



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

NÁVRH HYBRIDNÍHO MAGNETICKÉHO LOŽISKA

HYBRID MAGNETIC BEARING DESIGN

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Šindelář

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Dávid Rúra

BRNO 2021

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Petr Šindelář

ID: 195637

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Návrh hybridního magnetického ložiska

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vytvořte literární rešerši na téma využití hybridních magnetických ložisek v oblasti elektrických strojů.
2. Popište analytický návrh hybridního magnetického ložiska a vytvořte program pro jeho automatizovaný návrh.
3. Pro zadaný elektrický stroj proveďte návrh hybridního magnetického ložiska.
4. Vytvořte konečně prvkový model hybridního magnetického ložiska a proveďte ověření jeho vlastností.
5. Pro navržené magnetické ložisko proveďte tepelnou analýzu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] J. Pyrhonen, J. Jokinen, V. Hrabovcova "Design of Rotating Electrical Machines" John Wiley & Sons, Ltd, 2008. 512 s. ISBN 978-0-470-69516-6(H/B)
- [2] A. E. Fitzgerald, Ch. Kingsley, S. Umans "Electric Machinery", McGraw-Hill Companies Inc., 2003. 688 s. ISBN 0-07-112193-5
- [3] Chiba, A.; Fukao, T.; Ichikawa, O.; Oshima, M.; Takemoto, M.; Dorrell, D.G. Magnetic Bearings and Bearingless Drives; Elsevier: Boston, MA, USA, 2005; p. 20. ISBN 9780750657273.
- [4] Schweitzer, G.; Eric H. Maslen. Magnetic bearings: theory, design, and application to rotating machinery. New York: Springer, [2009]. ISBN 978-3-642-00496-4.

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 24.5.2021

Vedoucí práce: Ing. Dávid Růra

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení částí druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem hybridního magnetického ložiska. Jedná se o rozšíření problematiky běžných ložisek ve vysokootáčkových motorech. Práce je rozdělena do tří částí, kde se první část zabývá obecnou teorií magnetických ložisek. Druhá část se zabývá matematickým popisem ložiska. Třetí část se zabývá návrhem specifického hybridního magnetického ložiska. Návrh je proveden pro motor, pro který již bylo ložisko navrženo. Jedná se o motor o 45000ot/ min a výkonem 12kW. Cílem tohoto návrhu je vytvořit hybridní magnetické ložisko s magnety pro vytvoření stálého magnetického pole a cívkami pro regulaci sil ke stabilizaci rotoru a omezení vibrací. Praktický návrh zahrnuje matematický výpočet v programu MATLAB a počítačovou simulaci založenou na metodě konečných prvků v programu ANSYS Maxwell.

Klíčová slova

Magnetické ložisko, Hybridní magnetické ložisko, Magnetická levitace, Elektromagnetismus, Metoda konečných prvků, Magnetismus

Abstract

The thesis deals with the design of a hybrid magnetic bearing. This is an extension of the issue of common bearings in high-speed motors. The work is divided into three parts. A general theory of magnetic bearings is described in the first part. The second part deals with the mathematical description of the bearing. A proposal of specific hybrid magnetic bearing is described in the third part. The bearing for the motor was already designed. It is a 45000rpm motor with a power output of 12 kW. This thesis aims to create a design of hybrid magnetic bearing with magnets to create a permanent magnetic field and coils to regulate forces to stabilize the rotor and limit vibrations. The practical design includes mathematical calculation in Matlab and computer simulation based on the finite element method in ANSYS Maxwell.

Keywords

Magnetic bearing, Hybrid magnetic bearing, Magnetic levitation, Electromagnetism, Finite element method, Magnetism

Bibliografická citace:

ŠINDELÁŘ, Petr. *Návrh hybridního magnetického ložiska* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-24]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133091>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Dávid Růra.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Návrh hybridního magnetického ložiska“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Davidovi Rúrovi, za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne:

.....

podpis autora

Obsah

1.	Úvod.....	14
2.	Magnetická ložiska.....	15
2.1	Pasivní magnetická ložiska	17
2.1.1	Ložiska s permanentními magnety	17
2.1.2	Pasivní magnetické ložisko složené ze dvou, nebo tři prstencových permanentních magnetů	19
2.2	Aktivní magnetická ložiska.....	20
2.2.1	Axiální magnetické ložisko	23
2.2.2	Radiální magnetické ložisko	23
2.2.3	Kuželové magnetické ložisko s drápkovou strukturou	24
2.3	Hybridní magnetická ložiska.....	27
2.3.1	Hybridní radiální magnetické ložisko se stálou magnetizací od permanentních magnetů	27
2.4	Snímače polohy	29
2.4.1	Indukční snímače polohy	29
2.4.2	Kapacitní snímače polohy	30
2.4.3	Optické snímače polohy	31
3.	Matematický podklad pro návrh hybridního magnetického ložiska	32
4.	Matematický popis radiálního hybridního magnetického ložiska	36
5.	Praktický Návrh magnetického ložiska	39
5.1	Koncept řešení.....	40
5.2	Volba materiálu prstence na hřídeli	41
5.3	Volba magnetu	42
5.4	Návrh geometrie magnetického obvodu	44
5.5	Návrh geometrie vinutí	45
6.	Analýza hybridního magnetického ložiska	48
6.1	Zadání vstupních parametrů	48
6.2	Vzduchová mezera	48
6.3	Geometrie navrženého ložiska	49
6.4	Numerická a analytická analýza.....	52
7.	Tepelná analýza.....	58

7.1	Obecná teorie oteplení vodiče při průchodu proudem	58
7.2	Zadání vstupních parametrů	59
7.3	Tepelná analýza vinutí ložiska	60
7.4	Optimalizace oteplení vinutí	62
8.	Závěr	64

Seznam symbolů a zkratek

A	Ochlazovací plocha	$[\text{mm}^2]$
B	Magnetická indukce	$[\text{T}]$
B_r	Remanentní indukce	$[\text{T}]$
c	měrná objemová tepelná kapacita	$[\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}]$
D_v	Průměr vodiče vinutí	$[\text{m}]$
F_y	Síla ve směru y	$[\text{N}]$
F_{im}	Síla ve směru přitahování hřídele (jádra)	$[\text{N}]$
F_m	Magnetomotorické napětí	$[\text{A}]$
H	Intenzita magnetického pole	$[\text{A}\cdot\text{m}^{-1}]$
H_c	Koercitivní intenzita	$[\text{A}\cdot\text{m}^{-1}]$
I	Proud	$[\text{A}]$
k_{pCu_2}	Činitel plnění mědi	$[-]$
l_{CI}	Délka dráhy CI jádra	$[\text{m}]$
l_G	Délka vzduchové mezery	$[\text{m}]$
l	Délka	$[\text{m}]$
N	Závity	$[-]$
R	odpor	$[\Omega]$
R_G	Reluktance vzduchové mezery	$[\text{H}^{-1}]$
R_m	Celková reluktance (Celkový magnetický odpor)	$[\text{H}^{-1}]$
R_{CI}	Reluktance CI jádra	$[\text{H}^{-1}]$
r_{\max}	Maximální poloměr	$[\text{m}]$
r_{i_2}	Vnitřní poloměr	$[\text{m}]$
r_{i_1}	Vnější poloměr	$[\text{m}]$
S	Průřez	$[\text{mm}^2]$
S_{dr}	Průřez drážky	$[\text{mm}^2]$
t	Čas	$[\text{s}]$
V	Objem	$[\text{m}^3]$
v_{\max}	Maximální obvodová rychlost	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
W_{co}	Magnetická koenergie	$[\text{J}]$
W_m	Magnetická energie	$[\text{J}]$
x	Změna délky vzduchové mezery	$[\text{m}]$
y	Vychýlení hřídele z rovnovážné polohy	$[\text{m}]$
φ	Úhel naklonění pólových nástavců	$[\text{°}]$
μ	Permeabilita	$[-]$
μ_0	Permeabilita vakua	$[-]$
μ_r	Permeabilita materiálu	$[-]$
ϕ	Magnetický tok	$[\text{Wb}]$
Ψ	Spražený magnetický tok	$[\text{Wb}\cdot\text{mm}^{-2}]$

ε_r	Permitivita materiálu	$[\text{F}\cdot\text{m}^{-1}]$
ε_0	Permitivita vakua	$[\text{F}\cdot\text{m}^{-1}]$
σ	Pevnost v tahu	$[\text{Pa}]$
ν	Poissonův poměr	$[-]$
ω_{max}	Maximální úhlová rychlost	$[\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}]$
ρ	Hustota	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
α_o	součinitel přestupu tepla	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$
$\Delta\vartheta$	okamžité oteplení povrchu tělesa oproti okolí	$[\text{K}]$
τ	Časová oteplovací konstanta	$[\text{s}]$

Seznam obrázků

Obr. 2-1 Různý uspořádání pasivního magnetického ložiska [2]	18
Obr. 2-2 Uspořádání pasivních magnetických ložisek a) bez přesazení, b) s vnitřním přesazením, c) s vnějším přesazením [1]	18
Obr. 2-3 Pasivní axiální magnetické ložisko se a) dvěma prstenci s permanentními magnety b) tři se třemi prstenci s permanentními magnety [1]	19
Obr. 2-4 Princip funkce AML [18]	20
Obr. 2-5 stupňů volnosti hřídele rotoru magnetického ložiska [4]	21
Obr. 2-6 Stabilizace polohy rotoru radiálního magnetického ložiska [4]	22
Obr. 2-7 Axiální aktivní magnetické ložisko [2]	23
Obr. 2-8 Radiální aktivní magnetické ložisko [2]	24
Obr. 2-9 Schéma magnetického obvodu se 4 dvojicemi protilehlých cívek [4]	24
Obr. 2-10 Konstrukce kuželového aktivního magnetického ložiska s drápkovou strukturou [1]	25
Obr. 2-11 Uspořádání pólů jedné strany magnetického ložiska, b) uzavírání magnetického toku v jedné pólové dvojici [1]	25
Obr. 2-12 Uspořádání jednotlivých sil mezi jádrem a jedním statorovým zubem [1]	26
Obr. 2-13 Uspořádání jednotlivých sil mezi jádrem a jedním statorovým zubem [1]	27
Obr. 2-14 Indukční snímač polohy [18]	30
Obr. 2-15 Kapacitní snímač polohy [18]	31
Obr. 2-16 Princip laserového triangulačního senzoru polohy [5]	31
Obr. 3-1 Princip elektromagnetu [6]	32
Obr. 3-2 Vliv změny vzduchové mezery na magnetickou energii a koenergii, a) při konstantním toku, b) při konstantním proudu [6]	34
Obr. 4-1 Horní pólová dvojice	36
Obr. 4-2 Magnetický obvod jedné pólové dvojice	37
Obr. 5-1 Vysokootáčkový elektrický stroj pro návrh hybridního magnetického ložiska [19]	39
Obr. 5-2 Hysterézní smyčka [9]	43

Obr. 5-3 BH charakteristika magnetu Alnico9	43
Obr. 5-4 BH charakteristika magnetu Alnico9	44
Obr. 6-1 Náčrt hybridního magnetického ložiska.....	51
Obr. 6-2 Model hybridního ložiska.....	52
Obr. 6-3 Síla působící na rotor v ose x	53
Obr. 6-4 Síla působící na rotor v ose x s přírůstkem magnetomotorického napětí od cívek na levé straně.....	54
Obr. 6-5 Rozložení magnetické indukce v ložisku při vychýlení $0.4mm$ v ose y	55
Obr. 6-6 Rozložení magnetické indukce v ložisku při nulovém vychýlení	56
Obr. 7-1 Oteplovací charakteristika [17]	59
Obr. 7-2 Oteplení ložiska	61
Obr. 7-3 Oteplovací charakteristika ložiska	62

Seznam tabulek

Tabulka 5-1 Parametry vysokootáčkového elektrického stroje	40
Tabulka 5-2 Analytické hodnoty mechanické pevnosti.....	41
Tabulka 5-3 Průřezy vodiče vinutí a izolace [13].....	47
Tabulka 5-4 Geometrické rozměry vinutí.....	47
Tabulka 6-1 Geometrické rozměry magnetického obvodu.....	50
Tabulka 6-2 Výsledky proudů pro dosažení požadované síly 120 N	54
Tabulka 6-3 Výsledky sil numerické analýzy.....	57
Tabulka 7-1 Ohmické ztráty ve vinutí	60
Tabulka 7-2 Hodnoty maximálních teplot při normálním použití [16]	62

1. ÚVOD

Pojem magnetická levitace je ve světě znám už od 20 století, ale až v dnešní době nachází plnohodnotné využití, a to díky zlepšenému softwaru a masivnímu rozvoji polovodičových technologií v podobě výkonových procesorů, přesných a rychlých senzorů, nebo výkonových součástek pro potřebné výkonové měniče. Do provozu se magnetická ložiska zavádí především z důvodů větších nároků na motory v podobě nízké hlučnosti, vysoké účinnosti a atd.

Ložisko je obecně strojní součást skládající se zpravidla ze dvou kroužků, mezi nimiž jsou valivá tělíska snižující tření. Ve strojním průmyslu zaujímají ložiska samostatnou kapitolu strojních součástí využívaných téměř v každém stroji, kde dochází k rotaci, nebo posunu.

S rozvojem technologie dochází ke značnému zvyšování nároků na pracovní stroje z důvodu použití v nestandardních prostředích jako je např.: vakuum (v kosmu), v páře, ve strojích, kde je nežádoucí kontaminace mazivy, nebo naopak vyžadují naprosto dokonale čisté neagresivní prostředí (počítačové tomografy v nemocnicích, ventrikulární pomocné zařízení, potravinářský průmysl). Proto je nutné konstruovat ložiska tak, aby je bylo možno použít při těchto, ale i jiných extrémních podmínkách. Aby stroje byly schopné pracovat i za těch nejextrémnějších podmínek je potřeba, aby každá jejich součást byla schopna tyto podmínky snést. Proto tam, kde klasická valivá, nebo kluzná ložiska selhávají, nebo je jejich použití velmi problematické, přicházejí na řadu speciální typy ložisek. Tato ložiska jsou konstruována tak, aby odolaly i těm nejextrémnějším podmínkám. Samozřejmě není možné, aby jediné ložisko bylo schopno pracovat za všech podmínek. Proto existuje celá řada speciálních ložisek, které byly díky rozvoji technologií v posledních 20 letech vyvinuty. Mezi nejrozšířenějšími typy speciálních ložisek patří ložiska magnetická a vzduchová.

Magnetické ložisko je ložisko, které využívá principu magnetické levitace a umožňuje tak pohyb strojního zařízení bez fyzického kontaktu (pevná a rotující část ložiska jsou v prostoru udržovány magnetickým polem, aniž by se navzájem dotýkaly), tudíž nepotřebují mazat, což vede k výraznému snížení nákladů [4].

2. MAGNETICKÁ LOŽISKA

Samotná magnetická ložiska mají oproti běžným valivým, nebo kluzkým ložiskům mnoho výhod, na které se v dnešní době klade čím dál větší důraz. To také zapříčinilo jejich velký rozmach v průmyslu.

- 1) **Absence maziv ložiska:** Takováto ložiska umožňují bezúdržbový provoz nebo nabízejí využití tam, kde nesmí dojít ke kontaktu stroje s mazivou, nebo tam kde je mazání neslučitelné s výrobním procesem. Tato skutečnost snižuje provozní náklady na činnost ložiska.
- 2) **Nízká hlučnost:** Vzhledem k bezkontaktnímu uložení hřídele v ložisku nedochází k vysoké hlučnosti vlivem tření, pokud ovšem nedochází k níže zmíněné nestabilitě v pasivních magnetických ložiskách. Na hlučnost se v dnešní době klade velký důraz. V případě dobré konstrukce motoru, kdy by nedocházelo ke hluku způsobeného prouděním vzduchu od rotujících částí motoru, mohlo by se s použitím magnetických ložisek jednat o velmi tichý motor s velmi vysokými otáčkami.
- 3) **Vysoká účinnost:** Hřídel není v kontaktu s ložiskem, nedochází tudíž ke ztrátám třením a nedochází ke vzniku tepla, které by bylo potřeba odvádět pryč. V rámci energetické úspornosti, která se v dnešní době stává čím dál častějším tématem, je účinnost tou nejdůležitější výhodou, která nám z použití těchto ložisek plyne, protože díky nulovému tření můžeme používat motory s nižším výkonem (nízká spotřeba energie) a dosáhnout vyšší účinnosti. V některých případech zaniká i potřeba chlazení, která vyžaduje elektrickou energii.
- 4) **Schopnost pracovat v extrémních podmínkách:** Tato ložiska mohou bez problémů pracovat ve vakuu, v páře, při nízkých nebo naopak vysokých teplotách, kde se běžná ložiska potýkají s radou problémů.
- 5) **Nízké vibrace.** Malé vibrace v závislosti na volbě a konstrukci magnetického ložiska. Při správném návrhu získáme minimální vibrace magnetických ložisek. Ta jsou pak vhodná pro aplikace citlivé na vibrace. Jedna z možností aktivního tlumení je například volba velmi dlouhých a pružných hřídelů.
- 6) **Vysoká obvodová rychlost.** Mohou pracovat při obrovských obvodových rychlostech až 250 ms^{-1} v porovnání s valivými nebo hydro-dynamickými ložisky. Tyto rychlosti jsou však omezeny odstředivou silou působící na rotor.
- 7) **Spolehlivost a prakticky možná neomezená životnost.** Magnetická ložiska se vyznačují vysokou spolehlivostí. Proto doba jejich provozu je 15-20 let. V případě použití aktivních magnetických ložisek životnost klesá z důvodu řídicího systému, který závisí na použitých elektronických součástkách, ale většinou bývá až 5 let.
- 8) **Umělé vytváření vibrací:** V případě aktivních magnetických ložisek můžeme vibrace záměrně vyvolat pro získání dynamických charakteristik hřídelů [1,2,3,4,5].

Magnetické ložisko našlo využití především ve vysokorychlostních strojích, gyroskopech, setrvačnickových akumulátorech energie, kompresorech, molekulárních, vývěvách, výrobě elektrické energie, výrobě polovodičů, v potravinářském průmyslu, v kosmickém inženýrství a ve zdravotnictví v podobě umělého srdce, kde pasivní magnetická ložiska pracují ve ventrikulárním pomocném zařízení, což je systém nahrazující chod srdce, které není schopné, např. po infarktu, udržovat normální průtok krve a tlaky v cévních řečištích. Oproti běžným ložiskům poskytují magnetická ložiska bezúdržbový provoz a toho lze využít při vesmírných misích.

Magnetická ložiska lze rozdělit na pasivní, aktivní a hybridní. Pasivní magnetická ložiska jsou zařízení, která nepotřebují k funkci vnější zdroj energie. Obvykle je tvoří soustava permanentních magnetů. Jedná se spíše o miniaturní ložiska, neboť maximální dosažitelná tuhost a síla nenabývá potřebných parametrů pro použití ve větších aplikacích. Aktivní magnetická ložiska jsou závislá na vnějším zdroji v podobě elektrického proudu, který prochází cívkami a vytváří tak magnetické pole. Vzhledem k možnosti regulovat velikost výsledné síly prostřednictvím velikosti proudu jsou aktivní ložiska schopná nést rotory o hmotnosti několika tun. Z tohoto důvodu se v průmyslu častěji využívají aktivní magnetická ložiska než pasivní. Hybridní magnetická ložiska jsou speciální typ aktivních magnetických ložisek, která mohou být koncipována buď jako aktivní magnetické ložisko využívající stálý magnetický tok od permanentních magnetů, nebo mohou být označovány jako takzvané bezložiskové motory, kde pro levitaci rotoru je využito vinutí daného stroje [1].

Princip jakékoliv magnetické levitace je stejný a vychází z Maxwellových rovnic a fungují buďto na bázi reluktanční síly nebo Lorenzovy síly.

Magnetická ložiska fungující na principu magnetické reluktance. Síla zde působí kolmo na rozhraní dvou prostředí s různými relativními permeabilitami (například permeabilita vzduchu a magnetu) a snaží se snížit celkovou magnetickou reluktanci soustavy (například dva magnety s opačnými póly). Příkladem takového rozhraní může být vzduchová mezera mezi elektromagnetem a ocelovou hřídelí, kde síla přitahuje hřídel k elektromagnetu, čímž se snaží eliminovat vzduchovou mezeru s nízkou permeabilitou. Velikost síly závisí na síle magnetu a rozdílu permeabilit. Vzhledem k tomu, že permeabilita oceli je ve srovnání se vzduchem vysoká, tak i výsledná síla přitahující ocel je vysoká.

Magnetická ložiska fungující na principu Lorenzových sil, kde Lorenzova síla je hnací silou většiny používaných elektrických motorů. Působí na elektrický náboj, který se pohybuje v magnetickém poli, přičemž její směr je vždy kolmý na magnetické siločáry a je dán pravidlem pravé ruky [5].

2.1 Pasivní magnetická ložiska

Název pasivní magnetická ložiska je odvozen od skutečnosti, že k jeho funkci není potřeba žádný řízený akční člen, kterým by bylo potřeba dodávat elektrickou energii a z toho plyne jedna z hlavních výhod těchto magnetických ložisek, se kterými je spojeno mnoho dalších důležitých výhod. V první řadě bezpečnost, kdy nehrozí zásah elektrickým proudem. Během provozu také nedochází k ohřívání částí ložiska, jednak protože zde nedochází ke tření, ale také, a to především, pro nepřítomnost zmíněného elektrického proudu, který má tendenci měnit část své elektrické energie procházející cívkou na energii tepelnou. Z toho dále vyplývá elektrická nezávislost těchto ložisek na vnějších podmínkách (např. při výpadku proudu). Mezi další výhody lze jistě uvést jednoduchou konstrukci a poměrně malé rozměry i při nemalých zatíženích a z toho plynoucí i nižší váha ložiska.

Pasivní magnetická ložiska se dělí do dvou skupin, a to na ložiska s permanentními magnety nebo vysokoteplotními supravodiči. V této kapitole se budeme bavit pouze o ložiscích s permanentními magnety, která představují v podstatě nejjednodušší typ magnetických ložisek [4, 2].

2.1.1 Ložiska s permanentními magnety

Tato ložiska využívají trvalých permanentních magnetů a jsou nejjednodušší, nejlevnější a jsou i poměrně nejspolehlivější. Nedostatkem těchto ložisek je jejich nestabilita, protože radiální magnetická ložiska jsou nestabilní v axiálním směru a naopak axiální magnetická ložiska jsou nestabilní v radiálním směru. Také vlivem změn zatížení nelze během chodu měnit či přizpůsobovat polohu pohybujících se částí ložiska. Toto je vysvětleno tzv. Earnshawovým teorémem, který nám říká, že soustava elektricky nabitých částic nemůže setrvat ve staticky rovnovážné poloze pouze díky působení elektrostatických sil. Tyto nepříznivé jevy lze však obejít několika způsoby. Například použití diamagnetických těles, použití elektromagnetů se zpětnovazebním regulačním obvodem, použitím rotací levitujícího tělesa (vznik magnetického gyroskopického momentu), použitím oscilujícího elektromagnetického pole, využitím ferrofluidní tekutiny, přidáním opěrných mechanických těles, nebo jinou vhodnou konstrukcí celého zařízení.

Uspořádání jednotlivých konstrukcí, kterými se zde budeme zabývat, dělíme podle funkčního provedení na ložisko axiální, nebo radiální. Rozdíl mezi axiálním a radiálním typem je zřejmý z obrázku **2-1** [2].

	Radiální ložisko	Axiální ložisko
Přitahování		
odpuzování		

Obr. 2-1 Různý uspořádání pasivního magnetického ložiska [2]

Porovnání pasivních magnetických ložisek vůči aktivním [1]:

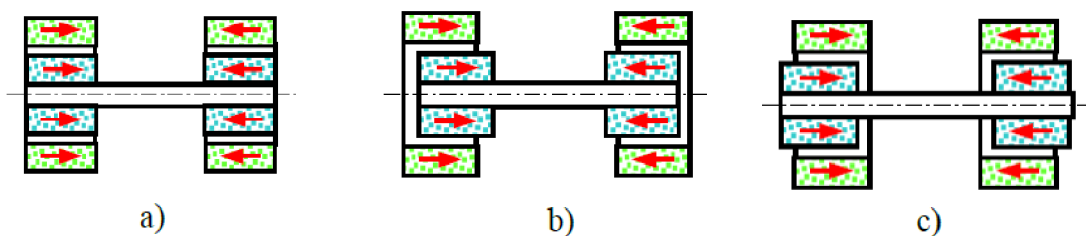
Výhody:

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

Nevýhody:

- nízká tuhost a menší tlumení
- malá únosnost

Magnetická ložiska na Obrázku 2-2 kombinují dva typy standardních magnetických ložisek: radiální a axiální. Axiální síly je docíleno vnitřním nebo vnějším přesazením vnitřního magnetického kroužku vůči vnějšímu. Bez použití zmíněného offsetu by ložiska dosahovala radiální stability, ale axiální nikoliv [1].



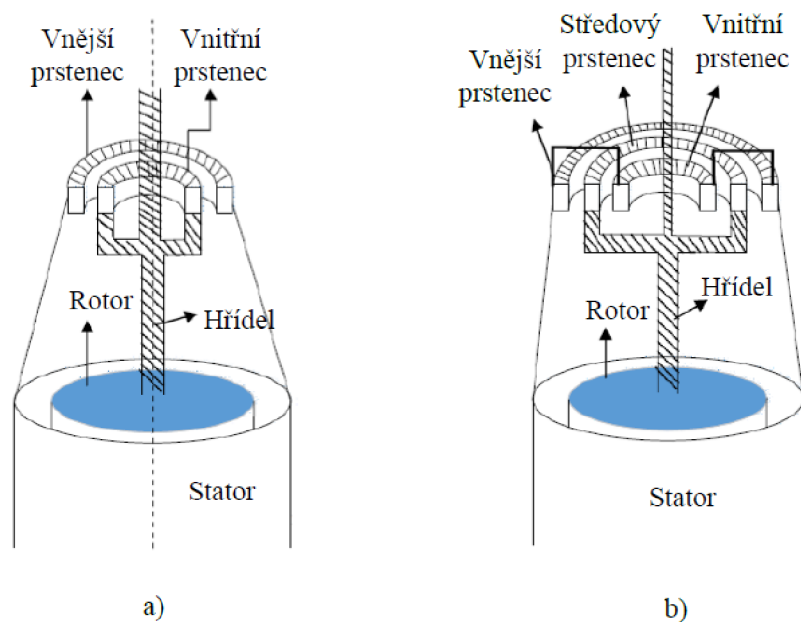
Obr. 2-2 Uspořádání pasivních magnetických ložisek a) bez přesazení, b) s vnitřním přesazením, c) s vnějším přesazením [1]

2.1.2 Pasivní magnetické ložisko složené ze dvou, nebo tří prstencových permanentních magnetů.

Velkým problémem, se kterým se běžná pasivní ložiska setkávají, je malá zatížitelnost a tuhost. Jedním ze způsobů, jak docílit větší tuhosti a síly je vyobrazen na Obrázku 2-3.

Běžná ložiska mají vnější magnety na statoru a vnitřní magnety na rotoru, jako v případě konstrukce na obrázku 2-3 a), kde vnější prstenec tvoří statorovou část magnetu ložiska a vnitřní prstenec tvoří rotorovou část magnetického ložiska. Jeden ze způsobů, jak docílit větší tuhosti a síly je vyobrazen na Obr. 2-3 b), kde je přidán vnitřní prstenec, který tvoří se vnějším prstencem statorovou část a středový prstenec tvořící rotorovou část.

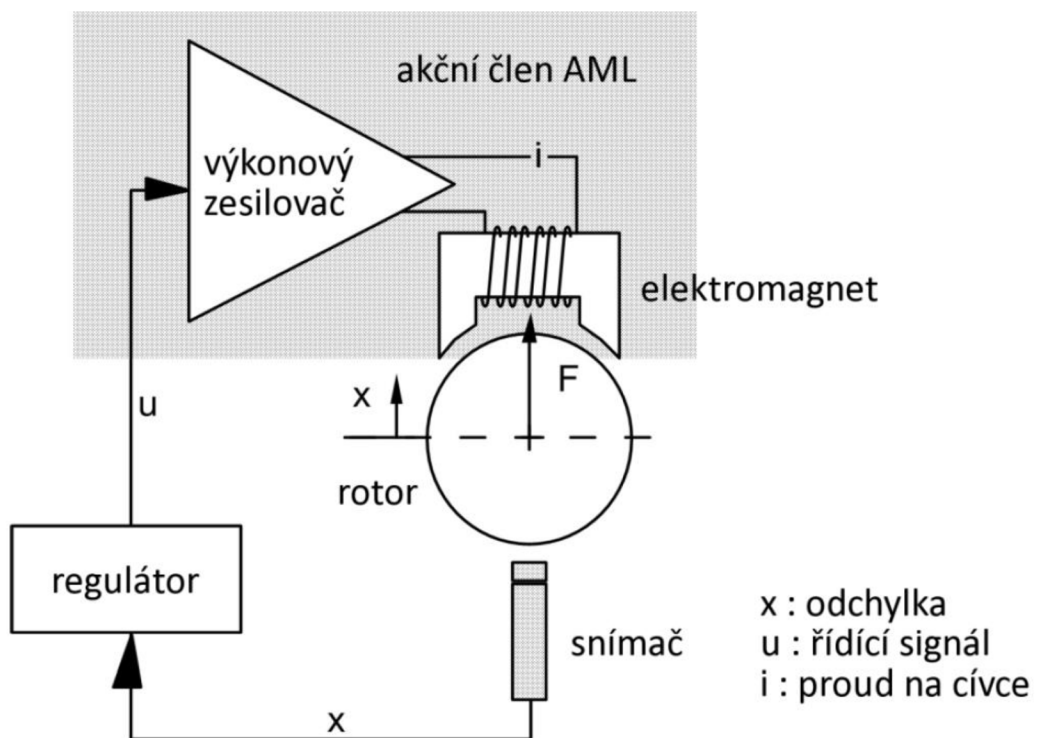
Takto navržené ložisko se třemi prstencovými permanentními magnety dosahuje 2,5krát větší síly a 1,2krát větší tuhosti oproti magnetickému ložiskům se dvěma prstencovými permanentními magnety [1].



Obr. 2-3 Pasivní axiální magnetické ložisko se a) dvěma prstenci s permanentními magnety b) tři se třemi prstenci s permanentními magnety [1]

2.2 Aktivní magnetická ložiska

Aktivní magnetická ložiska využívají přitažlivé síly a vyznačují se také tím, že pro svoji funkci potřebují řízený akční člen a elektrickou energii. Aktivní magnetická ložiska mají výhodu v možnosti uzpůsobení se změnám při zatížení. Z toho plyne možnost změny ložiskové mezery mezi statorovou a rotorovou částí. O tyto změny se stará řídicí systém, který vše hlídá a zajišťuje správnou polohu rotoru (hřídele), čímž dosahujeme velmi přesného uložení a vyhneme se tak případným vibracím a kmitům hřídele. Princip funkce se shoduje s běžnými elektromagnety. Ve statoru ložiska je umístěno pole cívek ve kterých se při průchodu elektrického proudu indukují magnetické pole, které přitahuje rotor z feromagnetického materiálu. Další výhodou ovládání ložiska je možnost ovládání na dálku. Díky tomu je možné například určit některé závady ložiska pomocí elektroniky a není tedy nutno rozebírat celé zařízení, v němž jsou tato ložiska zabudována [2]. Takovýto princip aktivního magnetického ložiska je popsán na obrázku 2-4. Na obrázku systém AML sestává z rotoru, snímačů a dalšího vybavení pro snímání pozice rotoru, regulátorů, výkonového zesilovače a elektromagnetů pro vytvoření přitažlivé síly.



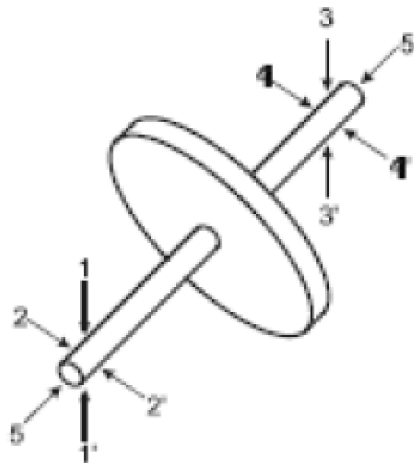
Obr. 2-4 Princip funkce AML [18]

Největší nevýhodou těchto ložisek je samozřejmě nutnost napájení elektrickým proudem a celkově větší prostorové nároky, jelikož je potřeba k ložisku připojit i řídicí systém. Samotné ložisko je z konstrukčního hlediska složitější, a tedy i výrobní náklady jsou vyšší. Elektrický proud procházející cívkami ve statoru může celé ložisko zahřívát a toto teplo se pak může přenášet do okolního prostředí.

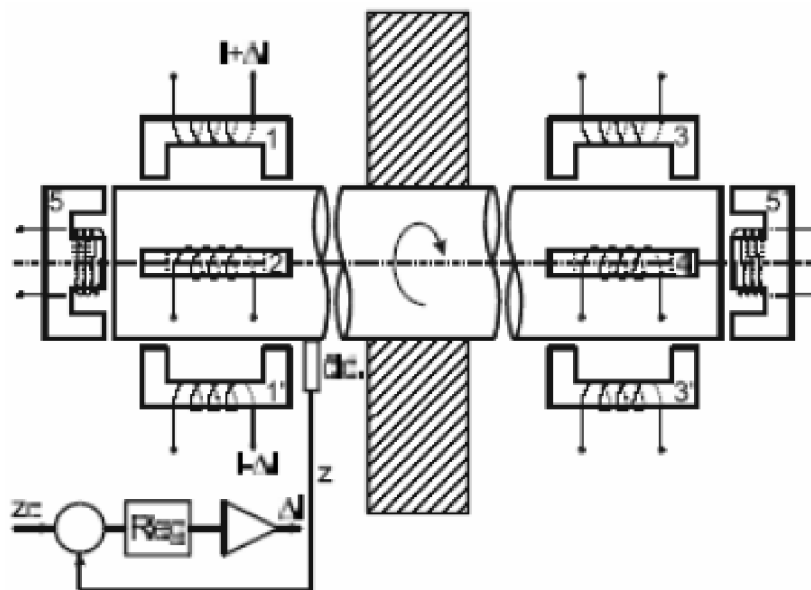
Materiál aktivních magnetických ložisek se volí s ohledem na jeho střídavou magnetizaci. Takovýto materiál musí mít vysokou počáteční i maximální permeabilitu a vysokou indukci nasycení. Obě tyto vlastnosti mají praktický vliv na zatížitelnost aktivních magnetických ložisek při zachování co nejmenších rozměrů a hmotnosti. Dále je potřeba zajistit ekonomičnost provozu. Toho můžeme docílit za pomoci snížení elektromagnetických ztrát při volbě materiálu s nízkou koercivitou a nízkou elektrickou vodivostí. V praxi se běžně využívají magneticky měkké materiály, které mají úzkou hysterezní smyčku. Takovéto materiály se dají snadno zmagnetovat a po přerušení proudu velmi rychle tyto magnetické vlastnosti ztratí.

Aktivní magnetická ložiska jsou ze všech druhů magnetických ložisek nejvíce využívána. Tato skutečnost plyne z uvedených výhod, které poskytují. Využití nachází nejen u výkonných setrvačnickových systémů, ale i u turbokompresorů a turbín, kde je vyžadována velká únosnost uložení. Přesné uložení je velmi důležité u tzv. vysokorychlostního obrábění, kde tato ložiska dovolují velmi přesné obrábění a k tomu umožňují i velké obvodové rychlosti a tím zkrácení výrobních časů. Proměnlivost vzduchové mezery mezi statorem a rotorem dovoluje použít tato ložiska k biologickým či farmaceutickým účelům (možnost zpracovávání živých buněk). Byť tato ložiska potřebují k provozu zdroj elektrického proudu a pořizovací náklady nejsou malé, jejich úspora energie, která by byla ztracena třením, je po dobu životnosti ložiska velká [2].

Poloha rotoru v ložisku není stabilní, proto je nutné aby, systém byl vybaven zpětnovazebním regulačním obvodem. V případě ložiska zobrazeného na obrázku 2-5 a 2-6 je potřeba monitorovat výchylku rotoru v 5 osách (čtyřech radiálních a jedné axiální), protože hřídel má 5 stupňů volnosti (obrázek 2-5), to se provádí pomocí indukčních snímačů polohy. Každá dvojice elektromagnetů 1-1', 2-2', 3-3', 4-4', 5-5' má svou vlastní zpětnovazební smyčku a čidlo polohy. Snímače 1-1' a 3-3' kontrolují 2 stupně volnosti rotoru: rotaci a translaci. Stejně tak i snímače 2-2' a 4-4'. Pár snímačů 5-5' kontroluje pouze translaci. Signálem, který řídí budicí proudy, je rozdíl mezi změřenou polohou hřídele a jeho požadovanou polohou [4].



Obr. 2-5 stupňů volnosti hřídele rotoru magnetického ložiska [4]



Obr. 2-6 Stabilizace polohy rotoru radiálního magnetického ložiska [4]

Porovnání aktivních magnetických ložisek vůči pasivním [1]:

Výhody:

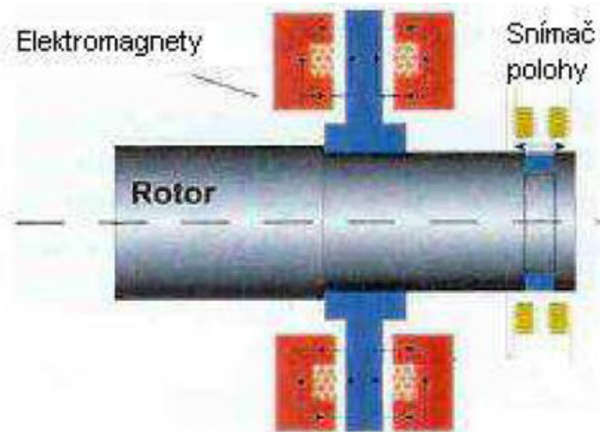
- vysoká přesnost uložení
- minimální energetické ztráty
- možnost řízení mezery mezi statorovou a rotorovou částí
- omezení vibrací
- možnost diagnostiky ložiska bez nutnosti demontáže
- vysoká únosnost
- nastavitelná tuhost a tlumení

Nevýhody:

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

2.2.1 Axiální magnetické ložisko

Axiální ložiska slouží k zachycení osových sil působících na rotor (hřídel). Zabraňují pouze posuvu hřídele, odebírají tedy pouze jeden stupeň volnosti. Na obrázku 2-7 je uvedený typický příklad axiálního ložiska.

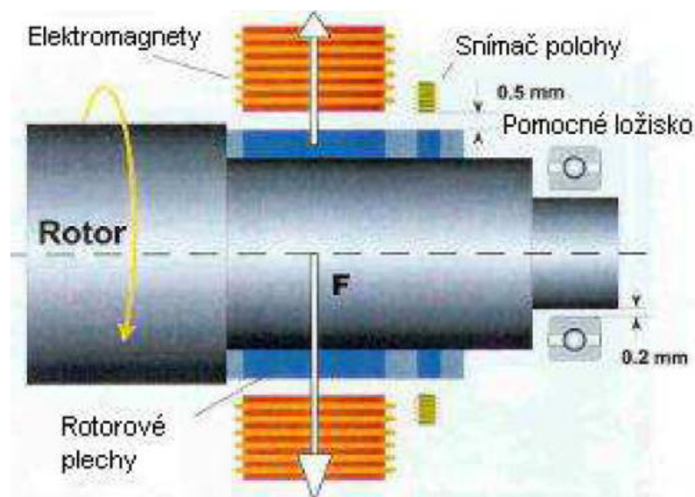


Obr. 2-7 Axiální aktivní magnetické ložisko [2]

Axiální magnetické ložisko má masivní ocelový kotouč z feromagnetického materiálu, který je připojen k hřídeli a po obou stranách jsou umístěny prstencové elektromagnety statoru, které mohou obsahovat několik vinutí. Dále je na rotoru umístěno snímací zařízení, které zaznamenává axiální posuv hřídele a vysílá signály do řídicího systému, který následně upraví velikost napájecího proudu v cívkách tak, aby hřídel zůstal ve správné poloze [2].

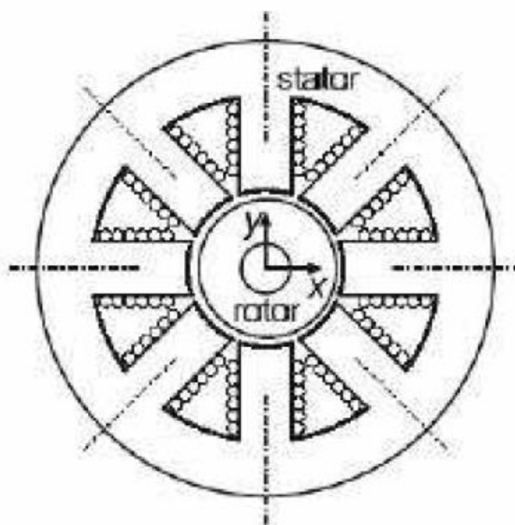
2.2.2 Radiální magnetické ložisko

Radiální aktivní magnetická ložiska zachycují síly, které se snaží vychýlit hřídel ze středové polohy. Odebírají čtyři stupně volnosti, a to posuv ve dvou osách na sebe kolmých a dále také rotaci ve dvou osách na sebe kolmých. Konstrukce je obdobná konstrukci s axiálními magnetickými ložisky. Na rotoru je nalisován kroužek z feromagnetického materiálu. Ve statorové části se nachází několik elektromagnetů, které jsou po obvodu rozloženy tak, aby proti sobě byla vždy jedna dvojice (po 180°). Takovýchto dvojic může být ve statoru různý počet, a to 2, 3, 4, atd. Vše je závislé na únosnosti ložiska a jeho prostorových dispozicích. Existuje však případ, kdy se ve statoru nachází pouze tři elektromagnety, které jsou po obvodu rozestaveny po 120°. Jedná se o nejjednodušší typ konstrukce radiálního ložiska, které však nemá příliš velkou únosnost a jeho řízení je také obtížnější. Jako u ostatních typů aktivních magnetických ložisek i zde jsou umístěny snímače polohy, které zjišťují polohu rotoru. Obrázek 2-8 zobrazuje zjednodušenou konstrukci těchto ložisek [2].



Obr. 2-8 Radiální aktivní magnetické ložisko [2]

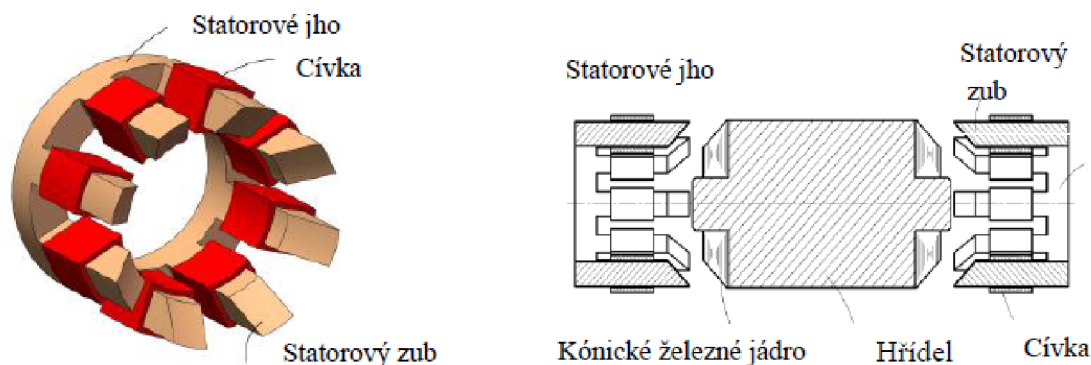
Na obrázku 2-9 je stator radiálního ložiska, který se skládá ze čtyř oddělených ovládacích jednotek. Každá jednotka je tvořena dvěma póly, na nichž je navinuta cívka. Při průchodu elektrického proudu cívkou vzniká přitažlivá síla, která působí na feromagnetický rotor. Velikost a únosnost ložiska je pak dána počtem pólů a jejich rozměry, materiálem statoru a rotoru, počtem závitů drátu, velikostí vzduchové mezery, maximálním proudem a vnějším průměrem hřídele [4].



Obr. 2-9 Schéma magnetického obvodu se 4 dvojicemi protilehlých cívek [4]

2.2.3 Kuželové magnetické ložisko s drápkovou strukturou

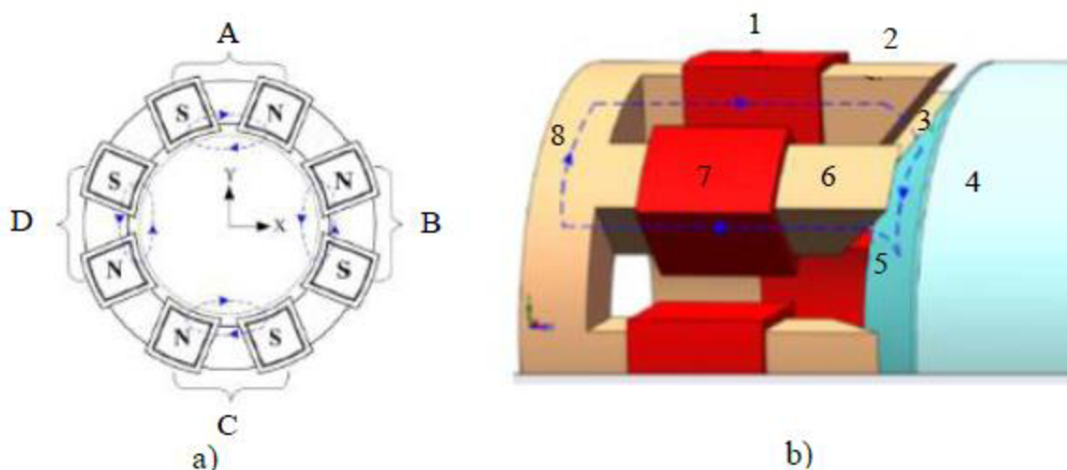
Magnetická ložiska vyžadují stabilitu v axiálním i radiálním směru, a proto je zapotřebí u běžných magnetických ložisek umístit minimálně tři ložiska (dvě radiální a jedno axiální), která tuto stabilitu zajistí. Takováto ložiska mají obecně velký průměr, kde v případě axiálního ložiska je zapotřebí rozměrný rotorový disk, jak je vyobrazeno na Obrázek 2-8.



Obr. 2-10 Konstrukce kuželového aktivního magnetického ložiska s drápkovou strukturou [1]

Tuto podmínku lze obejít použitím konstrukce s drápkovou strukturou Obrázek 2-10, kde takto navržené magnetické ložisko umožní zmenšit statorový průměr, ale naopak zvětší osovou délku stroje pro umístění cívek a statorového jha v axiálním směru. Další výhodou kuželovitého magnetického ložiska je menší hlučnost. Běžná ložiska s velkým rotorovým diskem způsobují poměrně velkou hlučnost vlivem turbulentního proudění vzduchu. Také působení odstředivých sil zde hraje menší roli než u ložisek s velkým rotorovým diskem, kde je zapotřebí tyto síly uvažovat při návrhu disku z důvodu pevnosti materiálu.

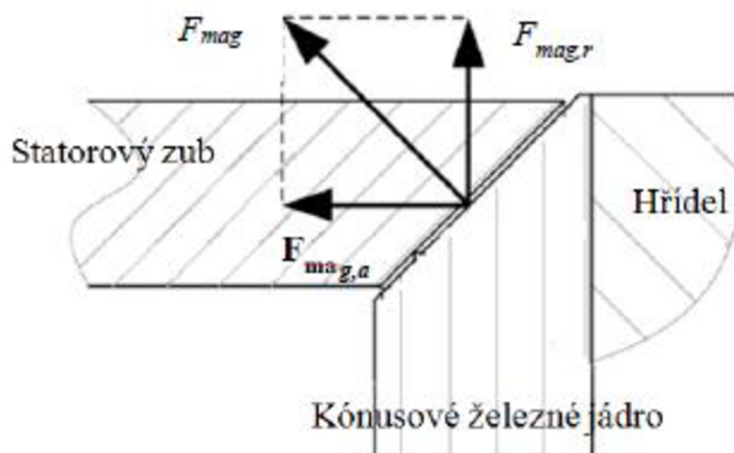
Kuželové magnetické ložisko se skládá ze dvou magnetických ložisek udržujících stabilitu jak v radiálním, tak axiálním směru. Obě ložiska mají osm statorových zubů zakončených kónicky s budícími cívkami uloženými v podélném směru a magnetické jho [1].



Obr. 2-11 Uspořádání pólů jedné strany magnetického ložiska, b) uzavírání magnetického toku v jedné pólové dvojici [1]

Magnetické pole jedné strany magnetického ložiska je zde tvořeno osmi budícími cívkami, které jsou navinuté na osm rotorových zubů. Polarita těchto cívek na obrázku 2-11a) je uzpůsobena tak, aby těchto osm cívek tvořilo dohromady 4 pólové dvojice.

Magnetické pole pólové dvojice na obrázku 2-11b) je zde vyznačeno čárkovaně. Tok vytvořený cívkou 1 (a cívkou 7, která vytváří tok ve stejném směru) prochází statorovým zubem 2 přes vzduchovou mezeru 3 do železného jádra 4 a dále pokračuje přes vzduchovou mezeru 5 do statorového zubu 6, kde se k tomuto toku přičte tok vytvořený od cívkou 7 a následně se vrací přes statorové jho 8 do statorového zubu 2, kde se uzavře smyčka.



Obr. 2-12 Uspořádání jednotlivých sil mezi jádrem a jedním statorovým zubem [1]

Takto vzniklý tok (stejně jako proud) prochází cestou nejmenšího odporu. Jelikož tento tok prochází vzduchovou mezerou, kde magnetický odpor lze měnit šířkou vzduchové mezery, tak výsledná síla F_{mag} je dána ve směru, který šířku vzduchové mezery zmenšuje a tuto výslednou sílu F_{mag} , díky kónickým plochám jádra a statorového zubu, lze rozdělit na jednotlivé složky. A to na složku v ose y $F_{mag,r}$ a na složku v ose x $F_{mag,a}$. Velikost této síly F_{mag} se odvíjí od velikosti proudu procházejícího cívkou 1 a 7 a těchto dvou vzduchových mezer [1].

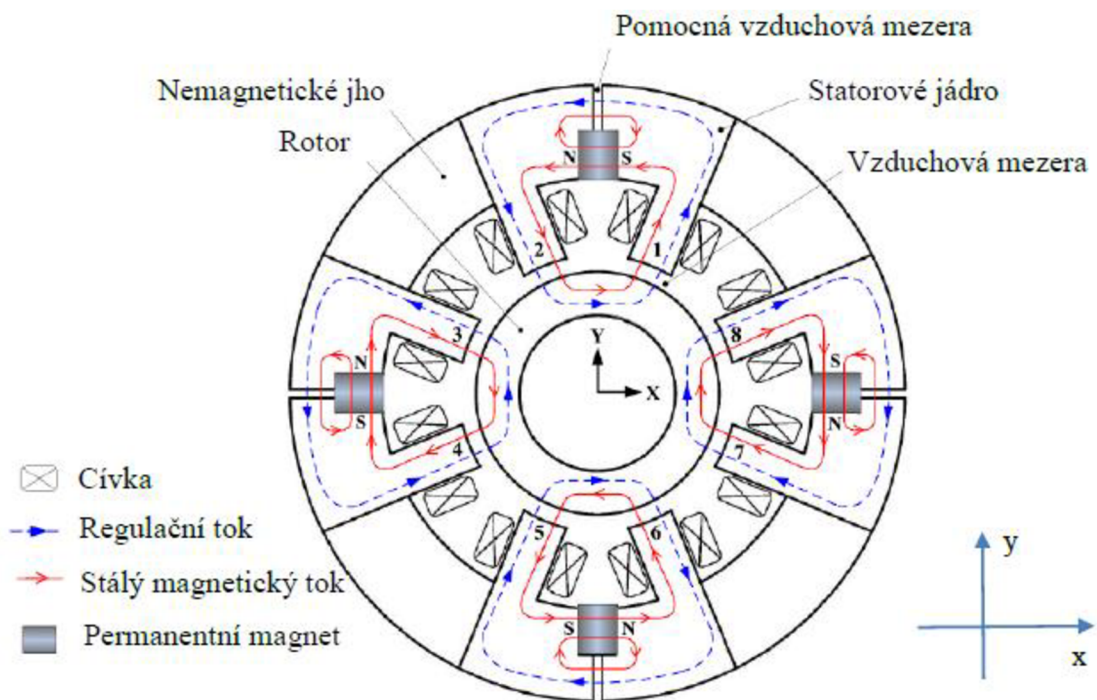
2.3 Hybridní magnetická ložiska

Hlavní výhodou hybridních ložisek je vytváření stálého magnetického pole pomocí permanentních magnetů. Tímto způsobem se docílí menší energetické náročnosti a zároveň se zmenší celkové vytvářené teplo oproti běžným aktivním ložiskům. [1]

2.3.1 Hybridní radiální magnetické ložisko se stálou magnetizací od permanentních magnetů

Magnetické ložisko v takovémto uspořádání umožňuje samostatnou regulaci radiálního směru v ose x a y , jako v případě magnetického ložiska s drápkovou strukturou. Díky permanentním magnetům, které udržují stálou magnetizaci dochází k přesnějšímu nastavování polohy a vyšším odolnostem vůči dynamickým změnám.

Magnetické ložisko na obrázku 2-13 je tvořeno 8 póly, které tvoří 4 pólové dvojice. Každá pólová dvojice obsahuje dvě cívky pro regulaci vzduchové mezery a jeden permanentní magnet (umístění ve statorovém jhu) pro udržení stálého magnetického toku. Na vnější straně permanentního magnetu je pomocná vzduchová mezera a mezi pólovými dvojicemi je umístěno nemagnetické jho. Statorové jádro s hřídelí je sestaveno z tenkých křemíkových plechů pro omezení vířivých ztrát.



Obr. 2-13 Uspořádání jednotlivých sil mezi jádrem a jedním statorovým zubem [1]

Magnetický tok vytvořený v jedné pólové dvojici se skládá z proměnlivého magnetického toku od dvou cívek a stálého magnetického toku od jednoho permanentního magnetu.

Tok vytvořený od permanentního magnetu je na obrázku **2-13** vyznačen nepřerušovanou čarou a je rozdělen do dvou částí. Jedna část magnetického toku prochází pomocnou vzduchovou mezerou a má opačný směr než magnetický tok vytvořený cívkami. Druhá část magnetického toku prochází jižním pólovým nástavcem **2**, přes vzduchovou mezeru do hřídele, a následně přes druhou vzduchovou mezeru do severního pólového nástavce **1** směrem do permanentního magnetu, kde se uzavře smyčka.

Tok vytvořený cívkou **1** a **2** je na obrázku **2-13** vyznačen přerušovanou čarou. Tento tok vytvořený cívkou **1** namotanou na pólový nástavec **1** (a cívkou **2**, která vytváří tok ve stejném směru) prochází přes vzduchovou mezeru do hřídele a dále pokračuje přes vzduchovou mezeru do severního pólového nástavce **1**, kde se k tomuto toku přičte tok vytvořený od cívky 1 a následně se vrací přes pomocnou vzduchovou mezeru zpět do pólového nástavce **1**, kde se smyčka uzavře.

Tento typ magnetického ložiska zahrnuje vlastnosti pasivního a aktivního magnetického ložiska, proto jej nazýváme hybridní magnetické ložisko. Jako v případě pasivních magnetických ložisek, tak i zde s využitím stálého magnetického toku od permanentních magnetů bez použití cívek, by se jednalo o nestabilní systém. Z tohoto důvodu jsou zde umístěny cívky pro zajištění regulace uzavřené smyčky magnetického toku pro následné udržování stabilní polohy rotoru.

V případě, že se rotor nachází ve stabilní poloze, neteče cívkami žádný proud a uzavřenou smyčku (jednotlivých pólových dvojic) tvoří jen tok vytvořený od permanentních magnetů. Pokud ovšem dojde k vychýlení v jednom směru, například ve směru osy y , kdy ve směru $-y$ dojde ke zvětšení vzduchové mezery a ve směru $+y$ dojde k zmenšení vzduchové mezery, tak polohové senzory detekují vychýlení rotoru z rovnovážné polohy. Regulátor na základě údajů z polohových senzorů generuje řídicí signál výkonovému zesilovači, který řídicí signál převede na proud odpovídající magnetickému poli ve vzduchové mezeře a řídicími cívkami začne protékat proud. Cívkami 1 a 2 začne protékat záporný proud a tím vznikne tok, který má opačný směr než tok od permanentních magnetů a výsledná síla ve směru y se zmenšuje. Naopak v cívkách 5 a 6 začne protékat kladný proud, který vytvoří tok ve směru toku permanentního magnetu a výsledná síla se začne zvětšovat. Cívkami 3,4,7,8 neteče žádný proud, jelikož ve směru x nedošlo k vychýlení rotoru. Jakmile dojde k navrácení rotoru do stabilní polohy, dojde znovu k upravení řídicího proudu tak, aby výsledný magnetický tok udržel rotor ve stabilní poloze i přes působení vnějších sil. [1]

2.4 Snímače polohy

V předchozích kapitolách byla zmíněna regulace polohy motoru, která je přirozeně nestabilní. Proto je nutná její zpětnovazební regulace. Řídicí systém umožňuje díky zpětnovazební regulaci řídit proud v ložisku na základě informace o pozici z jednoho senzoru. Jsou-li využívány informace o pozici rotoru jen od jednoho senzoru polohy, tak mluvíme o řízení s jedním vstupem a jedním výstupem. V případě, kdy je vyžadováno řízení vyššího charakteru, nebo je mezi osami očekávána významná křížová vazba, bývají řídicí systémy provedeny jako více vstupové a více výstupové. Řídicí systém polohy rotoru sestává ze senzoru polohy s doprovodnou elektronikou, regulátoru a výkonového zesilovače. Na snímač jsou kladeny požadavky pro bezkontaktnost, lineárnost a jednoduchost přenosové funkce. Při komerčním využití je požadavek na životnost, stabilitu a finanční náklady.

Při návrhu je potřeba brát v úvahu i prostor pro umístění snímačů polohy rotoru a prostředí, ve kterém budou snímače pracovat. Při zohledňování okolí, kde bude snímač používán je zapotřebí vybírat takový snímač, na který nebudou mít vnější vlivy významný vliv. Nejvhodnější umístění čidel je co nejbližší prvku, který má regulovat výchylku v daném místě. Při umístění snímače je dobré umístit snímač na místo, kde jsou průměry velké, protože v případě snímání oblé plochy dochází ke značné nesymetrii.

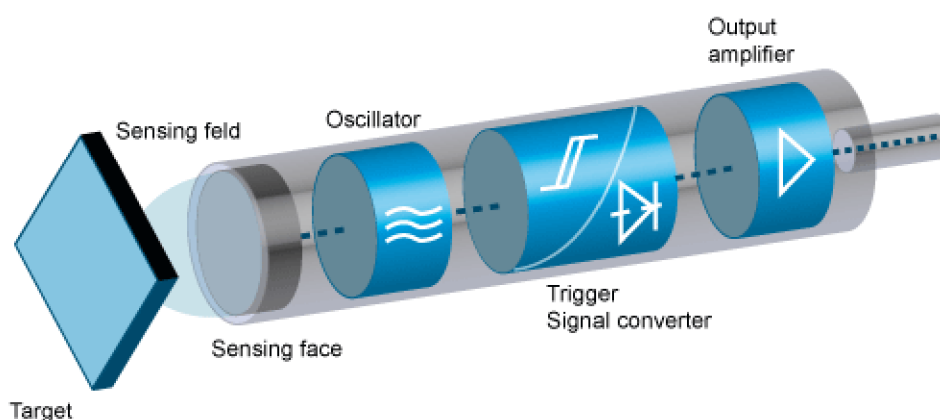
Snímače bývají často kalibrovány na produkci nulové hodnoty na vstupu v žádané poloze rotoru. Nachází-li se rotor nad touto polohou, tak generují kladný výstup a v případě, že se nachází pod touto hodnotou, tak generují záporný výstup.

Snímače v magnetických ložiskách musí měřit polohu rotoru bezkontaktním způsobem. Nejpoužívanějším typem snímačů v magnetických ložiskách jsou indukční snímače. Dále jsou používány i kapacitní, optické a akustické snímače. Všechny tyto snímače mají své nevýhody, které omezují jejich použití v některých aplikacích. Dále máme ještě Hallovy snímače, které jsou založené na hustotě elektromagnetického toku, tedy na přímém výpočtu pozice rotoru z proudu a napětí na cívkách [18].

2.4.1 Indukční snímače polohy

V praxi pro řízení polohy rotoru v ložisku jsou nepoužívanějším typem indukční snímače. Princip tohoto snímače je založen na vzájemném působení mezi kovovými vodiči a střídavým elektromagnetickým polem. V kovovém materiálu, který je snímán jsou snímačem do tohoto materiálu indukovány vířivé proudy, které odebírají energii z pole generovaného snímačem a tím velikost oscilační amplitudy klesá. Tato změna je následně snímačem vyhodnocena. Senzory jsou napájeny střídavým proudem o vysoké frekvenci v řádech kHz až MHz.

Jednou z nevýhod je nemožnost snímat polohu elektricky nevodivých materiálů. Samotný princip tohoto snímače zneprůjemňuje návrh ložiska. Skutečnost, že v okolí tohoto ložiska vzniká magnetické pole, které ovlivňuje pole snímače vnáší chybu do indukčního snímače, a proto není možné umístit tyto snímače přímo do blízkosti vinutí, nebo magnetů. Nicméně i přes tuto komplikaci jsou indukční snímače nejpoužívanějšími snímači v magnetických ložiscích. Hlavními důvody jsou odolnost vůči znečištění prostředí, vysoká mechanická odolnost a životnost. Protože i samotná magnetická ložiska představují z pohledu údržby bezúdržbový systém s dlouhou životností, tak je nanejvýš vhodné použít takové snímače, které svými vlastnostmi také zajistí bezúdržbový provoz a dlouhou životnost [18].



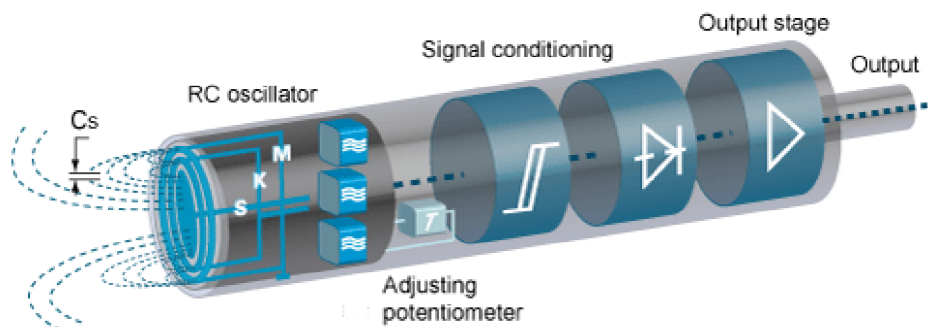
Obr. 2-14 Indukční snímač polohy [18]

2.4.2 Kapacitní snímače polohy

Kapacitní snímače polohy pracují na principu kondenzátoru s proměnou kapacitou, která se mění se vzdáleností. Toto vychází ze známého vztahu pro výpočet kapacity, která se vypočte jako:

$$C = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{l} \quad (2-1)$$

Aktivní plocha snímače obsahuje dvě koncentricky uspořádané kruhové elektrody pro určení dielektrické charakteristiky prostředí. V tomto případě mluvíme o vzduchu, kde se zvětšením vzdálenosti měřeného předmětu změní i permeabilita. Nevýhodou těchto snímačů je závislost na znečištění. Tato skutečnost se z pohledu bezúdržbového provozu při použití v magnetických ložiscích jeví jako velká nevýhoda a omezuje tak použití tohoto snímače v magnetických ložiscích. Nicméně zde odpadá potřeba použití elektricky vodivého materiálu, který je u indukčních snímačů zapotřebí [18].

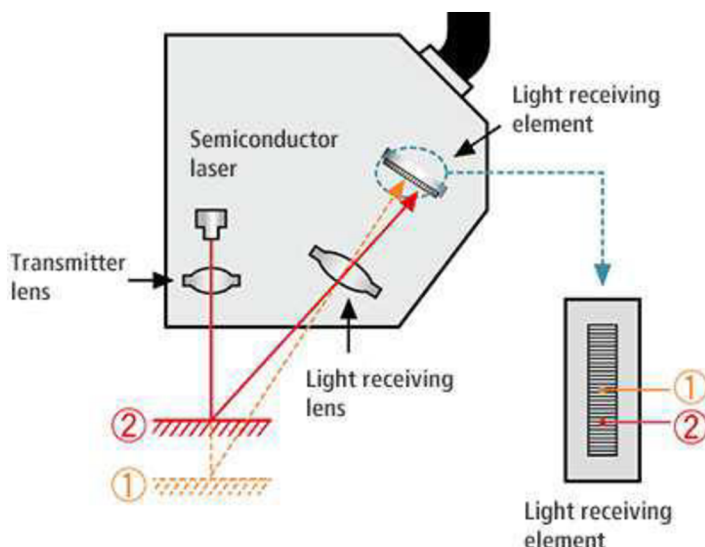


Obr. 2-15 Kapacitní snímač polohy [18]

2.4.3 Optické snímače polohy

Optické senzory pracují na několika principech, přičemž v případě magnetických ložisek jsou použitelná jen některá řešení. Nejjednodušším typem a také v našem případě realizovatelným typem senzoru je senzor polohy pracující jako fotodioda. Měřený objekt je zde osvětlen zdrojem světla a paprsky odražené od tohoto měřeného objektu následně dopadají do fotodiody o určitém toku. Jakmile dojde ke změně vzdálenosti, tak dojde i ke změně toku dopadajícího na fotodiodu. Nevýhodou tohoto senzoru je závislost na znečištění prostředí a závislost na okolních paprscích světla, jejichž intenzita se během dne mění. Těchto senzorů by se dalo využít v případě, kdy bychom zavedli chlazení motoru i do ložiskového systému a uzavřeli celé ložisko i se senzory.

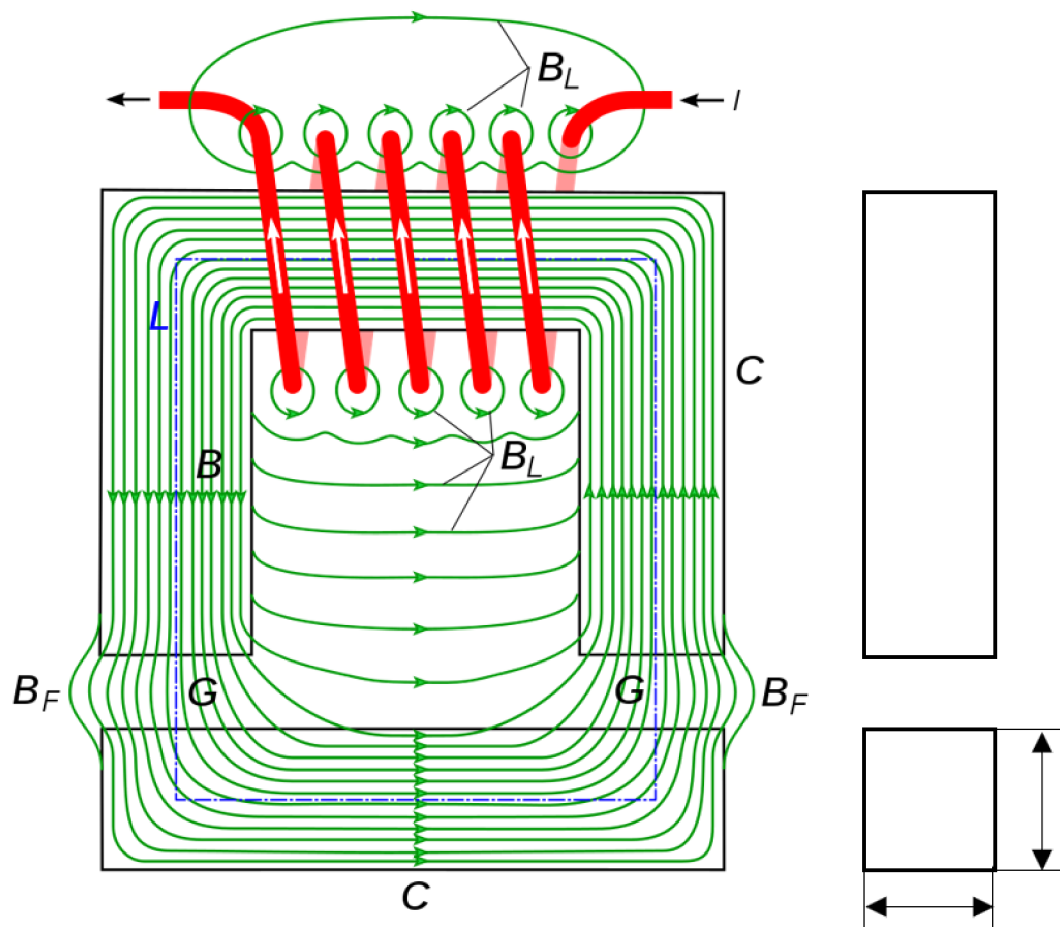
Dalším typem optického senzoru je laserový triangulační optický senzor. Jeho princip je zobrazen na obrázku 2-16. V základu jde o odraz paprsku od měřeného objektu pod nějakým úhlem zpět do snímače, nebo fotodiody. V závislosti na vzdálenosti měřeného objektu se mění úhel odrazu paprsku a následně i místo, kam paprsek na snímači dopadne [5].



Obr. 2-16 Princip laserového triangulačního senzoru polohy [5]

3. MATEMATICKÝ PODKLAD PRO NÁVRH HYBRIDNÍHO MAGNETICKÉHO LOŽISKA

Pro účel porozumění magnetickému ložisku využijeme princip elektromagnetu s jednou cívkou a bez permanentního magnetu (obrázek 3-1), na kterém si odvodíme všechny rovnice potřebné pro popis fungování této soustavy. Celé toto odvození vychází z [5, 7].



Obr. 3-1 Princip elektromagnetu [6]

Na obrázku 3-1 jsou znázorněny všechny indukční čáry magnetické indukce B , které vlivem průchodu elektrického proudu cívkou vzniknou v dané soustavě. V tomto případě teoretického odvozování rovnic neuvažujeme indukční čáry uzavírající se mimo jádro CI.

Takovouto soustavu můžeme brát jako elektrický obvod, kde prochází elektrický proud odpory jádra CI a vzduchové mezery. Tyto odpory představují magnetickou reluktanci a jejich výpočet je obdobný jako výpočet odporu vodiče a vypočítají se:

$$R_m = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{S} \quad (3-1)$$

Kde l je délka dráhy (na obrázku 3-1 je tato dráha vyznačena modrou čerchovanou čarou), přes kterou se uzavírá magnetický tok ($\phi = B \cdot S$), $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$ je permeabilita materiálu a S je průřez materiálu, kterým prochází indukční čáry magnetické indukce.

Výpočet reluktance jádra CI je:

$$R_{CI} = \frac{1}{\mu_r \cdot \mu_0} \cdot \frac{l_{CI}}{a \cdot b} \quad (3-2)$$

Výpočet reluktance dvou vzduchových mezer je:

$$R_G = 2 \cdot \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{(l_G - y)}{a \cdot b} \quad (3-3)$$

Kde l_G je nominální vzduchová mezera a y zde představuje vychýlení ze stabilní polohy, ale v následujícím odvozování budeme $(l_G - y)$ značit jako proměnou x , která zde bude představovat proměnou hodnotu vzduchové mezery v závislosti na vychýlení rotoru.

Reluktance CI jádra bývá řádově o dost nižší než reluktance vzduchové mezery. To je dáno permeabilitou materiálu, kdy v případě železa je $\mu_r = 1000 - 10000$ a v případě vzduchové mezery $\mu_r = 1$. Z těchto předpokladů nabývá odpor vzduchové mezery mnohem větší hodnoty než odpor CI jádra $R_G \gg R_{CI}$, a proto při dalším odvozování nebude odpor CI jádra uvažovat.

Výsledný magnetický tok je dán vztahem:

$$\phi = \frac{N \cdot I}{R_m} = N \cdot I \cdot \mu_0 \cdot \frac{a \cdot b}{x} \quad (3-4)$$

Výsledný spřažený magnetický tok je dán vztahem:

$$\Psi = \frac{N^2 \cdot I}{R_m} = N^2 \cdot I \cdot \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{a \cdot b}{x} \quad (3-5)$$

Výsledná indukčnost je dána vztahem:

$$L = \frac{N^2}{R_m} = N^2 \cdot \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{a \cdot b}{x} \quad (3-6)$$

V aktivních magnetických ložiskách se obecně pracuje s velmi malými vzduchovými mezerami a nastávají zde i situace, kdy požadujeme okamžitou reakci na velmi malé změny vychýlení pro omezení vibrací. V takovémto případě pracujeme s velmi malou

hodnotou x v porovnání s l_G . Výsledný vztah lze pomocí Taylorova rozvoje zjednodušit na:

$$L = N^2 \cdot \frac{\mu_0 \cdot a \cdot b}{2} \cdot \frac{1}{(l_G - y)} = N^2 \cdot \frac{\mu_0 \cdot a \cdot b}{2} \cdot \frac{1}{l_G} \left(1 + \frac{y}{l_G}\right) = L_0 \cdot \left(1 + \frac{y}{l_G}\right) \quad (3-7)$$

V obvodu se vzduchovou mezerou se ukládá magnetická a energie a koenergie. Obě tyto energie jsou ve své podstatě stejné, ale v případě magnetické koenergie mluvíme o energii (úbytku energie) potřebnou pro překonání magnetického odporu vzduchové mezery.

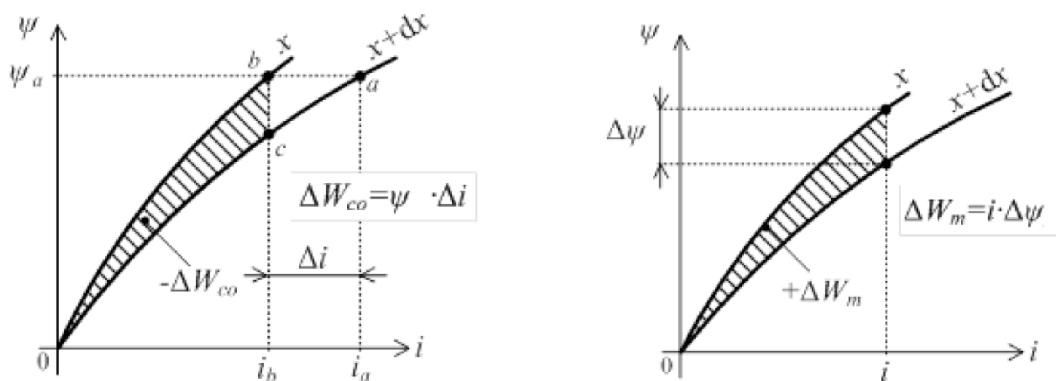
Magnetická koenergie pro lineární i nelineární soustavy:

$$W_{co} = \int_0^i \Psi \cdot di \quad (3-8)$$

Magnetická energie pro lineární i nelineární soustavy:

$$W_m = \int_0^\Psi I \cdot d\Psi \quad (3-9)$$

Na obrázku 3-2 jsou názorně zobrazeny změny energie v případě zvětšení vzduchové mezery. V případě obrázku 3-2 a) je při zvětšení vzduchové mezery zapotřebí pro udržení stálého spřaženého toku zvětšení proudu. Tím následně vzroste i celková energie. To samé se týká i síly, kterou přitahujeme jádro, protože v případě zvětšení vzduchové mezery se díky většímu úbytku ve vzduchové mezeře zmenší přitažlivá síla a pro zajištění stejné síly je zapotřebí dodat proud elektromagnetu. V případě obrázku 3-2 b) jde o změnu magnetické energie následkem zmenšení spřaženého toku vlivem zvětšené vzduchové mezery a tím se zmenší celková energie.



Obr. 3-2 Vliv změny vzduchové mezery na magnetickou energii a koenergi, a) při konstantním toku, b) při konstantním proudu [6]

V jádrech obecně dochází dříve k nasycení než ve vzduchových mezerách. Proto jsou obecně obvody s velkými vzduchovými mezerami méně nelineární až lineární oproti soustavám bez vzduchových mezer, které jsou více nelineární.

V případě lineární soustavy můžeme výraz pro magnetickou koenergií a energii zjednodušit:

$$W_{co} = \int_0^i \Psi \cdot di = \int_0^i L \cdot I \cdot di = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \quad (3-10)$$

$$W_m = \int_0^\Psi I \cdot d\Psi = \int_0^\Psi \frac{\Psi}{L} \cdot d\Psi = \frac{1}{L} \cdot \frac{1}{2} \cdot \Psi^2 = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \quad (3-11)$$

Výsledná energie v případě lineárního systému se spočítá jako:

$$W = W_m + W_{co} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 + \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 = L \cdot I^2 \quad (3-12)$$

Výslednou sílu lze vyjádřit jako sílu při konstantním proudu nebo při konstantním spřaženém toku.

$$F_{im} = - \left(\frac{dW_m}{dx} \right)_{\psi=konst.} \quad (3-13)$$

$$F_{im} = \left(\frac{dW_{co}}{dx} \right)_{i=konst.} \quad (3-14)$$

V tomto případě je lepší použít vzorec pro výpočet síly při konstantním proudu z důvodu jednodušší úpravy.

$$F_{im} = -I^2 \cdot N^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{a \cdot b}{4 \cdot x^2} \quad (3-15)$$

Výsledná síla vychází záporná, protože působí ve směru zmenšování vzduchové mezery tak, aby se magnetický odpor celé soustavy zmenšoval a s ním i magnetická energie soustavy. Výsledný vzorec lze ještě zjednodušit na:

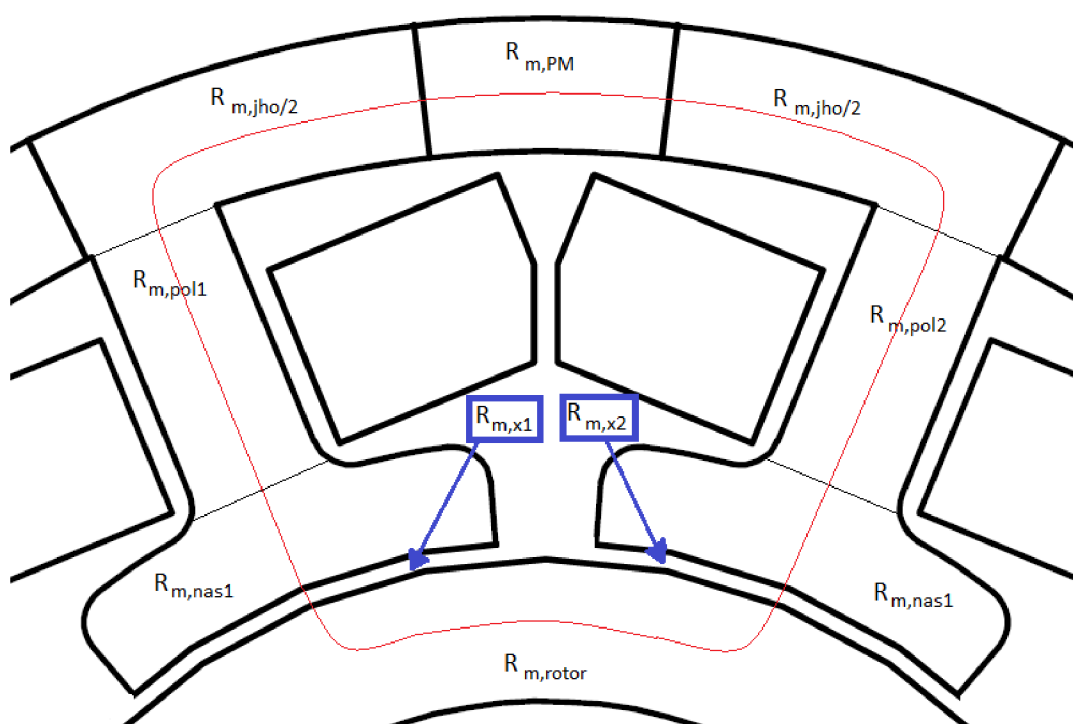
$$B = N \cdot I \cdot \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{1}{x} \Rightarrow N \cdot I = \frac{2 \cdot B \cdot x}{\mu_0} \quad (3-16)$$

A následným dosazením do vzorce 3-15 dostaneme:

$$F_{im} = - \frac{B^2 \cdot a \cdot b}{\mu_0} \quad (3-17)$$

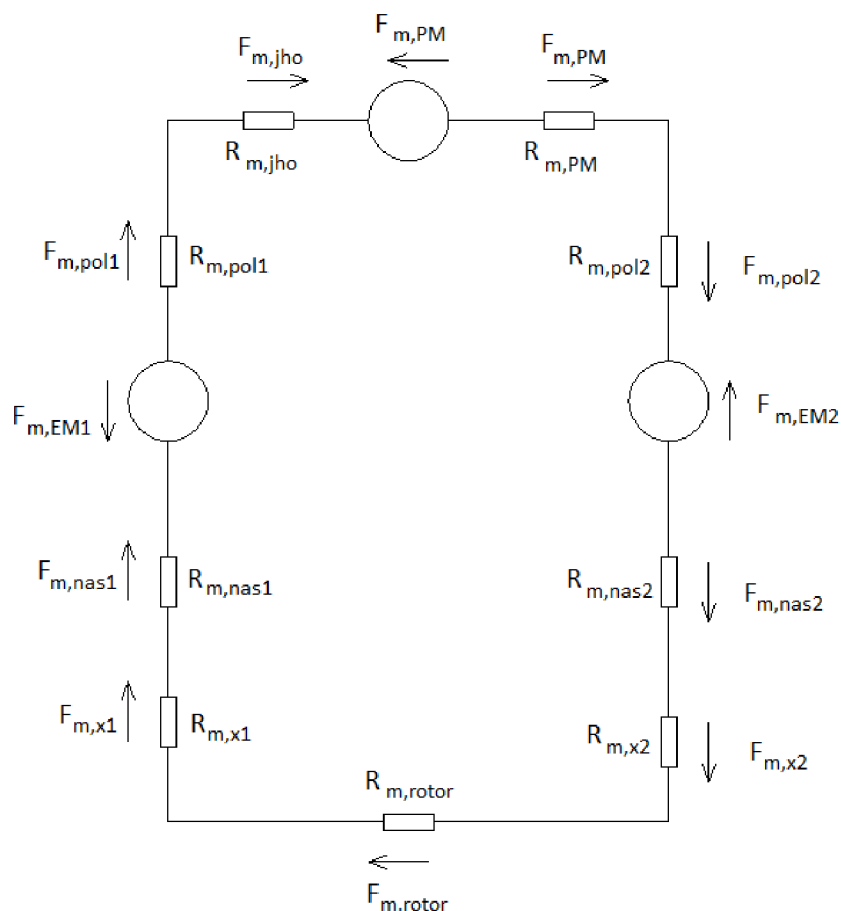
4. MATEMATICKÝ POPIS RADIÁLNÍHO HYBRIDNÍHO MAGNETICKÉHO LOŽISKA

V předchozím případě jsme uvažovali pouze CI jádro s cívkou bez použití magnetu. Nyní uvedeme matematický podklad pro naše konkrétní ložisko, které má cívkou na každém pólu a jeden magnet mezi póly (Obrázek 4-1). Jelikož jsou všechny pólové dvojice identické, budeme matematický popis uvažovat pouze pro jednu pólovou dvojici v ose y , kde v tomto směru působí i gravitační síla v opačném směru.



Obr. 4-1 Horní pólová dvojice

Zde bude matematický popis rozšířený o magnetické odpory celého obvodu, kde velký podíl na celkovém magnetickém odporu reprezentuje magnet. Tento Obvod budeme popisovat pomocí magnetomotorického napětí a magnetického odporu. Magnetomotorické napětí reprezentují dvě cívky $F_{m,EM1}$, $F_{m,EM2}$ a permanentní magnet $F_{m,PM}$. Magnetický odpor zde zastupují odpory vzduchové mezery $R_{m,x1}$, $R_{m,x2}$; odpory obou pólů $R_{m,pol1}$, $R_{m,pol2}$; odpor permanentního magnetu $R_{m,PM}$; odpor rotoru $R_{m,rotor}$; Odpor jha statoru $R_{m,jho}$; odpor pólových nástavců $R_{m,nas1}$, $R_{m,nas2}$.



Obr. 4-2 Magnetický obvod jedné pólové dvojice

Pro výpočet přitažlivé síly na rotor je zapotřebí z tohoto schématu vypočítat magnetomotorické napětí ve vzduchové mezeře. To se vypočte jako poměr magnetického odporu ve vzduchové mezeře k magnetickému odporu celého obvodu.

Magnetomotorické napětí ve vzduchové mezeře:

$$F_{m,x} = (F_{m,EM1} + F_{m,EM2} + F_{m,PM}) \frac{R_{m,x1} + R_{m,x2}}{R_m} \quad (4-1)$$

Celkový magnetický odpor se určí jako:

$$R_m = R_{m,x1} + R_{m,x2} + R_{m,pol1} + R_{m,pol2} + R_{m,PM} + R_{m,rotor} + R_{m,jho} + R_{m,nas1} + R_{m,nas2} \quad (4-1)$$

Výsledný vzorec 3-15, zjednodušíme pro výpočet síly v ose y od horní Pólové dvojice. Výslednou sílu od magnetů a cívek lze vypočítat jako:

$$F_y = -F_{m,x}^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{a \cdot b}{4 \cdot x^2} \cdot \cos \varphi \quad (4-2)$$

, nebo pomocí magnetické indukce jako:

$$F_y = -\frac{B_{m,x}^2 \cdot a \cdot b}{\mu_0} \cdot \cos \varphi \quad (4-3)$$

Jak je patrné ze vztahu na výpočet síly, tak přitažlivá síla roste s kvadrátem zvyšujícího se proudu a klesá s kvadrátem zvětšující se vzduchové mezery. Tím vznikají protichůdné reakce, kdy v horní pólové dvojici vlivem zvýšení proudu vzroste síla a následkem zvětšené síly se přitáhne hřídel a zmenší se vzduchová mezera. To zapříčiní další zvětšení přitažlivé síly, ale zmenšení přitažlivé síly na opačné straně vlivem zvětšené mezery. Protože na obou stranách máme permanentní magnety, tak i přitažlivá síla permanentních magnetů je závislá na velikosti vzduchové mezery a v případě, že dojde k přitáhnutí hřídele k horní pólové dvojici, tak dojde ke zvýšení přitažlivé síly horního permanentního magnetu, a naopak ke snížení přitažlivé síly dolního permanentního magnetu. S tímto je potřeba počítat v případě, kdy bychom chtěli používat variantu s elektromagnety napájenými jak kladným, tak i záporným proudem.

Jak už bylo uvedeno, tak v případě magnetických ložisek pracujeme s velmi malými změnami vzduchové mezery. Pokud mají být vztahy použitelné při výpočtu reálného ložiska, tak je zapotřebí vliv těchto malých změn zahrnout do výpočtu pomocí Taylorova rozvoje (rovnice 3-7), který zde rozšíříme. Rovnice magnetické indukce se upraví na [5]:

$$L = N^2 \cdot \frac{\mu_0 \cdot a \cdot b}{2} \cdot \frac{1}{l_G} \left(1 + \frac{y}{l_G} + \frac{y^2}{l_G^2} \right) = L_0 \cdot \left(1 + \frac{y}{l_G} + \frac{y^2}{l_G^2} \right) \quad (4-4)$$

Magnetická energie se zjednoduší na:

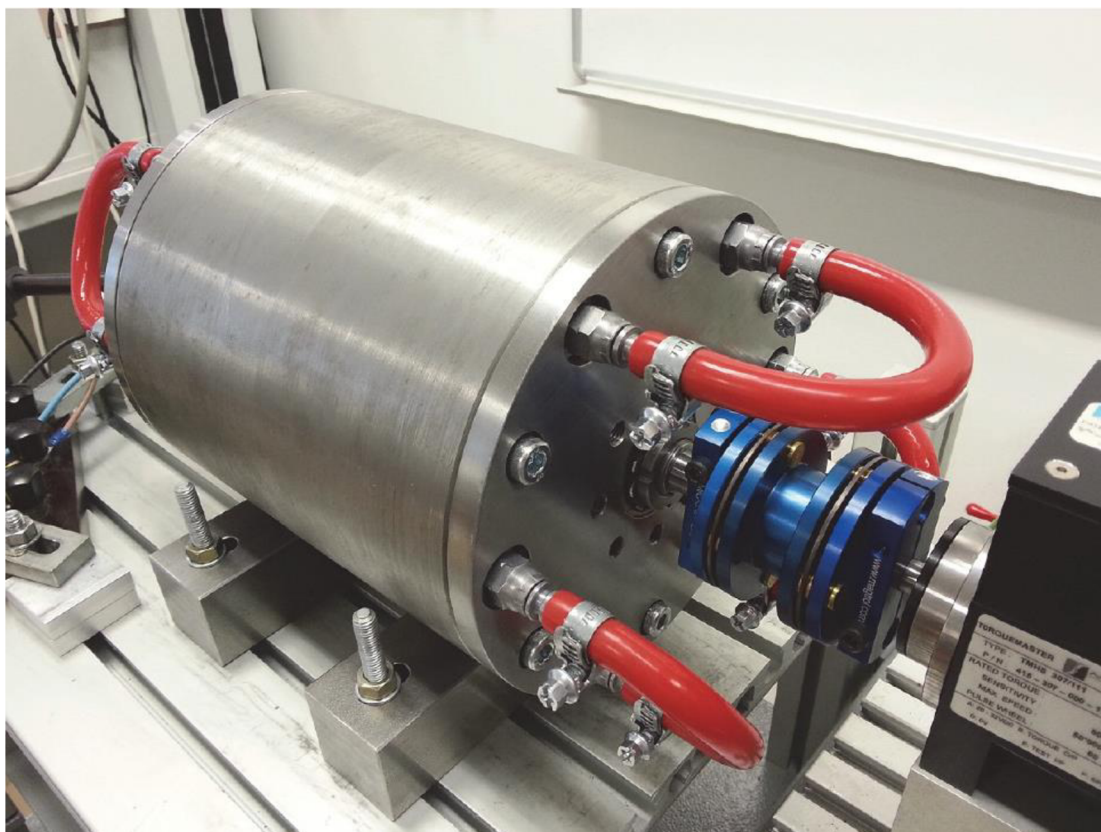
$$W_m = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot L_0 \cdot \left(1 + \frac{y}{l_G} + \frac{y^2}{l_G^2} \right) \quad (4-5)$$

Výsledná síla nyní bude:

$$F_y = -F_{m,x}^2 \cdot \frac{\mu_0 \cdot a \cdot b}{4 \cdot l_G} \cdot \left(\frac{1}{l_G} + \frac{2y}{l_G^2} \right) \cdot \cos \varphi \quad (4-6)$$

5. PRAKTICKÝ NÁVRCH MAGNETICKÉHO LOŽISKA

V přechozích kapitolách jsme uvedli teoretický a matematický podklad pro návrh hybridního magnetického ložiska. Tyto podklady nyní poslouží pro praktický návrh hybridního magnetického ložiska pro vysoko otáčkový motor umístěný v ústavu UVEE FEKT VUT v Brně.



Obr. 5-1 Vysokootáčkový elektrický stroj pro návrh hybridního magnetického ložiska [19].

Jedná se o vysokootáčkový stroj, u kterého není vhodné při takto vysokých otáčkách používat klasická ložiska z důvodu tření, které se zde zintenzivní a zapříčiní tak vyšší nárůst tepla a vyšší odpor snižující účinnost motoru. Tento stroj už v sobě má zabudované chlazení, které je možné mimo jiné využít i ke chlazení našeho ložiska [12].

Při návrhu ložiska pro vysokootáčkové motory se setkáme s řadou problému, které nám ztěžují návrh. Jelikož tento stroj už v sobě má zabudované chlazení, které je možné mimo jiné využít i ke chlazení našeho ložiska, tak toto chlazení, jak už napovídá obrázek **5-1** bude zasahovat do šířky našeho ložiska. Nicméně i šířka prstence umístěného na rotoru, se kterým se bude otáčet, je omezena odstředivými silami, a proto je nutné zvolit vhodný materiál (co do pevnosti) a vhodný poloměr prstence.

Při výběru magnetu je potřeba brát zřetel na skutečnost, že se zmenšující se vzduchovou mezerou roste přitažlivá síla magnetu. To znamená, že je potřeba navrhnout takový magnet, jehož sílu (v případě vychýlení) bude možné snadno vykompenzovat pomocí dvou cívek.

Samotný rotor je už od návrhu tohoto stroje pevně určen, a to zapříčiní další omezení při návrhu, kdy jsme omezeni prostorem pro umístění plechů pro magnetický obvod a omezení prostorem pro umístění vinutí pro cívky. Díky omezeným možnostem v podobě šířky ložiska z vnější a vnitřní strany, musíme šířku magnetického obvodu, šířku magnetu, a průměr cívek navrhovat současně.

Tabulka 5-1 Parametry vysokootáčkového elektrického stroje

Výkon	12 kW
Otáčky	45000 ot/min
Napětí	230 V
Frekvence	750 Hz
Počet pólů (2p)	2

5.1 Koncept řešení

Celý návrh hybridního ložiska vychází z numerického a analytického výpočtu. analytický výpočet vyžaduje vysokou přesnost při zadávání rozměrů a parametrů. S tím souvisí i časová náročnost analytického výpočtu oproti numerickému. Zatímco numerický výpočet byl proveden přímo v maxwellu, tak pro analytický výpočet bylo potřeba vytvořit program, který dle rozměrů z maxwellu vypočte potřebný proud na cívky pro dosažení požadovaných sil na hřídel při vychýlení. Analytický výpočet probíhal v prostředí matlab a rozměry byly převzaty z prostředí ansys maxwell.

Použitím těchto dvou způsobů výpočtu je možnost následně provést ověření správnosti výpočtů. Ačkoliv se obě hodnoty budou od sebe lišit, tak výsledný rozdíl se bude pohybovat v rozmezí 10% v závislosti na přesnosti. Tyto odchylky není snadné eliminovat, protože při analytickém výpočtu je zaváděno spoustu zjednodušujících předpokladů. Při výpočtu neuvažujeme rozptyl magnetického pole do okolí, dále neuvažujeme nerovnoměrné rozložení magnetické indukce v průřezu magnetického obvodu. Další záležitost, která způsobuje velkou odchylku numerického výpočtu od analytického je mesh. Čím lépe rozložíme jednotlivé elementy pro výpočet na zkoumané ložisko, tím dostaneme přesnější výsledky. Nicméně v rámci náročnosti výpočtů nebylo možné ve 3D analýze vytvořit ručně jednotlivé elementy, ale bylo nutné nechat ansys maxwell provést mesh samostatně, což se projevilo v přesnosti. Analytický výpočet byl proveden jak pro 2D, tak pro 3D, kdy pro 2D bylo možné ručně vytvořit mesh a dosáhnout tak přesnějších výpočtů.

5.2 Volba materiálu prstence na hřídeli

Původně bylo uvažováno o variantě nalisování magnetického prstence na obvod hřídele. Z důvodu omezené geometrie však bude nutné magnetický prsteneček zapustit do hřídele, aby bylo možné dosáhnout požadovaných parametrů. Pro magnetický obvod statorové části ložiska je zapotřebí zvolit materiál s co nejmenším magnetickým odporem. U magnetických ložisek nastává problém u prstence, který se točí zároveň s rotorem. Pro tento prsteneček je zapotřebí vybrat takový materiál, který vydrží odstředivé síly, které u vysokootáčkových motorů dosahují vysokých hodnot. Z pohledu namáhání odstředivými silami rotujícího systému vznikají nejvyšší síly na povrchu materiálu. Pro tento náš stroj byly zvoleny plechy s označením AISI 1008. Jedná se o uhlíkovou ocel. V rámci omezení geometrie vlivem chladicího systému a výběru materiálu, který dominuje vysokou pevností se dá odhadnout, že tyto odstředivé síly prsteneček vydrží. Nicméně je zapotřebí toto ověřit výpočtem nebo počítačovou analýzou. Výsledky numerického ověření tohoto namáhání jsou uvedeny v tabulce 5-2. Pro tento materiál magnetického obvodu prstence nalisovaného na rotoru máme ještě dost velkou rezervu v podobě povoleného namáhání.

Maximální obvodová rychlost pro prstencovou geometrii [12]:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{4 \cdot \sigma_{02}}{\left((1 - \nu_2) \cdot \frac{r_{i2}^2}{r_{i1}^2} + (\nu_2 + 3) \right) \cdot \rho_2}} \quad (5-1)$$

$$r_{\max} = \frac{v_{\max}}{\omega_{\max}} \quad (5-2)$$

Tabulka 5-2 Analytické hodnoty mechanické pevnosti

Pevnost v tahu	350 MPa
Poissonův poměr	30
Hustota	7 871 kg/m ³
Maximální obvodová rychlost	223,9 m/s
Maximální poloměr	47,5 mm
Obvodová rychlost	116,4 m/s

5.3 Volba magnetu

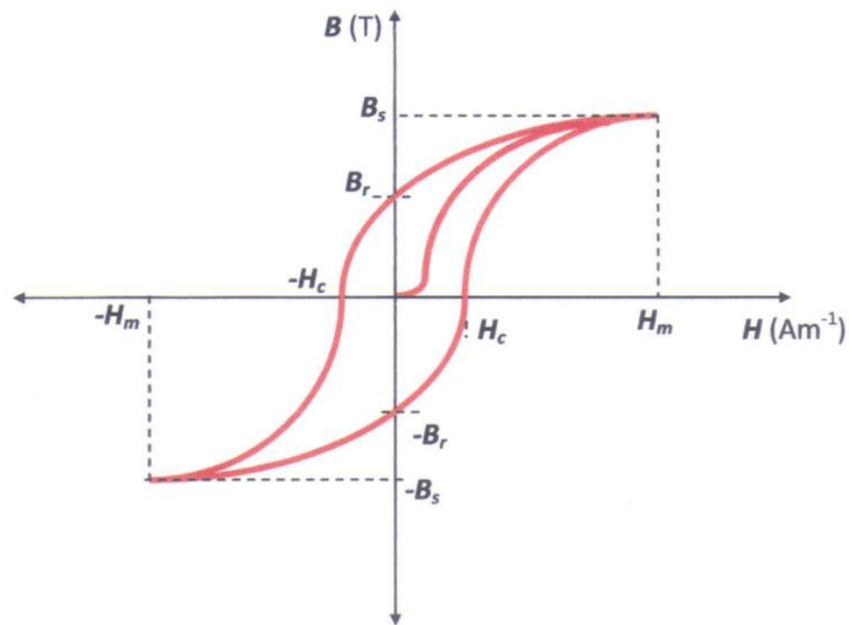
Jak už bylo zmíněno, v případě magnetů přitažlivá síla na rotor roste v závislosti na zmenšující se vzduchové mezeře. S tím je potřeba počítat při výběru permanentního magnetu. Pokud bychom zvolil příliš silný magnet, jako například magnety NdFe, které se vyznačují svojí velkou silou, tak by bylo nutné i cívky navrhnut tak, aby v případě vychýlení dokázaly překonat sílu magnetu a vrátily rotor zpět do původní polohy. V tomto případě bychom ovšem museli zajistit velmi velký počet závitů a velkou hodnotu proudu. Jinak řečeno je zapotřebí zvětšit magnetomotorické napětí generované elektromagnety. Toto řešení je v praxi nevhodné z důvodu vysokých proudů a v daném případě není možné, protože jsme limitováni geometrickými rozměry stroje. Výsledný počet vodičů vinutí a jejich šířka je limitována geometrickými rozměry stroje, a proto není možné počítat s tak vysokými proudy.

Jednou z možností, jak zmenšit sílu magnetu je vytvoření toku v opačném směru, než jaký má magnet pomocí protiproudu. To je ale v praxi velmi neefektivní způsob řešení a vyžaduje složité a drahé řízení. Ovšem v tomto případě není možné dosáhnout požadovaných sil jiným způsobem.

Pro takovéto ložisko s permanentními magnety je potřeba vybrat magnet s ideálně co nejvyšší relativní permeabilitou. Relativní permeabilitu je možno měnit za pomoci šířky a délky magnetu, ale při změně délky a šířky se změní i magnetické napětí vytvářené magnetem. Šířka je omezena rozměry stroje, takže jedinou možností je změna délky, kterou můžeme měnit v závislosti na rozteči mezi póly magnetu.

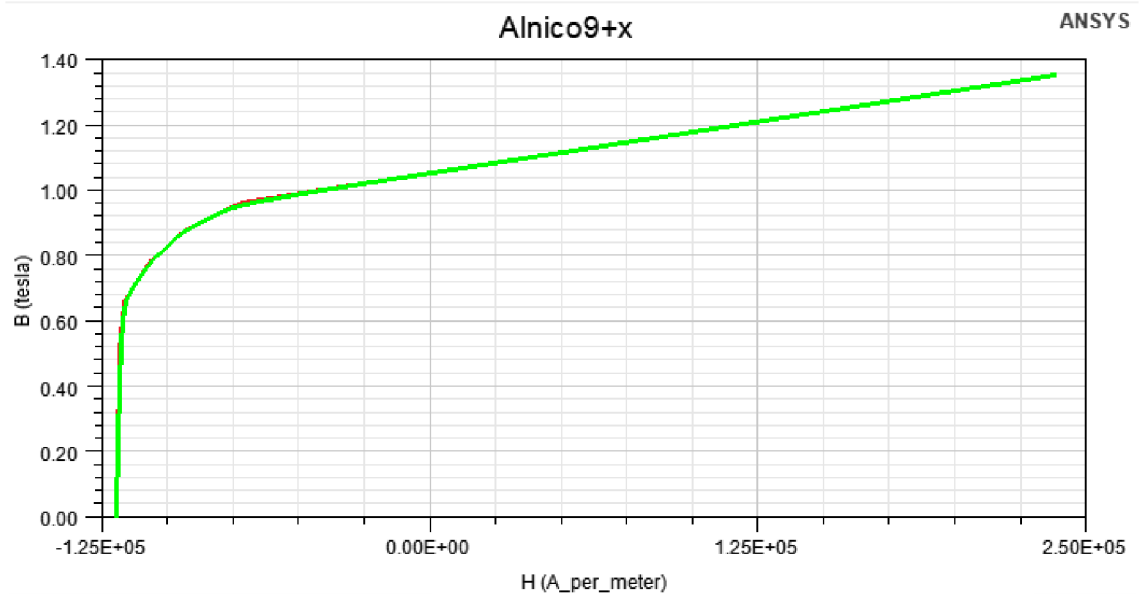
$$\mu_r = \frac{B_r}{H_c \cdot \mu_0} \quad (5-3)$$

Jak názorně ukazuje vztah 5-3, tak relativní permeabilita je tím vyšší, čím je vyšší remanentní indukce a čím je menší koercitivní intenzita. Z toho jasně plynou požadavky na náš magnet. Požadujeme, aby remanentní indukce dosahovala co nejvyšších hodnot, ale zároveň nechceme, aby koercitivní intenzita dosahovala co nejvyšších hodnot, ale ani nejnižších hodnot. V rámci volby magnetu je vhodné vybrat takový magnet, který svojí koercitivní intenzitou nepřevyší intenzitu magnetického pole generovaného cívkami. Jak už bylo řečeno, je toho možné docílit za pomoci vhodně navržené délky magnetu nebo volbou vhodného materiálu magnetu. V tomto případě volíme magnety AlNiCo. Tyto magnety se vyznačují velkou remanentní indukcí a nízkou hodnotou koercitivní síly. Oproti jiným magnetům mají užší hysterezní smyčku a díky tomu je lze snáze přemagnetovat a rychleji ztrácí své magnetické vlastnosti. Vzhledem k tomu, že v obvodu se ještě nachází cívky, které zde zároveň fungují i jako přídatné magnetizační vinutí pro magnety, tak magnety nikdy své magnetické vlastnosti neztratí.



Obr. 5-2 Hysterézní smyčka [9]

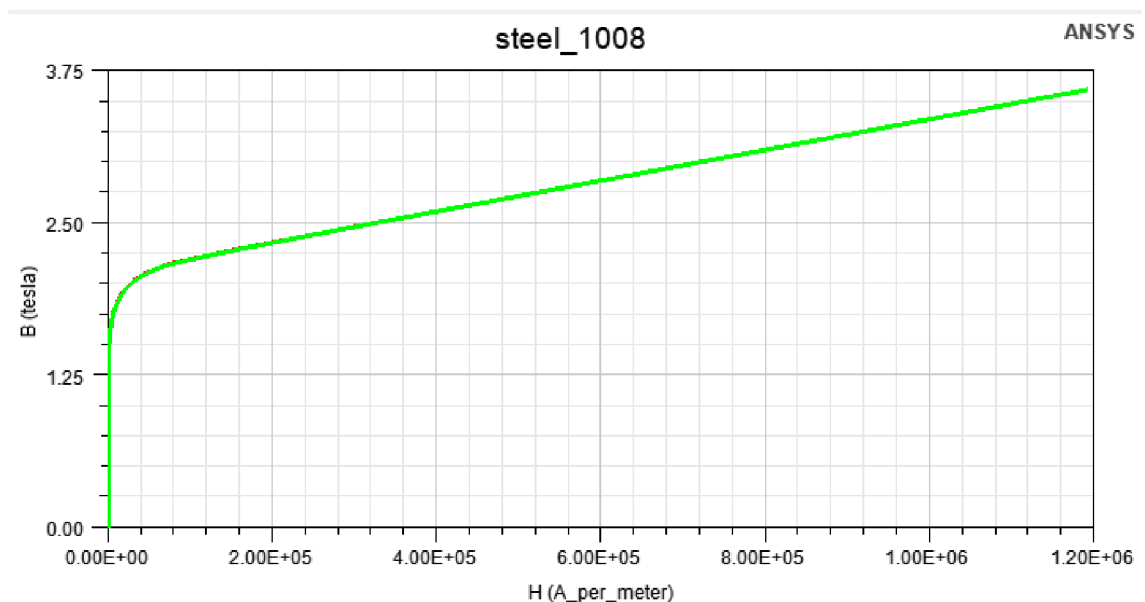
Z volby materiálu magnetu plynou i další výhody. Jednou z výhod je možnost přemagnetování magnetu pomocí protiproudu nebo jen jeho zeslabení pomocí protiproudu. Další výhodou může být částečné zeslabení magnetu v místech, kde krom přitažlivé síly magnetu působí ještě síly gravitační. To znamená, že v případě zeslabení spodního magnetu vlivem absence přírůstku magnetizačního toku od vinutí by došlo k zeslabení tohoto magnetu, zatím co magnet na opačné straně by působil na rotor stále stejnou silou. Na obrázku 6-4 je zobrazena BH charakteristika magnetu použitého pro naše hybridní ložisko.



Obr. 5-3 BH charakteristika magnetu Alnico9

5.4 Návrh geometrie magnetického obvodu

V přechozí kapitole byla zmíněna BH charakteristika, která nám mimo jiné udává pro magnet a plechy magnetického obvodu relativní permeabilitu. U magnetu se nachází koleno BH křivky mezi 0,6 až 0,9 T (obrázek 5-3), zatímco u plechů se koleno nachází v rozmezí 1,3 až 1,8 T (obrázek 5-4). U plechů není vhodné překračovat hodnotu 1,3 T, protože v této hodnotě magnetické indukce dochází k velkému snižování relativní permeability, a to zapříčiní velký nárůst magnetického odporu. Jelikož tyto plechy představují hlavní část dráhy, přes kterou se uzavírá tok, tak v případě velkého magnetického odporu by na nich vznikl velký úbytek magnetomotorického napětí. Koleno BH křivky můžeme překročit v případě magnetu, pokud vhodně vybereme jeho délku. V tomto případě je jeho délka mnohonásobně nižší než délka magnetického obvodu plechů.



Obr. 5-4 BH charakteristika magnetu Alnico9

Pro toto ložisko byly určeny požadavky na přitažlivou sílu 120 N v případě maximálního vychýlení. To znamená, že do cívek musí být přidán takový proud, aby přitažlivá síla cívek s magnetem překonala přitažlivou sílu druhého magnetu. Zde narážíme na problém v podobě volby šířky magnetického obvodu a šířky vinutí.

Podmínkou, která vyplývá z BH charakteristiky je, že magnetická indukce v plechách nesmí přesáhnout hodnotu 1,3 T.

Při prvním pohledu se může zdát, že překročením BH kolena ve stejnosměrné soustavě zajistíme vyšší kapacitu ložiska, avšak pro využití této kapacity je zapotřebí dodat větší proud a při podmínce zachování stejné proudové hustoty se rázem zvětší i ložisko, které naopak potřebujeme co nejvíce zmenšit.

V přechozích kapitolách byl uvedeny vztahy pro výpočet síly ve vzduchové mezeře z magnetomotorického napětí. Magnetomotorické napětí se spočítá jako:

$$F_m = \phi \cdot R_m \quad (5-4)$$

Tok magnetické indukce se spočítá jako:

$$\phi = B \cdot S \quad (5-5)$$

Následující vztahy nám říkají, že síla, kterou bude rotor přitahován je dána magnetomotorickým napětím ve vzduchové mezeře. Magnetomotorické napětí ve vzduchové mezeře je závislé na celkovém toku, který je pro celý magnetický obvod stejný a jeho hodnota je dána celkovým magnetickým odporem a celkovým magnetomotorickým napětím. Část tohoto napětí dodá magnet, ale zbytek je zapotřebí dodat cívkami.

Abychom dosáhli této síly a zbytečně nezvyšovali úbytky magnetomotorického napětí na magnetických odporech plechů, je zapotřebí optimálně nastavit šířku magnetického obvodu. Čím je šířka větší, tím menší magnetický odporu dostaneme. Nicméně při návrhu tohoto ložiska jsme dosti omezeni prostorem a také musíme zanechat nějaké místo pro vinutí. Pro dosažení potřebné šířky magnetického obvodu můžeme ložisko rozšířit o určitou délku. Jelikož hybridní magnetická ložiska mají fungovat jako rozšíření aktivních magnetických ložisek, která dosahují velkých rozměrů, je nanejvýš vhodné, aby toto ložisko dosahovala co nejmenší délky.

5.5 Návrh geometrie vinutí

Šířku vinutí musíme volit s ohledem na magnetický obvod ložiska, který pro svou správnou funkci potřebuje dostatečnou šířku. Při návrhu vinutí vycházíme z tabulky normy ČSN třídy 3473. Jedná se o starou normu, která nyní už neplatí, ale vzhledem ke skutečnosti, že pro návrh vinutí ložisek neexistuje žádná normou předepsaná tabulka, můžeme z ní vycházet. Tato tabulka není určena přímo pro vinutí ložiska, ale lze ji využít jako podklad pro návrh a odhadnout z ní šířku vinutí a případnou šířku a typ izolace.

Cívky hybridního ložiska zde fungují jako pomocné a dá se tedy předpokládat, že jimi nepoteče maximální proud neustále, ale jen v krátkých intervalech. S tím však nemůžeme při návrhu počítat a proto je nutné provést ověření tepelnou analýzou abychom zjistili, zda nebude docházet k přehřívání vinutí. Pokud by docházelo k přehřívání, bude nutné provést opatření například v podobně využití chladicího systému motoru.

Při vytváření geometrie vinutí neuvažujeme šířku izolace, ale jen šířku vodiče a nezohledňujeme činitel plnění mědi. Pro tyto parametry jsme ponechali v drážce rezervu. Činitel plnění mědi se vypočte jako:

$$k_{pCu_2} = \frac{N_{vdr} \cdot \frac{D_v^2 \cdot \pi}{4}}{S_{dr}} \quad (5-6)$$

Jedná se o poměr mezi součtem jednotlivých průřezů vodiče v drážce a průřezem drážky. Tento činitel stanovuje technolog na základě tvaru drážky a uspořádání vinutí. Tento činitel bývá v rozmezí 0,3-0,6. Vztah **5-6** udává čistý průřez vodičů děleno plochou drážky. Nicméně v tomto případě vychází činitel mědi velmi nízký. V praxi se používá i jiné vyjádření. To vychází z předpokladu, že každý vodič zabírá v drážce prostor o velikosti kvadrátu jeho průměru. Jinými slovy, namísto vyplnění prostoru pomocí kruhových průřezů prostor vyplníme obdélníkovými průřezy. Budeme-li uvažovat i průřez drážky pravidelného tvaru, jako je třeba obdélník, tak můžeme dosáhnout činitele plnění 1. Vztah se nyní zjednoduší na:

$$k_{pCu_2} = \frac{N_{vdr} \cdot D_v^2}{S_{dr}} \quad (5-7)$$

Jelikož se nacházíme v situaci, kdy prostory pro umístění vinutí a magnetického obvodu jsou dosti malé, je potřeba využít prostor pro vinutí co nejefektivněji. Činitel plnění v tomto případě vychází 0,785. To je velmi vysoká hodnota činitele plnění mědi a lze ji považovat za hraniční. Skutečností ale je, že prostor pro umístění vinutí není pravidelného tvaru a tím se činitel plnění mědi ještě o něco zmenší. Pokud zvolíme průřezy vodiče s izolací dle tabulky **5-3**, tak dostaneme případné průřezy vinutí i s izolací. Činitel vinutí zde uvažujeme jako hraniční hodnotu dle zvoleného průřezu vodiče s izolací. Typ izolace volíme s označením 2T podle tabulky **5-3**. V případě potřeby je možno ještě zmenšit šířku izolace, nebo zmenšit průřez vodiče. V případě změny průřezu vodiče bude potřeba provést novou tepelnou analýzu. Výsledné průřezy a šířky vinutí jsou uvedeny v tabulce **5-4**.

Tabulka 5-3 Průřezy vodiče vinutí a izolace [13]

Průměr jádra (mm)	Průřez jádra (mm ²)	Střední odpor při 20 °C (Ω · km ⁻¹)	Největší oboustranný izolační přírůstek (mm)						
			2B	L2H	2KT	2KS	T	2T	2I
1,06	0,882	19,880							
1,12	0,985	17,807							
1,18	1,094	16,042							
1,25	1,227	14,296	0,27		0,27	0,27	0,093	0,14	0,14
1,32	1,369	12,820							
1,40	1,539	11,397							
1,50	1,767	9,927 8							
1,60	2,011	8,725 6							
1,70	2,270	7,729 1							
1,80	2,545	6,895 0							
1,90	2,835	6,187 6	0,275	—					—
2,00	3,142	5,584 3							
2,12	3,530	4,969 9	0,325	—	0,3	0,3	0,12	0,18	—
2,24	3,941	4,451 7							
2,36	4,374	4,010 6							
2,50	4,909	3,574 1							
2,65	5,515	3,180 7	0,335						
2,80	6,158	2,849 1	0,385		0,345	0,365	0,15	0,24	
3,00	7,069	2,481 9							
3,15	7,793	1,962 0							
Tepelná třída izolace			A	A	F	H	B	B	F

- Poznámky: 1. Hliníkové vodiče se vyrábějí až od průměru 0,5 mm.
 2. Uvedeny jsou izolace nejběžněji používané:
 2B — dvojnásobné protisměrné opředění bavlnou nebo umělou přízí,
 L2H — lakovaný drát s dvojnásobným opředěním hedvábím,
 2KT — dvojnásobné opředění skleněnou přízí (podlepenou), lakované tereftalátovým lakem,
 2KS — dvojnásobné opředění skleněnou přízí, lakované silikonovým lakem,
 T — jednoduchá izolace tereftalátovým lakem,
 2T — zesílená izolace tereftalátovým lakem,
 2I — zesílená izolace polyesterimidovým lakem.
 3. Jmenovité průměry označené křížkem (+) se nedoporučují na nové výrobky.

Tabulka 5-4 Geometrické rozměry vinutí

Průřez jádra vodiče	0,985 mm ²
Průřez jádra vodiče s izolací	1,247 mm ²
Počet závitů	123
Průřez vinutí bez izolace	121,2 mm ²
Průřez vinutí s izolací	153,4
Průřez drážky pro umístění vinutí	215 mm ²
Činitel plnění mědi	0,71

6. ANALÝZA HYBRIDNÍHO MAGNETICKÉHO LOŽISKA

Ložisko je zde konstruováno jako 8-pólové hybridní magnetické ložisko. Každý pól má dvě cívky a jeden magnet pro vytvoření stálého magnetického pole. Jedná se o jakési rozšíření aktivních magnetických ložisek, kdy koncept návrhu bude vycházet z aktivních magnetických ložisek doplněných o permanentní magnety. Jak už bylo zmíněno, tak pro dosažení potřebných parametrů bylo provedeno několik podstatných zásahů, které toto ložisko znevýhodňují z pohledu praktičnosti. První zásahem bylo zapuštění magnetického prstence do hřídele místo umístění na povrch hřídele. Dalším zásahem, který dost zvyhodňuje ložisko oproti klasickým aktivním magnetickým ložiskům je nutnost dodat protiproud pro zeslabení magnetu v případě vychýlení rotoru. Takovéto řešení komplikuje a prodražuje návrh řízení a samotné zeslabování magnetu je nevhodný způsob řízení. Toto ložisko se jeví jako radiální ložisko, neboť v tomto směru je docíleno nejvyšších sil. Nicméně díky permanentním magnetům, které vytváří stálé magnetické pole, zde vznikají nepřetržité síly, které hřídel udržují i v axiálním směru.

6.1 Zadání vstupních parametrů

Každé magnetické ložisko, ať už pasivní, nebo aktivní je navrhováno na sílu, která má kompenzovat samotnou hmotnost hřídele, případně další zatížení a uchovat dostatečnou sílu pro zajištění dynamiky. Tato síla, kterou musí ložisko v radiálním směru vykonat se v praxi uvažuje jako trojnásobek gravitační síly na hřídel [15]. V tomto případě uvažujeme hmotnost ložiska 8,5 kg. Každý ložiskový systém obsahuje minimálně dvě ložiska. U magnetických ložisek se běžně objevují až 3 ložiska, kdy 2 ložiska v radiálním směru kompenzují 4 stupně volnosti a jedno axiální, které kompenzuje pátý stupeň (kapitola 2.2). V soustavě se nachází dvě ložiska v radiálním směru, kdy každé kompenzuje jednu polovinu gravitační síly. Toto je pouhý předpoklad, který vychází z určitého typu zátěže, kdy motor je uložen v horizontální poloze. V případě větší zátěže bude potřeba sílu ještě navýšit a pro případ uvažování i vertikálního uložení bude potřeba konstrukci změnit.

6.2 Vzduchová mezera

Při volbě vzduchové mezery je potřeba mít na paměti, že čím větší vzduchovou mezeru stanovíme, tak tím větší magnetomotorické napětí bude zapotřebí pro dosažení požadovaných sil. Jelikož vzduchová mezera představuje místo s největší hodnotou magnetického odporu, tak jakákoliv změna délky se značně projeví ve snížení přitažlivé síly. Změna této síly se v případě změny délky projeví exponenciálním způsobem, jelikož výsledná síla je dána podílem mocniny magnetomotorického napětí ku mocnině délky této vzduchové mezery (kapitola 4.). Pro dosažení větší hodnoty magnetomotorického

napětí bude zapotřebí buď zvětšit magnet, rozšířit magnetický obvod pro dosažení vyšší hodnoty toku, nebo změnit závitů a proud v cívkách. Tyto změny se následně značně promítnou do celé konstrukce ložiska a především do jeho rozměrů. V rámci návrhu magnetického ložiska se naopak snažíme docílit co nejmenších rozměrů ložiska.

Síla ložiska na hřídel se uvádí jako trojnásobek gravitační síly vznikající na hřídeli. Nicméně tuto sílu neuvažujeme v případě, když je rotor ve středu ložiska, ale v případě, kdy dojde k maximálnímu vychýlení. Výslednou délku, pro kterou se počítá potřebná síla uvažujeme jako 1,5násobek vzduchové mezery. Každé magnetické ložisko obsahuje ještě dosedací mechanické ložisko. To má za úkol chránit stroj v případě poruchy magnetického ložiska vlivem výpadku energie.

Doposud jsme uvažovali jen magnetomotorické napětí, které je při zvětšení vzduchové mezery zapotřebí zvětšit. Z toho plyne nárok na co nejmenší vzduchovou mezeru. Nicméně i příliš úzká vzduchová mezera není vhodná při návrhu řízení. Čím nižší vzduchová mezera, tím větší nároky na přesnost a tím se prodraží výroba řízení. Dále díky vysokým rychlostem narůstá vlivem odstředivých sil a rostoucí teplotě objem materiálu vlivem roztažnosti a tím se vzduchová mezera ještě zmenší.

6.3 Geometrie navrženého ložiska

Při návrhu geometrie se postupuje s návrhem každého pólu samostatně, protože všechny tyto póly jsou ve výsledku stejné. Pokud tedy nepotřebujeme dosáhnout vyšší síly v místech, kde očekáváme vyšší zatížení. V takovém případě navrhujeme jednotlivé póly samostatně.

Jak už bylo zmíněno, tak magnetický odpor magnetického obvodu je dán relativní permeabilitou, která se odčítá z BH charakteristiky. Jelikož tok je v celém obvodu stejný, tak magnetická indukce je dána šířkou tohoto magnetického obvodu. Z toho plyne podmínka na stejnou šířku feromagnetického materiálu v celé jeho délce, až na vzduchovou mezeru, kde je požadavek na co největší šířku a nejmenší délku vzduchové mezery. Zde je potřeba rozšířit feromagnetický materiál a v takovém případě mluvíme o pólovém nástavci. Pokud by nebyla zajištěna stejná šířka feromagnetického materiálu v celém obvodu, tak by v místech s větším průřezem byl zbytečně nevyužitý materiál, nebo v místech, kde je naopak menší průřez by zbytečně docházelo k narůstání úbytků magnetomotorického napětí vlivem zvětšování magnetického odporu. Potřebný průřez magnetického obvodu můžeme vypočítat ze vztahu 6-1, který po úpravě bude:

$$S_{Fe} = \frac{\mu_0 \cdot F_{max}^2}{B_{sat}^2 \cdot \cos \varphi} \quad (6-1)$$

Šířka magnetu musí být volena stejně, nebo minimálně větší, protože i zde je magnetický odpor závislý na BH charakteristice. Pokud by byla šířka magnetu zmenšena o polovinu a na jeho místo doplněn feromagnetický materiál, tak by se siločáry magnetické indukce uzavírali kolem tohoto magnetu na místo toho, aby se uzavírali přes rotor. Volit šířku magnetu větší, než je šířka feromagnetického materiálu také není vhodné z důvodu vyčnívání magnetu do prostoru, kde by nám z jedné strany zvětšoval celkové rozměry ložiska, nebo uvnitř ložiska zabíral prostor pro umístění vinutí. Jediný rozměr magnetu, který zde lze měnit nezávisle na šířce je délka magnetu. Magnetomotorické napětí magnetu se následně vypočte jako součin koercitivní síly magnetu a délky magnetu.

$$F_{m,PM} = H_c \cdot l_{PM} \quad (6-2)$$

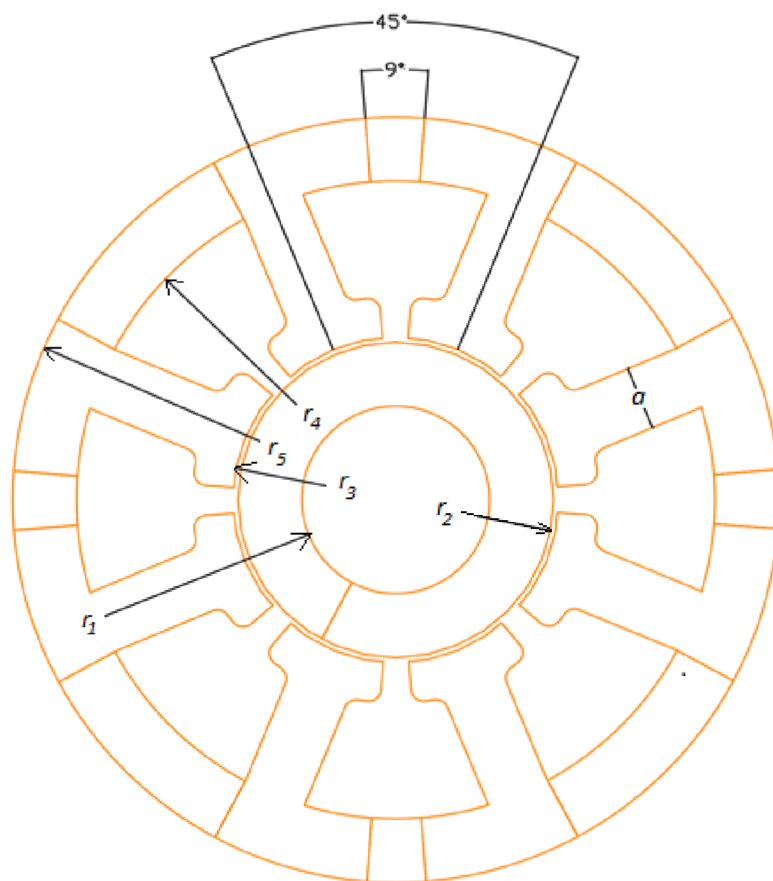
Šířka mezery mezi pólovými nástavci by měla být minimálně dvojnásobek vzduchové mezery, ale v praxi je ideálnější tuto vzdálenost ještě zvětšit, aby nedošlo k nechtěnému uzavírání siločar přes vzduchovou mezeru mezi těmito pólovými nástavci, ale zároveň docílit co největší šířky pólového nástavce.

Délka pólu mezi statorovým jho a rotorovým prstencem je volena dle požadovaného prostoru pro umístění vinutí. V přechozích kapitolách bylo řečeno, že motor má v sobě umístěné chlazení, které nás omezuje ve volbě šířky ložiska. Maximální poloměr ložiska je pro toto ložisko 60 mm. Jelikož hřídel s rotorovým prstencem, vzduchová mezera a jho statoru má již pevně stanovené rozměry, tak výsledná délka pólu s pólovým nástavcem je dána rozdílem celkového poloměru ložiska a součtu těchto nyní už pevně stanovených rozměrů

Tabulka 6-1 Geometrické rozměry magnetického obvodu

r_1	-	14,7 mm
r_2	-	24,7 mm
r_3	-	25,5 mm
r_4	-	50 mm
r_5	-	60 mm
H_c	Koercitivní síla magnetu	120000 A/m
l_{PM}	Délka permanentního magnetu	8,64 mm
$m_{hřidel}$	Hmotnost hřídele	8,5 kg
F_{max}	Maximální přitažlivá síla	120 N
a	Šířka magnetického obvodu	10 mm
b	Délka ložiska	50 mm
S_{Fe}	Průřez magnetického obvodu	5 cm ²
x	Vzduchová mezera	0,8 mm
B_{sat}	Koleno magnetické indukce	1,3 T

Toto jsou výsledky, které nyní využijeme pro numerický a analytický návrh hybridního magnetického ložiska v matlabu a Ansys maxwellu. Hodnoty přitažlivé síly a magnetické indukce sem vstupoval jen jako vstupní hodnoty pro návrh, ale jejich hodnoty se budou lišit po provedení numerického a analytického výpočtu.

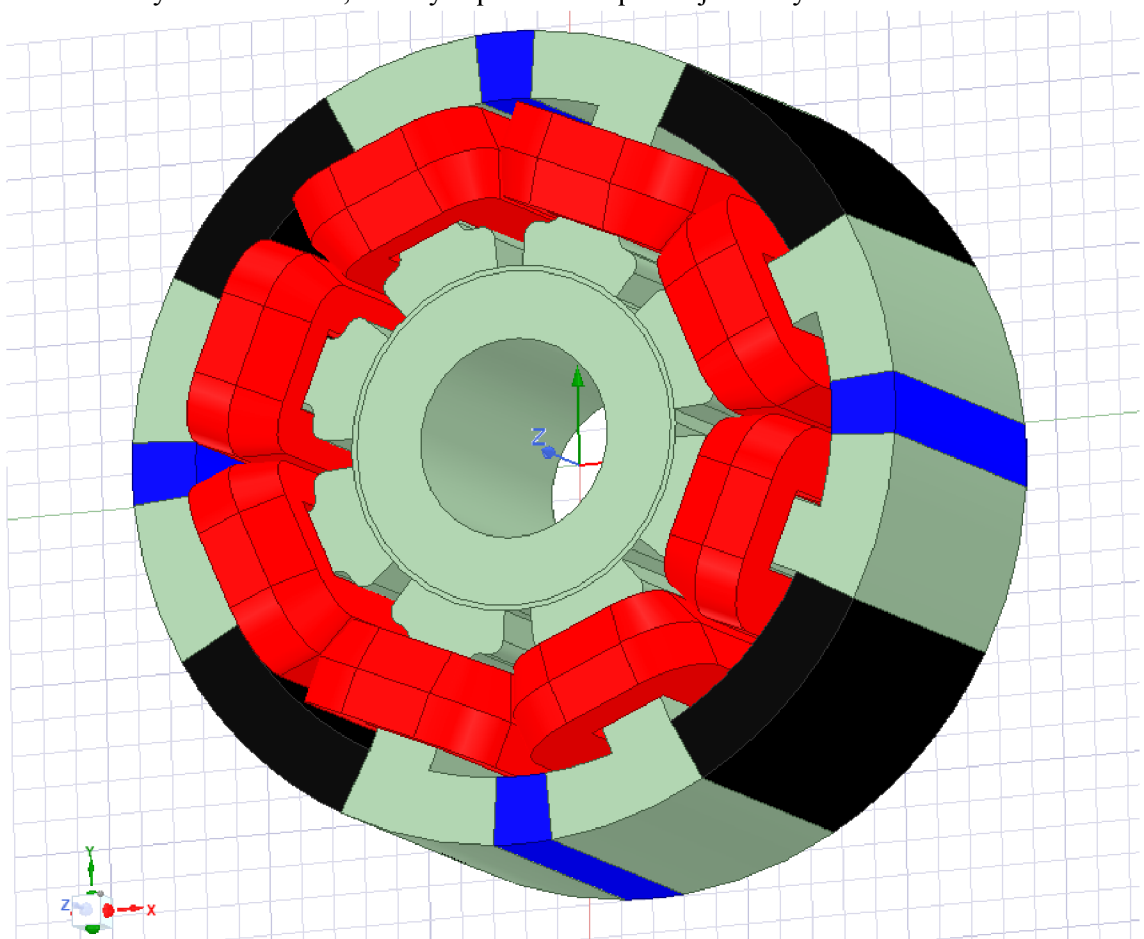


Obr. 6-1 Náčrt hybridního magnetického ložiska

6.4 Numerická a analytická analýza

Numerická analýza představuje z pohledu reálných výsledků přesnější analýzu z důvodu nezanedbání některých dějů, rozměrů a jevů. V této kapitole jsou shrnuté simulace hybridního magnetického ložiska, které se následně porovnávají s hodnotami vypočtenými analytickým výpočtem. Jsou zde uvedeny simulace v různých situacích, které jsou po návrhu nutné ověřit.

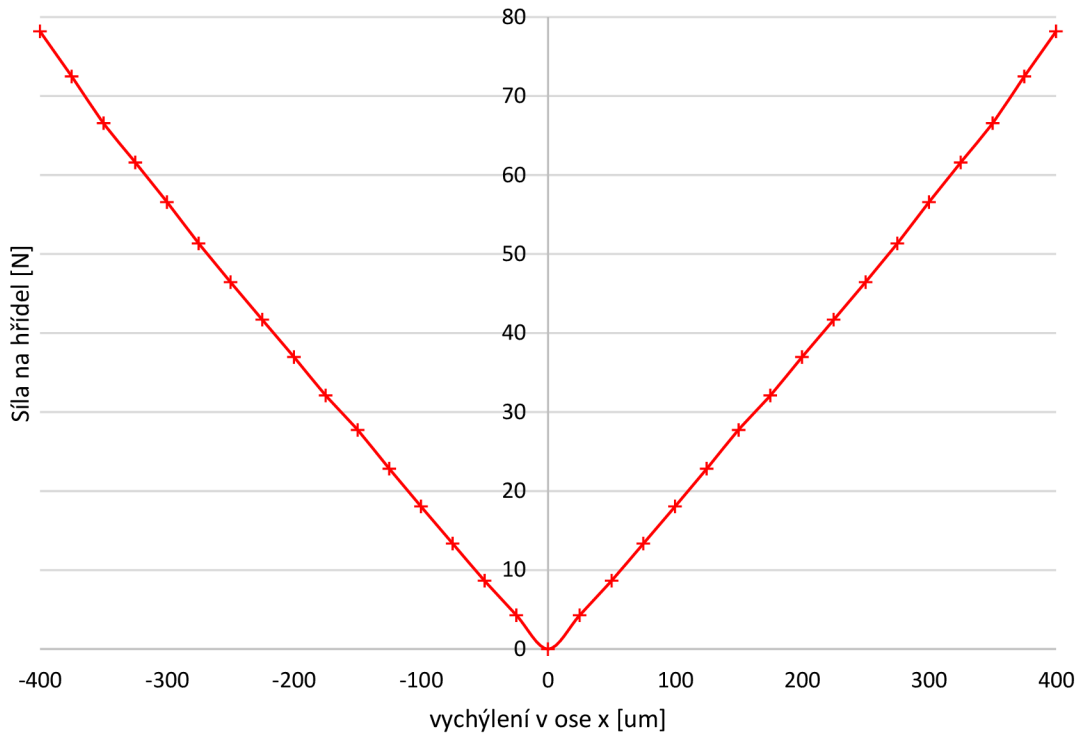
Pro numerický a analytický výpočet byla nejdříve vytvořena geometrie ložiska v přechodných kapitolách, jejíž rozměry byly parametrizovány a z následných numerických a zrychlených analytických výpočtů vytvořeny přesné rozměry. Dle vytvořeného programu byli zrychleně odvozeny některé rozměry a velikosti proudů a následně zadány do maxwellu, kde byla provedena přesnější analýza.



Obr. 6-2 Model hybridního ložiska

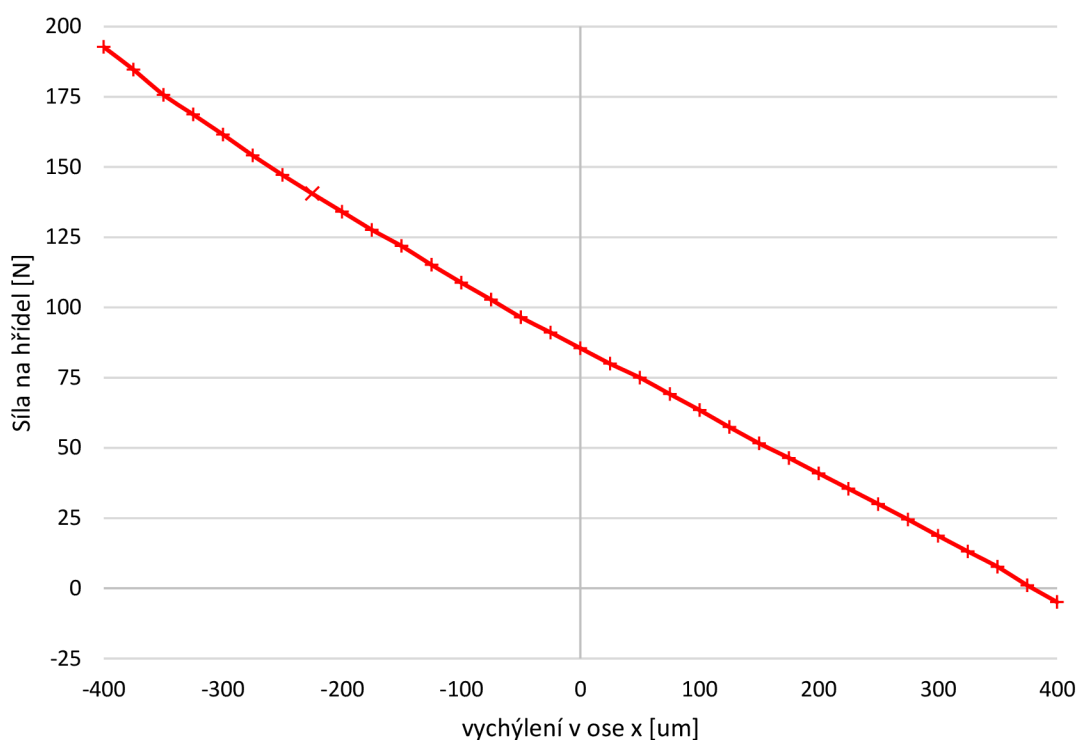
Mezi póly je umístěn hliník, který zde reprezentuje černý objekt. Ten zde představuje nemagnetický materiál, který zajišťuje, že magnetické siločáry povedou přes pólové nástavce vzduchovou mezerou do rotoru a zase zpět druhým pólem. Část těchto siločar se uzavírá i mimo tyto póly, ale ty je možné v rámci analytického výpočtu zanedbat. Magnet zde reprezentuje modrý objekt a jeho rozměry a materiál byly diskutován

v kapitole 5.3. Vzduchová mezera byla v analýze nastavena jako samostatný objekt pro vytvoření mesh, protože z pohledu výpočtu je nejdůležitější dosáhnout co nejpřesnějších výsledků ve vzduchové mezeře. Vinutí zde představují červené objekty, které obklopují póly a jejich průřez přesně odpovídá průřezu jednotlivých vodičů vynásobených počtem závitů. V geometrii vinutí není zahrnutý činitel plnění mědi a šířka izolace.



Obr. 6-3 Síla působící na rotor v ose x

Na obrázku **6-3** je zobrazena síla na rotor při různých hodnotách vychýlení. V tomto případě uvažujeme jen přírůstek magnetomotorického napětí od magnetů, nikoliv přírůstek magnetomotorického napětí od cívek. Jak bylo zmíněno v přechodících kapitolách, tak se změnou vzduchové mezery se změní přitažlivá síla magnetu. Zvětší-li se vzduchová mezera, tak síla se sníží a zmenší-li se vzduchová mezera, tak síla magnetu se zvýší. Jelikož vztah je dán podílem mocniny magnetomotorického napětí a mocniny délky vzduchové mezery, tak v případě zmenšování vzduchové mezery při zachování stejného magnetomotorického napětí od magnetu bude síla stoupat spíše exponenciálně. Na tomto grafu síla roste lineárně. To je dáno tím, že sice se síla jednoho magnetu exponenciálně zvýší, ale zároveň nám zde stále působí druhý magnet, kde síla exponenciálně klesá. Při jejich následném rozdílu a vykreslení do grafu dostaneme lineární průběh na místo exponenciálního jako na obrázku **6-3**.

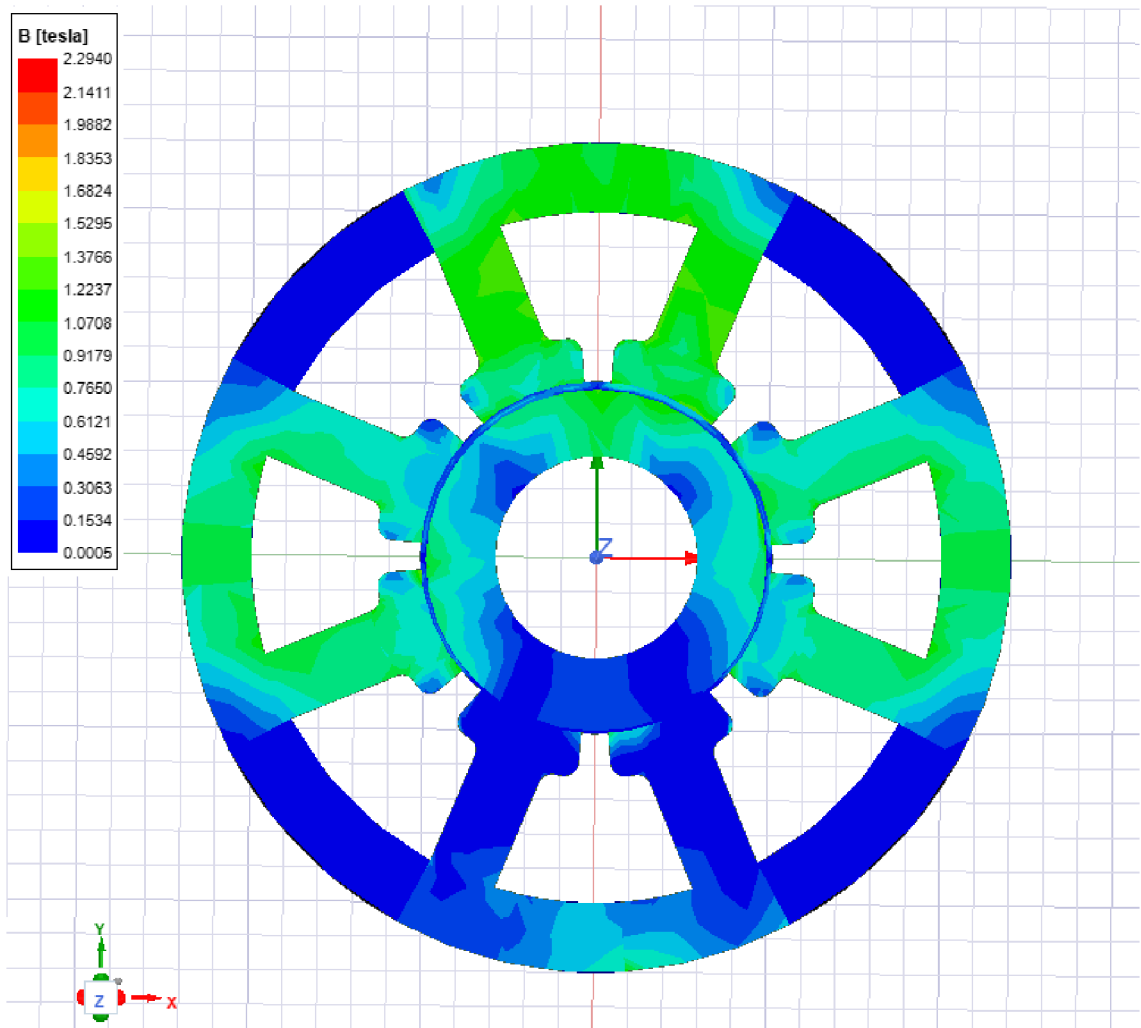


Obr. 6-4 Síla působící na rotor v ose x s přírůstkem magnetomotorického napětí od cívek na levé straně

Na obrázku **6-3** je vidět, jak moc se nám zvýší síla magnetu v případě vychýlení. Tuto sílu musíme nyní vykompenzovat pomocí cívek. V původní kapitole bylo zmíněno, že pro přitažení rotoru zpět do středu bude zapotřebí zeslabit magnetu pomocí protiproudu na straně, kde dojde ke zmenšení vzduchové mezery z důvodu vychýlení. Jelikož se nacházíme v situaci, kdy máme k dispozici cívky pro regulaci magnetomotorického napětí, tak není nutné nepřetržitě hned od počátku dodávat záporný proud. Jak ukazuje obraz **6-4**, tak v případě vychýlení od 0 do 100 um můžeme rotor ještě přitáhnout jen za pomoci přidání kladného proudu na straně, kde došlo ke zvětšení vzduchové mezery. A to silou od 85-63 N. Nacházíme se v řízení, kde reakce na změnu vzduchové mezery je téměř okamžitá a v takovém případě lze nastavit podmínku zadávání záporného proudu až od určité velikosti vychýlení hřídele.

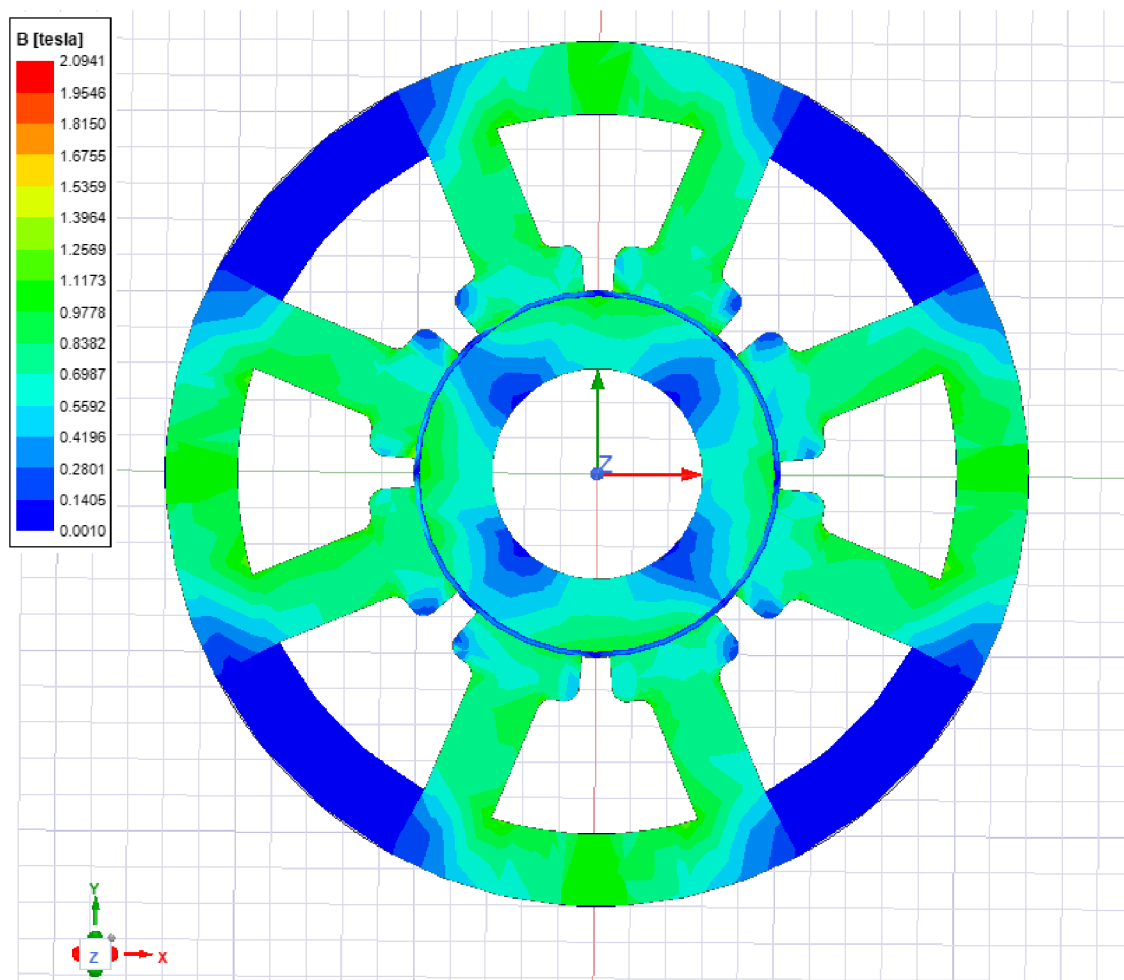
Tabulka 6-2 Výsledky proudů pro dosažení požadované síly 120 N

Průřez jádra	Analytický výpočet	Numerický výpočet
Proudu pro zeslabení magnetu	-4,1	-3,8
Proud pro zesílení magnetu	3,9	4,2



Obr. 6-5 Rozložení magnetické indukce v ložisku při vychýlení 0.4mm v ose y

Při této analýze byla hřídel vychýlena v ose y do své maximální hodnoty. Účelem této analýzy bylo ověřit, zdali dosáhneme potřebné síly v případě maximálního vychýlení. Spodní magnet byl potlačen vytvořením toku v opačném směru proudem o hodnotě -3,8 A. Horní magnet byl posílen tokem ve směru magnetu proudem 4,2.



Obr. 6-6 Rozložení magnetické indukce v ložisku při nulovém vychýlení

Dále bylo potřeba ověřit, zdali se při nulovém vychýlení nepůsobí na rotor síla ani v jednom směru. Na začátku kapitoly byla zmíněna geometrie vzduchové mezery pro zjemnění meshu. V rámci 3D analýzy nebyl mesh proveden ručně, ale z důvodu náročnosti byl mesh vygenerován automaticky a to zapříčinilo odchytku, kdy nám síla působí v jednom směru. Pro ověření správnosti byla provedena ještě 2D analýza, kde byl proveden mesh ručně a zde už výsledné síly vycházeli téměř nulové. Tyto síly jsou uvedeny v tabulce **6-3**.

V přechozích kapitolách byla zmíněna odchytky analytického výpočtu a numerického výpočtu. Zde si ji rozebereme přímo na obrázcích numerického výpočtu v Ansysu. Při výpočtu uvažujeme celý magnetický obvod feromagnetického materiálu, zatím co v počítačové analýze v Ansysu se magnetická indukce uzavírá jen přes část tohoto feromagnetického materiálu. Dále i rozložení magnetické indukce v pólových nástavcích není rovnoměrné a některá místa tohoto nástavce nejsou plně využita. To znamená, že není využit celý průřez feromagnetického materiálu a s tím souvisí i změna magnetického

odporu a tím i změna magnetomotorického napětí ve vzduchové mezeře. Tuto chybu velmi dobře demonstruje rozdíl analyticky vypočtených proudů a proudů zadaných do numerického výpočtu v Ansysu.

Nyní si rozebereme obrázek **6-5**, kde na pravé straně je pro dosažení potřebné síly přidán protiproud pro zeslabení magnetu. Pro tento případ byl vypočtený proud -4,1 A, ale pro potřeby absolutního zeslabení magnetu v simulaci stačila hodnota proudu menší a to hodnota -3,8 A. Jelikož numerický výpočet v ansysu neuvažuje celou šířku feromagnetického materiálu, tak i odpory jsou na něm větší a tím vzroste úbytek magnetomotorického napětí na feromagnetickém materiálu, a tedy pro potlačení magnetu nyní stačí menší hodnota magnetomotorického napětí vytvořená cívkami.

Na levé straně, kde byl dodán proud o kladné hodnotě nám analytickým výpočtem vyšla potřebná hodnota proudu pro přitažení vychýleného rotoru silou 120 N hodnota 3,9 A. Jelikož je pravá strana pólové dvojice stejná, jako levá strana, tak i magnetické odpory v rámci rozložení magnetické indukce se dají očekávat stejné. V tomto případě taky vychází magnetický odpor větší a úbytky na něm jsou taky větší, jak na pravé straně, kde byl dodán protiproud. Výsledná hodnota magnetomotorického napětí pro dosažení potřebných sil musela být navýšena proudem v cívkách a to na hodnotu 4,2 A.

Nicméně toto nejsou jediné důvody odchylky numerického výpočtu od analytického a do tohoto rozdílu jsou započteny i další jevy a děje, které při výpočtu zanedbáváme. Dalším takovým jevem je vazba mezi jednotlivými elektromagnety, nebo rozptyl magnetické indukce do okolí, které z hlediska analytického výpočtu neuvažujeme. Okolí při analytickém výpočtu uvažujeme jako dokonalý izolant. Z tohoto plyne i význam numerického výpočtu, který se stává nevyhnutelnou součástí návrhu ložiska.

Tabulka 6-3 Výsledky sil numerické analýzy

Analýza	x [N]	y [N]	z [N]
Nulové vychýlení 2D	4.293E-12	-3.3594E-12	-
Nulové vychýlení 3D	-0.9934	-3.4322	-3.479
Vychýlení v ose -y	-1.6933	121.11	-9.1801

7. TEPELNÁ ANALÝZA

V této kapitole se budeme věnovat teplotní analýze hybridního magnetického ložiska. V přechozích kapitolách bylo zmíněno chlazení, které je zabudované do vysokootáčkového motoru. V této analýze si ověříme, zda je možno ložisko využívat i bez tohoto chlazení, nebo zda je zapotřebí pro jeho správnou funkci toto chlazení využít i pro chlazení hybridního magnetického ložiska. Využití tohoto chlazení by umožnilo vyšší odvod tepla s uvažováním vyšších proudů až na horní hranici doporučených teplot.

7.1 Obecná teorie oteplení vodiče při průchodu proudu

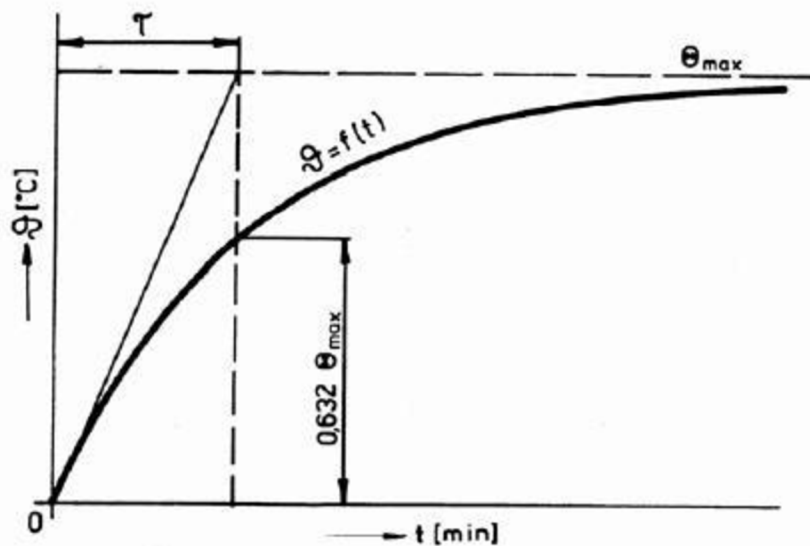
Vlivem průchodu elektrického proudu vzniká ve vodiči teplo. Nejvyšší ustálená teplota v tomto vodiči závisí na celkových ztrátách v podobě odvodu tepla. Vznik tepla v důsledku Joulových ztrát charakterizuje rovnice (7.1). Levá strana rovnice představuje teplo vyvinuté vlivem průchodu proudu. Druhá strana představuje teplo akumulované ve vodiči a teplo odevzdané do okolí. Teplo odevzdané do okolí je dáno součinem koeficientu přestupu tepla, okamžitého oteplení povrchu vodiče oproti okolí a ochlazovanou plochou. Teplo akumulované ve vodiči je dáno součinem konstanty měrného objemového tepla, zvýšení oteplení tělesa a objemem vodiče [17].

$$R \cdot I^2 dt = \alpha_0 \cdot A \cdot \Delta\vartheta dt + c \cdot V d\vartheta \quad (7.1)$$

Při pohledu na tuto rovnici nastává problém pro efektivní chlazení vodiče. Teplo odevzdané do okolí je dáno ochlazovací plochou, ale v případě vinutí jsou ochlazovány jen ty vodiče, které se nachází na povrchu. Dále i samotná izolace představuje problém v podobě konstant, které jsou jiné než v případě měděného vodiče a teplo odevzdávané do okolí bude nabývat nižších hodnot.

K ustálení teploty vodiče dojde ve chvíli, kdy teplo dodané nabývá stejné hodnoty, jako teplo odevzdané do okolí. Rovnice pro oteplovací charakteristiku je dána:

$$\Delta\vartheta = \frac{RI^2}{\alpha_0 A} \left[1 - e^{-\frac{\alpha_0 A}{cV} t} \right] = \Delta\vartheta^{-t/\tau_{max}} \quad (7.2)$$



Obr. 7-1 Oteplovací charakteristika [17]

Na obrázku 7-1 je znázorněna oteplovací charakteristika. Charakteristika pro naše ložisko musí mít podobný průběh. Jako každý materiál, ve kterém je generované nějaké teplo, má i naše ložisko nejdříve vysoký nárůst v podobě velkých hodnot tepla dodaného a malých hodnot tepla odevzdaného do okolí z důvodu malých rozdílů mezi teplotou ohřivaného vinutí ložiska a teplotou okolí. Následně dojde k ustálení vlivem velkého rozdílu teploty ohřivaného tělesa a teploty okolí, protože nyní už veškeré teplo dodané je odevzdané do okolí.

7.2 Zadání vstupních parametrů

Cílem této práce je ověřit, zda pro chlazení vnutí ložiska postačí přirozené proudění vzduchu, nebo zda bude nutné změnit konstrukci ložiska a zabudovat chlazení vysokootáčkového motoru i do tohoto ložiska.

Ověření oteplení vinutí provedeme přes oteplovací charakteristiku. Pokojová teplota se běžně udává v rozmezí 18-25°C. V tomto případě budeme uvažovat počáteční teplotu okolí a ložiska 22°C. Při teplotní analýze bylo potřeba udělat zásah do nastavení konstant uvedených v knihovně materiálu programu Workbench. Konkrétně se jedná o tepelnou vodivost vzduchu, která je zde uvedena jako 0,026 [W·m⁻²·K⁻¹]. Tuto konstantu uvádí i většina literatury, ale v rámci této analýzy bylo zapotřebí změnit tuto hodnotu na hodnotu 1 [W·m⁻²·K⁻¹]. Tato hodnota nejlépe reprezentuje oteplení vinutí. Pokud bychom ponechali původní hodnotu, tak by se teplota ložiska téměř nikdy neustálila a dosahovala by až příliš velkých hodnot, které neodpovídají realitě. Ani oteplovací charakteristika by neodpovídala reálnému oteplení vinutí při průchodu proudu. Na místo charakteristiky s rychlým nárůstem a s postupným ustálením by charakteristika měla průběh nejprve

s velkým nárůstem a pak by téměř lineárně stoupala až do nekonečna. V takovéto případě se vzduch chová spíše jako izolant.

Běžná doba měření oteplovací charakteristiky pro motory se pohybuje okolo jedné hodiny. Pro tuto tepelnou analýzu nastavíme stejný čas tranzientní tepelné analýzy.

Hlavním zdrojem tepla jsou v tomto případě cívky. Další tepelné ztráty vznikají i v ostatních částech ložiska, ale ty jsou s porovnáním s přírůstkem tepla od vinutí zanedbatelné. Nicméně do numerického výpočtu byli zahrnuti i tyto hodnoty ztrát.

Jak už bylo zmíněno, tak i toto měření bude zatíženo chybou. A to chybou ochlazovacího povrchu, který bude ve skutečnosti větší a chybou objemu vinutí, které bude taky větší vlivem absence činitele plnění mědi a izolace. Dále pro izolaci, která pokrývá vodič jsou stanovené jiné konstanty než pro měděný vodič. V neposlední řadě, neuvažujeme změnu teplot vlivem otáček, které v tomto ložisku dosahují velmi vysokých hodnot. Zanedbáním tohoto vlivu se dopouštíme velké chyby, protože proudění vzduchu má na výslednou teplotu ložiska zásadní vliv. Avšak v tomto návrhu ložiska není jasné, jak bude toto ložisko zapouzdřeno. Jako každá část motoru, tak i toto ložisko musí být opatřeno krytem, který zamezí nechtěnému dotyku a v takovémto případě, kdy ještě nevíme, jakým směrem bude vzduch vlivem přirozeného proudění a proudění vlivem otáčejícího se rotoru odcházet, tak ani nemůžeme toto proudění při návrhu uvažovat.

Vstupní hodnoty převzaté z numerické analýzy v Ansys maxwell jsou uvedeny v tabulce 7-1.

Tabulka 7-1 Ohmické ztráty ve vinutí

Ohmické ztráty spodního vinutí napájené záporným proudem -3,8 A	5,04738 W
	5,04302 W
Ohmické ztráty horního vinutí napájené kladným proudem 4,2 A	6,23832 W
	6,17999 W

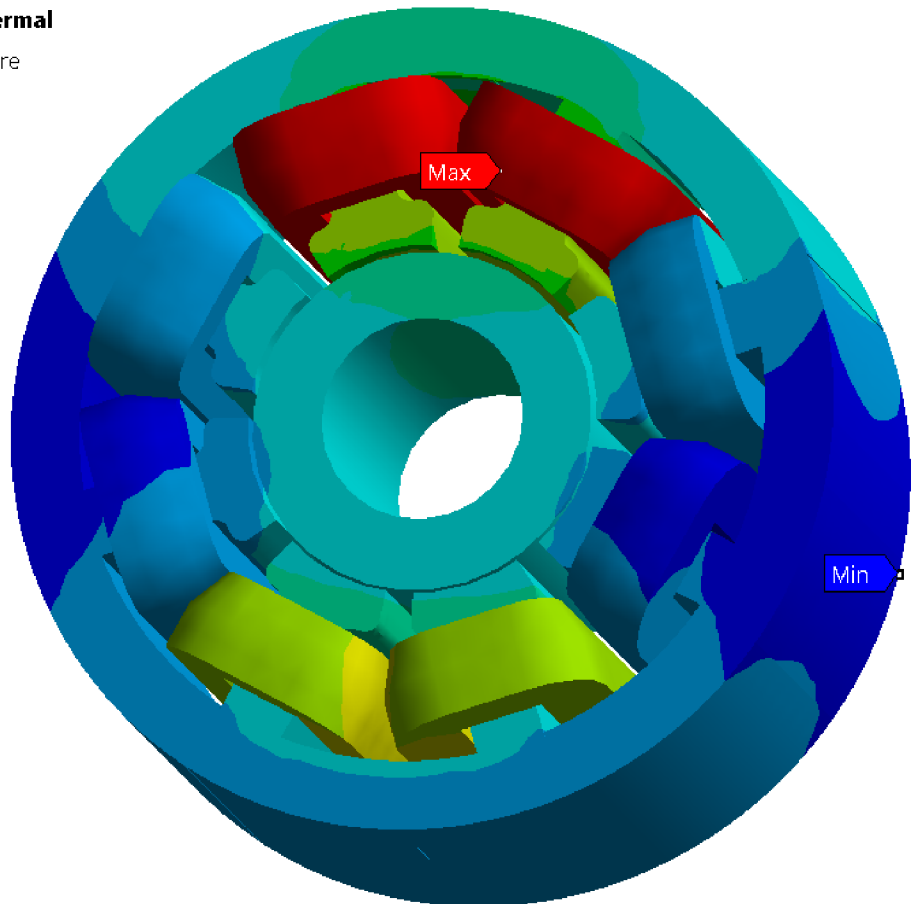
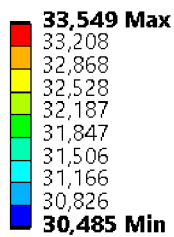
7.3 Tepelná analýza vinutí ložiska

Tepelná analýza byla provedena pro ložisko, které bylo maximálně vychýleno. Pro takovéto vychýlení hřídele tečou vinutím maximální proudy pro navrácení hřídele do stabilní polohy, které byli stanoveny výpočtem. Celé ložisko je konstruováno z kovových

materiálů, které dobře vedou teplo. Jak názorně ukazuje obrázek 7-2, tak vinutí, které je zde jediným zdrojem tepla ohřívá i celé ložisko. To znamená, že ložisko v žádném místě nedosahuje pokojové teploty, ale je téměř rovnoměrně oteplováno vinutím. Díky tomuto předávání tepla z cívek do ostatních částí ložiska se zvětšuje ochlazovací plocha a odvod tepla z cívek je tak efektivnější. Odvod tepla je zde zprostředkován jen za pomoci proudění vzduchem.

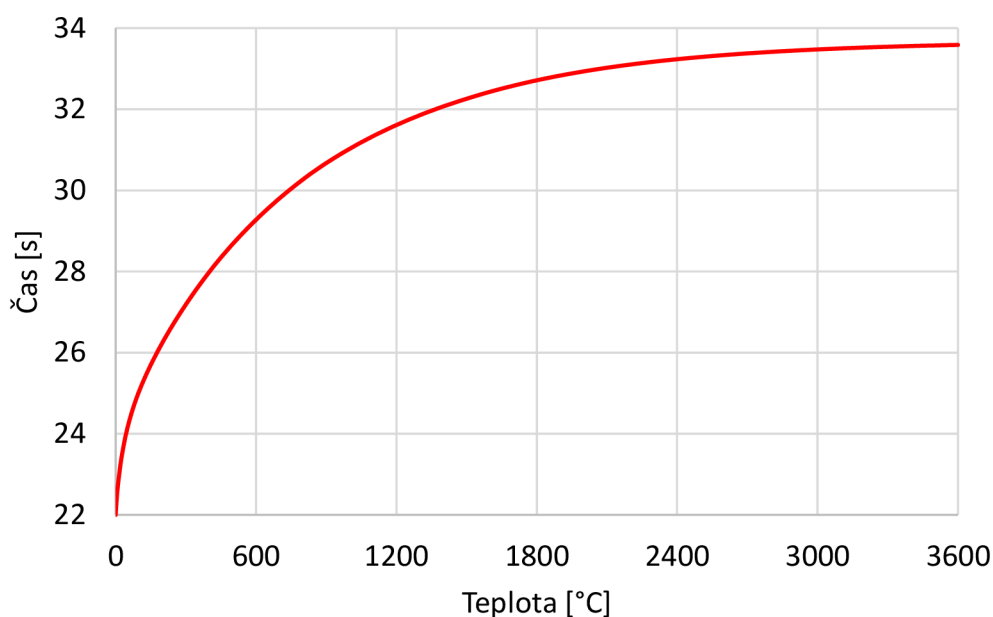
G: Transient Thermal

Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 3600



Obr. 7-2 Oteplení ložiska

Oteplovací charakteristika odpovídá teoretické oteplovací charakteristice. Nejprve docházelo k velkému nárůstu tepla v krátkém čase a následně došlo k ustálení.



Obr. 7-3 Oteplovací charakteristika ložiska

7.4 Optimalizace oteplení vinutí

Dle provedené teplotní analýzy můžeme říct, že pro ochlazení vinutí postačí přirozené proudění vzduchu. V předchozích kapitolách, kde byl proveden návrh vinutí byl určen i typ izolace. Jedná se o izolaci s označením 2T podle tabulky 5-2. V tomto případě se jedná o tepelnou třídu izolace s označením B. Pro tuto izolaci dle tabulky 7-2 vychází maximální teplota pro vinutí na 120°C.

Tabulka 7-2 Hodnoty maximálních teplot při normálním použití [16]

Třída izolace	Teplotní třída izolačního systému [°C]	Maximální teplota vinutí [°C]
A	102	100
E	120	115
B	130	120
F	155	140
H	180	165

Nabízí se i možnost uzavřít systém ložiska a přivést k němu chlazení motoru. V takovém případě, bychom mohli stanovit větší proud pro cívky, ale vzhledem k problému s BH charakteristikou plechů nemá smysl nadále navyšovat proudy v cívkách, protože většina magnetomotorického napětí by byla spotřebována na ztráty v magnetickém odporu plechů.

V rámci tohoto zadání, kdy požadujeme co nejmenší rozměry se nabízí jediná varianta, která by pro tuto konstrukci se zavedením chladicího systému do ložiska připadala v úvahu. Jedná se o zmenšení průřezu cívky při zachování stejného proudu. Tím by se nám uvolnilo místo pro úpravu šířky magnetického obvodu při zanechání stejného průměru a zmenšení délky magnetického ložiska. Nicméně je potřeba zdůraznit, že při zavedení tohoto chladicího systému se zvětší i rozměry ložiska, protože doposud byl tento chladicí systém limitujícím prvkem pro šířku ložiska. V takovém případě je zapotřebí provést celý návrh znova a ověřit i mechanickou odolnost při takto vysokých otáčkách.

8. ZÁVĚR

V rámci této diplomové práce jsme se seznámili s principem hybridních magnetických ložisek a jejich praktickému využití u vysokootáčkových motorů, kde vzniká problém při použití běžných kuličkových ložisek vlivem tření. Podrobně jsou zde popsány pasivní, aktivní, nebo hybridní magnetická ložiska. Přičemž v pasivních magnetických ložiskách byly popsány jen ložiska s použitím permanentních magnetů a v aktivních magnetických ložiskách byly popsány jen ložiska s použitím elektromagnetů.

Hlavní částí této práce jsou hybridní magnetická ložiska, která jsou zde koncipovaná jako aktivní magnetická ložiska s využitím permanentních magnetů k vytvoření stálého magnetického pole. A pro jejich pochopení je zapotřebí nejprve pochopit samotný princip aktivních a pasivních magnetických ložisek.

Práce je rozdělena do tří částí. V první části jsou teoreticky rozebrány tyto magnetická ložiska. Druhá část je koncipována na princip elektromagnetu s CI jádrem, pro který jsou odvozeny základní rovnice pro výpočet síly elektromagnetu, ze kterých následně vychází i princip našeho magnetického ložiska. Z tohoto matematického popisu jsou následně odvozeny rovnice přímo pro naše ložisko, které byli později využity pro analytický výpočet. Třetí část se týká kompletního návrhu magnetického ložiska pro zavěšení rotoru u již existujícího elektrického stroje umístěného na fakultě elektrotechniky. V rámci této kapitoly byl zpracovaný stručný popis jednotlivých kroků návrhu magnetu a následně proveden numerický analytický výpočet. Poslední kapitola se věnuje ověření tepelného namáhání cívek při maximálním průchodu proudu s následným vyhodnocením výsledků.

Návrh tohoto ložiska je z pohledu praktičnosti nepoužitelný z důvodu, že pro dosažení potřebných výsledků bylo nutné přivést na cívky protiproud. Původní koncept návrhu měl splnit podmínku na zachování veškerých rozměrů stroje, ale tohoto požadavku nebylo možné docílit, a proto muselo dojít k částečné úpravě hřídele v místě, kam umístíme ložisko. V rámci dodržení požadovaných parametrů se nabízí možnost využití repulzivních magnetů na rotoru, čímž bychom eliminoval potřebu protiproudu pro zeslabení magnetu.

Literatura

- [1] PRUŠA, R. Návrh magnetického ložiska pro čerpadlo. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 74 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D
- [2] ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA STROJNÍ, Václav NOHEL. Magnetická ložiska [online], 2012 [cit. 2020-11-18], Dostupné z: <https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/2990/1/Bakalarska%20prace.pdf>
- [3] ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, Ladislav Šidlo. NÁVRH A REALIZACE SUPRAVODIVÉHO LOŽISKA [online], [cit. 2020-11-9], Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/soutez/sidlo.pdf>
- [4] POLÁŠEK, Lukáš. Speciální typy ložisek a jejich aplikace [online]. Brno, 2010 [cit. 2021-01-05]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/14205>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování. Vedoucí práce Daniel Koutný.
- [5] Jan Krofta. ŘÍZENÍ AKTIVNÍHO RADIÁLNÍHO MAGNETICKÉHO LOŽISKA [online]. Praha, 2019 [cit. 2020-12-26]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/83668>. diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Fakulta strojního. Ústav přístrojové a řídicí techniky. Vedoucí práce Martin Novák.
- [6] Slideplayer, Michaela Janečková, Elektrické stroje - transformátory [online], [cit. 2020-12-28], Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/1887158/>
- [7] Vysoké učení technické v Brně, doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc. DYNAMIKA ELEKTROMECHANICKÝCH SOUSTAV, 2013 [cit. 2020-12-28].
- [8] PZK BRNO, permanentni magnety [online], [cit. 2021-3-27], Dostupné z: <https://www.pzk.cz/permanentni-magnety>
- [9] publi, elektrotechnické materiály 1-Magnetické materiály [online], [cit. 2021-3-30], Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/07.html>
- [10] AZO MATERIALS, AISI 1008 Carbon Steel (UNS G10080) [online], [cit. 2021-4-16], Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6538>
- [11] steel0, AISI 1008 [online], [cit. 2021-4-16], Dostupné z: https://www.steel0.com/AISI_1008.htm
- [12] RÚRA, Dávid. Návrh magnetického ložiska pro elektrický stroj. Brno, 2019, 72 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce: Ing. Jan Bárta, Ph.D.
- [13] Černý Josef, Návrh asynchronního motoru s kotvou nakrátko [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2021-11-9]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/9402>
- [14] BLAHA, J. Návrh a analýza synchronních strojů s permanentními magnety. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 99 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Vít

- [15] SKF workshop - Magnetic bearing for high speed machines.
- [16] Elektroprumysl, Transformátory a tlumivky – standartní provedení [online], [cit. 2021-3-30], Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/elektricke-a-zalozni-zdroje-energie/transformatory-a-tlumivky-standardni-provedeni>
- [17] Konšel, L. Jištění vedení proti přetížení a zkratu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 46 stran.
- [18] KOLARČÍK, F. Řídicí systém aktivního magnetického ložiska. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky, 2011. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Houška, Ph.D.
- [19] O., Vítek. *Vysokootáčkové elektrické motory*. Brno, 2016. Habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [20] Ren, X., Le, Y., Sun, J., Han, B. and Wang, K. (2017), Magnetic flux leakage modelling and optimisation of a CRAHMB for DC motor. *IET Electric Power Applications*, 11: 212-221. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2016.0259>
- [21] Xu, Z., Xu, L., Bangcheng, H. and Xiangyang, Y. (2018), Magnetic circuit designing and structural optimisation for a three degree-of-freedom hybrid magnetic bearing. *IET Electric Power Applications*, 12: 1082-1089. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2017.0792>
- [22] Ren, X., Sun, J., Peng, C. and Qiao, H. (2019), Analysis and design method of a combined radial-axial magnetic bearing based on asymmetric factor. *IET Electric Power Applications*, 13: 686-693. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2018.5347>
- [23] T. Zhang, X. Ye, L. Mo and X. Liu, "Modeling and Performance Analysis on the Slice Hybrid Magnetic Bearing With Two Radial Air-Gaps," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 29, no. 2, pp. 1-5, March 2019, Art no. 3601105, doi: 10.1109/TASC.2018.2890772.
- [24] N. R. Hemenway, H. Gjemdal and E. L. Severson, "Magnetic Bearing Technology for Industrial Bearingless Motor Systems," *2019 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*, 2019, pp. 51-58, doi: 10.1109/WEMDCD.2019.8887803.
- [25] Y. Le, J. Sun and B. Han, "Modeling and Design of 3-DOF Magnetic Bearing for High-Speed Motor Including Eddy-Current Effects and Leakage Effects," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 6, pp. 3656-3665, June 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2530778.
- [26] Zhu, H. and Wang, S. (2020), Decoupling control based on linear/non-linear active disturbance rejection switching for three-degree-of-freedom six-pole active magnetic bearing. *IET Electr. Power Appl.*, 14: 1818-1827. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2019.0448>
- [27] J. Ju, H. Zhu and C. Zhao, "Radial Force-Current Characteristic Analysis of Three-Pole Radial-Axial HMB," *2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/VPPC.2016.7791758.
- [28] X. Liu, J. Dong, Y. Du, K. Shi and L. Mo, "Design and Static Performance Analysis of a Novel Axial Hybrid Magnetic Bearing," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 11, pp. 1-4, Nov. 2014, Art no. 8300404, doi: 10.1109/TMAG.2014.2327165.

- [29] Yuan, Y., Sun, Y. & Xiang, Q. Design and Analysis of a Magnetic Bearings with Three Degrees of Freedom. *Chin. J. Mech. Eng.* **32**, 3 (2019).
<https://doi.org/10.1186/s10033-019-0320-3>
- [30] Bangcheng Han, Shiqiang Zheng, "Modeling and Analysis of Coupling Performance of Dynamic Stiffness Models for a Novel Combined Radial-Axial Hybrid Magnetic Bearing", *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2014, Article ID 340140, 17 pages, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/340140>