailněji jsou v kapitole 1.5.4 popsána aktivní magnetická ložiska, jejich rozdělení, výhody a nevýhody. Popsán je rozdíl mezi radiálními heteropolárními (kapitola 1.5.4.1), radiálními homopolárními (kapitola 1.5.4.2) a axiálními (kapitola 1.5.4.3) ložisky. V kapitole 1.5.5 je okrajově zmíněno i hybridní ložisko.

Kapitola 2.1 popisuje současnou nabídku senzorů na trhu, které je možné použít v systému magnetických ložisek. Jedná se především o indukční senzory (kapitola 2.1.1), kapacitní senzory (kapitola 2.1.2), optické senzory (kapitola 2.1.3) a magnetostatické senzory (kapitola 2.1.4). Druhy senzorů jsou pouze krátce popsány a je nastíněn jejich princip měření. V kapitole 2.1.5 je uvedena porovnávací tabulka, která je čistě orientační, protože trh je velice proměnlivý.

Řízení a problematika řídicích jednotek je popsána v kapitole 2.2, kde jsou popsány základní dva druhy řídicích jednotek. V kapitole 2.3 jsou popsány základní druhy používaných zesilovačů. V kapitole 2.4 jsou popsány ztráty, ke kterým dochází v magnetickém ložisku. Popsány jsou ztráty hysterezí (kapitola 2.4.1), ztráty vířivými proudy (kapitola 2.4.2), ztráty odporem prostředí (kapitola 2.4.3) a ztráty způsobené elektrickým odporem (kapitola 2.4.4).

Cíl 1 byl splněn v kapitolách 1 a 2.

Kapitola 3 se zabývá návrhem rotoru pro magnetické ložisko. Problematika se zabývá zejména nalisováním rotorových kroužků na hřídel a výpočtem veškerých potřebných hodnot. Rotorové kroužky jsou počítány metodou rotujících kotoučů z oblasti pružnosti pevnosti.

Ve 4. kapitole je popsán obecný výpočet magnetomotorické síly nejprve od jednoho lokálního magnetického obvodu (LMO) a poté od dvou protilehlých LMO. Právě dva protilehlé LMO (4 póly) jsou základním stavebním elementem počítaných aktivních radiálních heteropolárních ložisek. Výpočet je pak uveden pro osmipólové ložisko (kapitola 4.1), dvanáctipólové ložisko (kapitola 4.2) a šestnáctipólové ložisko (kapitola 4.3). Maximální síla u těchto ložisek je spočítaná pro dva případy natočení statoru. Všechny kapitoly jsou doplněny o výsledky výpočtu metodou konečných prvků, která byla vytvořena v programu Comsol Multiphysic a která ukazuje průběh magnetického pole statorem a rotorem. Kapitola 4.4 popisuje výpočet více pólového ložiska.

Kapitola 5 se zabývá velikostí a stavbou statoru. Výpočty jsou založené na rozměrových nárocích a doporučení pro výrobu.

Kapitola 6 se zabývá nasycením materiálu magnetickým polem - saturací. Popsána je nekonstantní relativní permeabilita a zjednodušený výpočet maximálního počtu závitů cívky, při které dojde k saturaci.

Cíl 2 byl splněn v kapitolách 3, 4, 5 a 6.

Kapitola 8 se v úvodu zabývá obecným popisem znalostního systému. V kapitole 8.1 jsou popsány možnosti tvorby výpočtové aplikace / znalostního systému vhodných pro výpočet aktivních magnetických ložisek. Kapitola 8.1.1 shrnuje výběr výsledného programu a uvádí důvody volby. V kapitole 8.2 jsou popsány jednotlivé části vytvořeného programu. Jedná se o části úvod (kapitola 8.2.1), rotor (kapitola 8.2.2), rozměry ložiska (kapitola 8.2.3). Výpočet rozměrů ložiska se týká pouze osmipólového, dvanáctipólového a šestnáctipólového ložiska. Doplněny jsou do programu i materiálové tabulky z kapitoly 7.3. Aplikace je přílohou této práce a jedná se o zkušební beta verzi.

Cíl 3 byl splněn v kapitole 8.2 na základě dat z kapitol 3, 4, 5, 6 a 7.

Kapitola 8.3 se zabývá ověřením správnosti výpočtů. Pro kontrolu byly zadány parametry komerčně vyráběného magnetického ložiska firmy Mecos a výsledný výpočet byl porovnán s parametry ložiska udávanými výrobcem. Výsledek výpočtu se liší od parametrů udaných výrobcem do několika desítek procent. Výsledky aplikace lze proto považovat za dostatečně přesné a shodné s realitou pro potřeby předběžného návrhu rozměrů ložiska.

Cíl 4 byl splněn v kapitole 8.3.

Kapitola 7 se zabývá výběrem nejvhodnějšího materiálu pro magnetická ložiska. Jsou zde definovány rozhodující magnetoelektrické vlastnosti materiálu a rozhodující pevnostní vlastnosti materiálu. Kapitoly 7.1 a 7.2 obsahují výsledky hledání v materiálové databázi CES EduPack 2010, která je v současné době jednou z největších databází materiálů dovolující komplexní porovnávání materiálových vlastností. Výsledná tabulka v kapitole 7.3 nabízí možnost výběru vhodných materiálů. Lze vybrat materiál s důrazem na některou materiálovou vlastnost, nebo materiál, který má průměrné všechny požadované materiálové vlastnosti. Kapitola 7.4 se zabývá volbou materiálu pro cívku s důrazem na vyšší teploty.

Cíl 5 byl splněn v kapitole 7.

9.1. ZHODNOCENÍ A DOPORUČENÍ NA POKRAČOVÁNÍ

Práce obsahuje cenné informace z oblasti magnetických ložisek. Vytvořený testovací program i výpočty pro něj použité poslouží k předběžnému návrhu rozměrů a parametrů radiálního heteropolárního ložiska pro konstruktéry bez hlubší znalosti problematiky magnetických ložisek. Pro konečný návrh uložení v magnetických ložiskách je však nutný přesný návrh odborníků z oblasti elektrotechniky a řízení založený na empirických znalostech.

Navržená aplikace je základem možného expertního systému pro komplexní návrh celého systému magnetických ložisek. Vytvoření aplikace v programu Excel dává možnost program rozšiřovat, případně začlenit výpočtovou část do většího výpočtového balíku jakým je kupříkladu program Mitcalc.

Dalším postupem pro rozvoj aplikace by bylo rozšíření o výpočet více pólových ložisek, ložisek s děleným magnetickým tokem, ložisek s nerozebíratelnou cívkou, ložisek s jinou geometrií statoru, než je jednoduchý LMO ve tvaru podkovy, axiálních ložisek atd. Vzhledem k tomu, že výstupem z programu je i potřebný proud pro zesilovač, bylo by možné také přímo doporučit zesilovač ze současného výběru na trhu. Toto však obnáší výběr z nabídky všech výrobců, která musí být neustále aktualizována. Zesilovač pak musí být navržen ve shodě s řídicí jednotkou, která musí být ve shodě se senzory.

10. ZDROJE A POUŽITÁ LITERATURA

- [1] TRAXLER, Alfons a Roland SIEGWART. MECOS TRAXLER AG. *Active Magnetic Bearings: Basic and Applications*. Winterthur, Switzerland, 1994.
- [2] Poznatky v oblasti hydrostatických ložisek. *MM Průmyslové spektrum: Trendy / Ložiska* [online]. 2002, roč. 2002, č. 11, strana 22 [cit. 2008-05-25]. DOI: Kód článku: 021119. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/poznatky-v-oblasti-hydrostatickych-lozisek.html>
- [3] SKF GROUP. Katalog ložisek [online]. [cit. 2011-05-18]. Dostupné z: <http://www.skf.com>
- [4] Návrh uložení rychloběžných rotorů: Hydrodynamická ložiska. TECHLAB. *Diagnostika, měření, výzkum* [online]. [cit. 2009-10-07]. Dostupné z: <http://www.techlab.cz/cs/NavrhRadLozisek.html>
- [5] KUBÍČEK, Josef. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. *Základy stavby výrobních strojů: Obráběcí stroje*. 1. vydání. Plzeň, 2001. ISBN 80-7082-710-6.
- [6] LAŠOVÁ, Václava. Návrh a kontrola uložení: Hydrodynamická ložiska, hydrostatická ložiska a valivá ložiska. s. 30. DOI: Prezentace z výuky výrobních strojů. Dostupné z: home.zcu.cz/~lasova/ZSVS/p444.ppt
- [7] SCHWEITZER, G., H. BLEULER a A. TRAXLER. *Active Magnetic Bearings: Basics, Properties and Applications of Active Magnetic Bearings of*. Zurich: ETH, 1994.
- [8] MAYER, Daniel a Bohuš ULRYCH. Halbachova soustava magnetů a její modifikace. *Sborník konference*. 2008, s. 4. DOI: GAČR No.102/07/0147. Dostupné z: <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce4/45.pdf>
- [9] KOVAŘÍK, Tomáš. Supravodiče. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. [online]. [cit. 2010-11-08]. Dostupné z: <http://supravodice.zcu.cz>
- [10] MAYER, Daniel. Magnetická levitace a její využití. *Elektro*. 2003, 2003/1, s. 9. DOI: GAČR č. 102/01/1401. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/el010304.pdf>
- [11] KUMMETH, P. *Development of superconducting magnetic bearings*. Elsevier: Physica, 2002, s. 372-376.
- [12] PESLAR, Jiří. Aerostatická, aerodynamická a magnetická ložiska: Přehledový článek. s. 11. Dostupné z: http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=647
- [13] Permanentní magnety: Co je třeba vědět o magnetech. SINOMAG, s.r.o. *Sinomag: Permanentní magnety* [online]. [cit. 2007-01-05]. Dostupné z: http://www.sinomag.cz/sinomag.cz/data/sinomag/downloads/Permanentni_magnety.pdf
- [14] ČERMÁK, Roman. Supervision systém pro vysokootáčkovou obráběcí vřetena uložená v aktivních magnetických ložiskách. Plzeň, 2003. Dizertační práce. Západočeská univerzita v Plzni.

- [15] SCHWEITZER, G. a E. MASLEN. *Magnetic bearings: Theory, Design and Application to Rotating Machinery* [CD e-ISBN 978-3-642-00497-1]. Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 2009. ISBN 978-3-642-00496-4.
- [16] SCHWEITZER, G. INTERNATIONAL CENTER FOR MAGNETIC BEARINGS. *Active magnetic bearings: chances and limitations*. Zurich: ETH Zurich, 2003.
- [17] Electrical resistivity and conductivity. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2011-11-22]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_conductivity
- [18] Mikro-epsilon: Katalog senzorů. MIKRO-EPSILON. [online]. [cit. 2007-12-05]. Dostupné z: <http://www.micro-epsilon.cz>
- [19] MASLEN, Eric. UNIVERSITY OF VIRGINIA, Department of Mechanical, Aerospace, and Nuclear Engineering. *Magnetic bearings*. Charlottesville, Virginia, 2000.
- [20] Magnetická ložiska. *MM Průmyslové spektrum: Inovace / Ložiska* [online]. 2005, roč. 2005, č. 1, strana 82 [cit. 2008-05-25]. DOI: Kód článku: 050172. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/magneticka-loziska.html>
- [21] SKF ložiska, a.s. Magnetická ložiska SKF: od inovace k osvědčeným řešením. *Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. s. 1 [cit. 2010-09-11]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26267
- [22] KNÍŽEK, K. Supravodivost a levitace: Nulový odpor při vedení elektrického proudu. *Fyzikální ústav: Akademie věd ČR*. s. 1. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/popularizace/supravodivost-a-levitace>
- [23] Keramicko-magnetické ložisko (CMB). CLEARAUDIO. [online]. [cit. 2011-05-05]. Dostupné z: <http://www.highend.cz/productpages/clearaudio/cmb.html>
- [24] LANG, M. a T. LEMBKE. Design of permanent magnet bearings with high stiffness. In: *The tenth International Symposium on Magnetic Bearings*. Martigny, Switzerland, 2006, s. 4. Dostupné z: http://www.ismb10.org/documents/ISMB10_detailed_program.pdf
- [25] SUZUKI, Haruhiko, Francois BARROT, Atsushi SUZUKI a Dominique CHAPUIS. Proto-model of novel contact-free disk suspension system utilizing diamagnetic material. In: *The tenth International Symposium on Magnetic Bearings*. Martigny, Switzerland, 2006, s. 4. Dostupné z: http://www.ismb10.org/documents/ISMB10_detailed_program.pdf
- [26] KEPKA, Jiří a Josef PSUTKA. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. *Umělá inteligence: Expertní systémy - část I*. 1. vydání. Plzeň, 1994. ISBN 8070821353.
- [27] MATOUŠEK, Václav. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, Fakulta aplikovaných věd, KIV. *Znalostní systémy a znalostní inženýrství: znalostní versus expertní systémy* [online]. 2007, 7 s. [cit. 2011-02-28]. Dostupné z: http://www.kiv.zcu.cz/studies/predmety/uir/predn/P7/Zn_Sys.pdf
- [28] BURDET, L. *Active magnetic bearing design and characterization for high temperature applications*. Lausanne, EPFL, 2006. THÈSE NO 3616 (2006). Dostupné z:

http://biblion.epfl.ch/EPFL/theses/2006/3616/EPFL_TH3616.pdf. Thesis. Ecole Polytechnique federale de Lausanne.

[29] MICHALEC, Jiří. Pružnost a pevnost II. Vyd. 2. Praha: České vysoké učení technické, 2001. ISBN 80-010-2375-3.

10.1. SEZNAM PRACÍ AUTORA

- (1) ČERMÁK, Roman, Jaroslav MATOUŠEK a Lukáš BARTOŇ. Knowledge support for designing of systems with active magnetic bearings. In: *PhD*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2005, s. 1-4. ISBN 80-7043-414-7.
- (2) ČERMÁK, R., MATOUŠEK, J., SPAL, P., BARTOŇ, L. Haptic human-computer interface for mechatronic lab. In *CADAM 2006*. Rijeka: Zigo, 2006. s. 17-18. ISBN: 953-7142-19-1
- (3) ČERMÁK, R., SPAL, P., MATOUŠEK, J., BARTOŇ, L. Haptic device for mechatronic lab. In *PhD 2006*. Plzeň: University of West Bohemia, 2006. s. 1-3. ISBN: 80-7043-486-4
- (4) ČERMÁK, R., BARTOŇ, L., MATOUŠEK, J. Actuator design for devices with active magnetic bearings. In *CADAM 2006*. Rijeka: Zigo, 2006. s. 15-16. ISBN: 953-7142-19-1
- (5) ČERMÁK, R., BARTOŇ, L., MATOUŠEK, J., BARTÁK, J. Towards a supervision system for high speed cutting spindle with active magnetic bearings. *GÉP*, 2007, roč. 58, č. 10-11, s. 22-27. ISSN: 0016-8572
- (6) ČERMÁK, R., BARTOŇ, L., MATOUŠEK, J. Tool condition monitoring using active magnetic bearings. In *CADAM 2007*. Rijeka: Zigo, 2007. s. 15-16. ISBN: 978-953-7142-24-7
- (7) BARTOŇ, L., ČERMÁK, R., MATOUŠEK, J. Modelování magnetických ložisek. In *Technical Computing Prague 2007*. Praha: Humusoft, 2007. s. 1-7. ISBN: 978-80-7080-658-6
- (8) MATOUŠEK, J., ČERMÁK, R., BARTOŇ, L. Modelování kontaktu mezi rotorem magnetického ložiska a záchytným ložiskem. In *Technical Computing Prague 2007*. Praha: Humusoft, 2007. s. 1-6. ISBN: 978-80-7080-658-6
- (9) ČERMÁK, R., BARTOŇ, L., VAVŘÍK, J., BARTÁK, J., SPAL, P. Model of superconductive MAGLEV vehicle. In *PhD 2007*. Plzeň: University of West Bohemia, 2007. s. 21-24. ISBN: 978-80-7043-597-7
- (10) BARTOŇ, L., ČERMÁK, R., MATOUŠEK, J. Magnetic levitation models using FEM. In *CADAM 2007*. Rijeka: Zigo, 2007. s. 5-6. ISBN: 978-953-7142-24-7
- (11) ČERMÁK, R., BARTOŇ, L., VAVŘÍK, J., BARTÁK, J., SPAL, P., MATOUŠEK, J. *MAGLEV* train laboratory experiment - some experience with bulding of a test rig. In *CADAM 2007*. Rijeka: Zigo, 2007. s. 17-18. ISBN: 978-953-7142-24-7
- (12) MATOUŠEK, J., ČERMÁK, R., BARTOŇ, L. Contact between rotor and retainer bearing - overview of modelling methods. In *CADAM 2007*. Rijeka: Zigo, 2007. s. 57-58. ISBN: 978-953-7142-24-7

(13) ČERMÁK, R., BARTOŇ, L., SPAL, P., BARTÁK, J., VAVŘÍK, J. Overview of magnetic levitation principles and their application in MAGLEV trains. *Advanced Engineering*, 2008, roč. 2, č. 1, s. 19-28. ISSN: 1846-5900

(14) ČERMÁK, R., BARTOŇ, L., MATOUŠEK, J. Modular concept of a supervision system for high speed cutting spindle with active magnetic bearings. *Advanced Engineering*, 2008, roč. 2, č. 2, s. 187-202. ISSN: 1846-5900

(15) BARTOŇ, L. Znalostní podpora pro návrh aktivního magnetického ložiska. In *Zborník referátov*. Košice: TU v Košiciach, Strojnícka fakulta, 2010. s. 7-10. ISBN: 978-80-970-294-1-8

(16) BARTOŇ, L. Návrh magnetického ložiska. In *Sborník referátů*. Ostrava: Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2011. s. 29-30. ISBN: 978-80-248-2450-5