



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 MAGNETICKÉHO LOŽISKA PRO ELEKTRICKÝ STROJ

DESIGN OF A MAGNETIC BEARING FOR AN ELECTRICAL MACHINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Dávid Rúra

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Bárta, Ph.D.

BRNO 2019



Diplomová práce

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

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Dávid Rúra

ID: 173735

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Návrh magnetického ložiska pro elektrický stroj

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vytvořte literární rešerši na téma magnetická ložiska a jejich využití v oblasti elektrických strojů.
2. Popište analytický návrh magnetického ložiska a vytvořte program pro jeho automatizovaný návrh.
3. Pro zadaný elektrický stroj provedte návrh magnetického ložiska.
4. Vytvořte konečně prvkový model magnetického ložiska a provedte ověření jeho vlastností.
5. Provedte ověření rotorové dynamiky pro navrženou soustavu rotoru a magnetických ložisek.

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.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 22.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Jan Bárta, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
předseda oborové rady

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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Súčasný trend vývoja vysoko-otáčkových strojov otvára ďalšie oblasti bádania. Jednou z nich sú aj magnetické ložiská. Tradičný prístup uchytenia rotora sa stáva u týchto typov strojov prekážkou a limitujúcim parametrom vďaka vysokému treniu. Preto v aplikáciách s turbo pohonmi nachádzajú magnetické ložiská svoje uplatnenie. Rovnako aj vývoj elektroniky nastolil možnosti kvalitnejšieho a rýchlejšieho riadenia v zložitejších riadiacich štruktúrach. Najväčšou výhodou magnetických ložísk je ich chod bez mechanického trenia a takmer nulová údržba, avšak v porovnaní s tradičnými ložiskami zaberajú omnoho viac miesta a zvyšujú dĺžku hriadeľa. Za účelom eliminácie nárastu dĺžky hriadeľa sú čoraz častejšie konštruované systémy s integrovaným magnetickým zavesením rotora, čím sa dosiahne efektívne rozloženie jednotlivých častí v stroji. V tejto diplomovej práci je diskutovaný návrh magnetických ložísk pre motor k turbocirkulátoru 45000ot/min s výkonom 12kW. Dôraz pri vypracovaní tejto práce je kladený na praktický návrh magnetických ložísk a aj na voľbu parametrov. Analytický výpočet vyjadruje súvislosti medzi jednotlivými parametrami, avšak zanedbáva viacero parazitných vplyvov, takže samotný návrh je ďalej podrobený optimalizácii a numerickej analýze. K týmto analýzám je pridaná aj kontrola kritických otáčok. Výsledky prezentovanej práce budú následne využité na výrobu laboratórneho vzorku s porovnaním výsledkov.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

magnetické ložiská, aktívne magnetické ložiská, analytický návrh, MKP, rotorová dynamika, kritické otáčky

ABSTRACT

The current development in the field of electric machinery is focusing on high-speed electric machines. This opens also other fields related to high-speed machines. One of them are magnetic bearing systems. Tradition approach of using ball bearing brings a few problems in design dealing with friction at high speeds. Together with magnetic bearings, development is their control. Faster chips opened a new way of thinking of control and helped to evolve robust control loops. The biggest advantage of magnetic bearing is non-friction run and almost no maintenance. Compare to traditional ball bearing, a magnetic bearing system needs more space and in some applications could happen that the shaft will be twice as long. This problem can be solved designing complex system with motor and integrated magnetic bearing what leads to downsizing. In this master thesis, the design of magnetic bearing for 12kw, 45000rpm is discussed. It focuses on practical design and correlations between parameter selection. The analytical approach is used to sketch the design and optimization is done afterwards. Problem with an analytical design is that it doesn't cover all parasitic phenomenae and thus numerical modelling and optimization are demanded. Also, the critical speed analyze is included in this thesis. The results of the work will be used for manufacturing prototype as an extension to the existing high-speed machine.

KEYWORDS

magnetic bearings, active magnetic bearings, analytical design, FEM, rotor dynamics, critical speed

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. Vedúci práce: Ing. Jan Bárta, Ph.D.

OBSAH

Zoznam symbolov, veličín a skratiek	9
1 Úvod	11
1.1 Dejiny vývoja magnetických ložísk	12
2 Návrh systému s magnetickými ložiskami	13
2.1 Zohľadňujúce parametre pri návrhu	15
2.1.1 Typy magnetických ložísk	15
2.1.2 Kapacita ložiska	17
2.1.3 Dynamika ložiska	18
2.1.4 Bias a radiaci prúd	18
2.1.5 Riadenie a snímače	18
3 Teoretický podklad pre elektromagnetický návrh magnetických ložísk	20
3.1 Odvodenie sily pomocou Maxwellovho tenzora	20
3.2 Zákon celkového prúdu	22
3.3 Zákon zachovania toku	23
3.4 Odvodenie sily pomocou energie magnetického poľa	23
3.5 Linerizácia výpočtu	24
3.6 Zosilnenie aktuátora pre $x=0$	26
3.7 Tuhosť systému v otvorenej slučke pri $x=0$	27
3.8 Strmosť nárastu sily	27
3.9 Príklad	27
4 Praktický návrh magnetického ložiska	29
4.1 Koncept riešenia	30
4.2 Návrh typu ložísk a ich uloženie v rámci systému	31
4.3 Voľba materiálov	31
4.4 Limitujúce a základné parametre pre návrh ložísk	32
4.4.1 Geometrické limity	32
4.5 Návrh a analýza radiálneho magnetického ložiska	36
4.5.1 Zadanie - vstupné parametre	36
4.5.2 Analytický návrh	37
4.5.3 Numerická analýza	43
4.6 Návrh a analýza axiálneho magnetického ložiska	49
4.6.1 Zadanie - vstupné parametre	49
4.6.2 Analytický návrh	50

4.6.3	Numerická analýza	54
5	Rotorová dynamika	59
5.1	Úvod do rotorovej dynamiky	59
5.2	Lavalov (Jeffcotov) rotor	61
5.3	Analýza rotorového systému s magnetickými ložiskami	63
6	Záver	67
6.1	Námety pre ďalší výskum	68
	Literatúra	69

ZOZNAM OBRÁZKOV

2.1	Proces návrhu elektrického stroja [6]	13
2.2	Náčrt sústavy rotora s umiestnenými ložiskami	14
2.3	Návrhový proces upravený pre magnetické ložiská	15
2.4	Systém delenia toku v radiálnom 8-pólovom magnetickom ložisku (vľavo s delením toku, vpravo bez delenia toku) [12]	16
2.5	Axiálne ložisko pracujúce na princípe vírivých prúdov	17
3.1	Model protilahlo pôsobiacich elektromagnetov	25
3.2	Porovnanie linearizovanej a reálnej sily pri $I_c = 0A$ [20]	26
4.1	Elektrický stroj, pre ktorý sú navrhnuté magnetické ložiská [2]	29
4.2	Koncept riešenia	31
4.3	Náčrt radiálneho ložiska	38
4.4	Rozloženie magnetickej indukcie pri uvažovaní analytického modelu	44
4.5	Rozloženie magnetickej indukcie pri napájaní všetkých cievok bias prúdom a $dz = 0mm$	44
4.6	Rozloženie magnetickej indukcie pri $dy = -0.4mm$	45
4.7	Rozloženie magnetickej indukcie pri $dy = -0.4mm$ a prehodnením po- larít cievok v $+x$ a $-y$ ($\alpha = 0.5$)	46
4.8	Priebeh sily pri rôznych bias prúdoch	46
4.9	Sila pri rôznych stavoch ložiska ($i_x = 0A$)	47
4.10	Sila pri rôznych stavoch ložiska ($i_x = 6.1A$)	47
4.11	Náčrt axiálneho ložiska	51
4.12	Model axiálneho ložiska	55
4.13	Rozloženie magnetického poľa pri polomere hriadeľa 25 a 18mm	56
4.14	Priebeh sily pri polomere hriadeľa 25 a 18mm	56
4.15	Sila pri rôznych kombináciách prúdu I_{cz} a výchylky dz , pri $I_{bz} = 9A$	57
4.16	Indukčnosť pri rôznych kombináciách prúdu I_{cz} a výchylky dz , pri $I_{bz} = 9A$	58
5.1	Prehľad módov[32]	61
5.2	Jettcofov model rotora [34]	61
5.3	Rotorový systém so sieťou	63
5.4	Campbellov diagram	64
5.5	Campbellov diagram - detail	65
5.6	Translačný mód pri frekvencii 39.236Hz	66
5.7	Ohybový mód pri kritickej frekvencii 1470.8Hz	66

ZOZNAM TABULIEK

4.1	Porovnanie mechanickej odolnosti materiálov pri menovitých otáčkach 45000 ot/min	34
4.2	Geometrické limity pre návrh magnetických ložísk	35
4.3	Výsledky analytického výpočtu radiálneho ložiska	42
4.4	Porovnanie výsledkov pred a po optimalizácii	43
4.5	Výsledky analytického výpočtu axiálneho ložiska	54
4.6	Geometria axiálneho ložiska po optimalizácii	57
5.1	Prehľad vlastných frekvencií rotorovej sústavy	65

ZOZNAM SYMBOLOV, VELIČÍN A SKRATIEK

U_{max}	napätie výkonového stupňa [V]
I_{max}	maximálny prúd výkonového stupňa [A]
U_{sat}	saturačný prúd [A]
B_{sat}	magnetická indukcia pri saturácii [T]
I_b	bias prúd [A]
I_c, i_p	riadiaci prúd [A]
J_M	prúdová hustota doménových prúdov [A/m ²]
M	objemový dipólový moment
J_F	prúdová hustota voľných prúdov [A/m ²]
H	intenzita magnetického poľa [A/m]
F	sila [N]
B	magnetická indukcia [T]
μ_0	permeabilita vákua [H/m]
T	moment [Nm]
J	prúdová hustota [A/m ²]
l	dĺžka [m]
N	počet závitov [-]
I	prúd [A]
Φ	magnetický tok [Wb]
W_{co}	koenergia [J]
ψ	spriahnutý magnetický tok [Wb]
L	indukčnosť [H]
i	prúd [A]
R_m	magnetický odpor [1/H]
S_{Fe}	prierez železa [m ²]
l_{Fe}	dĺžka strednej siločiar [m]
g	vzduchová medzera [m]
μ_r	relatívna permeabilita [-]
dx	výchylka [m]
K_x	tuhosť [N/m]
K_i	zosilnenie aktuátora [N/A]
B_b	magnetická indukcia pri bias prúde [T]
α	bias ratio
ω	uhlová rýchlosť otáčania [rad/s]
v	obvodová rýchlosť [m/s]
σ	mechanické namáhanie [Pa]
ν	Poissonove číslo [-]

n_n	menovité otáčky [ot/min]
p	počet pólov [-]
ρ	hustota materiálu [kg/mm ³]
r	polomer [m]
w	šírka zuba [m]
n_p	počet pólov radiálneho magnetického ložiska [-]
τ_p	pólové krytie [-]
k_c	činiteľ plnenia medi [-]
S_{Cu}	prierez medi v drážke [m ²]
P	výkon výkonového stupňa [W]
x_{max}	maximálna výchylka [m]

1 ÚVOD

Súčasný trend v oblasti vývoja elektrických strojov tlačí na oblasť vysokootáčkových strojov. Pri vývoji a návrhu týchto strojov vychádzajú do popredia fenomény, ktoré pri klasických indukčných strojoch nebolo nutné brať do úvahy. Jednou z týchto technologických výziev je aj zavesenie otáčajúceho sa rotora. Jednoduchšie návrhy počítajú s využitím klasických gulôčkových ložísk, avšak vzhľadom na rýchlosti s veľkosťou desiatky tisíc otáčok za minútu, nepatria medzi najlepšiu voľbu. Lepšia možnosť pre tento typ strojov je vzduchové ložisko, prípadne magnetické zavesenie. Obe tieto varianty majú svoje výhody a nevýhody a ich výber je nutné starostlivo zvážiť už v procese návrhu, keďže ovplyvnia celkový návrh elektrického stroja. Vďaka absencii mechanického trenia, kvôli magnetickému závesu, sa magnetické ložiská stávajú prakticky bezúdržbové. Vysokootáčkové pohony nepatria medzi jedinú oblasť uplatnenia týchto ložísk. Vďaka ich vlastnostiam ich mnohí výrobcovia zakomponujú do svojich zariadení ako kardio-stimulátory, bezkontaktné lineárne posuvy, zariadení na kontrolu a riadenie elasticity rotora, magnetické tlmiče, turbo-pohony, využitie v prostredí s nebezpečnými látkami a mnohé ďalšie [1].

Popri vývoji vysokootáčkových pohonov vzniká rovnako tlak na vývoj kompaktných integrovaných systémov zahrňujúcich viacero funkcií do jediného produktu, napr. stroje s integrovanou prevodovkou alebo spojkou. Tým sa dosiahne zníženie výrobných nákladov a rovnako aj zastavanie celého systému. Z toho dôvodu mnoho tímov, pracujúcich v oblasti magnetickej levitácie, vyvíjajú hybridné ložiská, napr. kombináciou radiálno-axiálneho ložiska, príp. bezložiskové stroje.

Táto diplomová práca sa venuje teoretickému podkladu pre návrh magnetických ložísk s následným praktickým elektromagnetickým návrhom magnetických ložísk pre vysoko-otáčkový stroj popísaný v habilitačnej práci [2]. Vzniká ako pokračovanie semestrálnej práce [3], v ktorej je detailne matematicky popísaný zjednodušený analytický návrh. Výsledky práce poslúžia ako podklad pre návrh riadiacej a výkonovej elektroniky spoločne s riadiacimi štruktúrami. K návrhu je využitý systém ANSYS, v ktorom sú analyticky vypočítané hodnoty podrobené numerickej analýze a doplnené o závislosti potrebné pre ďalší návrh vyššie spomenutých štruktúr. V závere práce je overená rotorová dynamika. Predpokladá sa, že navrhnuté riešenie bude po dokončení všetkých častí realizované a zadané do výroby.

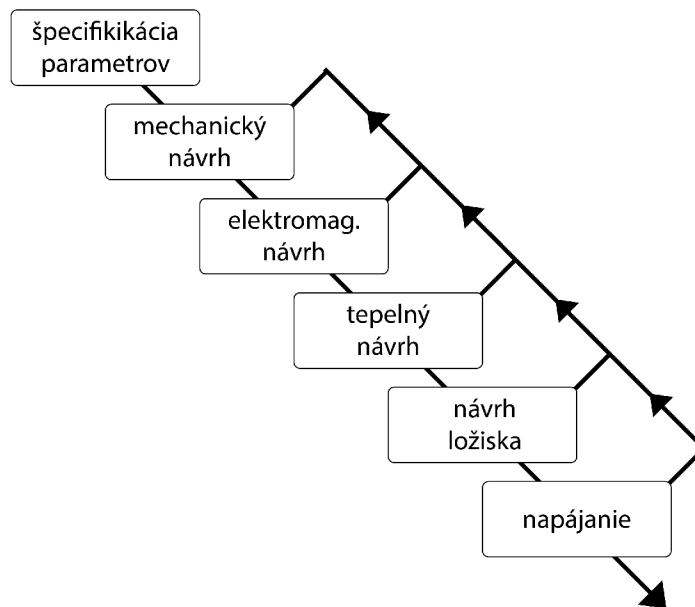
1.1 Dejiny vývoja magnetických ložísk

Model magnetického ložiska bol dlhé roky iba konceptom na papieri. Prevrat nastal s príchodom výkonovej elektroniky, analógového a digitálneho spracovania signálu a dostatočne výkonných zdrojov. To sa udialo okolo roku 1980, kedy začali byť všetky tieto oblasti dostatočne vyvinuté na to, aby predurčili praktické využitie magnetických ložísk v priemyselných aplikáciách. Ako jednu z najstarších prác, v ktorej boli magnetické ložiská, resp. magnetické zavesenie spomenuté, je Ernshawov teorém pojednávajúci o stabilite magnetického zavesenia, ktorý sa stal podkladom pre návrh magnetických ložísk. Následne jeden z prvých experimentov vykonal Holmes (1937) a Beam (1950). Obaja použili vo svojich experimentoch spätnoväzobnú reguláciu pre udržanie stability. Preto je zrod magnetickej levitácie datovaný do prvej polovice 19.storočia [4].

Koncom 19.st už magnetické ložiská zažívali implementáciu v mnohých systémoch v rýchlostiach od 5000ot/min do 15000ot/min. Tieto systémy magnetických ložísk si mohli dovoliť len veľké rotorové sústavy s hmotnosťami na úrovni jednotiek ton. Absencia olejového hospodárstva a možnosť prevádzky aj v znečistených prostrediach lákali mnohých zákazníkov prejsť práve na magnetické ložiská. Míľnikom v oblasti magnetických ložísk bol rok 1985, kedy bol predstavený úplne prvý bezolejový kompresor[5].

2 NÁVRH SYSTÉMU S MAGNETICKÝMI LOŽISKAMI

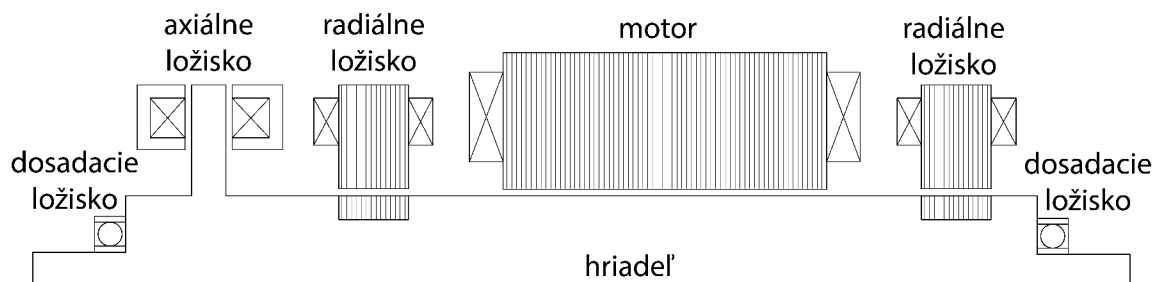
Metodika návrhu sa v marko-pohľade výrazne neodlišuje od návrhu moderných pohonov, viz. obrázok 2.1. Časti ako elektromagnetický a mechanický návrh spojený s overením oteplenia a zostavením regulačných štruktúr sú neoddeliteľnými krokmi k úspešnému funkčnému návrhu. Hoci tieto štruktúry sú nevyhnutné, ich poradie a dôležitosť sú závislé na konkrétnej aplikácii a vstupoch. Návrhy nie sú zvyčajne sekvenčné s jasnou postupnosťou krokov, ktoré vedú ku konečnému výsledku. Hoci časť výpočtu je správna a výsledky sú v poriadku, tento výsledok počas nasledujúceho výpočtu, (ovplyvnený výsledkami z predchádzajúceho výpočtu) môže kolidovať napr. s limitnými parametrami. Preto návrhy sú často zobrazované ako iteračné, aby bol dosiahnutý optimálny návrh. Tento prístup je chápaný do značnej miery aj ako optimalizácia. Finálna optimalizácia sa zameriava viac na odladenie určitých výsledných parametrov za účelom zlepšenia určitej vlastnosti, keďže návrhy sú dosť často o kompromisoch a protikladných požiadavkách.



Obr. 2.1: Proces návrhu elektrického stroja [6]

Pre úpravu a rozvedenie predchádzajúceho algoritmu návrhu pre potreby magnetických ložísk je nevyhnutná znalosť ich parametrov a javov, ktoré budú ovplyvňovať návrh. Preto nasledujúca sekcia bude venovaná stručnému prehľadu aspektov vstupujúcich do návrhu.

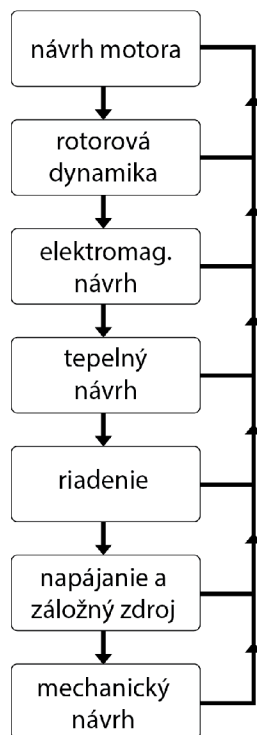
V úvode už bolo predstreté, že magnetické ložiská sú úzko späté s vysoko-otáčkovými mechanizmami. Tieto mechanizmy majú kvôli mechanickému namáhaniu obmedzenú maximálnu obvodovú rýchlosť. Tento jav bude podrobnejšie diskutovaný v podkapitole 4.4.1. Táto prvotná mechanická analýza posluží ako vstup pre elektromagnetický výpočet stroja a magnetických ložísk. Aby bolo možné prvotný návrh dokončiť, je potrebné jednotlivé celky uložiť vrámci systému s pridaním podporných a bezpečnostných prvkov ako sú napr. dosadacie ložiská, chladiace okruhy, atď. Do tohoto momentu boli jednotlivé prvky navrhované samostatne a so vznikom systému je možné analyzovať celkový vplyv jednotlivých prvkov. Tie budú na seba navzájom vplývať, či už magneticky alebo tepelne. Popri týchto analýzach bude tepelný výpočet a overenie rotorovej dynamiky nevyhnutnou súčasťou. V porovnaní s mechanickými guľôčkovými ložiskami, využitím magnetických ložísk, narastie výraznejšie dĺžka hriadeľa, čo sa negatívne odrazí na rotorovej dynamike.



Obr. 2.2: Náčrt sústavy rotora s umiestnenými ložiskami

Toto je prvotný náčrt systému a na základe výsledkov je možné pristúpiť k modifikácii jednotlivých parametrov za účelom dosiahnutia optimálneho návrhu, hoci, ako už bolo spomenuté vyššie, je to do značnej miery o kompromisoch. Jedná sa o multidisciplinárny problém a každá časť návrhu má právo diktovať, ako bude systém nakoniec vyzerat'. Toto rozloženie jednotlivých častí na rotore je podobné ako v [11]

Na základe týchto myšlienok je návrhový proces z 2.1 upravený a konkretizovaný pre potreby magnetických ložísk do nasledujúcej podoby:



Obr. 2.3: Návrhový proces upravený pre magnetické ložiská

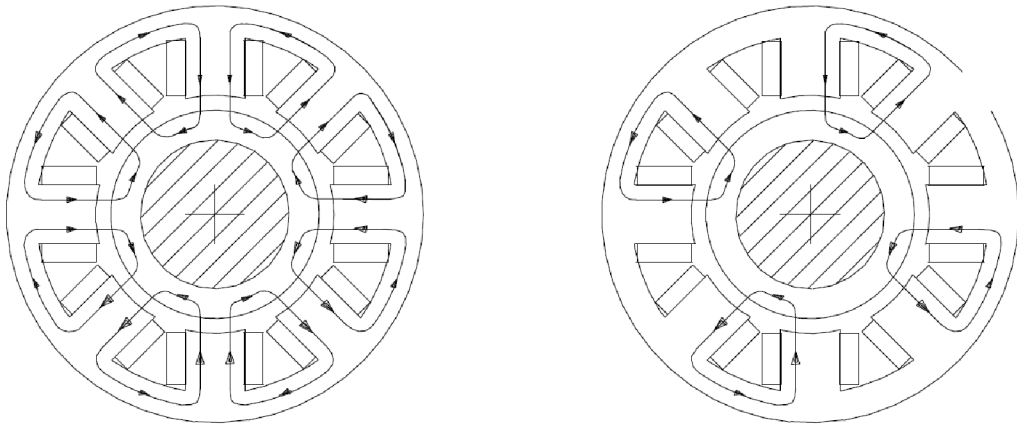
2.1 Zohľadňujúce parametre pri návrhu

Predchádzajúca metodika pokrýva návrh celého systému. Táto práca sa venuje podrobnejšie problematike návrhu elektromagnetickej časti magnetických ložísk a pre ďalší postup je potrebné brať v úvahu určité zohľadňujúce parametre. Tieto parametre sú úzko späté s konkrétnou aplikáciou a konkrétnou geometriou. Nasledujúca sekcia bude bližšie rozoberať teoretický podklad pre voľbu vstupných parametrov výpočtu magnetických ložísk.

2.1.1 Typy magnetických ložísk

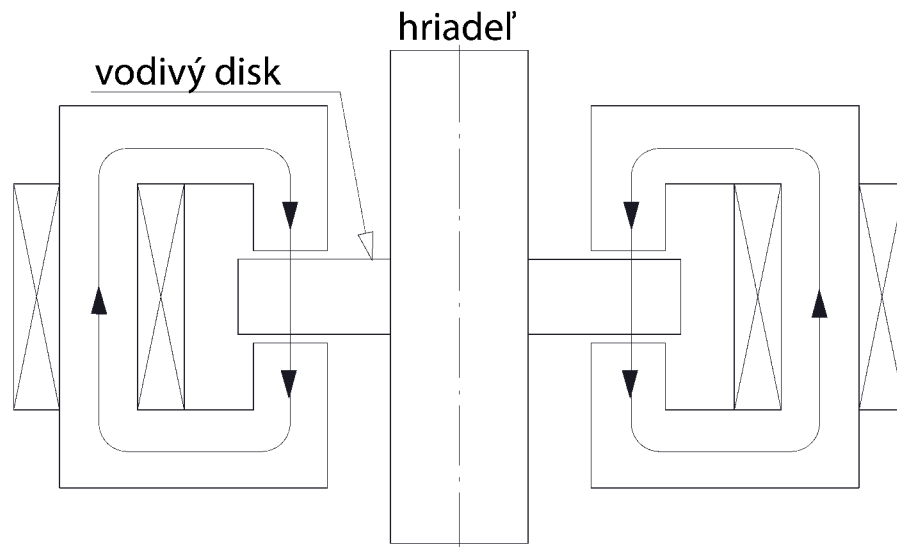
Každá aplikácia magnetických ložísk je určitými potrebami špecifická a preto aj vďaka vývoju vzniklo viacero rôznych usporiadaní a geometrií, ktorých využitie smeruje k špecifickým aplikáciám. V podstate voľba typu je úzko spätá s kapacitou a zložitostou riadenia. Pri realizácii radiálneho ložiska je možné siahnuť po rôznych n -pólových konštrukciách. Avšak nie pre každé n dáva zmysel tento systém zohľadňovať, hoci je realizovateľný. Ako bolo vyššie spomenuté, z pohľadu riadenia sa často volí 8 pólová konštrukcia, ktorá prináša najjednoduchšie riadenie, keďže pri uvažovaní 2-osového riadenia má každá os samostatne riadený elektromagnet,

ktorý je minimálne ovplyvňovaný tokmi od susedných elektromagnetov (hoci pri uvažovaní delenia toku: jeden zub pokrýva tok od 2 susedných cievok), viz obrázok 2.4. Porovnanie jednotlivých konfigurácií počtu pólov je možné nájsť v článkoch [7], [8], [9]. Popri zložitosti riadenia, do návrhu vstupuje aj celková spotreba aktuátora (elektromagnet plus výkonový stupeň). Vyšší počet pólov a teda aj cievok síce vykazuje lepšie výkonové pomery, čo je znakom lepšieho využitia objemu železa, avšak z ekonomického hľadiska pre zabezpečenie systému to nemusí byť najlepšia voľba vzhľadom na zvýšený počet elektronických výkonových stupňov [1].



Obr. 2.4: Systém delenia toku v radiálnom 8-pólovom magnetickom ložisku (vľavo s delením toku, vpravo bez delenia toku) [12]

Pre axiálne ložisko existujú primárne 2 koncepčne odlišné riešenia. Jedno využíva magnetický ťah medzi magnetom (pasívnym, alebo aktívnym - elektromagnet) a feromagnetickou kotvou. V princípe je tento model blízky myšlienke elektromagnetu v radiálnom ložisku. Na druhej strane existuje model využívajúci vírivé prúdy vznikajúce vo vodivom materiáli a sila je vyvolávaná magnetickou interakciou medzi indukovanými prúdmi v pohybujúcom sa disku a magnetickým pólom budeným v aktuátore. Nevýhoda tohoto konceptu tkvie v závislosti veľkosti indukovaných vírivých prúdov na rýchlosti otáčania rotora. Preto tieto ložiská musia mať štartovacie pomocné ložiská, ktoré pokrývajú oblasť nízkych otáčok, kedy indukované vírivé prúdy nie sú dostatočne veľké, aby vyvolali potrebnú silu. 2.5. [18]



Obr. 2.5: Axiálne ložisko pracujúce na princípe vírivých prúdov

Predchádzajúce odstavce boli zamerané primárne na aktívne magnetické ložiská, keďže tejto téme sa venuje práca. V praxi sa často v nenáročných aplikáciách využívajú magnety na pasívne ložiská, ktoré ale nedosahujú porovnateľné parametre s aktívnymi. Na druhej strane u nich absentuje prítomnosť riadenia a potreba výkonových elektronických prvkov na zabezpečenie správnej činnosti. Preto mnohé aplikácie podporili vznik hybridných ložísk, kde sa kombinujú vlastnosti aktívnych a pasívnych magnetických ložísk, prípadne radiálnych a axiálnych. To dopomáha do značnej miery šetriť priestor v stroji a teda aj spotrebu materiálov na jeho zhotovenie.

2.1.2 Kapacita ložiska

Kapacita ložiska udáva maximálnu silu, ktorú musí ložisko vyvinúť, aby dosiahlo nielen magnetickú levitáciu rotorovej časti stroja, ale aj silu pre pokrytie silových dynamických javov. Pri určení kapacity sa vychádza z hmotnosti rotorovej časti spoločne so všetkými prvkami, ktoré bude obsahovať. Problémom často býva určenie, aký podiel sily bude určený pre kompenzáciu externých silových účinkov, čiže dynamické javy. Ak by návrh počítal len s hmotnosťou rotorovej časti, tak by systém nebol schopný kompenzovať dynamické stavy, resp. by ich kompenzoval pomaly. Podobne v tomto type ložiska vzniká interakcia magnetických polí medzi jednotlivými pólmi, čo môže rovnako vplývať na veľkosť sily.

2.1.3 Dynamika ložiska

Dôležitým parametrom pre dynamiku ložiska je návrh elektroniky a regulácie, preto už počas elektromagnetického návrhu je vhodné s ním počítať, keďže od dynamiky sa odvíjajú maximálne parametre výkonových stupňov a tieto parametre priamo udávajú prúd v magneto-motorickej sile. Napríklad, celkový výkon zosilňovača je daný súčinom $U_{max}I_{max}$, kde I_{max} je volený ako saturačný prúd magnetického obvodu, čiže je možné konštatovať, že dynamika ložiska je priamo závislá na napätí. Predpoklad $I_{sat} = I_{max}$ je možné uvažovať len v prípade požiadavky na maximálne využitie výkonového stupňa. Výkon by mal byť dodaný pri hraničných výchylkách rotora od koncentrickej polohy.

2.1.4 Bias a riadiaci prúd

Ako bolo stanovené v predchádzajúcom odstavci, tak maximálny prúd výkonového stupňa je z pohľadu návrhu vhodné zvoliť totožný ako saturačný prúd, pri ktorom nedochádza k nadmernej saturácii železa B_{sat} . Nadmerne zvyšovať magnetickú indukciu nemá príliš význam, pretože za určitou hranicou dochádza k saturácii a so zmenou prúdu sa magnetická indukcia výrazne nemení. Zvyčajne sa B_{sat} volí na hornej hranici lineárnej oblasti.

Pri magnetických ložiskách sa navyše udáva pomer medzi bias prúdom a saturačným prúdom, kde táto hodnota by nemala presiahnuť 0.5. Bias prúd podporuje linearizáciu síl pôsobiacich na rotor, hoci vyššia hodnota znamená zlepšenie linearity, ale neúmerne zvyšuje veľkosť cievky. Vysvetlením je, že pri maximálnej výchylke, bude pri pomere medzi saturačným a bias prúdom väčšom ako 0.5, sila vyvíjaná v oboch protilahlých póloch a teda výslednica bude daná ich súčtom. Pri pomere medzi saturačným a bias prúdom rovnom 0.5 bude pri maximálnej výchylke na jednom póle nulový prúd a na protilahlom $I_b + I_c$, takže neexistuje sila pôsobiaca proti tejto sile. Súčasný trend ekologického zmýšľania podporuje prácu na prístupoch s uvažovaním nízkeho až nulového bias prúdu [19].

2.1.5 Riadenie a snímače

Pri uvažovaní umiestnenia magnetických ložísk je potrebné brať do úvahy aj uloženie čidiel snímajúcich polohu rotora. Tie by mali byť umiestnené v čo najtesnejšej blízkosti k prvku, ktorý má za úlohu regulovať výchylku v danom mieste. Príliš malé priemery spôsobujú problémy pri snímaní polohy, keďže plocha je oblá a výchylky spôsobujú značnú nesymetriu.

V teoretickej rovine sa využíva na popis riadenia a regulácie diferenciálny model, kde 2 čidlá, umiestnené proti sebe, merajú polohu rotora a regulujú na rovnakú odchýlku pri oboch čidlách. Zároveň týmto spôsobom pri poruche čidla je možné prejsť na riadenie iba s jedným čidlom, avšak so zmenou regulačných štruktúr. Takže tento spôsob riadenia je istým spôsobom zálohovaný. Prakticky sú ale kvalitné čidlá drahé a preto z ekonomických dôvodov sa meria výchylka v osiach XY pre radiálne ložisko a v osi Z pre axiálne ložisko. To redukuje počet čidiel z 10 na 5 kusov.

Pokročilé riadiace štruktúry umožňujú využiť aj bezčidlové riadenie, avšak je nutné dôkladne poznať správanie ložiska v každej situácii [13].

3 TEORETICKÝ PODKLAD PRE ELEKTRO- MAGNETICKÝ NÁVRH MAGNETICKÝCH LOŽÍSK

Magnetické ložisko je najprv navrhnuté pomocou analytických vzťahov, ktoré sú neskôr konfrontované s numerickým výpočtom pomocou analýzy metódy konečných prvkov - MKP. Nasledujúca kapitola popisuje tieto vzťahy.

3.1 Odvodenie sily pomocou Maxwellovho tenzora

Na odvodenie sily pôsobiacej na feromagnetický element je možné zvoliť viacero prístupov. Jedným z nich je aj Maxwellov tenzor, ktorý je tenzorom napätia vyjadrujúci tok hybnosti elektromagnetického poľa zvolenou plochou. Doménové prúdy v materiáli je možné vnímať ako prúdovú hustotu týchto prúdov s určitým rozložením vrámci materiálu. Za predpokladu dokonalého natočenia domén na základe ampérového modelu je prúd koncentrovaný blízko povrchu materiálu. Potom v každom prípade bude prúdová hustota definovaná ako

$$\mathbf{J}_M = \nabla \times \mathbf{M} \quad (3.1)$$

kde, \mathbf{M} je objemový dipólový moment. Ak sa v objeme nachádzajú voľné prúdy, tak vedú k nenulovej cirkulácii intenzity magnetického poľa \mathbf{H} .

$$\mathbf{J}_F = \nabla \times \mathbf{H} \quad (3.2)$$

Na základe týchto dvoch prúdových hustôt je sila pôsobiaca na feromagnetický element s využitím objemového integrálu

$$\mathbf{F} = \int (\mathbf{J}_M + \mathbf{J}_F) \times \mathbf{B} \, dv \quad (3.3)$$

Dosadením 3.1 a 3.2 do tejto rovnice

$$\mathbf{F} = \int (\nabla \times \mathbf{M} + \nabla \times \mathbf{H}) \times \mathbf{B} \, dv \quad (3.4)$$

Celková magnetická indukcia je súčtom magnetizácie a intenzity magnetického poľa, ktoré sú proporciálne závislé na magnetickej indukcii cez permeabilitu.

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{M} + \mathbf{H}) \quad (3.5)$$

Dosadením tejto rovnice do výrazu pre silu sa zredukuje počet neznámych a rovnica získa tvar

$$\mathbf{F} = \frac{1}{\mu_0} \int (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} \, dv \quad (3.6)$$

Využitím vektorovej identity

$$\oint (\mathbf{B}\mathbf{B}) - 2 \oint \mathbf{B} (\mathbf{B}d\mathbf{S}) = 2 \int \mathbf{B} \times (\nabla \times \mathbf{B}) \, dv - 2 \int \mathbf{B} (\nabla \cdot \mathbf{B}) \, dv \quad (3.7)$$

$$(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} = -\mathbf{B} \times (\nabla \times \mathbf{B}) \quad (3.8)$$

Aplikovaním týchto úprav na rovnicu sily 3.6

$$\mathbf{F} = \frac{1}{\mu_0} \oint \mathbf{B} (\mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}) - 2 \frac{1}{2\mu_0} \oint (\mathbf{B} \cdot \mathbf{B}) \, d\mathbf{S} - \frac{1}{\mu_0} \int \mathbf{B} (\nabla \cdot \mathbf{B}) \, dv \quad (3.9)$$

Gaussovo pravidlo hovorí o tom, že pre statické a pomaly sa meniace magnetické polia platí

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.10)$$

Čo spôsobí, že z rovnice sily 3.9 vypadne posledný člen

$$\mathbf{F} = \frac{1}{\mu_0} \oint \mathbf{B} (\mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}) - 2 \frac{1}{2\mu_0} \oint (\mathbf{B} \cdot \mathbf{B}) \, d\mathbf{S} \quad (3.11)$$

Táto integrácia má tvar Maxwellovho tenzoru napätia, ktorý je definovaný pri zanedbaní elektrického poľa ($\mathbf{E} = 0$)

$$T_{ij} = \frac{1}{\mu_0} \left(B_i B_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} B^2 \right) \quad (3.12)$$

kde $\delta_{ij} = 1$ pre $i = j$ a $\delta_{ij} = 0$ pre $i \neq j$. Na základe tohto vyjadrenia je sila vyjadrená pomocou Maxwellovho tenzoru

$$\mathbf{F} = \oint \bar{\mathbf{T}} \cdot d\mathbf{S} \quad (3.13)$$

V prípade, že vektor magnetickej indukcie je kolmý k povrchu železa a na celom tomto povrchu, tak je sila pôsobiaca na feromagnetický element

$$\mathbf{F} = \frac{1}{2\mu_0} \oint |\mathbf{B}|^2 d\mathbf{S} \quad (3.14)$$

Posledný krok zahŕňal predpoklad, ktorý je možné uvažovať iba v prípade, že materiál má rádovo niekoľkonásobne vyššiu relatívnu permeabilitu v porovnaní s okolitým prostredím. Ak by tomu tak nebolo, tak by to značne zvýšilo rozptyl a

teda aj znížilo magnetickú indukciu vo vzduchovej medzere.

V mnohých literárnych prameňoch sa pre názornosť využíva priblíženie, že sila pôsobí na povrchu skúmaného elementu. Dokonca aj tento výpočet to takto uvažuje. Sila je v celom elemente rozmiestnená rovnomerne a pôsobí konzistentne na celý element a nie len na jeho povrchu a v mieste vzduchovej medzery [12].

3.2 Zákon celkového prúdu

Ampérov zákon, alebo zákon zachovania celkového prúdu je prvým z rady Maxwellových rovníc.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (3.15)$$

Pri integrácii cez plochu A

$$\int_A \nabla \times \mathbf{H} \, da = \int_A \mathbf{J} \, da \quad (3.16)$$

Pravú stranu rovnice je možné nahradiť pomocou intenzity magnetického poľa a jej cirkuláciou na ploche A (podľa Stokesovej vety 3.18).

$$\oint_A H \, dl = \int_A \mathbf{J} \, da \quad (3.17)$$

Tento predpoklad platí pre 2D priestor. A dosadením tohoto predpokladu do rovnice 3.16

$$\int_A \nabla \times \mathbf{H} \, da = \oint_A H \, dl \quad (3.18)$$

Za predpokladu, že element dl je paralelný s \mathbf{H} , cesta magnetického toku môže byť rozdelená na n_a segmentov, kde H je konštantné. Prúdová hustota je rovnomerne rozložená a sústredená iba v cievkach a z toho prepisom integrálu do formy súm n_a elementov vzniká

$$\sum_{i=1}^{n_a} H_i l_i = \sum_{i=1}^{n_a} N_i I_i \quad (3.19)$$

Pri zachovaní predpokladu, že $JA = NI$ a uvažovania materiálu s konštantnou permeabilitou v každom segmente

$$B_i = \mu_i H_i \quad (3.20)$$

Bude výsledok v tvare [14]

$$\sum_{i=1}^{n_a} \frac{B_i l_i}{\mu_i} = \sum_{i=1}^{n_a} N_i I_i \quad (3.21)$$

3.3 Zákon zachovania toku

Štvrtou rovnicou z radu Maxwellových rovníc je Gaussov zákon známy aj ako zákon spojitosti indukčného toku.

$$\nabla \times \mathbf{B} = 0 \quad (3.22)$$

V integrálnej podobe

$$\int_s \int \mathbf{B} \, da = 0 \quad (3.23)$$

kde integrál je možné vyjadriť ako sumu

$$\sum_{i=1}^{n_a} \int_{A_i} B_i \, da = 0 \quad (3.24)$$

$$\int_{A_i} B_i \, da = B_i A_i = \Phi_i \quad (3.25)$$

A teda nakoniec [15]

$$\sum_{i=1}^{n_p} \Phi_i = 0 \quad (3.26)$$

3.4 Odvodenie sily pomocou energie magnetického poľa

Pre odvodenie sily je možné využiť energiu alebo koenergiu magnetického poľa. Pri uvažovaní lineárnej BH charakteristiky sú obe tieto energie svojou veľkosťou rovnaké. Avšak výpočty sa zjednodušia uvažovaním koenergie.

$$W_{co} = \int_0^i \psi di = \int_0^i Lidi = \frac{1}{2} Li^2 \quad (3.27)$$

kde indukčnosť je možné vyjadriť pomocou magnetického odporu. Potom celkový magnetický odpor obvodu zahrňujúci magnetický odpor železa a vzduchovej medzery je:

$$R_m = \frac{1}{\mu_0 S_{Fe}} \left(\frac{l_{Fe}}{\mu_{rFe}} + 2g \right) \quad (3.28)$$

Z toho indukčnosť

$$L = \frac{N^2}{R_m} = \frac{N^2 \mu_0 S_{Fe}}{\frac{l_{Fe}}{\mu_{rFe}} + 2g} \quad (3.29)$$

Tým sú dostupné všetky parametre pre deriváciu energie sústavy, ktorú dostaneme vyvíjanú vo vzduchovej medzere

$$F_{im}(i, g)|_{i=konšt.} = \frac{\partial W_{co}}{\partial g} = N^2 \mu_0 S_{Fe} \frac{-1}{\left(\frac{l_{Fe}}{\mu_{r_{Fe}}} + 2g\right)^2} i^2 \quad (3.30)$$

Odvođená sila je záporná. Môže sa to zdať nesprávne, ale logický dôvod je, že sila pôsobí v smere zmenšovania vzduchovej medzery, resp. inými slovami, snaží sa dostať do najnižšieho energetického stavu, takže redukuje šírku vzduchovej medzery tak, aby magnetický odpor medzery bol čo najmenší.[?]

Pri využití zákona celkového prúdu (Ampérovho zákona) a II. Kirchhoffovho zákona pre magnetický obvod platí bilancia

$$Ni = H_{s_{Fe}} l_{s_{Fe}} + H_{r_{Fe}} l_{r_{Fe}} + 2H_g g \quad (3.31)$$

kde intenzitu magnetického poľa je možné nahradiť pomocou permeability a indukcie magnetického poľa

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (3.32)$$

Dosadením do predchádzajúcej rovnice je výsledná magnetomotorická sila vyjadrená ako

$$Ni = \frac{B}{\mu_0 \left(\frac{l_{Fe}}{\mu_{r_{Fe}}} + 2g\right)} \quad (3.33)$$

Kvadrát magnetomotorickej sily je obsiahnutý aj v rovnici 3.30 a po dosadení a úprave je zjednodušený vzťah medzi silou, geometriou a magnetickým obvodom

$$F_{im} = -\frac{B^2 S_{Fe}}{\mu_0} \quad (3.34)$$

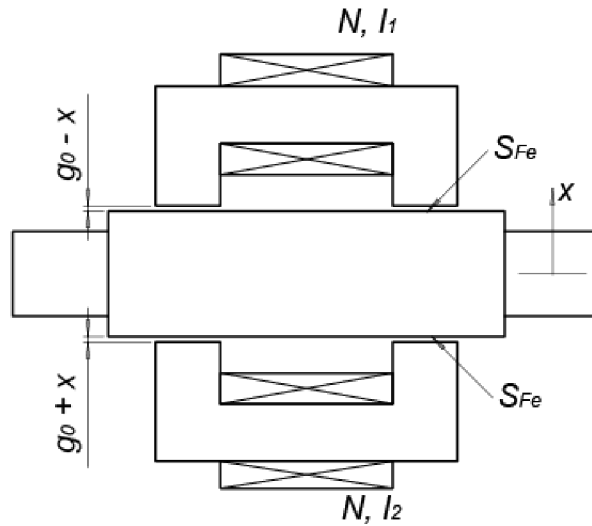
Táto rovnica už využíva vstupné parametre a obsahuje jednu neznámu a to potrebný prierez magnetického obvodu. Prístupov k výpočtu je viacero a všetky by mali viesť k rovnakému výsledku.[16]

3.5 Linerizácia výpočtu

Pri analýze rovnice 3.35 bez uvažovania externých vplyvov je závislosť sily na výchylke od sústrednej polohy dx kvadratická, pri zachovaní konštantného budenia NI . To je spôsobené tým, že magnetická indukcia materiálu sa mení so štvorcem vzduchovej medzery. Z toho vyplýva, že pri nulovej výchylke bude pôsobiť sila na kotvu, čo je nežiadúci jav, pretože si nezachová svoje koncentrické umiestnenie. Riešenie

tohto problému spočíva v protismernom silovom pôsobení, tzn., že ak pri $dx = 0$ bude rovnaká sila pôsobiť v opačnom smere, tak tým sa tieto sily navzájom vyrušia.

Kvadratická závislosť nie je viazaná iba na stav $dx = 0$, avšak jej vplyv je prítomný vrámci celého rozsahu pôsobenia. Výsledkom je lineárna závislosť pôsobiacej sily na výchylke. Zdrojom protismernej sily môže byť tiažová sila celej rotorovej časti, avšak do akej miery má táto sila dostatočné kompenzačné silové účinky je diskutabilné a závisí ako na konkrétnej aplikácii, tak aj od uloženia celého systému, ale aj na konfigurácii rotorovej časti, najmä jej hmotnosti. Návrh magnetických ložísk sa viac prikláňa k umelému silovému pôsobeniu, tzn. že sila je vyvolaná protilahlým elektromagnetom, ktorý vyvolá silu s opačným smerom pôsobenia.

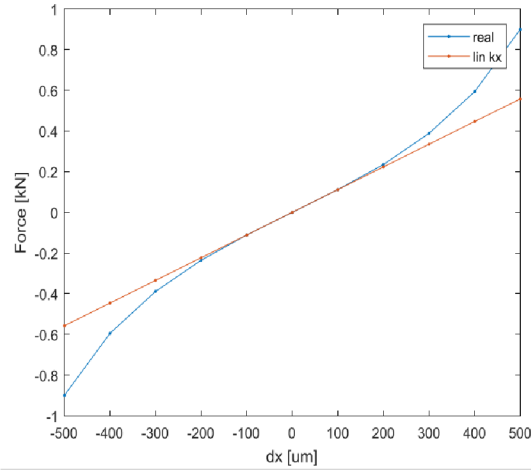


Obr. 3.1: Model protilahlo pôsobiacich elektromagnetov

Matematicky je možné linearizáciu a jej silové pôsobenie na kotvu popísať nasledovne

$$F = \mu_0 N^2 S_{Fe} \left(\frac{(i_b + i_x)^2}{(g - x)^2} - \frac{(i_b - i_x)^2}{(g + x)^2} \right) \quad (3.35)$$

Sila je tvorená 2 zložkami, kde jedna je kladná a druhá záporná. To vystihuje vyššie predstavený problém. Pri zachovaní budenia NI je sila od oboch elektromagnetov konštantná, oba členy v zátvorke budú rovnako veľké a teda výsledné pôsobenie podľa tejto rovnice bude nulové.



Obr. 3.2: Porovnanie linearizovanej a reálnej sily pri $I_c = 0A$ [20]

Táto rovnica rovnako dopomôže k výpočtu dôležitých parametrov pre riadenie a to k zosilneniu aktuátora a tuhosti celého systému [17], [20].

Pomocou týchto parametrov je možné predikovať správanie sústavy

$$F \approx \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{i_p=0} x + \left. \frac{\partial f}{\partial i_p} \right|_{x=0} i_p = K_x x + K_i i_p \quad (3.36)$$

3.6 Zosilnenie aktuátora pre $x=0$

V literatúre sa často pod týmto pojmom chápe aj ako prúdová tuhosť. Tieto parametre využíva riadenie na nastavenie regulátorov.

$$K_i \doteq \left. \frac{\partial f}{\partial i_p} \right|_{x=0} = \frac{\mu_0 N^2 I_b S_{Fe}}{g_0^2} \quad (3.37)$$

$$B_b = \frac{\mu_0 N I_b}{2g_0} \Rightarrow I_b = \frac{2g_0 B_b}{N \mu_0} \quad (3.38)$$

Po dosadení I_b do rovnice vyššie, K_i bude zosilnenie

$$K_i = \frac{2N B_b S_{Fe}}{g_0} \quad (3.39)$$

Zosilnenie aktuátora udáva priamo citlivosť systému. Zvýšenie citlivosti podľa rovnice je možné zvýšením bias prúdu, prípadne zmenšením vzduchovej medzery [12].

3.7 Tuhosť systému v otvorenej slučke pri $x=0$

$$K_x \doteq - \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{i_p=0} = - \frac{\mu_0 N^2 S_{Fe}}{g_0^3} (I_b^2 + i_{p,0}^2) \quad (3.40)$$

Pri $i_{p,0} = 0$ a obdobnou úpravou ako v predchádzajúcom prípade, je tuhosť

$$K_x = - \frac{4B_b^2 S_{Fe}}{\mu_0 g_0} \quad (3.41)$$

Podobne aj v tomto prípade bude tuhosť narastať s magnetickou indukciou, avšak v porovnaní so zosilnením, je to zmena kvadratická, prípadne so zmenšením vzduchovej medzery rovnakým spôsobom ako v predchádzajúcom prípade. Tento parameter je možné chápať aj ako tuhosť "magnetickej pružiny". Záporné znamienko vyplýva z derivácie [12].

3.8 Strmosť nárastu sily

Pri zanedbaní K_x a odporu vinutia

$$\left| \frac{df}{dt} \right|_{max} \approx K_i \left| \frac{di}{dt} \right|_{max} \quad (3.42)$$

kde

$$\left| \frac{di}{dt} \right|_{max} \approx \frac{U_{max}}{L} \quad (3.43)$$

A indukčnosť pri zanedbaní železa

$$L = \frac{N^2}{R_m} = \frac{N^2 \mu_0 S_{Fe}}{2g} \quad (3.44)$$

Dostupná rýchlosť prechodu:

$$\left| \frac{df}{dt} \right|_{max} = \frac{2I_b U_{max}}{g} = \frac{2\alpha I_{sat} U_{max}}{g} \quad (3.45)$$

kde α je pomer medzi budiacim a maximálnym saturačným prúdom (bias ratio) $\alpha = \frac{I_b}{I_{sat}}$.

3.9 Príklad

Na základe odvodení a definícií z predchádzajúcich kapitol je možné pristúpiť k zjednodušenému návrhu magnetického zavesenia kompenzujúceho jeden stupeň voľnosti. Pre názornosť je možné využiť obrázok 3.1, kde je uvažovaný iba jeden pól.

Z Ampérovho zákona

$$\frac{B_1 l_1}{\mu_1} + \frac{B_2 l_2}{\mu_2} + \frac{B_{g1} l_{g1}}{\mu_{g1}} + \frac{B_{g2} l_{g2}}{\mu_{g2}} = NI \quad (3.46)$$

Pri zachovaní rovnakého prierezu prechodu magnetického toku a pri platnosti zákona zachovania magnetického toku platí

$$B_1 = B_2 = B_{g1} = B_{g2} = B \quad (3.47)$$

za predpokladu, že permeabilita feromagnetického materiálu je niekoľkonásobne vyššia než vzduchu vo vzduchovej medzere, jej podiel nebude výrazný a preto ju môžeme uvažovať ako nekonečnú, čím v rovnici budú prvé 2 členy nulové.

$$\frac{l_1}{\mu_1}, \frac{l_2}{\mu_2} \ll \frac{l_g}{\mu_g} \quad \mu_g = \mu_0 \quad (3.48)$$

A teda, ak vzduchová medzera $l_{g1} = l_{g2} = g$

$$2 \frac{Bl_g}{\mu_g} = NI \Rightarrow B = \frac{\mu_0 NI}{2g} \quad (3.49)$$

Z odvodenia sily pomocou Maxwellovho tenzoru je sila

$$f = \frac{1}{2\mu_0} \sum_{i=1}^{n_a} B_i^2 A_i \quad (3.50)$$

Pri zanedbaní rozptylu magnetického toku je sila

$$f = \frac{B^2 A_g}{\mu_0} \quad (3.51)$$

a dosadením magnetickej indukcie B je výsledná sila pôsobiaca na kotvu

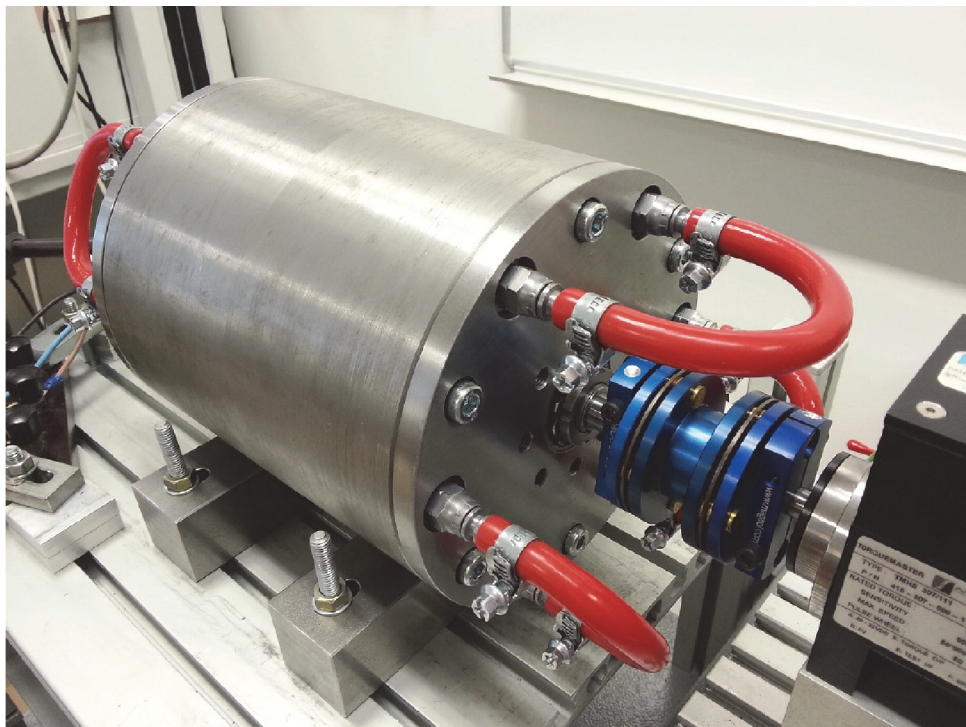
$$f = \frac{\mu_0 N^2 I^2 A_g}{4g^2} \quad (3.52)$$

4 PRAKTICKÝ NÁVRH MAGNETICKÉHO LOŽISKA

Predchádzajúce kapitoly popisovali teoretickú stránku návrhu magnetických ložísk stručne zohľadňujúc ich parametre. Tieto podklady poslúžia v ďalšom návrhu, kde budú využité pre konkrétny návrh radiálneho a axiálneho ložiska pre vysokootáčkový stroj vyvinutý na ústave UVEE FEKT VUT v Brně. Paralelne, ale separátne s touto diplomovou prácou prebieha aj návrh elektroniky a riadenia, čím je pokrytý návrhový cyklus, ako bol popísaný v kapitole 2. Spomínaný stroj je súčasťou habilitačnej práce [2] a má nasledujúce parametre:

Výkon	12 kW
Otáčky	45000 ot/min
Napätie	230V
Počet pólov (2p)	2
Frekvencia	750Hz

Ako laboratórny prípravok je tento stroj znázornený na nasledujúcom obrázku.



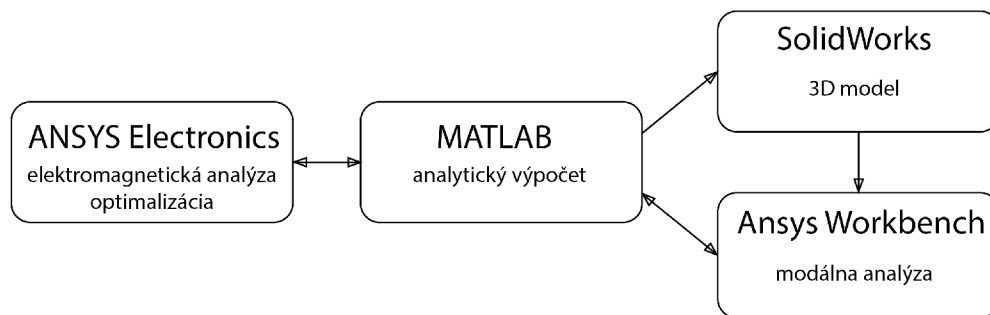
Obr. 4.1: Elektrický stroj, pre ktorý sú navrhnuté magnetické ložiská [2]

Tento stroj má implementovaných viacero technických riešení, ktoré môžu priamo alebo nepriamo vplyvať na návrh magnetických ložísk. Jedným z najvýraznejších, ktoré budú priamo ovplyvňovať výpočet, je maximálny priemer radiálneho ložiska, vzhľadom na už existujúci systém chladenia, zasadený priamo do kostry statora stroja. Vzhľadom na to, že sa jedná o vysoko-otáčkový stroj, tak odstredivé sily pri tejto rýchlosti sú extrémne a blížia sa k mechanickým limitom použitých materiálov. Podobne do značnej miery prechod z guľôčkových na magnetické ložiská bude mať za následok nárast dĺžky hriadeľa, čo značne degraduje dynamiku rotora.

Pre uloženie magnetických ložísk budú navrhnuté prídavné rozšírenia, ktoré nahradia súčasné ložiskové štíty magnetickými ložiskami. Vzhľadom na povahu magnetických ložísk a ich objemový záber v porovnaní s klasickými ložiskami, bude nevyhnutné celý stroj rozšíriť. Súčasný chladiaci systém stroja je možné využiť aj na chladenie magnetických ložísk, čím pri efektívnejšom odvode tepla je možné uvažovať s prúdovou hustotou na hornej hranici doporučených hodnôt. Konečné konštrukčné riešenie počíta so zachovaním súčasného statora a výrobou magnetických ložísk a nového rotora pre tento stroj. Od tejto myšlienky sa následne aj odvíja uvažovanie o rozmiestnení jednotlivých častí vrámci systému. V tomto prípade bol zvolený rovnaký model ako na obrázku 2.2.

4.1 Koncept riešenia

Súčasťou práce je dvojitý prístup k výpočtu magnetického ložiska - analytický a numerický. Analytický výpočet poskytuje výsledky priamo a relatívne v krátkom čase, avšak numerická analýza je náročnejšia na výpočtový výkon a čas. Vzhľadom na to bol zvolený prístup, kedy je výsledok analytického výpočtu podrobený numerickej analýze. Za týmto účelom bol vytvorený skript zahŕňajúci analytický výpočet v prostredí MATLAB, ktorý priamo komunikuje s prostredím ANSYS, v ktorom prebieha presnejšia numerická analýza. Pre zjednodušenie komunikácie boli modely parametrizované. Obe ložiská, radiálne aj axiálne, sú skúmané v 2D aj 3D analýze, aby bolo možné porovnať vzniknuté rozdiely. 2D analýza je výrazne menej náročná na čas v porovnaní s 3D analýzou, avšak opäť do toho vstupuje presnosť výpočtu. 3D model systému bol spracovaný v programe SolidWorks a slúži ako vstup do modálnej analýzy rotorovej dynamiky. Z technických príčin nebolo možné prepojiť elektromagnetickú a modálnu analýzu cez ANSYS Workbench. Inak by bolo možné analyzovať celý systém pri rôznych stavoch a sledovať aj vzájomné pôsobenie jednotlivých subsystémov.



Obr. 4.2: Koncept riešenia

4.2 Návrh typu ložísk a ich uloženie v rámci systému

V mnohých prácach je popísaných viacero návrhov, ktoré majú svoje špecifiká a aj svoje uplatnenie nájdu v rôznych sférach. V tomto prípade padlo rozhodnutie, že magnetické ložiská pre tento stroj majú slúžiť ako model, na ktorom bude možné robiť ďalší vývoj a teda by mal byť modulárny, s možnosťou obmeny niektorých prvkov. Podobne aj vznikla požiadavka na to, aby bol systém smerovaný na jednoduchosť a teda, aby k tomu nebolo nutné vyvinúť komplikovaný algoritmus riadenia. Na základe toho bolo vybrané radiálne ložisko 8-pólové heteropolárne, ku ktorému existuje mnoho článkov a prác rozvíjajúcich návrh, riadenie a pod, a axiálne ložisko ako elektromagnet v kruhovom prevedení. Čidla pre snímanie polohy rotora v radiálnom smere sú umiestnené tesne pri radiálnych ložiskách. Pri návrhu je potrebné uvažovať o umiestnení radiálnych čidiel medzi vinutia stroja a radiálneho magnetického ložiska, avšak z pohľadu sily signálu a skutočnosti, že tieto čidla pracujú na magnetickom princípe, by ovplyvňovanie magnetickými poľami od stroja a magnetického ložiska bolo omnoho silnejšie medzi týmito časťami než mimo nich. Umiestnenie čidla pre snímanie axiálneho smeru je trochu komplikovanejšie, avšak ako vhodná voľba prichádza do úvahy ho umiestniť do magnetického obvodu axiálneho ložiska cez ložiskový štít. V ložiskových štítoch sú ešte umiestnené dosadacie/bezpečnostné klasické gulôčkové ložiská, ktoré chránia stroj pri výpadku napájania, prípadne inej poruche, kde by hrozilo riziko úrazu a zničenie stroja.

4.3 Voľba materiálov

Existujúci materiál hriadeľa, pre ktorý bol stroj vypočítaný je AISI 1018 (ČSN 11 523). Jedná sa o nelegovanú konštrukčnú jemnozrnnú oceľ. Koleno BH charakteristiky sa nachádza na úrovni 1,2 – 1,3 T. Na rotore je nalisovaný valec zo zliatiny

medi, tá má za účel zvýšiť konduktivitu rotora. Čistá, resp. technická meď má nedostatočné mechanické pevnostné parametre a preto sa viac používajú zliatiny medi CuCrZr, CuBe a ďalšie. Tie sú dobrým kompromisom medzi konduktivitou a mechanickou pevnosťou.

Pre magnetický obvod radiálneho ložiska je možné využiť aj materiál, z ktorého je vytvorený magnetický obvod statoru stroja, príp. pre výpočet bol využitý materiál M250, ktorý sa využíva na výrobu feromagnetických plechov pre elektrické stroje. Táto voľba materiálov vychádza hlavne z už vybranej konfigurácie materiálov, ktoré sú využité v návrhu. Využívanie rovnakých materiálov má pozitívny ekonomický dopad na celkovú cenu stroja. To pravdaže nevyklučuje využitie iných materiálov, ktoré môžu byť vhodnejšie, avšak v tomto prípade sú tieto materiály postačujúce ako pre stroj, tak aj pre ložiská.

4.4 Limitujúce a základné parametre pre návrh ložísk

Úvod tejto kapitoly riešil návrh ložísk nielen jednostranne zameraný na ložiská samotné, ale aj na ich zakomponovanie do systému. Tento systém je v čase písania tejto práce už vytvorený a ďalšie prvky mu musia byť podriadené. Preto voľné parametre, s ktorými je možné numericky manipulovať, sú mierne zredukované. Zoznam všetkých parametrov je usporiadaný v tabuľke 4.2 na konci kapitoly.

4.4.1 Geometrické limity

maximálny polomer a obvodová rýchlosť rotujúcich častí

Vysoko-otáčkové stroje sú vždy limitované pevnosťou použitého materiálu. Najvyššie namáhanie, spôsobené odstredivými silami, je blízko povrchu rotujúcich častí. Častejšie je tento parameter udávaný cez maximálnu obvodovú rýchlosť. Pre železo je to typicky (330 – 500)m/s a pre transformátorové plechy (240 – 560)m/s. Prehľad hodnôt je v tabuľke 4.1 spoločne s výsledkami z výpočtov, ktoré sú uvedené nižšie.

Odstredivé sily hrajú významnú rolu pri návrhu vysoko-otáčkových strojov a vzhľadom na bezpečnostné riziká spojené s rotujúcou masou materiálu je nutné venovať tomu špeciálnu pozornosť.

Dôvod obmedzenia obvodovej rýchlosti nie je len v materiálových vlastnostiach, ale aj v geometrii. V elektrických strojoch sa prevažne vyskytujú rotujúce valcové

a prstencové geometrie. Pri uvažovaní vonkajšieho drážkovania rotujúcej masy, rapídne klesá maximálna obvodová rýchlosť a drážky sa pri prekročení namáhania nenávratne deformujú, čo vedie k zničeniu celého stroja. Preto je snaha sa vyhnúť drážkovaným vysoko-otáčkovým strojom, pretože to vedie ku minimálnym priemerom rotujúcich častí.

Z parametrov stroja je uhlová frekvencia stroja

$$\omega = \frac{2\pi n_n p}{60} \quad (4.1)$$

Maximálna obvodová rýchlosť - valcová geometria

$$v_{max} = \sqrt{\frac{8\sigma_0}{(\nu + 3)\rho}} \quad (4.2)$$

Maximálna obvodová rýchlosť pre prstencovú geometriu

$$v_{max} = \sqrt{\frac{4\sigma_{0_2}}{\left((1 - \nu_2)\frac{r_{i_2}^2}{r_{o_2}^2} + (\nu_2 + 3)\right)\rho_2}} \quad (4.3)$$

kde, σ_i je maximálne dovolené namáhanie materiálu a ν_i je Poissonovo číslo.

Následne je maximálny polomer daný pomocou uhlovej frekvencie

$$r_{max} = \frac{v_{max}}{\omega_{max}} \quad (4.4)$$

Na základe týchto výpočtov a selekcie materiálov z predchádzajúcej kapitoly budú maximálne dovolené polomery

$$r_o = \frac{\sqrt{\frac{8\sigma_0}{(\nu+3)\rho}}}{\omega} \quad (4.5)$$

podobne kombináciou rovníc 4.3 a 4.4

$$r_{o_2} = \sqrt{\frac{\frac{4\sigma}{\rho_2\omega_{max}^2} - (1 - \nu_2)r_{i_2}^2}{\nu_2 + 3}} \quad (4.6)$$

Pri tomto modeli je nutné poznať vnútorný polomer skúmanej časti pri veľmi tenkých prstencoch, pretože nebude s najväčšou pravdepodobnosťou zabezpečená podmienka mechanickej pevnosti. Preto je nutné skontrolovať vnútorný, prípadne vonkajší polomer prstenca, aby nedošlo k prekročeniu mechanickeho namáhania. Pri lisovaní prstenca na hriadeľ, môže pri prekročení maximálnych otáčok, dôjsť k prekročeniu medze sklzu, a elastická deformácia prejde do plastickej, prípadne prstenec zvýši svoj vnútorný polomer pôsobením odstredivej sily viac ako časť, na ktorej

Materiál	železo AISI 1018	M250-35
σ - maximálne dovolené namáhanie [MPa]	300	450
ν - Poissonova konštanta	0.29	0.3
ρ - hustota	7860	7600
r_{max} - valcová geometria [mm]	64.6	80.4
v_{max} - valcová geometria [m/s]	304	379
r_{max} - prstencová geometria ($r_i = 18$)[mm]	44.9	56.2
v_{max} - prstencová geometria [m/s]	212	265

Tab. 4.1: Porovnanie mechanickej odolnosti materiálov pri menovitých otáčkach 45000 ot/min

je nalisovaný a tým sa kompletne uvoľní, čo rovnako bude mať fatálne následky.

Podobne do návrhu tohto modelu vstupuje aj vyrobiteľnosť jednotlivých častí. Napríklad, ak sú radiálne ložiská umiestnené po oboch stranách rotorovej časti stroja, tak vyrobiteľnosť znamená možnosť nalisovania medenej rúrky na rotor, tzn., že žurnál aspoň jedného magnetického ložiska bude nalisovaný až potom, ako bude nalisovaná medená rúrka. Podobne ako sa počíta s relatívne veľkým diskom pre axiálne ložisko, ktorý je z mechanického pohľadu výhodnejšie nevyrábať samostatne, ale tak, aby hriadeľ a tento disk boli z jedného kusu materiálu. Čo nie je stále podmienkou, pretože hriadeľ môže byť z rôznych materiálov, ktoré nemusia mať tak výhodné magnetické vlastnosti. Ak by šlo o vyrobiteľnosť a náklady, tak možnosť výroby z jedného kusu materiálu neprichádza v úvahu, pretože by vzniklo príliš veľa odpadu [21], [22].

Maximálny polomer statorových častí

Systém magnetických ložísk má slúžiť ako rozšírenie aktuálneho stroja. Ako bolo spomenuté vyššie, tento stroj využíva externé chladenie a odvod tepla je zabezpečený chladiacimi kanálmi umiestnenými v kostre stroja. V tomto smere je možné zvážiť 2 prístupy a to, napojiť aj kostrové časti nových komponentov na existujúci systém, alebo tento systém ponechať v aktuálnom stave a vyviesť ho priamo zo stroja von. Obrázok 4.1 zobrazuje aktuálne navrhnutý systém. Problém je v tom, že chladiaci systém je náročný na priestor a je možné, že do veľkej miery by zasahoval do kostrových častí magnetických ložísk, čím by ich geometricky natiahol, čo z pohľadu rotorovej dynamiky nie je prijateľné. Preto bola zvolená jednoduchšia cesta a to, vybudovať kanáliky pre tok chladiacej kvapaliny aj do ostatných častí a uzavretie systému by bolo vykonané až na nových ložiskových štítoch. S touto zmenou bude

potrebné skontrolovať, či súčasný systém poskytuje dostatočnú kapacitu pre odvod tepla súčasne aj z magnetických ložísk.

Zoznam všetkých limitujúcich parametrov

Vyššie popísané parametre sú zhrnuté v nasledujúcej tabuľke s poskytnutím kompletného prehľadu parametrov, ktoré majú priamy vplyv na elektromagnetický návrh systému elektrického stroja a jeho magnetického uloženia. Doplnením parametrov z nasledujúcej tabuľky sú parametre pre maximálne polomery z tabuľky 4.1

vnútorný polomer kostry [mm]	60
polomer vrtania statora [mm]	32.5
polomer hriadeľa [mm]	32.4
vzduchová medzera [mm]	1.8

Tab. 4.2: Geometrické limity pre návrh magnetických ložísk

4.5 Návrh a analýza radiálneho magnetického ložiska

Ako bolo v kapitole 4.2 spomenuté, tak konštrukčne sa bude jednať o 8-pólové heteropolárne magnetické ložisko. Dôvod, prečo voľba padla na tento typ už bol spomenutý vyššie a vychádza najmä z jeho jednoduchosti. V princípe sa ale jedná o jedno z najjednoduchších aktívnych magnetických ložísk z pohľadu návrhu a riadenia. V literatúre je často časť prvotného návrhu a voľba potrebných parametrov slabšie popísaná a preto na túto časť je kladený pri popise návrhu vyšší dôraz, ktorý by mal ozrejmiť, čo je za danou voľbou. Podobne je to aj s prechodom medzi elektromagnetickým výpočtom a návrhom elektroniky. Preto aj táto časť je zahrnutá do diskusie o návrhu magnetických ložísk. V kapitole 2 je uvedené, že celkový návrh je iteračným cyklom. Z toho dôvodu bude prezentovaný iba posledný cyklus iterácie, ktorý vedie k výsledkom. Pravdaže isté okolnosti môžu viesť k ďalšej iterácii výsledkov, avšak v rámci pokrytia tejto diplomovej práce je výpočet dostatočný.

4.5.1 Zadanie - vstupné parametre

Hlavným a nosným parametrom radiálneho ložiska je jeho kapacita. Úlohou tohto ložiska je kompenzovať vlastnú tiaž rotorovej časti a zabezpečiť potrebnú dynamiku pri chode stroja. Pri tomto type radiálnych ložísk je pre dynamické javy a javy vplývajúce na finálnu silu alokovaných dve tretiny na kapacitu ložiska a jedna tretina na podporu vlastnej hmotnosti [23]. Preto sa uvažuje pre bežné aplikácie 3-násobok tiažovej sily ako základ pre kapacitu magnetického ložiska. Jedno ložisko pre radiálny smer nie je postačujúce, pretože hriadeľ má 5 stupňov voľnosti. Preto, ako pri klasických guľôčkových ložiskách, bude potrebné využiť minimálne 2 radiálne ložiská, ktoré dohromady budú kompenzovať 4 stupne voľnosti a o posledný stupeň voľnosti sa postará axiálne ložisko.

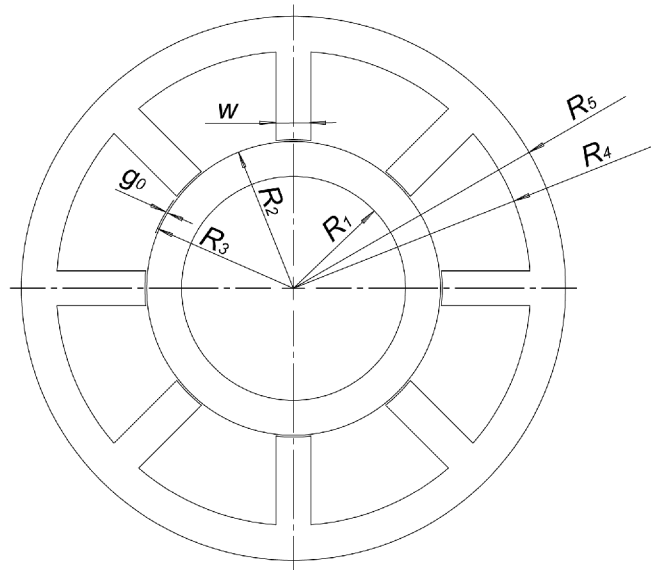
Predpoklad 3-násobku tiažovej sily je vhodný pre určitý typ záťaží a v prípade silne excentrickej záťaže stroja bude potrebné kapacitu ložiska navýšiť. Predpoklad 3-násobku tiažovej sily pôsobiacej na rotorovú časť platí len pri horizontálnom uložení stroja. Pri vychýlení rotora zo sústrednej polohy budú sily budené bias prúdom mimo os pólu a teda bude vznikať extra silové pôsobenie. Pri vertikálnom uložení kompenzácia tiažovej sily prechádza do axiálneho smeru a radiálne ložisko môže byť slabšie. Je možné navrhnuť ložiská pre oba typy uložení, avšak tým narastie cena, ani nie tak za ložiská samotné, ale za výkonové stupne, ktorých pri spomenutej konfigurácii (2x radiálne a 1x axiálne ložisko) bude potrebných 10 kusov.

4.5.2 Analytický návrh

Vzduchová medzera

Volba vzduchovej medzery je pre estimáciu potrebnej kapacity zásadná, pretože na nej značne závisia celkové geometrické rozmery. Z pohľadu rozmerov bude široká vzduchová medzera znamenať potrebu vyvinúť vyššie magneto-motorické napätie, aby tok prekonal prechod cez vzduchovú medzeru, čo pri nezmenenej prúdovej hustote bude viesť k väčšiemu objemu celého ložiska, alebo k potrebe ho efektívnejšie chladiť. Rovnako to značne zvýši aj váhu žurnálu, čo bude znamenať nárast hmotnosti celého hriadeľa a teda aj potrebnej vyššej kapacity ložiska. S rozmermi žurnálu potom úzko súvisia aj jeho maximálne geometrické rozmery. Prílišný nárast polomeru môže viesť k problémom s mechanickým namáhaním pri vysokých otáčkach a na druhej strane zmena dĺžky žurnálu prispeje k zmene dĺžky hriadeľa a z hľadiska rotorovej dynamiky to bude vnímané negatívne. Spoločne s dĺžkou žurnálu narastie aj celková dĺžka statoru vďaka čelám vinutí a takisto bude na vnútorné usporiadanie vplývať aj usporiadanie jednotlivých častí vnútri systému.

Jeden z limitujúcich parametrov je aj maximálna výchylka. Táto hodnota by sa mohla zdať ako šírka vzduchovej medzery, avšak magnetické ložisko musí prakticky navrhovanú silu vyvinúť až pri $2x_{max}$. Pri koncentrickom uložení je šírka vzduchovej medzery konštantná a rotor má vôľu $\langle -x_{max}; x_{max} \rangle$. Kapacita ložiska bude omnoho vyššia pri x_{max} ako pri $2x_{max}$. Preto je šírka vzduchovej medzery pre výpočet $g \approx 2x_{max}$ [12].



Obr. 4.3: Náčrt radiálneho ložiska

Volné parametre pre optimalizáciu

- delenie toku - magnetický tok vychádza z jedného zuba a uzatvára sa cez 2 susedné. Tento prístup prináša efektívnejšie využitie železa, avšak komplikuje to riadenie prúdu v cievkach viz obr. 2.4
- počet pólov n_p - nárast počtu pólov je výhodnejší pri veľkých priemeroch hriadeľov, čo dopomáha k efektívnejšiemu využitiu železa
- polomer hriadeľa r_1 - pri požiadavkách na nízke hodnoty dochádza ku problémom s rotorovou dynamikou, keďže tenký rotor bude mať vlastné frekvencie omnoho nižšie
- magnetická indukcia B_{sat} - pri zachovaní rovnakého feromagnetického materiálu sa môže zdať, že prechod za koleno BH charakteristiky dopomôže k nárastu kapacity ložiska, avšak využiť feromagnetikum za kolenom si vyžaduje vyšší prúd a teda cievky pri tomto výpočte budú rozmerovo väčšie. Podobne pri prechode cez nelineárnu časť bude nelinearizovať aj riadenie

Porovnanie úzkych a širokých vzduchových medzier:

- úzke vzduchové medzery
 - náročnejšie výrobné požiadavky na presnosť
 - pri vysokých otáčkach vďaka odstredivým silám a zvýšenej teplote dochádza k tepelnej rozťažnosti materiálov a teda k expanzii rotujúcich častí čím šírka vzduchovej medzery bude citlivejšia na tieto zmeny
 - zvýši sa prúdová tuhosť K_i , avšak K_x sa bude meniť v širšom rozsahu
- široká vzduchová medzera

- vyžaduje vyššie NI
- znižuje citlivosť na predpoklady využité pri výpočte
- nárast rozptylového magnetického toku

samotná voľba vzduchovej medzery je kritická vo všetkých ohľadoch, preto je jej nutné venovať patričnú pozornosť [12].

Návrh geometrie

Detailný popis výpočtu radiálneho ložiska už bol popísaný v podkladovej semestrálnej práci (ref). Výsledné analytické rovnice sú využité v nasledujúcich výpočtoch.

V návrhu sa postupuje s návrhom každého pólu samostatne. Zvyčajne sú všetky póly rovnako konfigurované, avšak to nie je pravidlom a v smeroch, v ktorých sa očakáva vyššie zaťaženie môže byť magnetický ťah posilnený.

Potrebný prierez magnetického obvodu

$$S_{Fe} = \frac{\mu_0 F_{max}}{B_{sat}^2} \cos \frac{\pi}{8} \quad (4.7)$$

Z pohľadu vyrobiteľnosti vrtanie statora magnetického ložiska r_3 a elektrického stroja sú zvolené rovnaké. Pri uvažovaní šírky vzduchovej medzery radiálneho magnetického ložiska g je vnútorný a vonkajší polomer žurnálu

$$r_2 = r_3 - g \quad (4.8)$$

Pri uvažovaní konštantného prierezu magnetického obvodu, majú statorové jarmo, zub statora a žurnál rovnakú šírku w , ktorú je možné vypočítať na základe znalosti vrtania statoru.

$$w = 2r_3 \sin \tau_p \frac{\pi}{8} \quad (4.9)$$

A teda vnútorný polomer žurnálu bude menší práve o túto hodnotu. Následne je nutné tento rozmer skontrolovať využitím rovnice 4.3.

$$r_1 = r_2 - w \quad (4.10)$$

Vonkajší polomer je limitovaný kostrou a umiestnením chladiaceho okruhu v kostre, preto $r_5 = 120mm$. Zo znalosti šírky jarma a vonkajšieho polomeru statoru je vnútorný polomer jarma, prípadne vonkajší polomer drážky

$$r_4 = r_5 - w \quad (4.11)$$

Posledný parameter pre návrh geometrie magnetického ložiska je jeho šírka. Z predchádzajúceho návrhu je známy prierez magnetického obvodu pre vyvolanie potrebného silového pôsobenia a šírka zuba, z toho jednoduchým výpočtom dostaneme dĺžku magnetického obvodu

$$l = \frac{S_{Fe}}{w} \quad (4.12)$$

Návrh drážky

Pri analýze Ampérovho zákona z kapitoly 3.2 je veľkosť magneto-motorického napätia daná súčinom prúdu a počtu závitov a zvolenej maximálnej magnetickej indukcie

$$NI = \frac{B_{sat}g_0}{\mu_0} \quad (4.13)$$

Rovnako tento súčin určuje sumu prúdov, ktorý tečie tenšími vodičmi cievky súčasne. Pri zvolenej prúdovej hustote je teda možné zistiť, či navrhnutá geometria poskytuje dostatok priestoru pre cievky v drážkach.

Takže z podmienky pre drážku

$$|NI| \leq k_c J_{max} S_{cu} \quad (4.14)$$

Prierez drážky je možné navrhnuť pre 2 typy cievok. Jednou z možností je, že cievka je navinutá napevno a druhá počíta s vyňateľnými cievkami.

$$S_{Cu} = \frac{r_4^2 \frac{\pi}{8} - r_3^2 \tan \frac{\pi}{8} - (r_4 - r_3) w}{2} \quad (4.15)$$

Prierez drážky pri využití vyňateľných cievok

$$S_{Cu} = \left[r_3 \tan \frac{\pi}{8} - \frac{w}{2} \right] (r_4 - r_3) \quad (4.16)$$

Pri bližšom skúmaní tejto rovnice je možné v nej nájsť aj rozmery vinutia. Časť v hranatých zátvorkách určuje šírku cievky a časť v oblých zátvorkách výšku cievky.

Je možné sa rozhodnúť, či preferovať jednoduchšiu výrobu, prípadne si zachovať možnosť výmeny cievky za inú alebo sa vrátiť k dimenzovaniu ložiska a zvoliť jeho vyššiu kapacitu.

Potrebný prierez vychádzajúci z podmienky 4.14 poskytuje 2 typy vinutí. Z pohľadu výroby je určite jednoduchšie navíjať cievky mimo stroja a následne ich len umiestniť na príslušné miesto. Vždy je ale možné sa vrátiť a zredukovať rozmery

statora ložiska a tým klásť vyšší dôraz na ekonomický aspekt [24].

Vlastnosti ložiska

Normalizované zosilnenie aktuátora - zosilnenie aktuátora vzťahnuté na súčin NI

$$\frac{K_i}{N^2 I_b} = \frac{4\mu_0 S_{Fe} \cos(\frac{\pi}{8})}{g_0^2} \quad (4.17)$$

Normalizovaná tuhosť otvorenej slučky

$$\frac{K_x}{N^2 I_b^2} = \frac{4\mu_0 S_{Fe} \cos(\frac{\pi}{8})}{g_0^2} \quad (4.18)$$

Normalizovaná indukčnosť

$$\frac{N}{L^2} = \frac{2\mu_0 S_{Fe}}{g_0} \quad (4.19)$$

Návrh parametrov výkonového stupňa

Pri konfigurácii stroja popísaného v tabuľke (ref) je strmosť nárastu sily pri plnej rýchlosti - požiadavka na maximálnu kapacitu pri maximálnych otáčkach:

$$\left| \frac{df}{dt} \right|_{max} = F_{max} \omega_{max} = F_{max} 2\pi \frac{n_n}{60} \quad (4.20)$$

Ako požiadavka na maximálne napätie výkonovej elektriny je 50 V. Napätie má priamo vplyv na dynamiku celého systému.

Výkonová požiadavka na elektroniku znie (s využitím definícií z rovníc vyššie)

$$I_{max} U_{max} = \frac{N I_{sat} I_b L}{N I_b K_i} \left| \frac{df}{dt} \right|_{max} = \frac{N I_{sat} g_0}{N I_b 2 \cos \frac{\pi}{8}} \left| \frac{df}{dt} \right|_{max} \quad (4.21)$$

Bližšia analýza výkonovej požiadavky odкрýva viacero neznámych. Známe sú iba parametre g_0 , $\frac{df}{dt}$. Pre najlepšie výkonové prispôsobenie výkonovej časti a ložiska je vhodné zvoliť $I_{sat} = I_{max}$. To umožní maximálne využitie oboch častí - ložiska a výkonového stupňa. Podobne pre zjednodušenie a linearizáciu riadenia bude bias ratio zvolené $\alpha = 0,5$. Spoločne s požiadavkou na maximálne výstupné napätie výkonového stupňa $U_{max} = 50V$, ostáva posledný neznámy parameter a to I_{sat} , prípadne I_{max} , ktoré majú za uvedeného prispôsobenia rovnakú hodnotu.

Potom

$$I_{sat} = I_{max} = \frac{\frac{g_0}{2 \cos 22.5} \left| \frac{df}{dt} \right|_{max}}{\alpha U_{max}} \quad (4.22)$$

Pri vypočítanom prúde a požadovanom napätí bude potrebný výkon výkonového stupňa

$$P_{amp} = U_{max}I_{max} \quad (4.23)$$

Na základe prúdov je možné určiť potrebný počet závitov.

$$N = \frac{NI}{I_{sat}} \quad (4.24)$$

Po doplnení týchto hodnôt do normalizovaných rovníc sú hodnoty nasledovné

hmotnosť hriadeľa [kg]	8.5
sila [N]	150
vzduchová medzera [μm]	800
pólové krytie τ_p	0.3
činiteľ plnenia medi k_{Cu}	0.5
magnetická indukcia B_{sat} [T]	1.2
r_1 [mm]	24.7
r_2 [mm]	32.4
r_3 [mm]	32.8
r_4 [mm]	52.3
r_5 [mm]	60
dĺžka zväzku l [mm]	18.4
nárast sily df/dt [kN/s]	706.9
magnetomotorická sila NI [A]	763.9
napätie výkonového stupňa U [V]	50
maximálny prúd I_{max} [A]	12.2
bias ratio	0.5
radiaci prúd I_c [A]	6.1
bias prúd I_b [A]	6.1
počet závitov N	62
zosilnenie aktuátora K_i [N/A]	24.2
polohová tuhosť K_x [kN/m]	-198

Tab. 4.3: Výsledky analytického výpočtu radiálneho ložiska

Tieto výsledky platia pre jednu časť radiálneho ložiska, avšak ako vyplynie z numerickej analýzy, tak väzby medzi jednotlivými časťami sú silné a preto hoci sú tieto výsledky správne, tak je potrebné modelovať systém a nie len jednu časť. Zahrnúť väzby do výpočtov je možné napr. pomocou reluktančnej siete [25].

4.5.3 Numerická analýza

Numerická analýza, z pohľadu relevantnosti výsledkov, poskytuje presnejšie riešenie jednotlivých dejov a javov, ktoré sú pri návrhu zanedbávané. V tejto kapitole sú zhrnuté simulácie, ktoré konfrontujú analytický výpočet a zároveň simulácie, ktoré znázorňujú chovanie ložiska v rôznych situáciách s uvažovaním parazitných javov. Program Ansys umožňuje navrhnuť optimalizáciu za účelom dosiahnutia potrebných parametrov. V prípade tohto návrhu bola optimalizácia vykonaná zmenou dĺžky paketu za podmienky vyvinutia navrhutej sily, keďže pri neuvažovaní parazitných javov numerická analýza vykazuje mierne odlišné parametre od analytickej.

Pri radiálnom type ložiska je možné optimalizovať viac parametrov ako pri axiálnom type. Avšak, zachovaním geometrických limitov nezostáva veľa voľných parametrov pre optimalizáciu. Pri zachovaní limitných parametrov a pri požiadavke na prierez drážky nie je možné manipulovať so šírkou zuba v širokom rozsahu. Pri veľmi úzkych zuboch rapídne rastie rozptyl. Z tejto požiadavky je šírka zuba priamo daná požadovaným prierezom drážky. Ďalším parametrom ako navýšiť silu je nárast dĺžky paketu, čo rovnako načrtáva uvažovanie o magnetických ložiskách ako o modulárnych systémoch. Práve dĺžka ložiska je jediným optimalizačným parametrom po tom, ako zvyšné limity ohraňovali ďalšiu optimalizáciu. Pre analýzu bol zvolený 2D model, ktorý je jednoduchší na výpočet v porovnaní s 3D modelom.

Výsledok optimalizácie dĺžky paketu je v nasledujúcej tabuľke:

Parameter	Analytický výpočet	Numerický výpočet
dĺžka paketu l [mm]	18.4	19
sila F [N]	145.3	150

Tab. 4.4: Porovnanie výsledkov pred a po optimalizácii

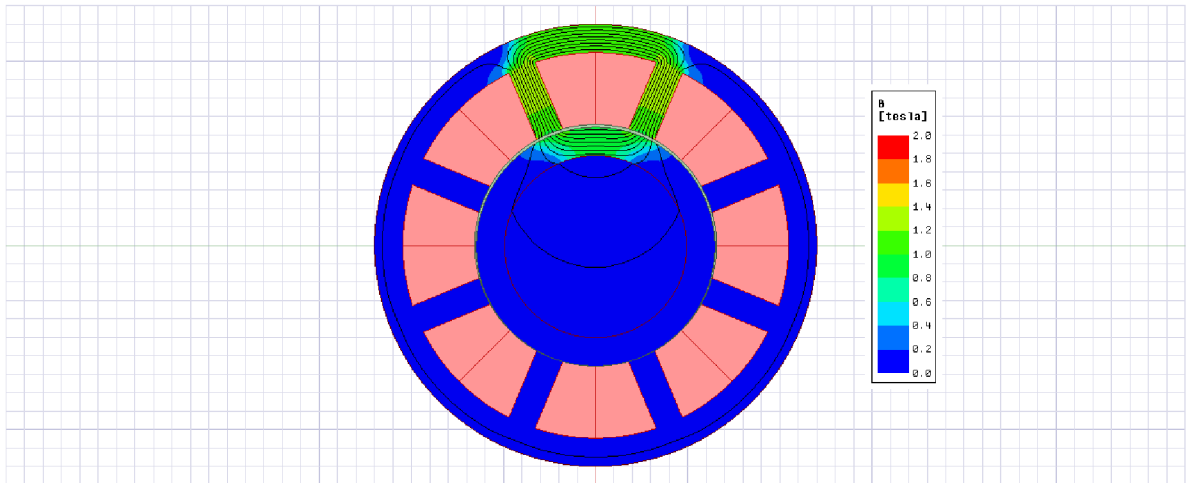
Ako je z výsledkov vidieť, tak parazitné javy zanedbané v návrhu majú značný vplyv na silu. Preto je numerická analýza nevyhnutnou súčasťou návrhu ložiska.

Pre ďalšiu diskusiu budú využité výsledky pre optimalizovaný model.

Počas výpočtu boli zvolené javy, ktoré je možné simulovať rovnako a porovnať ich s predpokladanými rozloženiami príp. priebehmi. Podobne z numerickej analýzy vyplývajú ďalšie skutočnosti, ktoré nie sú na prvý pohľad viditeľné, avšak z pohľadu možných prevádzkových stavov výrazne vplývajú na celý chod ložiska. Jedným z týchto javov je väzba medzi jednotlivými elektromagnetmi a jej vplyv na výslednú

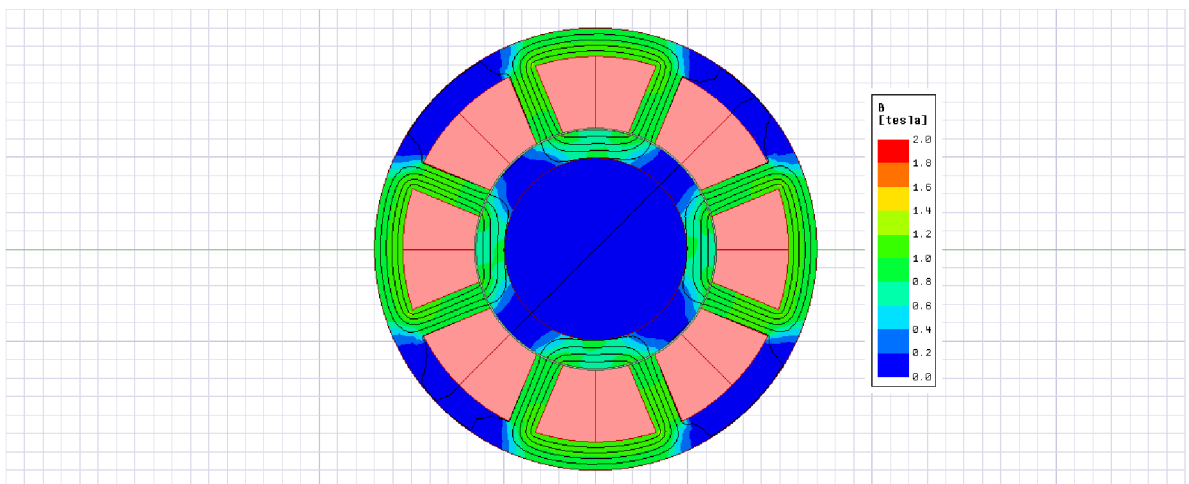
silu. To ešte bude detailnejšie zobrazené v grafe nižšie.

Analytický výpočet využíval návrh jedného elektromagnetu pri zvolenej magnetickej indukčii. Rozloženie magnetickej indukcie a uzatváranie magnetických siločiar je na nasledujúcom obrázku.



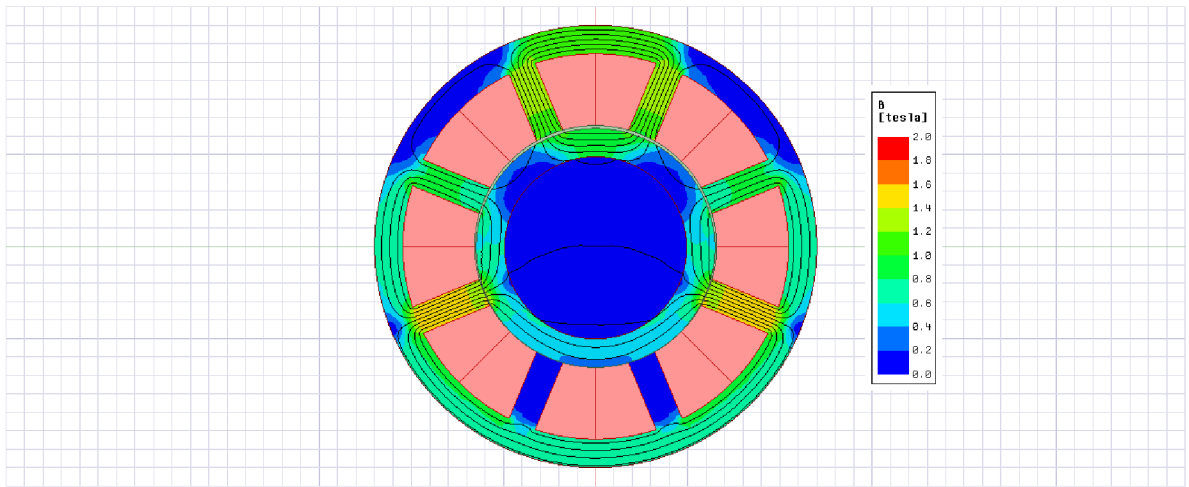
Obr. 4.4: Rozloženie magnetickej indukcie pri uvažovaní analytického modelu

Podobne v časti o riadení a linearizácii priebehu sily bolo spomenuté, že pri napájaní všetkých 4 elektromagnetov by mala byť výsledná sila pôsobiaca na hriadeľ nulová.



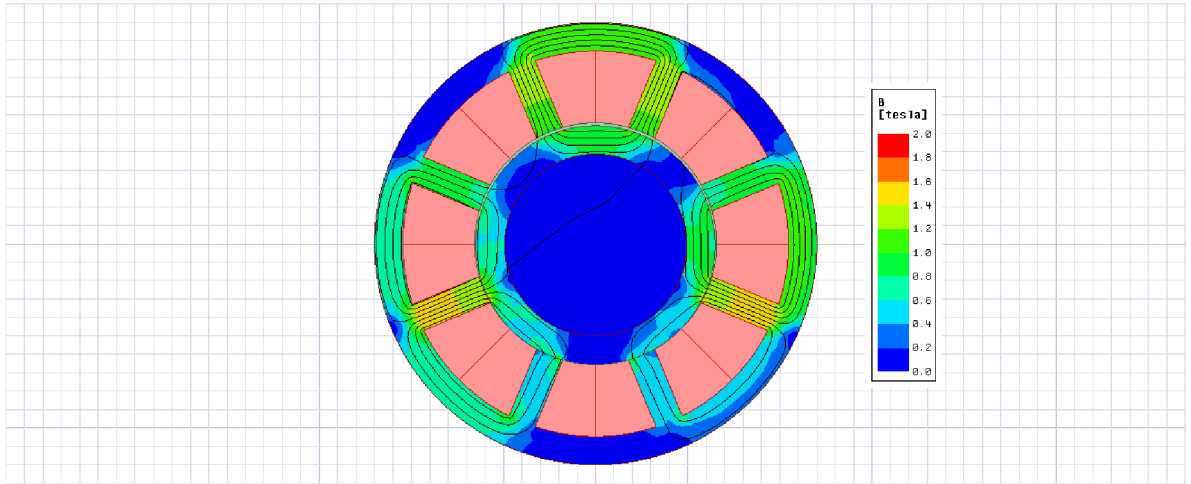
Obr. 4.5: Rozloženie magnetickej indukcie pri napájaní všetkých cievok bias prúdom a $dz = 0\text{mm}$

Pri nulovej výchylke $dz = 0\text{mm}$ je silové pôsobenie podľa očakávaní a to bez silového pôsobenia na rotor. Problém ale nastáva pri analýze v hraničných stavoch. Ako príklad je možné uvažovať $dy = -0.4\text{mm}$, čo je maximálna výchylka a teda vzduchová medzera pre elektromagnet v -y, +x a -x smer je menšia a magnetický obvod od x-osových elektromagnetov sa uzatvára cestou najjemnejšieho odporu a to cez spodnú časť žurnálu, čo ilustruje obrázok 4.6. To vedie k vývinu sily v smere zubov, pri ktorých je menšia vzduchová medzera, takže v tomto prípade smerom do -y. Celková sila pôsobenia na žurnál pre tento prípad je 65N, čo je menej ako polovica sily, pre ktorú je ložisko navrhnuté.



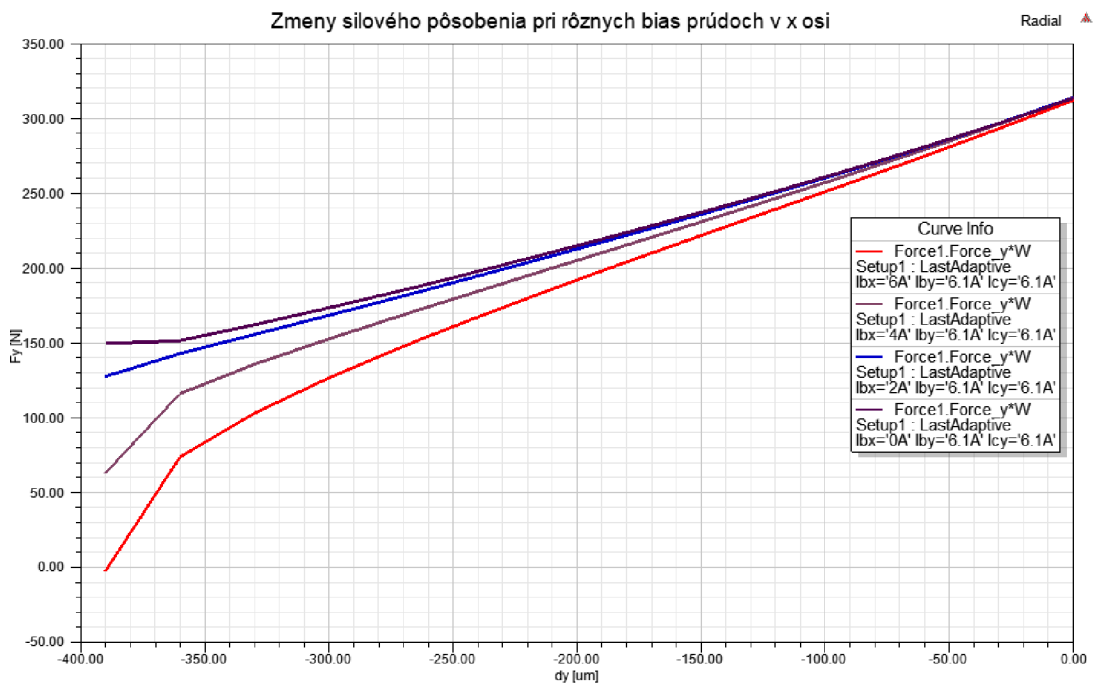
Obr. 4.6: Rozloženie magnetickej indukcie pri $dy = -0.4\text{mm}$

Pri prehodení polarít cievok sa situácia ešte skomplikuje, keďže magnetický obvod sa bude uzatvárať cez spodné zuby, pri ktorých je ešte užšia vzduchová medzera ako v predchádzajúcom prípade (viz- obrázok 4.7) a výsledná sila je dokonca v opačnom smere, v akom je nutné výchylku kompenzovať. Pre tento prípad je výsledná sila -3N .



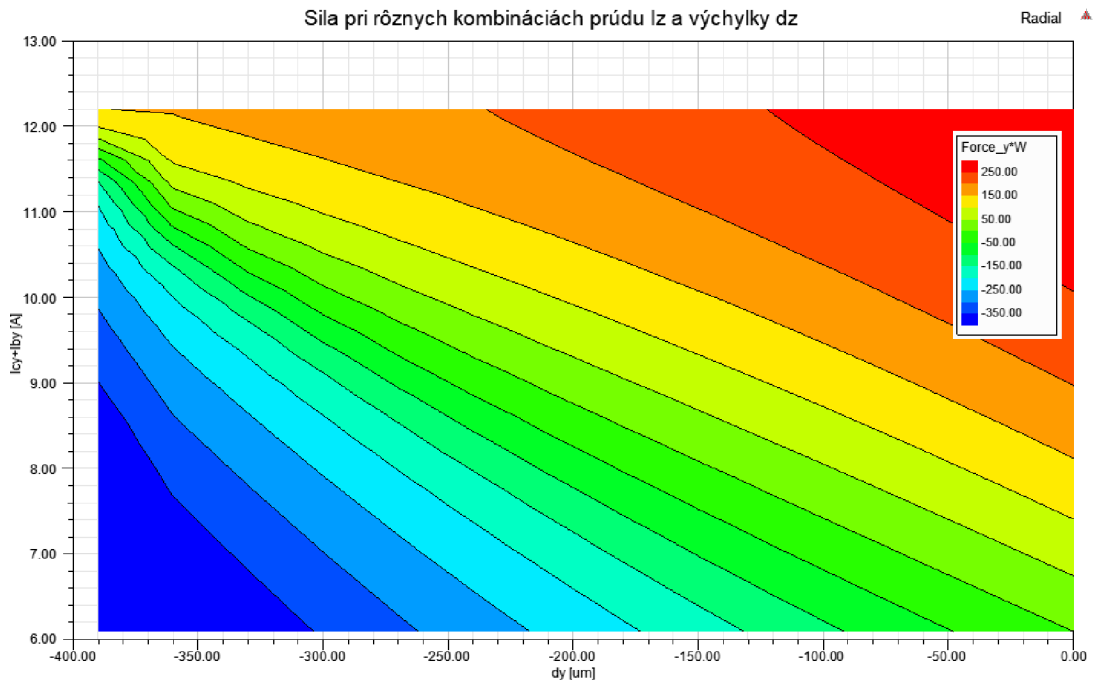
Obr. 4.7: Rozloženie magnetickej indukcie pri $dy = -0.4\text{mm}$ a prehodením polarít cievok v $+x$ a $-y$ ($\alpha = 0.5$)

To je veľmi silný parazitný jav, ale je možné redukovať tento jav zvolením nižšieho bias prúdu, avšak na druhej strane na úkor straty časti linearity. Za týmto účelom bola vytvorená závislosť sily F_y pri rôznych bias prúdoch v x -ových elektromagnetoch. Ako je vidieť, tak požadovaná sila 150N je vyvinutá iba v prípade nulového bias prúdu v x -ových elektromagnetoch.

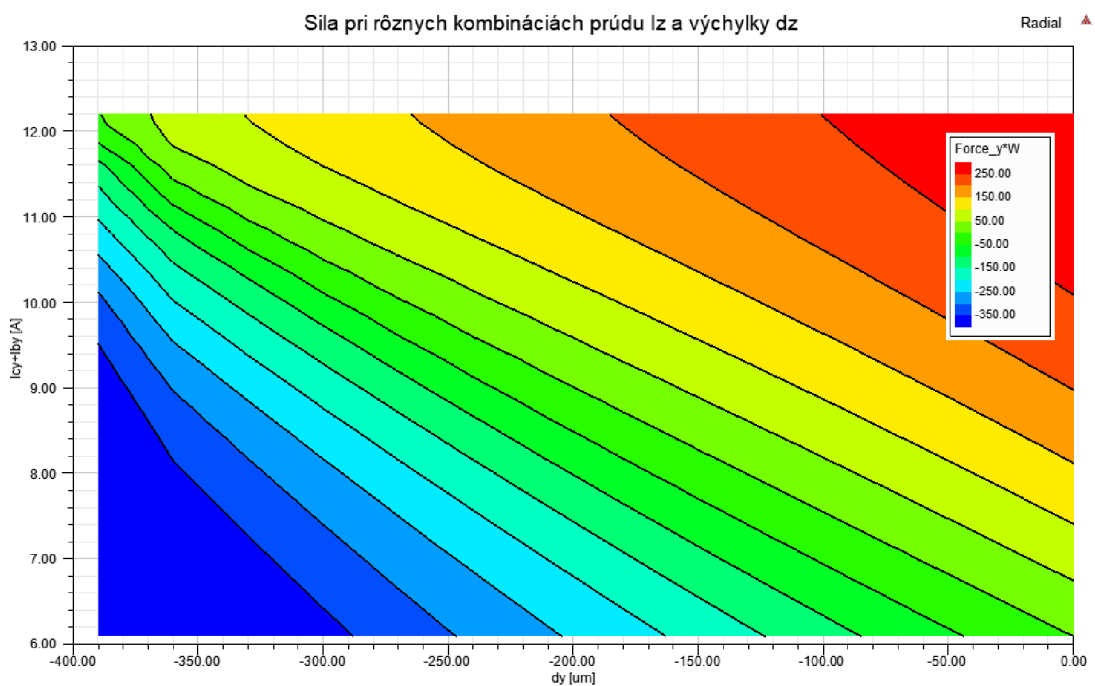


Obr. 4.8: Priebeh sily pri rôznych bias prúdoch

Lepší prehľad o tom, ako sa silovo ložisko správa v rôznych stavoch, podávajújú grafy závislosti prúdu na výchylke, kde sledujeme vývin sily.



Obr. 4.9: Sila pri rôznych stavoch ložiska ($i_x = 0A$)



Obr. 4.10: Sila pri rôznych stavoch ložiska ($i_x = 6.1A$)

Pre porovnanie boli vyhotovené grafy pri bias prúde $i_{bx} = 0$ a 6.1A . Od bias prúdu je očakávaná linearizácia, čo sa aj potvrdilo v prvom grafe, kde $i_{bx} = 0\text{A}$. Sila sa postupne navyšuje až do požadovanej hodnoty 150N pri 12.2A . Avšak, pri napojení $i_{bx} = 6.1\text{A}$ je linearizácia zachovaná, dokonca je aj výraznejšia, avšak požadovaná sila je vyvinutá už pri výchylke $250\mu\text{m}$.

Mierne schodovitý tvar je spôsobený krokom simulácie a nastavním BH krivky materiálu, kde bola obmedzená maximálne magnetická indukcia na 2T . Pri pokuse o vyššie hodnoty materiál vykazuje vlastnosti s $\mu_r = 1$.

4.6 Návrh a analýza axiálneho magnetického ložiska

Axiálne magnetické ložisko kompenzuje sily vznikajúce iba v jednom stupni voľnosti. Návrh aktívneho axiálneho ložiska má do značnej miery podobnosť pri návrhu postupu radiálneho ložiska. Výpočty a návrhové uvažovanie bude konfrontované s návrhom radiálneho ložiska, kde boli podrobne vysvetlené všetky detaily a ich vplyv na vlastnosti ložiska samotného, príp. systému ako celku. Preto návrh axiálneho ložiska bude oproti radiálnemu koncentrovaný na problematiku práve okolo axiálnych ložísk s odvolaním na state z analýzy radiálneho ložiska.

Pre tento projekt bolo zvolené klasické axiálne ložisko využívajúce elektromagnetický princíp. Ložisko pracujúce na princípe indukcie vírivých prúdov vo vodivom disku nie je pre dané využitie vhodné a to z dôvodu, že indukcia vírivých prúdov je priamo závislá na rýchlosti otáčania, čo by nebol problém pri menovitých otáčkach, avšak pri rozbehu tuhosť postupne narastá od nuly a pri malých otáčkach sú sily vyvíjané týmto typom ložiska minimálne. Pri uvažovaní pasívneho ložiska nastáva problém s pevnosťou magnetov, či už feritov, alebo magnetov vyrábaných zo vzácnych zemín v tom, že sú vyrábané z prášku lisovaním a teda ich pevnosť je priamo závislá na zrne a nastavení lisovania. To vnáša do výpočtu veľkú mieru nejasností a zvýšenie rizika vzniku poruchy. Aj keď zvolené aktívne ložisko vyžaduje aktívne napájanie, na druhej strane túto nevýhodu kompenzuje svojou ovládateľnosťou.

4.6.1 Zadanie - vstupné parametre

Aktuálne technologické riešenie využíva systém prítlačných pružín, ktoré predpínajú polohu rotoru silou 200 N. Preto aj magnetické axiálne ložisko bude počítat s touto silou.

Pri horizontálnom uložení sú sily v axiálnom smere zvyčajne veľmi malé. Vždy sa ale používajú 2 elektromagnety schopné vyvinúť silu pôsobiacu proti sebe. Je to jednak z dôvodu linearizácie, ale aj z možnosti výskytu síl pôsobiacich v oboch smeroch uvažovaného stupňa voľnosti. Horšie je to v prípade vertikálneho uloženia, kedy ložisko musí niesť komplet celú hmotnosť hriadeľa. V tomto prípade by mohla vzniknúť aj možnosť využitia iba jedného elektromagnetu, keď tiažová sila hriadeľa bude dostatočná, aby kompenzovala aj dynamické javy. V tomto prípade, podobne ako pri radiálnom ložisku je uloženie stroja uvažované horizontálne, preto vo výsledku bude axiálne ložisko zložené z 2 elektromagnetov.

Z pohľadu výroby je možné siahnuť po 2 riešeniach a to s lisovaním stredového disku, alebo uvažovať ho ako súčasť hriadeľa. Prvá možnosť bude pravdepodobne vykazovať menší dovolený polomer. Naopak druhá možnosť predpokladá polotovar rovnakého polomeru ako je disk, čo síce je možnosť, avšak z pohľadu opracovania sa jedná o neekonomické riešenia. Pri voľbe lisovania sú dostupné oba feromagnetické materiály. Axiálne ložisko nemá význam vyrábať skladaním plechov. Lepšia a prijateľnejšia voľba spočíva vo voľbe plného materiálu a frézovaní drážky pre vinutie.

4.6.2 Analytický návrh

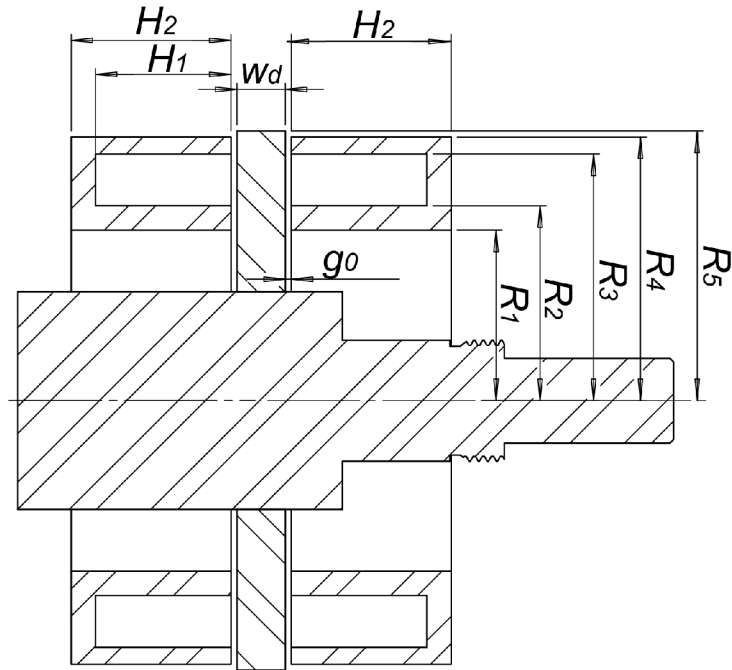
Vzduchová medzera

Pri axiálnom ložisku sa nepredpokladajú tak výrazné sily ako v prípade radiálneho ložiska. Preto aj šírka vzduchovej medzery môže byť väčšia. Aj keď ďalšia analýza ukáže, že široká vzduchová medzera bude mať viac negatívne dôsledky než pozitívne. Z praktického hľadiska bude široká vzduchová medzera znamenať nárast objemu ložiska, ktorý je konfrontovaný s maximálnym polomerom rotujúceho prvku a javom blízkosti (popísaný bližšie v nasledujúcej časti).

Návrh geometrie - časť prvá

Z odstavca vyššie je zrejmé, že geometria bude obmedzená najmä požiadavkami plynúcimi z rotorovej dynamiky, maximálneho dovoleného namáhania rotujúceho prvku a javu blízkosti. Z pohľadu rotorovej dynamiky pri vysokých otáčkach úzky rotujúci prvok prispieva k flexibilitě celého hriadeľa. Čím bude vzdialenejší od radiálneho ložiska, tým rotorová dynamika bude horšia v systéme, kvôli odstredivým silám na túto časť. Preto z tohoto pohľadu je tlak na čo najkratšie ložisko.

Popri tom do výpočtu vstupuje aj požiadavka na maximálny polomer daný mechanickým namáhaním. Tento problém bol podrobnejšie popísaný v kapitole 4.2.



Obr. 4.11: Náčrt axiálneho ložiska

Zatiaľ bližšie nerozoberaným javom, ktorý sa u radiálneho ložiska neuplatňuje, je jav blízkosti. Axiálne ložisko obopína hriadeľ, ktorý je feromagnetický a logicky by bolo možné uvažovať, že maximálna výchylka by mohla postačiť ako medzera medzi magnetickým obvodom ložiska a hriadeľom. Problém je ale v tom, že tento rozmer je porovnateľný so vzduchovou medzerou medzi axiálnym ložiskom a jeho rotujúcim diskom, čo spôsobí, že časť magnetického toku sa bude uzatvárať cez bok ložiska a hriadeľom. To spôsobí vývoj sily aj v radiálnom smere. Pri $dz = 0$ sa tento jav nebude uplatňovať, kvôli tomu, že všetky sily z každej strany sa navzájom vyrušia. Avšak pri výchylke hriadeľa od koncentrickej polohy bude vývoj radiálnej sily v smere vychýlenia, čo pre radiálne ložisko bude len umocňovať silu, ktorú musí vykompenzovať. Preto je vhodné, aby medzera medzi ložiskom a hriadeľom bola čo najvyššia. Pri výpočte rozmerov je určujúci prierez železa a drážky ložiska. Všetky tieto 3 parametre, vzdialenosť od hriadeľa, celková šírka a dĺžka ložiska je možné kompromisne zvoliť medzi rotorovou dynamikou a javom blízkosti. Možnosťou, ako s tým bojovať, je v mieste ložiska ubrať materiál z hriadeľa pod ním. Avšak to značne ovplyvní rotorovú dynamiku. Pri nízkych otáčkach by sa to mohlo javiť ako logické riešenie, avšak rotorová dynamika je vo vysoko-otáčkových strojoch smerodajná v mnohých ohľadoch.

Postup návrhu geometrických rozmerov sa bude skladať z určenia potrebného prierezu magnetického obvodu a určenia podobne ako pri radiálnom ložisku všet-

kých parametrov. Následne sa tieto hodnoty konfrontujú s javom blízkosti. Podrobná analýza tohto javu nie je súčasťou tejto práce a rozmery boli iteračne upravené ako kompromis medzi dĺžkou ložiska a medzery medzi hriadeľom a ložiskom. Hoci táto selekcia je určitým spôsobom voľná, je jav blízkosti hodný ďalšieho skúmania.

Potrebný prierez magnetického obvodu:

$$S_{Fe} = \frac{\mu_0 F_{max}}{B_{sat}^2} \quad (4.25)$$

Pri známom maximálnom vonkajšom polomere bude vnútorný polomer vonkajšieho zuba:

$$r_3 = \sqrt{r_4^2 - \frac{S_{Fe}}{\pi}} \quad (4.26)$$

Jav blízkosti je bližšie numericky skúmaný v programe ANSYS a výsledky ukazujú, že rozmer približne 10 mm výrazne neovplyvňuje uzatváranie magnetického toku v radiálnom smere axiálneho ložiska. Aby rotorová dynamika nedegradovala, polomer hriadeľa bude rovnaký ako je vnútorný polomer žurnálu.

$$r_1 = r_{1_{radial}} + 10 \text{ mm} \quad (4.27)$$

Pre nepresiahnutie nasýtenia vnútorného zuba je potrebný minimálny prierez magnetického obvodu. Pre vonkajší polomer vnútorného zuba

$$r_2 = \sqrt{\frac{S_{Fe}}{\pi} - r_1^2} \quad (4.28)$$

Návrh drážky pre vinutie

Aby bolo možné určiť ďalšie geometrické rozmery, je potrebné navrhnuť drážku, od ktorej rozmerov sa bude odvíjať ďalší výpočet geometrie

$$NI = \frac{2B_{sat}g_0}{\mu_0} \quad (4.29)$$

Pri navrhnutej prúdovej hustote a činiteli plnenia drážky je z podmienky pre minimálny prierez drážky

$$S_{Cu} \geq \frac{NI}{k_{Cu}J_{max}} \quad (4.30)$$

Táto hodnota určuje súčin rozmerov drážky $a \cdot b$. S týmito rozmermi je možné manipulovať voľne, avšak potrebný prierez drážky musí byť zachovaný.

Návrh geometrie - časť druhá

Z potrebného prierezu drážky je možné vypočítať hĺbku drážky.

$$h_{Cu} = \frac{S_{Cu}}{r_3 - r_2} \quad (4.31)$$

Podobne ako pri radiálnom ložisku je šírka zubu totožná so šírkou jarma a žurnálu, tak rovnaká myšlienka platí aj pri axiálnom ložisku. Jediný rozdiel je v tom, že prierez železa sa postupne zväčšuje s narastajúcou vzdialenosťou od stredu. To je aj vidieť na šírke vnútorného a vonkajšieho zubu, ktoré nie sú rovnaké. V tomto smere je pre zabezpečenie zvolenej magnetickej indukcie potrebný minimálne prierez a teda šírka vnútorného zubu. Ak jarmo a disk budú rovnakej šírky ako vnútorný zub, tak nedôjde k presýteniu. Bolo by možné uvažovať skosenú geometriu kvôli šetreniu materiálu, avšak pre jednoduchosť, nielen výroby, ostane tento rozmer konštantný.

$$w \geq r_2 - r_1 \quad (4.32)$$

Z numerickej analýzy vyplýva, že tento rozmer je nedostatočný a vzniká veľký rozptyl kvôli úzkym zubom, preto bola aplikovaná metodika úpravy šírky oboch zubov popísaná v článku [27].

Rotujúci disk

Disk, cez ktorý sa prenáša sila na hriadeľ, je umiestnený medzi 2 elektromagnetmi. Tie budú na neho pôsobiť súčasne pri bias prúde. Preto jeho šírka bude minimálne $2w$. Rovnako príliš tenké disky nie sú vhodné, pretože pri tak vysokých otáčkach sa výrazne deformujú, čo pri snímaní deformácií bude spôsobovať problémy pri riadení, keďže deformácia bude vnímaná ako výchylka od nominálnej polohy [27], [28].

Návrh parametrov výkonového stupňa

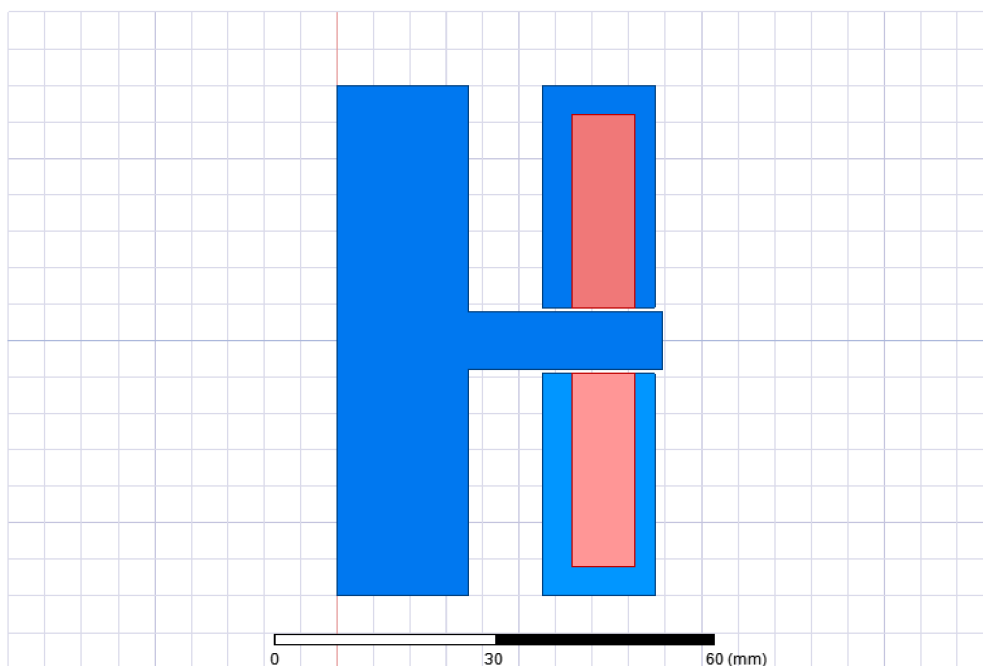
Postup pri návrhu elektroniky je rovnaký ako pre radiálne ložisko. Jediný rozdiel je v rovniciach pre K_x a K_i , kde redukcia $\cos\left(\frac{\pi}{8}\right)$ nebude hrať rolu, pretože tu sila pôsobí kolmo na disk.

Parameter	bez korekcie	s korekciou šírky zuba [27]
сила [N]	200	
vzduchová medzera [μm]	500	
činiteľ plnenia medi k_{Cu}	0.7	
magnetická indukcia B_{sat} [T]	1.2	
r_1 [mm]	32.5	32.5
r_2 [mm]	33.7	35.1
r_3 [mm]	42.6	41.3
r_4 [mm]	43.6	43.6
r_5 [mm]	44.6	44.6
dĺžka elektromagnetu l [mm]	38	39.4
magnetomotorická sila NI [A]	954.0	
napätie výkonového stupňa U [V]	50	
maximálny prúd I_{max} [A]	18	
bias ratio α	0.5	
riadiaci prúd I_c [A]	9	
bias prúd I_b [A]	9	
počet závitov N	51	
zosilnenie aktuátora K_i [N/A]	21.5	
polohová tuhosť K_x [kN/m]	203	

Tab. 4.5: Výsledky analytického výpočtu axiálneho ložiska

4.6.3 Numerická analýza

Pre potreby numerickej analýzy bol parametrický model vytvorený v programe ANSYS. Axiálne ložisko je možné modelovať v 2D s rotačnou symetriou.



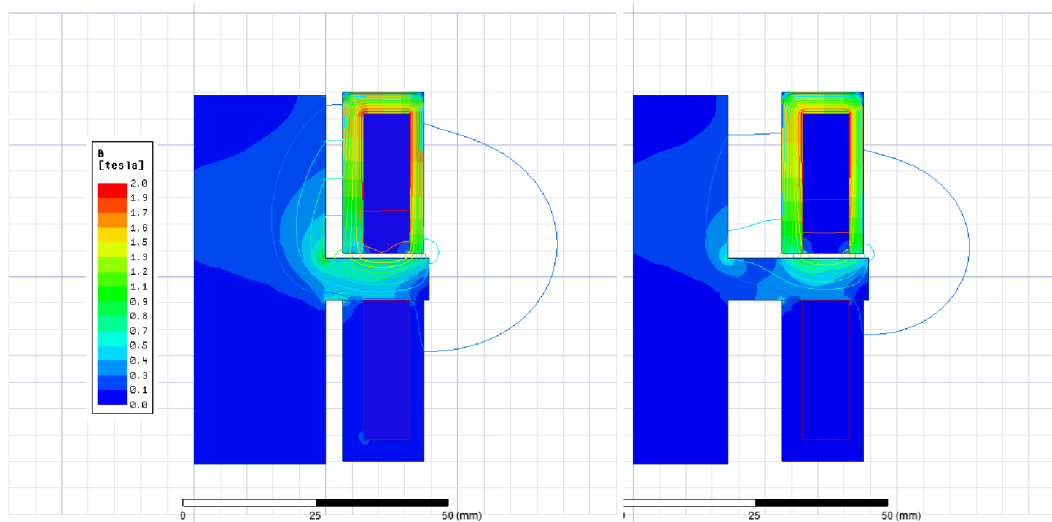
Obr. 4.12: Model axiálneho ložiska

Axiálne ložisko, hoci využíva magnetický princíp, tak rotujúci disk je stále vodivý a preto vírivé prúdy indukované v disku môžu ovplyvňovať výslednú silu. Tento jav ale nie je skúmaný v tejto práci, avšak tento jav už bol pozorovaný a skúmaný vo viacerých prácach [29].

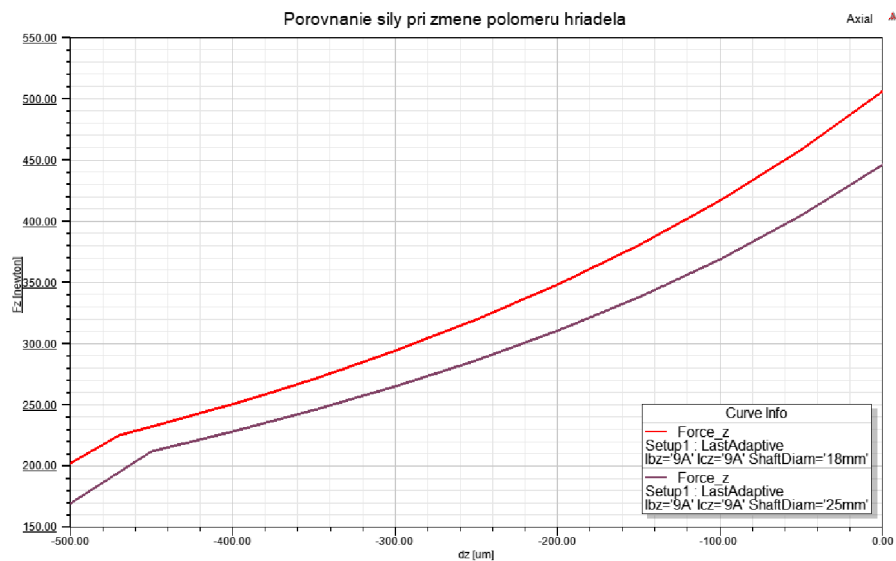
Podobne ako jav blízkosti, tak axiálne ložiská majú výraznejší rozptyl okolo vzduchovej medzery a preto je nutné rozmery ložiska korigovať, aby bola zaručená dostatočná kapacita ložiska. Problematiku rozptylu rozoberá už spomenutá práca [27], kde je modelovaný rozptyl pomocou koeficientov, ktoré prispievajú ku celkovej šírke zubov. Pre slabšie axiálne ložiská vychádzajú úzke zuby, pretože potrebný prierez zubu je kruhového tvaru a pri zachovaní prierezu je jeho šírka malá. To spôsobí, že zub v porovnaní so zvyškom geometrie sa správa ako hrot pri blízkom feromagnetiku a to výrazne dopomáha k nárastu rozptylu a poklesu efektívnej sily. Pri aplikovaní metodiky z [27] je potrebné približne 2.25-násobne zvýšiť prierez vnútorného zuba a 3-násobne vonkajšieho zuba, aby bola zaručená potrebná sila. Hoci tieto hodnoty sú analytického pôvodu, približne korešpondujú s výsledkami z numerickej analýzy. Je nutné ale podotknúť, že tento prístup nezahrňuje jav blízkosti.

Pre zohľadnenie javu blízkosti boli vykonané analýzy pri ktorých sa menila vzdialenosť hriadele od magnetického obvodu. Rozloženie magnetickej indukcie a vplyv na silu je možné vidieť na nasledujúcich obrázkoch. Pre posúdenie boli zvolené 2

hodnoty 18 a 25mm. Z grafu je vidieť, že sila pri polomere hriadeľa 25mm klesne asi o 30N v porovnaní s 18mm.



Obr. 4.13: Rozloženie magnetického poľa pri polomere hriadeľa 25 a 18mm



Obr. 4.14: Priebeh sily pri polomere hriadeľa 25 a 18mm

Vzhľadom na oba vyššie spomenuté javy je celý model podrobený optimalizácii, ktorej účelom je prispôbiť geometriu tak, aby bola zaručená dostatočná sila a aby magnetický obvod nebol presýtený. Nasýtenie magnetického obvodu spôsobí vnášanie nelinearity do radiacích štruktúr. Pravdaže vyššia indukcia bude vyžadovať magnetický obvod s menším prierezom. Medzi podmienky pre optimalizáciu patrí

teda maximálna indukcia v zuboch, kde dôraz bol kladený na vnútorný zub, pretože vyššia indukcia v ňom spôsobuje aj výraznejšie pôsobenie javu blízkosti a sily pôsobiacej na disk.

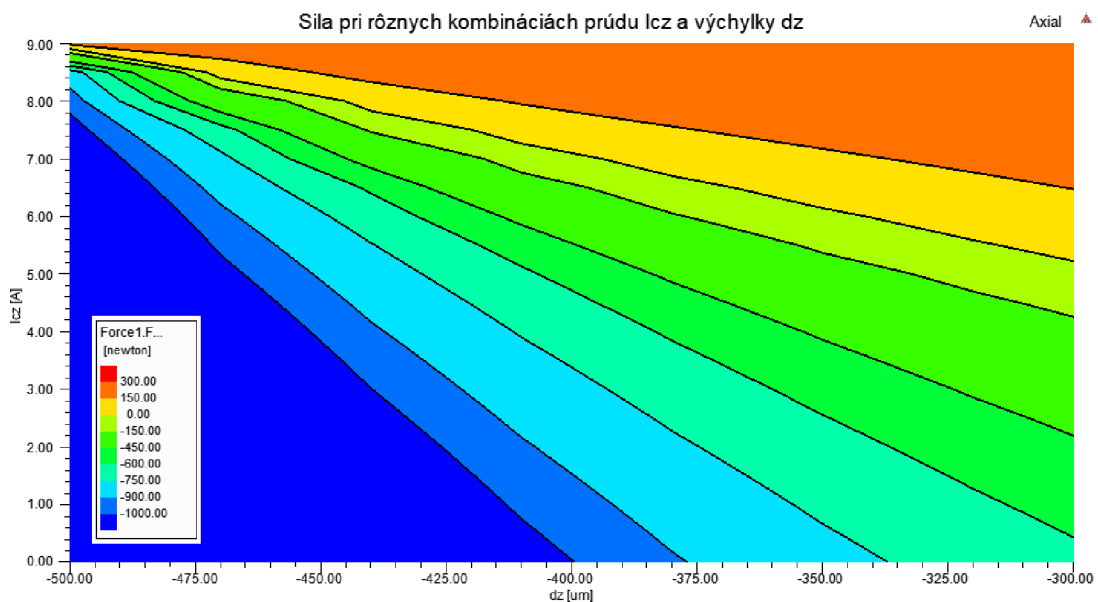
Podobný problém s rozdielnymi výsledkami nastal aj v práci [26]. Po optimalizácii bol získaný návrh axiálneho ložiska s nasledujúcimi parametrami.

r_1 [mm]	28.2
r_2 [mm]	32.2
r_3 [mm]	40.8
r_4 [mm]	43.6
r_5 [mm]	44.6
l [mm]	26.4

Tab. 4.6: Geometria axiálneho ložiska po optimalizácii

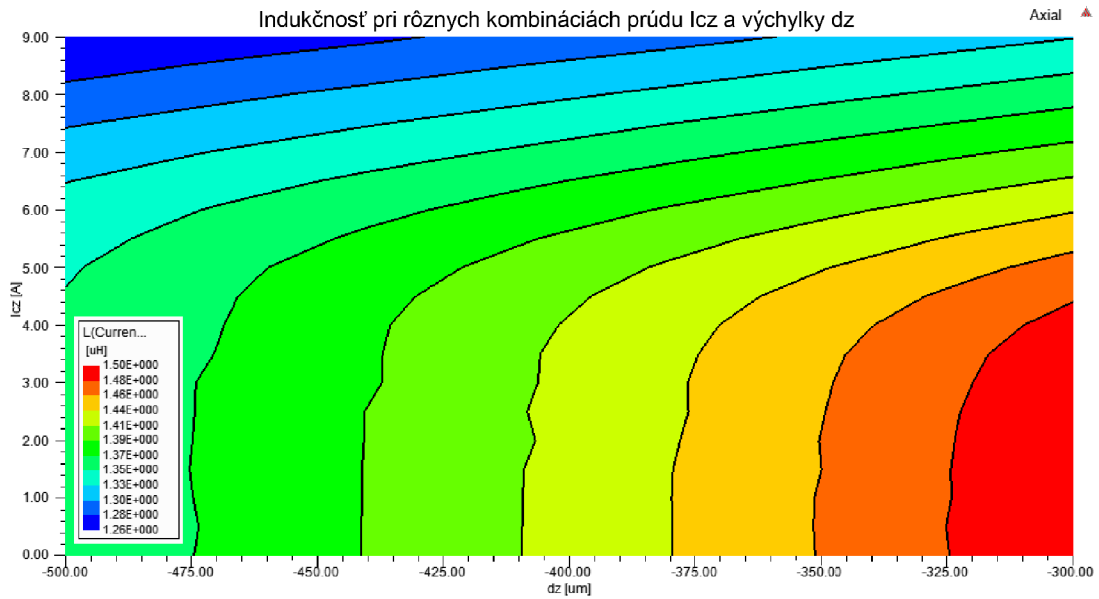
Z obrázku je vidieť ako sa ložisko geometricky prispôbilo tak, aby spĺňalo požiadavky. Podobne ako na radiálne, tak aj na axiálne ložisko bola aplikovaná linearizácia a teda sila by mala mať lineárny priebeh, čo je znázornené na nasledujúcom grafe.

Podobne je možné skúmať silu vrámci celého jej pôsobenia, tzn. pri všetkých možných stavoch. Za týmto účelom bol vytvorený aj nasledujúci graf



Obr. 4.15: Sila pri rôznych kombináciách prúdu I_{cz} a výchylky dz , pri $I_{bz} = 9A$

Z pohľadu rýchlosti riadenia je potrebné skúmať indukciu cievky, ktorá zásadne ovplyvní dynamiku ložiska.



Obr. 4.16: Indukčnosť pri rôznych kombináciách prúdu I_{cz} a výchylky dz , pri $I_{bz} = 9\text{A}$

Všetky tieto výsledky slúžia ako podklad pre návrh riadenia magnetického ložiska. To, čo nie je do simulácií zahrnuté, sú vírivé prúdy, ktoré sa budú indukovať pri prevádzke stroja a budú prispievať ku kompenzácii výchyliek a teplotnej analýzy. Modelovanie vírivých prúdov závisí aj na spôsobe ako bude disk axiálneho ložiska vytvorený, či bude z plechov, alebo jedného materiálu.

5 ROTOROVÁ DYNAMIKA

V predchádzajúcich kapitolách bola rotorová dynamika spomenutá viackrát, avšak bez bližšieho vysvetlenia. V tejto kapitole budú predstavené základy viac praktickej ako teoretickej rotorovej dynamiky vzhľadom na to, že súčasťou práce je overenie vhodnosti návrhu z pohľadu dynamiky. Kým klasické nízko-otáčkové stroje napájané priamo zo siete majú vo väčšine prípadov splnenú podmienku dynamiky na výbornú, tak vysoko-otáčkové stroje pracujú v tejto oblasti na hraničných limitách.

Oblasť rotorovej dynamiky pracuje najmä s riadením vibrácií a predikuje, čo sa bude diať pri určitých otáčkach a či prevádzka zariadení na takýchto otáčkach je bezpečná. Vibrácie vznikajú všade a každý prvok, element a aj geometria majú vlastné rezonančné frekvencie. Naviazanie na otáčky je hlavne kvôli zameraniu práce na točivé elektrické stroje.

Problematika rotorovej dynamiky je veľmi široká a nie je možné pokryť všetky jej časti vrámci tejto práce, ktorá je svojím zadaním viac smerovaná k elektromagnetickému návrhu.

5.1 Úvod do rotorovej dynamiky

V základe sú vibrácie priamo závislé na štruktúre hmoty a tuhosti systému (ref). Pri riadení vibrácií pracujeme s termínom tlmenie vibrácií. V teórii rotorovej dynamiky je vždy ako prvý príklad analýzy uvedený element zavesený na pružine. Element má určitú hmotnosť m a parametrom pružiny je tuhosť k . Pri natiahnutí pružiny a uvoľnení začne systém kmitať - vibrovať. Pri uvažovaní bezstratového systému (žiadne tlmenie), bude frekvencia kmitov priamo závislá na hmotnosti elementu a tuhosti pružiny [30].

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5.1)$$

Analýza závislosti výchylky na čase ukazuje, že táto závislosť sleduje sínusový priebeh s frekvenciou ω a amplitúdou

$$X = \frac{\frac{F}{k}}{\sqrt{\left(1 - \frac{m\omega^2}{k}\right)^2 + \left(\frac{c\omega}{k}\right)^2}} \quad (5.2)$$

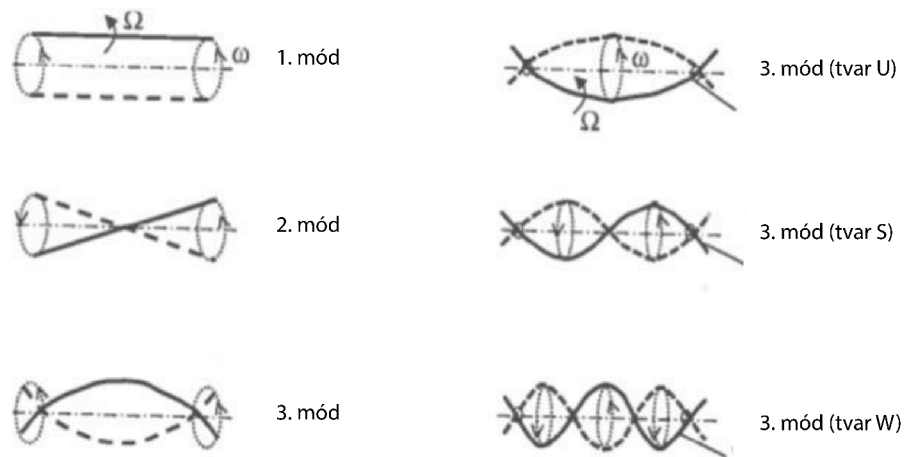
kde parametre v druhej zátvorke v menovateli určujú tlmenie systému. Tzn., že systém bez tlmenia by kmital harmonicky s rovnakou amplitúdou a tlmenie vnáša do

systemu postupný útlm kmitania.

Úlohou tlmenia je obmedziť amplitúdu vibrácií v ideálom prípade na minimum. Čiže, ak systém kmitá na vlastnej frekvencii s amplitúdou X , tak jednou z možností ako obmedziť amplitúdu, je zvýšiť tlmenie. Pri zmene systému z jednoduchej geometrie na zložitejšiu, základy, že vlastná frekvencia závisí na hmote a tuhosti systému, zostávajú. Vlastné frekvencie sa nazývajú aj rezonancia. Systémy majú vždy viac ako jednu rezonančnú frekvenciu. Je to z toho dôvodu, že rezonancia nastáva vtedy, ak dĺžka struny je celistvým násobkom šírky kmitu. Tým pádom budú vyššie vlastné frekvencie n -násobkom základnej frekvencie.

Pri skladaní týchto vyšších frekvencií dochádza aj k rôznym fázovým posunom a k rôznym amplitúdam, čo vedie k vzniku rôznych tvarov/módov kmitania. Na nasledujúcom obrázku sú zobrazené 3 módy kmitania. Ako je vidieť z obrázku, tak prvé dva módy sú translačné a nespôsobujú priame prídavné mechanické namáhanie. Pri treťom móde dochádza k prvému ohybu, čo už z mechanického hľadiska je kritickejšie. Rovnako aj z pohľadu elektrických strojov, kde pri takomto ohybe môže dôjsť k škrtu rotoru o stator. Pri vysokých otáčkach rastú sily vznikajúce z nevyváženosti rotora s druhou mocninou otáčok a tie odsúvajú hriadeľ ku ložiskovej stene. Dochádza k nárastu tuhosti ložiska a rotor sa vychýľuje v priečnom smere. Rotor sa stáva pružným, čím vzniká prvý ohybový mód, pri ktorom sa oba konce hriadeľa otáčajú rovnakým smerom so zhodnou vírivou rýchlosťou ω . V tomto móde nastáva prvá rezonancia odpovedajúca prvej vlastnej frekvencii rotora. Pri ďalšom zvyšovaní otáčok sa postupne dostane hriadeľ k druhému tvaru "S", potom "W". Pri "S"tvare je vírivá rýchlosť opačná proti smeru otáčania a pri "W"tvare je opäť v smere otáčania. Módy kmitania rotora v nelineárnej dynamike sú výsledkom superpozície synchronných a sub-synchronných zložiek kmitania rotora. Tuhosť rotorového systému a tuhosť ložísk ma zásadný vplyv na finálny tvar módu [33].

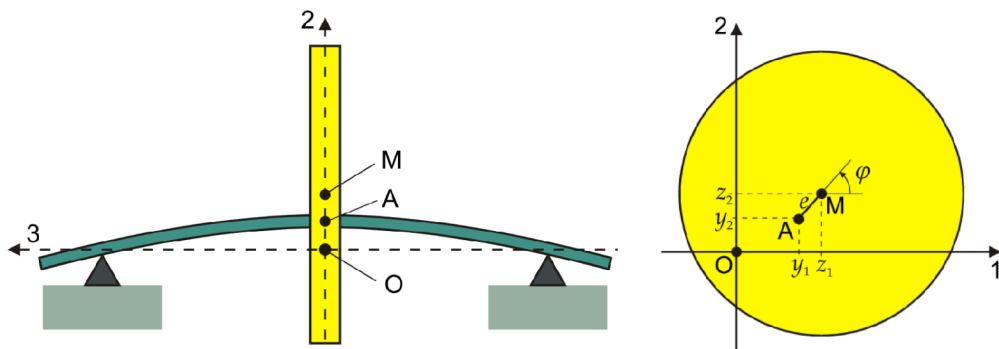
Pri výrobe rotorov a hriadeľov elektrických strojov sa vyžaduje, aby sa predišlo jednak vzniku vibrácií, ale hlavne aby sa predišlo vzniku síl, ktoré budú posúvať módy smerom k nižším frekvenciám. Bežné guľôčkové ložiská majú tak vysokú tuhosť, že sa s ňou ani nepočíta a uvažuje sa nekonečná tuhosť. Pri magnetických, vzduchových alebo kvapalinových ložiskách hrá tuhosť značnú rolu, pretože tá je obmedzená. Avšak túto nevýhodu kompenzujú bezkontaktným uložením, ktoré u vysokootáčkových motorov je nevyhnutné, kvôli trecím stratám v klasických ložiskách [31].



Obr. 5.1: Prehľad módov[32]

5.2 Lavalov (Jeffcotov) rotor

Na analýzu rotorovej dynamiky sa využívajú modely rotorov. Jedným z nich je aj Jeffcotov rotor, ktorý je tvorený rotujúcim tuhým diskom umiestneným na nehmotnom hriadeľi uloženom na oboch koncoch v tuhých ložiskách. Tento systém je skúmaný vo všeobecnom súradnicovom systéme s osami 1 a 2, viz. obr. 5.2. Ťažisko disku je v bode M a hriadeľ rotuje okolo bodu A. Súradnice (y_1 a y_2) určujú stred rotácie hriadeľa a súradnice (z_1 a z_2) ťažisko. Vzťah medzi týmito súradnicami je



Obr. 5.2: Jeffcotov model rotora [34]

$$z_1 = y_1 + e \cos \phi ; z_2 = y_2 + e \sin \phi \quad (5.3)$$

Pri skúmaní silového pôsobenia na disk je možné jeho sily rozložiť na silu spôsobenú momentom zotrvačnosti vlastnej hmoty disku, pružnosťou hriadeľa, viskóznym

tlmením okolia a gravitáciou. Z tejto analýzy vyplývajú diferenciálne rovnice pohybu

$$m_m \frac{d^2 z_1}{dt^2} = -ky_1 - d \frac{dy_1}{dt} \quad (5.4)$$

$$m_m \frac{d^2 z_2}{dt^2} = -ky_2 - d \frac{dy_2}{dt} - m_m g \quad (5.5)$$

Pre zjednodušenie je možné zaviesť predpoklady koncentrovania silového pôsobenia na A a konštantných otáčok rotoru. Pri tomto zjednodušení je možné dosadiť vzťah medzi z a y súradnicami z rovníc vyššie do pohybových rovníc

$$m_m \left(\frac{d^2 y_1}{dt^2} + \frac{d^2 (e \cos \phi)}{dt^2} \right) = -ky_1 - d \frac{dy_1}{dt} \quad (5.6)$$

$$m_m \left(\frac{d^2 y_2}{dt^2} + \frac{d^2 (e \sin \phi)}{dt^2} \right) = -ky_2 - d \frac{dy_2}{dt} - m_m g \quad (5.7)$$

Rozdelením súčiny v derivácii prechádza pohybová rovnica do nasledujúcej podoby

$$m_m \left(\frac{d^2 y_1}{dt^2} - e \frac{d^2 \phi}{dt^2} - e \left(\frac{d\phi}{dt} \right)^2 \cos \phi \right) = -ky_1 - d \frac{dy_1}{dt} \quad (5.8)$$

$$m_m \left(\frac{d^2 y_2}{dt^2} - e \frac{d^2 \phi}{dt^2} - e \left(\frac{d\phi}{dt} \right)^2 \sin \phi \right) = -ky_2 - d \frac{dy_2}{dt} - m_m g \quad (5.9)$$

Pri uvažovaní konštantných otáčok je možné uhol vyjadriť pomocou uhlovej frekvencie závislej na čase

$$\phi = \Omega t ; \quad \frac{d\phi}{dt} = \Omega ; \quad \frac{d^2 \phi}{dt^2} = 0 \quad (5.10)$$

Zavedením tohoto predpokladu sa pohybové rovnice zjednodušia

$$m_m \frac{d^2 y_1}{dt^2} + d \frac{dy_1}{dt} + ky_1 = m_m e \Omega^2 \cos \Omega t \quad (5.11)$$

$$m_m \frac{d^2 y_2}{dt^2} + d \frac{dy_2}{dt} + ky_2 = m_m e \Omega^2 \sin \Omega t - m_m g \quad (5.12)$$

pre ustálený stav platí

$$y_1(t) = r \cos(\Omega t - \epsilon) ; \quad y_2(t) = r \sin(\Omega t - \epsilon) - y_g \quad (5.13)$$

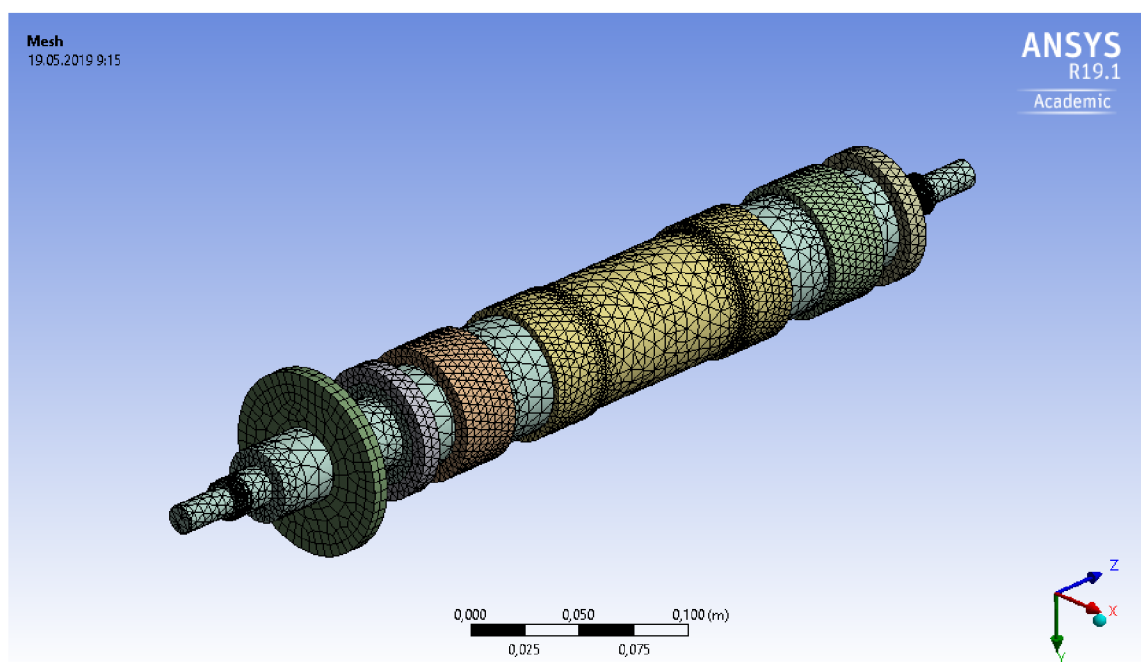
Polomer r udáva polomer kružnice, po ktorej obieha bod A (vzdialenosť medzi bodom O a A) [34], [35].

$$r = \frac{m_m e \cos \Omega^2}{\sqrt{(k - m_m \Omega)^2 + (d\Omega)^2}} ; \quad \epsilon = \arctan \frac{d\Omega}{k - m_m \omega^2} ; \quad y_g = \frac{m_m g}{k} \quad (5.14)$$

5.3 Analýza rotorového systému s magnetickými ložiskami

Pre potreby overenia rotorovej dynamiky a kontroly kritických otáčok rotorového systému bol z programu SolidWorks premostený model do Ansys Workbench, kde bol model mierne upravený pre potreby simulácie s jej nastavením. Výsledkom je Campbellov diagram popisujúci kritické otáčky. Popisuje závislosť otáčok na vlastných frekvenciách systému. Vytvorený model s upravenou sieťou je na obrázku 5.3.

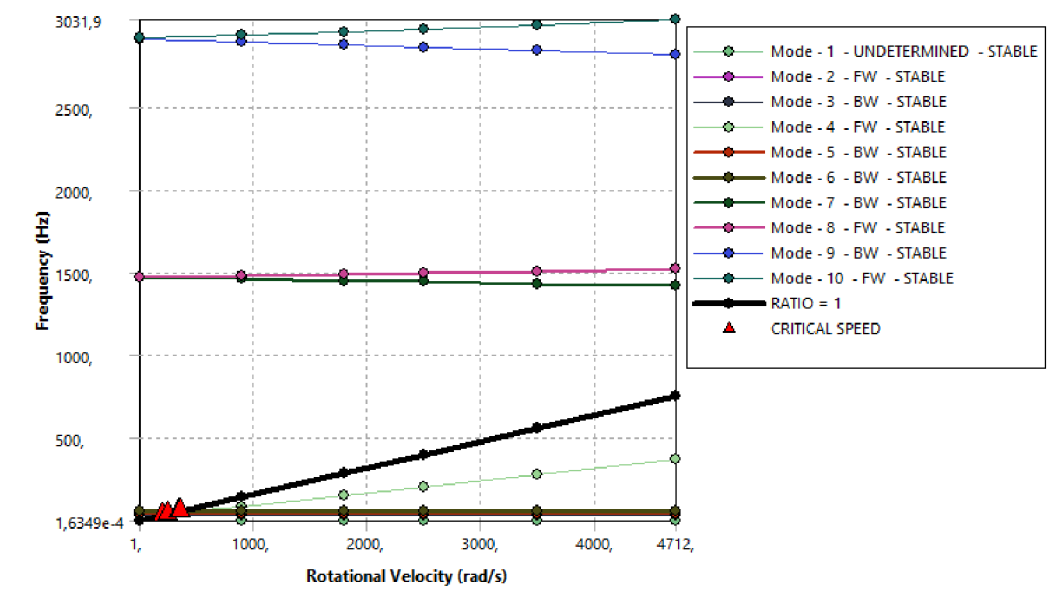
Tak, ako bolo avizované, magnetické ložiská spôsobia nárast dĺžky hriadeľa. Uložením všetkých častí na miesto, kde budú plniť svoju úlohu dĺžka rotora z pôvodných 242.3mm narástla na 506mm, čo je 2 násobok pôvodnej dĺžky. Ďalšou optimalizáciou alebo návrhom hybridných ložísk je možné túto dĺžku zredukovať, avšak takýto nárast dĺžky zobrazuje, že stroje, ktoré sú navrhnuté na medzi rotorovej dynamiky nemusia byť vždy vhodnými kandidátmi pre implementáciu magnetických ložísk.



Obr. 5.3: Rotorový systém so sieťou

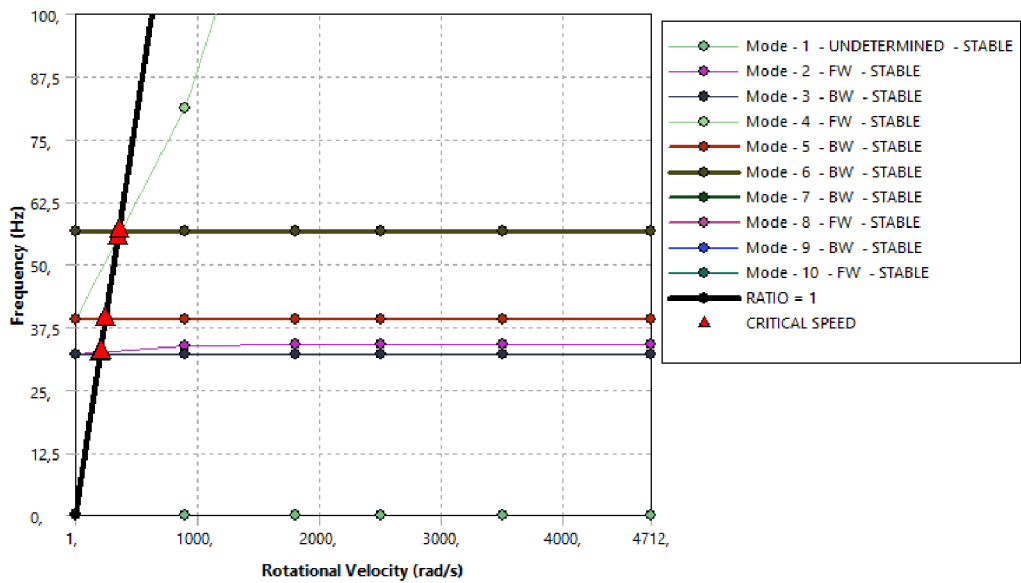
Magnetické ložiská sa vyznačujú tým, že v porovnaní s tradičnými ložiskami je možné u nich pozorovať vznik translačných módov, ktoré sa v tuhých ložiskách nevyskytujú. Avšak tieto módy je možné pomocou regulácie magnetického ložiska vykompenzovať. Problém nastáva ale pri ohybových módoch, ktoré sú pre každý

točivý elektrický stroj limitujúcim parametrom, pretože sa systém dostáva do rezonancie a ohyb môže s najväčšou pravdepodobnosťou spôsobiť škrt rotora o stator. Preto točivé stroje sa nesmú ani týmto otáčkam priblížiť, aby sa predišlo deštrukcii stroja. Bezpečná hranica medzi menovitými otáčkami a prvým ohybovým módom je približne 1.15 – 1.2 násobok menovitých otáčok. V navrhnutom systéme sú prvé ohybové módy na úrovni 1421.3Hz a 1522Hz, čo je takmer dvojnásobok menovitej frekvencie otáčania rotora (750Hz). Grafická reprezentácia tohto módu je na obr. 5.7. Následne, vyššie vlastné ohybové frekvencie sú dvojnásobkom prvej ohybovej frekvencie. V týchto módoch je možné očakávať "S" tvar ohybu, čo potvrdila aj simulácia. Prehľad všetkých módov je v tabuľke 5.1.



Obr. 5.4: Campbellov diagram

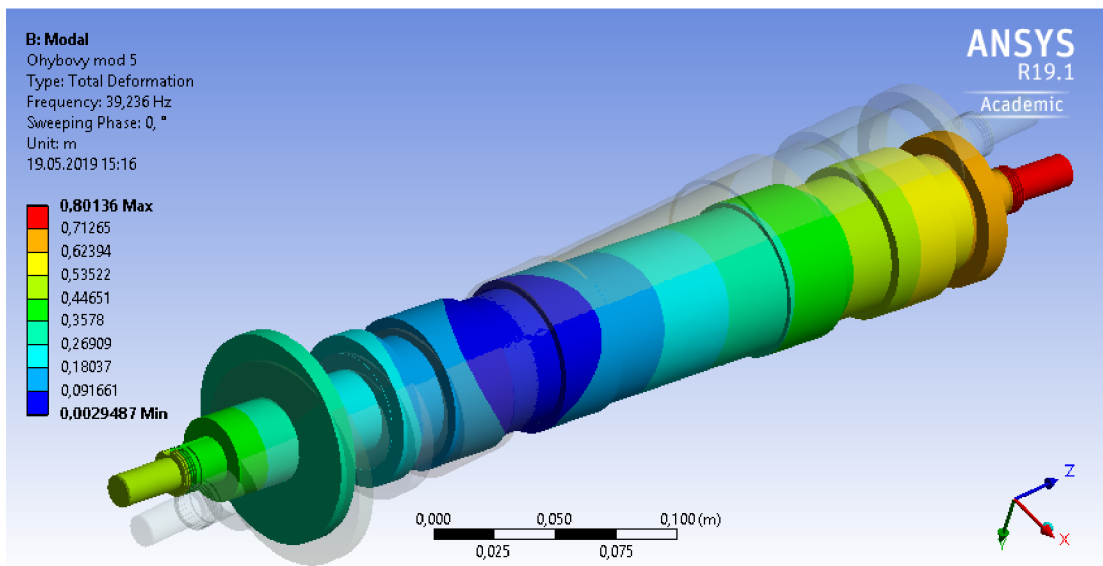
Módy 2 a 3 sú translačné módy, ktoré majú svoj pôvod v nesymetrickom rozložení jednotlivých prvkov na rotore a časť s axiálnym magnetickým ložiskom je tenšia a teda aj ľahšia, čím sa dostane do translačného pohybu omnoho jednoduchšie. Ťažšia strana sústavy zostáva pre zmeny výchylky a ľahšia časť sa začne vychyľovať doprednou, prípadne spätnou vírovou rýchlosťou. Podobne je to aj pri módoch 5 a 6, kde sústava sa nakláňa približne okolo stredu sústavy. Mód 4 je veľmi podobný predchádzajúcim módom.



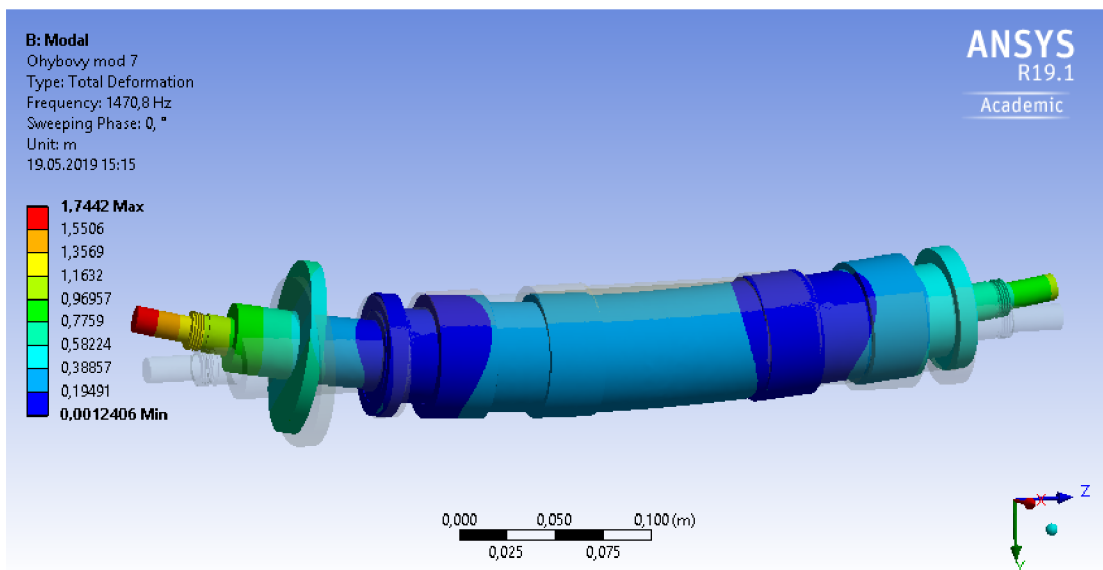
Obr. 5.5: Campbellov diagram - detail

Poradie módu	smer vírovej rýchlosti	stabilita	vlastná frekvencia [Hz]
1	-	stabilný	0
2	dopredný	stabilný	34,004
3	spätný	stabilný	32.028
4	dopredný	stabilný	376.2
5	spätný	stabilný	39.139
6	spätný	stabilný	56.635
7	spätný	stabilný	1421.3
8	dopredný	stabilný	1522.2
9	spätný	stabilný	2823.3
10	dopredný	stabilný	3031.9

Tab. 5.1: Prehľad vlastných frekvencií rotorovej sústavy



Obr. 5.6: Translačný mód pri frekvencii 39.236Hz¹



Obr. 5.7: Ohybový mód pri kritických frekvencii 1470.8Hz¹

Zo získaných výsledkov simulácie kritických otáčok je možné usúdiť, že rotorová sústava s magnetickými ložiskami je dostatočne tuhá a prvé ohybové kritické otáčky sú približne na dvojnásobku menovitých otáčok, čím je možné považovať návrh za vyhovujúci.

¹Farebná škála znázorňuje normalizovanú výchylku, ktorá nie je totožná s reálnou výchylkou. Pre zistenie presnej výchylky pri danej frekvencii by bolo nutné vykonať iný typ analýzy.

6 ZÁVER

Magnetické ložiská patria medzi elektrické stroje, ktorých aplikáciu je možné nájsť všade tam, kde bežné guľôčkové ložiská nie je možné využiť. Totiž, každá aplikácia má špecifické požiadavky na ložiská a hoci guľôčkové ložiská plnia svoju úlohu v rade aplikácie, pri vysoko-otáčkových strojoch nepatria medzi prvú voľbu. Tu nastupujú na rad magnetické ložiská, ktorých hlavnou výhodou je chod bez trenia vďaka magnetickému závesu. Práve návrhu analýzy magnetických ložísk sa venuje táto práca. V rámci práce boli spracované návrhy magnetického zavesenia rotoru už existujúceho elektrického motora pre turbocirkulátor.

V literatúre je často prezentovaný zjednodušený analytický návrh ložísk, ktorý, ako sa v práci ukázalo, je nedostatočný a nepokrýva parazitné javy. Preto je geometria modelu optimalizovaná tak, aby spĺňala požiadavky na vlastný chod. Rovnako aj analýza pôsobenia síl ukazuje, že vzájomná magnetická väzba jednotlivých častí má výrazný vplyv na výsledné silové pôsobenie. Mnoho parazitných vplyvov je možné kompenzovať riadením magnetických ložísk.

Prvá kapitola stručne popisuje historické pozadie vývoja magnetických ložísk. Následne druhá kapitola poskytuje diskusiu k možnostiam výberu typov ložísk a voľbe parametrov. V tejto kapitole bol kladený dôraz na detailnejší popis dopadov jednotlivých volieb a zmien na samotný návrh a aj na výslednú charakteristiku a chod ložísk. V rámci tretej kapitoly bol spracovaný teoretický podklad pre návrh obsiahnutý v štvrtej kapitole praktickou aplikáciou spojenou s diskusiou k jednotlivým krokom návrhu. Súčasťou štvrtej kapitoly je aj numerická analýza, kde návrh bol optimalizovaný a podrobený analýze s diskusiou k výsledkom. Posledná kapitola sa venuje overeniu rotorovej dynamiky, kde bola vykonaná modálna analýza za účelom zistenia, či navrhnutý systém má vlastné kritické otáčky nad menovitými.

Návrh magnetických ložísk spracovaný v tejto práci by mal viesť ku praktickej realizácii a následnému overeniu výsledkov na reálnej vzorke. Za týmto účelom bol vytvorený aj kompletný 3D model stroja, ktorý je možné využiť ako podklad pre výrobu. Elektromagnetická analýza je len časťou celého návrhu a preto boli v rámci práce vypracované podklady pre návrh výkonového stupňa. Správanie magnetického ložiska je možné skúmať z mnohých pohľadov a analýza obsiahnutá v tejto práci je len výňatkom najdôležitejších analýz demonštrujúcich reálny chod.

6.1 Námety pre ďalší výskum

- Často diskutovaným parametrom je ekológia a hospodárnosť prevádzky, preto aj keď vysoký bias prúd dopomáha ku linearizácii riadenia, spôsobuje značné tepelné straty. Preto aj viacero výskumných tímov sa zaoberá myšlienkou ložísk s nízkym bias prúdom, prípadne s pasívne budeným bias magnetickým polom.
- Silná magnetická väzba u radiálneho ložiska spôsobuje značné odchýlky od predpokladaného silového pôsobenia. Spoločne s detailným náhradným modelom s uvažovaním parazitných javov by dopomohol estimácii síl a riadiacich štruktúr.
- Súčasný rozmach strojového učenia a umelej inteligencie môže dopomôcť ku efektívnejšiemu riadeniu a aj redukcii hmotnosti a rozmerov ložiska.
- Analytický výpočet spojený s numerickou analýzou môže slúžiť ako podklad pre edukatívnu pomôcku využiteľnú v rámci odborných predmetov týkajúcich sa elektrických strojov.

LITERATÚRA

- [1] SCHWEITZER, G. a Eric H. MASLEN. *Magnetic bearings: theory, design, and application to rotating machinery*. New York: Springer, [2009]. ISBN 978-3-642-00496-4.
- [2] O., Vítek. *Vysokootáčkové elektrické motory*. Brno, 2016. Habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [3] RÚRA, Dávid. *Magnetická ložiska pro elektrické stroje*. Brno, 2019. Semestrální práce. VUT v Brně.
- [4] FLEMING, David p. *Magnetic bearings-state of the art - NASA-TM-104465* [online]. 1991 [cit. 2018-12-31]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/2060/19910016099>
- [5] WEISE, David A. a Frank D. PINCKNEY. *AN INTRODUCTION AND CASE HISTORY REVIEW OF ACTIVE MAGNETIC BEARINGS*.
- [6] RÚRA, Dávid. *Program pro návrh asynchronního motoru*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017, 67 listů : grafy, schémata + 1 CD-RO
- [7] MATSUDA, K, Y KANEMITSU a S KIJIMOTO. Optimal Number of Stator Poles for Compact Active Radial Magnetic Bearings. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. IEEE, 2007, **43**(8), 3420-3427 [cit. 2019-05-21]. DOI: 10.1109/TMAG.2007.900184. ISSN 0018-9464.
- [8] CHEN, Rui, Hongwei LI a Jing TIAN. The relationship between the number of poles and the bearing capacity of radial magnetic bearing. *2017 Chinese Automation Congress (CAC)*. IEEE, 2017, 2017, , 5553-5557. DOI: 10.1109/CAC.2017.8243771. ISBN 978-1-5386-3524-7. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8243771/>
- [9] RUI, Chen, Li HONGWEI a Tian JING. The relationship between the number of poles and the bearing capacity of radial magnetic bearing. In: *2017 Chinese Automation Congress (CAC)* [online]. IEEE, 2017, **2017-**, s. 5553-5557 [cit. 2019-05-21]. DOI: 10.1109/CAC.2017.8243771.
- [10] TSIOTRAS, P a B.c WILSON. Zero- and low-bias control designs for active magnetic bearings. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* [online]. IEEE, 2003, **11**(6), 889-904 [cit. 2019-05-21]. DOI: 10.1109/TCST.2003.819593. ISSN 1063-6536.

- [11] SIKANEN, Eerik. *MECHANICAL DESIGN AND ANALYSIS OF MODULAR ACTIVE MAGNETIC BEARING TEST RIG*. Faculty of Technology, 2014. Master's thesis. Lappeenranta University of Technology.
- [12] MASLEN, Eric. *Magnetic Bearings*. James Madison University, Virginia, 2014.
- [13] UZHEGOV, Nikita, Alexander SMIRNOV, Janne HEIKKINEN a Juha PYRHONEN. Design Aspects of High-Speed Electrical Machines With Active Magnetic Bearings for Compressor Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. IEEE, 2017, **64**(11), 8427-8436 [cit. 2019-05-20]. DOI: 10.1109/TIE.2017.2698408. ISSN 0278-0046.
- [14] PYRHÖNEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOVÁ. *Design of rotating electrical machines*. Second edition. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-70162-1.
- [15] FITZGERALD, A. E., Charles KINGSLEY a Stephen D. UMANS. *Electric machinery*. 6th ed. Boston, Mass.: McGraw-Hill, c2003. ISBN 0-07-112193-5.
- [16] CHIBA, Akira. *Magnetic Bearings and Bearingless Drives*. Elsevier, 2005. ISBN 0080478972.
- [17] FILATOV, Alexei, Larry HAWKINS a Patrick MCMULLEN. Homopolar Permanent-Magnet-Biased Actuators and Their Application in Rotational Active Magnetic Bearing Systems. *Actuators* [online]. Basel: MDPI, 2016, **5**(4), 26 [cit. 2019-05-20]. DOI: 10.3390/act5040026. ISSN 20760825. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/1858317906/>
- [18] BARTOŇ, Lukáš. *Znalostní podpora pro návrh systému aktivního magnetického ložiska*. FAKULTA STROJNÍ, 2012. DIZERTAČNÍ PRÁCE. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI.
- [19] BURDET, Luc a Roland SIEGWART. *Active magnetic bearing design and characterization for high temperature applications* [online]. EPFL (Lausanne), 2006 [cit. 2019-05-20]. DOI: 10.5075/epfl-thesis-3616.
- [20] VUOJOLAINEN, Jouni, Niko NEVARANTA, Rafal JASTRZEBSKI a Olli PYRHONEN. MATLAB-Based Tool for Teaching of Active Magnetic Bearing Design to Undergraduate Students. In: *2018 IEEE 18th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)* [online]. IEEE, 2018, s. 926-931 [cit. 2019-05-20]. DOI: 10.1109/EPEPEMC.2018.8521941.

- [21] SWANSON, Erik, Chris POWELL, Sorin WEISSMAN a Erik SWANSON. A Practical Review of Rotating Machinery Critical Speeds and Modes. *Sound Vibration* [online]. 2005, 39(5), 10-17 [cit. 2019-05-20]. ISSN 1541-0161. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/743384762/>
- [22] LARSONNEUR, René. *Design and control of active magnetic bearing systems for high speed rotation*. s.n, 1990. DOI: 10.3929/ethz-a-000578355.
- [23] SKF workshop - Magnetic bearing for high speed machines.
- [24] LIJESH, K. p a Harish HIRANI. Design of eight pole radial active magnetic bearing using monotonicity. In: *2014 9th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)* [online]. IEEE, 2014, s. 1-6 [cit. 2019-05-20]. DOI: 10.1109/ICIINFS.2014.7036658. ISBN 9781479964994.
- [25] POLLANEN, R, J NERG a O PYRHONEN. Reluctance network method based dynamic model of radial active magnetic bearings. In: *INTERMAG Asia 2005. Digests of the IEEE International Magnetics Conference, 2005* [online]. IEEE, 2005, s. 1429-1430 [cit. 2019-05-21]. DOI: 10.1109/INTMAG.2005.1464144. ISBN 0780390091.
- [26] BRITCHER, Colin p., V. dale BLOODGOOD a Nelson j. GROOM. *Further Development of an Optimal Design Approach Applied to Axial Magnetic Bearings* [online]. 2000 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/2060/20040086569>
- [27] IMLACH, J., A. MIKULA, D. w. LEWIS, P. e. ALLAIRE a B. BANERJEE. Design and test of a magnetic thrust bearing. *NASA. Langley Research Center, Magnetic Suspension Technology Workshop* [online]. 1993, (ogy workshop) [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/2060/19930018378>
- [28] JANG, Seok-myeong, Un-ho LEE, Jang-young CHOI a Jung-pyo HONG. Design and analysis of thrust active magnetic bearing. *Journal of Applied Physics* [online]. American Institute of Physics, 2008, **103**(7), 07F122-1-07F122-3 [cit. 2019-05-20]. DOI: 10.1063/1.2837649. ISSN 0021-8979.
- [29] SHAH, Arpi. *Design and Simulation of Magnetic Thrust and Radial Bearing System*. 2016. Dissertation. Kingston University.
- [30] YOON, Se Young, Zongli LIN a Paul E. ALLAIRE. Introduction to Rotor Dynamics. YOON, Se Young, Zongli LIN a Paul E. ALLAIRE. *Control of Surge in*

- Centrifugal Compressors by Active Magnetic Bearings* [online]. London: Springer London, 2013, 2013, s. 17-55 [cit. 2019-05-20]. *Advances in Industrial Control*. DOI: 10.1007/978-1-4471-4240-9_2. ISBN 978-1-4471-4239-3. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-1-4471-4240-9_2
- [31] NIJHUIS, A.B.M., J. SCHMIED a R. R. SCHULTZ. *Rotordynamic Design Considerations for a 23 MW Compressor with Magnetic Bearings*.
- [32] ALSAEED, A. A. Dynamic stability evaluation of an automotive turbocharger Rotorbearing system. 2005, Diploma thesis, Virginia Polytechnic Institute
- [33] Fryšček, T. *Dynamika rotorů moderních turbodmychadel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 93 s. Školitel: Prof. Ing. Václav Píštěk DrSc.
- [34] ARKKIO., A. *Special course on electromechanics*. Lecture slides. Department of Electrical Engineering: Aalto University, Finland, 2014.
- [35] GASCH, Robert a Herbert PFÜTZNER. *Dynamika rotorů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1980.