

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh aktivního magnetického ložiska

Autor: Tomáš Koželuh
Vedoucí práce: Ing. Jan Šobra, Ph.D.
Akademický rok: 2019 - 2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš KOŽELUH**
Osobní číslo: **E18N0008K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Návrh aktivního magnetického ložiska**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Zásady pro vypracování

1. Popište princip funkce, konstrukční provedení a řídicí systémy aktivních magnetických ložisek.
2. Pro zadané parametry ložiska zvolte několik vhodných topologií a proveďte jejich analytický výpočet.
3. Návrhy jednotlivých topologií ověřte konečnoprvkovými modely.
4. Shrňte a porovnejte dosažené výsledky.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Chiba, Akira et al. Magnetic bearings and bearingless drives. Amsterdam: Newnes, 2005. xviii, 381 s. ISBN 0-7506-5727-8.
2. elektronické informační zdroje (např. databáze IEEExplore)

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Šobra, Ph.D.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



L.S.



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá návrhem dvou magnetických ložisek 8-mi pólového a 12-ti pólového a porovnání jejich výhod a nevýhod pro moderní stroje, u kterých se snažíme o snížení ztrát, a tedy o zvýšení účinnosti.

Text je rozdělen do tří částí; první popisuje princip funkce, konstrukční provedení a řídicí systémy aktivních magnetických ložisek, druhá část se zabývá návrhem pro zadané parametry ložiska volbou několika vhodných topologií a jejich analytickým výpočtem. Třetí část obsahuje ověření navržených topologií metodou konečných prvků.

Klíčová slova

Magnetické ložisko, elektromagnetický návrh, uložení, lineární magnetický obvod, analýza metodou konečných prvků.

Abstract

The presented diploma thesis deals with the design of two magnetic bearings 8-pole and 12-pole and a comparison of their advantages and disadvantages for modern machines, in which we try to reduce losses and thus increase efficiency.

The text is divided into three parts; the first describes the principle of operation, design and control systems of active magnetic bearings, the second part deals with the design for the specific parameters of the bearing by selecting several suitable topologies and their analytical calculation. The third part contains verification of the proposed topologies by finite element method.

Key words

Magnetic bearing, electromagnetic design, bearing, linear magnetic circuit, finite element analysis.

Prohlášení

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

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



.....
podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Šobrovi, Ph.D. za cenné odborné rady, zkušenosti, poskytnuté podklady, připomínky, metodické vedení práce, a především však za jeho čas a trpělivost.

Obsah

OBSAH	9
SEZNAM OBRÁZKŮ	11
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	13
ÚVOD	15
1 MAGNETICKÉ LOŽISKO	16
1.1 PASIVNÍ MAGNETICKÁ LOŽISKA	17
1.1.1 <i>Magnetická ložiska s Halbachovou soustavou permanentních magnetů</i>	18
1.2 AKTIVNÍ MAGNETICKÁ LOŽISKA	22
1.2.1 <i>Magnetická ložiska bez integrovaného pohonu</i>	23
1.2.2 <i>Pohony s integrovanými magnetickými ložisky</i>	25
1.2.3 <i>Snímače polohy, řídicí obvody a související technologie</i>	26
1.2.4 <i>Magnetická ložiska typické uspořádání</i>	28
2 NÁVRH AKTIVNÍHO MAGNETICKÉHO LOŽISKA	31
2.1 ROTOR	31
2.1.1 <i>Pevnostní výpočet rotoru</i>	31
2.1.2 <i>Výpočet potřebné radiální síly ložiska</i>	32
2.2 STATOROVÁ ČÁST – VÝPOČET NOSNOSTI RADIÁLNÍHO LOŽISKA	33
2.2.1 <i>Výpočet vzduchové mezery</i>	34
2.2.2 <i>Velikost statoru 8-mi pólového ložiska</i>	34
2.2.3 <i>Velikost statoru 12-ti pólového ložiska</i>	40
2.3 SOUHRN VÝPOČTENÝCH HODNOT NAVRHOVANÝCH LOŽISEK	45
3 OVĚŘENÍ NÁVRHU PROGRAMEM S METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ	47
3.1 8-MI PÓLOVÉ LOŽISKO	47
3.2 12-TI PÓLOVÉ LOŽISKO	51
ZÁVĚR	55
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	57
PŘÍLOHY	1

Seznam obrázků

OBR. 1.1.1 KONSTRUKCE PRŮTOKOMĚRU S KÓNICKÝMI PERMANENTNÍMI MAGNETY [2]	17
OBR. 1.1.2 HALBACHOVA SOUSTAVA PERMANENTNÍCH MAGNETŮ [4].....	18
OBR. 1.1.3 IDEÁLNÍ KRUHOVÁ HALBACHOVA SOUSTAVA S VNITŘNÍM A) B) A VNĚJŠÍM C) D) RADIÁLNÍM POLEM [5]	20
OBR. 1.1.4 MODEL MAGNETICKÉHO LOŽISKA S A) IDEÁLNÍ, B) SEGMENTOVOU HALBACHOVOU MAGNETIZACÍ [5]	20
OBR. 1.1.5 GEOMETRIE AXIÁLNÍHO MAGNETICKÉHO LOŽISKA S PERMANENTNÍMI MAGNETY [16]	21
OBR. 1.1.6 GRAFICKÉ ZOBRAZENÍ HUSTOTY A SMĚRU MAGNETICKÉHO TOKU [16]	21
OBR. 1.2.1 ZÁKLADNÍ PRINCIP AKTIVNÍHO MAGNETICKÉHO LOŽISKA [17].....	22
OBR. 1.2.2 SCHÉMA MOTORU S MAGNETICKÝMI LOŽISKY [1].....	23
OBR. 1.2.3 NÁKRES MOTORU S MAGNETICKÝMI LOŽISKY [19]	24
OBR. 1.2.4 GRAFICKÉ ZOBRAZENÍ HUSTOTY A SMĚRU MAGNETICKÉHO TOKU [1]	25
OBR. 1.2.5 NÁKRES MOTORŮ S INTEGROVANÝMI MAGNETICKÝMI LOŽISKY A) S VNĚJŠÍM VINUTÍM B) S VINUTÍM ULOŽENÝM V DRÁŽKÁCH MAGNETICKÉHO OBVODU [7].....	26
OBR. 1.2.6 PŘÍKLAD INDUKČNÍCH SNÍMAČŮ [9]	27
OBR. 1.2.7 DVOUOSÉ VARIANTY MAGNETICKÉHO ZAVĚŠENÍ [1]	28
OBR. 1.2.8 PĚTIOSÉ VARIANTY MAGNETICKÉHO ZAVĚŠENÍ [1].....	29
OBR. 1.2.9 VARIANTY KONSTRUKCE S KOMBINACÍ MECHANICKÝCH A MAGNETICKÝCH LOŽISEK [1].....	30
OBR. 2.2.1 ROZMĚRY LOŽISKA [11].....	33
OBR. 2.2.2 OSMIPÓLOVÉ LOŽISKO V ZÁKLADNÍ A V DOPORUČENÉ POLOZE [11]	39
OBR. 2.2.3 DVANÁCTIPÓLOVÉ LOŽISKO V ZÁKLADNÍ A DOPORUČENÉ POLOZE [11]	44
OBR. 2.3.1 REÁLNÉ AKTIVNÍ MAGNETICKÉ LOŽISKO OD VÝROBCE SKF [15]	46
OBR. 3.1.1 B-H CHARAKTERISTIKA STATOROVÝCH PLECHŮ M350-50A	47
OBR. 3.1.2 MODEL HUSTOTY MAGNETICKÉ INDUKCE V 8-MI PÓLOVÉM LOŽISKU PŘI MAX. PROUDU.....	48
OBR. 3.1.3 ROZLOŽENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE MEZI 1 PÓLEM A ROTOREM	49
OBR. 3.1.4 MODEL HUSTOTY MAGNETICKÉ INDUKCE V 8-MI PÓLOVÉM LOŽISKU OTOČENÉM O 22,5° PŘI MAX. PROUDU	50
OBR. 3.1.5 ROZLOŽENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE MEZI 2-MA PÓLY A ROTOREM 8-MI PÓLOVÉHO LOŽISKA OTOČENÉHO O 22.5°	50
OBR. 3.2.1 MODEL HUSTOTY MAGNETICKÉ INDUKCE VE 12-TI PÓLOVÉM LOŽISKU OTOČENÉM O 15° PŘI MAX. PROUDU	51
OBR. 3.2.2 ROZLOŽENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE MEZI 2-MA PÓLY A ROTOREM 12-TI PÓLOVÉHO LOŽISKA OTOČENÉHO O 15°	52
OBR. 3.2.3 MODEL HUSTOTY MAGNETICKÉ INDUKCE VE 12-TI PÓLOVÉM LOŽISKU OTOČENÉM O 0° PŘI MAX. PROUDU	53
OBR. 3.2.4 ROZLOŽENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE MEZI 3-MI PÓLY A ROTOREM 12-TI PÓLOVÉHO LOŽISKA OTOČENÉHO O 0°	53

Seznam použitých symbolů a zkratek

A_c	plocha cívky [mm ²]
A_c^*	skutečná plocha cívky [mm ²]
A_g	plocha magnetického obvodu ve vzduchové mezeře [mm ²]
B	magnetická indukce [T]
B_{max}	maximální magnetická indukce [T]
B_{sat}	magnetická indukce v saturaci [T]
B_r	remanentní magnetická indukce [T]
c	šířka plochy cívky [mm]
d_{cu}	průměr vodiče vinutí [mm]
$d_{cu,izolace}$	průměr vodiče vinutí s izolací [mm]
d_{rotor}	průměr hřídele rotoru [mm]
E	Youngův modul pružnosti [MPa]
f	poměr ocel/cívka [-]
F_g	síla působící proti tíze rotoru [N]
$FG_{max,x=0}$	maximální síla reagující na gravitační sílu při nulové výchylce a maximálním proudu [N]
$F_{max,x=0}$	maximální síla ložiska při nulové výchylce a maximálním proudu [N]
F_{rad}	požadovaná radiální síla ložiska [N]
F_{rat}	radiální síla vzniklá od zatížení stroje [N]
h_p	výška pólu ložiska [mm]
I_{max}	maximální proud vodičem vinutí [A]
k_{pcu}	činitel plnění mědi [-]
l_{Fe}	délka paketu statoru [mm]
LMO	lokální magnetické obvody
l_{rotor}	délka hřídele rotoru [mm]
$l_{vodič}$	délka vodiče vinutí jednoho pólu statoru [mm]
$l_{vodič,stř}$	délka vodiče středního závitů vinutí jednoho pólu statoru [mm]
m_{rotor}	váha hřídele rotoru [kg]
N	počet závitů [-]
R_1	poloměr hřídele rotoru [mm]
R_2	poloměr rotoru pod ložiskem [mm]
Re	mez kluzu [MPa]

r_c	poloměr od středu k hornímu konci pólového nástavce [mm]
r_s	poloměr magnetického obvodu statoru [mm]
$S_{vodič}$	průřez vodiče vinutí statoru [mm]
$2p$	počet pólů [-]
x_{max}	maximální výchylka rotoru [mm]
w	šířka pólu ložiska [mm]
μ_0	permeabilita vakua [H/m]
μ_r	relativní permeabilita [H/m]
ρ	hustota [kg/m ³]
σ_{max}	maximální proudová hustota [A/mm ²]
$\tau_{p,1/2}$	poloviční pólová rozteč [mm]

Úvod

Na počátku 21. století se stalo globální oteplování důležitou otázkou. Jedním z cílů je snaha o snížení emisí CO₂. Moderní společnost stále častěji využívá nejnovějších technologií založených na energii (např. automobily, vlaky, letadla anebo klimatizační zařízení). Pro rozvoj těchto technologií jsou nezbytné alternativní energie a zlepšení účinnosti. Integrace vysoce účinných pohonů do výkonových mechatronických systémů je jedním z klíčů ke zlepšení účinnosti systému a tím ke snížení emisí CO₂.

V posledních letech se systémy magnetické levitace a zavěšení staly reálným řešením. Například systém vlaků Transrapid vyvinutý německými inženýry byl nainstalován v čínské Šanghaji. U tohoto vlaku jsou podvozky nadnášeny elektro-magnety. Proto je provozní rychlost podstatně vyšší než u konvenčních rychlovlaků, jako jsou Shinkansen, TGV a ICE. Díky magnetické levitaci byla zaznamenána nejvyšší rychlost více než 580 km / h. [1]

Kromě vlakových systémů se magnetické levitace a zavěšení používá také v jiných průmyslových odvětvích. Některé aplikace, jako jsou kompresory nebo generátory, vyžadují vysoké otáčky, aby se snížila hmotnost, rozměry a náklady a zároveň se maximalizovala účinnost celého systému. Například chemická čerpadla, turbomolekulární čerpadla, krevní pumpy, bioreaktory a kompresory však fungují v náročném prostředí, jako je vakuum, extrémně nízké nebo vysoké teploty, ve výbušné, jedovaté anebo biochemické kapalině. Běžná mechanická ložiska zde nelze instalovat tak, že jedním z řešení je zavěšení hřídele magnetickou levitací.

Systém s magnetickými ložisky je klíčovou technologií v následujících aplikacích mechatroniky:

- vysoce účinné a kompaktní systémy s integrovaným magnetickým odpružením a vysokou rychlostí otáčení hřídele;
- zařízení zavěšená magnetickými silami a pracující v náročném nebo agresivním prostředí;
- vysokorychlostní motory a generátory s dlouhými pružnými hřídeli, které vyžadují integrované tlumení vibrací podél axiální osy.

1 Magnetické ložisko

Koncem 80. let byla zavedena a rozvíjena nová teorie pohonu s magnetickými ložisky. Od té doby bylo provedeno mnoho testů a získáno mnoho zkušeností s provozem a chováním různých střídavých pohonů s magnetickými ložisky. U moderních strojů je při zvyšování otáček a výkonů stále častějším problémem mazání a údržba ložisek. V některých aplikacích je údržba ložisek významným problémem. Ložiska například mohou představovat hlavní problém u strojů ve vesmíru nebo také v agresivním prostředí se zářením či jedovatými látkami. Kromě toho nelze olej pro mazání použít ve vakuu, v prostředí s velmi vysokými anebo velmi nízkými teplotami, v potravinářském průmyslu a ve zdravotnictví. Pohony s magnetickým uložením tedy mohou rozšířit možné oblasti použití motorových pohonů.

Magnetické ložisko je elektromechanická soustava využívající principy magnetické levitace bez kontaktu mezi pevnou a rotující částí. Systém umožňuje řízení vzduchové mezery.

V základu dělíme magnetická ložiska na aktivní a pasivní. Aktivní magnetická ložiska pro svou funkci potřebují napájení elektrickou energií. Z pohledu působení levitačních sil dělíme magnetická ložiska na axiální nebo radiální.

Magnetické zavěšení nebylo běžné ani na konci dvacátého století z několika důvodů:

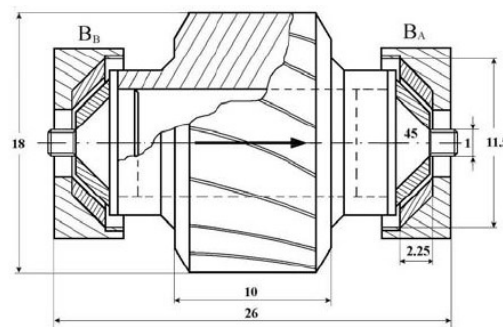
- malá rychlost výpočtů v reálném čase v digitálních procesorech
- regulátory proudu, tj. výkonové elektronické invertory, byly poměrně drahé
- návrh řídicí jednotky vyžaduje specializované znalosti
- senzory pro detekci polohy hřídele vyžadují prostor a jsou nákladné

Na počátku 21. století, byla většina výše uvedených problémů vyřešena. Nejnovější procesory, vstupní programovatelná hradlová pole mají rychlé A/D převodníky a 3-fázové PWM měniče umožňují vysoké rychlosti zpracování dat. Náklady na střídač se výrazně snížily díky integraci a sériové výrobě energetických zařízení. Pohony a generátory integrují magnetická ložiska s motorem nebo generátorem a zajišťují kompaktní velikost [1].

1.1 Pasivní magnetická ložiska

Pasivními magnetickými ložisky označujeme ložiska, která využívají pro svou činnost pouze přitažlivé nebo odpudivé síly permanentních magnetů. Pasivní magnetická ložiska nepotřebují pro svou činnost elektrické napájecí zdroje ani složité elektronické snímací a řídicí obvody. Ložiska s permanentními magnety nenašla široké uplatnění převážně z důvodu nízké tuhosti a tlumení. Obecně platí, že jsou radiální magnetická ložiska nestabilní v axiálním směru, a naopak axiální magnetická ložiska jsou nestabilní v radiálním směru. Možným řešením by bylo zkombinovat výše uvedené systémy.

Konstrukce magnetických ložisek s permanentními magnety, které eliminují nestabilitu v axiálním nebo radiálním směru jsou kónická kuželová ložiska. Příklad stroje s kónickými kuželovými ložisky je na Obr. 1.1.1

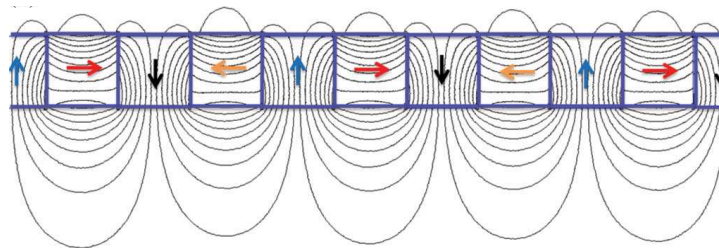


Obr. 1.1.1 Konstrukce průtokoměru s kónickými permanentními magnety [2]

Teoretickou analýzou takovéhoho uložení se zabýval např. Bassani v *Permanent magnetic levitation and stability*, ve kterém dospěl k závěru, že – cituji: „...pokud je dán vhodný tvar ložiska a směr magnetického pole, síly způsobující nestabilitu mohou být velmi malé v porovnání se stabilizujícími silami a z tohoto důvodu může být jev nestability prakticky zanedbatelný“ [2].

1.1.1 Magnetická ložiska s Halbachovou soustavou permanentních magnetů

V roce 1985 navrhl fyzik Klaus Halbach (Lawrence Berkeley National Laboratory, California) uspořádání permanentních magnetů, jímž docílil mimořádně silného magnetického pole. Pro toto uspořádání permanentních magnetů se označuje jako Halbachova soustava magnetů nebo Halbachovo pole (anglicky Halbach Array). Původně chtěl využít toto uspořádání pro konstrukci urychlovače částic. V polovině 90. let minulého století použil Halbachovu soustavu permanentních magnetů profesor kalifornské univerzity Richard F. Post (Lawrence Livermore National Laboratory) při návrhu vysokootáčkového generátoru. Přibližně v téže době byla sestrojena první pasivní magnetická ložiska s Halbachovou soustavou permanentních magnetů. [3]



Obr. 1.1.2 Halbachova soustava permanentních magnetů [4]

Výzkum pasivních magnetických ložisek využívajících Halbachovu soustavu permanentních magnetů probíhá v současné době na École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Département de Microtechnique (Švýcarsko). [3]

Halbachova soustava je vytvořena uspořádáním permanentních magnetů ve tvaru kvádrů v pořadí, jak je naznačeno na Obr. 1.1.2 (šipkami jsou vyznačeny směry jejich magnetické orientace). Směr orientace magnetického pole jednotlivých segmentů má za následek, že v oblasti u spodní části této soustavy je magnetické pole velmi silné – dosahuje hodnoty až kolem 1 T, kdežto v oblasti při horní části soustavy je magnetické pole velmi slabé. V aplikacích lze uvedené soustavy řadit za sebou. Permanentní magnety byly vyrobeny ze vzácných zemin, se slitinou neodýmium-železo-bor (NdFeB), s remanentní indukcí kolem 1,2 T. [4]

Původně měla Halbachova soustava sloužit v urychlovačích částic. Avšak našla uplatnění v širokém spektru aplikací: magnetická ložiska, lineární a rotační servomotory, bezkartáčové střídavé motory, elektromagnetické tlumiče, separátor magnetických nanočástic apod.

Dlouho byli vědci přesvědčeni, že pro levitaci dopravních prostředků jsou permanentní magnety nevhodné, protože mají velkou hmotnost v poměru k levitační síle. U dopravního systému Inductrack, využívajícího Halbachovu soustavu magnetů, tomu tak není. Ukazuje se, že poměr hmotnosti magnetů Halbachovy soustavy k jejich levitační síle je asi 1 : 50. [3]

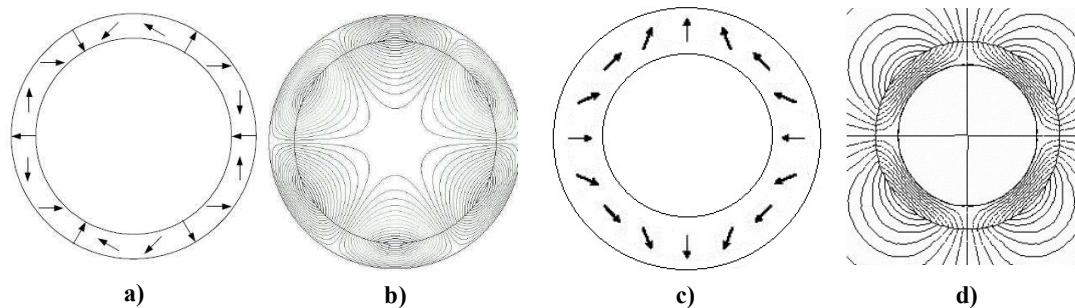
Vůz Indutracku má na spodní straně instalovanou Halbachovu soustavu. V jízdě dráze jsou hustě vedle sebe umístěny a navzájem izolovány cívky spojené nakrátko, jenž se označují levitační cívky. Při pohybu vozu se v levitačních cívkách indukuje proud, který vytváří magnetické pole. Toto magnetické pole se vzájemně odpuzuje s magnetickým polem Halbachovy soustavy permanentních magnetů. Protože se v levitačních cívkách indukuje proud pouze při pohybu vozu, musí být vůz vybaven pomocným podvozkem. Podvozek se používá pro nižší rychlosti, při kterých se ještě neindukuje v levitačních cívkách dostatečný proud, aby jeho působením vznikla dostatečná levitační síla.

Ve srovnání s dopravními systémy, které využívají pro levitaci elektromagnety, nevyžaduje systém Indutrack elektronické systémy pro regulaci budících proudů elektromagnetů, ani kryotechnické zařízení pro supravodivé magnety.

Dopravní systém Inductrack je pozoruhodný svou jednoduchostí a tím i vysokou spolehlivostí. Analýza levitačních sil systému Inductrack ukazuje, že největší síly vznikají při co nejvýraznějším indukčním charakteru levitačních cívek. Toho lze dosáhnout feromagnetickým jádrem. Kromě levitačních cívek se uvažuje o ekonomicky výhodnější alternativě, u níž jsou levitační cívky nahrazeny hliníkovými plechy obdélníkového tvaru. Plechy jsou navzájem izolovány a složeny do paketů. Pohybem Halbachovy soustavy se v nich indukují vířivé proudy s obdobnými účinky jako u levitačních cívek. [3]

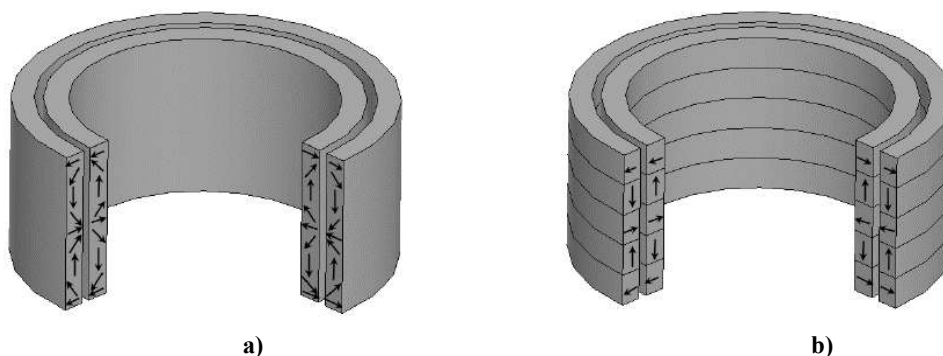
NASA (National Aeronautics and Space Administration) se zabývá využitím systému Indutrack pro starty raketoplánů a kosmických raket. [3]

Halbachovu soustavu magnetů lze také použít pro rotační pasivní magnetické ložisko. Běžná pasivní magnetická ložiska jsou tvořena dvěma jednolitými kruhovými permanentními magnety s radiální nebo axiální polarizací. Na Obr. 1.1.3 a) je zobrazeno ideální kruhové uspořádání Halbachovy soustavy s vnitřním radiálním polem. Z vizualizace siločar b) je zřejmé, že se magnetické pole uzavírá uvnitř kruhové soustavy. Na Obr. 1.1.3 c) je zobrazeno ideální kruhové uspořádání Halbachovy soustavy s vnějším radiálním polem. Vizualizace siločar d) ukazuje magnetické pole, které se uzavírá vně kruhové soustavy. Ideálního magnetického pole Halbachovy sestavy je možné také dosáhnout u celistvých materiálů. Nevýhodou celistvých materiálů je pole s menší výslednou magnetickou silou. Proto se v praxi častěji používají segmentované soustavy, protože jejich výsledné magnetické pole je velmi silné. [5]



Obr. 1.1.3 Ideální kruhová Halbachova soustava s vnitřním a) b) a vnějším c) d) radiálním polem [5]

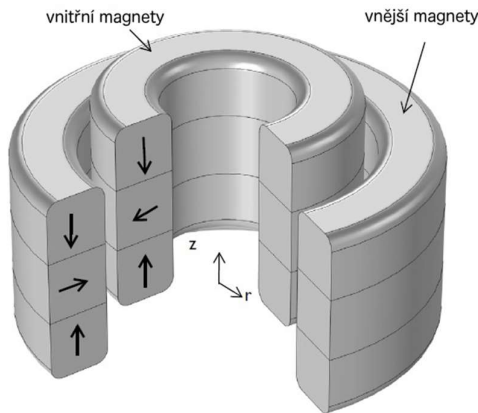
Při porovnání běžných ložisek s permanentními magnety a magnetických ložisek s Halbachovou soustavou zjistíme, že magnetická ložiska s Halbachovou soustavou dosahují při stejném objemu permanentních magnetů vyšší tuhosti.



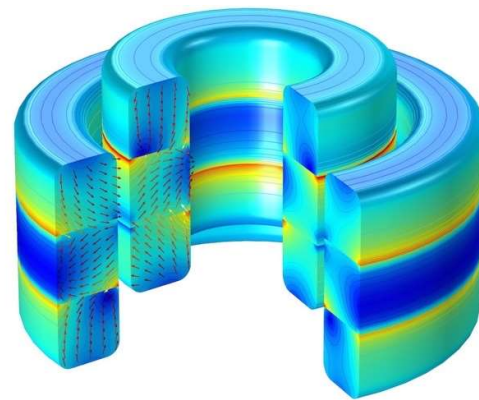
Obr. 1.1.4 Model magnetického ložiska s a) ideální, b) segmentovou Halbachovou magnetizací [5]

Na Obr. 1.1.5 je zobrazena geometrie uspořádání axiálního pasivního magnetického ložiska s využitím Halbachova pole magnetů. Na Obr. 1.1.6 je pro tuto konstrukci pasivního magnetického ložiska graficky znázorněna hustota a směr magnetického toku.

Magnetická ložiska s permanentními magnety se nepoužívají příliš často. Protože jejich magnetické pole není říditelné, a tak nelze ložisko přizpůsobovat změnám zatěžovací síly.



Obr. 1.1.5 Geometrie axiálního magnetického ložiska s permanentními magnety [16]

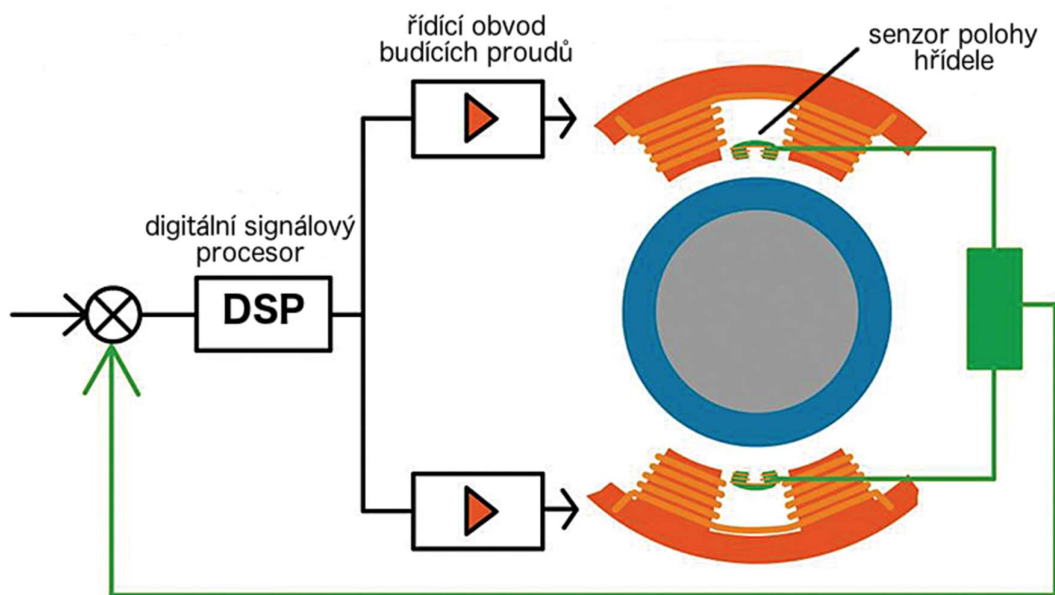


Obr. 1.1.6 Grafické zobrazení hustoty a směru magnetického toku [16]

Naopak výhodou bývají menší rozměry, než u aktivních magnetických ložisek s elektromagnety, protože není potřeba zdroj napájecího elektrického proudu a řídicí elektronické obvody. S tím také souvisí i další výhoda, není nutné řešit chlazení elektrických výkonových součástí. Tato ložiska se například využívají v lékařských a laboratorních přístrojích a pro uložení setrvačnicků.

1.2 Aktivní magnetická ložiska

Aktivní stejně jako pasivní magnetická ložiska využívají přitažlivou sílu ovšem v tomto případě vytvářenou elektromagnety. Pro zajištění stabilní polohy hřídele – rotoru je nutné zajistit snímání polohy hřídele a pomocí zpětnovazebního řízení budít elektromagnety řízením budícího proudu. Na Obr. 1.2.1 je zobrazen princip činnosti aktivního magnetického ložiska pro jednu osu – v tomto případě vertikální. Mechanická konstrukce je takováto: rotor, který musí být z feromagnetického materiálu, je obklopen stacionárními elektromagnety v obou radiálních osách. Vzduchová mezera mezi rotorem a statorem bývá 0,5 až 2 mm. Systém je dále doplněn snímače pro sledování polohy hřídele, které jsou umístěné na statoru. Za normálních provozních podmínek je rotor ideálně vystředěn a po celém obvodu má stejnou vzduchovou mezera mezi rotorem a statorem. V případě, že se rotor vychýlí ze středové polohy, snímač odešle signál do řídicí jednotky s DSP, která porovnává signál s referenční hodnotou, jenž odpovídá středové poloze hřídele. Řídicí jednotka posílá požadavek na změnu buzení do obvodů pro řízení budícího proudu elektromagnetů. Změna proudů zajistí, aby magnetické pole zesílilo, nebo případně zesláblo a rotor se tedy vrátil zpět do středové polohy. Pro ideální funkci je nutné, aby řízení probíhalo velice rychle a v reálném čase, vzhledem k velikosti vzduchové mezery mezi rotorem a statorem.

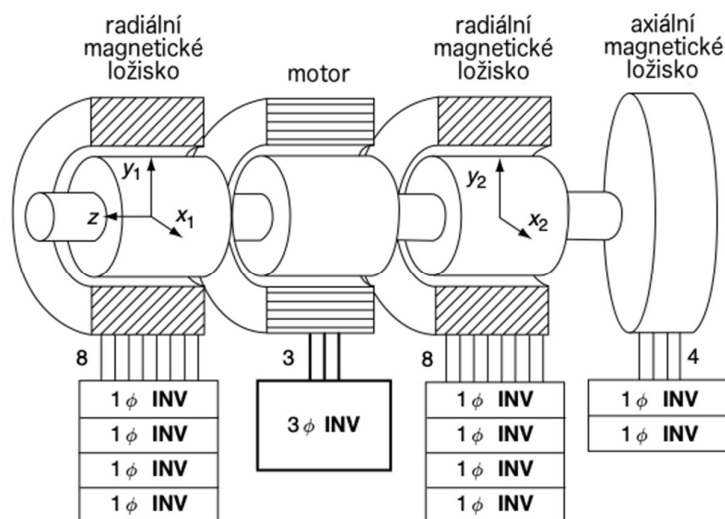


Obr. 1.2.1 Základní princip aktivního magnetického ložiska [17]

Při provozu aktivního magnetického ložiska působí na rotor dva typy zatížení, dynamické zatížení a statické zatížení. Mechanické statické zatížení stroje zahrnuje: prvky systému, hmotnost rotoru atd., Zatímco dynamická zatížení mohou zahrnovat: vibrace, změna zatížení atd. Standardně je předpínací proud nastaven na překonání statického zatížení a udržení rotoru ve středové pozici, avšak DSP je schopen snímat polohu při frekvenci až 10 kHz. Pokud se tedy rotor začne vychylovat ze středové polohy, dokáže DSP ve velmi krátkém čase reagovat úpravou hodnoty budících proudů elektromagnetů a vrátit rotor do své původní polohy. Z obrázku je zřejmé, že v reálné konstrukci musíme radiálně řídit polohu hřídele ve dvou osách. [2] [6]

1.2.1 Magnetická ložiska bez integrovaného pohonu

Na Obr. 1.2.2 je schéma typické konstrukce stroje s motorem vybaveného magnetickými ložisky. Hřídel je uložena ve dvou magnetických ložiskách, které jsou umístěny na krajích. Mezi nimi je motor. Radiální magnetická ložiska působí na hřídel radiálními silami ve dvou osách. Úroveň jednotlivých magnetických sil musí být řízeny pomocí zpětné vazby tak, aby poloha hřídele setrvala ve středu vrtání statoru.



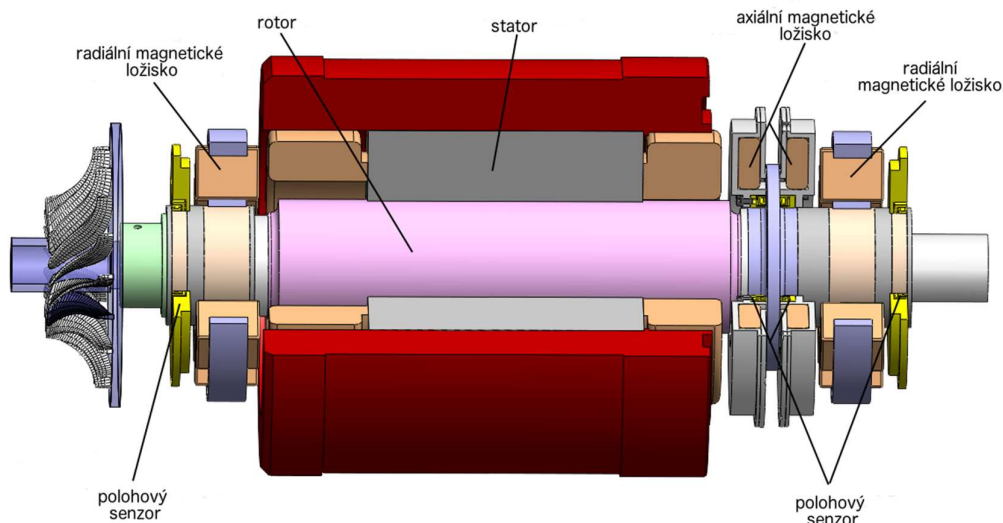
Obr. 1.2.2 Schéma motoru s magnetickými ložisky [1]

Levé radiální magnetické ložisko musí být řízeno ve dvou osách x_1 a y_1 . Pravé radiální magnetické ložisko musí být řízeno také ve dvou osách x_2 a y_2 . Poloha hřídele v ose z , je řízena magnetickou silou vytvářenou axiálním magnetickým ložiskem. Dohromady tedy je nutné řídit hřídel v pěti osách: x_1 , y_1 , x_2 , y_2 a z . [1]

Radiální magnetické ložisko musí mít ve statoru nejméně čtyři vinutí. Dvě cívky uložené v ose x a dvě cívky v ose y. Při průchodu proudu cívkou vzniká magnetické pole, a tedy magnetická přitažlivá síla. Výsledná radiální síla ve směru osy x je rozdílem přitažlivých radiálních sil vytvářených cívkami v ose x, případně silami vznikajícími zátěžným momentem na hřídeli, vibracemi apod.

Proudy protékající vinutím cívek magnetických ložisek jsou regulovány výkonovými elektronickými obvody. Většinou se používají jednofázové střídače napětí. Jednofázový střídač může regulovat jeden proud ve vinutí, takže v radiálním magnetickém ložisku jsou potřebné čtyři jednofázové střídače s osmi výstupními vodiči. [1]

Magnetickou sílu v axiálním směru vytváří dvě vinutí axiálního magnetického ložiska. Pro toto ložisko je nutné připojit dva jednofázové střídače, které řídí proudy ve vinutí a tím tedy magnetickou sílu v axiálním směru.

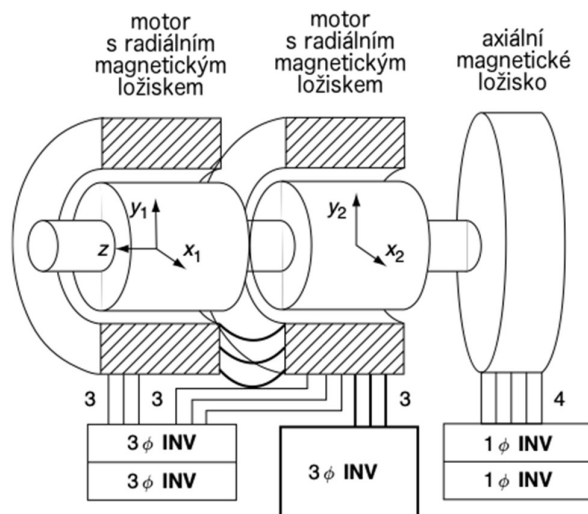


Obr. 1.2.3 Nákres motoru s magnetickými ložisky [19]

Na Obr. 1.2.3 je reálná konstrukce turbo-dmychadla společnosti FOSHAN GENESIS AMB TECH CO., LTD. Jedná se o systém s motorem na hřídeli uložené v magnetických ložiskách. Motor je umístěn mezi dvěma radiálními magnetickými ložisky. Axiální magnetické ložisko je na rozdíl od schématu umístěno vedle motoru.

1.2.2 Pohony s integrovanými magnetickými ložisky

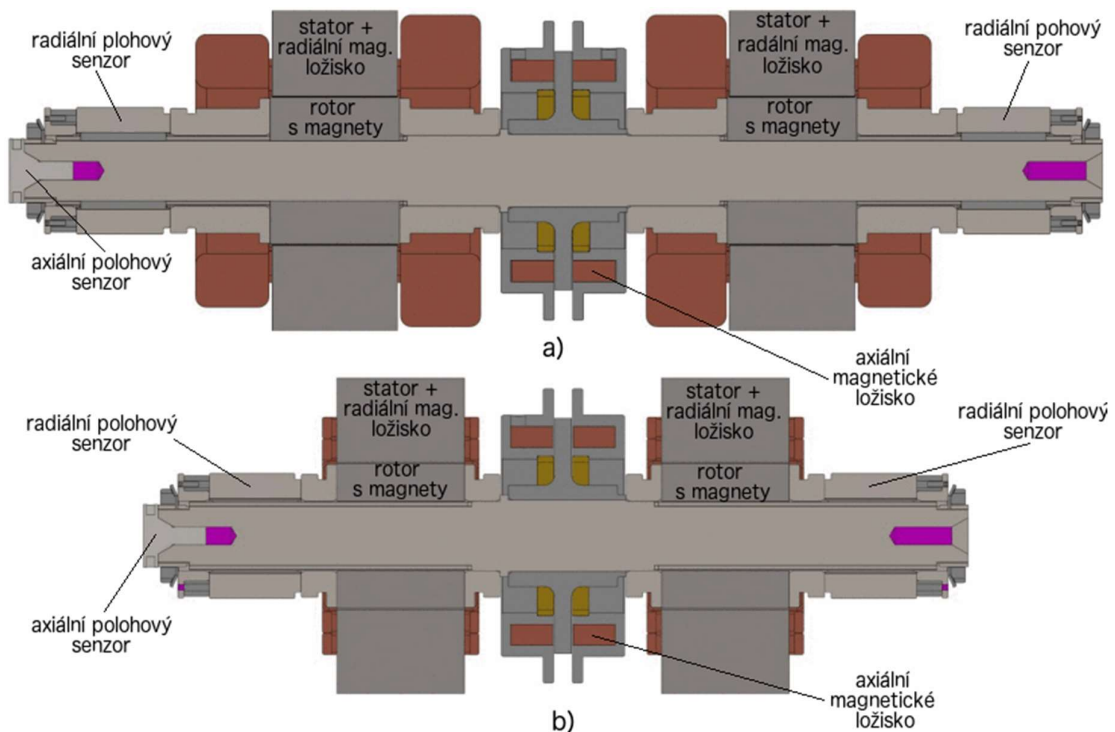
Protože je v současnosti tlak na zmenšování rozměrů, a snižování nákladů, byly vyvinuty a zkonstruovány stroje, u kterých je motor a magnetické ložisko integrováno do jednoho celku. Tato jednotka vytváří radiální síly a točivý moment. Celkový hnací moment je dvojnásobkem jmenovitého točivého momentu jednotky. Každý stroj má potom nejméně 2 takové jednotky.



Obr. 1.2.4 Grafické zobrazení hustoty a směru magnetického toku [1]

Pro tyto stroje je typické, že mohou mít menší délku hřídele, což má za následek vysoké kritické rychlosti a stabilnější provoz. Nízkou cenu, protože používají menší počet střídačů. Zároveň mají menší rozměry a používají se také levnější trojfázové střídače. Velkou výhodou těchto strojů je vyšší až dvojnásobný výkon i při zachování stejné délky hřídele. [1]

Na Obr. 1.2.5 je konstrukce stroje se dvěma motory s integrovaným magnetickým ložiskem se dvěma oddělenými vrstvami vinutí pro vytváření točivého momentu a radiální síly. Mezi motorovými jednotkami je ještě uloženo axiální magnetické ložisko. Díky této konstrukci lze polohu rotoru ovládat v 5 osách. Obr. 1.2.5 a) ukazuje strukturu rotoru laboratorního prototypu stroje s distribuovanými vinutími. Na Obr. 1.2.5 b) je zobrazen stroj s vinutím uloženým v drážkách magnetického obvodu. V obou strojích je použita stejná struktura rotoru IPM.



Obr. 1.2.5 Nákras motorů s integrovanými magnetickými ložisky a) s vnějším vinutím b) s vinutím uloženým v drážkách magnetického obvodu [7]

Použitím konstrukce s vnějším vinutím se celková délka stroje zvětšuje. Dlouhá konstrukce stroje snižuje frekvence ohýbání rotoru. To ve srovnání s pevným rotorem vytváří další požadavky na ovládání stroje. Použitím konstrukce s vinutím uloženým v drážkách magnetického obvodu lze významně zkrátit axiální délku, což je vidět na Obr. 1.2.5. Poměr délky stroje ku jeho průměru se označuje poměr LD. U stroje s vnějším vinutím je poměr LD 7,369 a pro stroj s vinutím uloženým v drážkách je 5,392, poměr LD je tedy snížen o 26,8 %. Snížená axiální délka také snižuje hmotnost rotoru a tím i sílu potřebnou k levitaci rotoru v ustáleném stavu. [7] [8]

1.2.3 Snímače polohy, řídicí obvody a související technologie

Vývoj výkonové elektroniky významně přispěl k vývoji motorů s magnetickými ložisky. Regulace proudu v reálném čase je možná díky vysokofrekvenčním tranzistorům IGBT a MOSFET. Dále také snímače polohy magnetického uložení, které vyžadují relativně vysokou vzorkovací frekvenci, protože magnetická síla je ze své podstaty nestabilní, proto je pro její stabilizaci nezbytný zpětnovazební regulátor. Požadovaná velikost vzorkovací frekvence závisí na mechanické setrvačnosti a tuhosti konstrukce. Z praktických a ekonomických důvodů se nejčastěji měří výchylka rotoru pouze

v osách x, y a z. Tento systém vyžaduje tedy 5 snímačů polohy, 2 pro měření výchylky v ose x, 2 pro měření výchylky v ose y a 1 pro měření v ose z.

Na snímače polohy rotoru jsou kladeny vysoké nároky. Musí mít malé rozměry, protože ve statoru není příliš místa. Musí být odolné vysokým teplotám, protože stator se při průtoku proudu zahřívá, často na velmi vysoké teploty a přitom musí mít velmi vysokou rychlost snímání a přesto výkonné a spolehlivé. V praxi se nejčastěji využívají indukční, kapacitní a optické snímače. Často je snaha snímače umístit co nejbližší magnetickým ložiskům. V případě radiálních ložisek je možné snímače zabudovat do mezer mezi cívkami. Citlivost a přesnost měření je závislá na přesnosti a kvalitě povrchu rotoru.

Indukční snímače mohou detekovat prakticky veškerý mechanický pohyb. Proti jiným metodám a sensorům se indukční snímače vyznačují hlavně velkou odolností proti nepříznivým okolním pracovním podmínkám, jako jsou prach, olej, voda, vlhkost, elektromagnetické rušení, teplota. Proto je lze přímo, bez přídavné izolace apod., použít na exponovaných místech vystavených nepříznivým vlivům. Indukční snímač pracuje na principu deformace magnetického pole vytvořeného LC členem snímače, které zpětně vlivem vzájemné indukčnosti ovlivňuje indukčnost cívky v LC členu. [9].



Obr. 1.2.6 Příklad indukčních snímačů [9]

Kapacitní snímače přiblížení zvládnou i některé aplikace méně vhodné pro indukční princip detekce. Zatímco indukční snímače mohou reagovat jen na elektricky vodivé materiály, kapacitní snímače detekují jak ty nevodivé, chovající se jako dielektrikum, tak i ty vodivé. U nich se pak uplatňuje jako dielektrikum vzduch mezi snímačem a detekovanou kovovou ploškou. Hlavním aktivním prvkem kapacitního snímače je kotoučová elektroda uvnitř válcového pouzdra, které působí i jako stínění. Vytvářejí tak kondenzátor, který má určitou základní kapacitu, která se pak dále mění se změnou dielektrika - přiblížení detekovaného objektu. Kapacitní snímač je pak doplněn rezistorem, se kterým je součástí RC oscilátoru. Ten je tedy rozladován právě změnou kapacity aktivního snímače. [10]

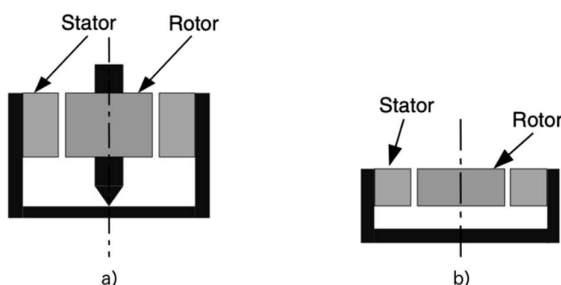
Optický snímač má nejpřesnější měření ze všech snímačů. Nejčastěji používá laser. Ale je také jedním z nejdražších snímačů, který navíc vyžaduje větší nároky na umístění. Snímání není ovlivněno magnetickým polem. Polohu rotoru lze detekovat buď paprskem, který je přerušován výchylkou rotoru, nebo se snímá odraz paprsku od rotoru. Oba způsoby jsou velice přesné. Měření je velice citlivé na čistotu měřeného prostředí a povrch rotoru. [11]

1.2.4 Magnetická ložiska typické uspořádání

V této kapitole jsou popsána typická uspořádání pro motor a generátor s magnetickými ložisky: dvouosé aktivní magnetické zavěšení, pětiosé zavěšení a kombinace konvenčních magnetických ložisek a mechanických ložisek.

Na Obr. 1.2.7 a) je zobrazeno dvouosé magnetické zavěšení magnetickými silami mezi rotorem a státorem. Ve spodní části hřídele je uloženo mechanické ložisko pro axiální a radiální polohování konce hřídele. Tato konstrukce je vhodná pro vertikální hřídele.

Na Obr. 1.2.7 b) je hřídel odstraněna. Dvouosé aktivní polohování poskytuje pasivní

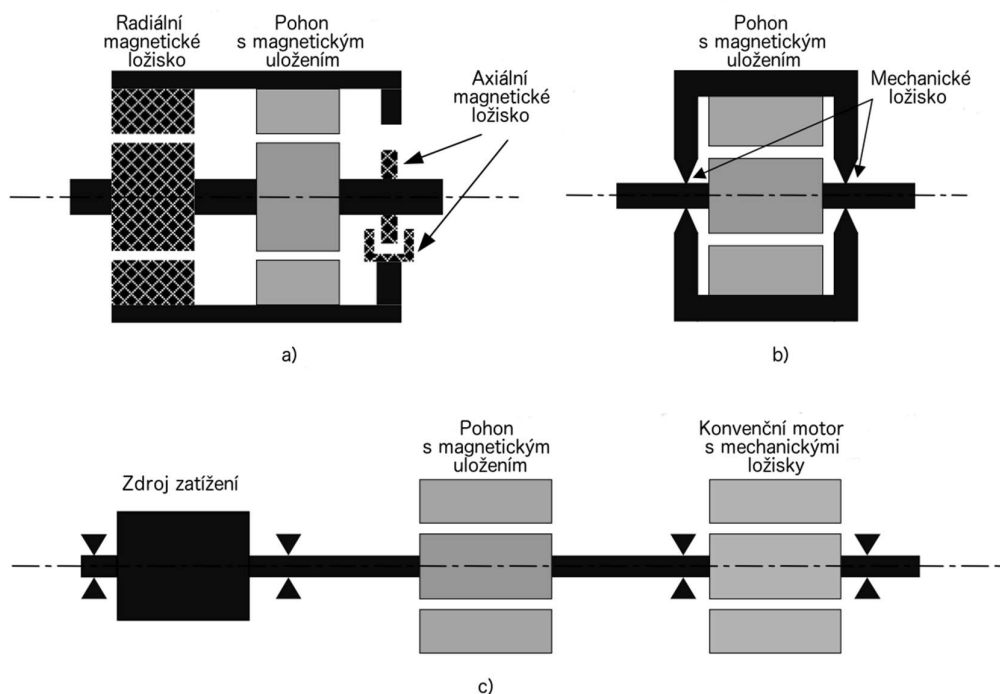


magnetické zavěšení při naklápění a axiálním pohybu, proto je omezena délka axiálního jádra pro pasivní zavěšení. Se správným provedením však byly realizovány kompaktní a levná magnetická ložiska tohoto typu.

[1]

Obr. 1.2.7 Dvouosé varianty magnetického zavěšení
[1]

Obr. 1.2.8 zobrazuje uspořádání pětiosého aktivního zavěšení. K vytvoření radiálních sil ve čtyřech osách jsou zapotřebí dva pohony s magnetickým uložením. Pro polohování páte ose je nutné axiální magnetické ložisko. Na Obr. 1.2.8 a) jsou na hřídeli dva rotory, které se otáčejí každý ve svém statoru. Tato konstrukce je vhodná například pro čerpadla nebo kompresory. Na Obr. 1.2.8 b) je rotor vně obou statorů. Tato konstrukce je vhodná pro setrvačníky nebo pro digitální video disky (DVD) a pevné disky (HDD).

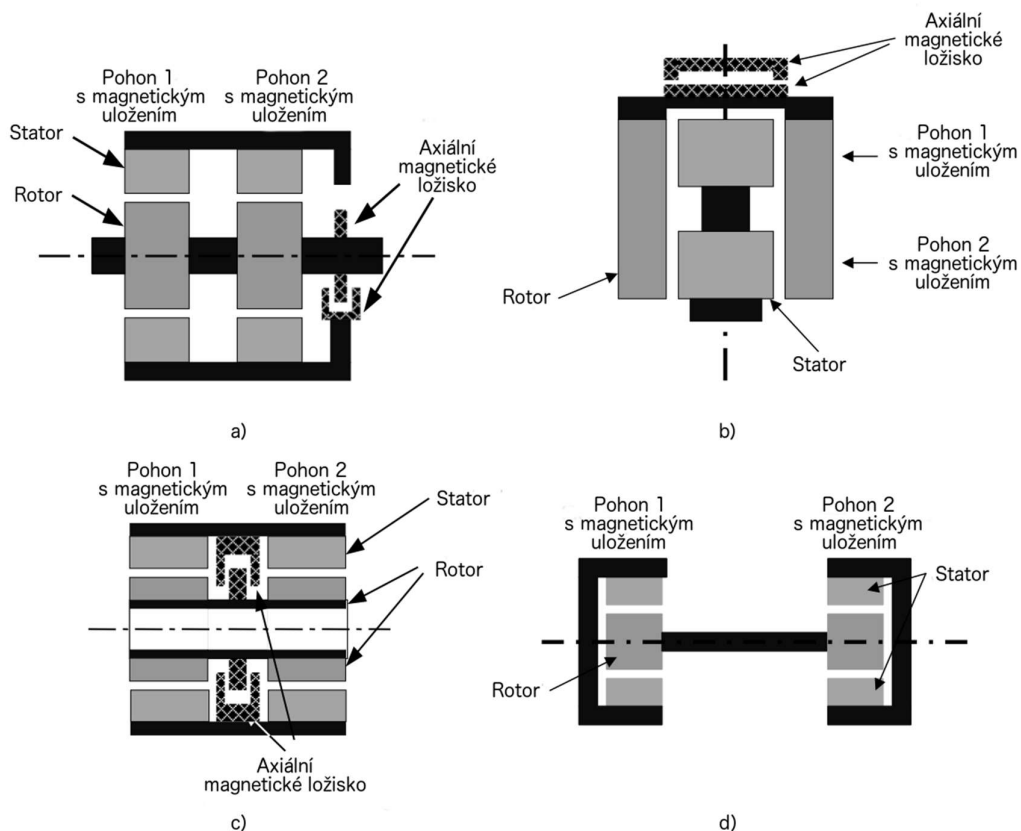


Obr. 1.2.8 Pětiosé varianty magnetického zavěšení [1]

Uspořádání na Obr. 1.2.8 c) je podobná konstrukce jako Obr. 1.2.8 a). Hřídel je dutá, což umožňuje průtok dolů středem, a axiální ložisko je umístěno mezi pohony s magnetickým uložením pro plné pětiosé zavěšení. Tato konstrukce je vhodná pro průtokoměry, čerpadla, vřetena atd. Na Obr. 1.2.8 a) – c) je použito axiální magnetické ložisko. V některých případech však není nutné. Pokud je axiální síla malá nebo přesné axiální polohování není nutné. V těchto případech může být axiální polohování pasivní, taková konstrukce je znázorněna na Obr. 1.2.8 d), kde jsou rotory v jednotkách s magnetickým uložením přirozeně s magnetickým uložením generují značný magnetický tok, vyvíjí hřídel dostatečnou přitahovány k jejich axiálním středům

magnetickými silami. Protože jednotky pružnou sílu při axiálním pohybu, aby byl pohon axiálně stabilní. [1]

Na Obr. 1.2.9 a) je vlevo aktivní radiální magnetické ložisko. Vpravo je pohon s aktivním uložením a za ním axiální magnetické ložisko. Toto uspořádání je vhodné pro velké radiální silové zatížení připojené k levému konci hřídele.



Obr. 1.2.9 Varianty konstrukce s kombinací mechanických a magnetických ložisek [1]

Na Obr. 1.2.9 b) a c) jsou zobrazeny varianty konstrukce s kombinací mechanických a magnetických ložisek. Na Obr. 1.2.9 b) jsou mechanická ložiska umístěna na obou koncích pohonu s aktivním uložením. Při extrémně vysokých otáčkách dochází k ohýbání hřídele a vzniku vibrací. Pohon s aktivním uložením může tyto vibrace potlačit a nést hmotnost hřídele. Na Obr. 1.2.9 c) je konstrukce, kde pohon s aktivním uložením slouží k potlačení zatížení dlouhého hřídele. [1]

2 Návrh aktivního magnetického ložiska

Jak už bylo popsáno v předešlých kapitolách princip funkce magnetických ložisek je ve využití přitažlivé nebo odpudivé síly na feromagnetický materiál. Jedná se tedy o mechanickou pružnou vazbu mezi pevnou částí statorem a pohyblivou částí rotorem. Za předpokladu otáčení rotoru nezávisle na magnetickém ložisku, pak musíme vyřešit stabilitu pro 5 stupňů volnosti. Pro stabilizaci levitace je nutné navrhnout minimálně kombinaci 2 radiálních a 1 axiálního ložiska, přičemž předpokládáme, že obě radiální ložiska budou stejná. V následujícím textu se budeme zabývat radiálního ložiska. [12]

Při návrhu magnetického ložiska se řeší návrh rotoru, statoru a parametry pro naddimenzování zesilovače a zároveň je cílem najít co nejmenší rozměry magnetického obvodu a zároveň dodržet požadované parametry (zejména dostatečnou sílu, oteplení, indukci atd.). Pro návrh magnetického ložiska byla zvolena reálná hřídel z katalogu firmy Siemens, dále jsou uvedeny její základní parametry, ostatní se musí dopočítat [8].

Pro návrh magnetického ložiska byly stanoveny tyto základní parametry:

Průměr hřídele	$d_{rotor} = 45 \text{ mm}$
Délka hřídele	$l_{rotor} = 721 \text{ mm}$
Váha hřídele	$m_{rotor} = 35 \text{ kg}$

Pro následující výpočet magnetického ložiska bude proveden dle [11] Dizertační práce pana Lukáše Bartoně – Znalostní podpora pro návrh systému aktivního magnetického ložiska.

2.1 Rotor

2.1.1 Pevnostní výpočet rotoru

Nebyl uvedený materiál, ze kterého je vyrobena hřídel, budeme proto předpokládat, že nejvýhodnější bude na zadanou hřídel nalisovat kroužky z válcovaného plechu s vysokou permeabilitou. Nalisované kroužky zároveň musí být izolované kvůli snížení zrát vířivými proudy.

Maximální otáčky rotoru jsou omezeny jeho pevností. Magnetické ložisko navrhujeme pro asynchronní motor, proto jsem pro rotor vybral uhlíkovou ocel AISI 1010, která má velmi dobré feromagnetické vlastnosti. Zároveň jmenovité otáčky asynchronního motoru jsou 1467 rpm, pro výpočet tedy budeme uvažovat i s rezervou otáčky 2000

rpm. Nejprve bychom měli vypočítat tečné a radiální napětí v rotoru, deformace nalisovaných kroužků a provést pevnostní kontrolu samotné hřídele. Pro takto malé otáčky ale můžeme výpočty mechanického namáhání a deformací klidně vynechat. Při takto malých otáčkách odhaduji dle [11] maximální deformaci kroužků v řádech 10^{-3} mm. Tyto výpočty by měli význam při požadovaných otáčkách o řád vyšších.

Parametry materiálu rotorových kroužků - měkká uhlíková ocel AISI 1010

$$B_{\text{sat}} = 2,15 \text{ T}$$

$$B_r = 0,8 \text{ T}$$

$$\mu_r = 2420 - 3800$$

$$\text{max. teplota} = 740^\circ\text{C}$$

$$R_2 = 30,5 \text{ mm}$$

2.1.2 Výpočet potřebné radiální síly ložiska

Nejdůležitějším parametrem aktivního magnetického ložiska je jeho síla. Síla ložiska musí zajistit nesení vlastní váhy rotoru a zároveň musí být dostatečná na udržení polohy rotoru i při chodu stroje. Potřebná radiální síla se skládá ze síly působící proti tíze rotoru F_g a z radiální síly způsobené mechanickým zatížením stroje $F_{r\text{zat}}$. Tato síla nebyla určena proto s ní nebude počítáno, ale při návrhu magnetického ložiska konkrétního stroje je nutné u výpočtu této síly začít [5].

Protože $F_{r\text{zat}}$ nebyla určena vyjdeme z obecného doporučení, že u radiálních magnetických ložisek se uvažuje na eliminování dynamických jevů při chodu stroje dvě třetiny síly a jedna třetina síly na podporu vlastní hmotnosti. Pro běžné aplikace se tedy uvažuje trojnásobek tíhové síly. Tento předpoklad platí pouze u strojů s horizontálním uložením hřídele [13].

Dalším předpokladem je, že rotor bude rovnoměrně nesen 2 aktivními ložisky, proto požadovaná síla jednoho ložiska bude polovina požadované síly.

Výpočet síly působící proti tíze rotoru:

$$F_g = m_{\text{rotor}} \cdot g \quad (2.1)$$

$$F_g = 35 \cdot 9,81 \text{ N}$$

$$F_g = 343,35 \text{ N}$$

Celkovou radiální síla:

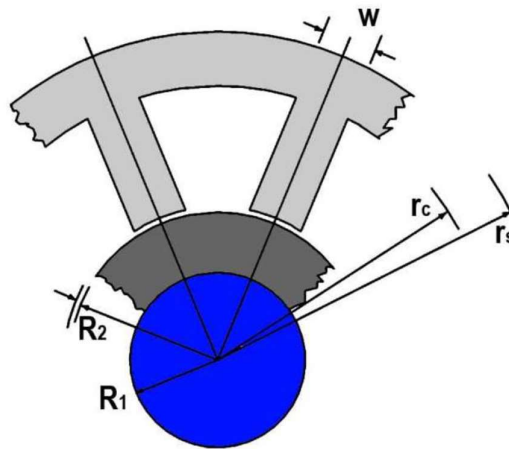
$$F_{\text{rad}} = \frac{3}{2} \cdot F_g \quad (2.2)$$

$$F_{rad} = \frac{3}{2} \cdot 343,35 \text{ N}$$

$$F_{rad} = 515,03 \text{ N}$$

2.2 Statorová část – výpočet nosnosti radiálního ložiska

Abychom mohli určit velikost radiálního ložiska, musíme určit počet pólů, ale zároveň musíme vycházet ze zadaného průměru rotoru. Dle literatury se považuje 3 pólové ložisko za ložisko s nejnižším počtem pólů. Tato konstrukce ale není příliš využívána. Pro řízení lze nejnázve použít 8-mi pólové ložisko se dvěma lokálními magnetickými obvody (LMO), které jsou umístěné proti sobě v obou řídicích osách. Výrobci však při návrhu a konstrukci ložisek nejvíce preferují 12-ti pólové ložisko, jehož výhodou je stálý provoz i při selhání jednoho vinutí nebo zesilovače. Pro použití více pólových ložisek však musí mít rotor dostatečně velký průměr. Pokud budeme zvětšovat průměr rotoru, budeme však zároveň snižovat maximální možné otáčky [11].



Obr. 2.2.1 Rozměry ložiska [11]

Jednotlivé rozměry statorových plechů magnetického obvodu bychom měli zvolit podle doporučených poměrů uvedených v literatuře [5]: vnější poloměr statoru r_s by měl být o něco větší než dvojnásobek vnitřního poloměru statoru R_2 , šířka pólu w by měla odpovídat poloviční pólové rozteči $\tau_{p,1/2}$, šířka jha statoru má být shodná s rozměrem pólu w . Na Obr. 2.2.1 je zobrazen řez ložiskem s uvedenými rozměry.

Dle zadání zde bude vypočteno 8-mi i 12-ti pólové ložisko a na závěr budou výsledky porovnány a zhodnoceny.

2.2.1 Výpočet vzduchové mezery

Velikost vzduchové mezery přímo ovlivňuje výslednou sílu magnetického ložiska a zároveň rozměry statorové části. Pokud zvolíme velkou vzduchovou mezeru, bude to negativně ovlivňovat velikost magnetického odporu a bude nutné zajistit větší magnetické napětí, aby ji magnetický tok překonal. To přímo ovlivňuje rozměry a váhu statorové části, případně to může negativně ovlivňovat i oteplení statorové části.

Na druhé straně musíme volit vzduchovou mezeru podle maximální výchylky rotoru x_{max} . Tuto výchylku musíme uvažovat 2 krát, protože rotor se může vychýlit ze středové polohy na obě strany. Proto budeme uvažovat pro výpočet šířku vzduchové mezery [13]:

$$g_0 \approx 2x_{max} \quad (2.3)$$

Protože radiální magnetické ložisko navrhujeme pro reálný stroj a není uvedena maximální výchylka rotoru, budeme uvažovat doporučovanou velikost $g_0=0,5$ mm.

2.2.2 Velikost statoru 8-mi pólového ložiska

Pro návrh velikosti statorové části je podstatný správný návrh provedení cívek, které vytváří magnetomotorickou sílu. Jádru bude složeno z lisovaných plechů M350-50A a na něm bude uloženo vinutí. Délka paketu zásadně ovlivňuje výslednou sílu od pólu, předběžně byla zvolena $l_{Fe}=50$ mm a v následných výpočtech bude ověřena správnost volby. f je poměr prostoru pro paket statorových plechů a prostoru pro cívku v obvodu statoru. Tento poměr je nutné volit uvážlivě. Vysoký poměr f neoponechá dostatečný prostor pro cívku, tím se sníží počet možných závitů a nedosáhne se velké magnetické indukce. Pokud zvolíme nízké f sníží se šířka pólu a pro zachování plochy pólu dojde k úměrnému zvětšení délky ložiska.

Z hlediska využití prostoru cívky mědi je téměř jedno, zda použijeme vodič malého nebo velkého průměru. Poměr plochy mědi v cívce ku poměru plochy jádra cívky se označuje se k_{pcu} a pro vodiče kruhového průřezu se většinou pohybuje okolo 0,5-0,7. Z hlediska oteplování to již neplatí, protože vodiče malých průřezů nemohou vést velké proudy. Obecně doporučená maximální proudová hustota pro lakovaný měděný vodič teplotní třídy 200°C je 6 A/mm² [11].

Šířku plochy cívky c vypočteme z obvodu rotoru:

$$c = \frac{\pi \cdot 2R_2 \cdot (1 - f)}{2 \cdot 2p} \quad (2.4)$$

$$c = \frac{\pi \cdot 61 \cdot (1 - 0,5)}{2 \cdot 8} \text{ mm}$$

$$c = 6 \text{ mm}$$

Šířku pólu ložiska w vypočteme:

$$w = \frac{\pi \cdot 2R_2 \cdot f}{2p} \quad (2.5)$$

$$w = \frac{\pi \cdot 61 \cdot 0,5}{8} \text{ mm}$$

$$w = 12 \text{ mm}$$

Plochu pólu A snadno vypočteme:

$$A = w \cdot l_{Fe} \quad (2.6)$$

$$A = 12 \cdot 50 \text{ mm}^2$$

$$A = 600 \text{ mm}^2$$

Poloměr r_s vypočteme dle pravidla uvedeného v úvodu kapitoly:

$$r_s = 2,2 \cdot R_2 \quad (2.7)$$

$$r_s = 2,2 \cdot 30,5 \text{ mm}$$

$$r_s = 67,1 \text{ mm}$$

Poloměr r_c vypočteme:

$$r_c = r_s - w \quad (2.8)$$

$$r_c = 67,1 - 12$$

$$r_c = 55,1 \text{ mm}$$

Výšku pólu ložiska h_p vypočteme:

$$h_p = r_c - g_0 - R_2 \quad (2.9)$$

$$h_p = 55,1 - 0,5 - 30,5 \text{ mm}$$

$$h_p = 24,1 \text{ mm}$$

Dále musíme zvolit, zda bude možné cívku sejmout z pólového nástavce – bude po celé délce stejně široká nebo ji nebude možné sejmout z pólového nástavce – bude se tedy směrem od středu stroje rozšiřovat a vyplní celou polovinu mezery mezi jednotlivými

póly. Pro další výpočet jsem se rozhodl pro rozebíratelnou cívku, která by měla vytvořit díky menšímu počtu závitů než cívka nerozebíratelná menší sílu od pólu [11].

Plochu zvolené cívky A_c vypočteme:

$$A_c = w \cdot (r_c - R_2) \quad (2.10)$$

$$A_c = 12 \cdot (55,1 - 30,5) \text{ mm}^2$$

$$A_c = 295,2 \text{ mm}^2$$

Pro zjištění skutečné plochy cívky A_c^* musíme započíst vliv návinnu a izolace. Pro činitel plnění mědi k_{pcu} jsem zvolil hodnotu 0,6 a následně vypočteme:

$$A_c^* = k_{pcu} \cdot A_c \quad (2.11)$$

$$A_c^* = 0,6 \cdot 295,2 \text{ mm}^2$$

$$A_c^* = 177,12 \text{ mm}^2$$

Pro vinutí jsme zvolili vodič s průměrem d_{cu} 1mm. Průměr vodiče s izolací $d_{cu,izolace}$ je 1,094 mm. Nyní můžeme vypočítat počet závitů cívky:

$$N = \frac{4 \cdot A_c^*}{\pi \cdot d_{cu}} \quad (2.12)$$

$$N = \frac{4 \cdot 177,12}{\pi \cdot 1}$$

$$N \doteq 225$$

Pro výpočet maximálního proudu vodičem I_{max} musíme stanovit maximální proudovou hustotu. Jak jsem psal v úvodu kapitoly dle literatury je doporučená maximální proudová hustota pro měděný vodič 6 A/mm². Z důvodu snížení možnosti zahřívání stroje zvolíme maximální proudovou hustotu $\sigma_{max}=3$ A/mm², potom může vypočítat:

$$I_{max} = \sigma_{max} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{cu}}{2}\right)^2 \quad (2.13)$$

$$I_{max} = 3 \cdot \pi \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2 \text{ A}$$

$$I_{max} = 2,356 \text{ A}$$

Nyní ještě musíme ověřit oteplení vinutí při průchodu proudem I_{max} . Za počáteční teplotu budeme uvažovat 20°C . Ustálenou teplotu předpokládejme 80°C . Nejprve musíme vypočítat střední délku závitu:

$$l_{\text{vodič,štr}} = 2 \cdot w + 2 \cdot l_{Fe} + 8 \cdot \frac{c}{2} \quad (2.14)$$

$$l_{\text{vodič,štr}} = 2 \cdot 12 + 2 \cdot 50 + 8 \cdot \frac{6}{2} \text{ mm}$$

$$l_{\text{vodič,štr}} = 148 \text{ mm}$$

Celková délka vodiče vinutí tedy bude:

$$l_{\text{vodič}} = N \cdot l_{\text{vodič,štr}} \quad (2.15)$$

$$l_{\text{vodič}} = 225 \cdot 148 \text{ mm}$$

$$l_{\text{vodič}} = 33300 \text{ mm}$$

Nyní vypočteme průřez vodiče vinutí:

$$S_{\text{vodič}} = \pi \cdot \left(\frac{d_{cu}}{2}\right)^2 \quad (2.16)$$

$$S_{\text{vodič}} = \pi \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2 \text{ mm}^2$$

$$S_{\text{vodič}} = 0,785 \text{ mm}^2$$

Dále vypočteme odpor vodiče vinutí jednoho pólu statoru při teplotě 20°C . Dle zdroje [14] je měrný odpor mědi při 20°C $\rho_{Cu,20} = 1,75 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$:

$$R_{\text{vodič},20} = \rho_{Cu,20} \cdot \frac{l_{\text{vodič}}}{S_{\text{vodič}}} \quad (2.17)$$

$$R_{\text{vodič},20} = 1,75 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{33,3}{0,785 \cdot 10^{-6}} \Omega$$

$$R_{\text{vodič},20} = 0,742 \Omega$$

Potom je třeba vypočítat nárůst teploty při provozu. Předpokládáme ustálenou teplotu 80°C. Dle zdroje [14] je měrný odpor mědi při 80°C $\rho_{Cu,80}=2,378 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$. Výsledný odpor při teplotě 80°C se vypočte dle vztahu:

$$R_{vodič,80} = \rho_{Cu,80} \cdot \frac{l_{vodič}}{S_{vodič}} \quad (2.18)$$

$$R_{vodič,80} = 2,378 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{33,3}{0,785 \cdot 10^{-6}} \Omega$$

$$R_{vodič,80} = 1,009 \Omega$$

Napájecí napětí bude stejnosměrné a jeho maximální hodnota pro jedno vinutí se vypočte dle ohmova zákona:

$$U_{zdroje} = R_{vodič,80} \cdot I_{max} \quad (2.19)$$

$$U_{zdroje} = 1,009 \cdot 2,356 V$$

$$U_{zdroje} = 2,377 V$$

Nakonec vypočteme ztráty ve vinutí jednoho pólu:

$$P_z = R_{vodič,80} \cdot I_{max}^2 \quad (2.20)$$

$$P_z = 1,009 \cdot 2,356^2 W$$

$$P_z = 5,6 W$$

Magnetické napětí F_m bylo vypočteno podle vztahu:

$$F_m = N \cdot I \quad (2.21)$$

$$F_m = 225 \cdot 2,356 A$$

$$F_m = 530,1 A$$

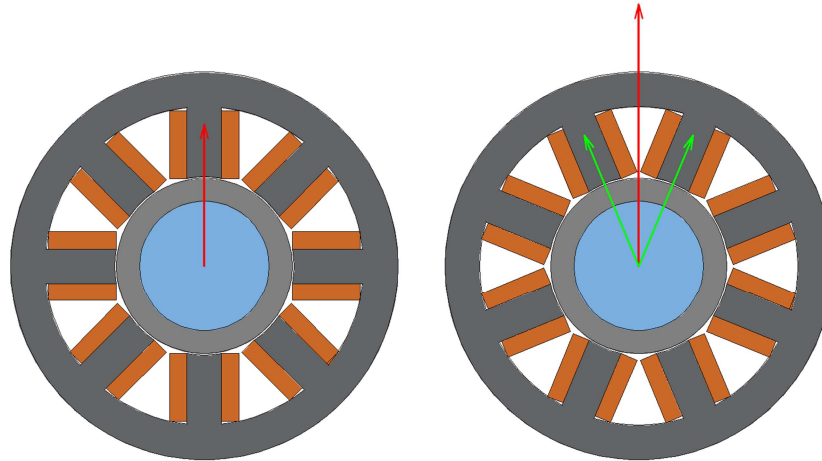
Magnetický obvod statoru bude složen z lisovaných plechů z materiálu M350-50A. V datasheetu, který je v příloze, je uvedena maximální magnetická indukce materiálu $B_{max} = 1,8 T < B_{sat}$. Následujícím výpočtem ověříme maximální hodnotu nasycení pro navržené ložisko:

$$B_{nas} = 2 \cdot \frac{\mu_0 N I_{max}}{2g_0} \quad (2.22)$$

$$B_{nas} = 2 \cdot \frac{\mu_0 \cdot 225 \cdot 2,356}{2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} T$$

$$B_{nas} = 1,332 T$$

Výpočet síly celého ložiska musíme rozdělit na jednotlivé části (lokální magnetické obvody LMO) a vypočítat sílu od těchto LMO. Zároveň musíme výpočet síly od jednoho LMO zjednodušit. Pro 8-mi pólové ložisko platí, že se magnetický obvod statoru navrhuje tak, aby LMO nebyl ve svislé ose pod rotorem, ale aby byl natočen o 45° . Pro jeho řízení ve svislé nebo vodorovné ose následně musíme použít vždy pár LMO, takže výsledná síla se bude rovnat vektorovému součtu síly dvou LMO [11].



Obr. 2.2.2 Osmipólové ložisko v základní a v doporučené poloze [11]

Maximální síla LMO při nulové výchylce a maximálním proudu:

$$F_{max,x=0} = \frac{1}{2} \mu_0 N^2 A \frac{I_{max}^2}{g_0^2} \cdot \cos 22,5^\circ \quad (2.23)$$

$$F_{max,x=0} = \frac{1}{2} \mu_0 \cdot 225^2 \cdot 600 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{2,356^2}{0,0005^2} \cdot \cos 22,5^\circ \text{ N}$$

$$F_{max,x=0} = 391,49 \text{ N}$$

Maximální síla reagující na gravitační sílu při nulové výchylce a maximálním proudu pro stroj v doporučené poloze:

Výsledná maximální síla aktivního magnetického ložiska je větší než požadovaná síla

$$FG_{max,x=0} = 2 \cdot \cos 22,5^\circ \cdot \frac{1}{2} \mu_0 N^2 A \frac{I_{max}^2}{g_0^2} \cdot \cos 22,5^\circ \quad (2.24)$$

$$FG_{max,x=0} = 2 \cdot \cos 22,5^\circ \cdot \frac{1}{2} \mu_0 \cdot 225^2 \cdot 600 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{2,356^2}{0,0005^2} \cdot \cos 22,5^\circ \text{ N}$$

$$FG_{max,x=0} = 723,38 \text{ N}$$

F_{rad} vypočtená vztahem (2.2)

2.2.3 Velikost statoru 12-ti pólového ložiska

Pro návrh 12-ti pólového ložiska sem vycházel ze stejných základních rozměrů, abychom mohli výsledky porovnat. Jádru bude opět složeno z lisovaných plechů z materiálu M350-50A a na něm bude uloženo vinutí. Délka paketu byla opět předběžně zvolena $l_{Fe}=50$ mm a v následných výpočtech byla ověřena správnost volby. V tomto případě nedosahovala síla magnetického ložiska požadované síly F_{rad} vypočtené ze vztahu (2.2). Proto jsem se vrátil na začátek a zkusil zvětšit délku paketu o 5 mm. Protože ani tato volba nepomohla, v dalším kroku jsem zkusil zvýšit délku paketu o dalších 5 mm. Takto jsem postupně zkoušel vypočítat výslednou sílu ložiska s délkou paketu na $l_{Fe}=55$ mm a 60 mm a ověřit správnost úpravy. Až teprve délka paketu $l_{Fe}=60$ mm zajistila doporučenou sílu magnetického ložiska, kdy $FG_{max,x=0} > F_{rad}$ a tento výpočet je dále.

Šířku plochy cívky c vypočteme z obvodu rotoru:

$$c = \frac{\pi \cdot 2R_2 \cdot (1 - f)}{2 \cdot 2p} \quad (2.25)$$

$$c = \frac{\pi \cdot 61 \cdot (1 - 0,5)}{2 \cdot 12} \text{ mm}$$

$$c = 4 \text{ mm}$$

Šířku pólu ložiska w vypočteme:

$$w = \frac{\pi \cdot 2R_2 \cdot f}{2p} \quad (2.26)$$

$$w = \frac{\pi \cdot 61 \cdot 0,5}{12} \text{ mm}$$

$$w = 8 \text{ mm}$$

Plochu pólu A snadno vypočteme:

$$A = w \cdot l_{Fe} \quad (2.27)$$

$$A = 8 \cdot 60 \text{ mm}^2$$

$$A = 480 \text{ mm}^2$$

Poloměr r_s vypočteme dle pravidla uvedeného v úvodu kapitoly:

$$r_s = 2,2 \cdot R_2 \quad (2.28)$$

$$r_s = 2,2 \cdot 30,5 \text{ mm}$$

$$r_s = 67,1 \text{ mm}$$

Poloměr r_c vypočteme:

$$r_c = r_s - w \quad (2.29)$$

$$r_c = 67,1 - 8 \text{ mm}$$

$$r_c = 59,1 \text{ mm}$$

Výšku pólu ložiska h_p vypočteme:

$$h_p = r_c - g_0 - R_2 \quad (2.30)$$

$$h_p = 59,1 - 0,5 - 30,5 \text{ mm}$$

$$h_p = 28,1 \text{ mm}$$

Zvolíme stejnou konstrukci vinutí a její plochu A_c vypočteme :

$$A_c = w \cdot (r_c - R_2) \quad (2.31)$$

$$A_c = 8 \cdot (59,1 - 30,5) \text{ mm}^2$$

$$A_c = 228,8 \text{ mm}^2$$

Pro zjištění skutečné plochy vinutí A_c^* musíme započíst vliv návinu a izolace. Pro činitel plnění mědi k_{pcu} jsem zvolil hodnotu 0,6 a následně vypočteme:

$$A_c^* = k_{pcu} \cdot A_c \quad (2.32)$$

$$A_c^* = 0,6 \cdot 228,8 \text{ mm}^2$$

$$A_c^* = 137,28 \text{ mm}^2$$

Pro vinutí jsme zvolili vodič s průměrem d_{cu} 1mm. Průměr vodiče s izolací $d_{cu,izolace}$ je 1,094 mm. Nyní můžeme vypočítat počet závitů cívky:

$$N = \frac{4 \cdot A_c^*}{\pi \cdot d_{cu}} \quad (2.33)$$

$$N = \frac{4 \cdot 137,28}{\pi \cdot 1}$$

$$N \doteq 175$$

Pro výpočet maximálního proudu vodičem I_{max} opět zvolíme stejnou maximální proudovou hustotu $\sigma_{max}=3 \text{ A/mm}^2$, potom může vypočítat:

$$I_{max} = \sigma_{max} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{cu}}{2}\right)^2 \quad (2.34)$$

$$I_{max} = 3 \cdot \pi \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2 \text{ A}$$

$$I_{max} = 2,356 \text{ A}$$

Výpočet střední délky závitu:

$$l_{\text{vodič,štr}} = 2 \cdot w + 2 \cdot l_{Fe} + 8 \cdot \frac{c}{2} \quad (2.35)$$

$$l_{\text{vodič,štr}} = 2 \cdot 8 + 2 \cdot 60 + 8 \cdot \frac{4}{2} \text{ mm}$$

$$l_{\text{vodič,štr}} = 152 \text{ mm}$$

Celková délka vodiče vinutí tedy bude:

$$l_{\text{vodič}} = N \cdot l_{\text{vodič,štr}} \quad (2.36)$$

$$l_{\text{vodič}} = 175 \cdot 152 \text{ mm}$$

$$l_{\text{vodič}} = 26600 \text{ mm}$$

Nyní vypočteme průřez vodiče vinutí:

$$S_{\text{vodič}} = \pi \cdot \left(\frac{d_{Cu}}{2}\right)^2 \quad (2.37)$$

$$S_{\text{vodič}} = \pi \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2 \text{ mm}^2$$

$$S_{\text{vodič}} = 0,785 \text{ mm}^2$$

Dále vypočteme odpor vodiče vinutí jednoho pólu statoru při teplotě 20°C. Dle zdroje [14] je měrný odpor mědi při 20°C $\rho_{Cu,20} = 1,75 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$:

$$R_{\text{vodič},20} = \rho_{Cu,20} \cdot \frac{l_{\text{vodič}}}{S_{\text{vodič}}} \quad (2.38)$$

$$R_{\text{vodič},20} = 1,75 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{26,6}{0,785 \cdot 10^{-6}} \Omega$$

$$R_{\text{vodič},20} = 0,593 \Omega$$

Výpočet odporu vinutí při teplotě 80°C:

$$R_{\text{vodič},80} = \rho_{Cu,80} \cdot \frac{l_{\text{vodič}}}{S_{\text{vodič}}} \quad (2.39)$$

$$R_{\text{vodič},80} = 2,378 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{26,6}{0,785 \cdot 10^{-6}} \Omega$$

$$R_{\text{vodič},80} = 0,806 \Omega$$

Napájecí napětí bude stejnosměrné a jeho maximální hodnota pro jedno vinutí se vypočte dle ohmova zákona:

$$U_{zdroje} = R_{vodič,80} \cdot I_{max} \quad (2.40)$$

$$U_{zdroje} = 0,806 \cdot 2,356 \text{ V}$$

$$U_{zdroje} = 1,9 \text{ V}$$

Nakonec vypočteme ztráty ve vinutí:

$$P_z = R_{vodič,80} \cdot I_{max}^2 \quad (2.41)$$

$$P_z = 0,806 \cdot 2,356^2 \text{ W}$$

$$P_z = 4,47 \text{ W}$$

Magnetické napětí F_m bylo vypočteno podle vztahu:

$$F_m = N \cdot I \quad (2.42)$$

$$F_m = 175 \cdot 2,356 \text{ A}$$

$$F_m = 412,3 \text{ A}$$

Magnetický obvod statoru bude složen z lisovaných plechů z materiálu M350-50A z uhlíkové oceli. V produktovém listu je uvedena maximální magnetická indukce materiálu $B_{max} = 1,8 \text{ T} < B_{sat}$. Následujícím výpočtem ověříme maximální hodnotu nasycení pro navržené ložisko:

$$B_{nas} = 2 \cdot \frac{\mu_0 N I_{max}}{2g_0} \quad (2.43)$$

$$B_{nas} = 2 \cdot \frac{\mu_0 \cdot 175 \cdot 2,325}{2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} \text{ T}$$

$$B_{nas} = 1,036 \text{ T}$$

Pro výpočet síly celého 12-ti pólového ložiska platí, že se magnetický obvod statoru navrhuje tak, aby LMO byl ve svislé ose pod rotorem. Pro jeho řízení ve svislé ose, kde je rotor zatížen navíc gravitační silou tak dochází k vytvoření největší síly, která dopovídá vektorovému součtu sil od tří LMO [11].

Maximální síla při nulové výchylce a maximálním proudu:

$$F_{max,x=0} = (2 \cdot \cos 15^\circ) \cdot \frac{1}{2} \cdot \mu_0 N^2 A \frac{I_{max}^2}{g_0^2} \cdot \cos 15^\circ \quad (2.44)$$

$$F_{max,x=0} = (2 \cdot \cos 15^\circ) \cdot \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot 175^2 \cdot 480 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{2,356^2}{0,0005^2} \cdot \cos 15^\circ N$$

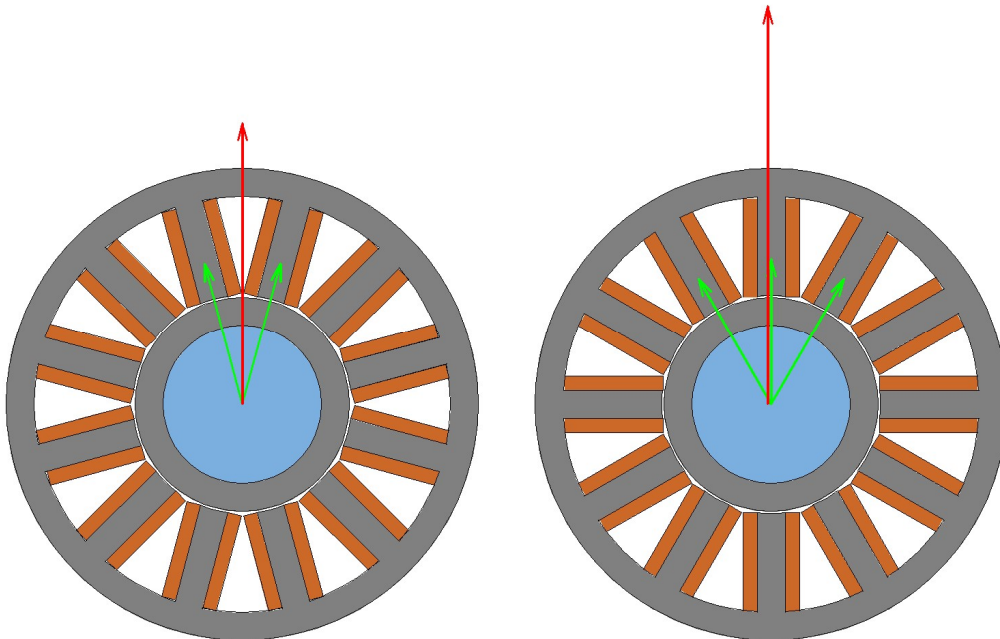
$$F_{max,x=0} = 382,67 N$$

Maximální síla reagující na gravitační sílu při nulové výchylce a maximálním proudu:

$$FG_{max,x=0} = (1 + 2 \cdot \cos 30^\circ) \cdot \frac{1}{2} \cdot \mu_0 N^2 A \frac{I_{max}^2}{g_0^2} \cdot \cos 15^\circ \quad (2.45)$$

$$FG_{max,x=0} = (1 + 2 \cdot \cos 30^\circ) \cdot \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot 175^2 \cdot 480 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{2,356^2}{0,0005^2} \cdot \cos 15^\circ N$$

$$FG_{max,x=0} = 541,18 N$$



Obr. 2.2.3 Dvanáctipólové ložisko v základní a doporučené poloze [11]

Až v tomto případě odpovídá výsledná síla magnetického ložiska požadované hodnoty, tedy $FG_{max,x=0} > F_{rad}$.

2.3 Souhrn vypočtených hodnot navrhovaných ložisek

Vypočtené hodnoty návrhu magnetického ložiska jsou uvedeny pro snadné porovnání do následující tabulky Tab. 2.3.1.

Tab. 2.3.1 Vypočtené hodnoty pro obě konstrukce ložiska

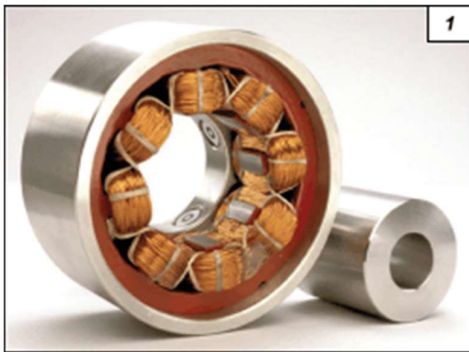
Typ ložiska	8-mi pólové	12-ti pólové	12-ti pólové	12-ti pólové
R_1 [mm]	22,5			
R_2 [mm]	30,5			
l_{Fe} [mm]	50	50	55	60
w [mm]	12	8		
A [mm ²]	600	400	440	480
r_s [mm]	67,1			
r_c [mm]	55,1	59,1		
h_p [mm]	24,1	28,1		
g_o [mm]	0,5			
A_c [mm ²]	295,2	228,8		
A_c^* [mm ²]	177,12	137,28		
k_{pcu} [-]	0,6			
N [-]	225	175		
σ_{max} [A/mm ²]	3			
I_{max} [A]	2,356			
d_{cu} [mm]	1			
$L_{vodič}$ [m]	33,3	23,1	24,85	26,6
$R_{vodič,80}$ [Ω]	1,009	0,7	0,753	0,806
U_{zdroje} [V]	2,377	1,65	1,77	1,9
P_z [W]	5,6	3,89	4,18	4,47
F_m [A]	530,1	421,3		
B_{sat} [T]	1,8			
B_{nas} [T]	1,332	0,518		
$F_{max,x=0}$ [N]	391,49	318,89	350,78,28	382,67
$FG_{max,x=0}$ [N]	723,38	450,98	496,08	541,18
513,03				

Z této tabulky vyplývá několik zásadních faktů. Ačkoliv je teoreticky lepší, aby mělo magnetické ložisko 12 pólů nežli 8 pólů, jeho řízení by bylo jemnější a v případě poruchy jednoho LMO by v preferované konstrukci byly ještě dva LMO pro udržení v centrální poloze a nebo minimálně doběh stroje, je zřejmé, že z praktického hlediska je to přesně naopak. 8-mi pólové ložisko má při stejných nebo menších rozměrech

větší přitažlivou sílu. To je dáno tím, že v obvodu zbývá více místa na „aktivní materiál“ pólu i pro vinutí. Průřez magnetického obvodu pólu, počet závitů vinutí a protékající proud jsou v podstatě nejdůležitější hodnoty návrhu. A pokud je požadavek na vyšší počet pólů magnetického ložiska, je zřejmé, že obvodová šířka pólu se bude nutně zmenšovat. Potom je možné požadovanou sílu ložiska dosáhnout zvětšením délky paketu. Nebo další možností je prodloužení výšky pólů, aby se mohl zvýšit počet závitů. To má ale za následek zvětšení vnějšího průměru magnetického ložiska. Poslední možností je zvýšení maximálního proudu protékajícího vinutím. Potom je ale možné, že bude nutné magnetické ložisko aktivně chladit, protože se vinutí bude průchodem proudu neúměrně zahřívat.

Ještě je nutné si uvědomit, že pro 8-mi pólové ložisko bude jistě levnější řídicí elektronika a zesilovače pro napájení vinutí.

Příklad, jak vypadá 8-pólové ložisko od firmy SKF je uveden na Obr. 2.3.1 Reálné aktivní magnetické ložisko od výrobce SKF



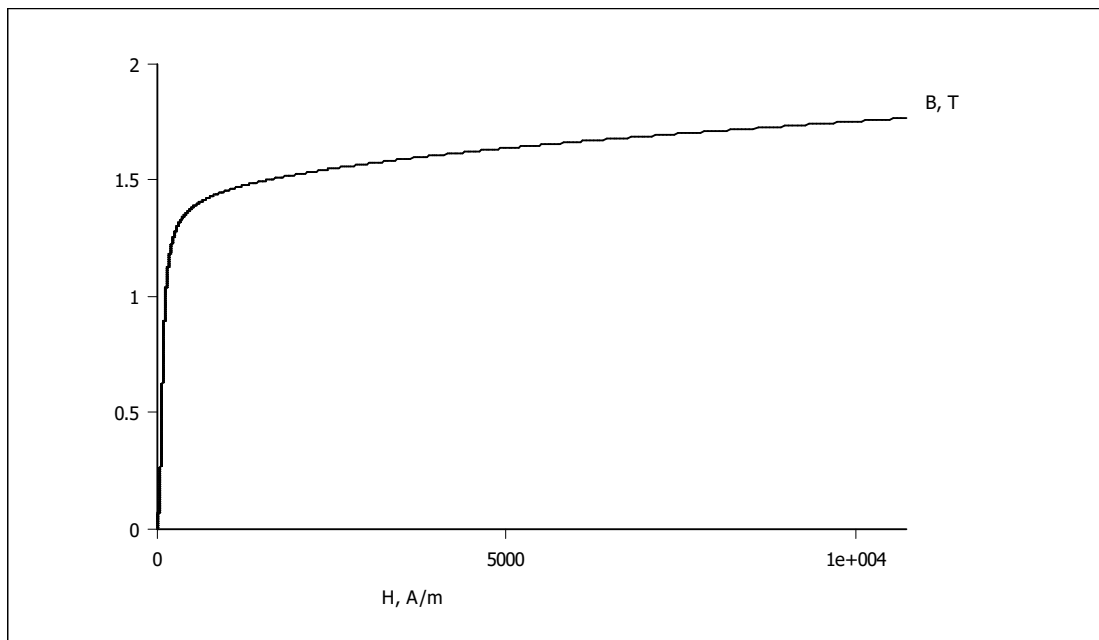
Obr. 2.3.1 Reálné aktivní magnetické ložisko od výrobce SKF [15]

3 Ověření návrhu programem s metodou konečných prvků

Pro ověření návrhu ložisek metodou konečných prvků jsem použil program FEMM verze 4.2. FEMM je software pro řešení nízkofrekvenčních elektromagnetických úloh v dvourozměrném a osově symetrickém prostoru. Software řeší lineární i nelineární magnetostatické úlohy, lineární i nelineární časové harmonické magnetické úlohy, lineární elektrostatické úlohy a úlohy s tepelným tokem v ustáleném stavu. Řešení je možné zobrazit ve formě grafů křivek a hustoty. Program také umožňuje uživateli prohlédnout pole v libovolných bodech, stejně jako vyhodnotit řadu různých integrálů a vykreslit různá množství bodů zájmu podél uživatelem definovaných křivek.

3.1 8-mi pólové ložisko

Pro statorový magnetický obvod všech ložisek byl navržen lisovaný plech M350-50A, jehož parametry byly z produktového listu přiloženého v příloze A zadané do programu. Na Obr. 3.1 je zobrazena jeho B-H charakteristika exportovaná z programu FEMM, protože pro napájení všech ložisek navrhuji použít stejnosměrné napájení je tato charakteristika zobrazená pouze v 1. kvadrantu.



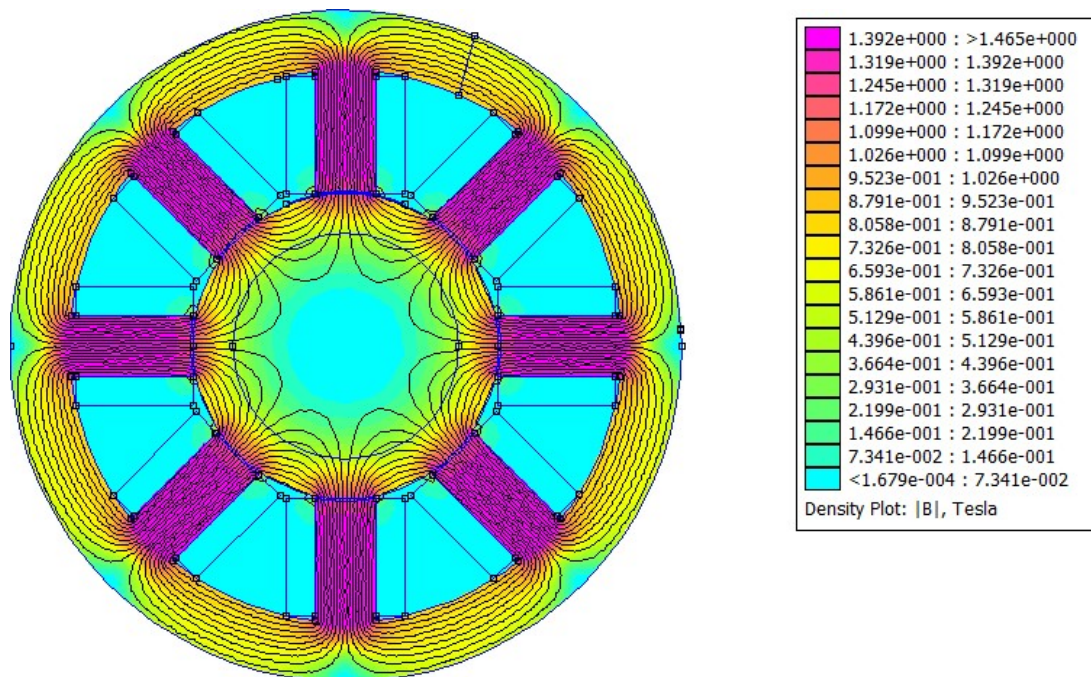
Obr. 3.1.1 B-H charakteristika statorových plechů M350-50A

Pro model 8-mi pólového ložiska v programu FEMM vychází v pozici, kdy je nad rotorem pouze jeden LMO, hodnoty, které jsou uvedeny v tabulce Tab. 3.1.1 pro porovnání s vypočtenými hodnotami a jejich grafické znázornění exportované z programu FEMM je uvedeno na obrázcích Obr. 3.1.2. a Obr. 3.1.3.

Tab. 3.1.1 Porovnání vypočtených hodnot se SW FEMM pro 8-mi pólové AML s natočením 0°

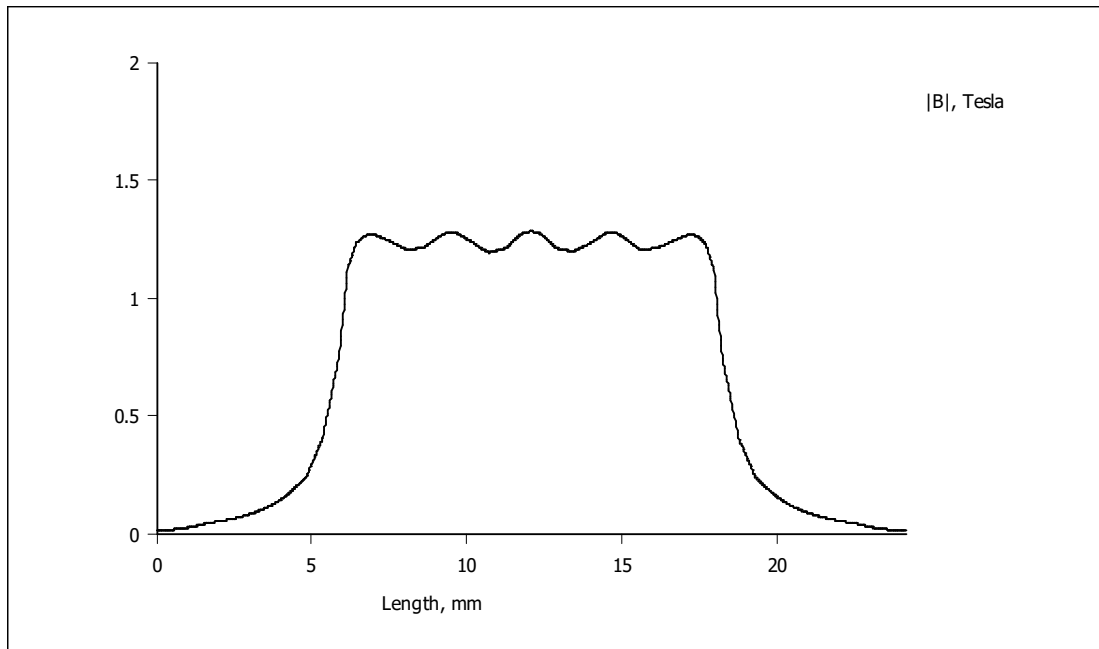
Veličina	Model FEMM	Vypočtené hodn.	Rozdíl
F_{\max} síla od jednoho pólu	375,49 N	391,49	-4,26 %
B_{\max} pól	1,465 T	1,332 T	9,07%
B_{\max} jhu statoru	0,9 T		

Při porovnání je zřejmý rozdíl mezi hodnotami, které byly vypočteny při simulaci softwarem FEMM a vypočtenými hodnotami. Velikost rozdílu přesto vykazuje poměrně dobrou shodu s analytickým návrhem.



Obr. 3.1.2 Model hustoty magnetické indukce v 8-mi pólovém ložisku při max. proudu

Graf hustoty magnetické indukce odhaluje, že nejvyšší hodnoty magnetické indukce budou v pólových nástavcích, naopak ve jhu statoru budou hodnoty magnetické indukce výrazně nižší. Z grafu je také zřejmé, proč tomu tak je. Protože přes pólový nástavec se uzavírá oproti jhu statoru dvojnásobný magnetický tok. Rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře mezi pólem a rotorem je zobrazeno na Obr. 3.1.3.



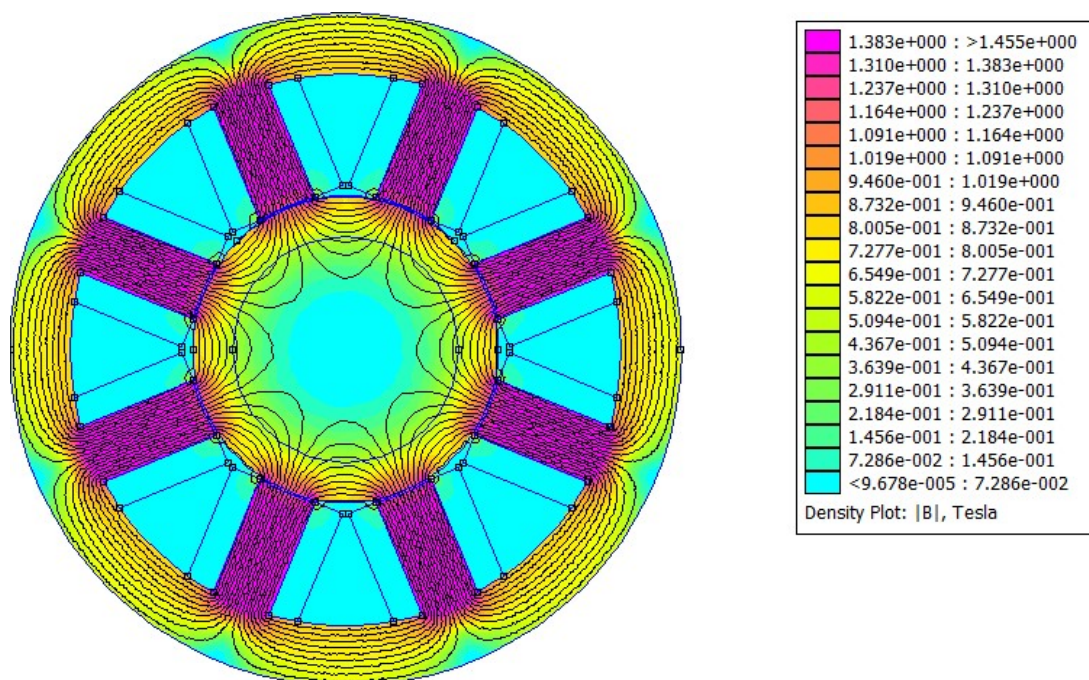
Obr. 3.1.3 Rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře mezi 1 pólem a rotorem

Pro model 8-mi pólového ložiska v programu FEMM vychází v pozici, kdy jsou nad rotorem dva LMO hodnoty, které jsou uvedeny v tabulce Tab. 3.1.2 pro porovnání s vypočtenými hodnotami a jejich grafické znázornění exportované z programu FEMM je uvedeno na obrázcích Obr. 3.1.4 a Obr. 3.1.5.

Tab. 3.1.2 Porovnání vypočtených hodnot se SW FEMM pro 8-mi pólové AML s natočením 22,5°

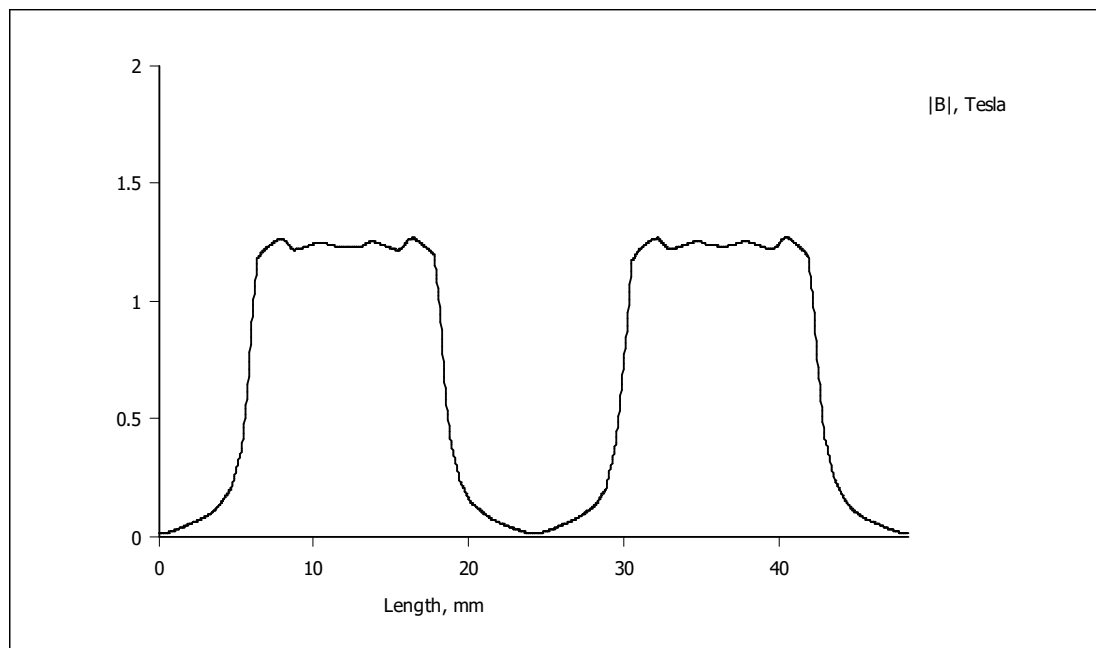
Veličina	Model FEMM	Vypočtené hodn.	Rozdíl
F_{\max} síla od dvou pólů	691,33 N	723,38 N	-4,43 %
B_{\max} pól	1,465 T	1,332 T	9,07%
B_{\max} jho statoru	0,9 T		

I v tomto případě je při porovnání přibližně stejný rozdíl mezi hodnotami, které byly vypočteny při simulaci softwarem FEMM a vypočtenými hodnotami. Ověření vypočtené síly aktivního magnetického ložiska vychází dobře. Hodnoty maximální magnetické indukce v pólovém nastavci i na vnějším obvodu se oproti předchozímu modulu nezměnily, protože se pouze celá konstrukce otočila o 22,5°.



Obr. 3.1.4 Model hustoty magnetické indukce v 8-mi pólovém ložisku otočeném o 22,5° při max. proudu

Graf hustoty magnetické indukce se změnil pouze v otočení celé konstrukce, proto se nejvyšší hodnoty magnetické indukce v pólech i ve jhu statoru nemění. Jejich hodnoty jsou uvedeny v Tab. 3.1.2.



Obr. 3.1.5 Rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře mezi 2-ma póly a rotorem 8-mi pólového ložiska otočeného o 22.5°

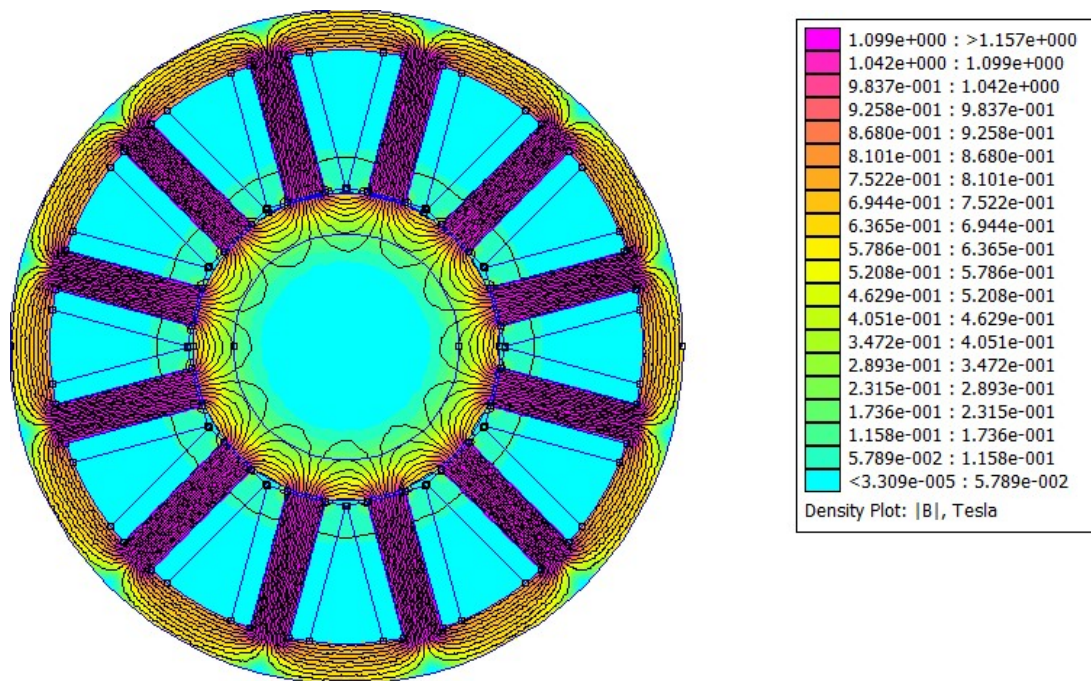
3.2 12-ti pólové ložisko

Pro model 12-ti pólového ložiska v programu FEMM vychází v pozici, kdy jsou nad rotorem dva LMO hodnoty, které jsou uvedeny v tabulce Tab. 3.2.1 pro porovnání s vypočtenými hodnotami a jejich grafické znázornění exportované z programu FEMM je uvedeno na obrázcích.

Tab. 3.2.1 Porovnání vypočtených hodnot se SW FEMM pro 12-ti pólové AML s natočením 15°

Veličina	Model FEMM	Vypočtené hodn.	Rozdíl
F_{\max} síla od dvou pólů	381,13 N	382,67 N	-0,4 %
B_{\max} vzduchová mezera	0,99 T	1,036 T	-4,65%
B_{\max} jho statoru	0,698 T		

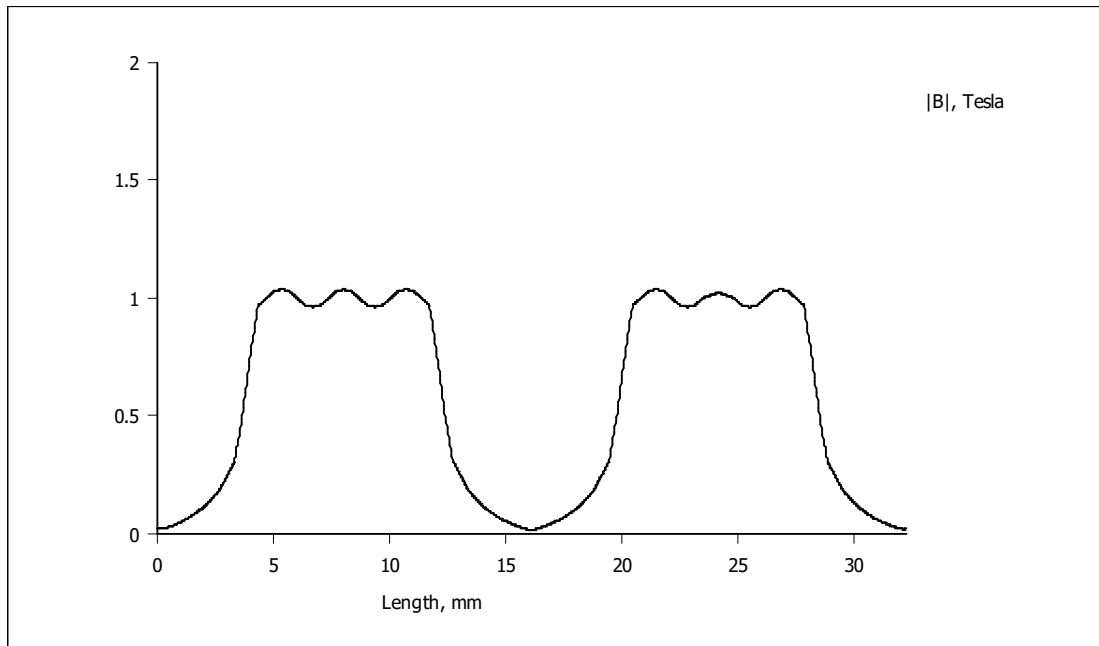
V tomto případě je při porovnání velice malý rozdíl mezi hodnotami síly, které byly vypočteny při simulaci softwarem FEMM a vypočtenými hodnotami. Při ověření vypočtené síly aktivního magnetického ložiska-mi pólového ložiska.



Obr. 3.2.1 Model hustoty magnetické indukce ve 12-ti pólovém ložisku otočeném o 15° při max. proudu

Graf hustoty magnetické indukce na Obr. 3.2.1 odhaluje, že nejvyšší hodnoty magnetické indukce budou v pólech, naopak ve jhu statoru budou hodnoty magnetické indukce výrazně nižší. Toto rozložení je podobné jako u 8-mi pólového magnetického ložiska a je ovlivněno změnou rozměrů magnetického obvodu statoru. Rozložení

magnetické indukce ve vzduchové mezeře mezi póly a rotorem je zobrazeno na Obr. 3.2.2, hodnoty magnetické indukce v pólu a ve jhu statoru jsou uvedeny v Tab. 3.2.1.



Obr. 3.2.2 Rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře mezi 2-ma póly a rotorem 12-ti pólového ložiska otočeného o 15°

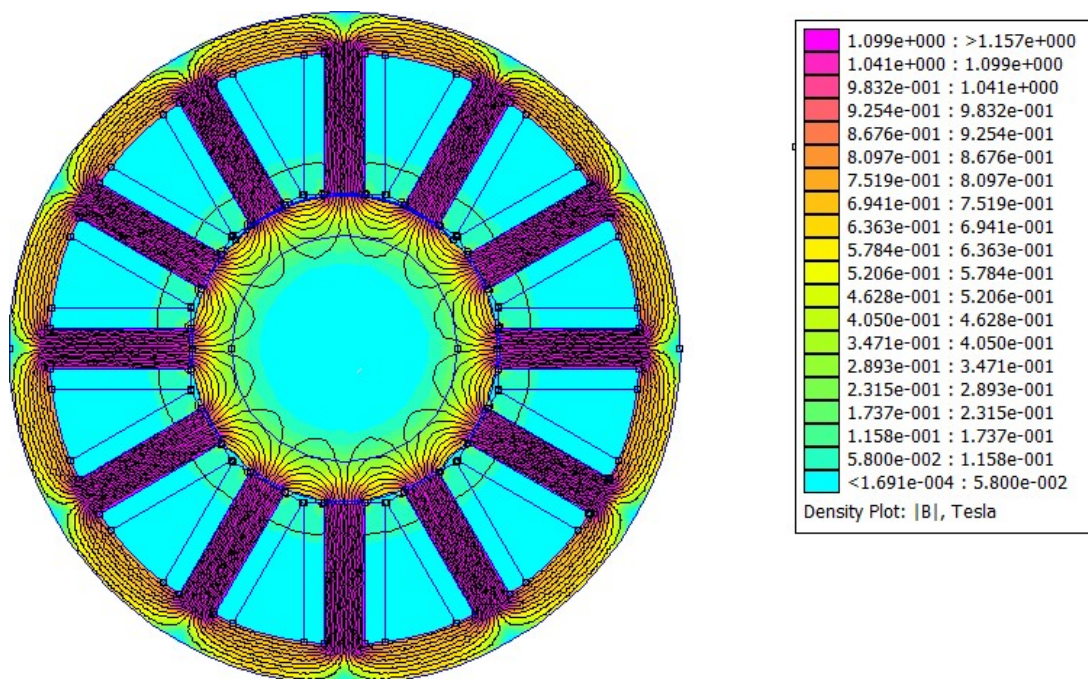
Pro model 12-ti pólového ložiska v programu FEMM vychází v pozici, kdy jsou nad rotorem 3 LMO hodnoty, které jsou uvedeny v tabulce Tab. 3.2.2 pro porovnání s vypočtenými hodnotami a jejich grafické znázornění exportované z programu FEMM je uvedeno na obrázcích Obr. 3.2.3 a Obr. 3.2.4.

Tab. 3.2.2 Porovnání vypočtených hodnot se SW FEMM pro 12-ti pólové AML s natočením 15°

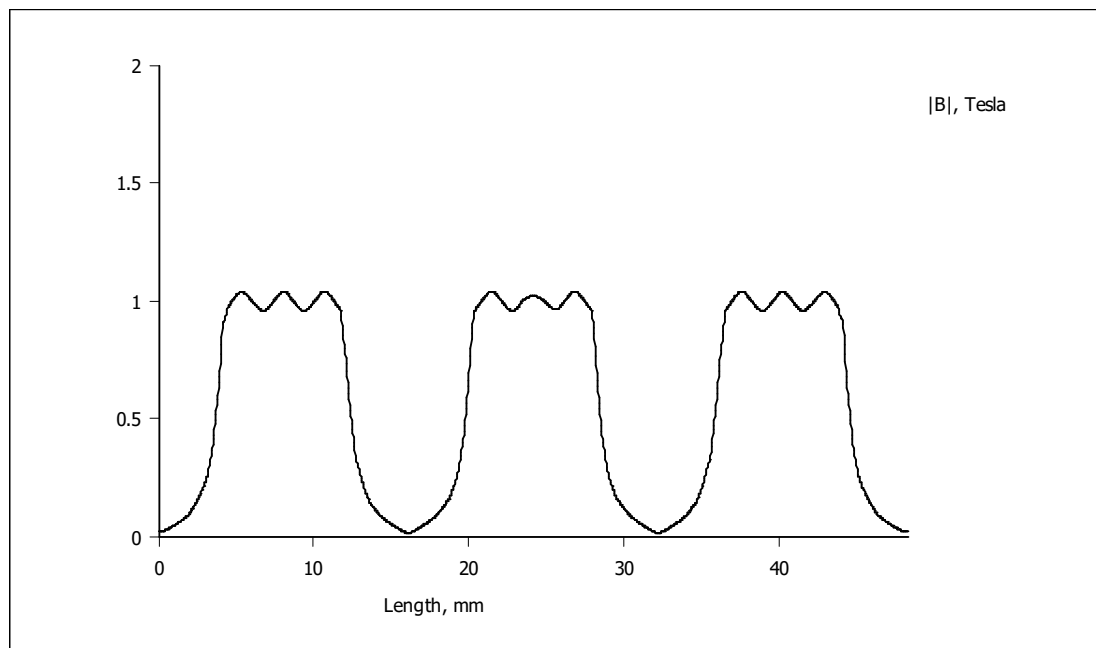
<i>Veličina</i>	<i>Model FEMM</i>	<i>Vypočtené hodn.</i>	<i>Rozdíl</i>
F_{\max} síla od tří pólů	540,21 N	541,18 N	-1,8 %
B_{\max} pól	0,984 T	1,036 T	-5,28%
B_{\max} jho statoru	0,689 T		

I v toto případě je při porovnání velice malý rozdíl mezi hodnotami, které byly vypočteny při simulaci softwarem FEMM a vypočtenými hodnotami. Ověření vypočtené síly aktivního magnetického ložiska vychází velice dobře.

Hodnoty maximální magnetické indukce v pólu i ve jhu statoru se oproti předchozímu modelu nezměnily, protože se pouze celá konstrukce otočila o 15°.



Obr. 3.2.3 Model hustoty magnetické indukce ve 12-ti pólovém ložisku otočeném o 0° při max. proudu



Obr. 3.2.4 Rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře mezi 3-mi póly a rotorem 12-ti pólového ložiska otočeného o 0°

Graf hustoty magnetické indukce na Obr. 3.2.3 ukazuje opět stejné rozložení hustoty magnetické indukce v magnetickém obvodu jako u předchozích modelů. Rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře mezi póly a rotorem je zobrazeno na Obr. 3.2.4, hodnoty magnetické indukce v pólu a ve jhu statoru jsou uvedeny v Tab. 3.2.2 Porovnání vypočtených hodnot se SW FEMM pro 12-ti pólové AML s natočením 15°.

Zpracované modely pro analýzu v programu FEMM jsou přiložené na CD.

Závěr

V první části práce byla provedena rešerše používaných topologií magnetických ložisek a stručně shrnut popis jejich funkce.

Ve druhé části jsem provedl návrh a analytický výpočet aktivních magnetických ložisek pro zadané parametry. Zvolil jsem návrh 8-mi pólového a 12-ti pólového aktivního magnetického ložiska. Vypočítal jsem parametry pro obě konstrukce aktivních magnetických ložisek a porovnal jsem jejich parametry, výhody a nevýhody. Z konstrukčního technického i ekonomického hlediska je pro většinu aplikací vhodnější a levnější konstrukce 8-mi pólového ložiska. Je to dáno fyzickými parametry konstrukce, kdy do mezikruží lze navrhnout póly s větším průřezem a umístit vinutí s více závitů. Tyto dva parametry jsou ještě s proudem protékajícím vinutím v podstatě nejdůležitější při návrhu magnetického ložiska. A pokud je požadavek na vyšší počet pólů magnetického ložiska, je zřejmé, že obvodová šířka pólu se bude nutně zmenšovat. Potom je možné požadovanou sílu ložiska dosáhnout zvětšením délky paketu. Nebo další možností je prodloužení výšky pólů, aby se mohl zvýšit počet závitů. To má ale za následek zvětšení vnějšího průměru magnetického ložiska. Poslední možností je zvýšení maximálního proudu protékajícího vinutím. Potom je ale možné, že bude nutné magnetické ložisko aktivně chladit, protože se vinutí bude průchodem proudu neúměrně zahřívat.

Před vlastním návrhem aktivního magnetického ložiska je tedy nutné vhodně zvolit rozměry, počet pólů a případně napájecí proud podle konstrukce stroje, pro který se aktivní magnetické ložisko navrhuje.

Návrhy jednotlivých topologií jsem zadal do programu pro ověření návrhu metodou konečných prvků FEMM verze 4.2. Doplnil elektromagnetické parametry navržených materiálů a provedl výpočet hustoty magnetické indukce ve statoru magnetického ložiska a výsledné síly od jednoho nebo více pólů. Ověření analytického výpočtu výsledné síly a magnetické indukce v magnetickém obvodu pro navržené topologie proběhlo pro 8-mi pólovou topologii dobře, pro 12-ti pólovou topologii velmi dobře. Nicméně stále platí tvrzení, že osmi pólové aktivní ložisko bude pro většinu aplikací plně dostačující svým počtem pólů a tedy možností přesného řízení levitace a zároveň

levnější. A to jak pohledu výroby, kdy bude levnější výroba aktivního magnetického ložiska a jeho řídicích elektronických obvodů, tak z pohledu následné údržby.

Seznam literatury a informačních zdrojů

1. **Chiba, Akira, a další, a další.** *Magnetic bearings and bearingless drives.* Amsterdam : Newnes, 2005. ISBN 0-7506-7527-8.
2. **Peslar, Jiří.** Aerostatická, aerodynamická a magnetická ložiska. *Přehledový článek.* [Online] 28. 3 2008. [Citace: 30. 10 2019.] http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=647.
3. **Mayer, Daniel.** Nové možnosti magnetické levitace v dopravě? *Časopis Elektro.* [Online] 12 2003. [Citace: 28. 11 2019.] <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/nove-moznosti-magneticke-levitace-v-doprave--14291>.
4. **Ijiri, Yumi, a další, a další.** Inverted Linear Halbach Array for Separation of Magnetic Nanoparticles. *IEEE Transactions on Magnetics website.* [Online] 1. 7 2013. [Citace: 29. 11 2019.] <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=20>.
5. **Pruša, Radomír.** Návrh magnetického ložiska pro čerpadlo. *Bakalářská práce.* [Online] 31. 5 2016. [Citace: 5. 11 2019.] <https://core.ac.uk/download/pdf/44404226.pdf>.
6. **Shah, Arpi.** Design and Simulation of Magnetic Thrust and Radial Bearing System. *Dissertation for the degree of Master by Research.* [Online] 2016. [Citace: 10. 11 2019.] <https://eprints.kingston.ac.uk/37499/1/Shah-A.pdf>.
7. **Jaatinen, Pekko, a další, a další.** Electric Machines and Drives (IEMDC), IEEE International Conference. *Improving of bearingless 6-slot IPM motor radial force characteristics using rotor skew.* [Online] 2007. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8002246>.
8. **Pazdera, Ivo.** Průmyslové čerpadlo s integrovaným elektromagnetickým systémem. [Dizertační práce]. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013.
9. **Vojáček, Antonín.** Bezkontaktní indukční snímače přiblížení - obecný popis. *Automatizace.hw.cz.* [Online] 20. Listopad 2014. [Citace: 10. Červen 2020.] <https://automatizace.hw.cz/komponenty-mereni-a-regulace/indukcni-snimace-priblizeni-obecny-popis.html>.
10. —. Bezkontaktní kapacitní snímače přiblížení - obecný popis. *Automatizace.hw.cz.* [Online] 27. Listopad 2014. [Citace: 10. Červen 2020.] <https://automatizace.hw.cz/komponenty-mereni-a-regulace/bezkontaktni-kapacitni-senzory-priblizeni-obecny-popis.html>.
11. **Bartoň, Lukáš.** Znalostní podpora pro návrh systému aktivního magnetického ložiska. [Dizertační práce]. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, 30. 3 2012.
12. **Mayer, Daniel.** Elektrodynamika v energetice. Praha : BEN, 2004.
13. **Růra, David.** Návrh magnetického ložiska pro elektrický stroj. *Diplomová práce.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 22. květen 2019.

14. **Bureš, Jiří.** Měrný odpor. *Converter.cz*. [Online] 2002. [Citace: 23. Květen 2020.] <http://www.converter.cz/tabulky/merny-odpor.htm>.
15. **Harris, Tim.** Magnetická ložiska SKF – od inovace k osvědčeným řešením. *ELEKTRO*. [Online] [Citace: 12. Červen 2020.] <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/magneticka-loziska-skf-od-inovace-k-osvedcenym-resenim--13657>.
16. **Paudel, Nirmal.** How to Model Magnetic Bearings in COMSOL Multiphysics. *COMSOL Blog*. [Online] 5. 9 2017. [Citace: 1. 12 2019.] <https://www.comsol.com/blogs/modeling-magnetic-bearings-in-comsol-multiphysics/>.
17. **Hinckley, Mark.** New Levels of Performance with Magnetic Bearings. *Engineering Exchange*. [Online] 8. 10 2010. [Citace: 1. 12 2019.] <https://www.engineeringexchange.com/profiles/blogs/new-levels-of-performance-with>.
18. **Boštjan, Polajžer.** Magnetic Bearings, Theory and Applications. [Online] Říjen 2010. [Citace: 8. Březen 2020.] http://haw.nsk.hr/arhiva/vol3/3810/33415/www.intechopen.com/Magnetic_Bearings_Theory_and_Applications.pdf. ISBN 978-953-307-148-0.
19. *FG-AMB*. [Online] FOSHAN GENESIS AMB TECH CO.,LTD., 2019. [Citace: 10. 11 2019.] <https://www.fgamb.com.cn/en/page.html?id=21>.

Přílohy

Příloha A -produktový list navrženého statorového plechu

Typical data for SURA® M350-50A

T	W/kg at 50 Hz	VA/kg at 50 Hz	A/m at 50 Hz	W/kg at 100 Hz	W/kg at 200 Hz	W/kg at 400 Hz	W/kg at 1000 Hz	W/kg at 2500 Hz
0,1	0,02	0,08	36,4	0,06	0,17	0,48	2,02	8,34
0,2	0,09	0,20	48,1	0,24	0,62	1,75	7,15	29,0
0,3	0,18	0,36	56,1	0,50	1,30	3,62	14,7	60,1
0,4	0,30	0,54	63,2	0,81	2,15	6,02	24,6	104
0,5	0,44	0,75	70,2	1,18	3,17	8,96	37,2	162
0,6	0,59	0,99	77,5	1,60	4,36	12,5	53,1	241
0,7	0,76	1,27	85,6	2,08	5,73	16,6	72,7	343
0,8	0,95	1,58	94,8	2,62	7,31	21,5	96,9	474
0,9	1,16	1,94	106	3,21	9,09	27,2	126	638
1,0	1,39	2,39	122	3,88	11,1	33,8	162	840
1,1	1,65	2,96	146	4,61	13,4	41,5	204	1079
1,2	1,95	3,76	185	5,43	16,0	50,4	254	1360
1,3	2,29	5,11	264	6,37	18,9	60,4	312	1679
1,4	2,75	8,40	481	7,53	22,3	72,1	378	2036
1,5	3,29	19,8	1200	8,99	26,6	85,7	456	2316
1,6	4,41	54,1	3025					
1,7	4,77	124	6186					
1,8	5,00	238	10720					

Loss at 1.5 T , 50 Hz, W/kg 3,29

Loss at 1.0 T , 50 Hz, W/kg 1,39

Anisotropy of loss, % 10

Magnetic polarization at 50 Hz

H = 2500 A/m, T 1,58

H = 5000 A/m, T 1,67

H = 10000 A/m, T 1,78

Coercivity (DC), A/m 45

Relative permeability at 1.5 T 1050

Resistivity, $\mu\Omega\text{cm}$ 42

Yield strength, N/mm² 320

Tensile strength, N/mm² 460

Young's modulus, RD, N/mm² 200 000

Young's modulus, TD, N/mm² 210 000

Hardness HV5 (VPN) 160

RD represents the rolling direction

TD represents the transverse direction

Values for yield strength (0.2 % proof strength)

and tensile strength are given for the rolling direction

Values for the transverse direction are approximately 5% higher

