

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2021

Bc. Ondřej Pavluš



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 ELEKTRODYNAMICKÉHO MAGNETICKÉHO LOŽISKA

ELECTRODYNAMIC MAGNETIC BEARING DESIGN

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Pavluš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Dávid Rúra

BRNO 2021

Diplomová práce

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

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Ondřej Pavluš

ID: 193228

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Návrh elektrodynamického magnetického ložiska

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vytvořte literární rešerši na téma využití elektrodynamických magnetických ložisek v oblasti elektrických strojů.
2. Analyticky popište chování elektrodynamického ložiska společně s metodikou jeho návrhu.
3. Pro zadaný elektrický stroj proveďte návrh magnetického ložiska.
4. Vytvořte konečně prvkový model elektrodynamického ložiska a proveďte ověření jeho vlastností.
5. Na vytvořeném konečně prvkovém modelu proveďte citlivostní analýzu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] J. Pyrhonen, J. Jokinen, V. Hrabovcova "Design of Rotating Electrical Machines" John Wiley & Sons, Ltd, 2008. 512 s. ISBN 978-0-470-69516-6(H/B)
- [2] A. E. Fitzgerald, Ch. Kingsley, S. Umans "Electric Machinery", McGraw-Hill Companies Inc., 2003. 688 s. ISBN 0-07-112193-5
- [3] Chiba, A.; Fukao, T.; Ichikawa, O.; Oshima, M.; Takemoto, M.; Dorrell, D.G. Magnetic Bearings and Bearingless Drives; Elsevier: Boston, MA, USA, 2005; p. 20. ISBN 9780750657273.
- [4] Schweitzer, G.; Eric H. Maslen. Magnetic bearings: theory, design, and application to rotating machinery. New York: Springer, [2009]. ISBN 978-3-642-00496-4.
- [5] Amati, N., De Lépine, X., and Tonoli, A. (October 15, 2008). "Modeling of Electrodynamic Bearings." ASME. J. Vib. Acoust. December 2008; 130(6): 061007.

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 24.5.2021

Vedoucí práce: Ing. Dávid Rúra

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

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Požadavky vysokorychlostních aplikací společně se snahou snížit spotřebu elektrické energie vedou k návrhům nových typů ložisek. V posledních desetiletích bylo hledáno ložisko, které by dosáhlo pasivní levitace použitím běžných materiálů při pokojové teplotě. To vedlo k vývoji elektrodynamického ložiska, které pracuje na principu vířivých proudů. V současné době ještě není elektrodynamické ložisko dostatečně prozkoumáno a jsou potřeba další výzkumy.

Cílem práce je nejprve teoretický popis moderních magnetických ložisek, zjednodušená analýza elektrodynamického ložiska a návrh konkrétního ložiska podle zvolených parametrů. Tato konstrukce bude následně simulována konečně prvkovou metodou pro ověření a posouzení jeho vlastností.

KLÍČOVÁ SLOVA

vysokorychlostní aplikace, magnetické ložisko, elektrodynamické ložisko, levitace, vířivé proudy, metoda konečných prvků

ABSTRACT

High speed applications demands with a need for lower energy consumption lead to designing new types of bearings. In the last decades magnetic bearing, which would be able to obtain passive stable levitation using regular materials at room temperature, has been searched. This has lead to development of electrodynamic bearing based on eddy currents principle. Currently the electrodynamic bearings are still not fully explored and further research is needed.

The aim of the work is to describe the theory about modern magnetic bearing, analysis and design of electrodynamic bearing according to given parameters. The finite element method is used for further analysis and evaluate behaviour of its properties.

KEYWORDS

high speed application, magnetic bearing, electrodynamic bearing, levitation, eddy currents, finite element method

PAVLUŠ, Ondřej. *Návrh elektrodynamického magnetického ložiska*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2021, 87 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Dávid Růra

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Bc. Ondřej Pavluš
VUT ID autora: 193228
Typ práce: Diplomová práce
Akademický rok: 2020/2021
Téma závěrečné práce: Návrh elektrodynamického magnetického ložiska

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Dávidu Rúrovi, za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

1	Úvod	16
2	Magnetická ložiska	17
2.1	Motivace	17
2.2	Využití elektrodynamických ložisek	18
2.3	Dělení magnetických ložisek	19
2.3.1	Pasivní magnetická ložiska	19
2.3.2	Aktivní magnetická ložiska	20
2.3.3	Supravodivá ložiska	21
2.3.4	Elektrodynamická ložiska	21
2.4	Vývoj konstrukce elektrodynamických ložisek	23
2.4.1	Vícepólová ložiska	23
2.4.2	Snížení ztrát vířivými proudy	24
2.4.3	Axiální elektrodynamické ložisko	25
2.4.4	Radiální elektrodynamické ložisko	25
3	Analýza ložiska	28
3.1	Rotační matice	28
3.2	Vířivé proudy a ložiskové síly	29
3.3	Odpor a indukčnost proudové dráhy	31
3.3.1	Vliv skin efektu	31
3.3.2	Stanovení odporu	31
3.4	Stanovení indukčnosti	34
3.4.1	Indukce ve vzduchové mezeře	35
3.5	Kvazistacionární analýza	38
3.6	Výpočet ztrát ložiska	39
4	Teoretický podklad pro návrh a konstrukční provedení ložiska	40
4.1	Konfigurace ložiska	40
4.2	Materiál hřídele	41
4.3	Průměr rotoru	41
4.4	Maximální provozní otáčky	41
4.5	Volba materiálu prstencového vodiče s ohledem na vysoké otáčky a vlastnosti ložiska	43
4.6	Volba vzduchové mezery	44
4.7	Volba materiálu permanentních magnetů	44
4.8	Konfigurace magnetů	45

4.9	Rozměry magnetů	46
4.10	Volba délky rotoru	46
4.11	Použití pólových nástavců	47
4.12	Materiál pólových nástavců	47
4.13	Volba pláště	48
4.14	Vzájemné spojení materiálů	49
4.14.1	Spojení prstencového vodiče a hřídele	49
4.14.2	Spojení permanentních magnetů, nástavců a pláště	49
5	Konstrukční návrh ložiska	50
5.1	Šířka rotorové části ložiska	50
5.2	Materiály použité pro stator	51
5.3	Rozměry statorové části ložiska	52
5.4	Délka rotorové části ložiska	52
5.5	Rozměry ložiskových dílů	53
6	Simulace chování navrženého ložiska	54
6.1	Simulace působení sil na základě kvazistacionární analýzy	54
6.2	Simulace metodou konečných prvků	59
6.2.1	Tvorba mesh – vlastní provedení	59
6.2.2	Tvorba mesh – možnosti vylepšení	61
6.2.3	Rozložení magnetického pole	62
6.2.4	Simulace ložiska při otáčení s výchylkou	63
7	Citlivostní analýza metodou konečných prvků	71
8	Závěr	76

Seznam obrázků

2.1	Princip supravodivého ložiska, překresleno z [1]	21
2.2	Princip supravodivého ložiska, překresleno z [1]	21
2.3	(a) Provedení s drážkama, (b) Bezdrážkové provedení, překresleno z [18]	23
2.4	Axiální elektrodynamické ložisko, překresleno z [20]	25
2.5	Radiální elektrodynamické ložisko, překresleno z [20]	26
2.6	Radiální typ, vnitřní provedení [2]	26
2.7	Radiální typ, vnější provedení [2]	27
2.8	Radiální typ, intermediate [2]	27
3.1	(a) Schéma reprezentující vodič rotující v magnetickém poli, (b) Znázornění bodu C v transformované soustavě, překresleno z [24]	28
3.2	Znázornění elektrického obvodu ve vodivém materiálu rotoru, překresleno z [20]	30
3.3	Přibližný tvar proudové dráhy, dva radiální magnety s pólovými nastavci, upraveno podle [2]	32
3.4	Linearizovaný model proudové dráhy v rotujícím válcovém vodiči, upraveno podle [2]	33
3.5	Směr magnetického toku vytvářeného indukovanými vířivými proudy při vychýlení v rámci jedné osy (a) a poté při natočení o 180° kolem středu magnetického pole (b)	34
3.6	Magnetický tok v řezu elektrodynamického ložiska	35
3.7	Náhradní magnetický obvod	36
3.8	Mechanický ekvivalent reprezentující elektrodynamické ložisko, upraveno podle [24]	38
4.1	Zjednodušený model radiálního elektrodynamického ložiska	40
4.2	Znázornění rotorových dílů	42
4.3	Porovnání pevnosti v tahu a vodivosti pro různé slitiny mědi[28]	43
4.4	Teplota komponent turbodmychadla, upraveno [31]	45
6.1	Závislost odporu R proudové dráhy na otáčkách n	54
6.2	Velikost magnetické indukce B ve vzduchové mezeře od vnějšího okraje vycentrovaného rotoru po stator	55
6.3	Závislost impedance Z proudové dráhy na otáčkách n	56
6.4	Síla rovnoběžná F_{\parallel} a kolmá F_{\perp} na směr vychýlení a výsledná síla F_q	56
6.5	Ztráty ložiska P_q vlivem vířivých proudů v závislosti na otáčkách n	57
6.6	Proud I v jedné proudovodné smyčce v závislosti na otáčkách n	58
6.7	Velikost výsledné síly F_q v závislosti na otáčkách n a výchylce z_0	58
6.8	Grafické zobrazení generované mesh, oblast kolem vzduchové mezery	59

6.9	Grafické zobrazení generované mesh, pohled shora	60
6.10	Grafické zobrazení generované mesh, pohled z boku	60
6.11	Vzor symetricky generované mesh [2]	61
6.12	Porovnání tetrahedrální (a) a hexahedrální meshe při simulaci vířivých proudů [20]	61
6.13	Rozložení magnetické indukce v řezu ložiska	62
6.14	Rozložení vektorů magnetické indukce v řezu ložiska	63
6.15	Simulace otáčení rotoru při vychýlení v magnetickém poli	64
6.16	Grafický průběh síly pro jednu otáčku, rychlost otáčení 1000 ot/min .	65
6.17	Grafický průběh síly pro jednu otáčku, rychlost otáčení 10 000 ot/min	65
6.18	Grafický průběh síly pro jednu otáčku, rychlost otáčení 30 000 ot/min	66
6.19	Síla F_y v závislosti na otáčkách n	67
6.20	Rozložení proudové hustoty v řezu ložiska	68
6.21	Rozložení vektorů proudové hustoty v řezu ložiska	68
6.22	Vektory sil působící na rotor	69
6.23	Ztráty ložiska P_{ztr} v závislosti na otáčkách n	70
7.1	Vliv délky magnetu l_m na velikost síly F_y	71
7.2	Vliv délky pólového nástavce l_n na velikost síly F_y	72
7.3	Vliv šířky magnetu w_m na velikost síly F_y	72
7.4	Vliv šířky pólového nástavce w_n na velikost síly F_y	73
7.5	Vliv délky rotoru l_r na velikost síly F_y	74
7.6	Vliv vychýlení rotoru q_o na velikost síly F_y	75
7.7	Ztráty ložiska P_{ztr} v závislosti na výchylce q_0	75
8.1	Závislost tuhosti na otáčkách pro různý počet radiálních magnetů [2]	81
8.2	Vliv přidání jednoho magnetu k původním dvěma [2]	81
8.3	Tuhost v závislosti na šířce magnetu [2]	82
8.4	Relativní tuhost v závislosti na šířce magnetu [2]	82
8.5	Tuhost v závislosti na délce magnetu [2]	83
8.6	Relativní tuhost v závislosti na délce magnetu [2]	83
8.7	Tuhost v závislosti na poměru délky rotoru ku statoru [2]	84
8.8	Tuhost v závislosti na tom, zda byly použity pólové nástavce [2] . . .	84
8.9	Výsledná síla při konstantním vychýlení v závislosti na tom, zda byly použity pólové nástavce [2]	85
8.10	Tažná síla při konstantním vychýlení v závislosti na šířce vodiče [36] .	85
8.11	Levitační síla při konstantním vychýlení v závislosti na šířce vodiče [36]	86
8.12	Tažná síla při konstantním vychýlení v závislosti na šířce vzduchové mezery [36]	86
8.13	Levitační síla při konstantním vychýlení v závislosti na šířce vzduchové mezery [36]	87

Seznam tabulek

4.1	Vybrané prvky s paramagnetickými nebo diamagnetickými vlastnostmi [32]	48
5.1	Úvodní zvolené parametry	50
5.2	Materiálové vlastnosti litiny	50
5.3	Porovnání materiálů prstencového vodiče a jejich parametrů	51
5.4	Parametry permanentního magnetu N52 [35]	52
5.5	Materiálové vlastnosti feritového jádra	52
5.6	Navržené rozměry elektrodynamického ložiska	53

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Jednotka	Název
B	[T]	Magnetická indukce ve vzduchové mezeře v místě vodiče
B_0	[T]	Magnetická indukce na čele pólového nástavce
B_m	[T]	Magnetická indukce permanentního magnetu
B_r	[T]	Remanentní magnetická indukce
c	[N s m ⁻¹]	Tlumení ložiska
C	[-]	Geometrický střed rotoru
d_m	[m]	Vnitřní průměr statoru, prstencových magnetů
D_m	[m]	Vnější průměr prstencových magnetů
D_n	[m]	Vnější průměr pólových nástavců
d_r	[m]	Vnitřní průměr rotujícího válce
D_r	[m]	Vnější průměr rotujícího válce
F	[N]	Síla
F_m	[A]	Magnetomotorické napětí
F_{od}	[N]	Odstředivá síla
F_q	[N]	Výsledná síla působící na rotor při vychýlení
F_x	[N]	Síla v ose x
F_y	[N]	Síla v ose y
F_z	[N]	Síla v ose z
F_{\parallel}	[N]	Složka výsledné síly rovnoběžná se směrem vychýlení
F_{\perp}	[N]	Složka výsledné síly kolmá na směr vychýlení
g	[m]	Délka vzduchové mezery
H_m	[A m ⁻¹]	Intenzita magnetického pole
H_c	[A m ⁻¹]	Koercitivní síla
I	[A]	Vířivý proud
J	[A m ⁻²]	Proudová hustota
k	[N m ⁻¹]	Tuhost ložiska
k_{safe}	[-]	Bezpečnostní koeficient
L	[H]	Indukčnost proudovodné dráhy
l_1, l_2, l_3	[m]	Délky jednotlivých částí proudovodné dráhy
l_g	[m]	Délka mezery
l_m	[m]	Délka prstencového magnetu v axiálním směru
l_{mez}	[m]	Délka vzduchové mezery
l_n	[m]	Délka pólového nástavce v axiálním směru

Symbol	Jednotka	Název
l_r	[m]	Délka rotoru
l_s	[m]	Délka statoru v axiálním směru
m	[kg]	Hmotnost
M	[N m]	Moment od kolmé složky síly
n	[ot/min]	Otáčky
N	[-]	Počet závitů
$n_{max-safe}$	[ot/min]	Maximální bezpečné otáčky
$n_{max-ult}$	[ot/min]	Maximální dosažitelné otáčky
n_{min}	[ot/min]	Minimální pracovní otáčky
O	[-]	Geometrický střed magnetického pole statoru
(O, x, y)	[-]	Osa reprezentující setrvačný referenční rámec spojený s magnetickým polem
(O, ξ, η)	[-]	Osa představující rotační referenční rámec spojený s vodičem rotujícím úhlovou rychlostí Ω
p	[-]	Počet pólových dvojic magnetů
P_q	[W]	Ztráty vířivými proudy ve vodiči rotoru
P_{ztr}	[W]	Ztráty ložiska
q	[-]	Počet pólových dvojic cívek
q_c	[m]	Vychýlení geometrického středu rotoru vůči středu magnetického pole
r_{i2}	[m]	Vnitřní poloměr vodivého prstence
r_{o2}	[m]	Vnější poloměr vodivého prstence
R	[Ω]	Odpor proudovodné dráhy
r	[m]	Střed vodivé vrstvy rotujícího válce
R_1, R_2, R_3	[Ω]	Odpor jednotlivých segmentů proudovodné dráhy
R_{Cu}	[H^{-1}]	Magnetický odpor měděného vodiče
$R_{Fe,h}$	[H^{-1}]	Magnetický odpor hřídele
$R_{Fe,n}$	[H^{-1}]	Magnetický odpor pólového nástavce
R_g	[H^{-1}]	Magnetický odpor vzduchové mezery
$R_{g-total}$	[H^{-1}]	Celkový magnetický odpor mezery
R_m	[H^{-1}]	Magnetický odpor permanentního magnetu
R_{mc}	[H^{-1}]	Celkový magnetický odpor (indukčnost proudové smyčky)
R_{mez}	[H^{-1}]	Magnetický odpor vzduchové mezery
R_r	[m]	Poloměr rotoru
r_s	[m]	Vnitřní poloměr statoru
S	[m ²]	Průřez segmentu proudovodné dráhy

Symbol	Jednotka	Název
S_m	[m ²]	Průřez prstencového magnetu v axiálním směru
t	[s]	Čas
t_{ef}	[m]	Efektivní tloušťka materiálu při skin efektu
t_r	[m]	Tloušťka materiálu rotujícího vodiče
U_i	[V]	Indukované napětí
v	[m s ⁻¹]	Rychlost pohybu
v_{max}	[m s ⁻¹]	Maximální obvodová rychlost
Volume-Force	[N m ⁻³]	Objemová síla
w_1, w_2, w_3	[m]	Šířky jednotlivých částí proudovodné dráhy
w_m	[m]	Šířka prstencového magnetu
w_n	[m]	Šířka pólového nástavce
Z	[Ω]	Impedance proudovodné dráhy
γ	[S m ⁻¹]	Konduktivita vodiče
δ_{skin}^{max}	[m]	Maximální hloubka při skin efektu
κ_2	[-]	Poissonova konstanta vodiče
λ	[W m ⁻¹ K ⁻¹]	Tepelná vodivost
Λ_0	[Wb m ⁻¹]	Koeficient popisující změnu magnetického toku vlivem otáčení rotoru
μ_0	[H m ⁻¹]	Permeabilita vakua
μ_r	[-]	Relativní permeabilita
$\mu_{r-hridel}$	[-]	Relativní permeabilita materiálu hřídele
μ_{r-mag}	[-]	Relativní permeabilita prstencového magnetu
ρ	[kg m ⁻³]	Hustota
ρ	[Ω m]	Rezistivita
σ_{0_2}	[Pa]	Napětí na mezi kluzu vodiče
τ	[deg]	Úhel natočení rotující soustavy vůči statické
ϕ	[Wb]	Magnetický tok
ψ	[Wb]	Magnetický tok
ω	[rad s ⁻¹]	Úhlová rychlost
Ω	[rad s ⁻¹]	Úhlová rychlost
$\omega_{max-ult}$	[rad s ⁻¹]	Maximální dosažitelná úhlová rychlost
ω_{min}	[rad s ⁻¹]	Minimální úhlová rychlost
ω_{RL}	[rad s ⁻¹]	Pólová frekvence vířivých proudů

Zkratka	Význam
AMB	Aktivní magnetické ložisko
BB	Kuličkové ložisko
EDB	Elektrodynamické ložisko
IACS	International Annealed Copper Standard, mezinárodní standard žíhané mědi
KERS	Kinetic Energy Recovery Systems, systém rekuperace kinetické energie
Mesh	Jedná se o souhrn vrcholů, hran a ploch, které definují tvar mnohostěnného objektu ve 3D
PMB	Pasivní magnetické ložisko
RAM	Random Access Memory, paměť s libovolným přístupem
SEMTEX	Víceúčelová plastická trhavina
UPS	Uninterruptible Power Supply, zdroj nepřerušovaného napájení

1 Úvod

Elektrické stroje pro vysokorychlostní aplikace společně se snahou snížit spotřebu elektrické energie dávají podnět pro vývoj nových typů ložisek. Magnetická ložiska mohou být využita všude tam, kde dokážou překonat problémy spojené s provozem klasických mechanických ložisek.

Jejich potenciál dodnes nebyl plně prozkoumán a využit. Taktéž povědomí veřejnosti o této technologii není velké. Úkolem této práce je v šesti kapitolách představit magnetická ložiska od úvodní všeobecné teorie, přes návrh konkrétního typu magnetického ložiska, až po konečně prvkovou simulaci jeho vlastností.

Nejprve je nutno představit současné typy magnetických ložisek, princip fungování a jednotlivé výhody a nevýhody. Na to naváže analýza elektrodynamického ložiska, která má za cíl popsat elektromagnetické a mechanické děje odehrávající se v ložisku během jeho činnosti. Nutno dodat, že se bude jednat o zjednodušený postup.

Návrh konkrétního typu elektrodynamického ložiska bude proveden jednak podle analýzy a dále na základě doporučení vyplývajících z již provedených simulací.

Konečně prvková simulace elektrodynamických ložisek je v současné době nejčastěji prováděna v programu COMSOL Mutltiphsics. V této práci bude použit program Ansys Maxwell, pomocí něhož získané výsledky budou prezentovány v rámci ověření vlastností ložiska.

Jelikož teoretický popis ložiska není do této doby stále dostatečný pro přesný výpočet rozměrů, bude na závěr provedena citlivostní analýza. Jejím účelem bude zkoumání vlivu změny jednotlivých rozměrů na sílu působící při vychýlení rotoru.

2 Magnetická ložiska

2.1 Motivace

Snížení energetické náročnosti, snaha o bezúdržbový provoz a dosažení vyšších otáček při snížení rozměrů elektrických strojů jsou důvody, proč se dnes snažíme nahradit kuličková ložiska a ložiska s fluidním filmem. Vzhledem k principu činnosti těchto ložisek vyplývají jistá omezení, která otevírají možnosti nové technologii magnetických ložisek. V magnetickém ložisku jsou ložiskové síly tvořeny magnetickými silami udržují pohybuující objekt ve stabilní poloze a poskytují bezdotykový pohyb bez tření. To vede k rostoucímu zájmu o jejich použití při konstrukci vysokootáčkových strojů. [1]

Pokud o použití magnetických ložisek je uvažováno už na začátku vývoje, je možno vytvořit zcela nové konstrukce. Například je možné za jistých okolností integrovat motor přímo do zátěže. V případě kuličkových ložisek není takováto konstrukce možná, jelikož kuličkové ložisko musí být kvůli vysokým rychlostem malé a tím je oslabena hřídel. Je možno si všimnout nových návrhů vysavače, kde v případě, že by motor využíval magnetické ložisko by bylo možno dosáhnout dvojnásobných otáček a čtvrtinových rozměrů. [1]

Příčina tohoto mechanického omezení u kuličkových ložisek je odstředivá síla F_{od} , která roste společně s otáčkami. Jednou z možností bylo použití keramických ložisek, které se vyznačují nižší hmotností, avšak i toto řešení má své omezení jenž plyne z rovnice (2.1). [2]

$$F_{od} = m\omega^2 r \quad (2.1)$$

Odstředivá síla roste lineárně s hmotností a kvadraticky s úhlovou rychlostí. Tím pádem poslední možností byla snaha o snížení průměru ložiska. Zde nastává problém s udržením momentu, protože stejný moment musí být přenášen přes užší hřídel a může docházet k torzním vibracím a únavě materiálu. Další nevýhodou tenčí hřídele je snížení ohybové frekvence, kdy dochází k ohybu rotoru vlivem odstředivých sil. [2]

Další jednoznačnou výhodou, kterou postrádá kuličkové ložisko je zamezení přenosu vibrací z rotoru na stator. U magnetického ložiska se žádné vibrace na stator nepřenášejí a díky tomu je možno dosáhnout velmi tichého chodu. [2]

2.2 Využití elektrodynamických ložisek

I když elektrodynamická ložiska nejsou na trhu dlouhou dobu, byla nalezena řada aplikací, kde je možné je s výhodami využít. Setrvačnick, u kterého je pomocí rotačního pohybu ukládána a poté opětovně využívána kinetická energie nachází v dnešní době čím dál větší uplatnění. Otáčky setrvačnicku běžně dosahují desítek tisíc otáček za minutu.

V energetice nachází setrvačnick uplatnění jako místo pro uložení energie, jeho schopnost rychlé odezvy je výhodná pro regulaci síťové frekvence. [3]

V automobilovém závodním průmyslu nachází setrvačnick uplatnění v aplikacích jako KERS (Kinetic Energy Recovery Systems). Snahou je energii při brzdění uložit a převést na mechanickou práci při opětovném zrychlení. To se děje při extrémních otáčkách, které umožní zachování menších rozměrů. [4]

Jiné využitím elektrodynamického ložiska je v oblasti spalovacích motorů v rámci turbodmychadla. To slouží k využití energie výfukových plynů ke zvýšení účinnosti pohonné jednotky. Vzhledem k tomu, že provozní otáčky turbodmychadel se pohybují v řádech desítek až stovek tisíc otáček za minutu, není možné využívat klasická valivá ložiska. Využívají se buď speciální valivá ložiska, nebo kluzná kapalinová hydrodynamická ložiska využívající kluzný tenký film z mazlavé kapaliny [5]. U obou typů je potřeba řešit problémy s nadměrným ohříváním, mazáním, nižší životností a potřebou údržby. Tato negativa je možno eliminovat využitím elektrodynamických ložisek.

V posledních desetiletích dochází k rozvoji mikroturbín, které slouží především jako kogenerační jednotky (kombinovaná výroba tepla a elektřiny). Jedná se o formu plynových turbín. Pracují při velmi vysokých otáčkách (až 100 000 ot/min), které jim umožňují snížit velikost a hmotnost soustrojí. V porovnání s klasickými plynovými turbínami mají vyšší účinnost. Typem ložisek v konstrukci mikroturbín bývají vzduchová ložiska s vzduchovým chlazením [6], [7]. Právě tady by bylo možno využít elektrodynamického ložiska, které taktéž nepotřebuje mazací kapaliny a je bezúdržbové.

Rozvíjí se také konstrukce hybridních ložisek, kdy minimálně dvě ložiska pracují navzájem v součinnosti. Jsou kombinovány výhody obou ložisek k celkovému zlepšení parametrů ložiska. Jeden takový design je možno spatřit v práci [8], kde autoři kombinují elektrodynamické ložisko s pasivním magnetickým ložiskem. V práci [9] bylo elektrodynamické ložisko doplněno aktivním magnetickým ložiskem, které jako ložisko funguje při nízkých otáčkách a dále po dosažení levitace přechází do funkce tlumiče.

Výše popsané možnosti nejsou samozřejmě konečné. Ať už se jedná o kosmický program, kde i energie ztracená v ložisku se počítá, ultracentrifugy nebo lékařské

přístroje, je zde možné tato ložiska využít. Jejich omezení jsou minimální provozní otáčky, od kterých začínají fungovat, proto je potřeba už od začátku počítat se záložním ložiskem.

2.3 Dělení magnetických ložisek

Jak již bylo řečeno magnetická ložiska nabízejí nové možnosti designu, redukují údržbu a eliminují mazání. Pro výběr do konkrétní aplikace je třeba znát jejich dělení, výhody a nevýhody plynoucí z jejich konstrukce.

Následující dělení se bude popisovat čtyři v současnosti nejpoužívanější typy:

1. Pasivní magnetická ložiska
2. Aktivní magnetická ložiska
3. Supravodivá magnetická ložiska
4. Elektrodynamická ložiska

2.3.1 Pasivní magnetická ložiska

Pasivní neboli ložiska s permanentními magnety. Pro jejich chod není potřeba žádné řízení. Mohou být konstruována jako radiální nebo axiální. Slabinou je stabilita pouze ve čtyřech stupních volnosti z pěti ve stejný čas. [1]

To se dá vysvětlit Earnshawovým teorémem, který říká, že není možné aby soustava elektricky nabitých těles setrvala v rovnovážné statické poloze jen díky působení elektrostatických sil. [1]

Nestabilita je v případě axiálních ložisek v radiálním směru a u radiálních ložisek v axiálním směru. Problém se dá vyřešit použitím jiného typu ložiska pro stabilizaci [1]. V nedávné době se objevila řešení, která dokázala i tyto problémy eliminovat a ložisko se podařilo stabilizovat jak v axiálním, tak v radiálním směru [10].

Nejčastěji používanými materiály jsou v současnosti permanentní magnety na bázi vzácných zemin. Jedná se o neodymové magnety NdFeB a samarium – kobaltové SmCo vyznačujícími se silným magnetickým polem a zároveň malým objemem. Díky tomu je možno dosáhnout relativně kompaktních rozměrů. Tím, že není potřeba řízení, však také odpadá možnost regulace a lepší kompenzaci při větším zatížení. [11]

Pro porovnání aktivní magnetické ložisko AMB, pasivní magnetické ložisko PMB, elektrodynamické ložisko EDB, kuličkové ložisko BB.

Výhody a nevýhody [1]:

- v ideálním případě nehrozí poškození únavou materiálu vs BB
- možnost dosáhnout velmi vysokých otáček vs BB
- tichý chod vs BB

- téměř neomezená životnost vs BB
- nízký růst teploty v závislosti na otáčkách vs BB
- není potřeba mazání ani těsnění vs BB
- jednoduchá konstrukce vs AMB
- nízká tuhost vs AMB, BB
- menší zatížitelnost vs AMB, BB
- u slitin SmCo při teplotě nad 350 °C pokles magnetických vlastností, teplotní hranice pro NdFeB mnohem nižší
- potřeba kombinace s jiným typem ložiska kvůli stabilitě vs BB

2.3.2 Aktivní magnetická ložiska

Tento typ ložisek je založen na elektromagnetech. Při průchodu proudu vinutím elektromagnetu vzniká síla, která působí přitažlivou silou na rotor opatřený feromagnetickým materiálem. [2]

Pro udržení rotoru ve správné poloze musí být elektromagnet na obou stranách rotoru ve všech stupních volnosti. Bezkontaktní senzory měří polohu rotoru. Analogový nebo digitální kontrolér připojený na elektromagnet kompenzuje výchylky změnou velikosti proudu, tak aby se rotor polohou vyrovnal se změnami zátěže a nedošlo k vyosení. Z toho plyne značná výhoda aktivních magnetických ložisek, a to možnost přizpůsobení se různým zátěžím, ale také nevýhoda komplikovaného systému prodražujícího cenu a větších rozměrů. Průchod elektrického proudu vinutím může taktéž ložisko zahřívat. [1], [2]

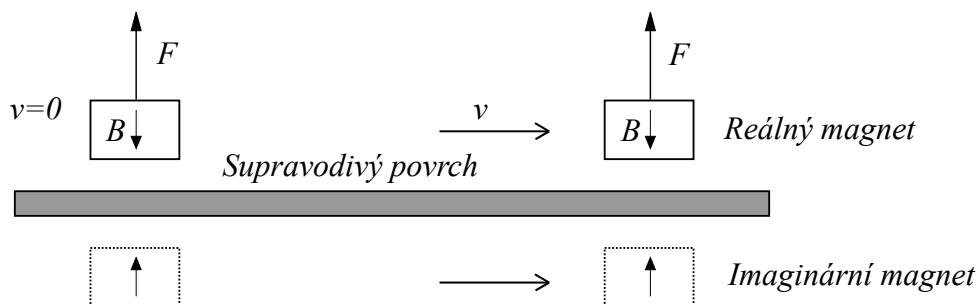
Využívá se například pro setrvačníky v UPS zdrojích [12].

Výhody a nevýhody [1]:

- zvládnou větší zátěž než PMB a EDB
- v ideálním případě nehrozí poškození únavou materiálu vs BB
- možnost dosáhnout velmi vysokých otáček vs BB
- tichý chod vs BB
- téměř neomezená životnost vs BB
- nízký růst teploty v závislosti na otáčkách vs BB
- není potřeba mazání ani těsnění vs BB
- může být použito v korozním prostředí
- možnost úpravy řídicího algoritmu oproti ostatním typům
- pracuje v širokém rozsahu teplot od -150 °C do +450 °C
- potřeba napájení a v případě výpadku také záložní napájení
- vysoká cena v porovnání s ostatními

2.3.3 Supravodivá ložiska

Supravodivé ložisko pracuje na principu „magnetického zrcadla“, obrázek 2.1. Když je vodič ochlazen až do supravodivého stavu, „vidí“ magnet svůj obraz pod supravodivým povrchem. Zrcadlový obraz se chová jako skutečný magnet a na magnet působí odpudivou silou. [1]



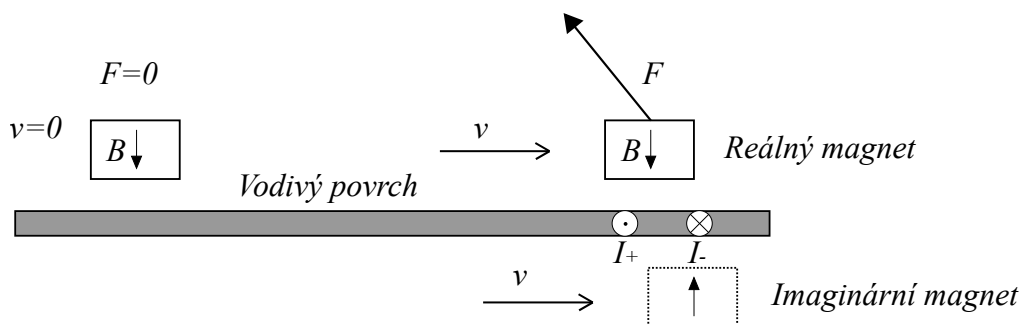
Obr. 2.1: Princip supravodivého ložiska, překresleno z [1]

To je způsobeno tzv. Meissnerovým jevem, kde se supravodivé ložisko chová jako ideální diamagnet. Supravodivý materiál až na tenkou povrchovou vrstvu zamezuje vnikání magnetického pole do svého objemu, tzn. $\mu_r = 0$. [2]

2.3.4 Elektrodynamická ložiska

Pracují na principu elektrodynamického odpuzování. Způsob je podobný jako u supravodivého ložiska, v tomto případě není odpor nulový.

Princip je založen na Lenzově zákoně. Ten říká, že pokud se vodič pohybuje v magnetickém poli, je indukován proud protékající tímto vodičem. Vodič si vytváří vlastní magnetické pole, kterým vzdoruje magnetickému poli jež na něj působí. [1]



Obr. 2.2: Princip supravodivého ložiska, překresleno z [1]

Pokud uvažujeme magnet pohybující se nad vodivým povrchem, obrázek 2.2, pak na základě Lenzova zákona je magnet odpuzován silou, jejíž vektor se snaží zpomalit

pohyb a způsobuje zvedání magnetu od povrchu. Magnetické zrcadlo se pohybuje před magnetem a způsobuje odpuzování.

Je možno si všimnout, že magnetický „zrcadlový obraz“ je pokřivený a fázově posunutý. To se dá vysvětlit konečnou rychlostí a elektrickým odporem vodivého materiálu. Vysvětlení proč imaginární magnet předbíhá reálný vzor je možné i tak, že si představíme vířivé proudy jako reakci na změnu magnetického toku způsobenou pohybem magnetu, který nastává před změnou magnetického toku. [2]

Pro konstrukci ložiska se využívají pro co nejvyšší účinnost prstencové magnety, polarizované v axiálním směru. Rotující částí je měděný válec umístěný buď vně, uvnitř nebo současně vně i uvnitř. [1]

Pokud se měděný válec otáčí kolem magnetického středu statoru, neindukují se v něm proudy do doby, než je z tohoto místa vytlačen. V ten moment cítí změnu magnetického toku, na kterou podle Lenzova zákona reaguje. Na straně, kde se válec magnetům přiblížil se snaží oddálit a na opačné straně zase přiblížit. Na to, aby tento jev mohl probíhat je nutno dosáhnout určitých otáček. [2]

Elektrodynamická ložiska se ukázala v porovnání s ostatními lepší co se týče spolehlivosti a údržby. Jak aktivní magnetická ložiska, tak i elektrodynamická našla uplatnění v průmyslu. Slabinou elektrodynamických je stabilita až od určitých otáček, nižší zatížitelnost a nemožnost je řídit jako u aktivních, to je ale také výhoda, která podstatně snižuje jejich cenu. [13]

Jistou nevýhodou může být, že ložisko z důvodu dolních mezních otáček potřebuje nějaké pomocné ložisko při dosedání. Funkcí tohoto ložiska je udržet rotor v definované pozici, aby vlivem gravitace nedošlo k poškození. [13]

Výhody a nevýhody [1]:

- v ideálním případě nehrozí poškození únavou materiálu vs BB
- možnost dosáhnout velmi vysokých otáček vs BB
- tichý chod vs BB
- téměř neomezená životnost vs BB
- nízký růst teploty v závislosti na otáčkách vs BB
- není potřeba mazání ani těsnění vs BB
- může být použito v korozním prostředí
- kompaktní a jednodušší provedení vs AMB
- spolehlivost, cena
- nejsou říditelné vs AMB
- nižší zatížitelnost vs AMB, BB
- nutnost dosáhnout určitých otáček oproti ostatním typům

2.4 Vývoj konstrukce elektrodynamických ložisek

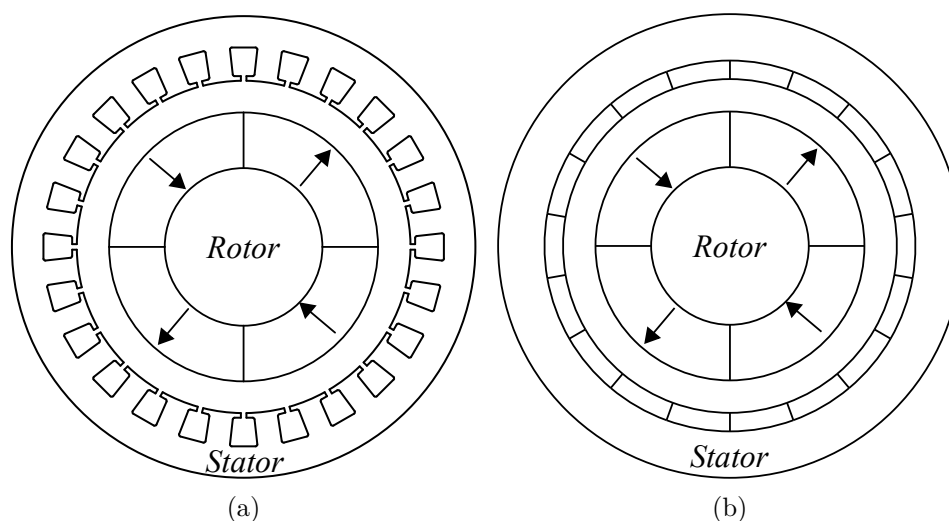
2.4.1 Vícepólová ložiska

Jedním z prvních návrhů je podle [14] založen na rotoru, který se levitací otáčí uvnitř lineárního indukčního motoru v kruhovém uspořádání. Pokusy s tímto ložiskem ukázaly nevýhodu v nestabilním chování a Joulových ztrátách v mědi rotujícího válce. [15]

Další model podle [16] byl podobný jako u [14]. Tentokrát bylo použito čtyřpólové konstrukce. Ze studie vyplývá, že problémy se ztrátami nebyly uspokojivě vyřešeny a jako hlavní problém bylo také označeno slabé tlumení elektromagnetické levitace.

Vlivem těchto problémů zájem o AC ložiska (pracují na principu střídavého proudu, mají vinutí jak ve statoru tak v rotoru) upadl a pozornost se upnula k jiným konstrukčním řešením.

Novější konstrukce upřednostnily využití permanentních magnetů v rotoru místo vinutí. Ukázalo se, že permanentní magnety jsou vhodnější pro použití ve vysokorychlostních aplikacích [17]. Na obrázku 2.3 jde vidět možné topologie s vinutím jak v drážkách, tak v bezdrážkovém provedení, kdy permanentní magnety jsou umístěny v rotoru a vinutí je ve statoru.



Obr. 2.3: (a) Provedení s drážkami, (b) Bezdrážkové provedení, překresleno z [18]

Použití drážek se odvíjí i od použitého materiálu jha. Tato volba není jednoduchá, vzhledem k tomu, že použití feromagnetického jha sebou přináší dva jevy [19]. Na jedné straně feromagnetické jho zvyšuje hustotu magnetického toku ve vzduchové mezeře a velikost Lorentzovy síly tlačící hřídel do středu. To je pozitivní efekt protože s rostoucí silou roste i tuhost ložiska. Na druhé straně dochází ke vzniku záporné

tuhosti díky reluktanční síle mezi jhem a magnety. V práci [19] je zmíněno, že materiál jha nemá velký vliv na chování ložiska pro malý průměr hřídele. Tyto rozdíly se dále zvyšují s rostoucím průměrem ložiska. Dochází ke zhoršení tlumení u obou variant, a to tím více v případě neferomagnetického jha. V případě zvýšení počtu pólů dochází u obou variant ke zvýšení tuhosti. V případě zvýšení počtu pólů a zvýšení průměru hřídele už přestává být výhodné použití feromagnetického jha a neferomagnetické provedení jha je výhodnější.

Z předchozího odstavce je možno odvodit, že použití drážkového provedení s feromagnetickým jhem zvyšuje destabilizační přitažlivou sílu mezi pólovými nástavci jha a magnety. Tato destabilizační síla je menší u bezdrážkového provedení.

2.4.2 Snížení ztrát vířivými proudy

Snaha o co nejmenší ztráty v ložisku vedla k vývoji takových konstrukcí, kde vířivé proudy jsou indukovány jen tehdy, když je to skutečně potřeba (null flux). Vířivé proudy mohou být dvojího typu. První je transformační generovaný proměnným magnetickým polem, druhý je pohybový, kde vířivé proudy vznikají při pohybu rotoru vzhledem ke statoru. Vzhledem k velké neefektivitě levitace při použití prvního typu je na něj nahlíženo jako na nechtěný. [20]

První myšlenkou podle [21] bylo snížení tloušťky materiálu pod hloubku vniku skin efektu. Tím pádem dojde ke vzájemné eliminaci povrchových proudů jak vnější, tak vnitřní strany vodiče. Aby tyto proudy mohly být úspěšně eliminovány je zapotřebí, aby otáčení probíhalo v „oblasti nulových proudů“, tj. v místě, kde žádný proud není kolmý na povrch válce. Dalším řešením podle [22] se stalo použití vinutého rotoru s propojenými cívkami tak, aby se indukovaná napětí navzájem eliminovala.

Pro konstrukci na obrázku 2.3b je pro zachování nulového vířivého proudu ve středové pozici a jeho indukci v případě posunutí mimo střed nejlepší zvolit počet pólů magnetů a vinutí tak, že respektuje rovnici (2.2). [23]

$$q = p \pm 1 \quad (2.2)$$

Kde p je počet pólových dvojic magnetů a q je počet pólových dvojic cívek. Výraz $q = p + 1$ platí pro ložisko s vnitřním rotorem a výraz $q = p - 1$ platí pro ložisko s vnějším rotorem. Tímto způsobem je možné dosáhnout i maximálního magnetického toku a indukovaného napětí v cívkách.

Pozdější výzkumy ukázaly, že použitím dvupólových ložisek místo vícepólových je možno efektivněji vyřešit problémy s nechtěnými vířivými proudy. V tomto případě totiž nedochází k indukování napětí, které by muselo být eliminováno. [2], [20]

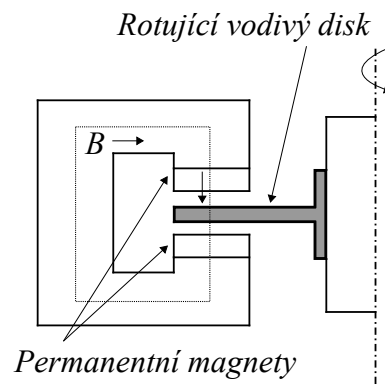
Pokud se rotor otáčí ve středu, pak kruhové provedení zabraňuje vzniku nežádoucích vířivých proudů. V symetrickém magnetickém poli totiž vodič necítí změnu magnetického toku, a tím pádem nedochází ke vzniku indukovaného napětí ani vířivých proudů.

$$U_i = \frac{d\phi}{dt} \quad (2.3)$$

Tento princip byl také nazván jako null-E [27]. I díky tomu je použití dvoupólového ložiska výhodnější z hlediska jednodušší konstrukce. Heteropolární konstrukce je navíc nutno udělat ve vinutém provedení. Homopolární ložiska jsou dále popsána v následujících kapitolách.

2.4.3 Axiální elektrodynamické ložisko

Vířivé proudy jsou v tomto ložisku indukovány v disku připojeném na válec rotující ve vzduchové mezeře, viz obrázek 2.4.



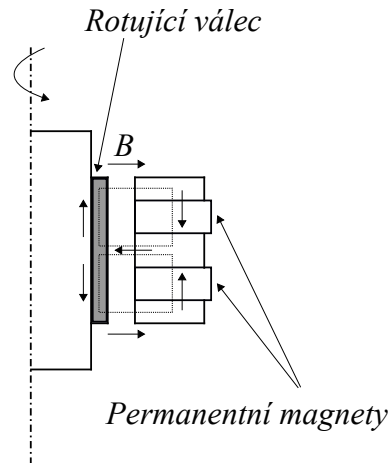
Obr. 2.4: Axiální elektrodynamické ložisko, překresleno z [20]

Magneticky vodivý materiál vede tok mezi permanentními magnety, které se v tomto uspořádání navzájem přitahují. Poté je veden skrze disk rovnoběžně s osou rotujícího válce, proto název axiální. Výhodou tohoto ložiska je, že využívá relativně malou vzduchovou mezeru. Nevýhodou je, že ne všechny tok prochází skrze rotující disk. Zbylý tok prochází oblastí určenou pro případné vychýlení rotujícího disku. [2]

2.4.4 Radiální elektrodynamické ložisko

Radiální ložisko bylo vyvinuto jako snaha vyřešit problémy s axiálním ložiskem. V posledních letech se na něj výzkumy zaměřují více než na výše uvedené. Neobsahuje žádný disk ale pouze rotující válec, obrázek 2.5. Magneticky vodivý materiál vede tok z permanentních magnetů kolmo na osu rotujícího válce. Permanentní magnety

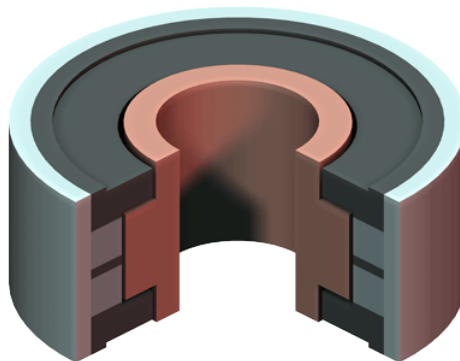
se navzájem odpuzují. Je vidět, že vířivé proudy prochází kratší vzdáleností než u axiálního ložiska i přes větší vzduchovou mezeru oproti axiálnímu, což vede k efektivnějšímu řešení. Absencí disku je možno dosáhnout nižší hmotnosti a kompaktního provedení. Použitím více řad magnetů je možno měnit charakteristiku směrem k vyššímu zatížení a tuhosti. [2]



Obr. 2.5: Radiální elektrodynamické ložisko, překresleno z [20]

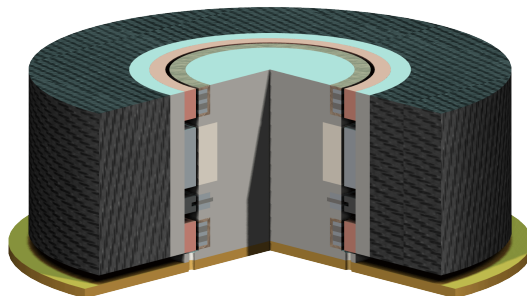
Možná konstrukční provedení podle firmy Magnet AB:

Provedení s vnitřním rotorem je možno vidět na obrázku 2.6.



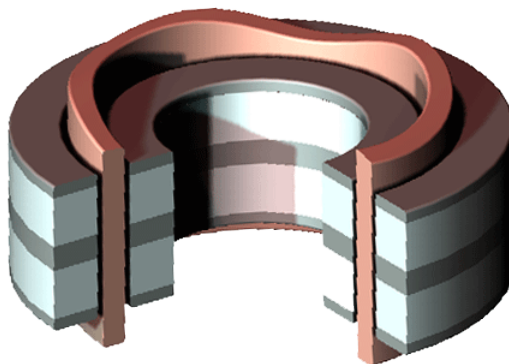
Obr. 2.6: Radiální typ, vnitřní provedení [2]

Na obrázku 2.7 je možno vidět provedení s vnějším rotorem použité v návrhu setrvačnicku. Zde se jednalo o motor–generátor.



Obr. 2.7: Radiální typ, vnější provedení [2]

Možností je i tzv. intermediate konstrukce, obrázek 2.8, vhodná zejména pro vysokou zátěž a výkon.



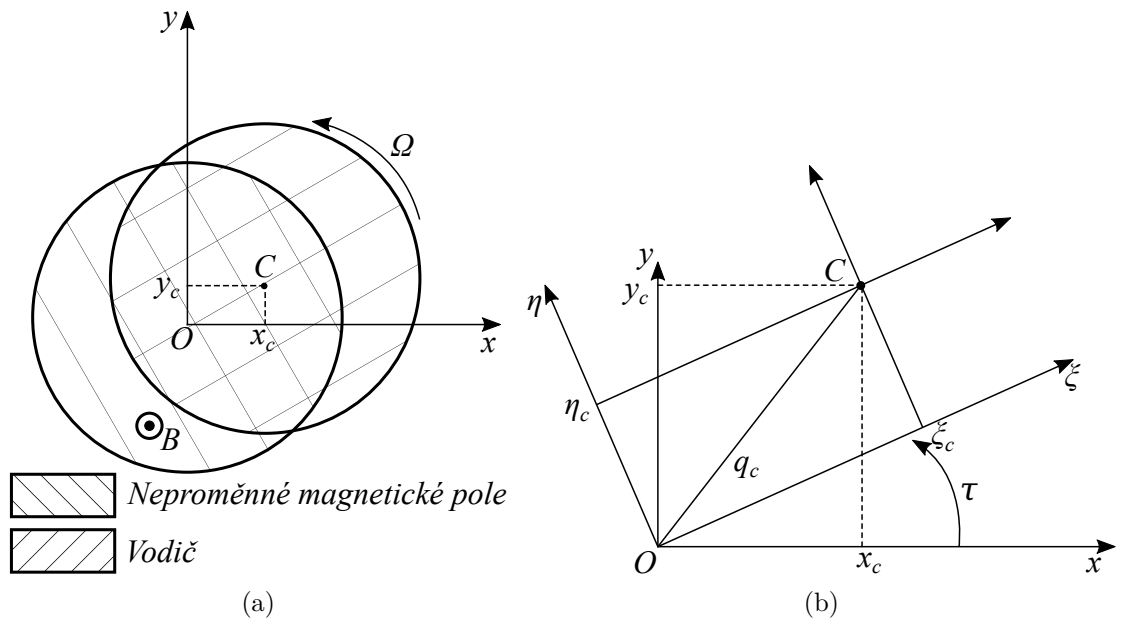
Obr. 2.8: Radiální typ, intermediate [2]

3 Analýza ložiska

V této kapitole bude řešena analýza modelu reprezentujícího rotující vodič uvnitř neproměnného magnetického pole.

3.1 Rotační matice

Na obrázku 3.1a je možno vidět zjednodušené schéma rotujícího vodiče vloženého do magnetického pole.



Obr. 3.1: (a) Schéma reprezentující vodič rotující v magnetickém poli, (b) Znázornění bodu C v transformované soustavě, překresleno z [24]

Magnetické pole na obrázku směřuje směrem ke čtenáři. O charakterizuje geometrický střed magnetického pole, C rotujícího vodiče. Osa (O, x, y) představuje setrvačný referenční rámec spojený s magnetickým polem. Osa (O, ξ, η) představuje rotační referenční rámec spojený s vodičem rotujícím úhlovou rychlostí Ω .

Vychýlení geometrického středu rotoru C vzhledem ke geometrickému středu magnetického pole O představuje veličina q_c , kde:

$$q_c = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

Transformace z nerotující do rotující soustavy:

$$\begin{bmatrix} \xi_c \\ \eta_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\tau) & \sin(\tau) \\ -\sin(\tau) & \cos(\tau) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

Zpětná transformace:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\tau) & -\sin(\tau) \\ \sin(\tau) & \cos(\tau) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_c \\ \eta_c \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

3.2 Vířivé proudy a ložiskové síly

Rotor otáčející se kolem své osy se může hýbat v osách x a y . Magnetický tok generovaný permanentními magnety procházející skrze něj je ovlivňován vychýlením rotoru. Z toho důvodu je dobré určit magnetický tok jako funkci pozice rotoru a úhlu natočení.

Transformační matice v rovnicích (3.4) a (3.7) byla převzata z práce [20]. Jedná se o univerzální matici pro výpočty jak heteropolárních, tak homopolárních ložisek, kde p znamená počet pólových dvojic.

Magnetický tok je převeden z rotujících do nerotujících souřadnic z důvodu jednoduššího výpočtu. Pro heteropolární řešení bylo uvažováno $p = 0$ pólových dvojic odpovídajících homopolárnímu ložisku:

$$\begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix}_{HE} = \Lambda_0 \begin{bmatrix} \cos((p-1)\tau) & -\sin((p-1)\tau) \\ \sin((p-1)\tau) & \cos((p-1)\tau) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_c \\ \eta_c \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix}_{HO} = \Lambda_0 \begin{bmatrix} \cos(\tau) & +\sin(\tau) \\ -\sin(\tau) & \cos(\tau) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_c \\ \eta_c \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Λ_0 je koeficient popisující změnu magnetického toku vlivem otáčení rotoru, jednotkou je $[\text{Wbm}^{-1}]$. Veličina τ představuje úhel natočení rotujících souřadnicových os oproti nerotujícím, ξ_c a η_c představují souřadnice bodu C v rotující soustavě.

Síla působící na rotor je výsledkem působení mezi statorovým magnetickým polem a rotorovými proudy. Jedná se o Lorentzovu sílu, která může být vypočítána jako:

$$F = NBl_r i = \Lambda_0 i \quad (3.6)$$

kde N je počet závitů, B je magnetická indukce, i je proud ve vodiči a l_r je délka rotoru.

Podobně jako v případě magnetického toku je výhodné mít sílu jako funkci úhlu natočení rotoru a proudu, síla je uvažována v rotujících souřadnicích:

$$\begin{bmatrix} F_\xi \\ F_\eta \end{bmatrix}_{HE} = \Lambda_0 \begin{bmatrix} \cos((p-1)\tau) & \sin((p-1)\tau) \\ -\sin((p-1)\tau) & \cos((p-1)\tau) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} F_\xi \\ F_\eta \end{bmatrix}_{HO} = \Lambda_0 \begin{bmatrix} \cos(\tau) & -\sin(\tau) \\ \sin(\tau) & \cos(\tau) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Vektory magnetického toku a síly jako komplexní proměnné:

$$\begin{aligned} \psi &= \psi_1 + j\psi_2 \\ F_q &= F_\xi + jF_\eta \end{aligned} \quad (3.9)$$

Transformační matice pro magnetický tok a sílu je možné převést na komplexní proměnné jako:

$$\begin{bmatrix} \cos(\tau) & +\sin(\tau) \\ -\sin(\tau) & \cos(\tau) \end{bmatrix}_\psi = \cos(\tau) - j\sin(\tau) = e^{-j\tau} \quad (3.10)$$

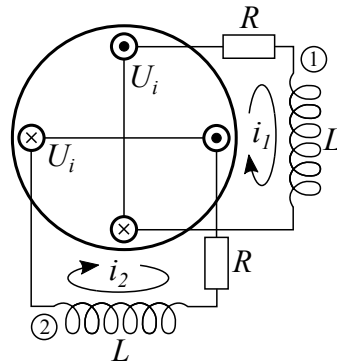
$$\begin{bmatrix} \cos(\tau) & -\sin(\tau) \\ \sin(\tau) & \cos(\tau) \end{bmatrix}_F = \cos(\tau) + j\sin(\tau) = e^{j\tau} \quad (3.11)$$

Poté už je možné napsat magnetický tok a sílu jako:

$$\psi = q_c \Lambda_0 e^{-j\tau} \quad (3.12)$$

$$F_q = i \Lambda_0 e^{j\tau} \quad (3.13)$$

Vodivý materiál si můžeme představit jako uzavřený obvod, který má svůj odpor R a indukčnost L , obrázek 3.2.



Obr. 3.2: Znázornění elektrického obvodu ve vodivém materiálu rotoru, překresleno z [20]

Při popisu dynamiky vířivých proudů ve vodiči je zaveden předpoklad, že se rotor otáčí konstantní úhlovou rychlostí Ω ($\tau = \Omega t$). Vířivé proudy ve vodivém materiálu se poté odvodí pomocí Kirchhoffova zákona z obr.3.2:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_i}{L} - \frac{R}{L}i = \frac{d\psi}{dt}L - \frac{R}{L}i \quad (3.14)$$

kde U_i je indukované napětí způsobené pohybem vodiče v magnetickém poli. Dosazením rovnice (3.12) do rovnice (3.14) můžeme napsat vztah (3.15):

$$\frac{di}{dt} = \frac{\Lambda_0}{L} \left(\frac{dq_c}{dt} - jq_c\Omega \right) e^{-j\Omega t} - \frac{R}{L}i \quad (3.15)$$

$$F_q = i\Lambda_0 e^{j\Omega t}$$

V těchto rovnicích je i jako stavová proměnná a F_q jako výstupní rovnice. Vhodnou úpravou, kdy prohodíme stavové a výstupní proměnné docílíme u rovnice (3.13) časově nezávislé koeficienty. Síla F_q se stane stavovou proměnnou a proud i výstupní proměnnou.

$$\frac{dF_q}{dt} = \frac{\Lambda_0^2}{L} \left(\frac{dq_c}{dt} - jq_c\Omega \right) - F_q \left(\frac{R}{L} - j\Omega \right) \quad (3.16)$$

$$i = \frac{F_q}{\Lambda_0} e^{-j\Omega t} \quad (3.17)$$

3.3 Odpor a indukčnost proudové dráhy

3.3.1 Vliv skin efektu

Vlivem vysoké frekvence otáčení rotoru dochází k vytlačování indukovaného elektrického proudu směrem k povrchu vodiče. Maximální hloubka δ_{skin}^{max} vniku je stanovena jako:

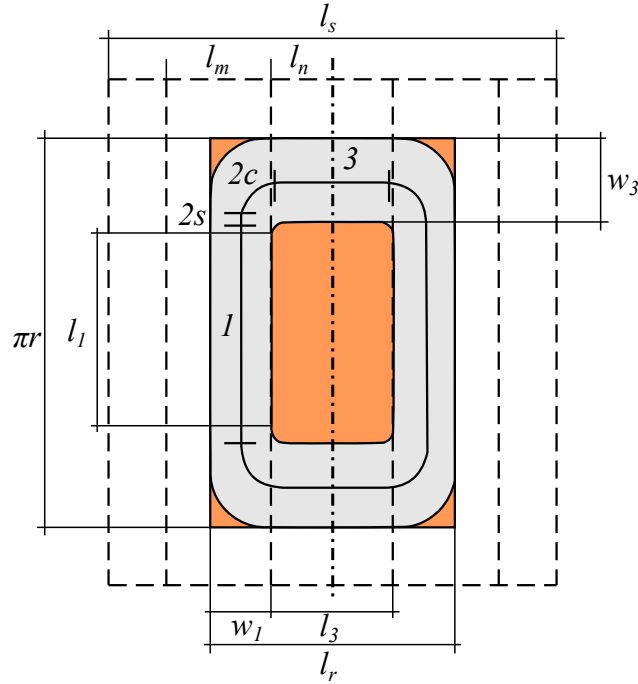
$$\delta_{skin}^{max} = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega_{min}\mu_0}} = \sqrt{\frac{2\rho}{2\pi \frac{n_{min}}{60} \mu_0}} \quad (3.18)$$

kde ρ je rezistivita vodiče, n_{min} jsou minimální provozní otáčky a μ_0 je permeabilita vakua. Tato hodnota je důležitá pro stanovení tloušťky vodivého materiálu, jehož rozměr by měl být větší než hloubka vniku.

3.3.2 Stanovení odporu

Odpor R a indukčnost L závisí na parametrech ložiska. Pro jejich výpočet je třeba popsat tvar proudové dráhy.

Obrázek 3.3 ukazuje rozvinutý pohled na proudovou dráhu ve vodivém válci. Šedou barvou je vyznačena dráha, oranžovou vodivý materiál. Rotor je v tomto případě o něco kratší než stator. Pro další výpočty je dráha rozdělena do tří částí. Části 2 budou pro jednoduchost linearizované. Parametr l_m je délka magnetu v axiálním směru, l_n je délka pólového nástavce v axiálním směru, l_1 , l_2 a l_3 představují délky části 1, 2, a 3. Parametry w_1 , w_2 a w_3 představují šířky částí 1, 2 a 3, l_r a l_s je délka rotoru a statoru, πr je polovina obvodu ve středu válcového vodiče.



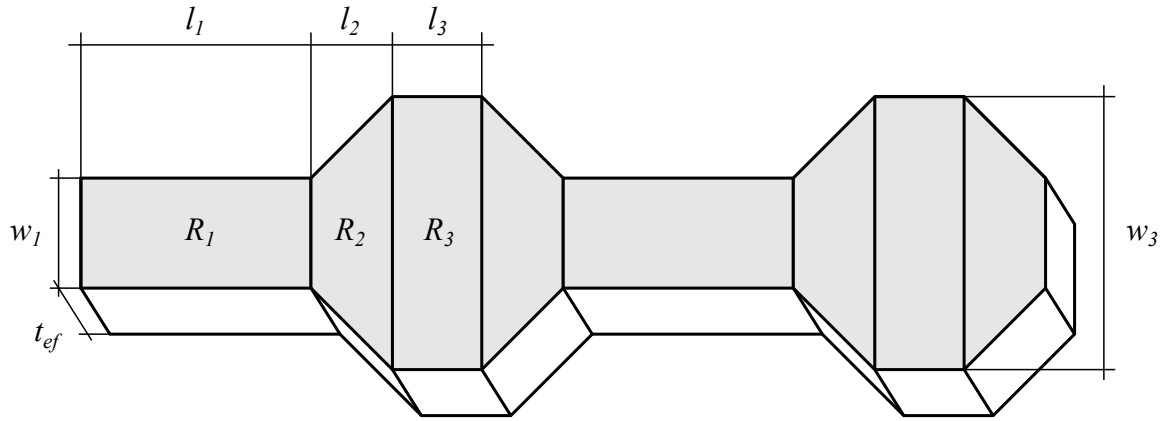
Obr. 3.3: Přibližný tvar proudové dráhy, dva radiální magnety s pólovými nástavci, upraveno podle [2]

Pokud tyto části myšlenkově rozložíme do roviny, můžeme vytvořit linearizovaný model proudové dráhy, obrázek 3.4.

Jednotlivé délky se určí následujícím způsobem:

$$\begin{aligned}
 l_1 &= \pi r - 2w_3 \\
 l_2 &= l_{2s} + l_{2c} = \left(\frac{w_3}{2} - \frac{w_1}{2} \right) + \frac{2\pi \frac{w_1}{2}}{4} \\
 l_3 &= 2l_n
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

Oblast 2 má původně nelineární průběh tvaru elipsy, tu nahradíme zjednodušením pomocí rovné části $2s$ a části $2c$, která tvoří čtvrtinu kruhu. Většina rozměrů pro délku se dá spočítat jednoduše z geometrie na obrázku 3.3.



Obr. 3.4: Linearizovaný model proudové dráhy v rotujícím válcovém vodiči, upraveno podle [2]

Šířka w_3 je však pro určení náročnější. Odvození vychází z toho, že proud oblastí R_3 neprochází rovnoměrně, ale kumuluje se spíše na horním a dolním okraji. Pokud chceme rovnoměrné rozložení, můžeme uvažovat podmínku, že oba průběhy vyvolají stejné ztráty. Z toho je možné odvodit parametr w_3 .

Šířka w_2 se dále spočítá jako průměr hodnot w_1 a w_3 .

Jednotlivé šířky se určí následujícím způsobem:

$$\begin{aligned} w_1 &= \frac{l_r}{2} - l_n \\ w_2 &= \frac{w_1 + w_3}{2} \\ w_3 &= \frac{2r}{\pi} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Rozměr r značí střed vodivé vrstvy rotujícího válce.

$$r = \frac{D_r + d_r}{4} \quad (3.21)$$

kde D_r je vnější průměr rotujícího válce a d_r je vnitřní průměr rotujícího válce (průměr hřídele na které je válec usazen).

Využitím:

$$\begin{aligned} R &= \rho \frac{l}{S} \\ S &= t_{ef} w \end{aligned} \quad (3.22)$$

kde ρ je rezistivita materiálu, l a S je délka a průřez oblasti, t_{ef} je efektivní tloušťka materiálu při skin efektu. Pokud je t_r větší než δ_{skin}^{max} pak pro výpočet odporu uvažujeme pouze hloubku vniku při skin efektu.

$$t_{ef} = \delta_{skin}^{max} \quad (3.23)$$

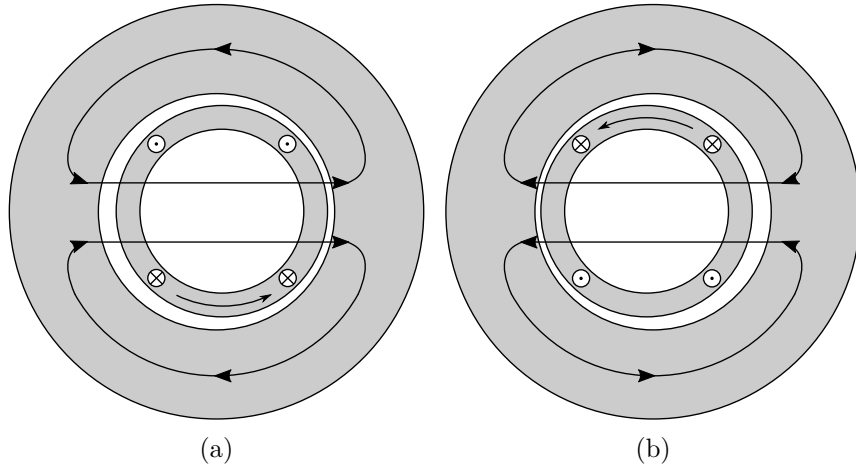
Celkový odpor linearizované dráhy je pak z obrázku 3.4:

$$R = 2(R_1 + 2R_2 + R_3) = \frac{2\rho}{t_{ef}} \left(\frac{l_1}{w_1} + \frac{4l_2}{w_1 + w_3} + \frac{l_3}{w_3} \right) \quad (3.24)$$

Dosažením rovnic (3.19) a (3.20) do (3.24) vznikne vztah pro výpočet odporu jedné smyčky. Jedná se o ložisko se dvěma magnety a pólovými nástavci.

$$R = \frac{\rho}{t_{ef}} \left(\frac{4r \left(\pi - \frac{4}{\pi} \right)}{l_r - 2l_n} + \frac{\frac{8r}{\pi} + (l_r - 2l_n)(\pi - 2)}{\frac{l_r}{2} - l_n + \frac{2r}{\pi}} + \frac{2\pi l_n}{r} \right) \quad (3.25)$$

3.4 Stanovení indukčnosti



Obr. 3.5: Směr magnetického toku vytvářeného indukovanými vířivými proudy při vychýlení v rámci jedné osy (a) a poté při natočení o 180° kolem středu magnetického pole (b)

Indukčnost smyčky závisí na magnetickém odporu R_{mc} a počtu závitů N . Předpokládejme vysokou relativní permeabilitu pólových nástavců, pak je možné jejich odpor zanedbat:

$$L = \frac{N^2}{R_{mc}} = \frac{N^2}{R_{Fe,n} + R_h + 2R_{g-total}} \approx \frac{N^2}{R_h + 2R_{g-total}} \quad (3.26)$$

kde $R_{Fe,n}$ a R_h jsou magnetické odpory pólového nástavce a hřídele. Mezera $R_{g-total}$ se dále skládá z odporu vzduchové mezery R_g a odporu mědi R_{Cu} . Relativní permeabilita mědi je velmi blízká vakuu, je proto možné tyto dva odpory sloučit.

$$R_{g-total} = \frac{l_g}{\mu_0 S} = \frac{g + t_r}{\mu_0 l_n (l_1 + w_3)} \quad (3.27)$$

Při vychýlení rotoru se sice délky mění, ale celkový odpor obou vzduchových mezer je v součtu stejný.

Magnetický odpor, který bude klást materiál hřídele, je možné určit jako:

$$R_h = \frac{d_r}{\mu_0 \mu_{r-hridel} S} = \frac{d_r}{\mu_0 \mu_{r-hridel} l_n (l_1 + w_3)} \quad (3.28)$$

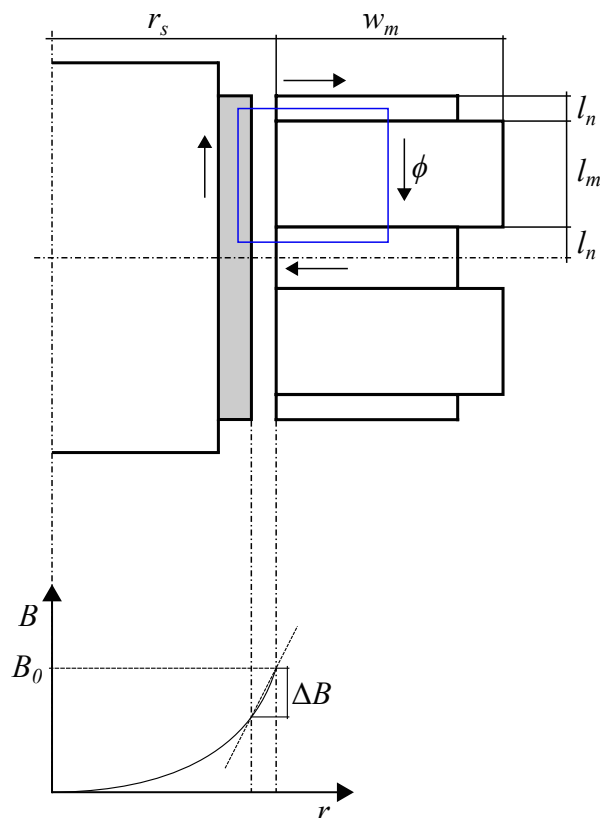
kde d_r průměr hřídele.

Poté indukčnost se vypočítá dosazením (3.27) a (3.28) do (3.26). Když uvažujeme, že N se rovná dvěma závitům proti sobě, každý na opačné straně vodivého válce, vychází pak:

$$L = \frac{4}{\frac{d_r}{\mu_0 \mu_{r-hridel} l_n (l_1 + w_3)} + 2 \frac{g + t_r}{\mu_0 l_n (l_1 + w_3)}} \quad (3.29)$$

3.4.1 Indukce ve vzduchové mezeře

Pro analytický výpočet je výhodné přibližně znát rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Obrázek 3.6 ukazuje elektrodynamické ložisko v řezu, je zde vyznačena cesta magnetického toku od horního prstencového magnetu.



Obr. 3.6: Magnetický tok v řezu elektrodynamického ložiska

Cílem je určit, jaký magnetický tok bude rotor cítit při vychýlení. Pro výpočet magnetického toku je vhodné nejprve stanovit náhradní magnetický obvod. Pro permanentní magnet je rovnice magnetizační křivky:

$$B_m = \mu_0 \mu_{r-mag} H_m + B_r \quad (3.30)$$

kde B_m je magnetická indukce permanentního magnetu, H_m je intenzita magnetického pole a B_r je remanentní magnetická indukce. Vyjádřením intenzity H_m se dostane:

$$H_m = \frac{B_m}{\mu_0 \mu_{r-mag}} - \frac{B_r}{\mu_0 \mu_{r-mag}} \quad (3.31)$$

Vynásobením obou stran rovnice l_m :

$$H_m l_m = \frac{B_m l_m}{\mu_0 \mu_{r-mag}} - \frac{B_r l_m}{\mu_0 \mu_{r-mag}} \quad (3.32)$$

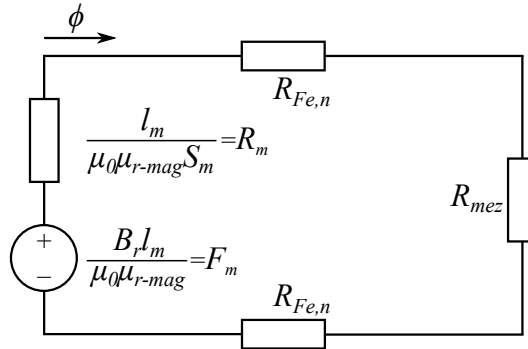
Levá strana rovnice je magnetomotorické napětí pro celý permanentní magnet, zlomek s remanentní indukcí je magnetomotorické napětí F_m jako zdroj v náhradním magnetickém obvodu.

Dále platí, že $\phi = B_m S_m$, poté můžeme vyjádřit:

$$\frac{B_m l_m}{\mu_0 \mu_{r-mag}} = \frac{l_m \phi}{\mu_0 \mu_{r-mag} S_m} = R_m \phi \quad (3.33)$$

kde R_m je magnetický odpor permanentního magnetu.

Schéma náhradního magnetického obvodu je možno vidět na obrázku.



Obr. 3.7: Náhradní magnetický obvod

Magnetický odpor vzduchové mezery R_{mez} je vzhledem ke svým rozměrům naprosto dominantní a rozhodující. Je tudíž možno zanedbat magnetické odpory pólových nástavců $R_{Fe,n}$. Silné permanentní magnety se chovají jako vzduchové mezery a jejich relativní permeabilita vychází blízko $\mu_r = 1$. V obvodu jejich magnetický odpor R_m není možné zanedbat. [25].

Magnetický tok jednoho permanentního magnetu se poté určí jako:

$$\phi = \frac{F_m}{R_m + R_{mez}} = \frac{\frac{B_r l_m}{\mu_0 \mu_{r-mag}}}{\frac{l_m}{\mu_0 \mu_{r-mag} S_m} + \frac{l_{mez}}{S_{mez} \mu_0}} \quad (3.34)$$

Plocha magnetu S_m se určí jako:

$$S_m = \pi(r_s + w_m)^2 - \pi r_s^2 \quad (3.35)$$

Parametry vzduchové mezery byly odhadnuty:

$$l_{mez} = l_m + l_n + 1,5g \quad (3.36)$$

$$S_{mez} = \pi r_s^2 - \pi(r_s - 0.003)^2 \quad (3.37)$$

V prostředních pólových nástavcích se sčítají dva magnetické toky od dvou proti sobě orientovaných permanentních magnetů. Magnetická indukce na čele pólového nástavce směrem k vzduchové mezeře se určí jako:

$$B_0 = \frac{2\phi}{2l_n 2\pi r_s} = \frac{\phi}{l_n 2\pi r_s} \quad (3.38)$$

kde r_s je vnitřní poloměr statoru (je nutné uvažovat prstencový magnet po celém obvodu).

U čela nástavce je magnetická indukce z celé vzduchové mezery nejvyšší, směrem ke středu se výrazně snižuje až kompletně zaniká. Funkčně tento pokles není lineárně závislý. Pro výpočet je podstatná jen magnetická indukce ve vzduchové mezeře. Dále ložisko nevyužije celou vzduchovou mezeru, ale jen zhruba polovinu, kvůli funkci pomocného ložiska. S těmito fakty můžeme daný krátký úsek linearizovat, obrázek 3.6.

Bude volena funkční závislost:

$$B = 500r + (B_0 - 500r_s) \quad (3.39)$$

K těmto výpočtům je třeba dodat, že přesné stanovení tvaru dráhy magnetického toku ve vzduchové mezeře vzhledem k jejímu tvaru a rozměrům je analyticky velmi náročné.

Analýza brala v úvahu, že magnetický tok procházel rovnoměrně zvolenou lome-nou drahou o nějaké délce a průřezu. Reálně by byl tvar dráhy poměrně zakřivený a rozložení nerovnoměrné.

Stanovenou magnetickou indukci je tím pádem potřeba brát s rezervou.

3.5 Kvazistacionární analýza

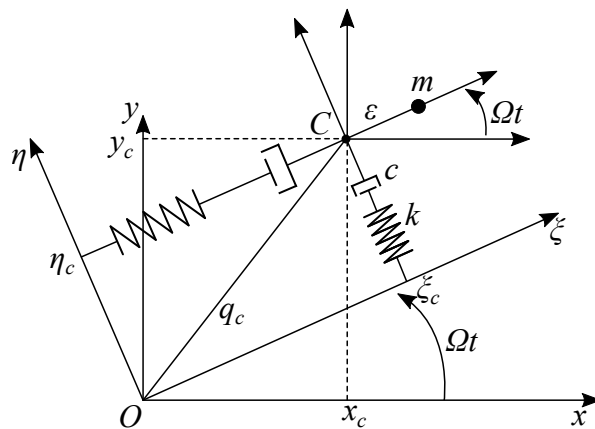
Pro výpočet síly působící na otáčející se rotor se využívá této metody, která spočívá v uvažování neměnného vychýlení rotoru mimo osu. Vzdálenost q_c mezi geometrickým středem magnetického pole O a středem rotujícího vodiče C je konstantní. Při uvažování rovnice (3.16) bude platit:

$$\begin{aligned} q_c &= q_0 \\ \frac{dq_c}{dt} &= 0 \\ \frac{dF_q}{dt} &= 0 \end{aligned} \quad (3.40)$$

Po dosazení rovnic (3.40) do (3.16), vyjádření F_q , usměrnění zlomku a další úpravě je možno definovat:

$$F_q = \frac{\Lambda_0^2 q_0}{L \left(1 + \left(\frac{R}{L\Omega}\right)^2\right)} - j \frac{\Lambda_0^2 q_0 \Omega}{R \left(1 + \left(\frac{L\Omega}{R}\right)^2\right)} = F_{\parallel} + jF_{\perp} \quad (3.41)$$

Rovnice představuje vztah mezi elektromagnetickou silou působící na rotující vodič v závislosti na úhlové rychlosti.



Obr. 3.8: Mechanický ekvivalent reprezentující elektrodynamické ložisko, upraveno podle [24]

Chování ložiska je také možno popsat pomocí mechanických ekvivalentů. Použitými ekvivalenty jsou tuhost k , tlumení c a pólová frekvence vířivého proudu uvnitř vodiče ω_{RL} .

Mechanický ekvivalent reprezentující ložisko je možno vidět na obrázku 3.8.

$$\begin{aligned}k &= \frac{\Lambda_0^2}{L} \\c &= \frac{\Lambda_0^2}{R} \\ \omega_{RL} &= \frac{R}{L} = \frac{k}{c}\end{aligned}\tag{3.42}$$

Dosazením rovnic (3.42) do (6.1), je možno po úpravě dostat:

$$F_q = \frac{kq_0}{1 + \left(\frac{\omega_{RL}}{\Omega}\right)^2} - j \frac{cq_0\Omega}{1 + \left(\frac{\Omega}{\omega_{RL}}\right)^2} = F_{\parallel} + jF_{\perp}\tag{3.43}$$

Síla F_q se skládá ze dvou komponent a to ze síly rovnoběžné F_{\parallel} a síly kolmé F_{\perp} na vychýlení.

3.6 Výpočet ztrát ložiska

Ztráty v ložisku jsou primárně způsobeny vířivými proudy ve vodiči rotoru při vychýlení. Ostatní možné ztráty například v magnetickém obvodu nebo offsetem magnetického středu způsobeného nehomogenitou materiálů nebudou uvažovány.

Ztráty při vychýlení P_q se dají také spočítat jako mechanický výkon od momentu, který produkuje tangenciální neboli kolmá složka síly F_{\perp} .

$$P_q = M\omega = F_{\perp}q_0\Omega\tag{3.44}$$

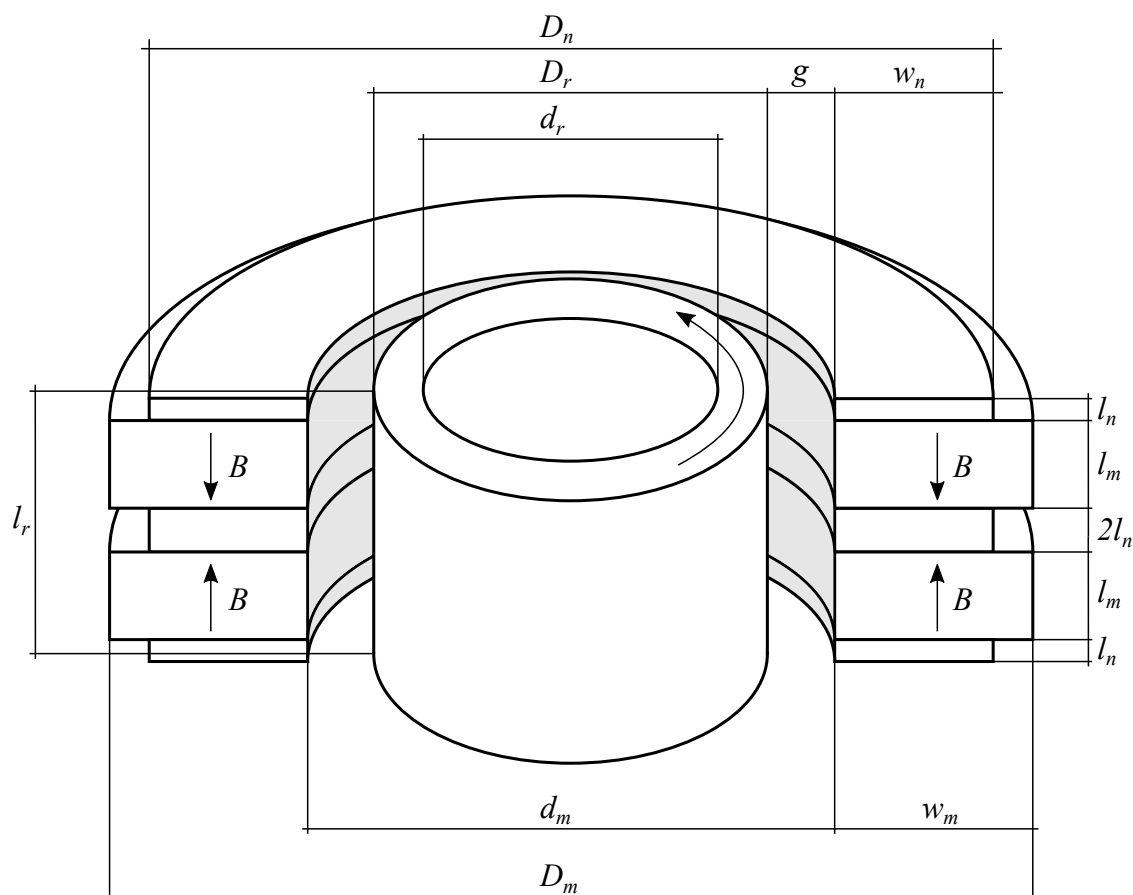
Pokud známe ztráty způsobené vířivými proudy, které protékají nějakou definovanou smyčkou o odporu R , je možné dopočítat jaký proud tyto ztráty způsobil. Pokud uvažujeme dvě proudovodné smyčky, kde odpor jedné je R , pak:

$$I = \sqrt{\frac{P_q}{2R}}\tag{3.45}$$

4 Teoretický podklad pro návrh a konstrukční provedení ložiska

Návrh je proveden dle doporučení vyplývajících ze simulací provedených v [2].

4.1 Konfigurace ložiska



Obr. 4.1: Zjednodušený model radiálního elektrodynamického ložiska

Bylo vybráno homopolární ložisko s vnitřním rotorem. Stator se skládá z axiálně magnetovaných permanentních magnetů orientovaných axiálně a z vnějšího statorového pláště. Volitelně je možno přidat pólové nástavce. Všechny statorové díly jsou rotačně symetrické. Rotor se skládá z hřídele, na které je umístěn rotující dutý válec z jednoho kusu materiálu.

4.2 Materiál hřídele

Hřídel jako taková není užívána pouze ložisky, nýbrž je součástí konstrukčního celku, ke kterému ložiska patří. Jeho volbu tak nebude reálně snadné ovlivnit.

Na obrázku 3.5a je rotor vychýlen v kladném směru osy x . Vlivem působení vnější síly, bude ložisko při levitaci působit takovou silou, aby se vrátilo zpět do středové pozice. Použitím feromagnetické hřídele by mělo za následek, že snahou magnetického obvodu by bylo zmenšit magnetický odpor na minimum, došlo by tím pádem k přitahování rotoru. Tento jev by působil destabilizačně.

Doporučením by bylo vyhnout se pokud možno hřídeli z feromagnetického materiálu.

4.3 Průměr rotoru

Údaj o průměru hřídele je dán konstrukcí, ve které bude ložisko působit. Tloušťka vodivého dutého válce t_r do kterého bude hřídel vložena se odvíjí od minimálních provozních otáček n_{min} .

$$t_r = \frac{D_r - d_r}{2} \geq \delta_{skin}^{max} \quad (4.1)$$

kde D_r je vnější průměr dutého válce, d_r je vnitřní průměr dutého válce a δ_{skin}^{max} je maximální hloubka vniku při skin efektu.

Doporučovaná tloušťka materiálu t_r je 1 až 1,5 násobek maximální hloubky vniku při skin efektu, rovnice (3.18). Je zvoleno:

$$t_r \doteq 1,25\delta_{skin}^{max} \quad (4.2)$$

Vztah mezi složkami síly a různými tloušťkami vodiče je možné na obrázku 8.10 a 8.11 příloha A. Je vidět, že pro nižší tloušťky se síla působící na rotor zvyšuje, vířivé proudy jsou více u povrchu a mohou lépe interagovat.

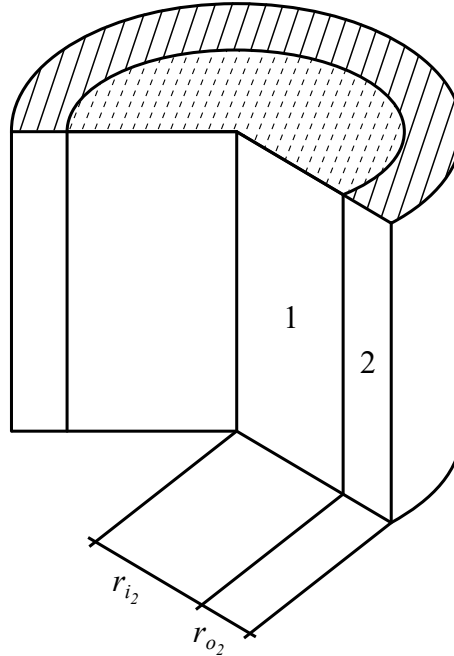
4.4 Maximální provozní otáčky

Jedná se o důležitý parametr, který je potřeba určit vzhledem k použitým materiálům. Na rychle rotující rotor budou působit odstředivé síly, které při překročení mezní rychlosti mohou způsobit poškození, či úplnou destrukci ložiska.

Rotor se skládá z hřídele válcového tvaru (1) a vodiče prstencového tvaru (2), obrázek 4.2. Obě části jsou k sobě vhodně připevněny.

Rotující části jsou namáhány jak v radiálním tak tangenciálním směru. Uvažovaným namáháním v obou případech je namáhání tahem [26]. Je potřeba aby napětí působící na daný materiál nepřekročilo tzv. mez kluzu. Při překročení této meze sice

ještě nedojde k roztržení materiálu, ale je to nejmenší napětí, při kterém dochází k podstatné deformaci materiálu. To se projeví jak u povrchu zvětšením průměru rotoru, tak hlavně u spoje vodivého prstence a hřídele, kde může dojít k uvolnění vodiče.



Obr. 4.2: Znázornění rotorových dílů

Určení maximální obvodové rychlosti vychází ze vztahu:

$$v_{max} = \sqrt{\frac{4\sigma_{02}}{\rho_2 \left((1 - \kappa_2) \frac{r_{i2}^2}{r_{o2}^2} + (\kappa_2 + 3) \right)}} \quad (4.3)$$

kde σ_{02} je napětí na mezi skluzu vodivého prstence, ρ_2 je hustota, κ_2 je Poissonova konstanta, r_{i2}^2 je vnitřní poloměr a r_{o2}^2 je vnější poloměr prstence.

$$r_{i2} = \frac{d_r}{2} \quad (4.4)$$

$$r_{o2} = r_{i2} + t_r \quad (4.5)$$

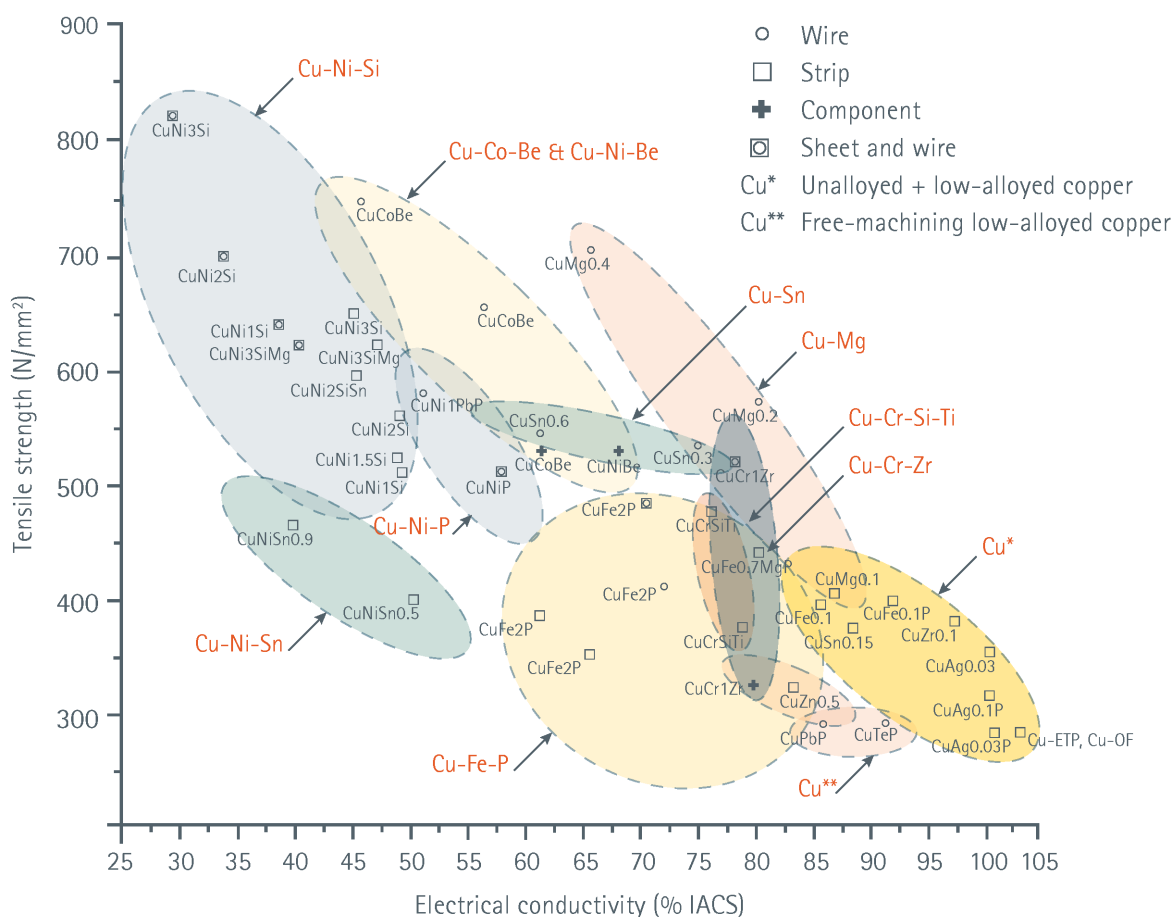
Maximální možné otáčky rotoru se poté určí jako:

$$n_{max} = \omega_{max} \frac{60}{2\pi} = \frac{v_{max}}{r_{o2}} \frac{60}{2\pi} \quad (4.6)$$

V rámci teorie ještě není uvažován bezpečnostní koeficient respektující nedokonalosti materiálu.

4.5 Volba materiálu prstencového vodiče s ohledem na vysoké otáčky a vlastnosti ložiska

Vzhledem k tomu, že materiál rotujícího válce ve velké míře ovlivňuje parametr tlumení c , je důležité vybrat vodič s co nejnižší rezistivitou. Optimální volbou je elektrotechnická měď Cu. Naopak materiál vodivého válce nemá vliv na parametr tuhost k , ta bývá ovlivněna magnetickým obvodem. [27]



Obr. 4.3: Porovnání pevnosti v tahu a vodivosti pro různé slitiny mědi [28]

Elektrotechnická měď má nejvyšší vodivost mezi běžně dostupnými kovy. Z pohledu magnetické levitace se tudíž jeví jako ideální materiál. Nicméně její mez kluzu je celkem nízká a tím pádem schopnost odolávat odstředivým silám při vysokých otáčkách je taktéž nízká. Tím dochází ke snížení maximálních provozních otáček.

Východiskem je použití vhodné slitiny mědi jako kompromis mezi vodivostí a pevností v tahu. Malá příměs prvků (např. cín, beryllium, hořčík, chrom, železo nebo zinek) dokáže zvýšit pevnost na úkor vodivosti.

Vodivost se obecně porovnává procentuálně vzhledem k vodivosti mědi dle IACS (International Annealed Copper Standard), kde 100 % IACS vodivosti žíhané mědi odpovídá $5,8001 \cdot 10^7 \text{ Sm}^{-1}$ při teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$ [29]. Poté už záleží na konkrétní situaci, zda je požadována vyšší pevnost či vodivost.

4.6 Volba vzduchové mezery

Jedná se o důležitý parametr, který bude značně ovlivňovat chování ložiska. Větší vzduchová mezera bude vyžadovat zvětšení rozměrů permanentních magnetů, aby magnetický tok směřující k rotoru mohl tuto vzduchovou mezeru překonat. Pokud bychom magnety nezvětšili, došlo by se zvyšující se vzduchovou mezerou k poklesu síly působící na ložisko při vychýlení, obrázek 8.12 a 8.13, příloha A.

Není však možné vzduchovou mezeru použít příliš úzkou, protože při otáčení dochází k namáhání a mírnému zvětšení rozměrů. Tento jev je dále ovlivňován i teplotou, díky čemuž se vzduchová mezera zmenšuje. Je taktéž vyžadována vyšší přesnost při výrobě komponent.

Použitím širší vzduchové mezery je potřeba vyrobit větší stator a ložisko může být méně citlivé na vyosení.

4.7 Volba materiálu permanentních magnetů

Důležitými parametry pro volbu permanentních magnetů je co nejvyšší koercitivní síla a remanentní indukce. Na těchto veličinách závisí maximální energetický součin $(BH)_{max}$.

V současnosti existují čtyři typy permanentních magnetů [30]:

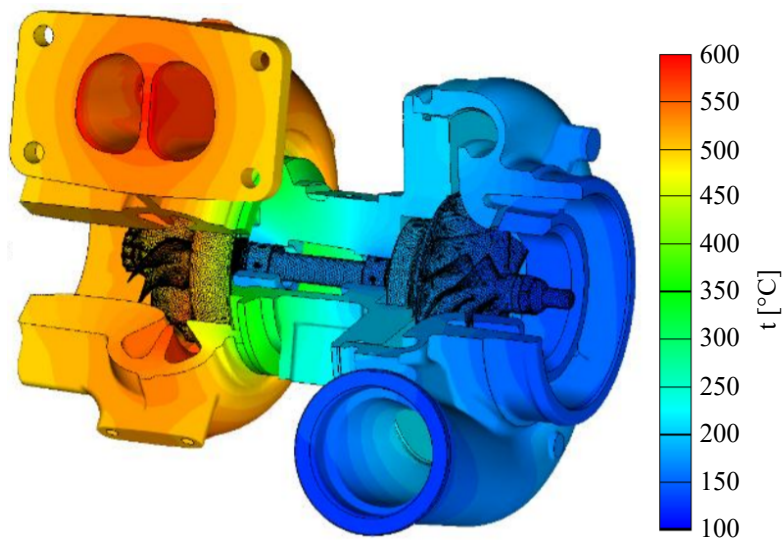
1. **AlNiCo**, jehož základem je slitina hliníku, niklu, železa, kobaltu a titanu. Vyrábí se několik variant, navzájem se liší složením, cenou, maximálním energetickým součinem, který však nedosahuje takových hodnot jako u magnetů ze vzácných zemin. Dodnes je jeho největší výhodou vysoká provozní teplota, která může dosáhnout $500 \text{ }^\circ\text{C}$.
2. **Feritové magnety**, kde základem jsou buďto barnaté nebo strontnaté ferity. Stejně jako v předešlém případě nedosahuje maximální energetický součin takových hodnot jako u magnetů ze vzácných zemin. Výhodou je však velmi nízká cena, která je činí nejrozšířenějšími magnety.
3. **SmCo**, základem jsou prvky samarium a kobalt, které jsou poněkud hůře dostupné a proto relativně drahé. Tento magnet dosahuje vysokého energetického součinu oproti výše dvěma zmíněným. Jeho další výhodou je vysoká provozní

teplota (až 300 °C) a odolnost proti korozi. Nevýhodou může být, kromě již zmíněné ceny, také křehkost a menší odolnost vůči pnoucím silám.

4. **NdFeB**, jedná se o směs neodymu, železa a boru. V současnosti nejlepší variantou je směs $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Jeho výhodou je nejvyšší maximální energetický součín a také nižší cena v porovnání s magnety SmCo. Nevýhodou je poměrně nízká provozní teplota, která u nejlepších provedení dosahuje jen 60 °C a nízká odolnost proti korozi.

Kromě maximálního energetického součinu je třeba počítat i s maximální provozní teplotou. Při návrhu je třeba znát teplotu, kterou dosahuje bezprostřední okolí ložiska a v případě výrazně vyšších teplot než 20 °C možnosti chlazení, bude-li k dispozici.

Parametry magnetického obvodu výrazně ovlivňují tuhost ložiska. Vzhledem k této skutečnosti a vlivu teploty na BH charakteristiku magnetu je třeba přihlídnout i k teplotnímu koeficientu. Ten říká procentuální pokles magnetické indukce a koercitivní síly na každý °C od 20 °C po maximální pracovní teplotu. To je třeba brát v potaz v případě, kdy se pracovní teplota pohybuje ve vyšších částech dovoleného teplotního rozsahu.



Obr. 4.4: Teplota komponent turbodmychadla, upraveno [31]

4.8 Konfigurace magnetů

Ze simulací vyplývá, že zvýšení tuhosti je možno dosáhnout zvyšováním počtu radiálních magnetů. Tato možnost je však omezoována rotorovou dynamikou, kde více magnetů zvyšuje délku rotoru.

Ukázalo se, že přidáním jednoho magnetu ke dvěma původním se zvedla tuhost zhruba dvakrát. Efektivita magnetů umístěných na koncích je výrazně nižší kvůli úniku magnetického toku, který se tak nepodílí na vytváření tuhosti. Obrázek 8.1 a 8.2, příloha A.

Pokud záleží na rotorové dynamice a je třeba zvýšit tuhost, je možnost použít více kratších magnetů při zachování délky rotoru.

4.9 Rozměry magnetů

Z obrázku popisující závislost tuhosti na poměru šířky magnetu ku délce je vidět, že tuhost ložiska výrazně roste se zvětšující se šířkou magnetů. Na druhou stranu obrázek popisuje závislost relativní tuhosti (N/mm/cm^3) na poměru w_m/l_m , kde relativní tuhost s rostoucí šířkou klesá. Obrázek 8.3 a 8.4, příloha A.

Další možností jak zvýšit tuhost a přitom nezměnit délku ani počet magnetů je zvětšit jejich šířku. Z ekonomického hlediska je to ale horší volba.

Šířka pro největší tuhost:

$$w_m \geq 2l_m \quad (4.7)$$

Ekonomické řešení:

$$w_m = 0,6l_m \quad (4.8)$$

V případě délky jednoho magnetu je doporučeno řešení, kdy délka magnetu l_m včetně pólových nástavců se rovná dvojnásobku součtu velikosti vzduchové mezery g a hloubky vniku skin efektu δ_{skin}^{max} . Zároveň by měla být délka pólového nástavce l_n čtvrtinová oproti l_m . Velikost vzduchové mezery g je potřeba zvolit. Vztahy pro rozměry magnetů vychází ze simulací na obrázku 8.5 a 8.6, příloha A.

$$\begin{aligned} l_m + 2l_n &= 2(g + \delta_{skin}^{max}) \\ l_m &= 4l_n \end{aligned} \quad (4.9)$$

4.10 Volba délky rotoru

První možností je zvolit rotor kratší než stator. V tomto případě je zde prostor tak akorát velký, že rotorem protéká pouze hlavní smyčka vířivého proudu a žádné bludné proudy na koncích rotoru. Hlavní smyčka nemá na výběr a cirkuluje v blízkosti magnetů, kde produkuje sílu. Dochází však k nárůstu odporu.

Druhou možností je rotor delší než stator. Bludné postranní proudy zde vznikají, ale mají dostatek prostoru.

Třetí možností, která se ukázala jako nejhorší, je rotor stejně dlouhý jako stator. Je dostatečně dlouhý aby zde vznikly bludné proudy, ale ty už nemají dost místa pro

svou cirkulaci. Tím pádem produkují na koncích rotoru zápornou tuhost. Problém se projevuje hlavně u ložisek s pólovými kryty.

Doporučená délka rotoru je buď o něco kratší než délka statoru a nebo výrazně delší. Obrázek 8.7, příloha A.

4.11 Použití pólových nástavců

Část problematiky použití pólových nástavců byla popsána výše. Hlavní účel je směrování magnetického toku směrem k vodivému válci. Použitím je dosaženo vyšší indukce, která sice na jednu stranu snižuje parametr tuhost ve vyšších otáčkách, ale na druhou stranu snižuje minimální rychlost potřebnou pro levitaci. Další výhodou je vyšší tuhost při nízkých otáčkách.

Jejich šířku je potřeba zvolit tak, aby se minimalizoval únik magnetického toku. Jinak řečeno, aby se neuzavíral v místech, kde nepůsobí na rotor.

Optimální volba šířky pólových nástavců je taková, aby na straně, kde je potřeba zamezit úniku, byla o něco kratší než radiální magnety. Zbylý prostor je pak vyplněn distančními nemagnetickými prstenci.

4.12 Materiál pólových nástavců

Materiál by měl být zvolen s ohledem na co nejmenší ztráty. V případě materiálu jha rozlišujeme dvojí typy ztrát. Ztráty hysterezní, které vznikají v důsledku cyklického magnetování feromagnetika, a ztráty vířivými proudy, které jsou způsobeny elektrickou vodivostí feromagnetik a také nerovnoměrným rozložením proudové hustoty v důsledku skin efektu.

V obou případech hraje důležitou roli frekvence magnetického pole. Nikoliv však pole permanentních magnetů, nýbrž časově proměnné pole, které vytváří proudovodné smyčky v rotoru při vychýlení z rovnovážné polohy, obr. 3.5.

Hysterezní ztráty je možno potlačit tak, že vybereme materiál s úzkou hysterezní smyčkou. Je to tím, že plocha dané hysterezní smyčky odpovídá energii potřebné pro přemagnetování jednotkového objemu.

K potlačení vířivých proudů přispěje zvýšení elektrického odporu. To je možno provést zvýšením podílu křemíku v materiálu a zároveň rozdělením nástavce na řadu vzájemně izolovaných plechů. Čím je plech tenčí, tím je vliv vířivých proudů více potlačen, na druhou stranu se zhorší činitel plnění železa.

Na trhu dnes existují dva typy feromagnetických plechů, a to orientované a neorientované. Neorientované plechy jsou nejvíce rozšířeným typem, hlavně kvůli nižší

ceně a jejich použití je převážně u elektrických motorů a aplikací, kde ztráty v železe nejsou kritické.

Jak vyplývá z předešlého odstavce orientované plechy mají uplatnění u velkých distribučních transformátorů, kde ztráty hrají důležitou roli. Tyto plechy se vyrábí od běžně tlustých plechů (0,3 mm) po ultra tenké plechy (méně jak 0,1 mm). Jejich nevýhodou je vyšší cena.

Je možné vzít v úvahu, že pólové nástavce v mnoha případech dosahují jen velmi krátké délky v axiálním směru, řádově jednotky mm. V případě, že nepoužijeme ultra tenké plechy, bude na sobě uložených pouze několik plechů. V takovém případě je možno nepoužít jádro z plechů, ale využít feritové jádro. Tato jádra mají i při velmi vysokých frekvencích relativně nízké ztráty a je možno je použít.

4.13 Volba pláště

Materiál pro plášť by neměl být vyroben z feromagnetického materiálu. Pokud by byl, uzavíral by se tudy magnetický tok z permanentních magnetů, kde by neprodukoval žádnou práci, což je negativní jev.

Optimální konstrukce by měla být z materiálu s co nejnižší magnetickou vodivostí. Možností by bylo, že by se pouze vnitřní část pláště vyrobila z materiálu, který má buď paramagnetické nebo diamagnetické vlastnosti.

Materiál	Rel. permeabilita μ_r [-]	Tepelná vodivost λ [W m ⁻¹ K ⁻¹]
Hliník	1,000023	237
Měď	0,999990	386
Pyrolytický uhlík	0,9996	80/1600
Olovo	0,999983	35,3
Zinek	0,999988	116
Mangan	1,0010	7,81
Titan	1,00005	21,9
Chrom	1,00033	93,9

Tab. 4.1: Vybrané prvky s paramagnetickými nebo diamagnetickými vlastnostmi [32]

4.14 Vzájemné spojení materiálů

4.14.1 Spojení prstencového vodiče a hřídele

Níže jsou představeny možnosti, jejich výhody a nevýhody, jak docílit pevného spojení mezi prstencovým vodičem a hřídelí [26].

1. **Smršťovací lícování** – tato metoda je založena na principu teplotní roztažnosti látek. Její omezení může nastat v případě, kdy je potřeba dosáhnout vyššího rozdílu teplot než maximální teplota, na kterou může být některý materiál zahřátý. Udává se, že rozdíl 400 °C, včetně chlazení hřídele se dá považovat za dostatečný pro maximální upevnění dvou materiálů.
2. **Použití adheziva** – tato možnost je velmi jednoduchá na provedení. Nicméně spoj může být velmi náchylný na okolní podmínky, jako prostředí nebo teplota, kdy se může chovat nepředvídatelně.
3. **Bandáž rotoru** – rotor je obalen kevlarem nebo uhlíkovými vlákny. Tato možnost je velmi vhodná pro aplikace s vnějším rotorem. Vzhledem k tomu, že tloušťka vrstvy zvětšuje vzduchovou mezeru, dojde k oslabení magnetického pole. Z tohoto důvodu není pro vnitřní rotor vhodná.
4. **Pozitivní smršťovací gradient** – v tomto případě by materiály musely být vybrány takovým způsobem, aby se při namáhání více roztahovala hřídel nežli prstencový vodič. Vzhledem k materiálovým možnostem však v tomto případě nejspíš nebude proveditelná.
5. **Svařování výbuchem** – neboli také explozivní nanášení, jedná se o metalurgické spojení dvou materiálů působením energie výbuchu. K detonaci se používá např. SEMTEX. Rázem a vysokým tlakem výbuchu vznikne spoj. Výhodou je minimální ohřev materiálu a krátký svařovací čas, nevýhodou je vyšší cena [33].

4.14.2 Spojení permanentních magnetů, nástavců a pláště

Vzájemné spojení magnetů ke zbylým statorovým dílům by mělo ideálně být provedeno vhodným adhezivem. V případě magnetů ve statoru není přítomna odstředivá síla.

Vhodnou metodou se v tomto případě nejvíce smršťovací lícování, jednak kvůli maximálním teplotám materiálů a jednak také tato metoda vede k negativnímu ovlivnění magnetickým vlastností materiálů [34].

5 Konstrukční návrh ložiska

V této fázi řešení budou na základě teoretického podkladu numericky stanoveny geometrické parametry ložiska. Zde uvedený návrh bude simulován v následující kapitole.

Zvolené parametry	Hodnota	Jednotka
Minimální pracovní otáčky ložiska n_{min}	10 000	[ot/min]
Maximální pracovní otáčky ložiska n_{max}	45 000	[ot/min]
Průměr hřídele d_r	40	[mm]
Šířka vzduchové mezery g	1	[mm]
Počet prstencových magnetů	2	[-]
Teplota okolí	20	[°C]
Pólové nástavce	Budou použity	

Tab. 5.1: Úvodní zvolené parametry

Hřídel, na kterou bude usazen vodivý válec, bude tvořena z litiny, což je slitina železa a uhlíku, kde obsah uhlíku je více než 2 %.

Veličina	Hodnota	Jednotka
Relativní permeabilita μ_r	60	[-]
Hustota ρ	7200	[kg m ⁻³]
Konduktivita γ	1,5	[MS m ⁻¹]

Tab. 5.2: Materiálové vlastnosti litiny

5.1 Šířka rotorové části ložiska

Pro určení tloušťky prstencového vodiče budou ke srovnání určeny parametry pro čistou elektrotechnickou měď. Porovnány budou se slitinou CuMg0,2. Tato slitina byla vybrána z důvodu dobré elektrické vodivosti ku napětí na mezi kluzu.

Pro čistou elektrotechnickou měď vychází hloubka vniku při skin efektu z rovnice (3.18), kde:

$$\delta_{skin}^{max} = 5,2 \text{ mm} \quad (5.1)$$

Z doporučeného rozsahu 1 až 1,5 násobku hloubky vniku je volena tloušťka dutého vodivého válce:

$$t_r = 1,25\delta_{skin}^{max} = 6,5 \text{ mm} \quad (5.2)$$

Využitím vztahu (4.3), (4.6) a (5.2) vyjde maximální (ultimátní obvodová) obvodová rychlost:

$$n_{max-ult} = 22871 \text{ [ot/min]} \quad (5.3)$$

Veličina	Cu	CuMg0,2	Jednotka
Konduktivita γ	100	78	[% IACS]
Konduktivita γ	58,001	45,24	[MS m ⁻¹]
Rezistivita ρ	17,24	22,1	[nΩ m ⁻¹]
Napětí na mezi kluzu σ_{0_2}	33,3	370	[MPa]
Hustota ρ_2	8960	8900	[kg m ⁻³]
Poissonova konstanta κ_2	0,34	0,34	[-]

Tab. 5.3: Porovnání materiálů prstencového vodiče a jejich parametrů

Stejným postupem jako v předešlém případě vychází pro CuMg0,2:

$$\delta_{skin}^{max} = 5,8 \text{ mm} \quad (5.4)$$

$$t_r = 7,2 \text{ mm} \quad (5.5)$$

$$n_{max-ult} = 74350 \text{ [ot/min]} \quad (5.6)$$

Pro takto vysoké otáčky je důležité uvažovat nedokonalosti materiálu, různé mikrotrhliny, nečistoty apod. Poté je dobré snížit dosažitelnou rychlost o bezpečnostní koeficient, který je volen v tomto případě $k_{safe} = 1,5$.

$$n_{max-safe} = \frac{n_{max-ult}}{k_{safe}} = \frac{74350}{1,5} = 49567 \text{ [ot/min]} \quad (5.7)$$

Zvolený materiál splňuje pro dané otáčky působení odstředivých sil a celkový průměr rotoru (vnější průměr rotujícího válce) poté vychází:

$$D_r = d_r + 2t_r = 40 + 2 \cdot 7,2 = 54,4 \text{ mm} \quad (5.8)$$

5.2 Materiály použité pro stator

Permanentní magnety byly zvoleny slinuté NdFeB. Konkrétní použitá třída N52. Jedná se o velmi silné permanentní magnety s vysokým energetickým součinem $(BH)_{max}$. Vzhledem ke zvolené teplotě okolí se jedná o ideální pracovní podmínky pro tento typ magnetu. Magnety jsou orientovány tak, aby se vzájemně odpuzovaly.

Pólové nástavce byly vybrány jako feritová prstencová jádra.

Veličina	Hodnota	Jednotka
Remanentní indukce B_r	1,45	[T]
Koercitivní síla H_c	979	[kA m ⁻¹]
Maximální pracovní teplota	60	[°C]

Tab. 5.4: Parametry permanentního magnetu N52 [35]

Veličina	Hodnota	Jednotka
Relativní permeabilita μ_r	5000	[-]
Hustota ρ	4600	[kg m ⁻³]
Konduktivita γ	0,01	[S m ⁻¹]

Tab. 5.5: Materiálové vlastnosti feritového jádra

5.3 Rozměry statorové části ložiska

Rozměry magnetů byly voleny pro vysokou tuhost s ohledem na rotorovou dynamiku. Podle vztahu (4.7) a (4.9) vychází rozměry pro jeden magnet a pro délku pólového nástavce:

$$l_m = 9,1 \text{ mm} \quad (5.9)$$

$$w_m = 18,2 \text{ mm} \quad (5.10)$$

$$l_n = 2,3 \text{ mm} \quad (5.11)$$

Délka statoru bez pláště vychází:

$$l_s = 2(l_m + 2l_n) = 27,4 \text{ mm} \quad (5.12)$$

Další neznámou je určení šířky pólových nástavců. Ta by měla být o něco menší než šířka magnetů pro zamezení úniku magnetického toku. Zvolena byla šířka:

$$w_n = 14,2 \text{ mm} \quad (5.13)$$

5.4 Délka rotorové části ložiska

Délka rotoru byla zvolena kratší než délka statoru v axiálním směru.

$$l_r = 1,3l_s = 17,5 \text{ mm} \quad (5.14)$$

5.5 Rozměry ložiskových dílů

Součást	Hodnota	Jednotka
Vnější průměr rotujícího válce D_r	54,4	[mm]
Délka jednoho magnetu v axiálním směru l_m	9,1	[mm]
Vnitřní průměr prstencového magnetu d_m	56,4	[mm]
Vnější průměr prstencového magnetu D_m	92,8	[mm]
Délka pólového nástavce v axiálním směru l_n	2,3	[mm]
Vnější průměr pólového nástavce D_n	84,8	[mm]
Délka statoru l_s	27,4	[mm]
Délka rotoru l_r	17,5	[mm]

Tab. 5.6: Navržené rozměry elektrodynamického ložiska

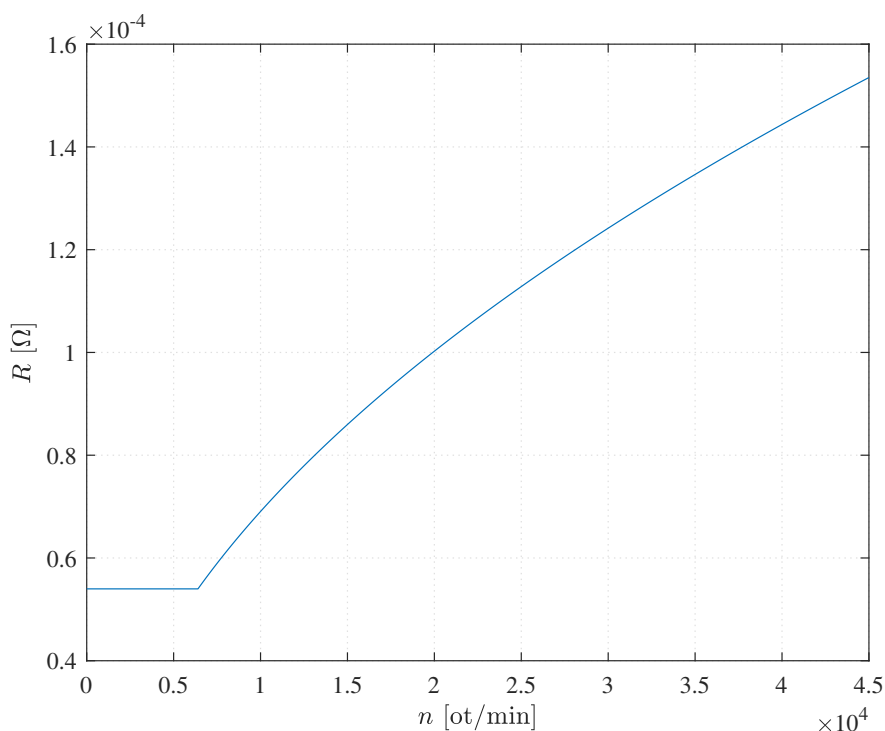
6 Simulace chování navrženého ložiska

6.1 Simulace působení sil na základě kvazistacionární analýzy

Nyní po stanovení a výpočtu parametrů je možno zjistit velikost sil působících na ložisko v závislosti na otáčkách. Z rovnic (3.25) a (3.29) je možno po dosazení zjistit odpor R a indukčnost L proudové dráhy. Jelikož odpor je uvažován jako proměnná v závislosti na otáčkách, bude přepočítáván pro každou rychlost otáčení zvlášť. Indukčnost bude ponechána jako otáčkově nezávislá.

$$L = 3,93 \cdot 10^{-8} \text{ H}$$

Závislost odporu proudové dráhy na otáčkách je možno vidět na obrázku 6.1. Skok v charakteristice představuje uvažování konstantního odporu v případě, že hloubka vniku při skin efektu je větší než tloušťka vodiče.

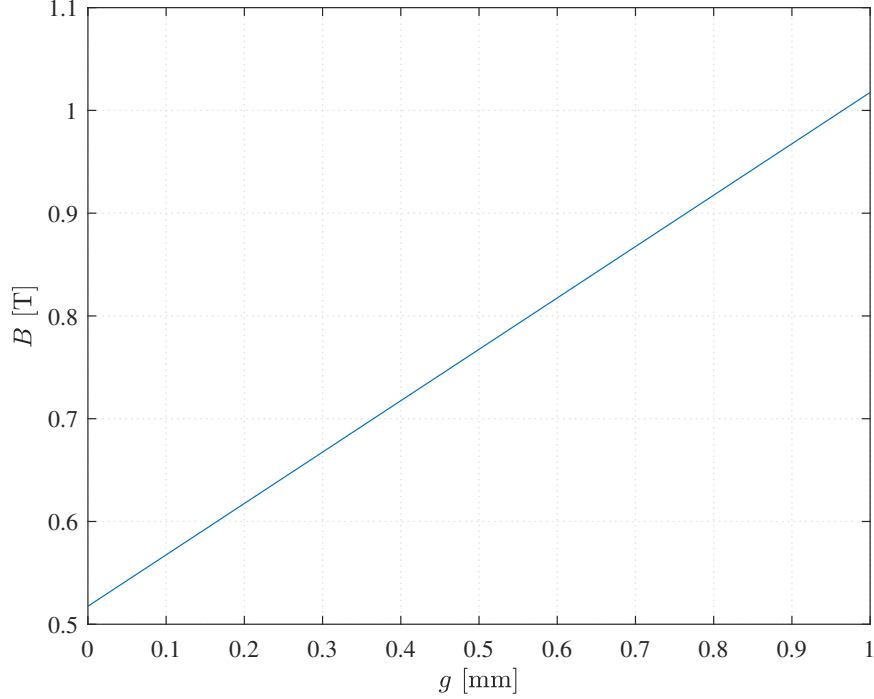


Obr. 6.1: Závislost odporu R proudové dráhy na otáčkách n

V rovnici (3.6) je koeficient popisující změnu magnetického toku vlivem otáčení rotoru $\Lambda_0 = NBl_r$. Délka rotoru byla navržena jako $l_r = 17,5$ mm, počet závitů $N = 2$. Pokud uvažujeme velikost výchylky $q_0 = 0,5$ mm, můžeme zhruba zjistit

velikost magnetické indukce z rovnice (3.39), pak magnetická indukce, která bude v místě výchylky rotoru bude uvažována $B = 0,77$ T.

Magnetická indukce v oblasti vzduchové mezeře, jejíž délka je označena v tomto případě jako g je možno vidět na obrázku 6.2



Obr. 6.2: Velikost magnetické indukce B ve vzduchové mezeře od vnějšího okraje vycentrovaného rotoru po stator

Pokud se podíváme na velikost celkové impedance proudové dráhy, jež je tvořena odporem R a reaktancí ωL , kde:

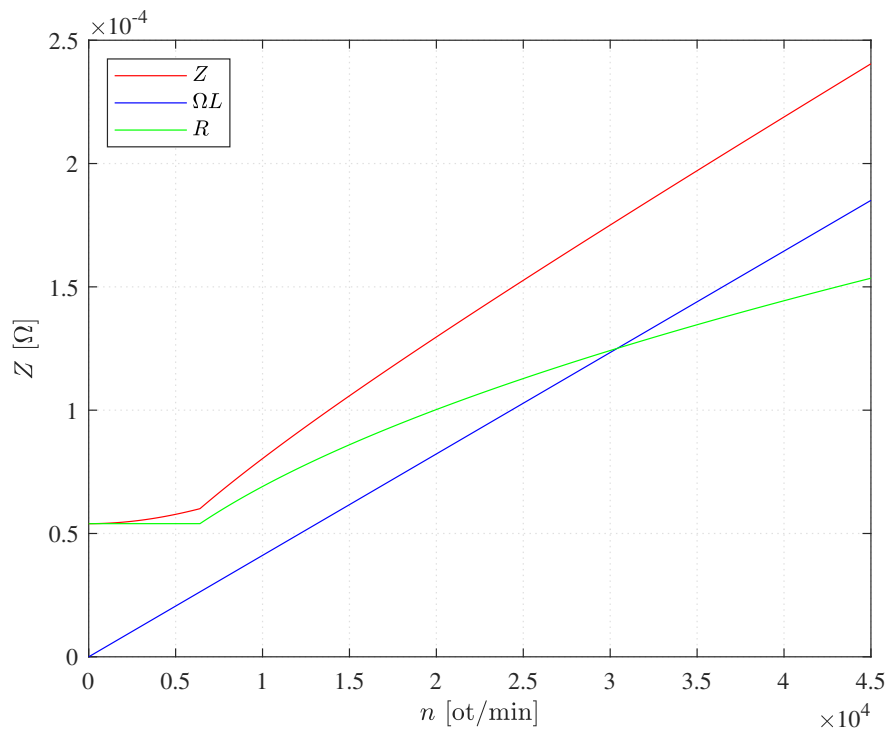
$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (6.1)$$

Z obrázku 6.3 je vidět, že se zvyšujícími se otáčkami reaktance postupně převyšuje odpor R , až se stává dominující složkou impedance Z .

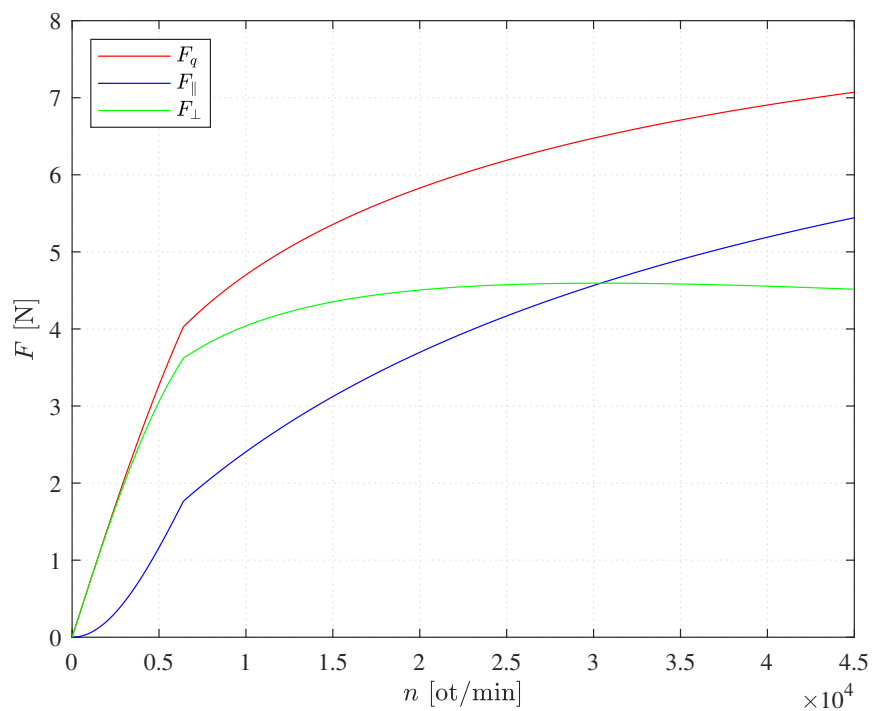
V části analýza byl výpočet síly při konstantním vychýlení odvozen jako:

$$F_q = \frac{\Lambda_0^2 q_0}{L \left(1 + \left(\frac{R}{L\Omega}\right)^2\right)} - j \frac{\Lambda_0^2 q_0 \Omega}{R \left(1 + \left(\frac{L\Omega}{R}\right)^2\right)} = F_{\parallel} + jF_{\perp}$$

kde $\Omega = 2\pi \frac{n}{60}$. Grafický průběh složek výsledné síly v závislosti na otáčkách n je možno vidět na obrázku 6.4.



Obr. 6.3: Závislost impedance Z proudové dráhy na otáčkách n

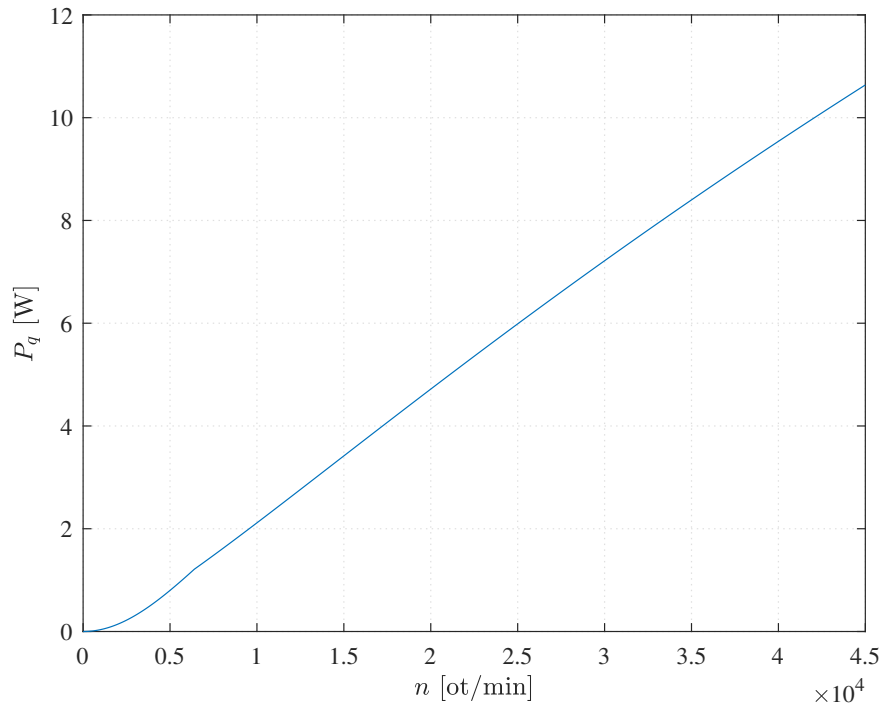


Obr. 6.4: Síla rovnoběžná F_{\parallel} a kolmá F_{\perp} na směr vychýlení a výsledná síla F_q

Výsledná síla F_q je celková síla, která působí na rotor jak v paralelním, tak v kolmém směru, kde:

$$F_q = \sqrt{F_{\parallel}^2 + F_{\perp}^2} \quad (6.2)$$

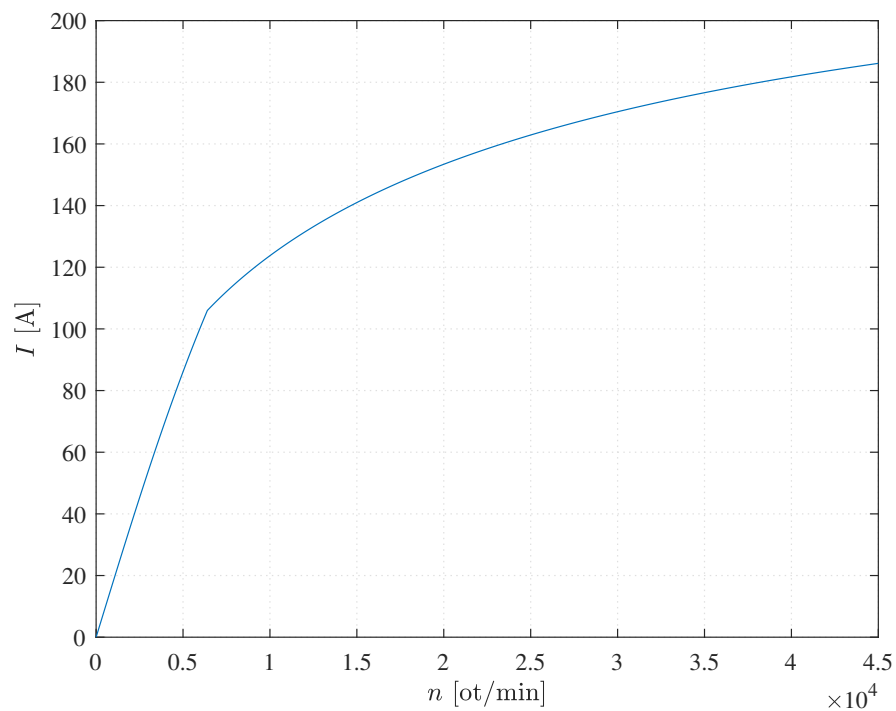
Ztráty ložiska vlivem vířivých proudů ve vodiči rotoru vlivem vychýlení byly spočítány a vykresleny v grafu 6.5. Ztráty jsou z počátku ovlivňovány tangenciální kolmou složkou síly F_{\perp} při dané výchylce (v tomto případě $q_0 = 0,5$ mm) a otáčkami n . Při zvyšujících se otáčkách se kolmá složka síly ustaluje a postupně klesá a ztráty jsou dále ovlivňovány zvyšujícími se otáčkami.



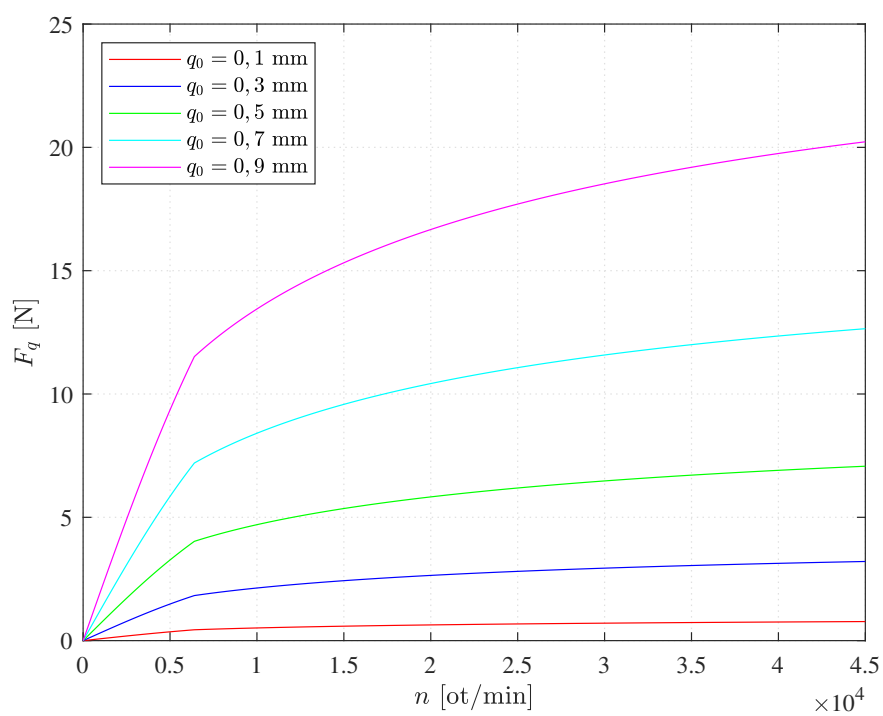
Obr. 6.5: Ztráty ložiska P_q vlivem vířivých proudů v závislosti na otáčkách n

Velikost proudu protékajícího jednou proudovodnou smyčkou může dosahovat řádu až stovek ampér v závislosti na otáčkách n a výchylce q_0 , graf 6.6. K hodnotám ztrát ve vodiči a proudu je třeba dodat, že se nejedná o trvalý stav. Ke ztrátám ideálně dochází pouze při vychýlení rotoru, který by ale měl být ložiskem vrácen zpět. Pokud by se stalo, že ložisko není schopné rotor vrátit do původní pozice, je třeba, aby bylo nasazeno záložní ložisko.

Síla je kromě rychlosti závislá taktéž na výchylce rotoru, s rostoucí výchylkou se očekává, že síla F_q působící na rotor bude růst. Pro vybrané velikosti výchylek byla provedena kvazistacionární analýza, obrázek 6.7. Pro výchylku $q_0 = 0,9$ mm se jedná spíše o ukázkou, neboť při takovéto výchylce už musí být rotor držen jiným záložním ložiskem.



Obr. 6.6: Proud I v jedné proudovodné smyčce v závislosti na otáčkách n



Obr. 6.7: Velikost výsledné síly F_q v závislosti na otáčkách n a výchylce q_0

6.2 Simulace metodou konečných prvků

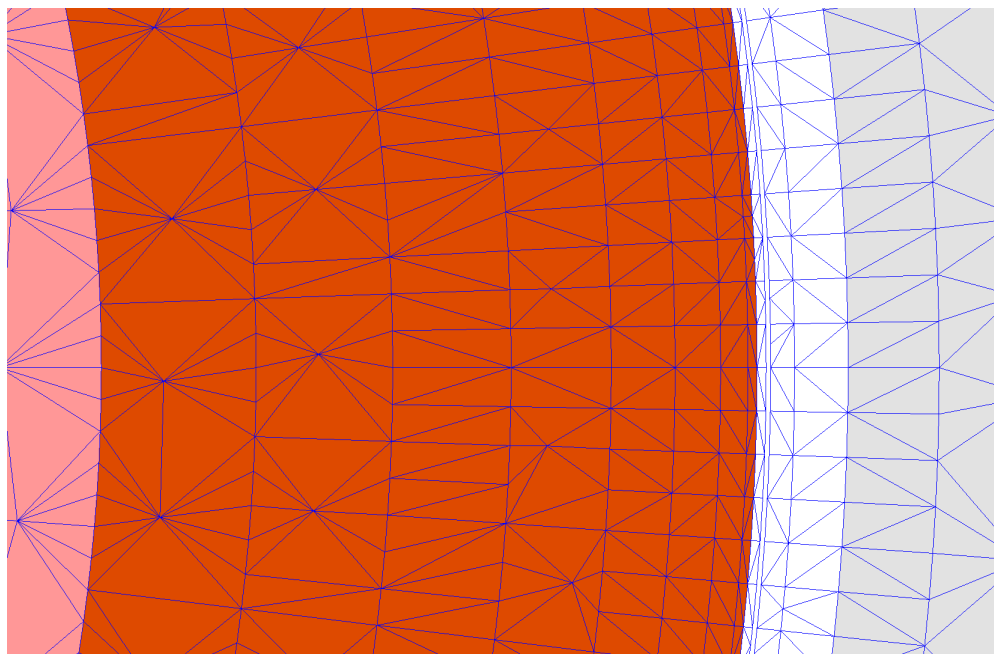
Chování navrženého ložiska bylo dále zkoumáno metodou konečných prvků v prostředí Ansys Maxwell transient 3D. Tranzientní analýza byla zvolena z důvodu otáčení rotoru v magnetickém poli, kde při výchylce vzniká požadovaná síla. Prostředí 3D zase lépe umožní studovat ložisko oproti 2D analýze, kde by došlo k jisté ztrátě přesnosti výpočtů.

6.2.1 Tvorba mesh – vlastní provedení

Jedná se o velmi důležitou součást simulace, která značně ovlivňuje přesnost a správnost výpočtů. Její tvorbě tudíž musí být věnována určitá pozornost.

Nejvyšší hustota mesh byla zvolena pro povrch rotoru a vzduchovou mezeru. Vířivé proudy se indukují na povrchu vodivého válce a vlivem působení skin efektu dochází k vytlačování proudu směrem na povrch. Je proto důležité zvolit mesh tak, aby se hustota elementů směrem k povrchu zvyšovala. To bylo docíleno tak, že vodič byl rozdělen na osm vrstev, kde se každá lišila v šířce o 0,2 mm oproti předchozí.

Vzduchová mezera byla rozdělena na tři vrstvy. Tloušťky vrstev byly voleny, tak, že u povrchu rotoru byla vrstva užší, dále byly vrstvy širší. Pozice vrstvy u vodiče se dále upravuje podle umístění rotoru daného výchylkou.



Obr. 6.8: Grafické zobrazení generované mesh, oblast kolem vzduchové mezery

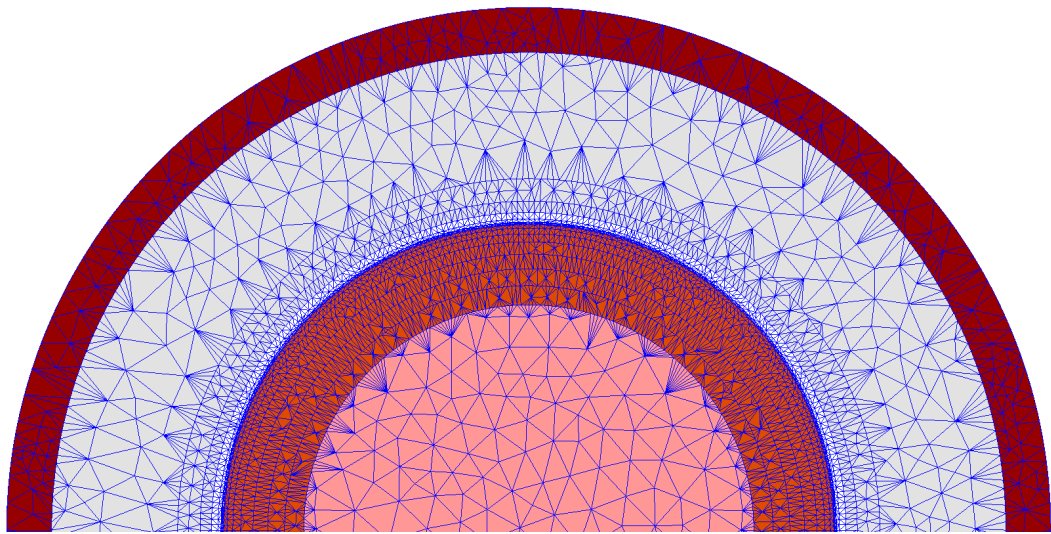
Pólové nástavce, jejichž cíl je vést magnetický tok, byly rozděleny do třech vrstev.

Dvě úzké vrstvy postupně se zvětšující byly umístěny do blízkosti vzduchové mezery. Poslední vrstva vyplňovala zbytek pólového nástavce.

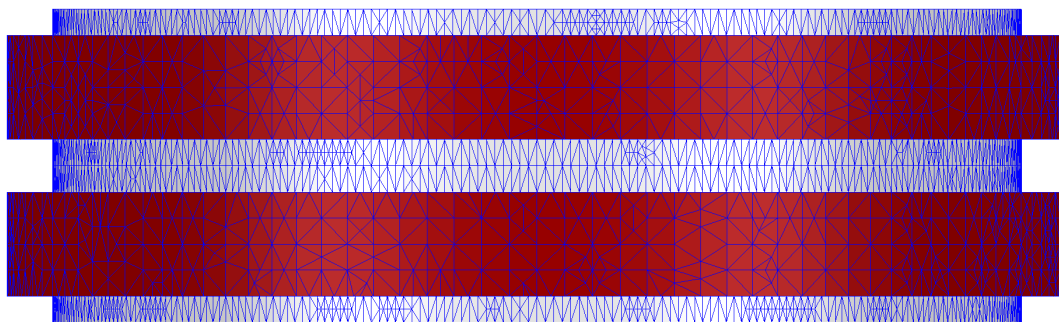
Byl zvolen kratší rotor než stator, díky čemuž vznikl nevyplněný prostor, přes který taktéž prochází magnetický tok. Pro tyto oblasti nad a pod rotorem byla dodatečně zhuštěna mesh pro přesnější výsledky.

Zbytek sestavy má mesh zvolenou podle důležitosti, spíše o něco hrubší než oblast vzduchové mezery, vodiče a krajů pólových nástavců.

Celkově ale nepřesáhla délka okraje tetrahedronů u vnitřní meshe (inside mesh) délku 1 mm. Povrchová mesh (surface mesh) byla zvolena tak, aby maximální povrchová normálová odchylka byla 3° a délka společně s šířkou elementu byly co nejméně rozdílné.



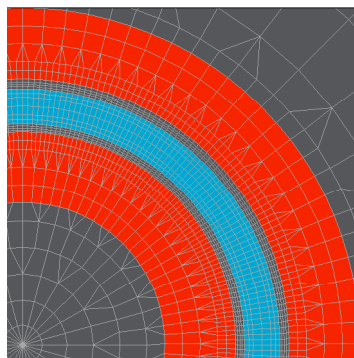
Obr. 6.9: Grafické zobrazení generované mesh, pohled shora



Obr. 6.10: Grafické zobrazení generované mesh, pohled z boku

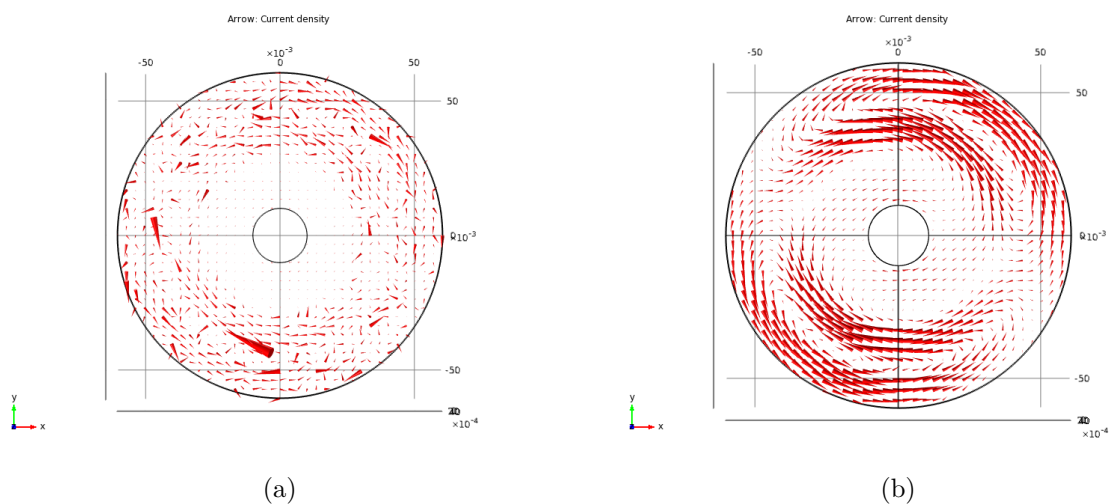
6.2.2 Tvorba mesh – možnosti vylepšení

Pro správně nastavenou mesh a nejvíce přesné výpočty jsou kladeny vyšší požadavky [2], obrázek 6.11. Je potřeba, aby zvolená mesh byla perfektně symetrická. Nicméně Ansys Maxwell neumožňuje vytvořit symetrickou mesh pro celkově nesymetrický objekt, jakým je ložisko s vychýleným rotorem, i když jednotlivé části symetrické jsou.



Obr. 6.11: Vzor symetricky generované mesh, vytvořeno v programu MEGA 3D-FEM [2]

Další nedokonalostí použitého softwaru je možnost volby jen tetrahedrálční meshe, ta ale podle [2] a [20] není vhodná pro správnou simulaci vířivých proudů. Můžou zde údajně vznikat proudy, které by se zde z fyzikálního hlediska neměly vyskytnout.



Obr. 6.12: Porovnání tetrahedrálční (a) a hexahedrálční meshe při simulaci vířivých proudů [20]

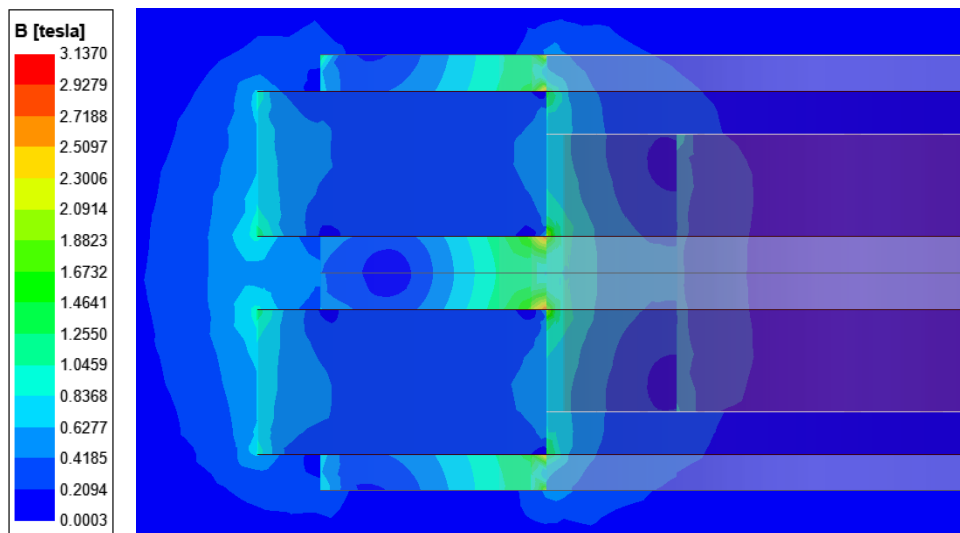
Příkladem může být konečně prvková simulace zobrazená na obrázku 6.12, kde je možno vidět zkrácení tvaru proudovodné dráhy. Výpočty byly provedeny v programu COMSOL Multiphysics.

6.2.3 Rozložení magnetického pole

V předchozích úvahách bylo řečeno, že rozložení magnetického toku v rámci vzduchové mezery mezi dvěma prstencovými magnety je značně nesymetrické.

Byla proto provedena simulace neuvažující otáčení rotoru a zohledňující pouze působení magnetů. Z obrázku 6.13 je možno vidět, že skutečné rozložení magnetického toku je nerovnoměrné, největší magnetická indukce se nachází podle očekávání u okrajů pólových nástavců. Se vzrůstající vzdáleností od pólových nástavců magnetická indukce klesá.

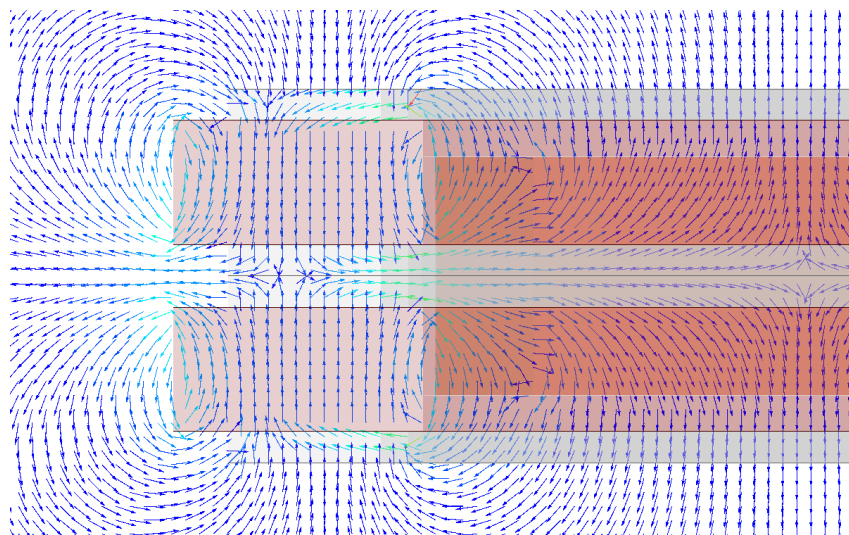
Dále je možno si všimnout, že magnetický tok se podle očekávání uzavírá i na vnější straně ložiska. V tomto případě, díky zkrácení pólových nástavců tudý magnetický tok neprochází v takové míře jako u vzduchové mezery.



Obr. 6.13: Rozložení magnetické indukce v řezu ložiska

Obrázek 6.14 ukazuje, jak dva prstencové magnety orientované proti sobě mají magnetický tok orientován na vzduchovou mezeru.

Při uvažování, že materiál ložiska má všechny kvalitativní parametry symetrické, je možno na základě obrázku 6.14 říct, že magnetická indukce ve středu ložiska je skutečně nulová.



Obr. 6.14: Rozložení vektorů magnetické indukce v řezu ložiska

6.2.4 Simulace ložiska při otáčení s výchylkou

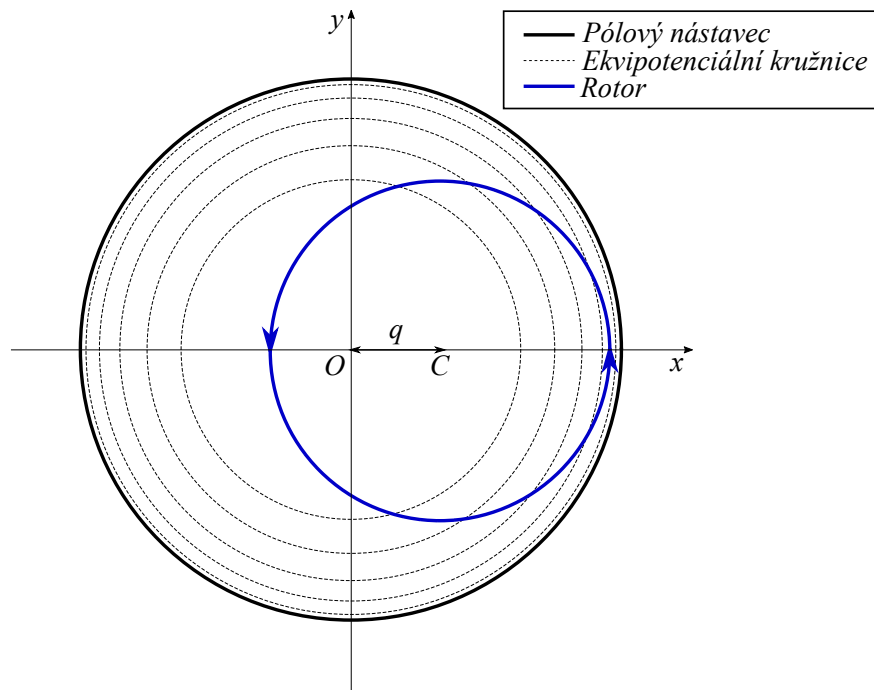
Pro indukování vířivých proudů musí být splněny jisté podmínky. Pokud rotor rotuje kolem středu magnetického pole, nebudou při zanedbání nehomogenit materiálu indukovány vířivé proudy. Rotor musí být otáčen tak, aby vodič při otáčení cítil změnu magnetického pole. Toho je možno docílit například průběhem podle obrázku 6.15.

Rotor v tomto případě rotuje kolem vlastní osy (bod C), která je v offsetu o výchylku q vůči ose středu magnetického pole (bod O). Rotor při otáčení v této pozici prochází jednotlivými ekvipotenciály. Ty označují místa, kde se magnetické pole nemění. Při průchodu z jednoho do druhého ekvipotenciálu cítí rotor změnu magnetického pole a na tu reagují indukované vířivé proudy.

V Ansys Maxwell byla nastavena simulace o délce jedné periody otáčky s krokem $1/36$ periody. Byly zjišťovány síly působící na rotor ložiska ve všech osách x , y a z . Výchylka nastavena na 0,5 mm v kladném směru osy x .

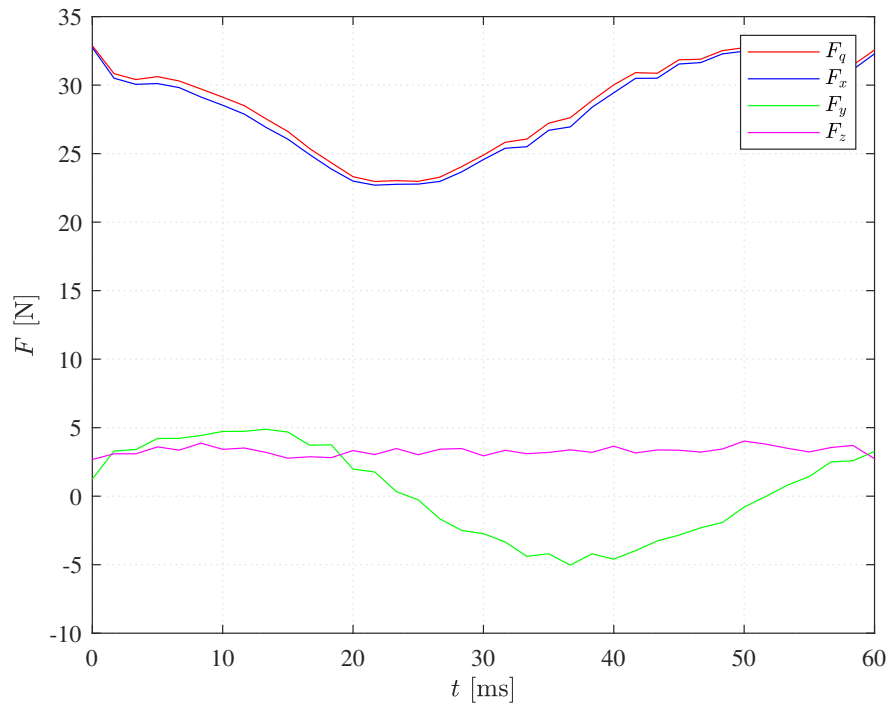
Grafy 6.16, 6.17 a 6.18 ukazují vybrané průběhy pro 1000 ot/min, 10 000 ot/min a 30 000 ot/min. Porovnáním průběhů je možno si všimnout několika zvláštností. Jednak v ose z působí síla o velikosti zhruba 3 N, jedná se o sílu, která by se zde neměla vyskytnout. Tato výchylka může být do jisté míry zapříčiněna nesymetrií generované mesh.

Další zvláštností je počátek síly v ose x , síla F_x . Ukazuje se jeho otáčková nezávislost, což odporuje fyzikálnímu principu fungování ložiska, který předpokládá, že síla je otáčkově závislá. Problémy s otáčkovou nezávislostí při působení sil byly dlouhodobým problémem při dřívějších simulacích. V tomto případě ještě stále zů-

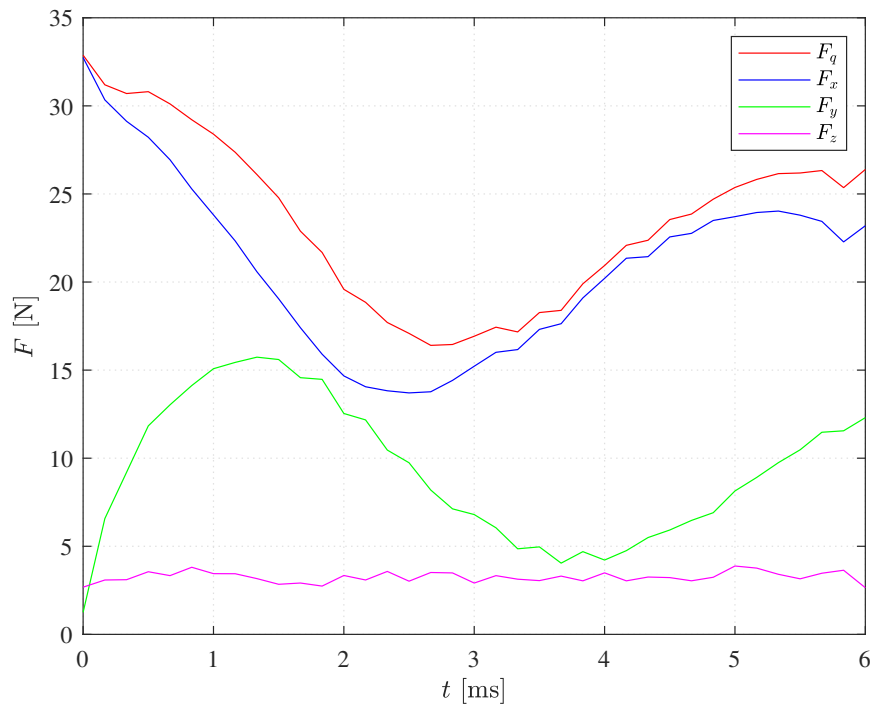


Obr. 6.15: Simulace otáčení rotoru při vychýlení v magnetickém poli

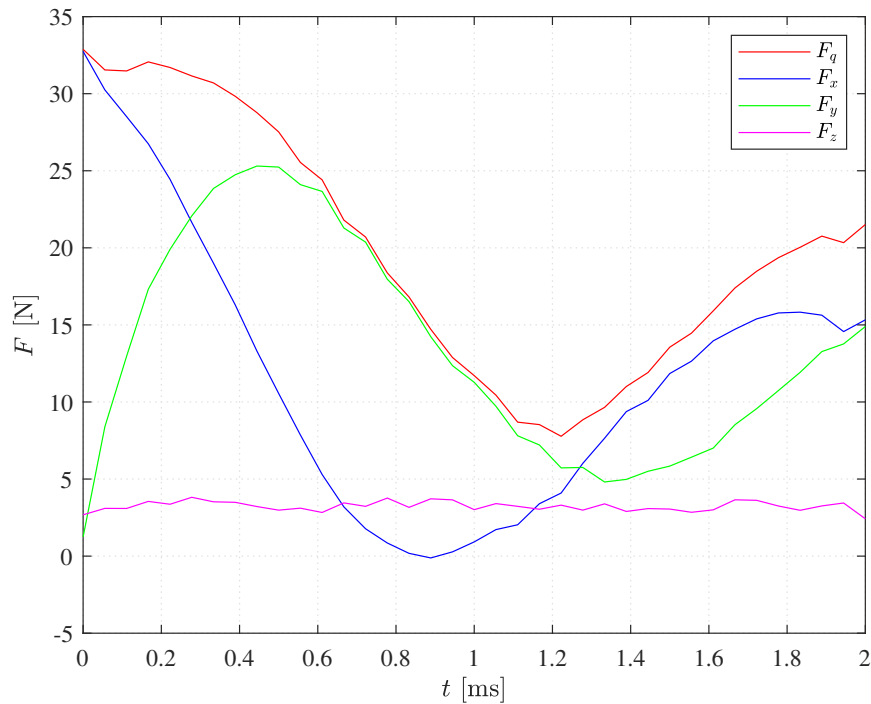
stává jistá část neznámá pro správné provedení simulace. Dosažení plné otáčkové závislosti je tudíž klíčovým aspektem, který je potřeba splnit.



Obr. 6.16: Grafický průběh síly pro jednu otáčku, rychlost otáčení 1000 ot/min



Obr. 6.17: Grafický průběh síly pro jednu otáčku, rychlost otáčení 10 000 ot/min



Obr. 6.18: Grafický průběh síly pro jednu otáčku, rychlost otáčení 30 000 ot/min

Co však oproti dřívějším simulacím otáčkově závislé je, jsou následující průběhy sil F_x a F_y . Pomineme-li sílu F_x , jejíž průběh je obtížné interpretovat, můžeme se blíže zaměřit na průběh síly F_y . Do grafu 6.19 byl vynesena průběh této síly v závislosti na otáčkách.

Průběh splňuje původní předpoklady, že zpočátku je nárůst síly v závislosti na otáčkách strmý, poté strmost klesá a průběh se začíná ustalovat.

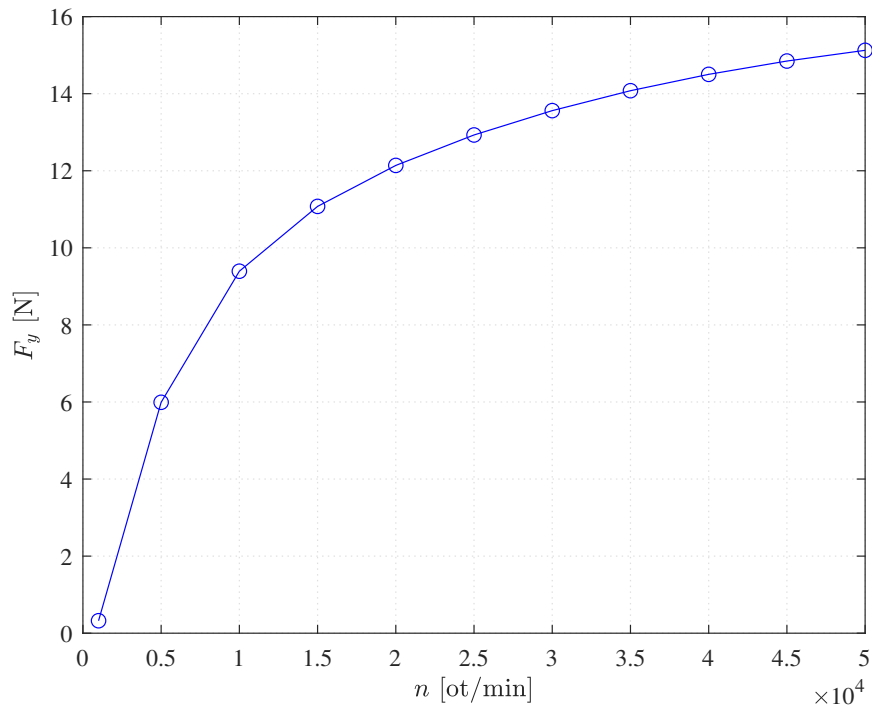
Pro vykreslení grafu 6.19 byla použita průměrná hodnota síly F_y v rámci jedné otáčky u každé rychlosti.

Pozornost se dále zaměřila na proudovodnou dráha ve vodiči rotoru. Byla využita data pro simulaci ložiska při 45 000 ot/min, s vychýlením 0,5 mm ve směru osy x . Obrázek 6.20 a 6.21 ukazuje polohu proudovodné smyčky.

Je možno si všimnout, že smyčky se nenachází v ose x vychýlení, jak by se dalo předpokládat, nýbrž se nachází více posunutě po směru hodinových ručiček. Vysvětlení by bylo v tom, že indukované vířivé proudy reagují na změnu magnetického toku a předbíhají tak. Tento fázový posuv způsobený indukčností se zvyšuje s rostoucími otáčkami.

Rotor v průběhu jedné otáčky protíná jednotlivé ekvipotenciály postupně, vířivé proudy jsou proto také více rozprostřeny po povrchu vodiče.

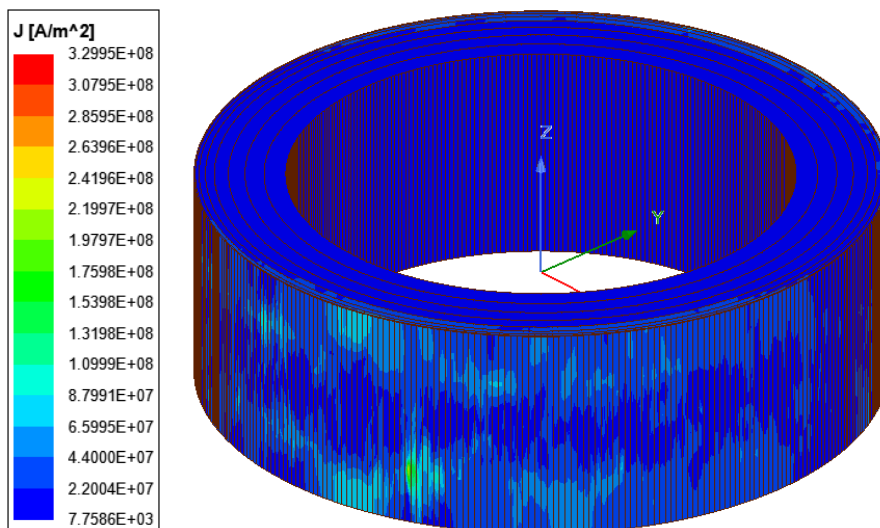
Rozložení vířivých proudů kromě toho ovlivňuje také skin efekt. Obrázek 6.21 ukazuje formování proudovodných smyček ve vodiči. Oproti očekávání zde není vidět



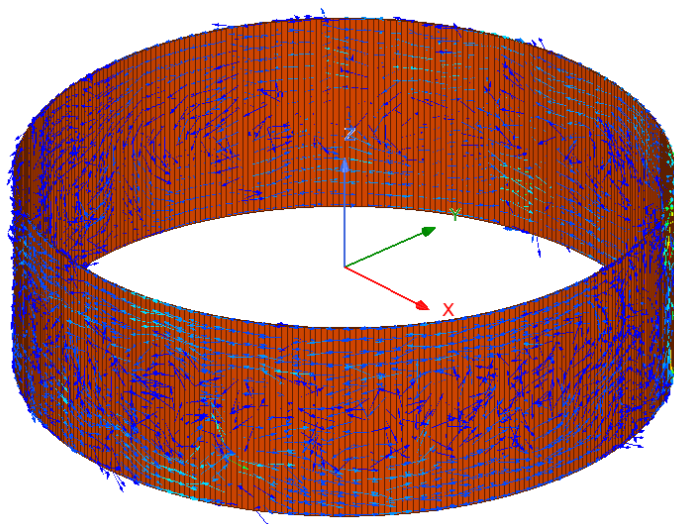
Obr. 6.19: Síla F_y v závislosti na otáčkách n

jedna velká smyčka na každé straně, ale spíše více vzájemně sousedících menších smyček. Je možné, že při nižších otáčkách skutečně dochází k vytvoření více menších smyček. Vlivem skin efektu je proud vytlačěn k okraji vodiče nejen v radiálním směru, ale také v axiálním. Tím by se vytvářel na menší smyčky tlak, který by je nutil splynout při velmi vysokých rychlostech.

Tento proces jde už při této rychlosti vidět tak, že proudová hustota roste na horním a dolním okraji vodiče, zatímco uprostřed jeho stěn klesá.



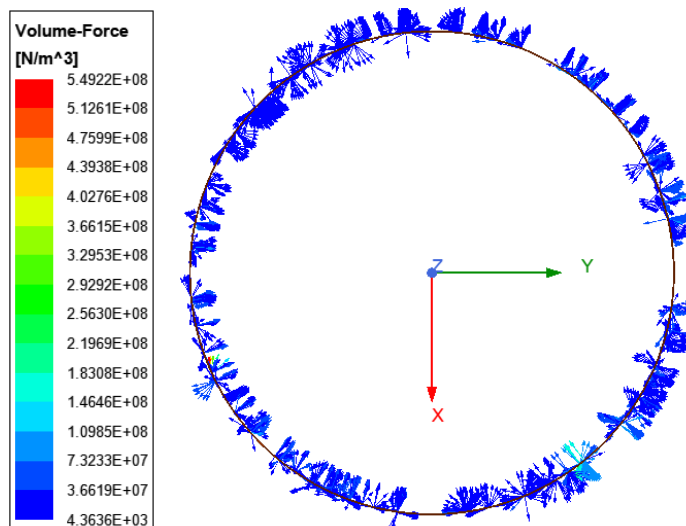
Obr. 6.20: Rozložení proudové hustoty v řezu ložiska



Obr. 6.21: Rozložení vektorů proudové hustoty v řezu ložiska

Pro lepší znázornění byla vybrána pouze krajní vrstva u obrázků 6.21 a 6.22. Směr působení síly splňuje předpoklady. Rotor byl vychýlen v kladném směru osy x a otáčí se proti směru hodinových ručiček. V místě, kde vodič vstupuje do místa s rostoucí magnetickou indukcí, se snaží síla působit opačným směrem a rotor oddálit. V místě, kde vodič vstupuje do místa s klesající magnetickou indukcí, se snaží síla naopak přiblížit. Výsledná síla nepůsobí přímo na střed (rovnoběžně s osou x), ale uzavírá s osou x úhel daný tangenciální kolmou složkou síly.

Velikost ztrát při vychýlení z obrázku 6.23 je dle simulace podstatně vyšší než



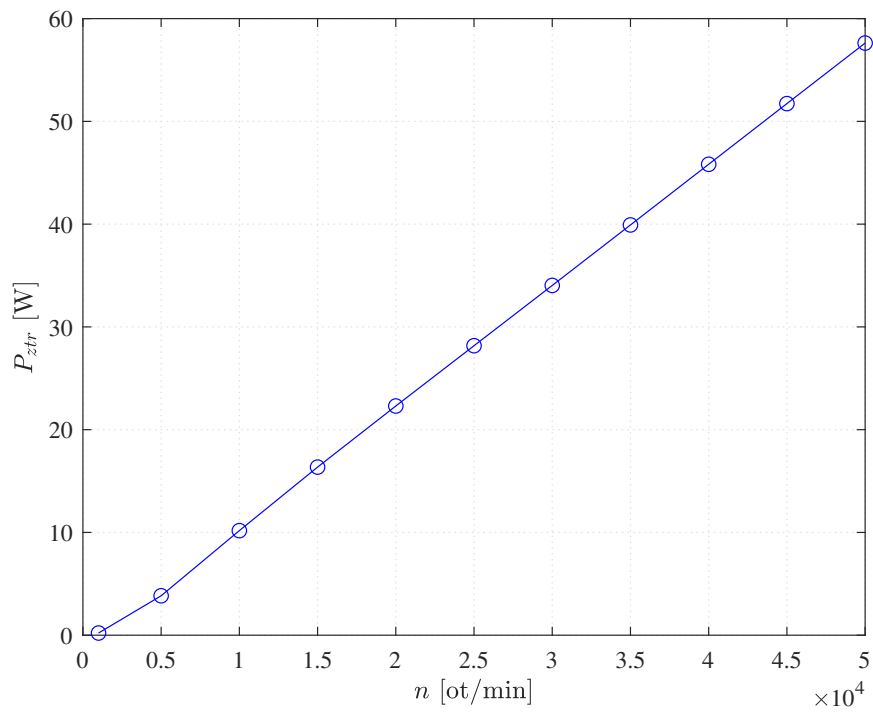
Obr. 6.22: Vektory sil působící na rotor

očekávaná. Teoretické výpočty obsahují řadu zjednodušení. Od určení magnetické indukce ve vzduchové mezeře, tvaru a vlastností proudovodné dráhy až po výpočet síly působící na rotor.

Kvalita meshe v oblasti vzduchové mezery byla nastavena s poměrně vysokou hustotou, což umožnilo přesnější výpočty.

Do vyšších ztrát se reálně mohla promítnout nesymetrie a tetrahedrální mesh, stejně tak možnost, že simulace i vlivem nejistého výpočtu síly není stále optimální. I tak se dá ale předpokládat, že ztráty ložiska při simulaci budou podstatně vyšší než při teoretickém výpočtu.

A dále se dá také předpokládat, že ztráty skutečného ložiska budou ještě o něco vyšší. Stejně jako dříve je potřeba podotknout, že takovéto ztráty nastávají až při vychýlení. Za běžného provozního stavu, kdy je ložisko vycentrované, by ztráty měly být naprosto minimální.



Obr. 6.23: Ztráty ložiska P_{ztr} v závislosti na otáčkách n

7 Citlivostní analýza metodou konečných prvků

Cílem citlivostní analýzy je zjistit vliv změny geometrických rozměrů na velikost síly působící na rotor. Původním cílem bylo zpřesnění rozměrů ložiska, které byly stanoveny na základě doporučení v práci [2].

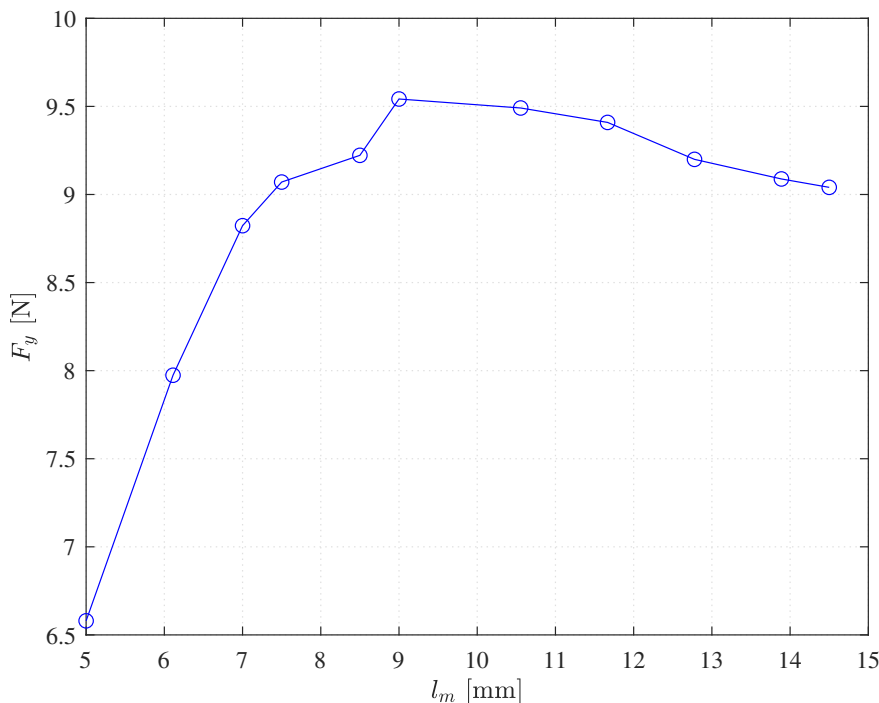
Při simulaci byl vytvořen rozsah velikostí, ve kterém je cílem najít optimální velikost pro danou součást. Pro každou jednu velikost byla provedena simulace jako v předešlých případech v rámci jedné otáčky.

Za zmínku stojí, že každá otáčka (velikost) se počítá samostatně na jednom jádře procesoru. Pro každou zvlášť je potřeba vygenerovat novou mesh a výpočet pro každý krok otáčky, což klade velké nároky na paměť RAM.

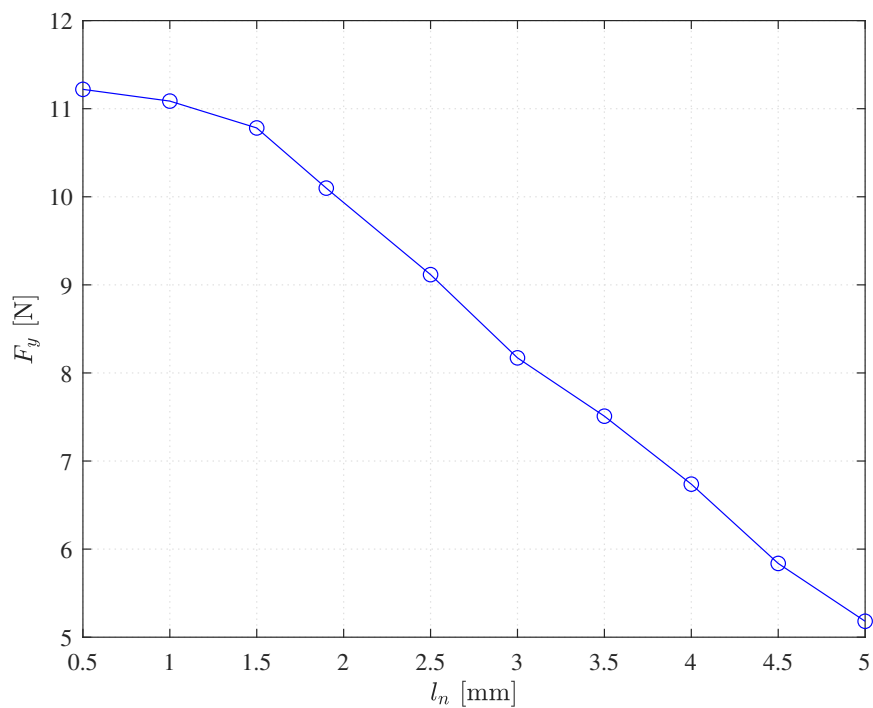
Pro náročné výpočty je žádoucí mít velký výpočetní výkon, ideálně co nejvíce jader procesoru s nadstandardně velkou pamětí RAM.

Nicméně doladění vhodné mesh je pro velké časové nároky na simulaci poměrně náročné. Proto výsledkem simulací není hladká křivka ale průběh s občasnými odskoky.

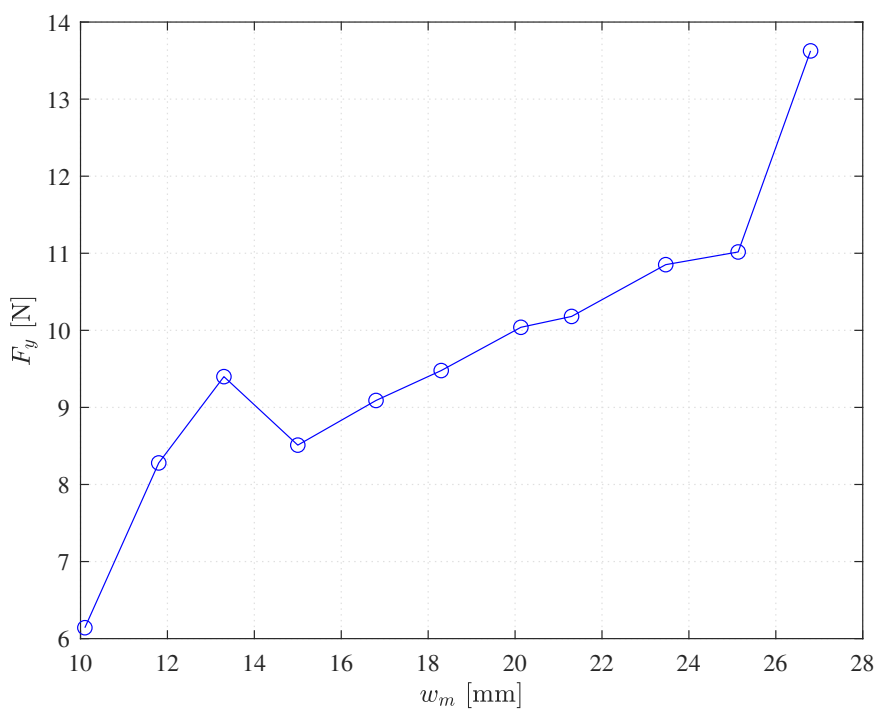
S délkou magnetů v axiálním směru by měla síla zpočátku růst, později se spíše ustálit až klesat. Až na malou odchylku graf 7.1 tento předpoklad potvrzuje. Maximum pro sílu F_y působící na rotor je proto očekáváno mezi 8 až 9 mm axiální délky magnetu.



Obr. 7.1: Vliv délky magnetu l_m na velikost síly F_y



Obr. 7.2: Vliv délky pólového nástavce l_n na velikost síly F_y

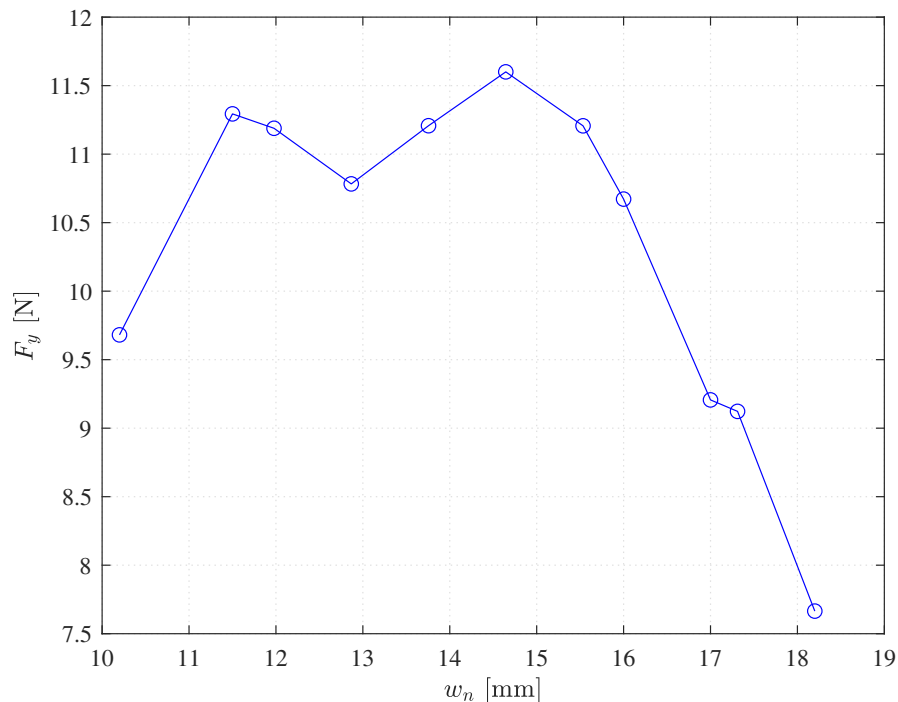


Obr. 7.3: Vliv šířky magnetu w_m na velikost síly F_y

Poměrně hladký průběh grafu 7.2 potvrzuje, že čím delší pólový nástavec, tím síla F_y působící na rotor klesá. Pólový nástavec má své výhody i nevýhody popsané v předešlých kapitolách. Jeho další výhodou je, že omezuje vliv tangenciální kolmé složky síly a snižuje úhel mezi celkovou silou působící na rotor F_q a silou směřující na střed $F_{||}$.

Dále byl simulován vliv šířky magnetu w_m na sílu F_y . Graf 7.3 má ve svém průběhu jednu větší odchylku. Ze zbylého průběhu se ale i tak dá usoudit, že se zvětšující se šířkou síla mírně roste. V tomto případě vzhledem původní šířce je růst už velmi malý.

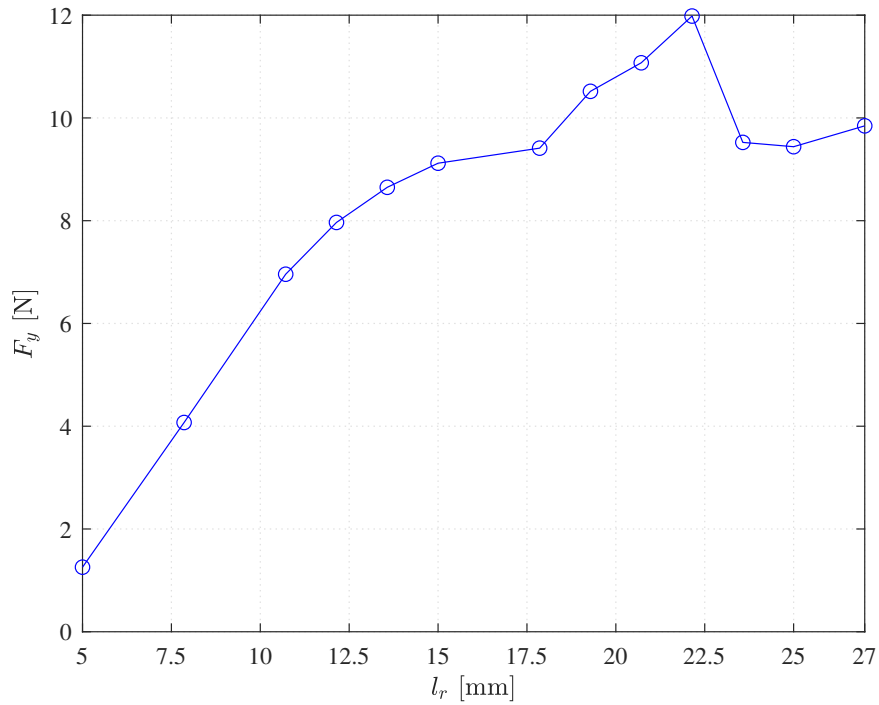
V předešlých kapitolách bylo řečeno, že pokud je šířka pólového nástavce w_n stejně velká jako šířka magnetu w_m , pak se magnetický tok více uzavírá na vnější straně. Simulace zjišťovala, jak se bude síla měnit s šířkou pólového nástavce blížíící se šířce magnetu. Graf 7.4 ukazuje, že zpočátku ještě síla roste a magnety jsou tak více využity, ale později významně klesá.



Obr. 7.4: Vliv šířky pólového nástavce w_n na velikost síly F_y

Pozornost byla také věnována délce rotoru. Byla provedena simulace pro nalezení maxima síly působící na rotor při délce rotoru l_r , která je kratší než délka statoru l_s . Tento výběr byl ovlivněn tím, že simulace pro každou další délku vyžadovala neúměrně dlouhý čas výpočtu souvisejícím s prudkým nárůstem hustoty tetrahedronů ve vodiči a vzduchové mezeře. Graf 7.5 potvrzuje, že pokud je rotor výrazně kratší

než stator při prodloužení síla roste. Pokud se už délka blíží délce statoru, začne síla klesat vlivem parazitních jevů na krajích vodiče.

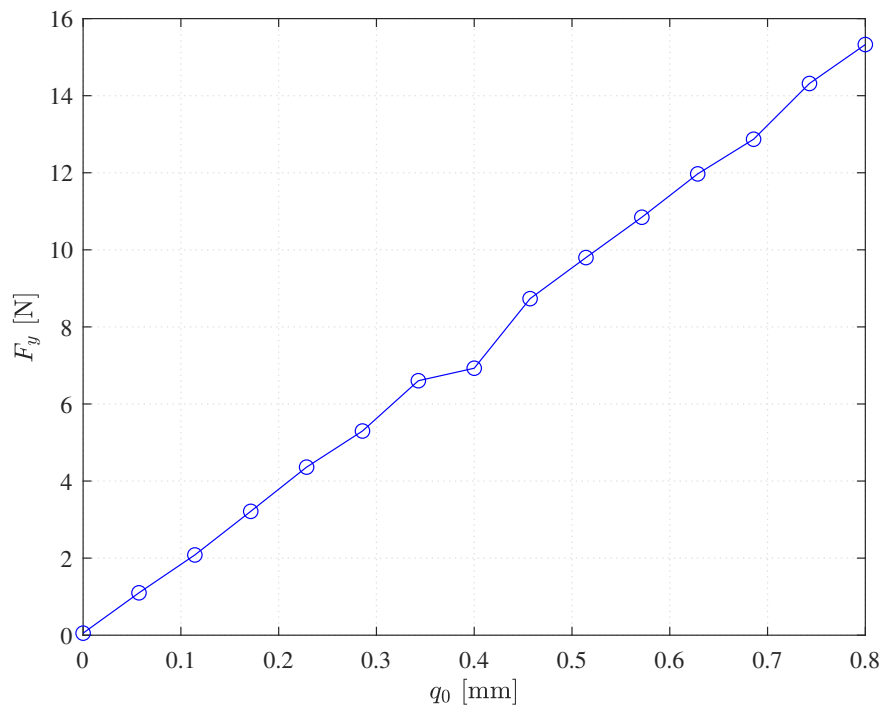


Obr. 7.5: Vliv délky rotoru l_r na velikost síly F_y

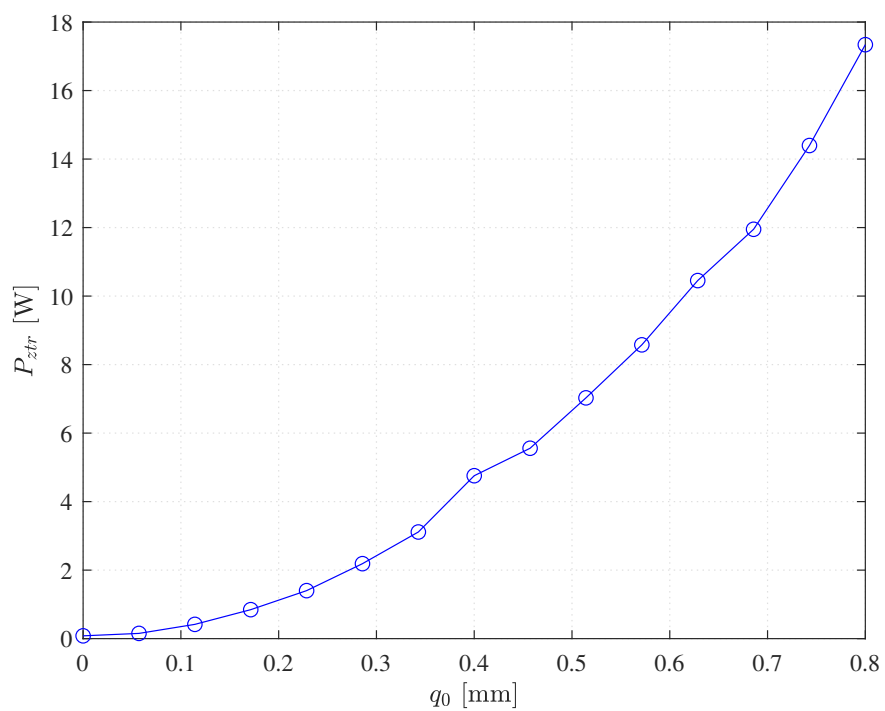
Simulace byly provedeny při rychlosti otáčení $n = 10000$ ot/min a výchylce $q_0 = 0,5$ mm ve směru osy x .

Citlivost ložiska byla zkoumána i pro změnu výchylky q_0 . Dříve byl uveden předpoklad, že se zvětšující se výchylkou bude síla působící na rotor růst. Graf 7.6 tento předpoklad potvrzuje a ukazuje, že růst síly je zhruba lineární.

Na ztrátách ložiska se výchylka projevuje zpočátku mírně, při větších výchylkách je vliv vychýlení významnější, graf 7.7.



Obr. 7.6: Vliv vychýlení rotoru q_0 na velikost síly F_y



Obr. 7.7: Ztráty ložiska P_{ztr} v závislosti na vychýlce q_0

8 Závěr

V první části byly popsány principy fungování čtyřech nejvýznamnějších typů magnetických ložisek. Jejich výhody a nevýhody byly přehledně zaznamenány a vzájemně porovnány.

Analýza se zabývala popisem převážně elektromagnetických dějů v elektrodynamickém ložisku. Byl využit zjednodušený postup pro výpočet, který neuvažuje řadu nepříznivých jevů. Cílem bylo odvodit vztah pro výpočet síly v rámci kvazistacionární analýzy, která popisuje závislost výsledné elektromagnetické síly na otáčkách při konstantním vychýlení.

V rámci návrhu byly použity jako podklad simulace a doporučení z nich vyplývající z práce [2]. Po výběru konfigurace ložiska a zvolení počátečních parametrů bylo možno systematicky dopočítat ostatní potřebné rozměry pro zjednodušený návrh, tab. 5.1 a 5.6, obr. 4.1. Zpětným dosazením rozměrů bylo možno pomocí analytických vztahů sestavit graf závislosti výsledné síly na rychlosti při konstantním vychýlení, obr. 6.4.

Při kvazistacionární analýze byl uvažován měnící se odpor proudové smyčky vlivem skin efektu a rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Indukčnost proudové smyčky byla ponechána neměnná, i když ve velmi vysokých otáčkách je taktéž do jisté míry ovlivněna skin efektem.

Bylo provedeno ověření vlastností metodou konečných prvků v prostředí Ansys Maxwell transient 3D. Pro správné provedení simulace bylo třeba vytvořit mesh tak, aby bylo respektováno chování vířivých proudů při skin efektu. Jemná mesh byla proto cílena ve vrstvách na vodič, vzduchovou mezeru a pólové nástavce. Zbytek sestavy má nastavenou mesh podle důležitosti.

Výsledky transientní analýzy ukázaly, že simulace ještě není dokonalá. I když některé průběhy ukázaly otáčkovou závislost, počátek průběhu síly v ose x se chová otáčkově nezávisle. Tato nejasnost je problém, který je potřeba pro správné provedení v budoucnu vyřešit.

Detailnější pohled se zaměřil na tvar proudovodné smyčky, která byla vykreslena na obrázku 6.20 a 6.21. Na takto detailním pohledu je vidět, že proudovodná dráha nemá hezky definovaný tvar a může se skládat z několika menších smyček.

Působení síly na rotor při vychýlení taktéž nesměřuje přímo na střed proti vychýlení, ale bylo ověřeno, že působí pod úhlem.

Oproti očekávání jsou ztráty v ložisku při simulaci podstatně vyšší. Takový rozdíl mohl být způsoben jak zjednodušením analýzy, tak možnými odchylkami při simulaci. Pro zjištění reálných ztrát je potřeba vytvořit laboratorní prototyp.

Pro zjištění, jakým způsobem změna rozměrů ovlivňuje chování ložiska, byla provedena citlivostní analýza. Tranzientní analýza je poměrně náročná na výpočet

i v dnešní době. Pro simulaci řady parametrů v nějakém rozumném čase je proto zapotřebí velké výpočetní kapacity.

Grafické průběhy se podařilo nasimulovat tak, aby se z nich daly vyčíst potřebné informace. Původní simulace z práce [2] se s určitými odchylkami podařilo potvrdit. Je možno konstatovat, že při správně nastavené mesh a dostatečném výpočetním výkonu je možné tuto metodu použít pro optimalizaci rozměrů ložiska.

Seznam použitých zdrojů

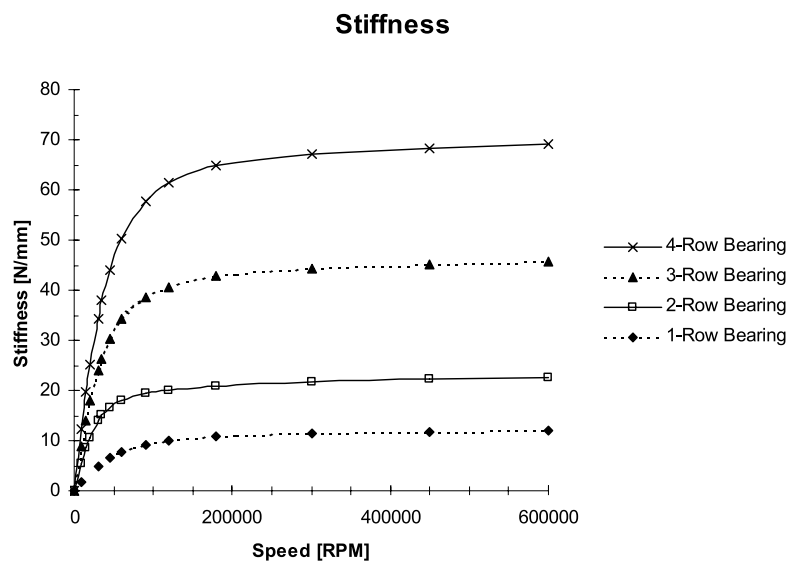
- [1] GRANSTRÖM, Marcus. Design and Analysis of a 1-DOF magnetic bearing. Stockholm, Sweden, 2011. Master of Science Thesis. KTH Industrial Engineering and Management.
- [2] A. LEMBKE, Torbjörn. *Design and Analysis of a Novel Low Loss Homopolar Electrodynamic Bearing*. Stockholm, Sweden, 2005. Doctoral Dissertation. Electrical Machines and Power Electronics Department of Electrical Engineering, KTH Royal Institute of Technology.
- [3] 20 MW Flywheel Frequency Regulation Plant. *SmartGrid.gov* [online]. [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: https://www.smartgrid.gov/files/documents/OE0000200_HazleSpindle_FactSheet.pdf
- [4] SARKAR, Aditya. *Kinetic Energy Recovery Systems in Formula 1* [online]. Stanford University, 2016 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <http://large.stanford.edu/courses/2015/ph240/sarkar1/>
- [5] DOBROVOLNÝ, Ondřej. *Moderní trendy v konstrukci kluzných ložisek turbodmychadel* [online]. Brno, 2014 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/32560>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Jiří Knotek.
- [6] TRNAVSKÝ, Jiří. Spalovací mikroturbíny – lepší než plynové motory. *Energie21* [online]. 2015 [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://www.energie21.cz/spalovaci-mikroturbiny-lepsi-nez-plyнове-motory/>
- [7] GILLETTE, Stephen. Microturbine Technology Matures. *POWER* [online]. 2010 [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://www.powermag.com/microturbine-technology-matures/>
- [8] SAFAEIAN, Reza a Hossein HEYDARI. Optimal design of a compact passive magnetic bearing based on dynamic modelling. *IET Journals* [online]. 2019 [cit. 2021-04-16]. ISSN 1751-8660. Dostupné z: doi:10.1049/iet-epa.2018.5674
- [9] CUI, Qingwen. *Stabilization of electrodynamic bearings with active magnetic dampers*. Lausanne, 2016. PhD thesis. École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [10] TOBE, Frank. Permanent Magnet Bearing Breakthrough. *Design World* [online]. 2014 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.designworldonline.com/permanent-magnet-bearing-breakthrough/>
- [11] PESLAR, Jiří. *Aerostatická, aerodynamická a magnetická ložiska*. Brno, 2008. Přehledový článek . Ústav konstruování, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně.
- [12] MCMULLEN, Patrick, Vinh VUONG a Lawrence HAWKINS. Flywheel Energy

- Storage System with AMB's and Hybrid Backup Bearings. *CALNETIX TECHNOLOGIES* [online]. Cerritos, California, USA, 2006 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: https://www.calnetix.com/sites/default/files/13_0.pdf
- [13] IMPINNA, Fabrizio, *Electrodynamic Bearings Modeling and Design*. Turin, 2010. PhD thesis. Politecnico Di Torino.
- [14] NIKOLAJSEN, Jorgen L. *A magnetic bearing based on eddy-current repulsion*. Texas A&M Univ. College Station, TX, United States, 1987.
- [15] NIKOLAJSEN, Jorgen L. *An AC-electromagnetic bearing for flywheel energy storage in space*. Texas A&M Univ. College Station, TX, United States, 1993.
- [16] K. A., CONNOR a TICHY J. A. *Analysis of an Eddy Current Journal Bearing*. Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, 1988.
- [17] BORISAVLJEVIC, A., H. POLINDER a J. A. FERREIRA. *On the Speed Limits of Permanent-Magnet Machines*. In IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 1, pp. 220-227, Jan. 2010, doi: 10.1109/TIE.2009.2030762.
- [18] KLUYSKENS, V., C. DUMONT a B. DEHEZ. *Description of an Electrodynamic Self-Bearing Permanent Magnet Machine*. In IEEE Transactions on Magnetics, vol. 53, no. 1, pp. 1-9, Jan. 2017, Art no. 8100409, doi: 10.1109/TMAG.2016.2615598.
- [19] DUMONT, C., V. KLUYSKENS a B. DEHEZ. *Impact of the yoke material on the performance of wounded electrodynamic bearings*. International Symposium on Magnetic Bearings. 2014.
- [20] GIRARDELLO DETONI, Joaquim. *Developments on Electrodynamic Levitation of Rotors*. Turin, 2012. PhD dissertation. POLITECNICO DI TORINO.
- [21] POWELL, J. a G. DANBY. *Electromagnetic Inductive Suspension and Stabilization System for a Ground Vehicle*. 1969. U.S. Patent 3 470 828.
- [22] POST, Richard. *Dynamically stable Magnetic Suspension/Bearing System*. 1996. US patent No. 5495221.
- [23] DUMONT DE CHASSART, Corentin. *Heteropolar null-flux electrodynamic bearings for the passive radial suspension of rotors*. Louvain, 2016. PhD thesis. École polytechnique de Louvain.
- [24] TONOLI, A., N. AMATI, F. IMPINNA a J. DETONI. 2011. *A Solution for the Stabilization of Electrodynamic Bearings: Modeling and Experimental Validation*. Journal of vibration and acoustics. 133. 10.1115/1.4002959.
- [25] PYRHÖNEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOVÁ. *Design of Rotating Electrical Machines*. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley, 2008. ISBN 978-0-470-69516-6.
- [26] LARSONNEUR, René. *Design and control of active magnetic bearing systems for high speed rotation*. Zürich, 1990. PhD thesis. Swiss Federal Institute of Technology Zurich.

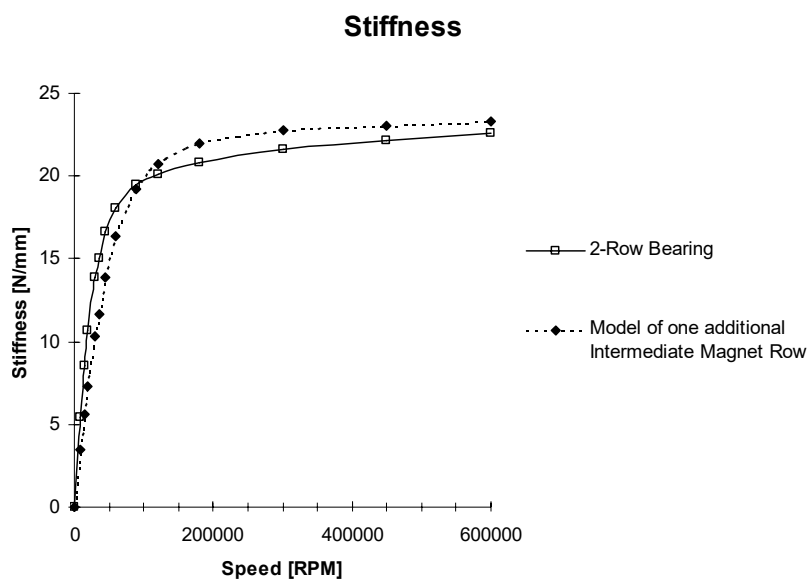
- [27] FILATOV, Alexei. “Null-E” Magnetic Bearings. Virginia, 2002. Doctoral Dissertation. University of Virginia School of Engineering and Applied Science.
- [28] Introduction to the Copper Conductivity Materials Database. *Copper Development Association* [online]. Hemel Hempstead [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://copperalliance.org.uk/about-copper/conductivity-materials/>
- [29] *Physics of Nondestructive Evaluation* [online]. Iowa State University [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: https://www.nde-ed.org/Physics/Materials/Physical_Chemical/Electrical.xhtml
- [30] TUMAŃSKI, Sławomir. Handbook of Magnetic Measurements. *Routledge Handbooks Online* [online]. 2016 [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://www.routledgehandbooks.com/doi/10.1201/b10979-4>
- [31] S., Bukovnik, Offner G., Diemath A. a Smolik L. *Turbocharger Dynamic Analysis: Advanced Design Simulation in Time Domain Using CFD Predicted Thermal Boundary Conditions* [online]. 2017 [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: doi:10.24352/UB.OVGU-2017-117
- [32] Vlastnosti prvků [online]. [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/>
- [33] VYCHOPEŇ, DAVID. *Svařování - technologie, značení, výpočty*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství.
- [34] N., Takahashi, Morimoto H., Yunoki Y. a Miyagi D. *Effect of shrink fitting and cutting on iron loss of permanent magnet motor* [online]. Okayama University, 2008 [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmmm.2008.04.170
- [35] *Arnold Magnetic Technologies* [online]. Rochester, USA [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/11/N52-151021.pdf>
- [36] LOPES, Marcelo de Almeida, Guilherme G. SOTELO, Elkin RODRIGUEZ a Richard M. STEPHAN. *An Electrodynamic Magnetic Bearing* [online]. 2014 [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: doi:10.13140/2.1.2169.4401

Přílohy

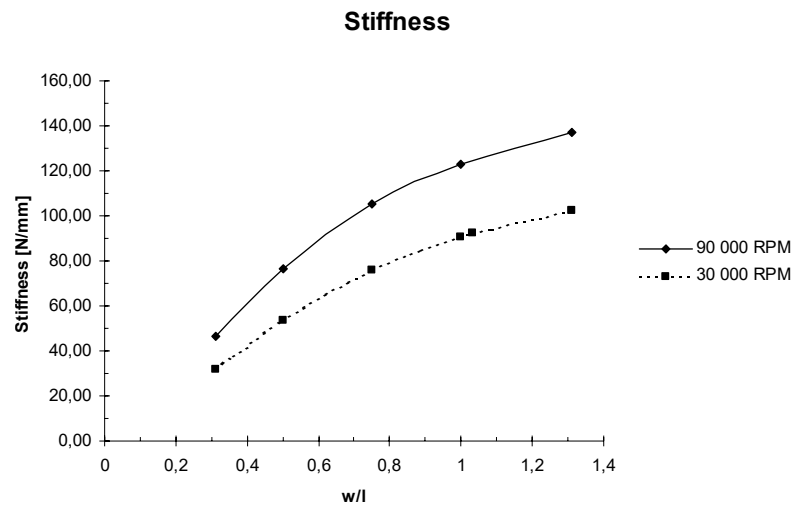
Příloha A



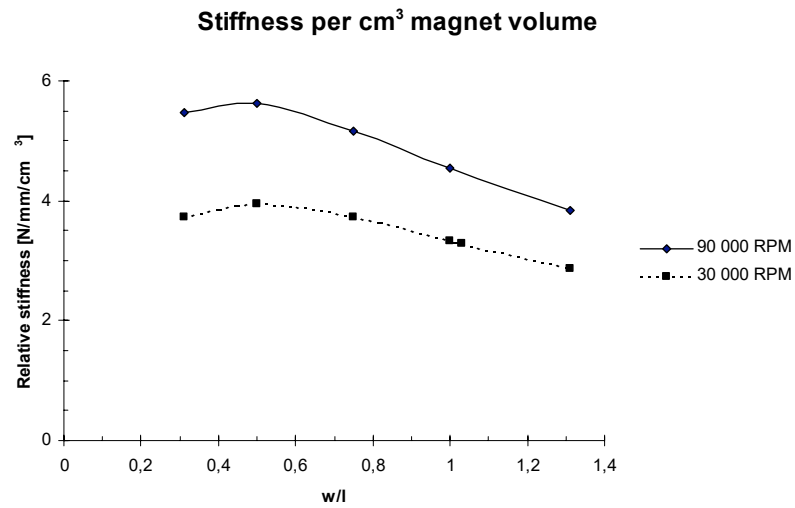
Obr. 8.1: Závislost tuhosti na otáčkách pro různý počet radiálních magnetů [2]



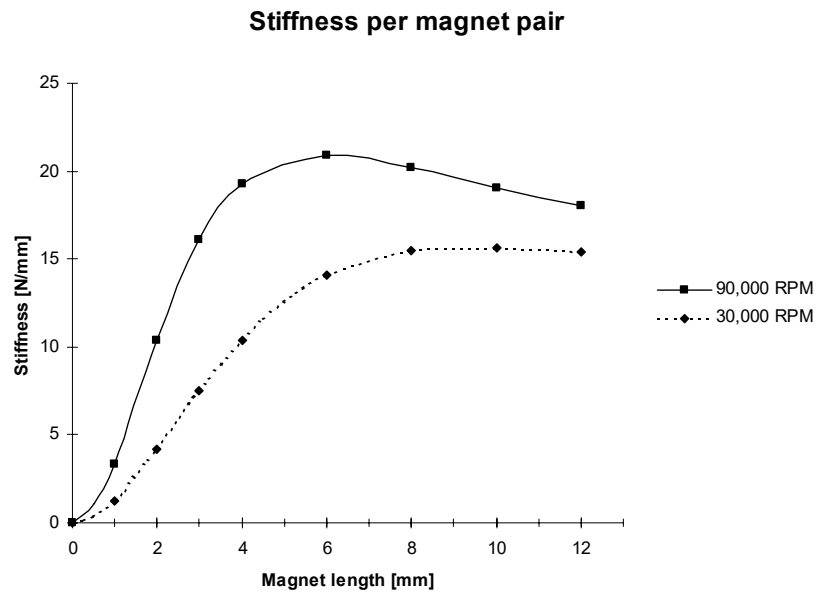
Obr. 8.2: Vliv přidání jednoho magnetu k původním dvěma, je možno vidět jak přidání magnet dosahuje stejné tuhosti jako zbylé dva [2]



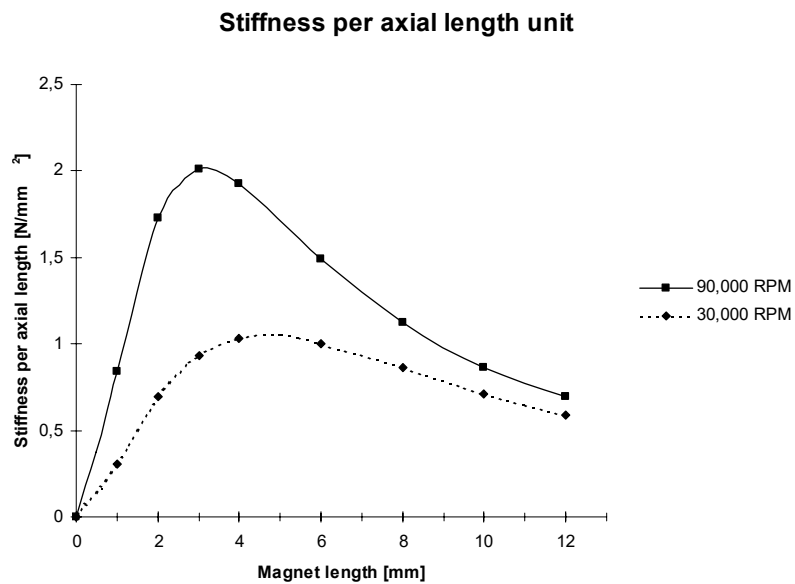
Obr. 8.3: Tuhost v závislosti na šířce magnetu [2]



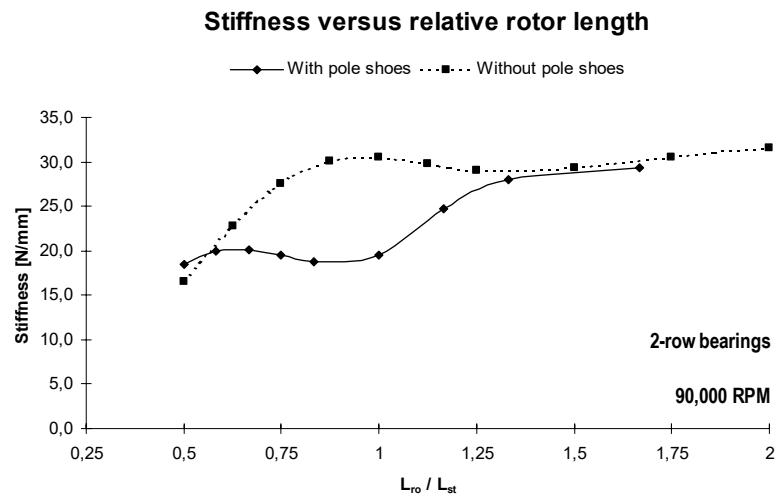
Obr. 8.4: Relativní tuhost v závislosti na šířce magnetu [2]



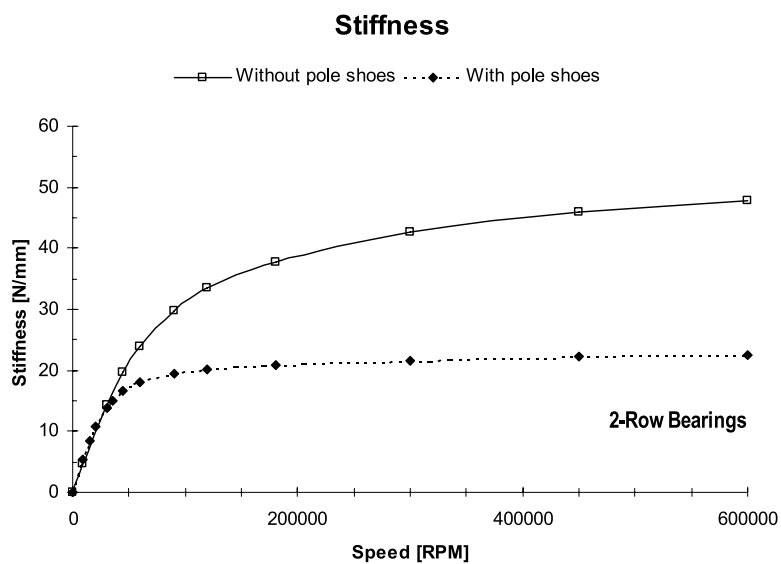
Obr. 8.5: Tuhost v závislosti na délce magnetu [2]



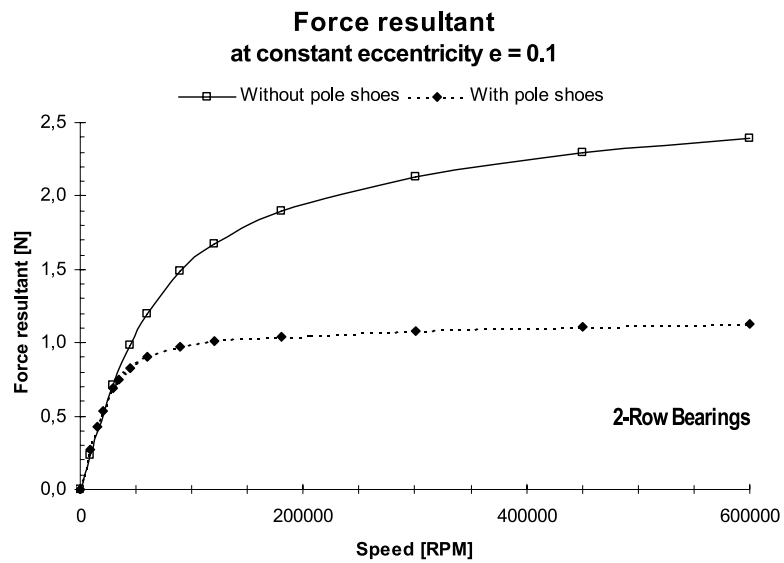
Obr. 8.6: Relativní tuhost v závislosti na délce magnetu [2]



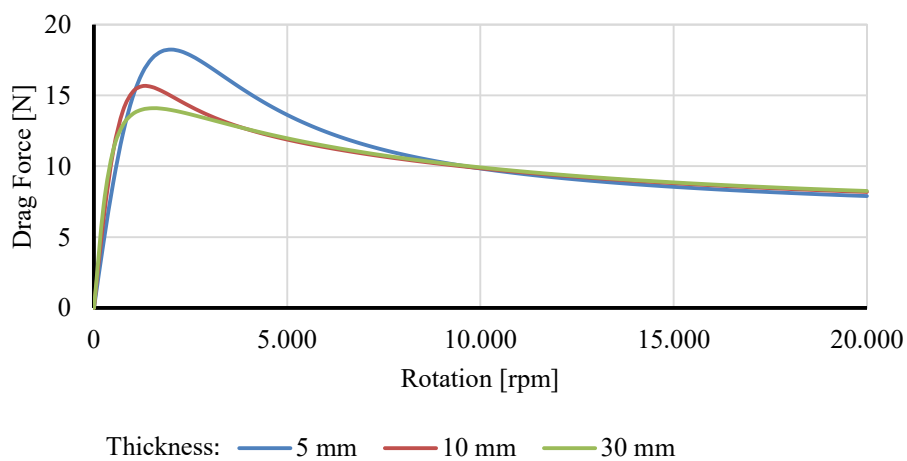
Obr. 8.7: Tuhost v závislosti na poměru délky rotoru ku statoru [2]



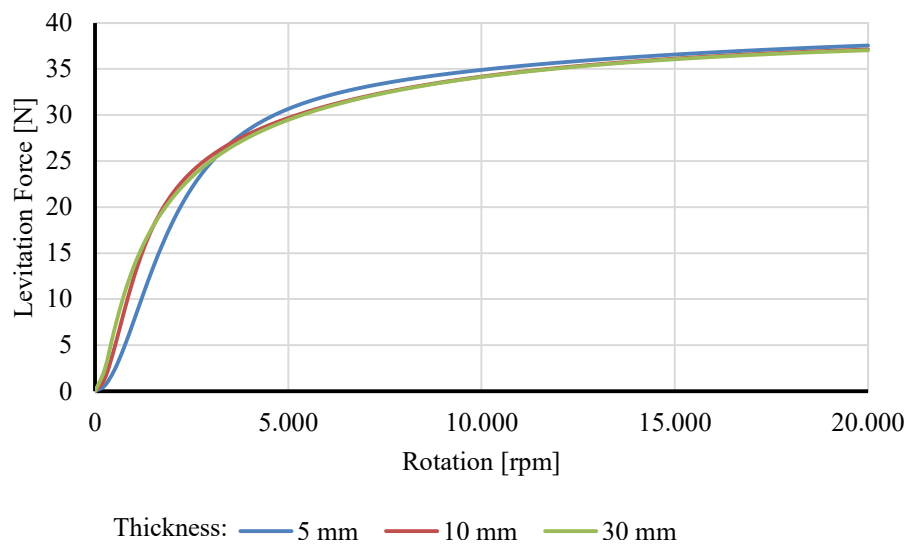
Obr. 8.8: Tuhost v závislosti na tom, zda byly použity pólové nástavce [2]



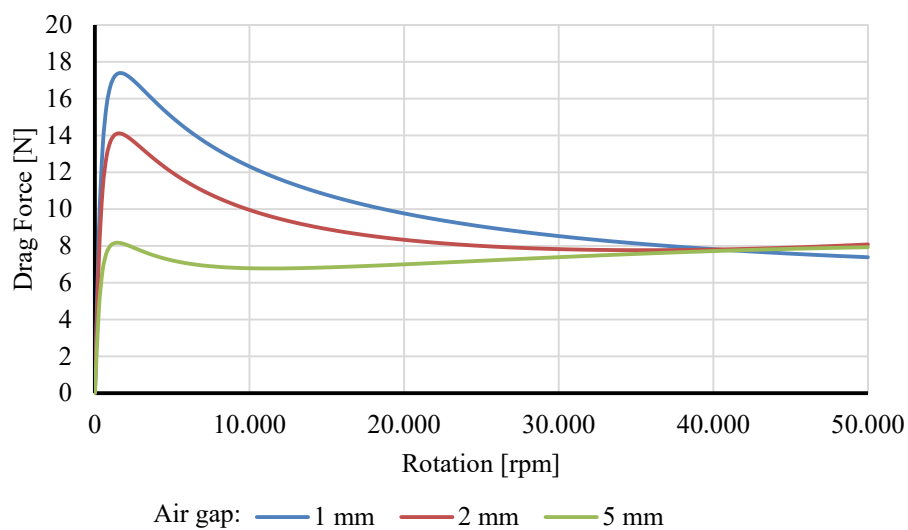
Obr. 8.9: Výsledná síla při konstantním vychýlení v závislosti na tom, zda byly použity pólové nástavce [2]



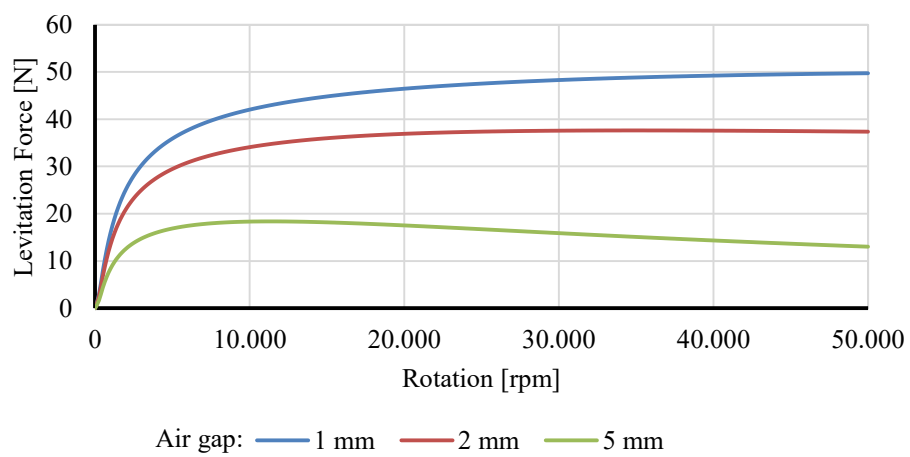
Obr. 8.10: Tažná síla při konstantním vychýlení v závislosti na tloušťce vodiče [36]



Obr. 8.11: Tažná síla při konstantním vychýlení v závislosti na tloušťce vodiče [36]



Obr. 8.12: Tažná síla při konstantním vychýlení v závislosti na šířce vzduchové mezery [36]



Obr. 8.13: Levitační síla při konstantním vychýlení v závislosti na šířce vzduchové mezery [36]