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

SIMULAČNÍ MODEL LEVITAČNÍHO MAGNETU A MAGNETICKÉHO LOŽISKA
SIMULATION MODEL OF LEVITATION MAGNET AND MAGNETIC BEARING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Karel Stuchlý
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2016

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**
Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Karel Stuchlý ***ID:*** 164907
Ročník: 3 ***Akademický rok:*** 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Simulační model levitačního magnetu a magnetického ložiska

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte literární rešerši na téma konstrukce a simulace aktivních magnetické ložisek.
2. V programu Simplorer a Maxwell vytvořte model levitačního magnetu a proveďte simulaci.
3. Vytvořte MKP model magnetického ložiska a proveďte jeho simulaci.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] A. Chiba, T. Fukao, O. Ichikawa, M. Oshima, M. Takemoto, D.G. Dorrell, Magnetic bearings and bearingless drives. Elsevier 2005.

[2] KADLEC, Michal. Levitační elektromagnet. Brno, 2011. Bakalářská práce . VUT Brno.

[3] B. Polajzer, Magnetic Bearings, Theory and Applications, Rijeka, Croatia, InTech 2010

Termín zadání: 21.9.2015 ***Termín odevzdání:*** 31.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.
Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D., *předseda oborové rady*

UPOZORNĚNÍ:
Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Cílem této bakalářské práce je vypracovat literární rešerši na téma konstrukce a možnosti simulace aktivních magnetických ložisek. Fyzicky bude toto magnetické ložisko součástí čerpadla čerpající mléko v potravinářském průmyslu. Klasická mazná ložiska by mohla tekutinu znehodnotit. V rámci práce je provedena simulace levitačního elektromagnetu v programu ANSYS Simplorer a Maxwell. Následně jsou poznatky této simulace aplikovány na simulaci dvouosého magnetického ložiska, které je odsimulováno.

Abstract

The aim of this Bachelor thesis is to make a review about konstruction and options of simulation of active magnetic bearing. This active magnetic bearing will be a part of milk pump in food industry. A traditional oil lubricated bearing could devalue a fluid. As a part of the work is carried out a simulation of levitation electromagnet by a computer program ANSYS Simplorer and Maxwell. Consequently, knowledge of this simulation are applied to simulate two-axis magnetic bearing, which is simulated.

Klíčová slova

AMB; ANSYS; konstrukce AML; ložisko; simulace

Keywords

AMB; ANSYS; bearing; construction of AMB; simulation

Bibliografická citace

STUCHLÝ, K. *Simulační model levitačního magnetu a magnetického ložiska.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 56 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Simulační model levitačního magnetu a magnetického ložiska jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne …… Podpis autora ……..

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Rostislavu Huzlíkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne …… Podpis autora ……..

OBSAH

1 ÚVOD **13**

2 VSTUP DO PROBLEMATIKY MAGNETICKÝCH LOŽISEK **14**

2.1 ZÁKLADNÍ FUNKČNÍ PRINCIP MAGNETICKÉHO LOŽISKA **14**

2.2 SILOVÉ PŮSOBENÍ ELEKTROMAGNETU **15**

3 MOŽNOSTI MAGNETICKÝCH LOŽISEK **17**

3.1 USPOŘÁDÁNÍ STATOROVÉHO VINUTÍ RADIÁLNÍCH LOŽISEK **17**

3.1.1 HOMOPOLÁRNÍ 17

3.1.2 HETEROPOLÁRNÍ 18

3.2 OPTIMÁLNÍ POČET STATOROVÝCH PÓLŮ KOMPAKTNÍHO AKTIVNÍHO RADIÁLNÍHO MAGNETICKÉHO LOŽISKA **18**

4 PRAKTICKÁ ŘEŠENÍ MAGNETICKÝCH LOŽISEK **20**

4.1 TROJOSÉ MAGNETICKÉ LOŽISKO **20**

4.1.1 STRUKTURA LOŽISKA 21

4.1.2 PRINCIP LEVITAČNÍ SÍLY V RADIÁLNÍM SMĚRU 21

4.1.3 PRINCIP LEVITAČNÍ SÍLY V AXIÁLNÍM SMĚRU 22

4.2 KONICKÉ AKTIVNÍ MAGNETICKÉ LOŽISKO **22**

4.2.1 POROVNÁNÍ LOŽISEK 23

4.2.2 STRUKTURA AKTIVNÍHO DRÁPKOVÉHO KONICKÉHO MAGNETICKÉHO LOŽISKA 23

4.2.3 FUNKČNÍ PRINCIP 24

5 ŘÍZENÍ MAGNETICKÉ LEVITACE **26**

5.1 ZÁKLADNÍ DĚLENÍ SPOJITÝCH REGULÁTORŮ **26**

5.1.1 P-REGULÁTOR 26

5.1.2 I-REGULÁTOR 26

5.1.3 D-REGULÁTOR 27

5.2 PID-REGULÁTOR **28**

5.3 PD-REGULÁTOR **28**

5.4 STAVOVÉ ŘÍZENÍ LOŽISKA **29**

6 SIMULAČNÍ PROGRAMY ANSYS **31**

6.1 ANSYS MAXWELL **31**

6.1.1 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (MKP) 31

6.2 ANSYS SIMPLORER **31**

7 TVORBA MODELU LEVITAČNÍHO MAGNETU A JEHO SIMULACE **33**

7.1 MATEMATICKÉ ROVNICE SYSTÉMU LEVITAČNÍHO MAGNETU **33**

7.2 APLIKACE MATEMATICKÉHO MODELU V PROGRAMU ANSYS SIMPLORER **34**

7.3 MODEL MAGNETU V ANSYS MAXWELL **37**

7.4 APLIKACE MODELU DO PROSTŘEDÍ ANSYS SIMPLORER **38**

7.4.1 IMPLEMENTACE MODELU POMOCÍ „EQUIVALENT CIRCUIT“ 38

7.4.2 PROPOJENÍ MODELU 38
7.5 INDUKČNOST MODELU LEVITAČNÍHO MAGNETU 40
7.5.1 ANALYTICKÝ VÝPOČET 40
7.5.2 VÝPOČET POMOCÍ SIMULACE 41
7.6 GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ SIMULACÍ 42
8 MKP MODEL MAGNETICKÉHO LOŽISKA A JEHO SIMULACE 43
8.1 MODEL LOŽISKA V ANSYS MAXWELL 43
8.2 SIMULACE LOŽISKA V ANSYS SIMPLORER 44
8.2.1 SESTAVA SIMULAČNÍHO MODELU 44
8.2.2 VYHODNOCENÍ ZTRÁT MODELU LOŽISKA 45
8.3 INDUKČNOST MODELU MAGNETICKÉHO LOŽISKA 47
8.3.1 ANALYTICKÝ VÝPOČET 47
8.4 GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ LOŽISKA 49
9 ZÁVĚR 52
LITERATURA 53

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Zobrazení systému a) jednoho elektromagnetu a tělesa, b) dvou elektromagnetů a tělesa (převzato z [1] - upraveno) 14

Obr. 2: Grafické zobrazení působení sil mezi tělesem a a) jedním elektromagnetem b) dvěma nabuzenými elektromagnety (převzato z [1] – upraveno) 15

Obr. 3: Příčný a podélný řez homopolárního aktivního magnetického ložiska (převzato z [2]) ... 17

Obr. 4: Příčný a podélný řez heteropolárního aktivního magnetického ložiska (převzato z [2]) .. 18

Obr. 5: Příčný řez aktivního magnetického ložiska a) třípólového, b) čtyřpólového (převzato z [3] - upraveno) 19

Obr. 6: Nákres systému a) klasický pěti-jednotkový systém s axiálním diskem, b) čtyř-jednotkový systém s válcovým diskem (převzato z [4] - upraveno) 20

Obr. 7:Nákres tříprvkového trojosého magnetického ložiska (převzato z [4] - upraveno) 21

Obr. 8: Struktura a princip ložiska v a) radiálním směru, b) axiálním směru (převzato z [4] - upraveno) 21

Obr. 9: Struktura aktivního drápkového konického magnetického ložiska a) celku, b) statoru (převzato z [5] - upraveno) 23

Obr. 10: Detail konické části aktivního ložiska (převzato z [5] - upraveno) 24

Obr. 11: Konfigurace magnetických pólů (Převzato z [5] - upraveno) 24

Obr. 12: Uzavírající se smyčka magnetického toku aktivním konickým magnetickým ložiskem (převzato z [5] - upraveno) 25

Obr. 13: Schéma zapojení P-regulátoru (převzato z [11] - upraveno) 26

Obr. 14: Schéma zapojení I-regulátoru (převzato z [11] - upraveno) 27

Obr. 15: Schéma zapojení D-regulátoru 27

Obr. 16: Schéma zapojení PID-regulátoru (převzato z [11] - upraveno) 28

Obr. 17: Blokový diagram magnetického ložiska (převzato z [6] - upraveno) 28

Obr. 18: Blokový diagram stavově popsaného systému (převzato z [12] - upraveno) 29

Obr. 19: Princip stavového řízení (převzato z [12] - upraveno) 30

Obr 20: Bločky používané při tvorbě simulace v ANSYS Simplorer s využitím Continuous Blocks 35

Obr. 21: Simulace v programu ANSYS Simplorer s využitím „Continuous Blocks“ 36

Obr. 22: Model levitačního elektromagnetu v programu ANSYS Maxwell 37

Obr. 23: Bločky používané při tvorbě simulace v ANSYS Symplorer pomocí „Equivalent Circuit“ 39

Obr. 24: Model levitačního magnetu v programu ANSYS Simplorer ve spolupráci s Maxwell 40

Obr. 25: SubCircuit řízení levitačního magnetu *40*

Obr. 26: Průběh polohy levitačního elektromagnetu v simulaci pomoci MKP v ANSYS Maxwell a Simplorer *42*

Obr. 27: Průběh proudu levitačního elektromagnetu v simulaci pomoci MKP v ANSYS Maxwell a Simplorer *42*

Obr. 28: Model magnetického ložiska se znázorněnými směry proudů vinutí *43*

Obr. 29: Model levitačního ložiska v programu ANSYS Simplorer ve spolupráci s Maxwell *44*

Obr. 30: Schéma střední siločáry *48*

Obr. 31: Průběh velikosti magnetické indukce ve statorovém zubu v čase při střídě 0,5 a střední hodnotě proudu 1,46 A *50*

Obr. 32: Průběh velikosti magnetické indukce ve statorovém zubu v čase při střídě 0,25 a střední hodnotě proudu 0,62 A *50*

Obr. 33: Zobrazení magnetických siločár a velikosti magnetické indukce v ložisku *51*

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.: Zadané a vypočtené hodnoty analytického výpočtu indukčnosti levitačního magnetu.....41

Tab. 2: Známé a vypočtené hodnoty výpočtu indukčnosti levitačního magnetu pomocí simulace 41

Tab. 3: Definované parametry modelu.....45

Tab. 4: Hodnoty získané pomocí simulace z modelu 01_VYKONY_MAX_vy a výpočty ztrát 46

Tab. 5: Hodnoty získané pomocí simulace z modelu 02_VYKONY_NUL_vy a výpočty ztrát.....46

Tab. 6: Hodnoty získané pomocí simulace z modelu 03_STRIDA05_ NUL _vy a výpočty ztrát ...46

Tab. 7: Hodnoty získané pomocí simulace z modelu 04_STRIDA025_ NUL _vy a výpočty ztrát .47

Tab. 8: Hodnoty získané pomocí simulace z modelu 05_STRIDA025_POSUV_ NUL _vy a výpočty ztrát.....47

Tab. 9: Zadané hodnoty pro výpočet magnetické indukce 49

Tab. 10: Vypočtené hodnoty.....49

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Název	Jednotka
A	matice vnitřních vazeb	[-]
B	magnetická indukce	[T]
B_1	vstupní matice vazeb	[-]
C	výstupní matice vazeb	[-]
C2	označení kondenzátoru	[F]
F_-	síla v záporném směru osy	[N]
F_+	síla v kladném směru osy	[N]
F_a	síla axiální	[N]
F_{EM}	elektromagnetická síla	[N]
F_G	tíhová síla	[N]
F_M	magnetická síla	[N]
F_{rad}	síla radiální	[N]
F_r	rušivá síla	[N]
F_v	výsledná síla	[N]
F_x	síla ve směru osy X	[N]
F_y	síla ve směru osy Y	[N]
F_z	síla ve směru osy Z	[N]
H_{fe}	intenzita magnetického pole v železe	[A/m]
H_p	přenosová funkce	[-]
H_v	intenzita magnetického pole ve vzduchové mezeře	[A/m]
I	elektrický proud	[A]
I_-	proud působící v záporném směru osy	[A]
I_+	proud působící v kladném směru osy	[A]
I_0	budící proud	[A]
$I_{63\%}$	hodnota proudu vinutím v čase τ	[A]
I_C	řídící proud	[A]
$I_{ef,dio}$	efektivní hodnota proudu diodou	[A]
I_{max}	maximální hodnota proudu vinutím	[A]
$I_{stř,dio}$	střední hodnota proudu diodou	[A]
I_{vin}	proud jedním vinutím	[A]
K_p	konstanta zesílení proporčního členu	[-]
L	indukčnost	[H]
L_l	indukčnost ložiska	[H]
N_l	počet závitů dvou cívek ložiska	[-]

Symbol	Název	Jednotka
N_x	počet vodičů vinutí v ose X	[-]
N_y	počet vodičů vinutí v ose Y	[-]
N_z	počet závitů cívky elektromagnetu	[-]
P_{1-4}	příkon jednotlivých vinutí ložiska	[W]
P_{celk}	celkový příkon ložiska	[W]
R1,R2	označení rezistorů	[Ω]
R_{cu}	odpor cívek	[Ω]
R_m	magnetický odpor	[H^{-1}]
$R_{m\delta}$	magnetický odpor na vzduchové mezeře	[H^{-1}]
R_r	matice regulace	[-]
$R_{vin,l}$	odpor vinutí magnetického ložiska	[Ω]
$R_{vin,m}$	odpor vinutí levitačního magnetu	[Ω]
S_{fe}	průřez jádra magnetu	[m^2]
$S_{stř}$	střední průřez magnetického toku ložiska	[m^2]
T_d	časová konstanta derivačního členu	[s]
U1	vstupní napětí	[V]
U2	výstupní napětí	[V]
U_p	prahové napětí diody	[V]
Z	okamžitá poloha	[m]
Z_0	počáteční poloha	[m]
a	zrychlení	[ms^{-2}]
a_j	šířka jádra levitačního magnetu	[m]
b	výška jádra levitačního magnetu	[m]
c	délka jádra levitačního magnetu	[m]
d_{in}	vnitřní průměr statoru	[m]
d_{out}	vnější průměr statoru	[m]
i(t) nebo i	okamžitá velikost proudu	[A]
k	směrnice přímky	[-]
k_i	silově - proudový faktor	[-]
k_i	silově - dislokační faktor	[-]
l_1	délka 1	[m]
l_2	délka 2	[m]
l_3	délka 3	[m]
l_{fe}	střední délka siločáry v železe	[m]
$l_{lož}$	hloubka ložiska	[m]
l_m	výška kolejnice	[m]

Symbol	Název	Jednotka
$l_{stř}$	střední délka siločáry ložiska	[m]
l_v	střední délka siločáry ve vzduchu	[m]
r_0	zesilovací konstanta	[-]
r_1	derivační konstanta	[-]
r_1	poloměr délky 1	[m]
r_{-1}	integrační konstanta	[-]
r_2	poloměr délky 2	[m]
r_{vin}	dynamický odpor diody	[Ω]
u_1	vektor vstupních signálů	[-]
u(t) nebo u	okamžitá velikost napětí	[V]
u_i	indukované napětí	[V]
v	rychlost	[ms^{-1}]
x*	referenční pozice	[m]
y	vektor výstupních signálů	[-]
α	vrcholový úhel	[°]
δ_x	relaticní chyba	[%]
μ_0	permeabilita vakua	[H/m]
μ_{rpl}	permeabilita plechu ložiska	[H/m]
$\tau_{0,1,2}$	časová konstanta 0, 1, 2	[s]
τ_i	časová konstanta	[s]
Φ_b	magnetický tok z permanentního magnetu	[Wb]
χ	stavový vektor	[-]
$\Psi_{y/z}$	spřažený magnetický tok osami	[Wb]
ΔP_{1diod}	ztráty na jedné diodě	[W]
ΔP_{1vin}	odporové ztráty jednoho vinutí	[W]
ΔP_{celk}	celkové ztráty ložiska	[W]
ΔP_{CL}	CoreLoss	[W]
ΔP_{diod}	celkové ztráty na diodách ložiska	[W]
ΔP_{SL}	SoliLoss	[W]
ΔP_{vin}	celkové ztráty na vinutích ložiska	[W]

Zkratka	**Význam**
A+RML	axiální a radiální magnetické ložisko
AML	axiální magnetické ložisko
C	kombinované ložisko
$C_{1,2}$	označení cívek
D	derivační
G_c	přenos řízení
I	integrační
L1,2,3,4	označení magnetické pólové dvojice
MKP	metoda konečných prvků
N	severní magnetický pól
P	proporciální
PD	proporciálně derivační
PI	proporciálně integrační
PID	proporciálně, integračně derivační
R1,2,3,4	označení magnetické pólové dvojice
RML	radiální magnetické ložisko
RRA	radiální, radiální, axiální
S	jižní magnetický pól
$S_{1,2}$	označení statorových zubů

1 Úvod

Bakalářská práce se zabývá konstrukcí aktivních magnetických ložisek, jež jsou provozována na principu vzniku magnetického pole kolem vodiče protékaným proudem a jeho silovém působení na rotující objekt.

První část bakalářské práce je věnovaná principiálním vlastnostem magnetických ložisek a jejich možným konstrukčním řešením, mezi něž spadá trojosé magnetické ložisko a konické magnetické ložisko. Dále jsou v práci naznačené možnosti řízení magnetické levitace.

V druhé části práce je provedena simulace levitačního magnetu v prostředí ANSYS Simplorer pomocí matematického modelu. Model je dále nahrazen simulací v programu ANSYS Maxwell a propojen s prostředím Simplorer pomocí „Equivalent Circuit“, přičemž je popsán postup jeho sestavení. Model je odsimulován a připojen na řídicí systém.

Třetí část je věnovaná tvorbě simulačního modelu dvouosého magnetického ložiska. Je vytvořen jeho model v ANSYS Maxwell a opět implementován do ANSYS Simplorer, tentokrát však pomocí „Transient Cosimulation“ a to z důvodu umožnění zobrazení vířivých a hysterezních ztrát. Model je připraven pro připojení k řízení.

Jak u modelu levitačního magnetu, tak u modelu ložiska je ověřena reálnost simulací pomocí analytických výpočtů magnetických indukčností vinutí.

Magnetická ložiska nabízejí nesčetné množství možností a výhod oproti klasickým mazným ložiskům. Magnetické ložiska jsou průmyslově využívaná více jak třicet let, ovšem z mnoha důvodů, mezi něž spadá i pořizovací a provozní cena, se jejich uplatnění omezovalo jen do aplikací, kde takzvaně nebylo zbytí. Příkladem je provoz vysokorychlostních strojů.

První vědecký záznam týkající se magnetických ložisek je datován do roku 1842, kdy vyšel první vědecký článek na toto téma a autorem byl anglický vědec S. Ernshaw. Článek se zabývá bezkontaktní podporou tělesa. První praktické práce vznikaly v 50. letech 20. století přičiněním profesora Jesse Beamse. Později v 70. a 80. letech 20. století se začaly magnetické ložiska uplatňovat i v kosmických projektech NASA. První komerční magnetické ložiska se objevily v roce 1976. Již v těchto dobách bylo prohlašováno, že právě přišel ten pravý čas pro jejich široké využívání [8].

Dnes již magnetická ložiska pronikají do stále více průmyslových oblastí a do stále náročnějších průmyslových strojů. Je kladen důraz na jejich spolehlivost, provozní flexibilitu, dostupnost a bezúdržbový provoz.

2 Vstup do problematiky magnetických ložisek

Magnetická ložiska jsou zařízení, která využívají pro podporu rotoru magnetických sil. Dochází k tzv. levitaci rotoru. Některá magnetická ložiska poskytují plně bezkontaktní oporu, jiné jen částečnou a pracují společně s klasickými mechanickými ložisky.

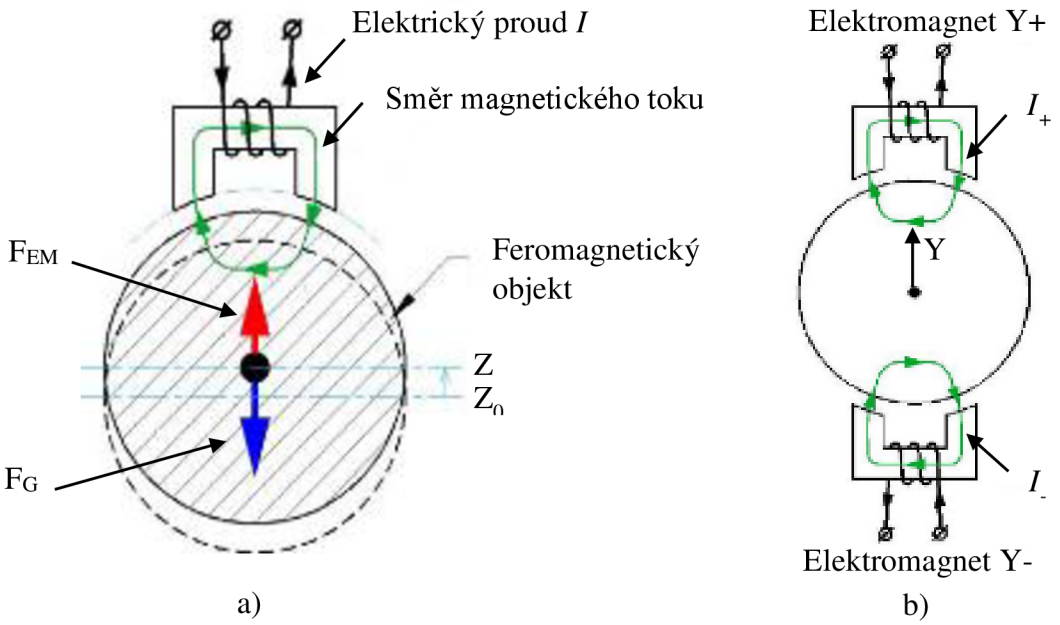
Použití magnetického pole k udržení předmětu v levitujícím stavu se objevuje od 19. století. V té době však ještě nebylo technicky možné vyrobit systém, který by dosahoval takových výkonů, jež by byly v technické praxi uplatitelné.

Magnetické ložisko plní stejné základní principy jako klasické mechanické ložisko. Snaží se o snížení tření mezi dvěma strojními díly, kdy jeden je v pohybu (převážně rotující) a druhý je v klidu. Na rotující část (hřídel) mohou působit síly buďto ve směru axiálním nebo radiálním.

2.1 Základní funkční princip magnetického ložiska

Čerpáno ze zdroje [1].

Železný (feromagnetický) objekt je přitahován permanentním magnetem nebo elektromagnetem (cívka vinutá okolo železného jádra). Tento jednoduchý princip je znázorněn na Obr. 1, kdy feromagnetický objekt je přitahován pomocí elektromagnetu, který působí silově proti síle gravitační.



Obr. 1: Zobrazení systému a) jednoho elektromagnetu a tělesa, b) dvou elektromagnetů a tělesa (převzato z [1] - upraveno)

Síla působící na těleso závisí na velikosti proudu protékající cívkou a vzdálenosti objektu od elektromagnetu (na vzduchové mezeře). V případě, že velikost elektrického proudu zůstává konstantní a působí na těleso větší přitažná elektromagnetická síla než síla gravitační, vzduchová mezera mezi tělesem a elektromagnetem se zmenšuje. V důsledku jejího zmenšování se zvyšuje

elektromagnetická síla, a těleso se začíná přibližovat rychleji. Dojde až k mechanickému styku mezi tělesem a elektromagnetem.

V opačném případě, je-li elektromagnetická síla menší než síla gravitační a proud tekoucí cívkou je konstantní, těleso se od elektromagnetu vzdaluje, roste vzduchová mezera a elektromagnetická síla slábne.

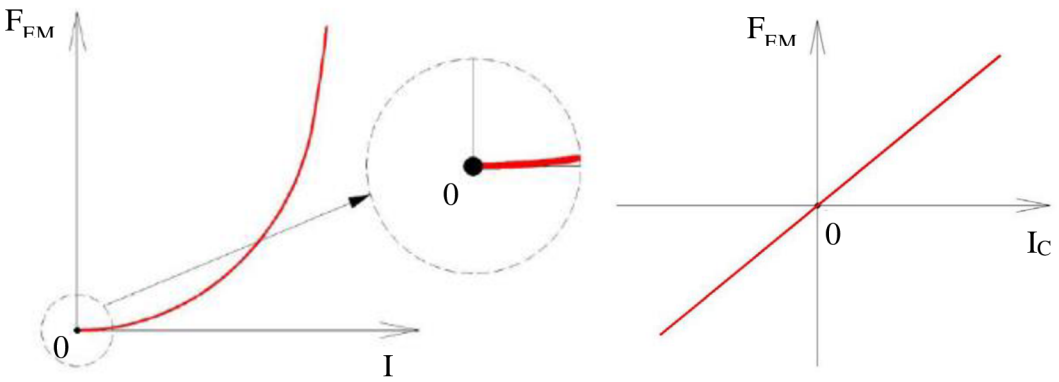
Z toho plyne, že pro zajištění stabilní levitace tělesa, je zapotřebí soustavně regulovat proud protékající cívkou, což vyvolá změnu velikosti elektromagnetické síly. Pozice tělesa musí být nepřetržitě měřená a vyhodnocovaná. Aplikováním tohoto poznatku získáváme systém pojmenovaný aktivní elektromagnetické ložisko. Tento systém obsahuje sadu elektromagnetů, polohové senzory, kontrolér a výkonové zesilovače. Dalším nepostradatelným prvkem aktivního magnetického ložiska je tzv. záloha, která zajišťuje bezpečnost provozu v případě pochybení jakékoli části systému aktivního ložiska.

Mezi elektromagnetem a feromagnetickým objektem působí pouze přitažlivé síly, proto aktivní elektromagnetický systém zobrazený na Obr. 1 potřebuje pro svou činnost vnější sílu působící na těleso opačným směrem jako v našem případě gravitační síla. V případě, že vnější síla může měnit polaritu, je zapotřebí druhého elektromagnetu v opačném směru, což je také zobrazeno na Obr. 1. Působí-li vnější síla na těleso ve směru Y, pak nabuzením spodního elektromagnetu způsobíme správnou odezvu aktivního magnetického ložiska.

2.2 Silové působení elektromagnetu

Síla působící na feromagnetické těleso je takřka kvadraticky závislá na velikosti proudu protékajícím elektromagnetem $F_{EM} \sim I^2$.

Jelikož je závislost elektromagnetické síly kvadratická, v rozmezí působení malých sil se řízení pomocí velikosti proudu cívkou těžko nastavuje. Tomuto lze předejít jednoduchým buzením obou elektromagnetů postavených naproti sobě stejným budícím proudem I_0. Je-li proud I_0 stejný v obou cívkách elektromagnetu a je-li feromagnetické těleso umístěné uprostřed, pak výslednice sil obou magnetů je nulová.



Obr. 2: Grafické zobrazení působení sil mezi tělesem a a) jedním elektromagnetem b) dvěma nabuzenými elektromagnety (převzato z [1] – upraveno)

Lze matematicky odvodit, že budeme-li chtít měnit sílu působící na těleso v daném směru a budeme-li I_0 v horním elektromagnetu zvyšovat o hodnotu řídicího proudu I_C a o tuto hodnotu I_C snižovat I_0 v dolním elektromagnetu, pak závislost elektromagnetické síly na řídícím proudu I_C je lineární:

Síla v kladném směru osy Y (2.1):

$$F_+ \sim (I_0 + I_C)^2 \tag{2.1}$$

Síla v záporném směru osy Y (2.2):

$$F_- \sim (I_0 - I_C)^2 \tag{2.2}$$

Výsledná síla působící na těleso (2.3):

$$F = F_+ - F_- \sim (I_0 + I_C)^2 - (I_0 - I_C)^2 = 4I_0 I_C \tag{2.3}$$

Máme-li konstantní proud I_0 a těleso je udržováno ve stabilní středové poloze, pak elektromagnetická síla je jednoduše lineární závislosti na řídicím proudu. Charakteristiky těchto závislostí jsou zobrazeny na Obr. 2.

3 Možnosti magnetických ložisek

Magnetická ložiska jsou rozdělena do dvou skupin podle silového působení na hřídel. Axiální ložiska působí ve směru osy hřídele a jsou ve většině případů tvořena pasivními ložisky.

Pasivní ložiska využívají místo komplikovaných elektromagnetů pro svou činnost permanentní magnety. Toto řešení má výhodu co se týče energetické nenáročnosti, ovšem systém není řízen a není zde možnost dosažení velkých výkonů.

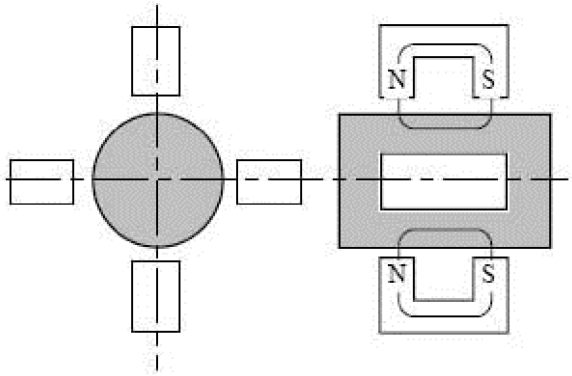
Radiální ložiska jsou ložiska působící na hřídel ve směru kolmém na osu otáčení. Převážně se provádějí jako ložiska aktivní, což jsou ložiska využívající elektromagnety a systémy jejich řízení.

Ložiska hybridní používají v každém směru jiný systém a jsou v praxi nejpoužívanější.

3.1 Uspořádání statorového vinutí radiálních ložisek

3.1.1 Homopolární

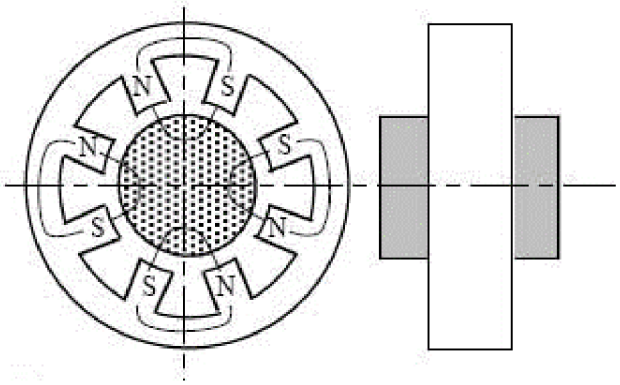
Při tomto způsobu uspořádání jsou póly v příčném řezu ložiskem uspořádány stejným směrem, takže dochází k tomu, že se magnetický obvod uzavírá v axiálním směru ložiska (Obr. 3). Tento způsob uspořádání je méně používaný, jelikož při rotaci hřídele se rychle mění polarizace hřídele N-S-N-S-N-S-N-S. Dochází následně k tzv. skinefektu, kdy silové účinky magnetického pole působí pouze na tenkou vrstvu povrchu tělesa, což zhoršuje funkci ložiska.



Obr. 3: Příčný a podélný řez homopolárního aktivního magnetického ložiska (převzato z [2])

3.1.2 Heteropolární

Hereropolární uspořádání je mnohem používanější. V příčném řezu (Obr. 4) jsou vedle sebe umístěny opačné póly stejné cívky, takže magnetický tok se uzavírá mezi dvěma sousedními póly. Při rotaci hřídele dochází ke střídání polarizace S-S-N-N-S-S-N-N, což je s poloviční frekvenci při stejných otáčkách jako u uspořádání homopolárním a z toho plyne snížení nepříznivého vlivu skinefektu [2].



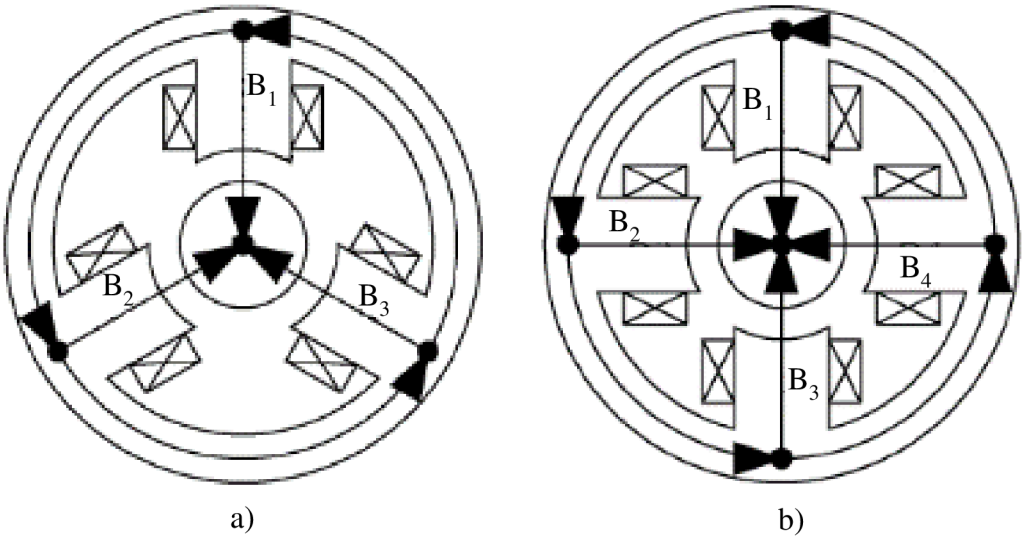
Obr. 4: Příčný a podélný řez heteropolárního aktivního magnetického ložiska (převzato z [2])

3.2 Optimální počet statorových pólů kompaktního aktivního radiálního magnetického ložiska

Čerpáno ze zdroje [3].

Nalezení optimálního množství pólů aktivního radiálního magnetického ložiska je důležité pro minimalizaci vnějších rozměrů statoru ložiska. Využívá se analýza magnetického obvodu k určení počtu závitů v cívce při dosažení největšího přesycení v mezních proudech a magnetických tocích cívky.

Pomoci této analýzy bylo vyvinuto šest typů magnetických ložisek pro danou velikost průměru čepu ložiska. Třípólové ložisko má nejmenší vnější rozměr při průměru čepu ložiska menším než 50 mm. Při průměru čepu ložiska větším než 200 mm mají již všechna ložiska téměř stejný rozměr. Na Obr. 5 je příklad třípólového a čtyřpólového aktivního magnetického ložiska (AML) v řezu.



Obr. 5: Příčný řez aktivního magnetického ložiska a) třípólového, b) čtyřpólového (převzato z [3] - upraveno)

Pro neomezenou délku ložiska je statorový rozměr lineární závislosti součinu počtu pólů a cívkového vinutí.

Osmipólové heteropolární magnetické ložisko má široké využití v průmyslu z důvodu jednoduchého řízení magnetických sil působících v ložisku. Oproti tomu třípólové magnetické ložisko má mnohem menší uplatnění, ovšem cena není tak vysoká, jelikož postačují pouze tři výkonové zesilovače pro řízení třech elektromagnetů. Pro heteropolární třípólové magnetické ložisko mohou být použity pouze dva výkonové zesilovače pro řízení tří elektromagnetů, kde dvě ze tří cívek jsou anti-sériově zapojené.

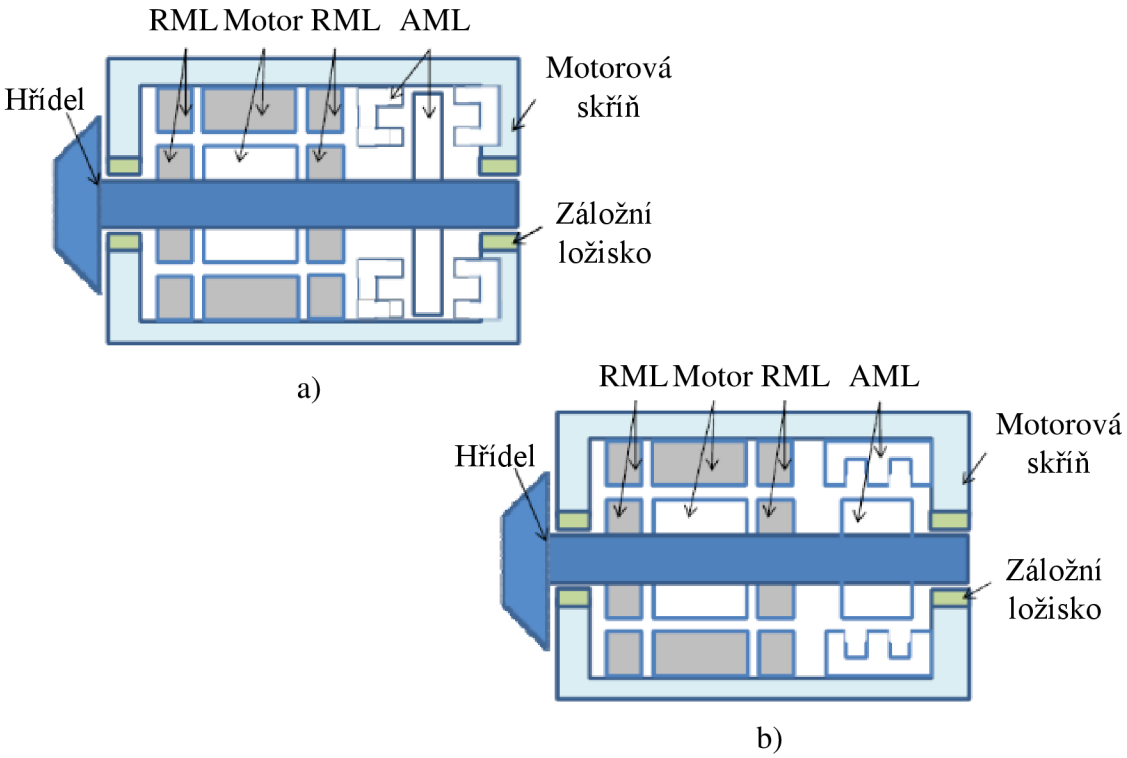
Množství statorových pólů narůstá s požadavkem na vyšší nosnost ložiska neboli s hmotností rotoru a velikostí působících sil na něj (zatížení).

4 Praktická řešení magnetických ložisek

4.1 Trojosé magnetické ložisko

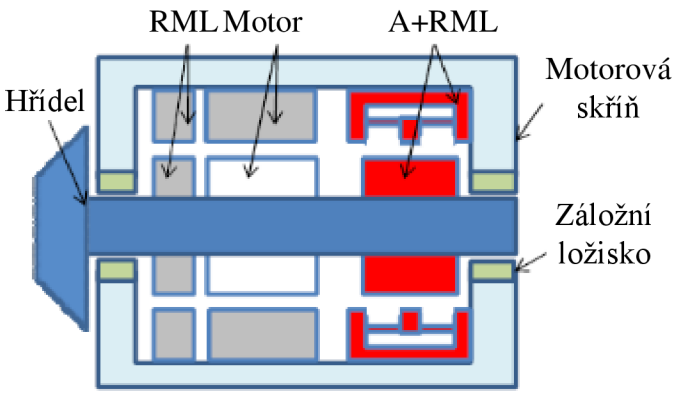
Čerpáno ze zdroje [4].

Většina aktivních magnetických strojů se skládá z pěti dílčích jednotek: dvou radiálních aktivních magnetických ložisek, motoru a dvou axiálních aktivních magnetických ložisek, zobrazených na Obr. 6. Tato klasická struktura je poměrně komplikovaná z důvodu potřeby disku, který je propojen s hřídelí a má značně velký průměr, což má špatný dopad na velikost systému, cenu a rychlost otáčení. Další komplikací je zajištění dynamické rovnováhy mezi rotorem a zařízením na něj připojeným. Z toho důvodu je zapotřebí nějakým způsobem tuto slabou část systému nahradit. Jednou z možností je změnit rozložení axiálních ložisek a velkorozměrového rotačního disku a nahradit je jedním válcovým diskem o nižším průměru s jedním axiálním ložiskem. Tato varianta je zobrazena na Obr. 6.



Obr. 6: Nákres systému a) klasický pěti-jednotkový systém s axiálním diskem, b) čtyř-jednotkový systém s válcovým diskem (převzato z [4] - upraveno)

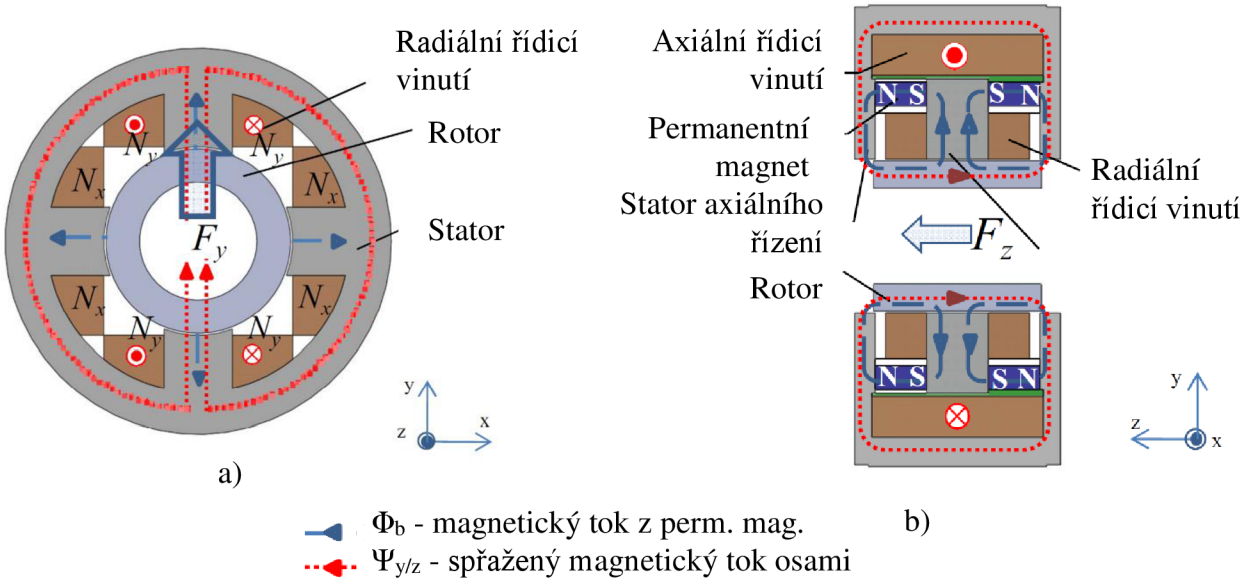
Novou možností je spojení jednoho radiálního magnetického ložiska s axiálním (R + AML), z čehož automaticky vyplývá absence rozměrného rotujícího disku, snížení ceny a zvýšení možných otáček, zobrazeno na Obr. 7.



Obr. 7:Nákres tříprvkového trojosého magnetického ložiska (převzato z [4] - upraveno)

4.1.1 Struktura ložiska

Rotor má jednoduchý válcový tvar a je umístěn ve středu. Stator je vybaven dvěma radiálními vinutími, která jsou navinuta na čtyřech význačných pólech jha, zobrazeno na Obr. 8. Toto statorové jho, jež se stará o radiální řízení, je semknuto osmi permanentními magnety, které jsou magnetizovány v axiálním směru. Kromě toho je řídící axiální stator vně radiálního řídícího statoru a vinutí axiálního statoru je navinuto v obvodovém směru.



Obr. 8: Struktura a princip ložiska v a) radiálním směru, b) axiálním směru (převzato z [4] - upraveno)

4.1.2 Princip levitační síly v radiálním směru

Na rotor působí magnetický tok Φ_b vytvořený permanentními magnety. Na Obr. 8 je znázorněn malými modrými šipkami. Chceme-li vyvolat určitou sílu na rotor v daném směru y, necháme protékat proud vinutími N_y. Totéž můžeme učinit pro směr x pomocí vinutí N_x. Začne-li vinutím N_y protékat proud, vznikne magnetický tok Ψ_y (červené šipky), který po interakci s magnetickým tokem Φ_b vytvoří sílu F_y působící na rotor. Totéž platí i pro směr x. Z toho plyne, že pomocí

vektorového součtu síly ve směru x a směru y jsme schopni vytvořit výslednou sílu působící v kterémkoli radiálním směru, a tak cíleně působit na rotor.

4.1.3 Princip levitační síly v axiálním směru

Na rotor opět působí magnetický tok Φ_b tvořený permanentními magnety, ovšem jeho účinky se navzájem ruší. Začne-li axiálním řídicím vinutím protékat proud, vznikne magnetický tok Ψ_z, což vyvolá sílu F_z působící na rotor. Opačnou polaritou elektrického proudu vyvoláme opačný směr síly.

4.2 Konické aktivní magnetické ložisko

Čerpáno ze zdroje [5].

V konickém aktivním magnetickém ložisku jsou statory radiálních ložisek a statory kombinovaných (radiálních a axiálních) magnetických ložisek rozmístěny v radiálním prostoru. Základem většiny axiálních magnetických ložisek je rozměrný axiální disk upevněný na rotor, což má mnoho nevýhod.

Drápkové magnetické ložisko má malé radiální konstrukční rozměry. Statorové jádro i vinutí jsou umístěny v axiálním směru, díky čemuž je docíleno zmenšení ložiska v radiálním směru. Ložisko má tedy téměř stejné rozměry jako rotor. Toto ložisko se uplatňuje hlavně v případech, kdy je radiální prostor limitován.

Magnetické síly generované v ložisku způsobují stabilní pozici ve vzduchu, tudíž zde není žádný fyzický kontakt mezi rotorem a statorem. Není nutno používat jakékoli lubrikanty a nedochází k mechanickému opotřebení.

Konvenční aktivní magnetické ložiskové systémy obvykle využívají tři magnetická ložiska pro ovládání pěti stupňů volnosti rotoru. Toho může být dosaženo pomocí dvou radiálních magnetických ložisek a jednoho axiálního (RRA). Pro snížení velikosti ložiska se dvojice ložisek nahrazuje specifickou magnetickou jednotkou, která dokáže operovat jak ve směru axiálním, tak radiálním. Jednou možností je kombinované ložisko a druhou je konické aktivní magnetické ložisko. Kombinované ložisko má zkratku C a je vytvořeno spojením radiálního a axiálního ložiska pomocí úpravy konstrukce.

V případě použití axiálního disku se vystavujeme riziku možného snížení maximálních otáček vlivem velké obvodové rychlosti a také v okolí disku vzniká ve vzduchu turbulentní proudění a dochází k akustickému rušení. Dále se komplikuje obsluha ložiska.

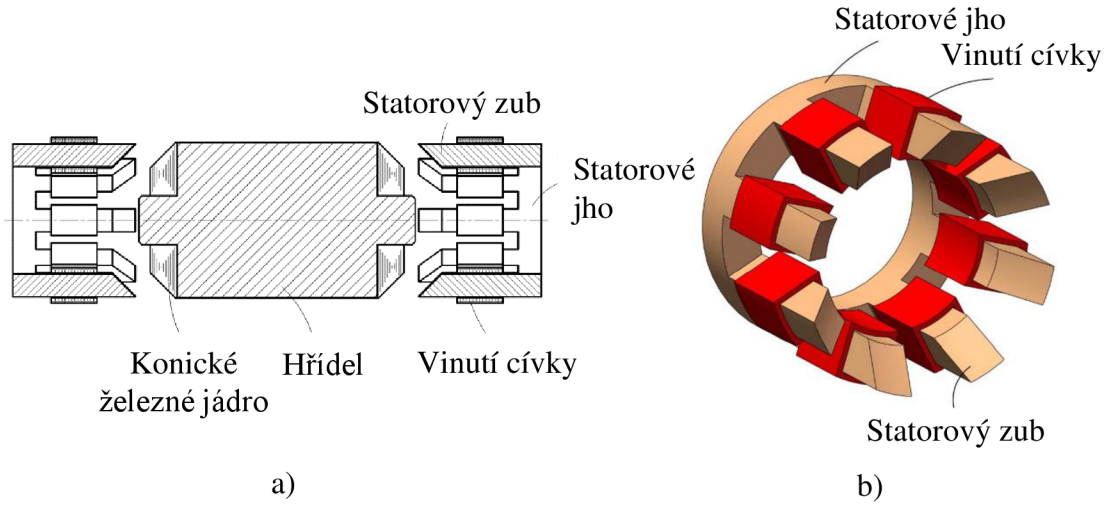
Konický magnetický ložiskový systém nepotřebuje axiální disk. Struktura konického magnetického ložiska je podobná klasickému radiálnímu magnetickému ložisku. Liší se pouze tím, že oba pracovní povrchy na statoru a rotoru jsou konické, což umožňuje magnetickým silám působit jak v axiálním, tak radiálním směru zároveň. Díky tomu může být rotor držen ve stabilní poloze ve vzduchu a axiální disk není potřeba. Bohužel statorové cívky a jádra jsou orientovány v axiálním směru, což má negativní vliv na axiální rozměry ložiska.

4.2.1 Porovnání ložisek

Struktura klasického aktivního magnetického ložiska má radiální rozměr rozsáhlý, což je způsobeno přítomností axiálního disku. Pasivní magnetická ložiska jsou tvořena permanentními magnety, takže budící cívky nejsou potřeba a ložiska jsou malá. Nicméně pasivní ložiska postrádají možnost aktivního řízení. Obecně poskytují slabé tlumení a ve srovnání s aktivními magnetickými ložisky mají omezenou nosnost.

4.2.2 Struktura aktivního drápkového konického magnetického ložiska

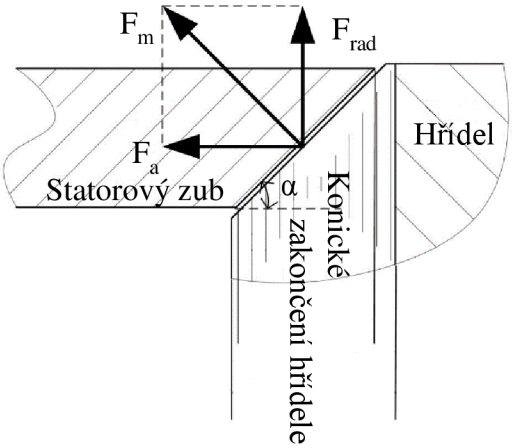
Skládá se ze dvou statorových komponent a jednoho rotorového komponentu. Statorové jádro má prstencové jho a osm vyčnívajících statorových zubů. Každý zub je ovinut cívkou. Všechny zuby mají konické zakončení, zobrazeno na Obr. 9.



Obr. 9: Struktura aktivního drápkového konického magnetického ložiska a) celku, b) statoru (převzato z [5] - upraveno)

Jádro je vyrobeno z feromagnetického materiálu DT4 nebo může být vyrobeno z jiných lehkých magnetických kompozitních materiálů. Konická jádra jsou tvořena laminovanými křemiko-ocelovými plechy DW310-35 o tloušťce 0,35 mm kvůli omezení vnitřních ztrát vířivými proudy.

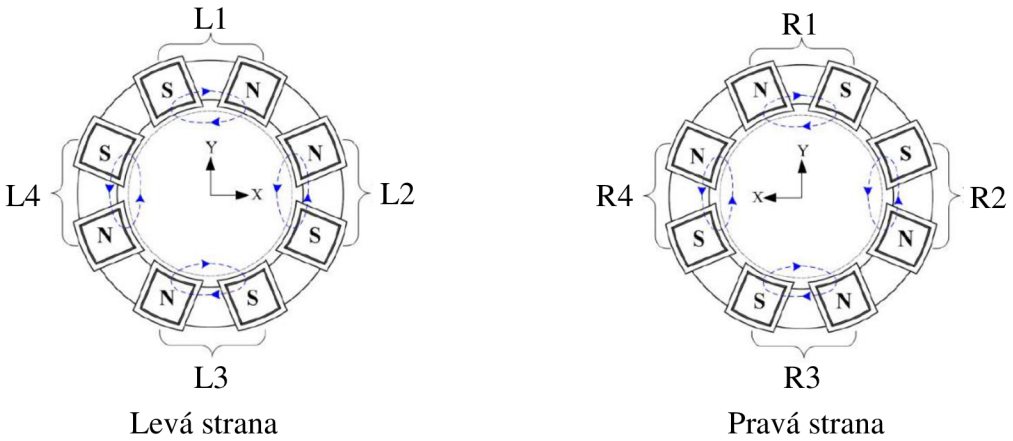
Vrcholový úhel α konického statorového zubu je totožný s úhlem konického rotoru. Ovšem z Obr. 10 je patrné, že konická plocha rotoru musí být o něco delší nežli plocha zubů, jelikož rotor se musí vůči statoru lehce pohybovat. Dále jsou na obrázku znázorněny složky výsledné magnetické síly F_m složené ze složky radiální síly F_{rad} a axiální síly F_a.



Obr. 10: Detail konické části aktivního ložiska (převzato z [5] - upraveno)

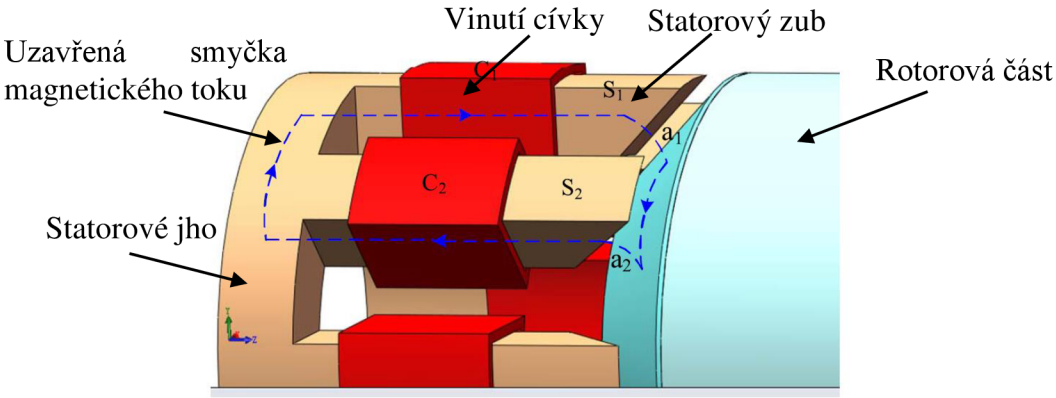
4.2.3 Funkční princip

Osm statorových zubů s budícími cívkami představují magnetické póly ložiska. Dva sousední póly/drápky/zuby mají opačnou polaritu a jejich budící cívky jsou spojeny sériově. Proto každý stator je složen ze čtyř pólových dvojic, které vytvářejí čtyři magnetické smyčky (Obr. 11).



Obr. 11: Konfigurace magnetických pólů (Převzato z [5] - upraveno)

Nyní vezměme magnetickou pólovou dvojici L_1 jako příklad pro ilustrování cesty magnetického toku ložiskem. Tato cesta je zobrazena na Obr. 12. Průtokem proudu cívkou C_1 je vytvářeno magnetické pole. Poté magnetický tok protéká statorovým zubem S_1, vzduchovou mezerou a_1, konickým ocelovým jádrem, vzduchovou mezerou a_2 statorovým zubem S_2 a statorovým jhem zpět do statorového zubu S_1, kde se magnetický tok uzavírá ve smyčce. Současně magnetický tok vyvolaný budící cívkou C_2 má stejnou trasu magnetického toku jako tok vyvolaný budící cívkou C_1 a celkový magnetický tok magnetické pólové dvojice L1 je jejich součtem.



Obr. 12: Uzavírající se smyčka magnetického toku aktivním konickým magnetickým ložiskem (převzato z [5] - upraveno)

Jelikož pracovní povrch rotoru a statoru je konický, magnetické síly mohou být rozloženy do axiálního směru síly a radiálního směru síly zároveň. Díky magnetickým silám generovanými dvěma statory, jedním na levé a jedním na pravé straně, může být rotor podpírán ve vzduchu stabilně.

5 Řízení magnetické levitace

Ze samé podstaty aktivního magnetického ložiska vyplývá nestabilita přenosové funkce ložiska, tudíž její řízení je pro funkčnost ložiska nezbytná. Tato část se zabývá primární strategií řízení ložiska. Základem je jednoosý systém zavěšení ložiska, který se dá následně rozšířit do dvouosého systému.

5.1 Základní dělení spojitých regulátorů

Čerpáno ze zdroje [11].

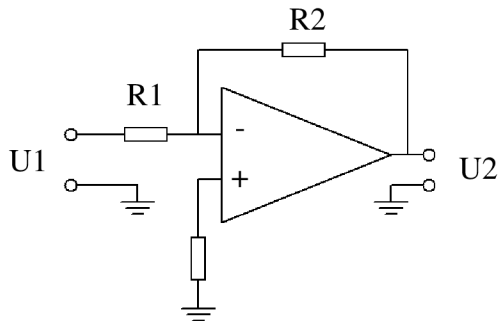
5.1.1 P-regulátor

P (proporcionální) regulátor je nejjednodušším regulátorem. Regulační odchylku pouze zesiluje (zesilovač) a platí pro něj vztah (5.1):

$$u(t) = r_0 e(t), \tag{5.1}$$

kde $u(t)$ je akční veličina, r_0 zesilovací konstanta a $e(t)$ je regulační odchylka.

Schéma zapojení P-regulátoru je naznačeno na Obr. 13 s využitím rezistorů R1 a R2.



Obr. 13: Schéma zapojení P-regulátoru (převzato z [11] - upraveno)

Vztah (5.2) pro přenosovou funkci P-regulátoru za předpokladu velkého zesílení:

$$H_p = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{R_2}{R_1} = K_p \tag{5.2}$$

U tohoto regulátoru je možné určit pouze velikost zesilovací konstanty. Ta přímo ovlivňuje velikost akční veličiny v závislosti na regulační odchylce. Velikost zesilovací konstanty má vliv i na dobu trvání regulačního pochodu. Nevýhodou regulátoru je stálá regulační odchylka, která nemůže být odstraněna. Využití P-regulátoru je např.: stabilizace proudu, napětí či teploty.

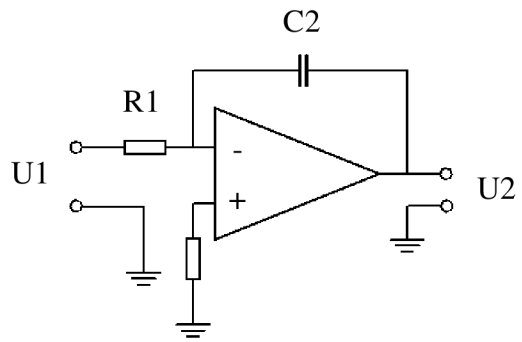
5.1.2 I-regulátor

I (integrační) regulátor je již komplikovanější systém. Velikost akční veličiny je dána časovou hodnotou integrálu regulační odchylky. Platí vztah (5.3):

$$u(t) = r_{-1} \int e(t)dt, \tag{5.3}$$

kde r_{-1} je integrační konstanta.

Schéma zapojení I-regulátoru naznačeno na Obr. 14 s využitím rezistoru R1 a kondenzátoru C2.



Obr. 14: Schéma zapojení I-regulátoru (převzato z [11] - upraveno)

Vztah (5.4) pro přenosovou funkci I-regulátor za předpokladu velkého zesílení:

$$H(p) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{Z_2(p)}{Z_1(p)} = \frac{\frac{1}{pC_2}}{R_1} = \frac{1}{pC_2R_1} = \frac{1}{\tau_i p}, \qquad \tau_i = C_2R_1, \tag{5.4}$$

kde τ_i je časová konstanta.

I-regulátor umožňuje odstranit regulační odchylku, ovšem může také zapříčinit rozkmitání systému, což zhoršuje celkovou stabilitu obvodu. Převážně se I-regulátor aplikuje v kombinaci s P-regulátorem.

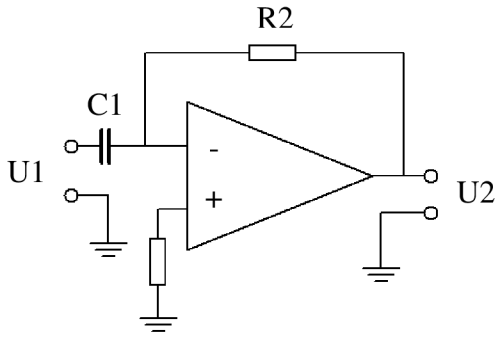
5.1.3 D-regulátor

D (derivační) regulátor je stejně matematicky komplikovaný jako I-regulátor. Velikost akční veličiny závisí na okamžité hodnotě rychlosti změny žádané a skutečné hodnotě regulované veličiny. Platí vztah (5.5):

$$u(t) = r_1 e'(t), \tag{5.5}$$

kde r_1 je derivační konstanta.

Schéma zapojení D-regulátoru naznačeno na Obr. 15.



Obr. 15: Schéma zapojení D-regulátoru

5.2 PID-regulátor

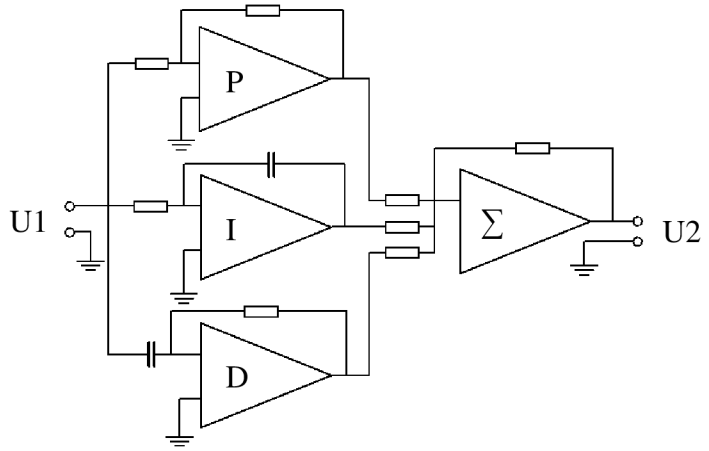
Čerpáno ze zdroje [11].

PID (proporcionálně integračně derivační) regulátor je spojení všech tří základních typů v jednom, přičemž paralelním zapojení je nejvýhodnější.

Vztah (5.6) pro přenosovou funkci:

$$H(p) = K_p + \frac{K_i}{p} + K_d p = \frac{(1 + p\tau_1)(1 + p\tau_2)}{p\tau_0} \tag{5.6}$$

Schéma zapojení PID-regulátoru naznačeno na Obr. 16:

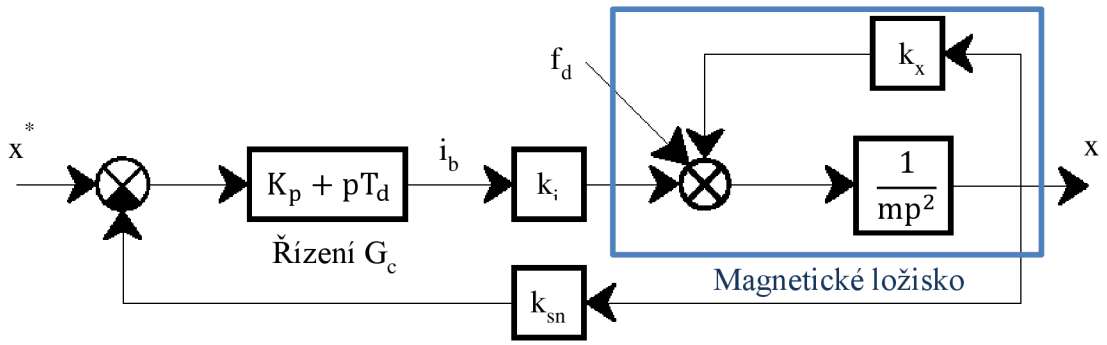


Obr. 16: Schéma zapojení PID-regulátoru (převzato z [11] - upraveno)

5.3 PD-regulátor

Čerpáno ze zdroje [6].

Na Obr. 17 je znázorněn blokový diagram magnetického ložiska a jeho řízení pro jednoosý systém.



Obr. 17: Blokový diagram magnetického ložiska (převzato z [6] - upraveno)

Poloha x zavěšeného tělesa je zaznamenána pomoci detektoru se zesílením k_{sn} a následně porovnána s referenční (žádanou) pozicí x^*. Výsledná chyba je zesílená pomocí řízení G_c. Proud i_b napájí celé jednoosé ložisko. V bloku označeném „Magnetické ložisko“ představuje m hmotnost

rotoru, k_i je silově-proudový faktor a k_x silově-dislokační faktor. Jelikož přenosová funkce magnetického ložiska není stabilní, musí stabilizační řízení využívat zpětnovazební smyčku.

Jednoduchému řízení vhodnému pro magnetické ložisko odpovídá PD regulátor. Ideální přenosová funkce PD regulátoru je (5.7):

$$G_c = K_p + pT_d, \tag{5.7}$$

kde K_p je konstanta zesílení proporčního členu a T_d je časová konstanta derivačního členu. Celková smyčka přenosové funkce může být zapsána jako (5.8):

$$G_L = k_{sn}\left(K_p + pT_d\right) \cdot \frac{k_i}{mp^2 - k_x} \tag{5.8}$$

5.4 Stavové řízení ložiska

Čerpáno ze zdrojů [11][12].

Každou lineární soustavu lze popsat pomocí diferenciální rovnice n-tého řádu, dále přepsat do soustavy n diferenciálních 1. řádu a dále na matici.

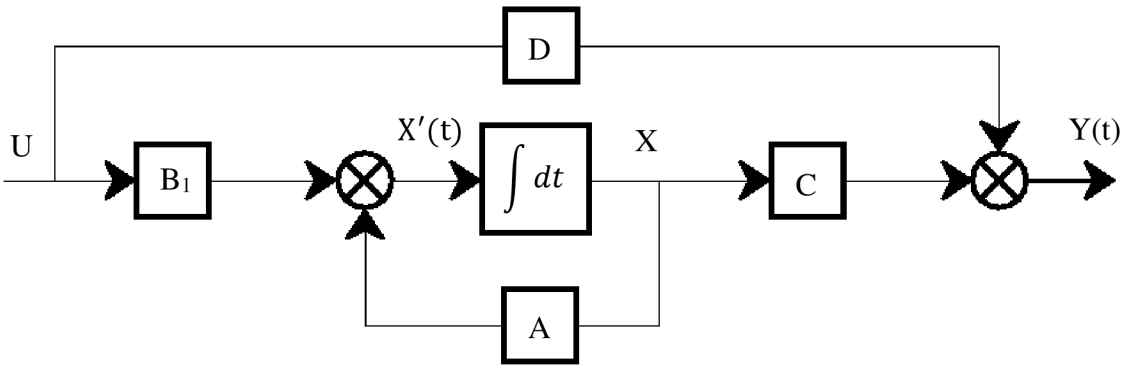
Můžeme-li systém převést v konečném čase z jednoho stavu do jakéhokoli jiného, potom je systém řiditelný, což je pro možnosti magnetického ložiska hlavním předpokladem.

Linearizujeme-li elektromagnet v jeho pracovním bodě, můžeme tento systém považovat za stavový a lze popsat následujícími rovnicemi (5.9), (5.10):

$$\dot{x} = Ax + B_1 u_1 \tag{5.9}$$

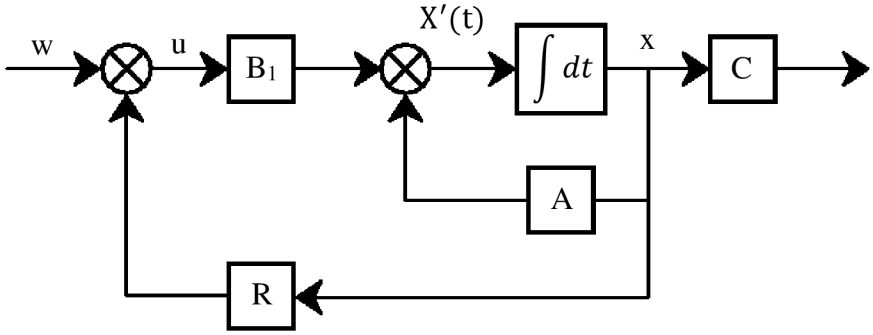
$$y = Cx\,, \tag{5.10}$$

kde x je stavový vektor, jež je složen ze stavových proměnných, u_1 je vektor vstupních signálů, y je vektor výstupních signálů, A je matice vnitřních vazeb systému (stavová matice), B_1 je maticí vazeb na vstupu do systému (řídicí matice) a C je maticí vazeb na výstupu ze systému (výstupní matice). Ukázáno na Obr. 18.



Obr. 18: Blokový diagram stavově popsaného systému (převzato z [12] - upraveno)

Stavového řízení se docílí zařazením zpětné vazby do systému, skrze všechny stavové proměnné. Schéma systému s implementaci regulátoru je na Obr. 19.



Obr. 19: Princip stavového řízení (převzato z [12] - upraveno)

Rovnice (5.11), (5.12) definují systém obsahující zpětnovazební regulaci

$$\dot{x} = (A - B_1 R_r)x + B_1 u_1 \tag{5.11}$$

$$y = Cx, \tag{5.12}$$

kde R_r je matice regulace.

6 Simulační programy ANSYS

Čerpáno ze zdroje [9].

6.1 ANSYS Maxwell

ANSYS Maxwell je program využívaný k simulaci nízkofrekvenčních elektromagnetických polí.

Tento simulační software požívají inženýři pro 2D a 3D analýzy elektromagnetických a elektromechanických přístrojů, motorů, pohonů, transformátorů, senzorů, magnetů a cívek. Elektromagnetické pole lze řešit ve stacionární, nestacionární nebo frekvenční oblasti.

6.1.1 Metoda konečných prvků (MKP)

Při simulacích je používaná metoda konečných prvků. Jedná se o jednu z nejpoužívanějších numerických metod. Tato metoda vznikla z potřeby řešit složité problémy pružnosti a strukturálních analýz ve stavebnictví a leteckém průmyslu. Metoda konečných prvků se využívá pro simulaci proudění tepla a tekutin, průběhu napětí a vlastních frekvencí, deformačních a elektromagnetických jevů.

MKP je založena na principu rozdělení ploch do trojúhelníkové výpočtové sítě (mesh), kdy každému bodu sítě náleží jedna diferenciální rovnice, pomocí kterých je vypočítáván děj probíhající v dané ploše.

ANSYS Maxwell umožňuje uživateli kreslit obecné geometrie řešeného tělesa, nebo vybírat tvary z daných databází. Je možné importovat geometrie z kompatibilních softwarů CAD. Maxwell dokáže efektivně navrhnout výpočtové sítě, které se dají snadno upravovat.

Uživatel má možnost vybírat z velké škály databáze materiálů, kterou může i dále upravovat a specifikovat. Lze využít nelinearit materiálů, jako jsou BH křivky, hysterezní smyčky, teplotních závislostí materiálů, skin efekty, vířivé proudy atd. Dále ANSYS Maxwell umožňuje rotační a translační pohyb komponent.

ANSYS Maxwell je schopen spolupracovat se stavovými modely konečnoprvkových simulací z programů ANSYS Simplorer, Pmxprt, PExprt atd.

Uživatel jednoduše navrhne nebo importuje geometrii, určí materiály a vlastnosti daných dílů, nastaví parametry simulace, mezi něž patří tvar výpočtové sítě, spustí simulaci a následně zobrazí průběhy polí, grafů či animací, pomocí nichž vyhodnotí výsledky.

6.2 ANSYS Simplorer

ANSYS Simplorer je výkonná platforma využívána při simulování a analýze virtuálních systémových prototypů. Umožňuje vývojovým týmům ověřovat a optimalizovat komplexní elektrické, elektromechanické, teplotní a hydraulické systémy. Nejčastěji je použita v automobilovém a leteckém průmyslu.

ANSYS Simplorer využívá analýzy obvodových schémat obsahující komponenty různých fyzikálních oblastí (elektrické, magnetické, digitální, hydraulické, tepelné atd.).

Systém ANSYS Simplorer umožňuje použití řady modelovacích technik, jako jsou obvodová schémata, stavové automaty, matematické rovnice, blokové diagramy. Využívá také více programovacích jazyků (VHDL/AMS, SML, C/C++).

Při aktuálním růstu významu multifyzikálních technologií dostává software ANSYS Simplorer možnost být využíván pro komplexní hodnocení a řešení celého systému v jednom prostředí a tak eliminovat možná rizika a chyby ještě před výrobou prototypu.

Software obsahuje obsáhlé knihovny naprogramovaných komponent. Dále je umožněna spolupráce mezi ostatními programy (ANSYS Maxwell, ANSYS HFSS, ANSYS Mechanical, ANSYS Fluent atd.)

Lze tedy pozorovat vliv jednotlivých komponent na chování celého systému díky vzájemné provázanosti programů.

7 Tvorba modelu levitačního magnetu a jeho simulace

7.1 Matematické rovnice systému levitačního magnetu

Pro střední siločáru elektromagnetu procházející kolejnicí platí Ampérův zákon vyjádřený rovnicí (7.1):

$$N_z \cdot i = H_{fe} \cdot l_{fe} + 2 \cdot H_v \cdot l_v, \tag{7.1}$$

kde N_z je počet závitů cívky elektromagnetu, i proud tekoucí jednotlivými závity, H intenzita magnetického pole (H_{fe} – v železe, H_V – ve vzduchu) a l délka siločáry procházející daným prostředím (l_v – vzduch, l_{fe} – zbylý mag. obvod).

Po vyjádření proudu dojdeme k rovnici (7.2):

$$i = \frac{l_{fe}}{N_z} \cdot H_{fe} + \frac{2}{\mu_0 \cdot N_z} \cdot B \cdot l_V, \tag{7.2}$$

kde μ_0 je permeabilita vakua a B je velikost magnetické indukce.

Pro vyjádření elektrického napětí u na elektromagnetu docházíme po aplikaci 2. Kichhoffova zákona k rovnici (7.3):

$$u = R_{cu} \cdot i + u_i = R_{cu} \cdot i + \frac{d\psi}{dt}, \tag{7.3}$$

kde Rcu je odpor cívek, i proud procházející elektromagnetem, u_i indukované napětí a $d\psi/dt$ časová derivace spřaženého magnetického toku.

Při zanedbání rozptylu magnetického toku v jádře dojdeme k rovnici (7.4):

$$\psi = N_z \cdot \Phi = N_z \cdot B \cdot S_{fe}, \tag{7.4}$$

kde Φ je magnetický tok jednoho závitu a S_{fe} je průřez jádra magnetu.

Magnetický tok můžeme následně derivovat podle času a dojít k rovnici (7.5):

$$\frac{d\psi}{dt} = N_z \cdot S_{fe} \cdot \frac{dB}{dt} \tag{7.5}$$

Dosazením rovnice (7.5) do rovnice (7.3) získáme vztah (7.6).

$$u = R_{cu} \cdot i + N_z \cdot S_{fe} \cdot \frac{dB}{dt} \tag{7.6}$$

Dále je z rovnice (7.6) vyjádřena časová derivace magnetické indukce a za proud dosazena rovnice (7.2). Dojdeme k rovnici (7.7), pomocí níž je vytvořena simulace v programu ANSYS Simplorer.

$$\frac{dB}{dt} = \frac{1}{N_z S_{fe}} \left[u - R_{cu} \cdot \left(\frac{l_{fe}}{N_z} \cdot H_{fe} + \frac{2}{\mu_0 \cdot N_z} \cdot B \cdot l_V \right) \right] \tag{7.7}$$

K získání druhé potřebné rovnice pro simulaci musíme vyjít z Newtonova principu superpozice, kdy součtem jednotlivých vektorů sil působících na těleso dojdeme k výslednici sil F_v, která má stejné silové účinky jako jednotlivé síly dohromady. Toto popisuje rovnice (7.8):

$$\vec{F_v} = \sum_{i=1}^{n} \vec{F_i} \tag{7.8}$$

Jelikož na elektromagnet působí pouze tři síly (F_G tíhová síla, F_r rušivá síla a F_M magnetická síla), které působí ve stejné ose v těžišti elektromagnetu (F_G směřuje svisle k zemskému jádru, F_M směřuje svisle vzhůru a F_r působí také v ose, ovšem může měnit znaménko). Za toho předpokladu platí vztah (7.9), kdy jsme schopni určit velikost síly F_v pomocí součtu/rozdílu velikostí vstupních sil.

$$F_v = F_G - F_M + F_r \tag{7.9}$$

Z druhého Newtonova zákona platí, že síla je přímo úměrná součinu zrychlení a a hmotnosti tělesa m. Jeho aplikací, vyjádřením zrychlení a a dosazením vzorců pro výpočet jednotlivých sil dojdeme k rovnici (7.10):

$$a = \frac{1}{m}\left(F_g - F_m + F_R\right) = \frac{1}{m}\left(m \cdot g - \frac{S_{fe} \cdot B^2}{\mu_0} + F_r\right), \tag{7.10}$$

kde g je tíhové zrychlení.

Derivací polohy (velikosti vzduchové mezery l_v) podle času dojdeme k rychlosti tělesa v a následnou derivací rychlosti podle času dojdeme ke zrychlení tělesa a. Díky těmto faktům dojdeme k následujícím dvěma rovnicím (7.11) a (7.12), potřebným k provedení simulace v ANSYS Simplorer.

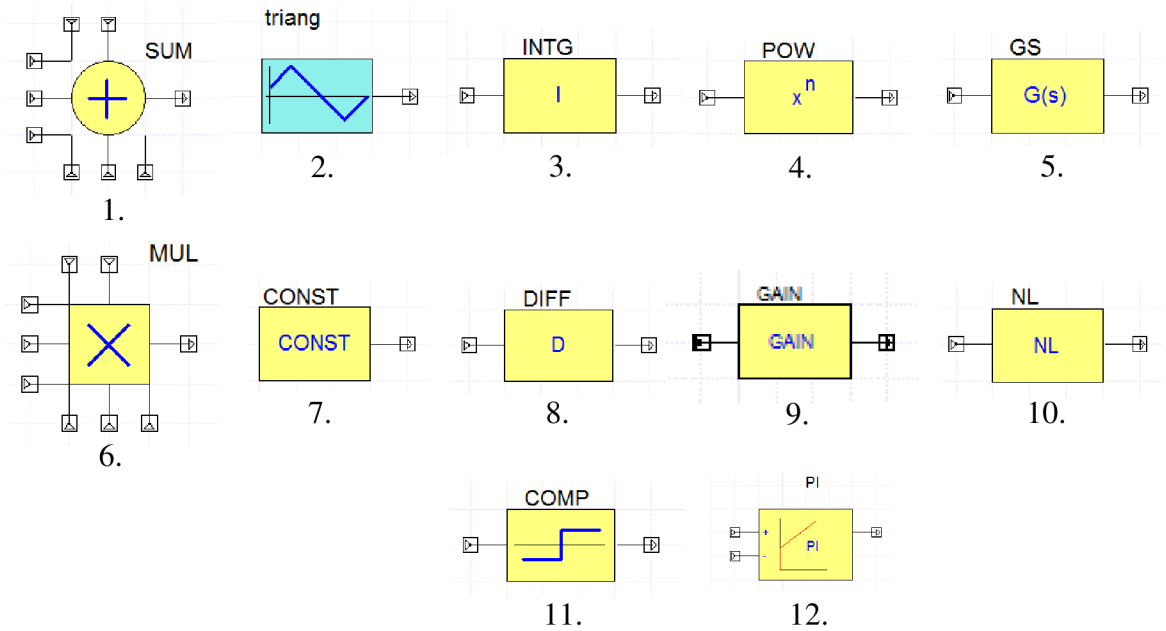
$$\frac{dl_v}{dt} = v \tag{7.11}$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{m}\left(-\frac{S_{fe} \cdot B^2}{\mu_0} + m \cdot g + F_r\right) \tag{7.12}$$

Veškeré potřebné rovnice k provedení simulace jsou rovnice (7.7), (7.11) a (7.12).

7.2 Aplikace matematického modelu v programu ANSYS Simplorer

V této práci je vytvořena simulace elektromagnetu a jeho řízení pomocí programu ANSYS Simplorer, která je zobrazena na Obr. 21. Simulace vychází ze zdroje [7] a má za účel ověřit srovnatelnost mezi výstupem simulace pomocí Matlab Simulink a ANSYS Simporer. Při přetváření simulace byly použity bločky, které jsou znázorněny na Obr 20.



Obr 20: Bločky používané při tvorbě simulace v ANSYS Simplorer s využitím Continuous Blocks

Blok 1. se nazývá „Summation“ (sčítání) a umožňuje uživateli sčítat a odečítat až sedm vstupů, v modelu byl však použit s maximálně třemi vstupy.

Blok 2. s názvem „Triangular“ (trojúhelníkový) je v simulaci použit jako zdroj pilovitého signálu s frekvencí 5 kHz a amplitudou 10. Tento byl použit v simulaci pouze jednou.

Blok 3. s názvem „Integrator“ (integrátor) je v simulaci použit nejprve šestkrát a následně po úpravách pouze třikrát a to k převedení zrychlení na rychlost a následně polohu magnetu. Většinou je tento blok doplněn o limitující podmínky.

Blok 4. s názvem „Power“ (mocnina) je v modelu použit jednou a to jako druhá mocnina.

Blok 5. s názvem „S-Transfer Function“ (s - přenosová funkce) je v simulaci použit dvakrát, nejprve jako proudové čidlo a následně jako čidlo polohy. Pro dosažení sjednocení průběhů simulace muselo být proudové čidlo v ANSYS Simploreru upraveno vůči Matlab Simulink. Nutnost této úpravy je zřejmě způsobena růzností nastavení řešičů a vlastností výpočtu simulací.

Blok 6. s názvem „Multiplier“ (násobitel) může mít stejně jako blok 1. sedm vstupů, je použit jednou, a to s celkově dvěma vstupy.

Blok 7. s názvem „Constant Value“ (konstantní hodnota) je v simulaci použit třikrát, a to pro zadání požadované polohy, rušivé síly a tíhy magnetu.

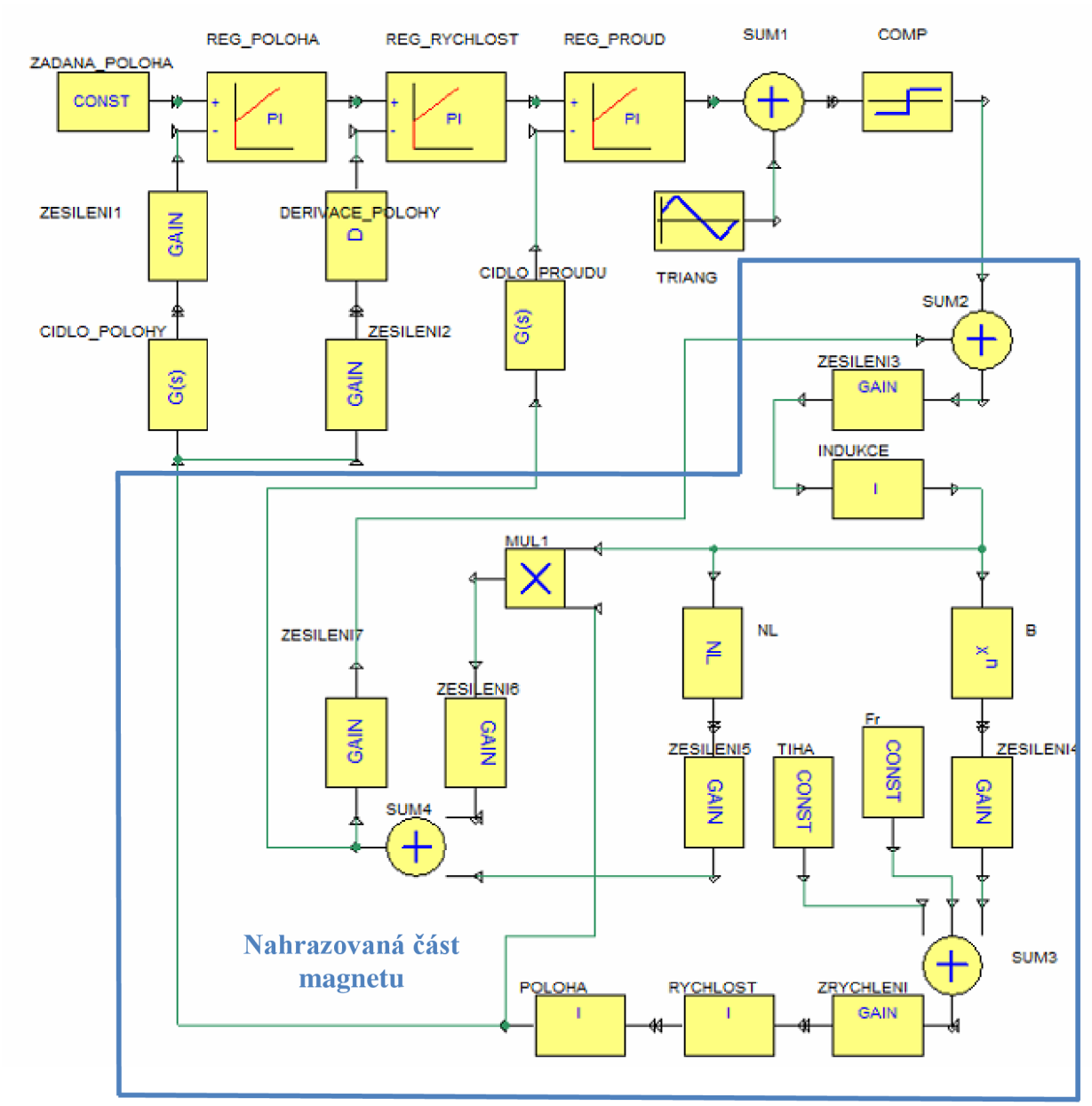
Blok 9. s názvem „Gain“ (přírůstek) je v systému aplikován třináctkrát a plní funkci zesílení, součinu.

Blok 10. s názvem „Nonlinear Characteristic“ (nelineární charakteristika) je použit pouze jednou, a to z důvodu aplikace BH-křivky magnetu.

Blok 11. s názvem „Comparator“ (komparátor) je v modelu použit také jednou a plní funkci přiřazení výstupní hodnoty v závislosti na velikosti vstupní veličiny.

Blokem 12. s názvem „PI Controller“ bylo později nahrazeno vždy pět bloků (2x SUM, 2x GAIN a jeden INTG) a to z důvodu větší přehlednosti.

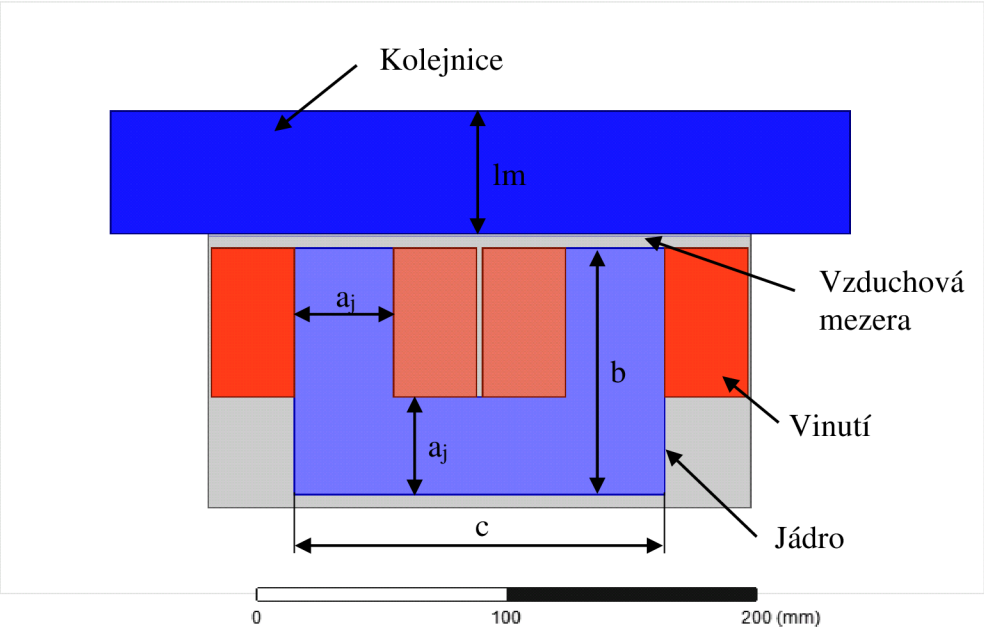
Je ověřeno, že simulace pomocí ANSYS Simplorer odpovídá výsledkům simulace MATLAB Simulink, a proto může být dále přistoupeno k nahrazení matematické simulace modelu magnetu pomocí propojení na ANSYS Maxwell s využitím metody konečných prvků.



Obr. 21: Simulace v programu ANSYS Simplorer s využitím „Continuous Blocks“

7.3 Model magnetu v ANSYS Maxwell

Je vytvořen parametrický model, zobrazený na Obr. 22, sestávající se ze čtyř základních částí. Dvě sériově zapojené cívky vytvářející magnetický tok v magnetickém obvodu, jádro a kolejnice. Celý model je nastaven jako „Solution Type“, „Certesian“, XY a „Magnetostatic“. Magnetický obvod je složen z jádra obklopeného cívkami, kolejnicí a dvěma vzduchovými mezerami. Pro jednoduchost je materiál, který je použit v kolejnici a jádře, definován pouze BH křivkou, jež je použita ve zdroji [7]. Vinutí je tvořeno mědí, přičemž každá (ze dvou) cívek je tvořena 160 závity. Celý model je vytvořen parametricky, aby bylo možné operativně měnit rozměry. Defaultní nastavení tohoto modelu je šířka jádra a_j = 40 mm, délka jádra c = 150 mm, výška jádra b = 100 mm, výška kolejnice lm = 50 mm, výška vzduchových mezer lv = 6 mm a mezera mezi vinutími jsou 2 mm.



Obr. 22: Model levitačního elektromagnetu v programu ANSYS Maxwell

V modelu elektromagnetu bylo definováno ohraničení (Boundaries) simulace, nastavené buzení (Excitation) - „Current Excitation“, kde hodnota „Value“ je definována jako součin proměnné N (počet závitů) a I (proud závitem), pro čtyři plochy, kdy je třeba dávat pozor na správnou orientaci proudů, aby se magnetický tok uzavíral v cívkách přes jádro, vzduchové mezery a kolejnici. Dále jsou nastaveny charakteristiky „Parameters“, síla „Force“ na jádro s názvem zelezo a martice „Matrix“ na všechny plochy vinutí a v záložce „Post procesing“ je vytvořena skupina „Group1“ ze všech buzení.

Je upřesněno mešování „Mesh Operations“ v jádře, kolejnici, vinutí, a vzduchové mezeře.

Nejdůležitějším krokem je nastavení „Optimetrics“. Zde bylo zvoleno „Add → Parametric“, v následujícím okně políčko Add. V okně „Add/Edit Sweep“ je mezi proměnnými (Variable) vybrána vzduchová mezera lv, zaškrtnuta položka „Linear step“ a definován: Start – 1 mm, Stop = 10 mm a Step = 0,5 mm. Po vyplnění je potřeba kliknout na tlačítko Add. Dále je vybrána proměnná proudu I, zaškrtnuta položka Linear count a definováno: Start = -100 A, Stop = 100 A a Count = 40. Opět je potřeba kliknout na políčko Add a pro potvrzení tlačítko OK. Pro ověření

nastavení lze přejít na záložku Table, kde je celkem 760 položek (pro každou velikost vzduchové mezery 40 možností velikosti proudu). Dále je v záložce „Calculations“ vybráno tlačítko „Setup Calculations…“, a přidány kalkulace zelezo.Force_mag, zelezo.Force_x, zelezo.Force_y a Matrix1.L(Group1,Group1).

Po úspěšném nastavení Optimetrics je ještě potřeba na něj kliknout pravým tlačítkem a zvolit „Analyze“. Pro urychlení výpočtu je vhodné nastavit s ohledem na používaný hardware počet „Task“ a „Core“ v HPC and Analysis Options. Takto připravený model lze následně použít v simulacích v programu ANSYS Simplorer.

7.4 Aplikace modelu do prostředí ANSYS Simplorer

Po vyřešení „Optimetrics“ elektromagnetu v Maxwellu se všemi svými náležitostmi je možná jeho aplikace.

7.4.1 Implementace modelu pomocí „Equivalent Circuit“

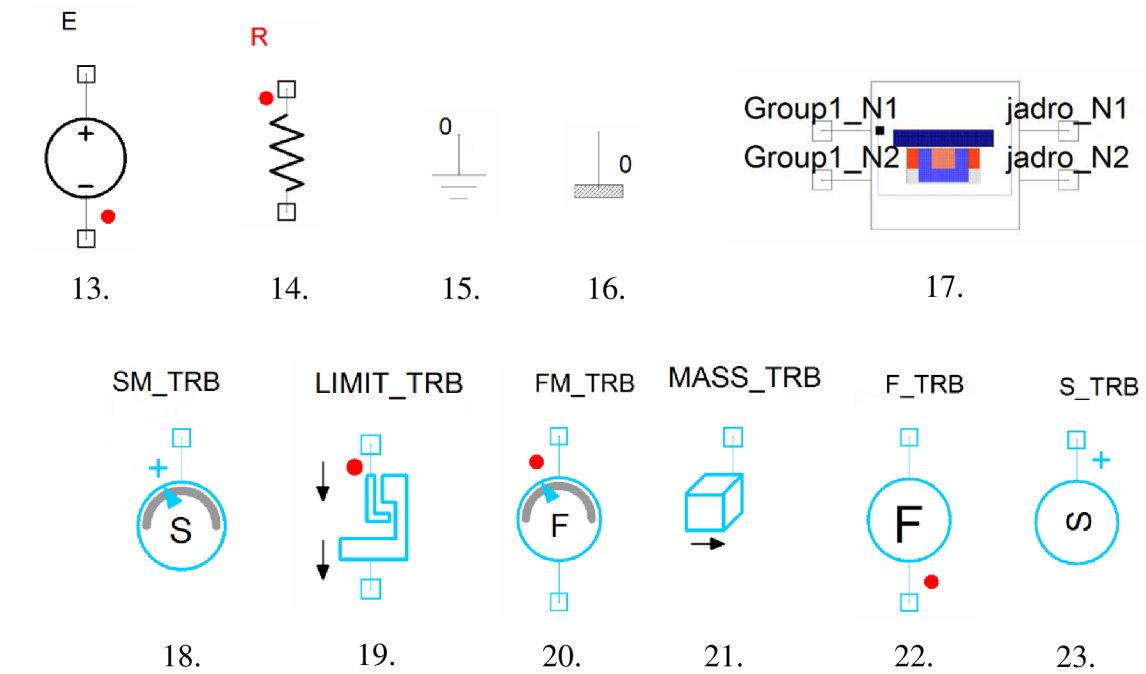
V programu ANSYS Simplorer je postupováno následovně: nejprve se z horní lišty vybere Simplorer Circuit → SubCircuit → Maxwell Component → Add Equivalent Circuit. V tomto novém okně se zvolí přístupová cesta k uloženému souboru Maxwell. V tuto chvíli se sám otevře ANSYS Maxwell s vybraným projektem. Zde je potřeba mít otevřený konkrétně hledaný „Maxwell 2D Design“. Následně se přejde zpět do okna ANSYS Simplorer, kde se definuje: „Design Type - 2D“, „Filter by – Magnetostatic“ a konkrétní název „Maxwell 2D Design“. Poté nutno stisknout tlačítko „Obtain Design Information“ a následně „Extract Equivalent Circuit“. Opět se přechází do prostředí programu ANSYS Maxwell a postupuje se v konfiguraci SubCircuitu. Ponechává se defaultní nastavení, pouze je zvážena možnost „Component“ X nebo Y a jako „Current Variables Represent“ je zvoleno „Ampers“ → zmáčknutí políčka „Další“. Zde se pro jistotu zvolí „Replace Invalid Character in Name with Underscore“, zaškrtne se „Use Bezier Interpolation“ pro větší přesnost → zmáčknutí políčka „Další“. Zde je důležité zadat hloubku modelu „Model depth“, což je v tomto případě 50 mm, v tabulce ve sloupci „Current“ vybrat „I“ místo <Dependent> → zmáčknutí políčka Dokončit. Zpět se přechází do okna ANSYS Simplorer a potvrzeno tlačítkem OK.

Takto vznikne model, který je nutno v prostředí ANSYS Simplorer řádně propojit.

7.4.2 Propojení modelu

Celkové schéma se skládá ze čtyř hlavních částí: části řízení, která je převzata z již funkčního modelu, část elektrická, která propojuje řízení s modelem „Equivalent Circuit“, model elektromagnetu tvořen pomocí „Equivalent Circuit“ a silová část. Všechny použité prvky jsou zobrazeny na Obr. *23*. Bločky 13., 14., a 15. jsou obsaženy v elektrickém obvodě, 16. představuje definovaný „Equivalent Circuit“ elektromagnetu a zbylé bločky jsou obsaženy v silovém obvodě.

Řídící část má celkem tři vstupy. Prvním je konstanta, která určuje požadovanou hodnotu ustálení, a zbylé dvě jsou proměnné v čase. Jedná se o informace o okamžité poloze modelu a o okamžité velikosti proudu modelu. Tyto informace jsou zadány v blocích „Constant Value“.



Obr. 23: Bločky používané při tvorbě simulace v ANSYS Symplorer pomocí „Equivalent Circuit“

Blok 13. s názvem „Voltage Source“ (napěťový zdroj) je připojen na řízení, které tak definuje velikost (v tomto případě polaritu) napětí zdroje.

Blok 14. „Resistor“ (Odpor) je zapojen sériově se zdrojem napětí a blokem „Equivalent Circuit“. Jeho hodnota je nastavena na 0,284 Ω, což reprezentuje odpor vinutí.

Blok 15. a 16. jsou uzemnění obvodu (elektrického i silového). V prostředí ANSYS Simplorer musejí být všechny obvody uzemněny pro jejich správné chování.

Blok 17. představuje výše definovaný „Equivalent Circuit“.

Blok 18. „Translation Position Meter“ (polohoměr) je použit pro zobrazení a odkázaní na okamžitou polohu systému v bloku „Constant Value“ s názvem POLOHA_ZDROJ.

Blok 19. „Translation Limit Stop“ limituje mechanické dorazy levitačního magnetu, kde spodní limit má velikost 1 mm a vrchní 9 mm.

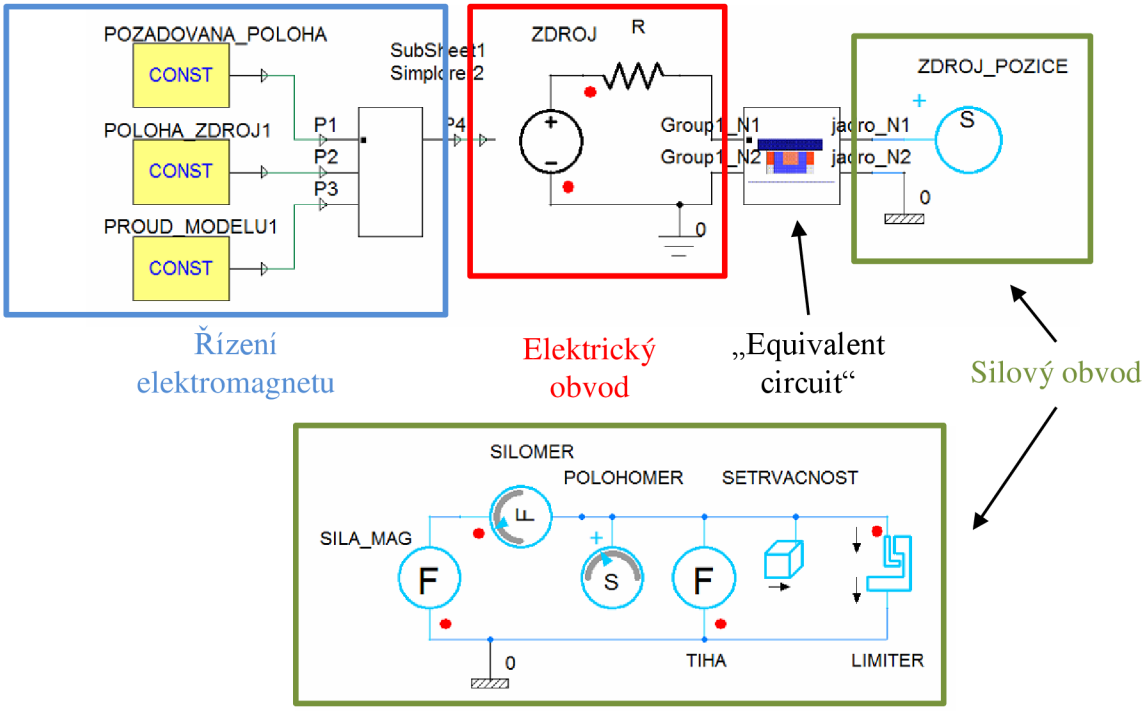
Blok 20. „Translation Force Meter“ (siloměr) umožňuje zobrazit potenciál síly mezi dvěma body silového obvodu.

Blok 21. „Translation Mass“ definuje velikost setrvačných sil magnetu, což je závislé na jeho hmotnosti.

Blok 22. „Translation Force Source“ je použit dvakrát. Jednou představuje tíhu celého magnetu a podruhé odkazuje na velikost síly vznikající elektromagnetickým působením modelu levitačního magnetu.

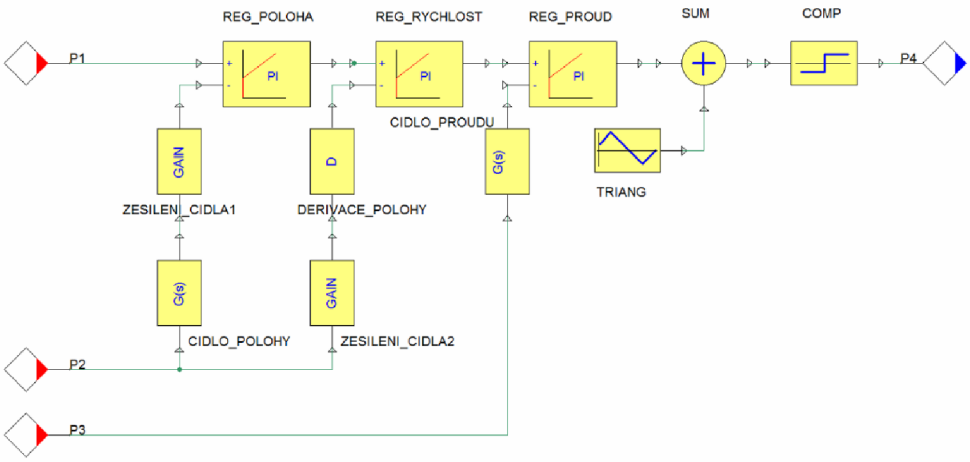
Blok 23. „Translation Position Soutce“ vnucuje modelu informaci o jeho poloze.

Celé schéma propojení „Equivalent Circuit“ s řízením přes elektrický a silový obvod je zobrazeno na Obr. 24.



Obr. 24: Model levitačního magnetu v programu ANSYS Simplorer ve spolupráci s Maxwell

Na Obr. 24 je zobrazen „SubSheet1“, což je vytvořený „SubCircuit“, který obsahuje veškeré prvky řízení. Ten je zobrazen na Obr. 25.



Obr. 25: SubCircuit řízení levitačního magnetu

7.5 Indukčnost modelu levitačního magnetu

7.5.1 Analytický výpočet

Pro ověření reálnosti modelu je analyticky vypočtena vlastní indukčnost levitačního elektromagnetu. Nejprve je definován vztah (7.1) pro výpočet magnetického odporu $R_{m\delta}$ v magnetickém obvodě

$$R_{m\delta} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{l_v}{a_j \cdot b}, \tag{7.1}$$

kde l_v je délka vzduchové mezery, μ_0 permeabilita vakua a součin $a_j \cdot b$ představuje plochu vzduchové mezery.

Vztah pro výpočet indukčnosti L i s dosazením je (*7.2*):

$$L = \frac{N_z^2}{2 \cdot R_{m\delta}} = \frac{\mu_0 \cdot a_j \cdot b \cdot N_z^2}{2 \cdot l_v} = \\ = \frac{4\pi \cdot 10^{-6} \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot (160 \cdot 2)^2}{2 \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 12{,}87\ mH, \tag{7.2}$$

kde N_z je počet závitů cívky.

Při analytickém výpočtu indukčnosti levitačního magnetu je využito hodnot vypsaných v Tab. 1.

Tab. 1.: Zadané a vypočtené hodnoty analytického výpočtu indukčnosti levitačního magnetu

l_v [mm]	a_j [mm]	b [mm]	N [-]	L [mH]
10	40	50	320	12,87

7.5.2 Výpočet pomocí simulace

Parametrickému modelu zobrazenému na Obr. 22 je vytvořena kopie, které je změněn „Solution Type“ na „Transient“, je povoleno propojení na ANSYS Simplorer a následně je vložen v tomto prostředí jako „SubCircuit“ „Transient Cosimulation“. Tento „SubCircuit“ je připojen na napěťový zdroj a odpor. Je zapojen i silový obvod jako na Obr. 24. Z grafického průběhu nárůstu velikosti proudu odporem v čase je odečtena velikost časové konstanty τ = 8,6 ms.

Velikost indukčnosti elektromagnetu pomocí simulace je tedy dle vztahu (7.3) stanovena na 2,5 mH. Tato hodnota je sice nižší oproti analyticky vypočtené hodnotě, ovšem to je nejspíše způsobeno zanedbáním magnetického rozptylu ve vzduchových mezerách, které jsou 10 mm velké.

$$L = \tau \cdot R_{vin,m} = 8{,}7 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}284 = 2{,}47\ mH \tag{7.3}$$

Při výpočtu indukčnosti levitačního magnetu pomocí simulace je využito hodnot vypsaných v Tab. 2.

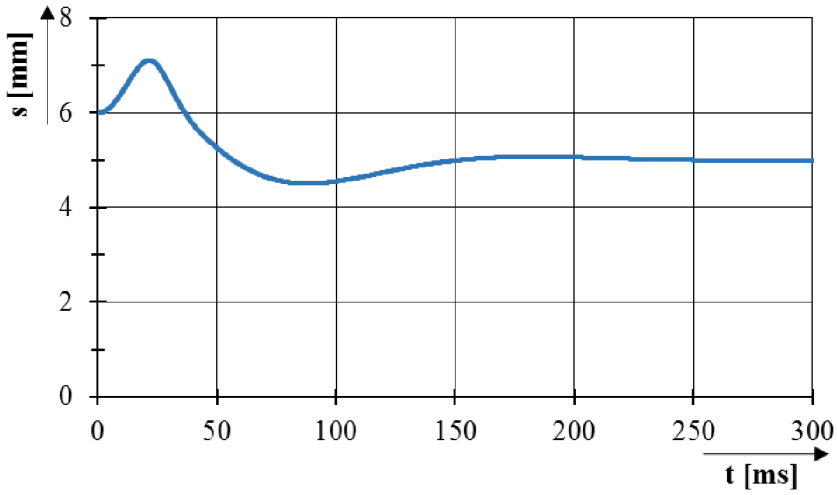
Tab. 2: Známé a vypočtené hodnoty výpočtu indukčnosti levitačního magnetu pomocí simulace

I_{max} [A]	$I_{63\%}$ [A]	τ [ms]	$R_{vin,m}$ [Ω]
35,2	22,3	8,63	0,284

7.6 Grafické vyhodnocení simulací

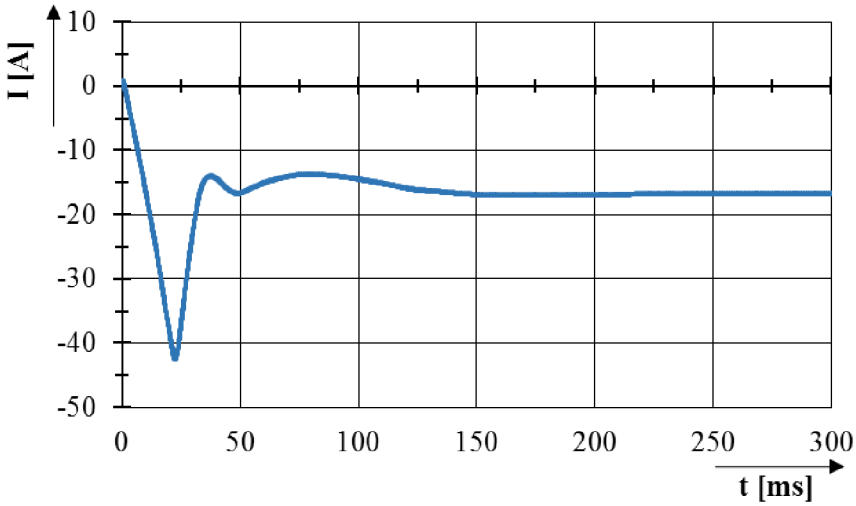
Průběhy polohy a proudu levitačního magnetu simulované pomoci modelu MKP jsou znázorněny na Obr. 26 a Obr. 27.

Průběhy polohy jak simulace pomocí MKP, tak matematického modelu si jsou velmi blízké. Děj je provázen počátečním zvětšením vzdálenosti, což odpovídá poklesu magnetu, následnému přitažení a vyrovnání.



Obr. 26: Průběh polohy levitačního elektromagnetu v simulaci pomoci MKP v ANSYS Maxwell a Simplorer

Na Obr. 27 je znázorněn průběh proudu modelem. Průběhy jsou opět podobné, jak pro simulaci matematického modelu, tak pro simulaci s MKP. Ustálená hodnota proudu je po dosažení žádané polohy 16,7 A.



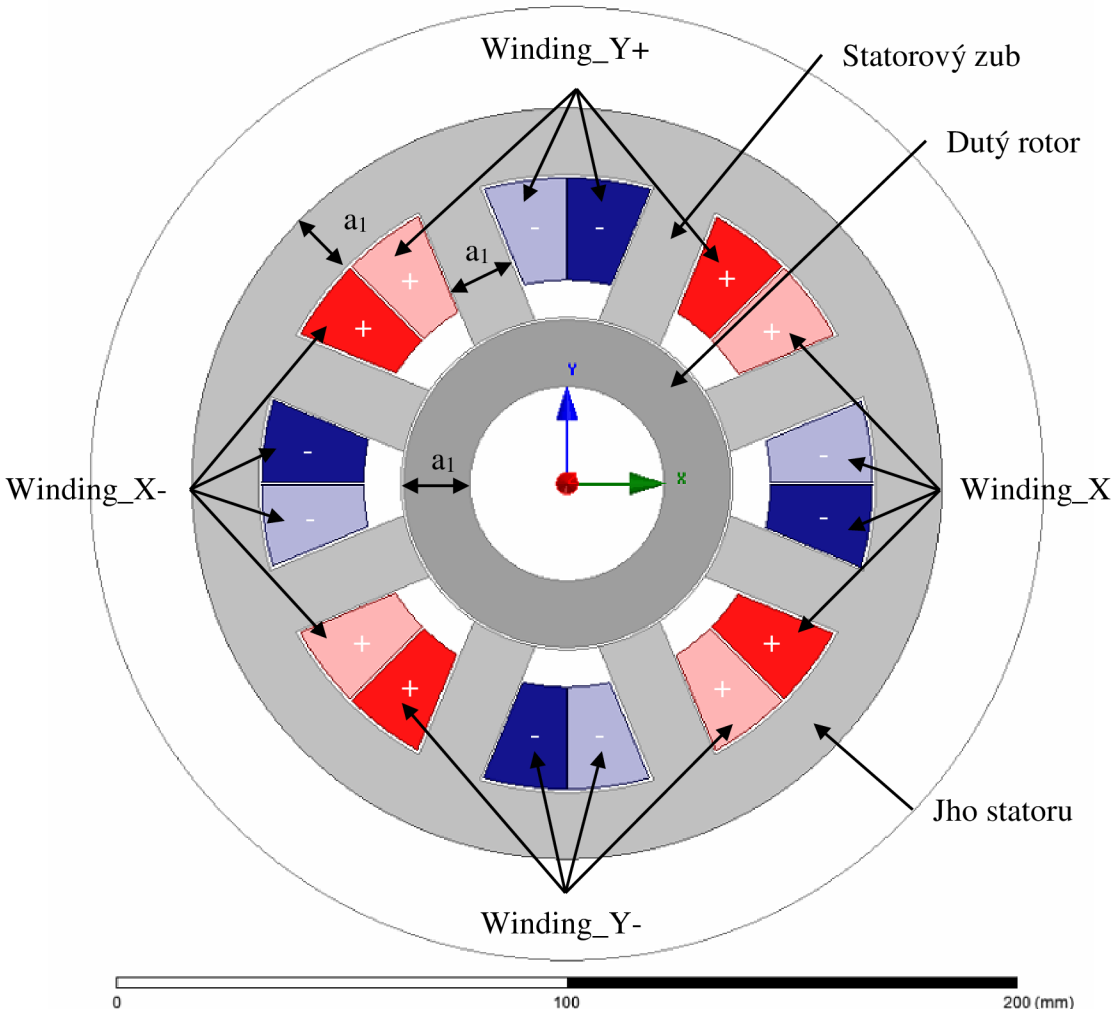
Obr. 27: Průběh proudu levitačního elektromagnetu v simulaci pomoci MKP v ANSYS Maxwell a Simplorer

8 MKP model magnetického ložiska a jeho simulace

Dále je v této práci vytvořen model magnetického ložiska a provedena jeho simulace.

8.1 Model ložiska v ANSYS Maxwell

V prostředí ANSYS Maxwell je vytvořen model „Maxwell 2D Design“, „Transient“ stávající se ze statorového plechu, dutého rotoru a jednotlivých vinutí. Každé vinutí je tvořeno dvěma sériově zapojenými cívkami, z čehož plyne osm cívek neboli osm statorových zubů. Každá cívka je tvořena 213 závity. Model je zobrazen na Obr. 28.



Obr. 28: Model magnetického ložiska se znázorněnými směry proudů vinutí

V modelu jsou požity následující materiály: „copper“ (jednotlivé plochy vinutí), „steel_1010“ (plocha dutého rotoru), „M22_26G1“ (statorový plech) a „vacuum“ (vzduchová mezera, okolí vinutí, vnitřek rotoru a okolí celého ložiska).

Statorovému plechu „M22_26G1“ jsou definované parametry v závislosti na frekvenci (tyto závislosti odpovídají plechu značenému M400-50A), což umožňuje programu vypočítávat „CoreLoss“ neboli ztráty hysterezní a ztráty vířivými proudy. Pro jednoduchost simulací má magnetický obvod ve všech místech stejný průřez – výška jha, šířka zubů i tloušťka rotoru je stejná.

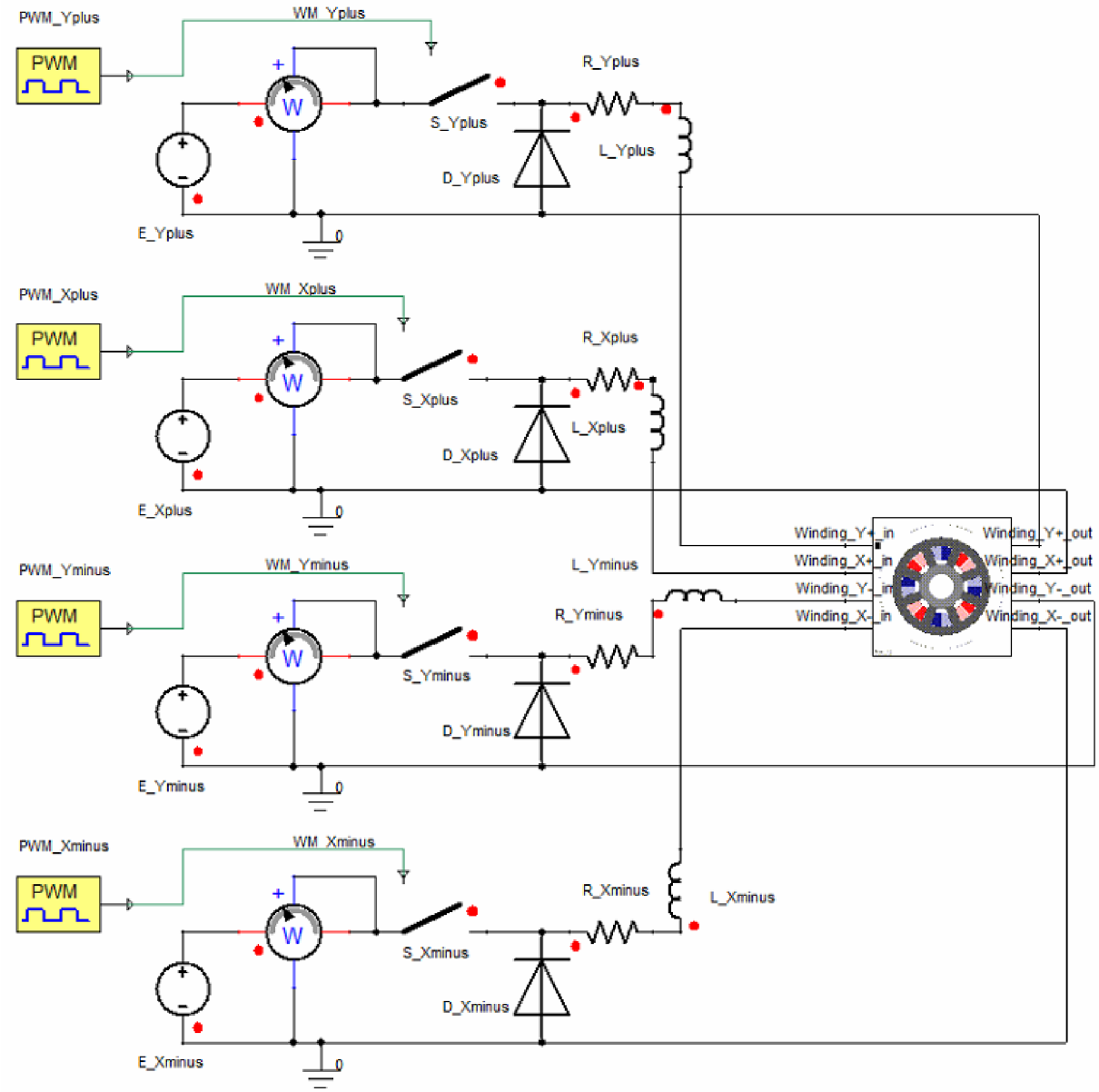
V ploše rotoru je povolen výpočet „SolidLoss“ neboli ztrát vířivými proudy.

V modelu je parametricky zadaná osa rotoru, což umožňuje měnit jeho výchylku. Vzduchová mezera při nulové výchylce rotoru je 0,6 mm. Velikost proudu vinutím je nastavená tak, aby byla řízena externě.

8.2 Simulace ložiska v ANSYS Simplorer

8.2.1 Sestava simulačního modelu

Model ložiska není vložen do prostředí ANSYS Simplorer stejným způsobem jako v případě simulace levitačního magnetu, ovšem pomocí „SubCircuit“ „Transient Cosimulation“, což umožňuje získat informaci o velikosti a průběhu „CoreLoss“ a „SolidLoss“, které jsou vyřešeny v prostředí ANSYSY Maxwell. Celý model je zobrazen na Obr. 29.



Obr. 29: Model levitačního ložiska v programu ANSYS Simplorer ve spolupráci s Maxwell

Každé ze čtyř vinutí je připojeno na samostatný napěťový obvod tvořený napěťovým zdrojem, wattmetrem, pulzně šířkově modulovaným (PWM) spínačem, rezistorem, cívkou a paralelně spojenou diodou. Na wattmetru odečítáme celkový příkon soustavy. Rezistor představuje ohmické vlastnosti jednotlivých vinutí (3,67 Ω). Cívka je do meziobvodu zařazena ze dvou důvodů. Zaprvé z důvodu zahrnutí vzájemných indukčností vinutí a zadruhé kvůli snadnému nastavení počátečního proudu simulací. Dioda plní svůj úkol při rozepnutém spínači, kdy proud tekoucí přes vinutí nemůže být mžikově přerušen, ale uzavírá se zpět přes diodu v propustném směru.

Celý systém je nastaven tak, aby byl řízen pomocí PWM. Bločky PWM, které jsou použity v modelu, mají parametricky zadanou velikost střídy s. To může být využito při potenciálním řízení celého systému.

Definované parametry modelu jsou zapsány v Tab. 3, kde R_d je dynamický odpor diody, U_p je prahové napětí a R_{vin} odpor jednoho vinutí ložiska.

Tab. 3: Definované parametry modelu

R_d [Ω]	U_p [V]	$R_{vin,l}$ [Ω]
0,001	0,8	3,67

8.2.2 Vyhodnocení ztrát modelu ložiska

V projektu ANSYS Simplorer s názvem BOD3 je model vyobrazený na obr. 29 vložen do pěti „Simplorer Design“ a každý je jinak přednastaven pro simulaci. Každý „Simplorer Design“ obsahuje „SubCircuit“, jenž je obsažen v souboru ANSYS Maxwell s názvem BOD3 s pěti „Maxwell 2D Design“, které jsou také rozdílně parametrizovány.

První „Simplorer Design“ je pojmenován 01_VYKONY_MAX_vy a má nastavenou maximální možnou výchylku rotoru (0,59 mm), počáteční proud 2,3 A a velikost střídy 0,75. Jsou odečteny hodnoty příkonu jednotlivých vinutí ložiska, proudů vinutími a ztrát hysterezní a vířivými proudy. Tyto hodnoty jsou zapsány v Tab. 4, která obsahuje i vypočtené hodnoty odporových ztrát vinutí, ztráty na diodách a relativní chybu mezi příkonem a ztrátami.

Příklady výpočtů pro Tab. 4, Tab. 5, Tab. 6, Tab. 7 a Tab. 8 jsou vztahy (8.1), (8.2)

$$P_{celk} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 19{,}97 + 19{,}97 + 19{,}97 + 19{,}97 = \\ = 79{,}94\ W, \tag{8.1}$$

kde P_{celk} je celkový příkon ložiska a $P_{1\text{-}4}$ jsou příkony jednotlivých vinutí,

$$\Delta P_{1vin} = R_{vin,l} \cdot I_{vin}^2\,, \tag{8.2}$$

kde ΔP_{1vin} jsou ztráty jednoho vinutí a I_{vin} je velikost proudu jednoho vinutí. Pro získání ΔP_{vin} jsou sečteny ztráty na všech čtyřech vinutích. Dále vztah (8.3)

$$\Delta P_{1diod} = U_p \cdot I_{stř,dio} + R_d \cdot I_{ef,dio}^2\,, \tag{8.3}$$

kde ΔP_{1diod} jsou ztráty na jedné diodě, $I_{stř,dio}$ je střední hodnota proudu diodou a $I_{ef,dio}$ je efektivní hodnota proudu diodou. Pro získání ΔP_{diod} jsou sečteny ztráty všech čtyř diod. Další vztah (8.4)

$$\Delta P_{celk} = \Delta P_{CL} + \Delta P_{SL} + \Delta P_{vin} + \Delta P_{diod}\,, \tag{8.4}$$

kde ΔP_{celk} jsou celkové ztráty ložiska a poslední vztah (8.5)

$$\delta_x = \frac{\Delta P_{celk} - P_{celk}}{\Delta P_{celk}} \cdot 100\,, \tag{8.5}$$

kde δ_x je relativní chyba mezi příkonem a ztrátami.

Tab. 4: Hodnoty získané pomocí simulace z modelu 01_VYKONY_MAX_vy a výpočty ztrát

	$P_{cívky}$ [W]	I_{vin} [A]	$I_{stř,dio}$ [A]	$I_{ef,dio}$ [A]		Ztráty [W]	δ_x [%]
X-	19,9743	2,3057	0,5768	1,1525	$_{\Delta}P_{CL}$	3,7336m	**-0,01**
X+	19,9743	2,3057	0,5768	1,1525	$_{\Delta}P_{SL}$	22,3173m	
Y-	19,9710	2,3058	0,5770	1,1530	$_{\Delta}P_{vin}$	78,0494	
Y+	20,0155	2,3060	0,5760	1,1511	$_{\Delta}P_{diod}$	1,8506	
P_{celk}	**79,94**				$_{\Delta}P_{celk}$	**79,93**	

Druhý „Simplorer Design“ 02_VYKONY_NUL_vy je nastaven totožně jako první s tím rozdílem, že rotor má nulovou výchylku. Veškeré hodnoty jsou shrnuty v Tab. 5.

Tab. 5: Hodnoty získané pomocí simulace z modelu 02_VYKONY_NUL_vy a výpočty ztrát

	$P_{cívky}$ [W]	I_{vin} [A]	$I_{stř,dio}$ [A]	$I_{ef,dio}$ [A]		Ztráty [W]	δ_x [%]
X-	19,9592	2,3047	0,5765	1,1521	$_{\Delta}P_{CL}$	3,5988m	**0,01**
X+	19,9592	2,3047	0,5765	1,1521	$_{\Delta}P_{SL}$	18,8596m	
Y-	19,9592	2,3047	0,5765	1,1521	$_{\Delta}P_{vin}$	77,9749	
Y+	19,9592	2,3047	0,5765	1,1521	$_{\Delta}P_{diod}$	1,8501	
P_{celk}	**79,84**				$_{\Delta}P_{celk}$	**79,85**	

Třetí „Simplorer Design“ 03_STRIDA05_NUL_vy má opět nulovou výchylku rotoru, ovšem střída je nastavena na 0,5 a počáteční proud je tedy snížen na hodnotu 1,45 A. Hodnoty jsou shrnuty v Tab. 6.

Tab. 6: Hodnoty získané pomocí simulace z modelu 03_STRIDA05_ NUL _vy a výpočty ztrát

	$P_{cívky}$ [W]	I_{vin} [A]	$I_{stř,dio}$ [A]	$I_{ef,dio}$ [A]		Ztráty [W]	δ_x [%]
X-	8,4284	1,4602	0,7304	1,0321	$_{\Delta}P_{CL}$	10,9045m	**-0,11**
X+	8,4284	1,4602	0,7304	1,0321	$_{\Delta}P_{SL}$	24,2677m	
Y-	8,4284	1,4602	0,7304	1,0321	$_{\Delta}P_{vin}$	31,3005	
Y+	8,4284	1,4602	0,7304	1,0321	$_{\Delta}P_{diod}$	2,3415	
P_{celk}	**33,71**				$_{\Delta}P_{celk}$	**33,68**	

Čtvrtý „Simplorer Design“ 04_STRIDA025_NUL_vy má opět sníženou střídu až na 0,25, což znamená i snížení velikosti počátečního proudu na 0,62 A. Se snižující se střídou se snižují i velikosti příkonů a ztrát ložiska. Hodnoty shrnuty v Tab. 7.

Tab. 7: Hodnoty získané pomocí simulace z modelu 04_STRIDA025_ NUL _vy a výpočty ztrát

	$P_{cívky}$ [W]	I_{vin} [A]	$I_{stř,dio}$ [A]	$I_{ef,dio}$ [A]		Ztráty [W]	δ_x [%]
X-	1,8056	0,6259	0,4695	0,5417	$_{\Delta}P_{CL}$	2,8705m	**0,69**
X+	1,8056	0,6259	0,4695	0,5417	$_{\Delta}P_{SL}$	15,2305m	
Y-	1,8056	0,6259	0,4695	0,5417	$_{\Delta}P_{vin}$	5,7509	
Y+	1,8056	0,6259	0,4695	0,5417	$_{\Delta}P_{diod}$	1,5036	
P_{celk}	**7,22**				$_{\Delta}P_{celk}$	**7,27**	

Pátý „Simplorer Design“ je 05_STRIDA025_POSUV_NUL_vy, který je stejný jako čtvrtý, ovšem ve vinutích působících v záporných směrech os x a y jsou nastaveny bločky PWM s fázovým posunem 180°. Hodnoty shrnuty v Tab. 8.

Tab. 8: Hodnoty získané pomocí simulace z modelu 05_STRIDA025_POSUV_ NUL _vy a výpočty ztrát

	$P_{cívky}$ [W]	I_{vin} [A]	$I_{stř,dio}$ [A]	$I_{ef,dio}$ [A]		Ztráty [W]	δ_x [%]
X-	1,7968	0,6198	0,4642	0,5360	$_{\Delta}P_{CL}$	5,8564m	**1,19**
X+	1,7912	0,6298	0,4746	0,5463	$_{\Delta}P_{SL}$	22,0245m	
Y-	1,7968	0,6198	0,4642	0,5360	$_{\Delta}P_{vin}$	5,7311	
Y+	1,7912	0,6298	0,4746	0,5463	$_{\Delta}P_{diod}$	1,5033	
P_{celk}	**7,18**				$_{\Delta}P_{celk}$	**7,26**	

8.3 Indukčnost modelu magnetického ložiska

Z důvodu ověření funkčnosti modelu magnetického ložiska je model otestován na velikost indukčnosti jednoho vinutí v případě maximální výchylky rotoru. V programu ANSYS Maxwell je odečtena hodnota 0,9 H.

8.3.1 Analytický výpočet

Analytický výpočet této indukčnosti vychází ze základních vztahů (8.6) a (8.7). Pro určení velikosti indukčnosti při výpočtu magnetického odporu je zanedbána velikost vzduchových mezer, jelikož v modelu se rotor nachází ve své krajní pozici, kdy dochází téměř ke styku statoru s rotorem.

$$L = \frac{N^2}{R_m} \tag{8.6}$$

$$R_m = \frac{1}{\mu_0 \mu_{rpl}} \cdot \frac{l_{stř}}{S_{stř}} \tag{8.7}$$

Délku střední siločáry magnetického toku lze počítat jako křivku složenou ze čtyř částí, přičemž dvě jsou stejné, jak je zobrazeno v Obr. 30. K určení délky l_1 pomocí vztahu (8.9) je nutno určit poloměr r_1, na kterém se nachází, pomocí rovnice (8.8)

$$r_1 = \frac{d_{out} - a_1}{2} = \frac{170 - 15}{2} = 77{,}5\ mm, \tag{8.8}$$

kde d_{out} je vnější průměr statorového plechu a a je výška jha viz Obr. 28.

$$l_1 = \frac{2\pi \cdot r_1}{Q} = \frac{2\pi \cdot 77{,}5}{8} = 60{,}87\ mm \tag{8.9}$$

Délka l_2 je určena stejně jako l_1 ovšem s novým poloměrem r_2. Tyto výpočty jsou v rovnicích (8.10) a (8.11)

$$r_2 = \frac{d_{in} - a}{2} = \frac{75{,}2 - 15}{2} = 30{,}1\ mm, \tag{8.10}$$

kde d_{in} je vnitřní průměr statorového plechu.

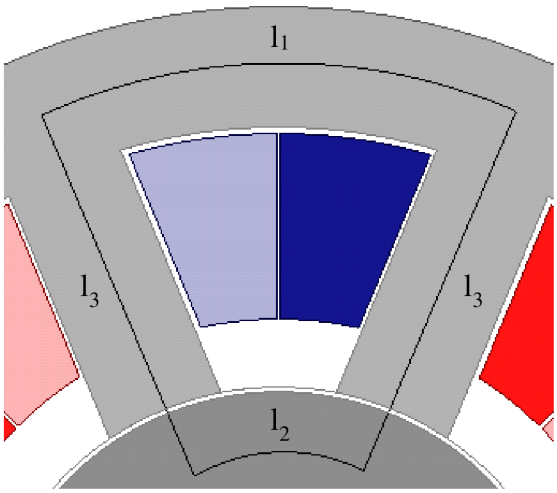
$$l_2 = \frac{2\pi \cdot r_2}{Q} = \frac{2\pi \cdot 30{,}1}{8} = 23{,}64\ mm \tag{8.11}$$

Poslední délka l_3 je určena vztahem (8.12).

$$l_3 = \frac{d_{out} - d_{in}}{2} = \frac{170 - 75{,}2}{2} = 47{,}4\ mm \tag{8.12}$$

Celková délka střední siločáry s použitím předchozích vztahu je určena rovnicí (8.13).

$$l_{stř} = l_1 + l_2 + 2 \cdot l_3 = 60{,}87 + 23{,}64 + 2 \cdot 47{,}4 = 179{,}31\ mm \tag{8.13}$$



Obr. 30: Schéma střední siločáry

Průřez obvodu magnetického toku $S_{stř}$ je dán vztahem (8.14)

$$S_{stř} = a_1 \cdot l_{lož} = 15 \cdot 10^{-3} \cdot 70 \cdot 10^{-3} = 1{,}05 \cdot 10^{-3}\ m^2\ , \tag{8.14}$$

kde $l_{lož}$ je délka ložiska.

Relativní permeabilita statorového plechu a rotoru je dána vztahem (8.15) a pro oba materiály je z důvodu zjednodušení totožná. Tento vztah je získán z rovnice regrese lineární části BH křivky materiálu „M22_26G1“ použitém v modelu ANSYS Maxwell.

$$\mu_{rpl} = \frac{k}{\mu_0} = \frac{1{,}46569 \cdot 10^{-3}}{\mu_0} = 1166{,}36\ (-) \tag{8.15}$$

Dosazením do rovnice (8.6) získáme vztah (8.16) a výsledná analyticky získána indukčnost je 1,558 H. Tato hodnota je sice více než indukčnost získána ze simulace, ovšem simulace započítává i rozptyl na vzduchové mezeře a její magnetický odpor. Z toho důvodu je tedy usouzeno, že simulace pomocí ANSYS Maxwell odpovídá analytické metodě.

$$L_l = \frac{N_l^2}{R_m} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_{rpl} \cdot S_{stř} \cdot N_l^2}{l_{stř}} = \\ = \frac{4\pi \cdot 10^{-6} \cdot 1166{,}36 \cdot 1{,}05 \cdot 10^{-3} \cdot 426^2}{179{,}3 \cdot 10^{-3}} = 1{,}558\ H \tag{8.16}$$

V této části bylo počítáno s hodnotami zobrazenými v Tab. 9 a byly vypočteny hodnoty, které jsou zobrazeny v Tab. 10.

Tab. 9: Zadané hodnoty pro výpočet magnetické indukce

d_{out} [mm]	d_{in} [mm]	a_1 [mm]	$l_{lož}$ [mm]	N_l [-]	k [-]
170	75,2	15	70	426	1,46569m

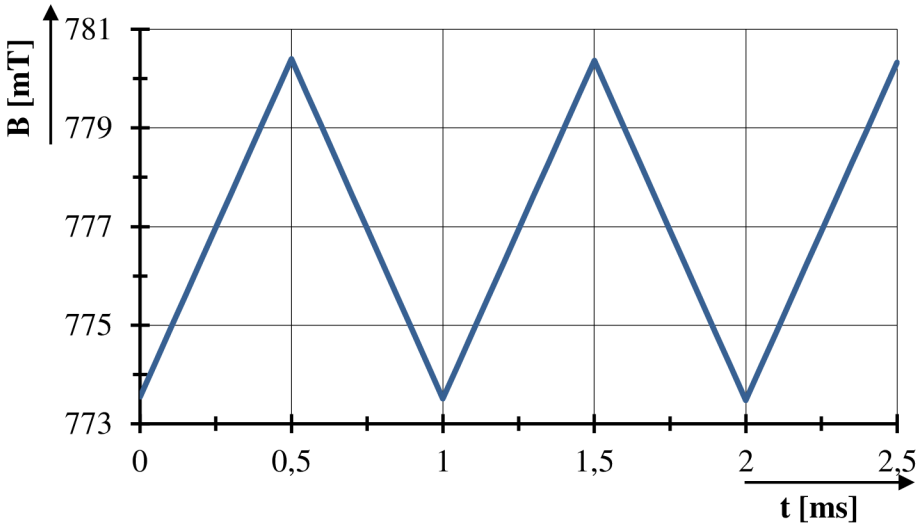
Tab. 10: Vypočtené hodnoty

r_1 [mm]	r_2 [mm]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_3 [mm]	$l_{stř}$ [mm]	μ_{rpl} [-]	L_l [H]
77,5	30,1	60,87	23,64	47,4	179,31	1166,36	1,558

8.4 Grafické vyhodnocení ložiska

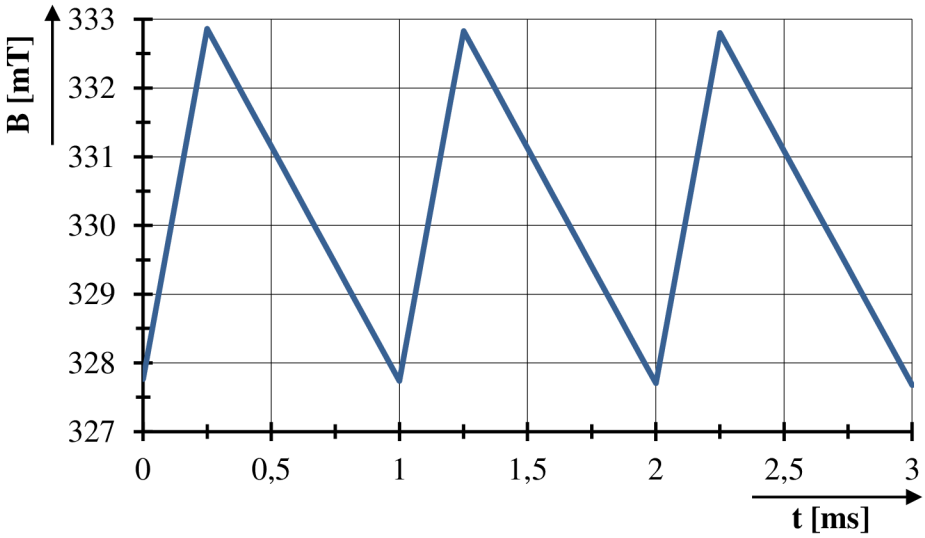
Pomocí programu ANSYS Maxwell jsou získány průběhy simulací a následně zobrazeny v této práci.

Na Obr. 31 je zobrazen průběh velikosti magnetické indukce v magnetickém obvodě (v bodě ve statorovém zubu). V tomto případě je velikost ustáleného proudu vinutím 1,46 A při střídě 0,5. Průběh magnetické indukce lineárně odpovídá průběhu proudu vinutím. Frekvence spínání a rozpínání obvodu vinutí je natolik velká (1 kHz), že „ustálená“ hodnota proudu kmitá pouze v rozmezí 17 mA. Průběh nárůstu a poklesu proudu vlivem indukčnosti vinutí není lineární, ovšem jeho nelinearita je natolik malá, že průběh magnetické indukce se jeví jako pilovitý.



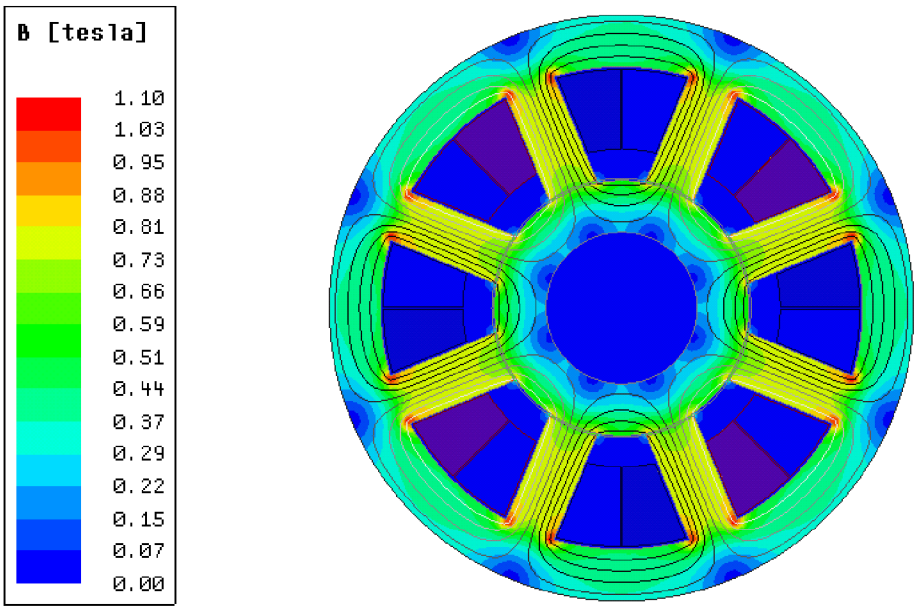
Obr. 31: Průběh velikosti magnetické indukce ve statorovém zubu v čase při střídě 0,5 a střední hodnotě proudu 1,46 A

Na Obr. 32 je znázorněn průběh magnetické indukce magnetického obvodu při střídě 0,25 a ustálené velikosti proudu 0,62 A. V tomto případě je hodnota kolísání proudu 14 mA a průběh magnetické indukce se opět jeví pilovitě. V obou případech je zřejmé, že velikost magnetické indukce kolísá kolem své střední hodnoty o ±3 mH, přičemž největší zvlnění proudu i magnetické indukce odpovídá střídě 0,5.



Obr. 32: Průběh velikosti magnetické indukce ve statorovém zubu v čase při střídě 0,25 a střední hodnotě proudu 0,62 A

Na Obr. 33 je znázorněno rozložení magnetické indukce ložiska při střídě 0,5 a trasy magnetických siločár. Je patrné, že největší velikost magnetické indukce je ve středu cívek (statorových zubech) a na hranách magnetického obvodu.



Obr. 33: Zobrazení magnetických siločár a velikosti magnetické indukce v ložisku

9 Závěr

První část bakalářské práce se zabývala obecně problematikou a funkčními principy magnetických ložisek. Je zde zmínka o tzv. skinefektu vyvolaném v rotoru ložiska a vlivu proti sobě působících cívek, díky kterým lze docílit zjednodušení silových vlivů na rotor, pomocí budícího a řídicího proudu. V další části jsou popsány konstrukční možnosti aktivních magnetických ložisek, mezi něž patří trojosé magnetické ložisko a konické magnetické ložisko.

Další kapitola se zabývala řízením magnetické levitace a popisovala její základní principy a možnost řízení pomoci PD, PID regulátoru či stavově.

Práce obsahovala uvedení a seznámení se s prostředím ANSYS, ve kterém je kladen důraz na software Maxwell a Simplorer.

V následující části práce byl popsán matematický model levitačního magnetu, pomocí něhož byl vytvořen simulační model v programu ANSYS Simplorer. Následně byl tento model nahrazen simulací na principu MKP provedenou programem ANSYS Maxwell. Tato simulace byla implementována do prostředí ANSYS Simplorer a zprovozněna. V práci byly zobrazeny průběhy polohy a proudu simulace.

Dále byl v práci vytvořen funkční model dvouosého magnetického ložiska v prostředí ANSYS Maxwell, které je tvořeno ze statorového plechu o osmi zubech, na nichž jsou navinuty cívky tak, že tvoří heteropolární systém ložiska. Pomocí napojení na ANSYS Simplorer je model otestován a odsimulován.

Věrohodnost obou modelů prováděných v prostředí ANSYS Maxwell byla ověřena pomocí analytických výpočtů vlastních indukčností vinutí, které odpovídají indukčnostem získaných ze simulací.

Součástí této práce bylo popsání jednotlivých bločků využívaných během simulací. Také byl v práci sepsán podrobný návod k tomu, jak správně nastavit simulaci, aby bylo možné vložit „SubCircuit“ z programu ANSYS Maxwell do Simplorer a to s využitím „Equivalent Circuit“. Tato funkce umožňuje uživateli zadat v prostředí ANSYS Maxwell vlastnosti modelu, které budou vypočteny a linearizovány v sekci „Optimetrics“. Hlavní výhodou této funkce je zjednodušení a urychlení následných simulačních dějů prováděných programem ANSYS Simplorer.

Literatura

[1] *How magnetic bearing works* [online]. FILATOV a Larry HAWKINS. 2013 [cit. 2015-11-07]. Dostupné z: http://www.calnetix.com/sites/default/files/CALNETIX_HOW_MAGNETIC_BEARINGS_WORK.pdf

[2] BARTOŇ, Lukáš. *Znalostní podpora pro návrh systému aktivního magnetického ložiska*. Plzeň, 2012. Dostupné také z: https://dspace.zcu.cz/bitstream/handle/11025/5835/dizertace_v20.pdf?sequence=1. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Jaromír HORÁK, CSc.

[3] MATSUDA, K., Y. KANEMITSU a S. KIJIMOTO. Optimal Number of Stator Poles for Compact Active Radial Magnetic Bearings. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2007, 43(8): 3420-3427. DOI: 10.1109/TMAG.2007.900184. ISSN 0018-9464. Dostupné také z: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4277907

[4] ORGANIZED BY KIEE, IEEJ CO-ORGANIZED BY CES a IEEE TECHNICAL CO-SPONSOR. *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2010 International Conference on*. Piscataway: I E, 2010. ISBN 978-142-4477-203. ISSN 978-1-4244-7720-3.

[5] SHILEI XU a JIANCHENG FANG. A Novel Conical Active Magnetic Bearing With Claw Structure. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2014, **50**(5): 1-8. DOI: 10.1109/TMAG.2013.2295060. ISSN 0018-9464. Dostupné také z: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6684287

[6] CHIBA, Akira. *Magnetic bearings and bearingless drives*. London: Elsevier/Newnes, 2005, xviii, 381 p. ISBN 0 7506 5727 8.

[7] KADLEC, Michal. *Levitační elektromagnet*. Brno, 2011. Bakalářská. VUT Brno.

[8] EATON, D, J RAMA a S SINGHAL. Magnetic bearing applications. *2010 Record of Conference Papers Industry Applications Society 57th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference (PCIC)* [online]. IEEE, 2010, : 1-9 [cit. 2015-12-03]. DOI: 10.1109/PCIC.2010.5666819. ISBN 978-1-4244-6800-3. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5666819

[9] *ANSYS Electronics* [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: https://www.svsfem.cz/content/ansys-ansoft-0

[10] *Víceparametrový regulátor oběhového čerpadla*. Brno, 2010. Diplomová práce. VUT Brno, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, UREL. Vedoucí práce Doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

[11] SKALICKÝ, Jiří. *Teorie řízení*. Druhé. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2002.

[12] *Simulation modeling of machatronics systems 2*. Brno: Brno University of Technology, 2006. ISBN 84-3341-80-21.