



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## NÁVRH MAGNETICKÉHO LOŽISKA PRO ČERPADLO

DESIGN OF MAGNETIC BEARING FOR PUMP

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radomír Pruša

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.

BRNO 2016



# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Radomír Pruša

**ID:** 164376

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2015/16

**NÁZEV TÉMATU:**

## Návrh magnetického ložiska pro čerpadlo

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Provedte literární rešerši na téma konstrukce aktivních a pasivních magnetických ložisek.
2. Provedte výpočet potřebných sil, které budou působit na oběžné kolo hydraulického stroje.
3. Pro vypočtené síly navrhnete aktivní radiální magnetické ložisko a pasivní axiální ložisko.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

- [1] A. Chiba, T. Fukao, O. Ichikawa, M. Oshima, M. Takemoto, D.G. Dorrell, Magnetic bearings and bearingless drives. Elsevier 2005.
- [2] B. Polajzer, Magnetic Bearings, Theory and Applications, Rijeka, Croatia, InTech 2010
- [3] GANČO, M.: Axiální síla hydrodynamických čerpadel s radiálním obežným kolesom. Strojnícky časopis 47, 1996, č.2, str. 94-105

**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 předkládané bakalářské práce je navrhnout magnetický ložiskový systém přečerpávacího zařízení. Použití magnetických ložisek vychází z požadavku zamezení kontaktu čerpaného média s jakýmkoliv mazacím prostředkem. Navržené pasivní ložisko se skládá ze tří axiálně polarizovaných prstencových magnetů využívajících odpuzivých magnetických sil. Navržené osmipólové radiální ložisko je tvořeno lištěným státorem s vyniklými póly a dvouvrstevným soustředným vinutím. Rotor ložiska je dutý, neboť současně slouží jako přívod čerpané kapaliny k oběžnému kolu odstředivého čerpadla. Návrh obou ložisek je založen na metodě konečných prvků programu ANSYS Maxwell. Výsledky simulací sil axiálního ložiska byly porovnány s hodnotami získanými experimentálním laboratorním měřením. Namáhání konstrukčních součástí ložisek bylo ověřeno implementovanou funkcí pevnostní analýzy v prostředí Autodesk Inventor. Součástí práce je rešerše na téma konstrukce aktivních a pasivních magnetických ložisek.

## **Abstract**

The aim of this thesis is to design a magnetic bearing system for a pump. The use of magnetic bearings is based on the necessity of preventing the contact of the pumped fluid with a lubricant. The designed passive bearing consists of three axially polarized annular magnet using repulsive magnetic forces. The designed eight-pole radial bearing is formed by a laminated stator with salient poles and two-layer concentric winding. The rotor of the bearing is hollow because it also serves as a liquid supply of the impeller to centrifugal pump. The design of both bearings is based on the finite element method from the software ANSYS Maxwell. The results from simulating the axial bearing forces have been compared with the values obtained from experimental laboratory measurements. The component stress has been verified by implementing the function of stress analysis in Autodesk Inventor. The work includes research on the topic of constructing active and passive magnetic bearings.

## **Klíčová slova**

aktivní magnetické ložisko, elektromagnetismus, magnetismus, metoda konečných prvků, pasivní magnetické ložisko

## **Keywords**

active magnetic bearing, electromagnetism, finite element method, magnetism, passive magnetic bearing

## **Bibliografická citace**

PRUŠA, R. *Návrh magnetického ložiska pro čerpadlo*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 74 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh magnetického ložiska pro čerpadlo 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

<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>17</b>
<b>2 KONSTRUKCE MAGNETICKÝCH LOŽISEK .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 PASIVNÍ MAGNETICKÁ LOŽISKA .....</b>	<b>18</b>
2.1.1 AXIÁLNÍ MAGNETICKÉ LOŽISKO SE TŘEMI PRSTENCOVÝMI MAGNETY .....	18
2.1.2 PASIVNÍ MAGNETICKÉ LOŽISKO PRO POUŽITÍ V KREVNÍ PUMPĚ .....	19
2.1.3 MAGNETICKÉ LOŽISKO S HALBACHOVOU ŘADOU .....	20
<b>2.2 AKTIVNÍ MAGNETICKÁ LOŽISKA .....</b>	<b>22</b>
2.2.1 HETEROPOLÁRNÍ RADIÁLNÍ MAGNETICKÉ LOŽISKO SE STÁLOU MAGNETIZACÍ.....	22
2.2.2 KUŽELOVÉ MAGNETICKÉ LOŽISKO S DRÁPKOVOU STRUKTUROU .....	23
2.2.3 TŘÍOSÉ MAGNETICKÉ LOŽISKO S VÁLCOVÝM ROTOREM.....	25
<b>3 VÝPOČET SIL .....</b>	<b>28</b>
<b>3.1 AXIÁLNÍ SÍLA .....</b>	<b>28</b>
<b>3.2 RADIÁLNÍ SÍLA.....</b>	<b>30</b>
<b>4 ANSYS MAXWELL .....</b>	<b>32</b>
<b>5 NÁVRH PASIVNÍHO MAGNETICKÉHO LOŽISKA .....</b>	<b>33</b>
<b>5.1 VOLBA TYPU A ROZMĚRŮ PERMANENTNÍCH MAGNETŮ .....</b>	<b>34</b>
<b>5.2 NÁVRH MECHANICKÝCH ČÁSTÍ LOŽISKA .....</b>	<b>35</b>
<b>5.3 SIMULACE NAVRŽENÉHO LOŽISKA .....</b>	<b>36</b>
<b>5.4 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ Z 2D A 3D MKP.....</b>	<b>38</b>
<b>5.5 PEVNOSTNÍ ANALÝZA MECHANICKÝCH SOUČÁSTÍ LOŽISKA.....</b>	<b>40</b>
5.5.1 VÁLCOVÁ PODLOŽKA .....	40
5.5.2 KONZOLE PRO UPEVNĚNÍ STATOROVÝCH PERMANENTNÍCH MAGNETŮ .....	41
<b>5.6 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ PASIVNÍHO AXIÁLNÍHO MAGNETICKÉHO LOŽISKA .....</b>	<b>42</b>
<b>5.7 DALŠÍ MOŽNÁ KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ PASIVNÍHO MAGNETICKÉHO LOŽISKA .....</b>	<b>45</b>
5.7.1 ZMĚNA VNITŘNÍHO A VNĚJŠÍHO PRŮMĚRU PERMANENTNÍCH MAGNETŮ.....	45
5.7.2 AXIÁLNÍ MAGNETICKÉ LOŽISKO S PĚTI PERMANENTNÍMI MAGNETY .....	47
5.7.3 PASIVNÍ RADIÁLNÍ MAGNETICKÉ LOŽISKO .....	48
<b>6 NÁVRH AKTIVNÍHO MAGNETICKÉHO LOŽISKA.....</b>	<b>49</b>
<b>6.1 NÁVRH MAGNETICKÉHO OBVODU STATORU .....</b>	<b>49</b>
<b>6.2 NÁVRH VINUTÍ STATORU .....</b>	<b>50</b>
<b>6.3 SIMULACE A ÚPRAVA LOŽISKA V PROGRAMU ANSYS MAXWELL.....</b>	<b>54</b>
<b>6.4 SEMI-ANALYTICKÉ URČENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE .....</b>	<b>58</b>
<b>6.5 PEVNOSTNÍ ANALÝZA DYNAMOVÉHO PLECHU .....</b>	<b>61</b>
<b>7 ZÁVĚR.....</b>	<b>62</b>



<b>LITERATURA .....</b>	<b>64</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>67</b>





## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Pasivní axiální magnetické ložisko se a) dvěma b) třemi magnetickými prstenci (převzato z [1] a upraveno).....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2: Konstrukční uspořádání krevní pumpy (převzato z [16] a upraveno).....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 3: Možná uspořádání pasivních magnetických ložisek (převzato z [16] a upraveno).....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 4: Základní segmentované Halbachovo uspořádání (převzato z [5] a upraveno) .....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 5: Rozšířené segmentové Halbachovo uspořádání (převzato z [5] a upraveno).....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 6: Ideální kruhové Halbachovo uspořádání s a) b) vnitřním (převzato z [4]) c) d) vnějším radiálním polem (převzato z [3]) .....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 7: Model magnetického ložiska s a) ideální, b) segmentovou Halbachovou magnetizací (převzato z [2]).....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 8: Struktura radiálního heteropolárního ložiska (převzato z [15] a upraveno).....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 9: a) Struktura statoru b) uspořádání kuželového aktivního magnetického ložiska (převzato z [6] a upraveno) .....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 10: a) Uspořádání levé strany magnetických pólů, b) uzavírání magnetického toku jednoho pólu (převzato z [6] a upraveno).....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 11: Složky magnetické síly <math>F_{mag}</math> (převzato z [6] a upraveno) .....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 12: Rozdílná uspořádání magnetických ložisek v motoru (převzato z [7] a upraveno) .....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 13: a) Jednotlivé konstrukční prvky a b) řez tříosého magnetického ložiska (převzato z [7]) .....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 14: Princip a) radiální a b) axiální levitace tříosého magnetického ložiska s válcovým rotorem (převzato z [7] a upraveno).....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 15: Náčrt s parametry čerpadla pro výpočet působících sil na oběžné kolo.....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 16: Průběh axiální síly na nosný disk čerpadla, krycí disk čerpadla a od přitékající kapaliny v závislosti na poměrném průtoku čerpadlem .....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 17: Průběh sil zatěžující radiální ložisko v závislosti na poměrném průtoku.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 18: Průběh celkové radiální a axiální síly v závislosti na poměrném průtoku.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 19: Uspořádání permanentních magnetů pasivního magnetického ložiska .....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 20: Sestava rotoru pasivního magnetického ložiska.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 21: Uzavírání magnetické indukce a siločar přes ocelovou hřídel a válcovou podložku.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 22: Průběh silového působení na středový magnet v závislosti na posunutí hřídele.....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 23: Průběh vyvozované síly od a) levého b) pravého statorového magnetu.....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 24: Uzavírání magnetické indukce a siločar přes hřídel a plastovou válcovou podložku (axisymetrická simulace).....</i>	<i>37</i>



<i>Obr. 25: Rozložení magnetické indukce – zobrazena 1/4 ložiska (3D simulace).....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 26: Průběh parazitní radiální síly pasivního axiálního magnetického ložiska v závislosti na axiálním vychýlení při radiálním vychýlení 0,6 mm.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 27: Výřez použitého rozložení výpočetní sítě pro 2D metodu konečných prvků.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 28: Výřez použitého rozložení výpočetní sítě pro 3D metodu konečných prvků.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 29: Pevnostní analýza válcové podložky při axiálním zatížení 234 N.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 30: Pevnostní analýza ložiskového domku při maximálním axiálním zatížení 400 N.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 31: Pracoviště pro experimentální měření axiálního magnetického ložiska.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 32: Detail na uložení permanentních magnetů ve statoru a rotoru ložiska (pozn.: směry šipek na fotografii neodpovídají směřům magnetizace magnetů, sloužily pouze k orientaci v době montáže ložiska).....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 33: Změřený průběh axiální síly spolu s průběhy sil určenými simulacemi.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 34: Průběh radiální a axiální síly v závislosti na symetrické změně vnitřního a vnějšího průměru rotorového PM při radiálním vychýlení 0,6 mm a axiálním vychýlení 2 mm (na ose x je vynesena velikost vnějšího průměru rotorového PM, odpovídající vnitřní průměr uvádí tabulka v pravé části obrázku).....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 35: Uvažovaná uspořádání pasivního magnetického ložiska s pěti permanentními magnety.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 36: Průběh a) radiální b) axiální síly v závislosti na axiálním vychýlení při radiálním vychýlení 0,6 mm pro čtyři varianty pasivního ložiska s pěti permanentními magnety.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 37: Průběh radiální a axiální síly ložiska s pěti PM (varianta A) v závislosti na změně vnitřních a vnějších průměrů rotorů (na ose x je vynesena velikost vnějšího průměru rotorového PM, odpovídající vnitřní průměr uvádí tabulka v pravé části obrázku).....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 38: Model radiálního pasivního magnetického ložiska.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 39: a) Náčrtek statorového plechu b) B-H křivka dynamo plechu M22-26G.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 40: a) Schéma zapojení cívek v AML b) detail statorové drážky s izolací.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 41: Doprovodné nákresy pro výpočet střední délky závitu.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 42: a) 2D model ložiska pro MKP b) detail výpočetní sítě vzduchové mezery pro MKP při vychýleném rotoru o 0,59 mm.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 43: a) Závislost přitažlivé síly na délce železa při maximálním radiálním vychýlení ložiska b) Závislost přitažlivé síly na radiálním vychýlení pro délku železa 70 mm.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 44: Průběh magnetické indukce uprostřed vzduchové mezery pod jednou pólovou dvojicí AML v rovnovážném stavu a při radiálním vychýlení o 0,59 mm.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 45: Rozložení magnetické indukce a siločar v ložisku při maximálním dovoleném proudu (napájen pouze elektromagnet ve směru kladné osy y, bez radiálního vychýlení).....</i>	<i>57</i>



<i>Obr. 46: Rozložení magnetické indukce a siločar v ložisku při maximálním dovoleném proudu (při napájení všech elektromagnetů, bez radiálního vychýlení).....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 47: a) Střední siločára jedné pólové dvojice AML b) magnetický obvod jedné pólové dvojice (analogie elektrického a magnetického obvodu).....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 48: Rozložení relativní permeability v řezu aktivního magnetického ložiska při maximálním dovoleném proudu 2,36 A.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 49: Rozložení relativní permeability v řezu aktivního magnetického ložiska při proudu 0,5 A .....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 50: Pevnostní analýza statorového pólu AML.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 51: Pohled na část výpočetní sítě pro pevnostní analýzu .....</i>	<i>61</i>



## SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Zadané hodnoty pro výpočet sil působících na oběžné kolo hydraulického stroje.....</i>	<i>28</i>
<i>Tab. 2: Výchozí hodnoty pro návrh pasivního magnetického ložiska .....</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 3: Vlastnosti prstencového permanentního magnetu 75×49×10 (mm)[18] .....</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 4: Hodnoty působící síly získané z 2D a 3D metody konečných prvků.....</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 5: Porovnání změřených a simulací vypočtených hodnot síly při vychylování axiálního pasivního ložiska .....</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 6: Citlivostní analýza axiální síly ložiska na výrobních tolerancích permanentních magnetů .....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 7: Výchozí hodnoty pro návrh magnetického ložiska.....</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 8: Rozměry statorového paketu .....</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 9: Uvažované průřezy vodičů pro AML .....</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 10: Vybrané rozměry modelu ložiska pro výpočet střední délky závitu spolu s vypočtenými hodnotami dle rovnic (6.7), (6.8) a (6.9).....</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 11: Parametry vinutí vypočtené dle rovnic (6.10), (6.11), (6.12), (6.13), (6.14) a (6.15), ....</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 12: Maximální rozměry buněk výpočetní sítě pro simulaci AML .....</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 13: Shrnutí hodnot analytického výpočtu přitažlivé síly ložiska.....</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 14: Délky úseků střední siločáry.....</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 15: Zjištěné a vypočtené hodnoty pro semi-analytický výpočet magnetické indukce .....</i>	<i>59</i>



## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Název	Jednotka
$B$	magnetická indukce	[T]
$B_r$	remanentní indukce permanentního magnetu	[T]
$B_\delta$	magnetická indukce ve vzduchové mezeře	[T]
$B_{\delta,sim}$	hodnota magnetické indukce ve vzduchové mezeře určená simulací	[T]
$B_{\delta,vyp}$	hodnota magnetické indukce ve vzduchové mezeře určená semi-analyticky	[T]
$D_{PMr}$	vnější průměr rotorového permanentního magnetu	[m]
$F$	síla	[N]
$F_{2D}$	síla určená v axisymetrickém rozložení	[N]
$F_{3D}$	síla určená ve trojrozměrném rozložení	[N]
$F_a$	axiální síla	[N]
$F_{ap}$	síla působící na krycí disk	[N]
$F_{az}$	síla působící na nosný disk	[N]
$F_c$	axiální síla vyvolaná přitékající kapalinou	[N]
$F_{\check{c},ax}$	axiální síla způsobená provozem oběžného kola	[N]
$F_{\check{c},rad}$	radiální síla způsobená provozem oběžného kola mimo nominální otáčky	[N]
$F_{dim,ax}$	výsledná síla pro dimenzování axiálního ložiska	[N]
$F_g$	tíhová síla	[N]
$F_L$	síla levého statorového permanentního magnetu působící na rotorový magnet	[N]
$F_m$	magnetické napětí	[A]
$F_{m,jho}$	úbytek magnetického napětí ve jhu statoru aktivního magnetického ložiska	[A]
$F_{m,nas}$	úbytek magnetického napětí na pólovém nastavci aktivního magnetického ložiska	[A]
$F_{m,nas1}$	úbytek magnetického napětí na pólovém nastavci jedna v rámci jednoho elektromagnetu aktivního magnetického ložiska	[A]
$F_{m,nas2}$	úbytek magnetického napětí na pólovém nastavci dva v rámci jednoho elektromagnetu aktivního magnetického ložiska	[A]
$F_{m,pol}$	úbytek magnetického napětí na pólu aktivního magnetického ložiska	[A]
$F_{m,pol1}$	úbytek magnetického napětí na pólu jedna v rámci jednoho elektromagnetu aktivního magnetického ložiska	[A]



$F_{m,pol2}$	úbytek magnetického napětí na pólu dva v rámci jednoho elektromagnetu aktivního magnetického ložiska	[A]
$F_{m,rotor}$	úbytek magnetického napětí ve jhu rotoru aktivního magnetického ložiska	[A]
$F_{m,\delta}$	úbytek magnetického napětí ve vzduchové mezeře aktivního magnetického ložiska	[A]
$F_{m,\delta1}$	úbytek magnetického napětí v první vzduchové mezeře v rámci jednoho elektromagnetu aktivního magnetického ložiska	[A]
$F_{m,\delta2}$	úbytek magnetického napětí v první vzduchové mezeře v rámci jednoho elektromagnetu aktivního magnetického ložiska	[A]
$F_{m1}$	zdroj magnetického napětí jedna v rámci jednoho elektromagnetu aktivního magnetického ložiska	[A]
$F_{m2}$	zdroj magnetického napětí dva v rámci jednoho elektromagnetu aktivního magnetického ložiska	[A]
$F_{mag}$	výsledná magnetická síla	[N]
$F_{mag,a}$	axiální složka magnetické síly	[N]
$F_{mag,r}$	radiální složka magnetické síly	[N]
$F_{mer}$	axiální síla určená experimentálním měřením	[N]
$F_P$	síla pravého statorového permanentního magnetu působící na rotorový magnet	[N]
$F_{pol,plech}$	síla působící na jeden pól statorového plechu	[N]
$F_r$	radiální síla	[N]
$F_{r,axl}$	parazitní radiální síla způsobená pasivním magnetickým ložiskem	[N]
$F_{r,sim}$	radiální síla určená simulací	[N]
$F_{r,vyp}$	radiální síla určena analytickým výpočtem	[N]
$F_{rad}$	celková radiální síla působící na radiální ložisko	[N]
$F_{rad,dim}$	radiální síla pro dimenzování radiálního ložiska	[N]
$F_s$	síla vzniklá nevyvážením rotoru	[N]
$F_{sim1}$	axiální síla získaná simulacemi pro hodnoty remanentní indukce a koercitivní síly dle firmy Neomag	[N]
$F_{sim2}$	axiální síla získaná simulacemi pro hodnoty remanentní indukce a koercitivní síly dle firmy Neomag	[N]
$F_{STŘ}$	síla působící na středový (rotorový) permanentní magnet	[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]
$H$	intenzita magnetického pole	[A·m <sup>-1</sup> ]



$H_c$	koercitivní síla permanentního magnetu	$[A \cdot m^{-1}]$
$H_{jho}$	střední intenzita magnetického pole ve jhu statoru aktivního magnetického ložiska	$[A \cdot m^{-1}]$
$H_{nas}$	střední intenzita magnetického pole v pólovém nástavci aktivního magnetického ložiska	$[A \cdot m^{-1}]$
$H_{pol}$	střední intenzita magnetického pole v pólu aktivního magnetického ložiska	$[A \cdot m^{-1}]$
$H_{rotor}$	střední intenzita magnetického pole ve jhu rotoru aktivního magnetického ložiska	$[A \cdot m^{-1}]$
$I$	proud	$[A]$
$I_{max}$	maximální dovolený proud vinutím	$[A]$
$N$	počet závitů	$[-]$
$P_z$	ztrátový výkon	$[W]$
$Q$	průtok	$[m \cdot s^{-1}]$
$Q_n$	jmenovitý průtok čerpadlem	$[m \cdot s^{-1}]$
$R_{m,jho}$	magnetický odpor jha statoru aktivního magnetického ložiska	$[H^{-1}]$
$R_{m,nas1}$	magnetický odpor pólového nástavce jedna v rámci jednoho elektromagnetu aktivního magnetického ložiska	$[H^{-1}]$
$R_{m,nas2}$	magnetický odpor pólového nástavce dva v rámci jednoho elektromagnetu aktivního magnetického ložiska	$[H^{-1}]$
$R_{m,pol1}$	magnetický odpor pólu jedna v rámci jednoho elektromagnetu aktivního magnetického ložiska	$[H^{-1}]$
$R_{m,pol2}$	magnetický odpor pólu dva v rámci jednoho elektromagnetu aktivního magnetického ložiska	$[H^{-1}]$
$R_{m,rotor}$	magnetický odpor rotoru aktivního magnetického ložiska	$[H^{-1}]$
$R_{m,\delta1}$	magnetický odpor vzduchové mezery jedna v rámci jednoho elektromagnetu aktivního magnetického ložiska	$[H^{-1}]$
$R_{m,\delta2}$	magnetický odpor vzduchové mezery dva v rámci jednoho elektromagnetu aktivního magnetického ložiska	$[H^{-1}]$
$R_{vodič,20}$	celkový odpor vodiče při teplotě 20°C	$[\Omega]$
$R_{vodič,80}$	celkový odpor vodiče při teplotě 80°C	$[\Omega]$
$S$	plocha řezu oběžného kola	$[m^2]$
$S_8$	plocha vyústění čerpadla	$[m^2]$
$S_{cu}$	výpočtová plocha pro určení počtu závitů	$[m^2]$
$S_{Fe}$	plocha jednoho pólového nástavce	$[m^2]$
$S_N$	plocha mezi oběžným kolem a stěnou difuzoru v nejužším místě	$[m^2]$
$S_{okna}$	obsah plochy pro uložení vinutí	$[m^2]$



$S_{\text{vodič}}$	průřez vodiče bez izolace	$[\text{m}^2]$
$U_{\text{zdroje}}$	maximální napájecí napětí aktivního magnetického ložiska	$[\text{V}]$
$a$	šířka jha statoru	$[\text{m}]$
$b_{2D}$	šířka oběžného kola čerpadla	$[\text{m}]$
$c$	rozteč mezi pólovými nástavci	$[\text{m}]$
$c_{m0}$	rychlost proudícího média na vstupu do oběžného kola	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
$d_{\text{cu}}$	průměr vodiče bez izolace	$[\text{m}]$
$d_{\text{cu,izolace}}$	průměr vodiče včetně izolace	$[\text{m}]$
$d_{\text{in}}$	vnitřní průměr statoru aktivního magnetického ložiska	$[\text{m}]$
$d_{\text{out}}$	vnější průměr statoru aktivního magnetického ložiska	$[\text{m}]$
$d_{\text{PMr}}$	vnitřní průměr rotorového permanentního magnetu	$[\text{m}]$
$d_{\text{rotor}}$	průměr rotoru aktivního magnetického ložiska	$[\text{m}]$
$g$	tíhové zrychlení	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$
$h_{\text{pn}}$	výška pólového nástavce v nejužším bodě	$[\text{m}]$
$I_x$	proud protékající vinutím kladné osy $x$	$[\text{A}]$
$i_{-x}$	proud protékající vinutím záporné osy $x$	$[\text{A}]$
$i_y$	proud protékající vinutím kladné osy $y$	$[\text{A}]$
$i_{-y}$	proud protékající vinutím záporné osy $y$	$[\text{A}]$
$k$	koeficient pro výpočet radiální síly způsobené oběžným kolem	$[-]$
$k_{\text{pcu}}$	činitel plnění mědi	$[-]$
$k_{\text{pFe}}$	činitel plnění železa	$[-]$
$l$	délka	$[\text{m}]$
$l_{\text{cr}}$	osová vzdálenost středů vinutí dvou drážek	$[\text{m}]$
$l_{\text{Fe}}$	aktivní délka paketu magnetického ložiska	$[\text{m}]$
$l_{\text{Fe,lab}}$	délka paketu aktivního ložiska s těsnícím labyrintem	$[\text{m}]$
$l_{\text{jho}}$	délka střední siločáry ve jhu statoru aktivního magnetického ložiska	$[\text{m}]$
$l_{\text{nas}}$	délka střední siločáry v pólovém nástavci statoru aktivního magnetického ložiska	$[\text{m}]$
$l_{\text{pol}}$	délka střední siločáry v pólu statoru aktivního magnetického ložiska	$[\text{m}]$
$l_{\text{rotor}}$	délka střední siločáry v rotoru aktivního magnetického ložiska	$[\text{m}]$
$l_{\text{vodič}}$	celková délka vodiče cívek tvořící jeden elektromagnet	$[\text{m}]$
$l_{\text{vodič,stř}}$	střední délka vodiče tvořící jeden závit cívky	$[\text{m}]$
$m$	počet vodičů tvořících jeden závit cívky	$[-]$
$m_{\text{kolo}}$	hmotnost oběžného kola s hřídelí	$[\text{kg}]$





$n$	otáčky	$[\text{min}^{-1}]$
$p$	počet pólových dvojic	$[\text{Pa}]$
$p_1$	vstupní tlak do oběžného kola	$[\text{Pa}]$
$p_{2s}$	tlak před krycím diskem	$[\text{Pa}]$
$p_{2v}$	tlak za nosným diskem	$[\text{Pa}]$
$r_2$	poloměr oběžného kola	$[\text{m}]$
$r_{dr}$	poloměr středu statorové drážky vůči ose otáčení	$[\text{m}]$
$r_n$	vstupní poloměr nosného (výtlačného) disku	$[\text{m}]$
$r_T$	vstupní poloměr krycího (sacího) disku	$[\text{m}]$
$t_2$	koncová teplota	$[\text{°C}]$
$t_{plech}$	šířka dynamového plechu	$[\text{m}]$
$t_{rotor}$	síla stěny dutého rotoru čerpadla	$[\text{m}]$
$u$	obvodová rychlost oběžného kola	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
$u_x$	přiložené napětí na vinutí elektromagnetu ve směru kladné osy $x$	$[\text{V}]$
$u_{-x}$	přiložené napětí na vinutí elektromagnetu ve směru záporné osy $x$	$[\text{V}]$
$u_y$	přiložené napětí na vinutí elektromagnetu ve směru kladné osy $y$	$[\text{V}]$
$u_{-y}$	přiložené napětí na vinutí elektromagnetu ve směru záporné osy $y$	$[\text{V}]$
$\Delta a$	axiální vychýlení rotoru ložiska	$[\text{m}]$
$\Delta r$	radiální vychýlení rotoru ložiska	$[\text{m}]$
$\theta_v$	koeficient úhlové vzdálenosti	$[-]$
$\Phi_b$	stály magnetický tok permanentních magnetů	$[\text{Wb}]$
$\Phi_x$	magnetický tok vznikající od vinutí radiální regulace ve směru osy $x$	$[\text{Wb}]$
$\Phi_y$	magnetický tok vznikající od vinutí radiální regulace ve směru osy $y$	$[\text{Wb}]$
$\Phi_z$	magnetický tok vznikající od vinutí axiální regulace	$[\text{Wb}]$
$\alpha_{cu}$	teplotní součinitel odporu	$[-]$
$\delta$	velikost vzduchové mezery	$[\text{m}]$
$\delta B_{\delta, \text{sim}, \text{vyp}}$	relativní odchylka magnetické indukce ve vzduchové mezeře mezi semi-analytickým výpočtem a hodnotou získanou ze simulace	$[\%]$
$\delta F$	relativní odchylka dvou výsledků těžby síly	$[\%]$
$\delta F_{\text{mer}, \text{sim}1}$	relativní odchylka axiální síly experimentálně změřené a získané ze simulace pro hodnoty remanentní indukce a koercitivní síly dle firmy Neomag	$[\%]$
$\delta F_{\text{mer}, \text{sim}2}$	relativní odchylka axiální síly experimentálně změřené a získané ze simulace pro hodnoty remanentní indukce a koercitivní síly dle firmy Arnoldmagnetics	$[\%]$



$\delta F_P$	relativní odchylka síly pravého krajního (statorového) permanentního magnetu	[%]
$\delta F_{r,vs}$	relativní odchylka síly určené simulací a analytickým výpočtem	[%]
$\delta F_{STR}$	relativní odchylka síly působící na středový (rotorový) permanentní magnet	[%]
$\mu_0$	permeabilita vakua	[H·m <sup>-1</sup> ]
$\rho$	hustota čerpané kapaliny	[kg·m <sup>-3</sup> ]
$\rho_{cu,20}$	měrný elektrický odpor při teplotě 20°C	[Ω·m]
$\sigma_{max}$	maximální přípustná proudová hustota	[A]
$\tau_{p,1/2}$	polovina pólové rozteče	[m]
$\omega_s$	úhlová rychlost kapaliny v prostoru krycího disku	[rad·s <sup>-1</sup> ]
$\omega_v$	úhlová rychlost kapaliny v prostoru nosného disku	[rad·s <sup>-1</sup> ]



<b>Zkratka</b>	<b>Význam</b>
AML	aktivní magnetické ložisko
AxML	axiální magnetické ložisko
BLDC	bezkartáčový stejnosměrný motor (BrushLess Motor)
M22-26G	typové označení dynamového plechu
MKP	metoda konečných prvků
NdFeB	neodymový permanentní magnet
$N_x$	vinutí radiální regulace ve směru osy x
$N_y$	vinutí radiální regulace ve směru osy y
$N_z$	vinutí axiální regulace
PM	permanentní magnet
PML	pasivní magnetické ložisko
PVC-U	polyvinylchlorid neměkčený
Ra+AxML	kombinace radiálního a axiálního magnetického ložiska
RaML	radiální magnetické ložisko



## 1 ÚVOD

Cílem této práce je navrhnout magnetický ložiskový systém pro odstředivé čerpadlo. Ten se bude skládat z pasivního axiálního a aktivního radiálního magnetického ložiska. Důvodem použití magnetických ložisek je vyloučení kontaktu čerpaného média s mazacím prostředkem.

Magnetismus fascinuje lidstvo od samotného objevení. Slovo magnetismus vychází z názvu asijského města Magnésia, kde se nacházela velká naleziště magnetovce. Schopnost silového působení bez fyzického kontaktu těles dala vzniku mnoha myšlenkám o využití tohoto jevu. Jako první byly silové účinky magnetizmu využity v kompase ve 12. století čínskými námořníky. Hans Oersted v roce 1820 objevil spojení magnetizmu a elektřiny, na základě chování stříelky kompasu poblíž vodiče, kterým protékal proud. V roce 1842 byl vysloven Earnshawův teorém, ze kterého lze odvodit následující: stabilní pasivní levitace ve všech stupních volnosti nelze dosáhnout, aniž by jeden stupeň volnosti nebyl zajištěn jiným způsobem. Jesse Beams ve 40. letech 20. století využil magnetické ložisko při vývoji centrifugace uranu [8][9].

Základní podstatou ložiska je snížit mechanické tření mezi pohybující se a stacionární částí. Již v roce 2600 př.n.l. starověcí Egypťané využívali určitou formu ložisek k přepravě masivních kamenných bloků. Leonardo da Vinci v roce 1500 vytvořil koncept prvního kuličkového ložiska [10].

S rozvojem výpočetní techniky v 70. a 80. letech 20. století odstartoval i růst mezinárodního výzkumu a vývoje v oblasti magnetických ložisek. Přibližně ve stejnou dobu byla první magnetická ložiska nasazena v průmyslu [9].

Při provozu magnetických ložisek nedochází ke vzniku mechanického opotřebení, třecích ztrát a s tím spojeného hluku. K provozu není zapotřebí mazacích tuků, proto jsou například vhodná pro potravinářský průmysl. Umožňují použití v agresivním prostředí, kde běžná mechanická ložiska by nedosahovala velké životnosti. Magnetická ložiska nacházejí uplatnění ve vysokorychlostních strojích, gyroskopech, setrvačnickových akumulátorech energie, kompresorech, molekulárních vývěvách.... Svě použití magnetické ložisko našlo i ve zdravotnictví v podobě umělého srdce, kde pomáhá k záchraně lidských životů. Oproti běžným poskytují magnetická ložiska bezúdržbový provoz, této skutečnosti je například využíváno při vesmírných misích [6][10] [11].

Magnetická ložiska lze rozdělit na pasivní, aktivní a hybridní. Pasivní magnetická ložiska jsou zařízení, která nepotřebují k funkci vnější zdroj energie. Obvykle je tvoří soustava permanentních magnetů. Jedná se spíše o miniaturní ložiska, neboť maximální dosažitelná tuhost a síla nenabývá potřebných parametrů pro použití ve větších aplikacích [9].

Aktivní magnetická ložiska jsou závislá na vnějším zdroji v podobě elektrického proudu, který prochází cívkami a vytváří tak magnetické pole. Vzhledem k možnosti regulovat velikost výsledné síly prostřednictvím velikosti proudu jsou aktivní ložiska schopná nést rotory o hmotnosti několika tun. Z tohoto důvodu se v průmyslu častěji využívají aktivní magnetická ložiska než pasivní [9].

Hybridní magnetická ložiska jsou speciální typ aktivních magnetických ložisek, která mohou být koncipována buď jako aktivní magnetické ložisko využívající stálý magnetický tok od permanentních magnetů. Nebo mohou být označovány jako takzvané bezložiskové motory, kde pro levitaci rotoru je využito vinutí daného stroje [9].

## 2 KONSTRUKCE MAGNETICKÝCH LOŽISEK

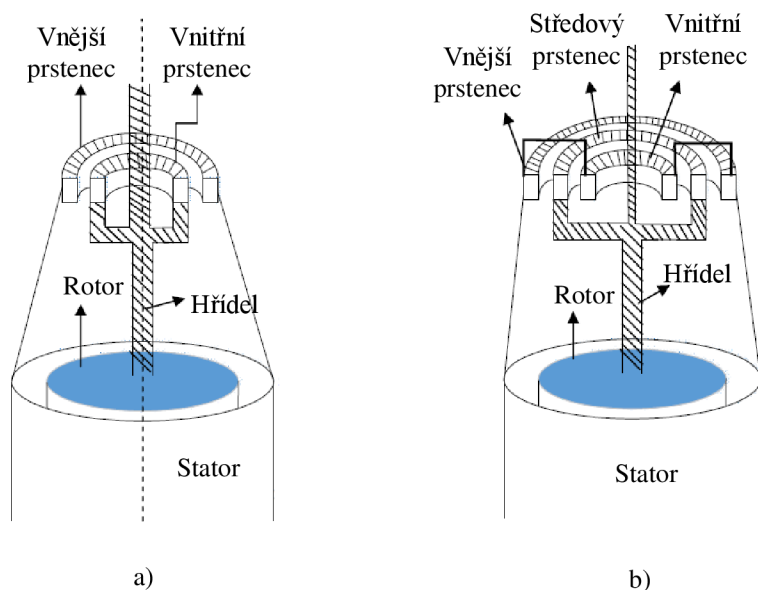
### 2.1 Pasivní magnetická ložiska

#### 2.1.1 Axiální magnetické ložisko se třemi prstencovými magnety

Inovaci se zabývali autoři článku [1].

Analytické metody pro návrh pasivního magnetického ložiska jsou velmi komplikované. Při výpočtu působících sil se nelze vyhnout eliptickým integrálním počtům, které jsou velmi časově náročné. Proto při návrhu byla použita počítačová podpora v podobě metody konečných prvků.

Častá struktura pasivních magnetických ložisek je složena ze dvou prstencových permanentních magnetů, takové uspořádání je zobrazeno na Obr. 1 a). Vnitřní prstenec je spojen s rotorem a spolu s ním se otáčí. Vnější prstenec je spojen se státorem a jeho poloha je fixována. Velký problém běžných pasivních ložisek je malá zatížitelnost a tuhost.



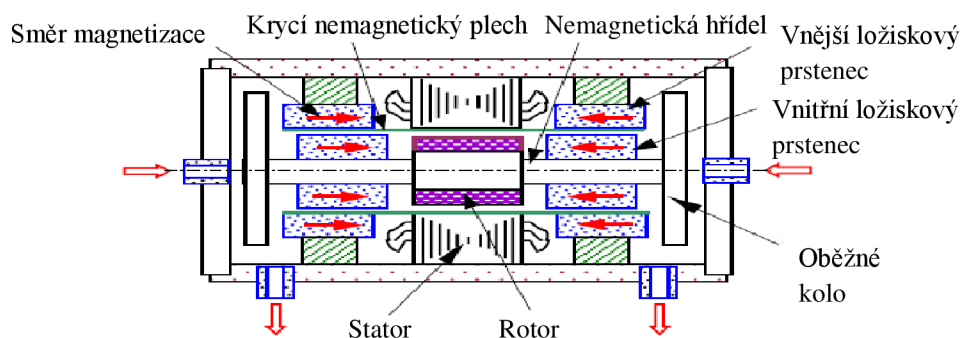
Obr. 1: Pasivní axiální magnetické ložisko se a) dvěma b) třemi magnetickými prstenci (převzato z [1] a upraveno)

Nová struktura pasivního magnetického ložiska dosahuje větší tuhosti i síly, tím se rozšiřuje oblast jeho použití. Ložisko se namísto běžných dvou skládá ze třech prstencových permanentních magnetů. Uspořádání je vyobrazeno na Obr. 1 b). Konstrukce tvaru prstenců je obdobná jako u předcházející varianty. Tentokrát však vnější i vnitřní prstenec tvoří stator ložiska a středový prstenec je připevněn na rotoru.

Ložisko se třemi prstencovými magnety dosahuje 2,5 krát větší maximální síly a 1,2 krát větší tuhosti oproti ložisku se dvěma prstenci. Je třeba poznamenat, že pro obě konstrukce ložiska bylo použito stejného typu neodymových permanentních magnetů a zároveň vnější rozměry ložiska zůstaly zachovány.

### 2.1.2 Pasivní magnetické ložisko pro použití v krevní pumpě

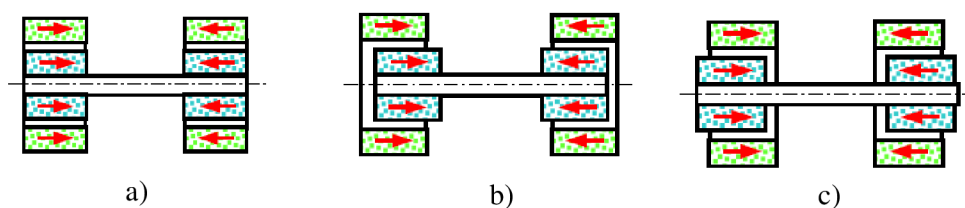
Při realizaci projektu krevní pumpy byly zvažovány různé možnosti zavěšení rotoru. Běžná mechanická ložiska byla zavržena pro nadměrný hluk a opotřebení. Proto bylo přistoupeno k bezkontaktnímu uložení. V potaz připadly bezložiskové systémy, které využívají pro levitaci statorové vinutí motoru. Nevýhodou těchto systémů jsou velké hardwarové nároky. Aktivní magnetická ložiska ve srovnání s bezložiskovými systémy mají výrazně jednodušší řízení. Nicméně tuhle variantu autoři taktéž zavrhlí pro jejich poměrně velký objem a malou účinnost. Bylo žádoucí, aby zvolená struktura byla kompaktní, jednoduchá a zároveň by nevyžadovala složité řízení. Proto pro realizaci projektu v článku [16] byla zvolena nová koncepce pasivního magnetického ložiska. Jednoduchost byla zachována i v motorové části, kde bylo použito bezkartáčového bezsenzorového stejnosměrného motoru (BLDC).



Obr. 2: Konstrukční uspořádání krevní pumpy (převzato z [16] a upraveno)

Uspořádání krevní pumpy je zobrazeno na Obr. 2. V kostře motoru se na koncích hřídele nachází dvě pasivní magnetická ložiska, která vytváří levitační sílu pro zavěšení rotoru. Vnitřní i vnější ložiskový prsteneč má stejný směr axiální magnetizace. Levé a pravé ložisko má magnetizaci v opačném směru.

Magnetická ložiska na Obr. 2 kombinují dva typy standardních magnetických ložisek: radiální a axiální. Axiální síly je docíleno vnitřním nebo vnějším přesazením vnitřního magnetického kroužku vůči vnějšímu. Bez použití zmíněného offsetu by ložiska dosahovala radiální stability, ale axiální nikoliv. Na Obr. 3 jsou znázorněna tři možná uspořádání vnitřních kroužků. Pro dosažení potřebných parametrů zavěšení bylo použito metody konečných prvků, která napomohla navrhnout optimální velikost vzduchové mezery mezi vnitřním a vnějším magnetickým prstencem, vzájemný offset obou kroužků ve výchozí poloze a zároveň rozměry obou prstenců.



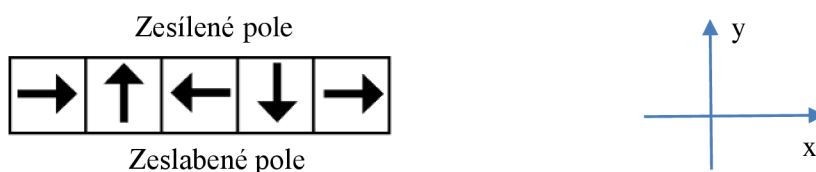
Obr. 3: Možná uspořádání pasivních magnetických ložisek (převzato z [16] a upraveno)

### 2.1.3 Magnetické ložisko s Halbachovou řadou

Použitá koncepce Halbachovy řady pro pasivní magnetické ložisko pochází ze zdroje [2].

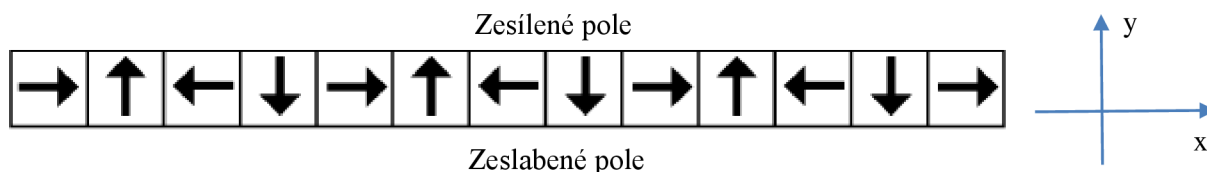
Běžná pasivní magnetická ložiska jsou tvořena dvěma jednodílnými kruhovými permanentními magnety s radiální nebo axiální polarizací. Halbachova magnetizace je speciální seskupení permanentních magnetů, které na jedné straně zvyšuje intenzitu magnetického pole a na protilehlé straně je intenzita téměř nulová, tento jev je nazýván jako samostínění. Halbachovo uspořádání je pojmenováno po jeho vynálezci Klausovi Halbachovi. Původně mělo sloužit v urychlovačích částic. Avšak našlo uplatnění v širokém spektru použití: lineární a rotační servomotory, bezkartáčové střídavé motory, elektromagnetické tlumiče, magnetická ložiska...

Existuje ideální a segmentovaná Halbachova magnetizace. Základní sestavu segmentované magnetizace tvoří pětice magnetů, které jsou polarizované následovně: sousední magnety jsou vždy vůči sobě polarizované o devadesát stupňů a každý třetí magnet má polarizaci ve stejné ose, ale v opačném směru než první v pořadí. Skladba směrů polarizací může být následující (Obr. 4):  $x$ ,  $y$ ,  $-x$ ,  $-y$ ,  $x$ . V předcházejícím uspořádání se vytvoří silné magnetické pole na straně kladné osy  $y$ , naopak na straně záporné je pole minimální. Pokud je zapotřebí, aby silné pole bylo na straně kladné osy  $y$  a slabé na straně záporné, je uspořádání následující:  $-x$ ,  $y$ ,  $x$ ,  $-y$ ,  $-x$ . Je patrné, že došlo k změně magnetů s polarizací ve směru  $x$  na polarizaci  $-x$  a naopak [2][4][5].



Obr. 4: Základní segmentované Halbachovo uspořádání (převzato z [5] a upraveno)

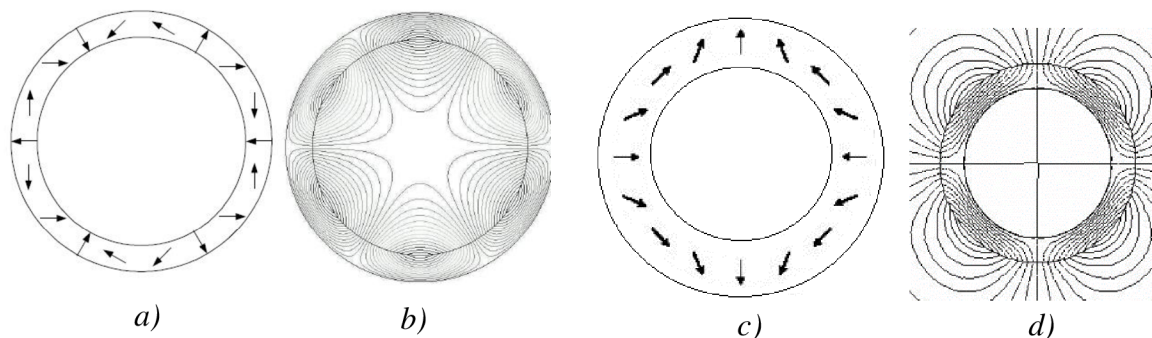
V případě potřeby delšího magnetického pole je možné jednotlivé úseky na sebe napojovat. Při spojování jednotlivých úseků musí být zachován systém polarizací jednotlivých magnetů (viz předchozí text), tak jak je zobrazeno na Obr. 5. Tudiž připojí-li se další dva Halbachovy úseky, nebude výsledný počet segmentů (magnetů) 15, ale 13 [5].



Obr. 5: Rozšířené segmentové Halbachovo uspořádání (převzato z [5] a upraveno)

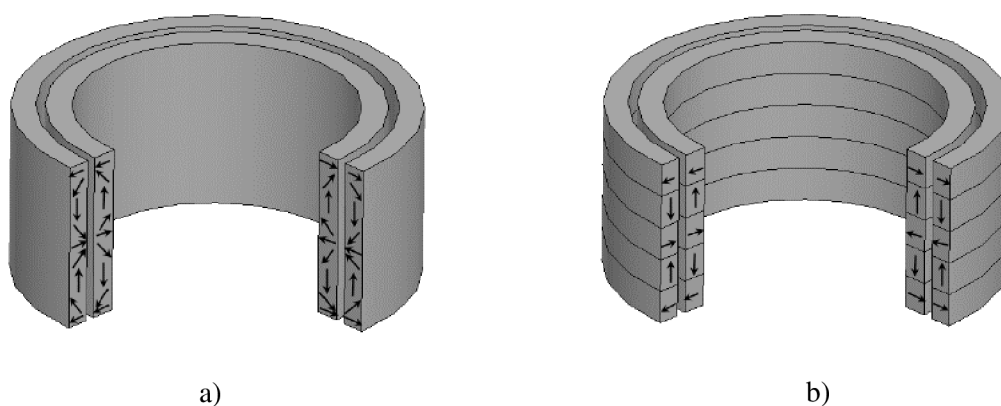
Na Obr. 6 a) je zobrazeno ideální kruhové Halbachovo uspořádání s vnitřním radiálním polem. Ze znázornění siločar Obr. 6 b) je patrné, že veškeré magnetické pole je uvnitř prstence [2]. Na Obr. 6 c) je zobrazeno ideální kruhové Halbachovo uspořádání s vnějším radiálním polem. Ze znázornění siločar v Obr. 6 d) vyplývá, že veškeré magnetické pole je vně prstence. Ideální Halbachovy magnetizace je možné dosáhnout u celistvých materiálů. Použitím této struktury

vznikne podél vnitřního obvodu sinusové magnetické pole. Nevýhodou jednotných materiálů je menší výsledné magnetické pole. Proto se v praxi častěji využívají segmentované pro dosažení vyššího magnetického pole [2][3].



Obr. 6: Ideální kruhové Halbachovo uspořádání s a) b) vnitřním (převzato z[4]) c) d) vnějším radiálním polem (převzato z [3])

Oproti běžným pasivním magnetickým ložiskům s radiální nebo axiální polarizací mohou pasivní magnetická ložiska s Halbachovou magnetizací nabídnout vyšší tuhost ve stejném objemu permanentních magnetů. Typická struktura axiálního PML s válcovou Halbachovou strukturou je znázorněna na Obr. 7, kde a) znázorňuje ideální a b) strukturovanou magnetizaci. Zesílené magnetické pole se nachází mezi oběma válci a naopak zeslabené pole se nachází na vnitřní straně (u hřídele) a vnější straně ložiska (upevnění ve statoru). Strukturované uspořádání využívá dvou segmentů na pól. Použitím více segmentů na pól by došlo k lepšímu přiblížení k ideálnímu uspořádání, ale v praktických aplikacích postačuje aproximace vzniklá od 2 segmentů na pól. Aplikací dvou segmentů na pól je dosaženo určitých výhod: jednotlivé segmenty jsou polarizovány pouze ve dvou rovinách (radiální a axiální směr), a to přináší podstatné zjednodušené nároky na výrobu a tím i nižší celkovou cenu [2].



Obr. 7: Model magnetického ložiska s a) ideální, b) segmentovou Halbachovou magnetizací (převzato z [2])

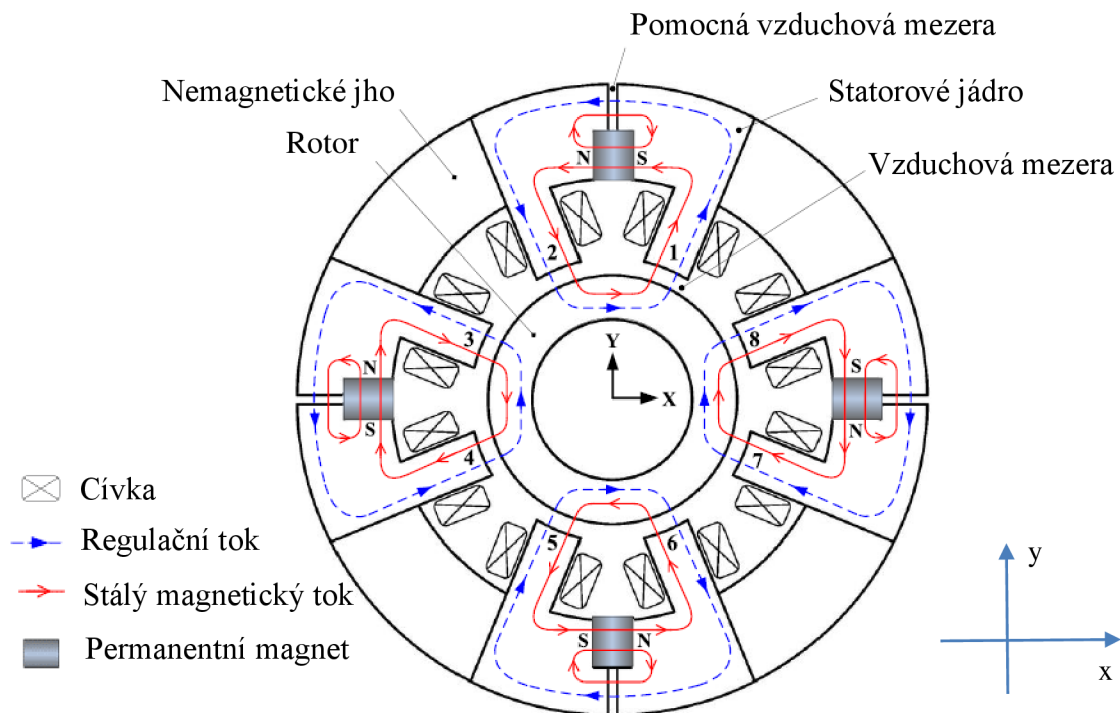


## 2.2 Aktivní magnetická ložiska

### 2.2.1 Heteropolární radiální magnetické ložisko se stálou magnetizací

Hlavní výhodou hybridních ložisek je vytváření stálého magnetického pole pomocí permanentních magnetů, tímto způsobem se docílí menší energetické náročnosti a zároveň se zmenší celkové vytvářené teplo oproti běžným aktivním ložiskům. Konceptem se zabývali autoři v literatuře [15].

Radiální ložiska lze klasifikovat podle uspořádání polarit magnetů ve statoru na homopolární a heteropolární. Póly homopolárního uspořádání mají stejnou magnetizaci v celé rotační rovině, naopak u heteropolárních se magnetizace střídavě mění. Při rotaci homopolárního ložiska nedochází okolo obvodu rotoru ke střídání polarit magnetického pole, proto ztráty v železe rotoru jsou minimální. Nicméně obvykle tato ložiska mají axiální magnetizaci a dva statory, to zapříčiní velkou osovou délku stroje a menší hodnotu kritických otáček. Heteropolární ložiska dosahují menších axiálních délek a skládají se z jednoho statoru.



Obr. 8: Struktura radiálního heteropolárního ložiska (převzato z [15] a upraveno)

Konstrukce heteropolárního magnetického ložiska s pomocnou vzduchovou mezerou je na Obr. 8. Magnetické póly 1 a 2, 3 a 4, 5 a 6, 7 a 8 tvoří dohromady čtyři pólové dvojice 12, 34, 56, 78. Společně podél obvodu statoru vytváří rovnoměrně rozloženou heteropolární konfiguraci SSJJSSJJ. Čtyři permanentní magnety jsou vloženy v každé ze čtyř pólových dvojic statorového jha a vytváří klidový magnetický tok. Na každém pólovém nastavci je navinuta cívka vytvářející magnetický tok ve vzduchové mezeře mezi póly a hřídelí. Na vnější straně permanentního magnetu je pomocná vzduchová mezera. Sousední pólové dvojice jsou spojeny nemagnetickým jhem.



Veškeré statorové jádro a hřídel jsou složeny z tenkých křemíkových plechů k omezení vířivých ztrát.

Takovéto uspořádání jednotlivých nezávislých magnetických obvodů umožní samostatnou regulaci v ose  $x$  a  $y$ , neboť je vyloučeno jakékoliv spojení mezi osami  $x$  a  $y$ . To přináší možnost snadnější regulace, přesnější nastavení polohy a vyšší odolnost vůči dynamickým změnám.

Následující vysvětlení principu činnosti se vztahuje k pólové dvojici 12 na Obr. 8. Magnetický tok permanentních magnetů (dále jen PM) je znázorněn plnou čarou. Tento tok od PM je rozdělen na dva: jeden tok procházející skrze pólový nástavec 2, vzduchovou mezeru 2, hřídel, vzduchovou mezeru 1, pólový nástavec 1 a vrací se zpět do PM, a tím se uzavírá magnetická smyčka. Druhá smyčka prochází přes pomocnou vzduchovou mezeru.

Tok vytvořený cívkou je na Obr. 8 znázorněn přerušovaně. Cívka 1 a 2 vytváří tok orientovaný ve stejném směru jako tok vzniklý od permanentního magnetu. Tok se uzavírá následovně: pólový nástavec 2, vzduchová mezeru 2, hřídel, vzduchová mezeru 1, pólový nástavec 1 a pomocná vzduchová mezeru. Délka PM je delší než pomocné mezery, proto magnetický tok cívky prochází přes pomocnou vzduchovou mezeru, tím se docílí menších energetických ztrát cívky.

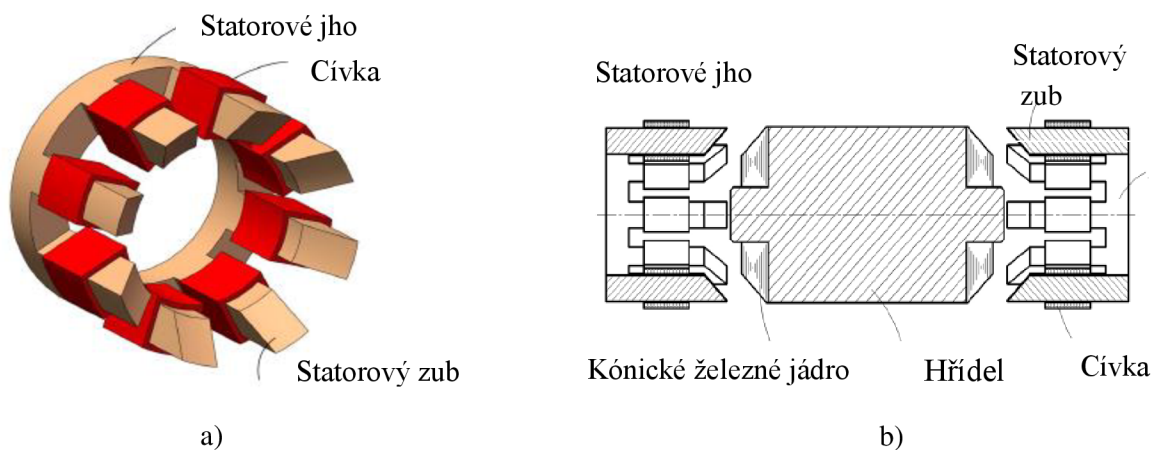
Ze své podstaty představují magnetická ložiska se stálým magnetickým polem od permanentních magnetů nestabilní systém, proto je zapotřebí regulovat uzavřenou smyčku pro udržení stabilní polohy rotoru. Pokud se rotor nachází v rovnovážné poloze (po celém obvodu je stejná vzduchová mezeru), neteče řídicími cívkami žádný proud, a tudíž se nevytváří ani řídicí magnetický tok. Jakmile dojde k vychýlení rotoru např. ve směru  $-x$ ,  $-y$ , dojde ke zvětšení horní a pravé vzduchové mezery a naopak dolní a levá vzduchová mezeru se zmenší. Polohové senzory indikují změnu vychýlení rotoru z rovnovážné polohy. Regulátor na základě údajů z polohových senzorů generuje řídicí signál výkonovému zesilovači, který řídicí signál převede na proud odpovídající magnetickému poli ve vzduchové mezeře. Vzniklý magnetický tok se superponuje s tokem permanentních magnetů. Magnetická pole se navzájem posilují v horní a pravé části (oba toky mají stejný směr), naopak v dolní a levé části dojde k zeslabení výsledného pole (směry toků jsou obrácené) viz Obr. 8 (takový způsob řízení je označován jako diferenční). To má za následek větší silový účinek ve směru  $x$ ,  $y$ . Jakmile se hřídel navrátí do původní rovnovážné polohy, dojde opět k úpravě řídicího proudu tak, aby výsledný magnetický tok byl schopen udržet hřídel v této poloze i přes vnější silové působení.

### 2.2.2 Kuželové magnetické ložisko s drápkovou strukturou

Konstrukce magnetického ložiska s drápkovou strukturou byla prezentována ve zdroji [6]. Obecně radiální i axiální magnetická ložiska vyžadují poměrně velký statorový průměr, zvláště pak axiální ložiska vyžadují rozměrný rotorový disk. Taková ložiska nelze aplikovat v případech, pokud jsou vyžadovány malé radiální rozměry výsledného stroje. Konstrukce magnetického ložiska s tzv. drápkovou strukturou tento nedostatek eliminuje, neboť stator dosahuje stejného průměru jako rotor. Avšak nevýhodou ložiska s drápkovou strukturou je prodloužení osové délky stroje, které je způsobené umístěním cívek a statorového jha v axiálním směru.

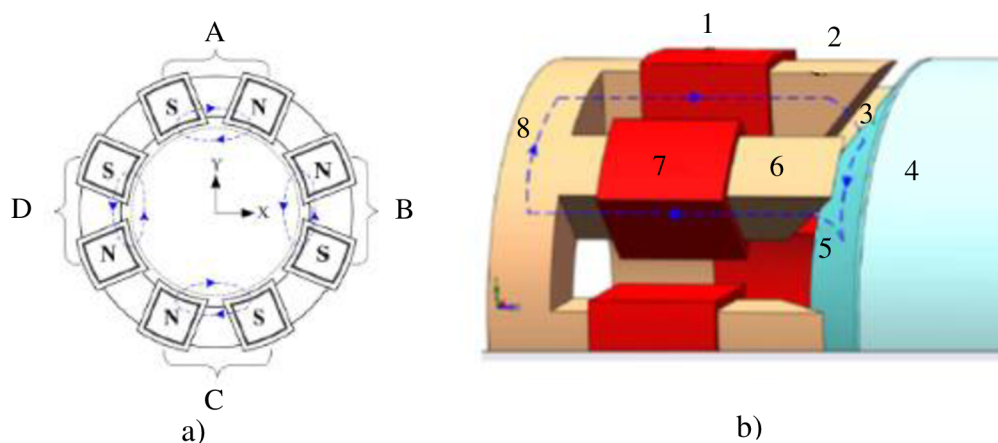
Pro návrh této struktury bylo využito metody magnetické obvodové analýzy, virtuálního posunutí a metody konečných prvků. Kuželové magnetické ložisko se skládá z magnetického jha,

osmi statorových zubů a budících cívek uložených v podélném směru. Zakončení jednotlivých zubů je provedeno kónicky viz Obr. 9.



Obr. 9: a) Struktura statoru b) uspořádání kuželového aktivního magnetického ložiska (převzato z [6] a upraveno)

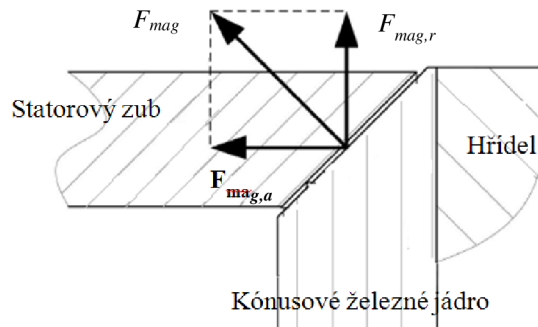
Běžné stroje s magnetickými ložisky obsahují pro zajištění pěti stupňů volnosti tři ložiska (dvě radiální a jedno axiální), naproti tomu při použití kuželového ložiska jsou zapotřebí pouze dvě. Disky běžných axiálních magnetických ložisek, kromě zmíněného velkého obsazeného prostoru, způsobují poměrně velkou hlučnost vlivem vzniku turbulentního proudění vzduchu. Také působení odstředivých sil vnáší velký problém při návrhu, proto materiálová pevnost rotorového kotouče limituje maximální možné otáčky.



Obr. 10: a) Uspořádání levé strany magnetických pólů, b) uzavírání magnetického toku jednoho pólu (převzato z [6] a upraveno)

Magnetické pole je vytvářeno pomocí osmi budících cívek. Pole sousedních cívek (zapojených v sérii) jsou opačné polarity, tím se vytváří pólová dvojice. Tudíž osm budících cívek spolu tvoří celkem čtyři magnetické obvody, jak ukazuje Obr. 10 a). Následující princip se vztahuje na pólovou dvojici A. Magnetický tok na Obr. 10 b) je značen čárkovaně. Cívka (1) průchodem proudu vytváří magnetický tok uzavírající se přes statorový zub (2), vzduchovou mezeru (3), kónické železné jádro (4), vzduchovou mezeru (5), statorový zub (6) a statorové jho (8), kterým se vrací zpět

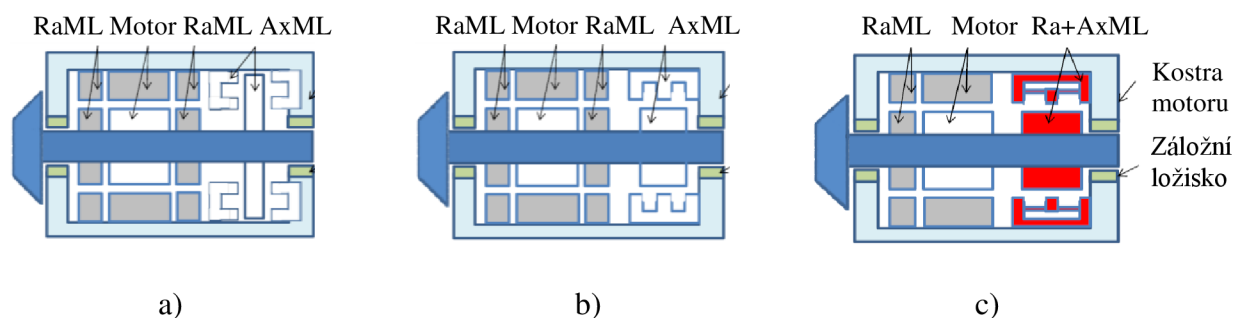
na zub (2). Magnetický tok buzený cívkou (7) má stejnou dráhu a směr, jako tok vybuzený cívkou (1). Proto celkový tok magnetického pole A je součet obou toků cívek (1 a 7). Vzniklý tok se snaží vytvořit stav (polohu) s nejmenším magnetickým odporem, to způsobí vytvoření síly  $F_{mag}$ . Poněvadž plochy rotoru a statoru jsou kónické, magnetická síla  $F_{mag}$  (viz Obr. 11), která působí mezi těmito povrchy, může být rozložena na složku axiální  $F_{mag,a}$  (rovnoběžná s osou) a složku radiální  $F_{mag,r}$  (kolmá k ose) [6].



Obr. 11: Složky magnetické síly  $F_{mag}$  (převzato z [6] a upraveno)

### 2.2.3 Tříosé magnetické ložisko s válcovým rotorem

U běžných axiálních ložisek nastává mnoho problémů při výrobě i montáži způsobených velkým rotorovým diskem. Z tohoto důvodu autoři článku [7] představili v minulosti jednoosé aktivní axiální magnetické ložisko s válcovým rotorem mající malý průměr a jednoduchý tvar. Pro praktické užití je přesto vhodnější použít tříosé aktivní magnetické ložisko kombinující vlastnosti jednoosého ložiska s válcovým rotorem a dvouosého ložiska.

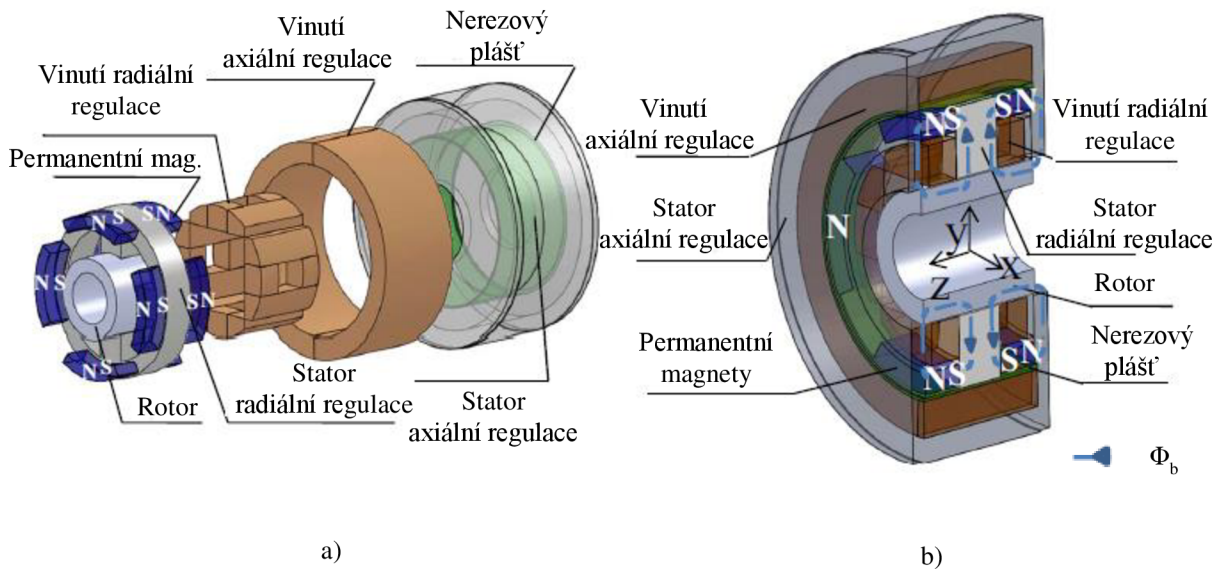


Obr. 12: Rozdílná uspořádání magnetických ložisek v motoru (převzato z [7] a upraveno)

Na Obr. 12 jsou zobrazeny konstrukce motorů s rozdílným typem magnetických ložisek. Varianta a) zobrazuje běžnou konstrukci, dvě radiální ložiska (RaML) spolu s axiálním ložiskem (AxML). Součástí axiálního ložiska je rozměrný disk, který komplikuje montáž výsledného stroje.

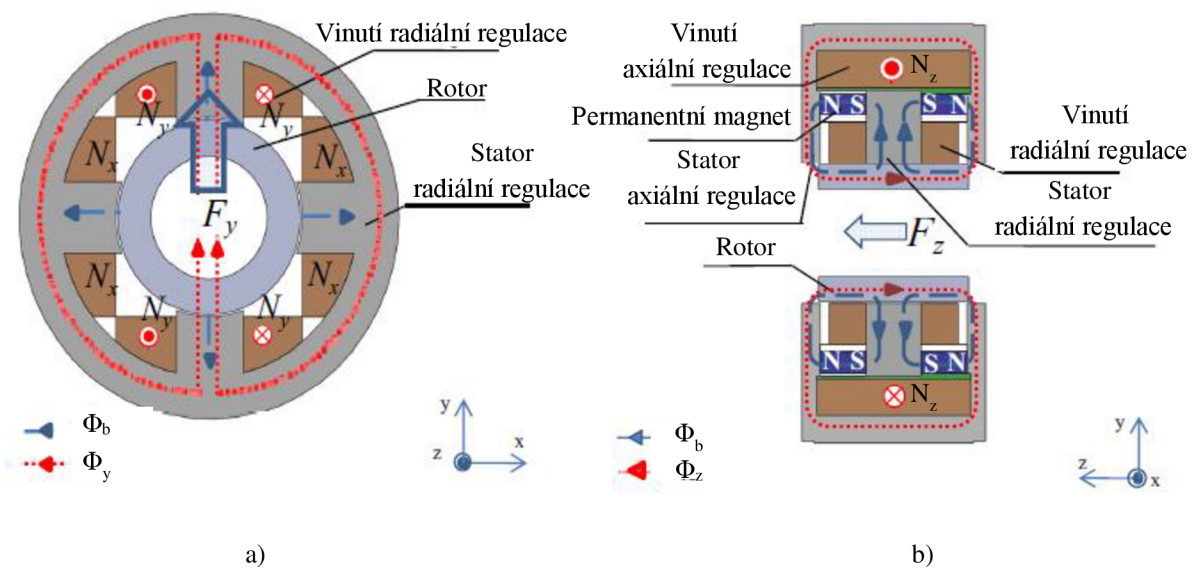
U varianty b) je použito stejného počtu ložisek. Odlišné je axiální ložisko, které namísto diskového rotoru má rotor válcový. Malý průměr rotoru ložiska umožňuje použití i ve vysokootáčkových aplikacích.

Uspořádání c) obsahuje celkem dvě ložiska, kde pravé ložisko zastává funkci axiálního i radiálního ložiska (Ra+AxML).



Obr. 13: a) Jednotlivé konstrukční prvky a b) řez tříosého magnetického ložiska (převzato z [7])

Obr. 13 zobrazuje strukturu tříosého ložiska. Válcový rotor se nachází uprostřed tělesa statoru. Kolem rotoru je centrován stator radiální regulace. Okolo vyniklých pólů statoru radiální regulace je navinuto dvoupólové vinutí. Statorové jho radiální regulace je vloženo mezi osm permanentních magnetů, které jsou polarizovány v axiálním směru. Vinutí axiální regulace je navinuté v obvodovém směru, uvnitř statoru axiální regulace (Obr. 13).



Obr. 14: Princip a) radiální a b) axiální levitace tříosého magnetického ložiska s válcovým rotorem (převzato z [7] a upraveno)



Obr. 14 a) ukazuje princip levitace v radiálním směru. Permanentními magnety vytváří stálý magnetický tok  $\Phi_b$  procházející radiálně od rotoru ke statoru (tento tok je znázorněn na Obr. 14 b) modře). Pokud začne téct do vinutí radiální regulace  $N_y$  stejnosměrný proud, vytvoří se magnetický tok  $\Phi_y$ , na Obr. 14 je znázorněn červenou čarou. Ve spodní části ložiska se toky  $\Phi_y$  a  $\Phi_b$  vzájemně odečtou (jejich směr je opačný), naopak v horní části ložiska mají oba toky stejný směr, výsledný tok bude jejich součtem. Nesymetrické rozložení toku vyvolá sílu  $F_y$  ve směru osy  $y$ . Podobně vzniká i radiální síla  $F_x$  (průchod stejnosměrného proudu přes vinutí radiální regulace  $N_x$  vytvoří magnetický tok  $\Phi_x$ ). Z toho vyplývá, že radiální síla může být generována do požadovaného směru pomocí součtu vektorů  $F_x$  a  $F_y$ . Výslednice těchto dvou sil řídí pozici hřídele v radiálním směru.

Obr. 14 b) zobrazuje princip levitace v axiálním směru. Permanentní magnety vytváří stálý magnetický tok  $\Phi_b$  ve směru, jak naznačuje Obr. 14 b). Pokud začne procházet stejnosměrný proud přes vinutí axiální regulace  $N_z$ , vytvoří se magnetický tok  $\Phi_z$ . Na pravé straně ložiska směřují toky  $\Phi_z$  a  $\Phi_b$  opačným směrem, proto dojde k odečtení toků. Naopak na levé straně se směry obou toků shodují a jejich výsledný tok je součtem. Nesymetrické rozložení toku vyvolá sílu  $F_z$  ve směru osy  $z$ . Pokud se změní směr proudu, vlivem přepólování cívek, síla  $F_z$  bude mít opačný směr.

Axiální síla  $F_z$ , radiální síla  $F_y$  popř.  $F_x$  je řízena pomocí velikosti a polarity stejnosměrného proudu. Tyto levitační síly mohou být efektivně vytvářeny, neboť radiální a axiální magnetický tok se neuzavírá skrze permanentní magnety, které mají velký magnetický odpor.

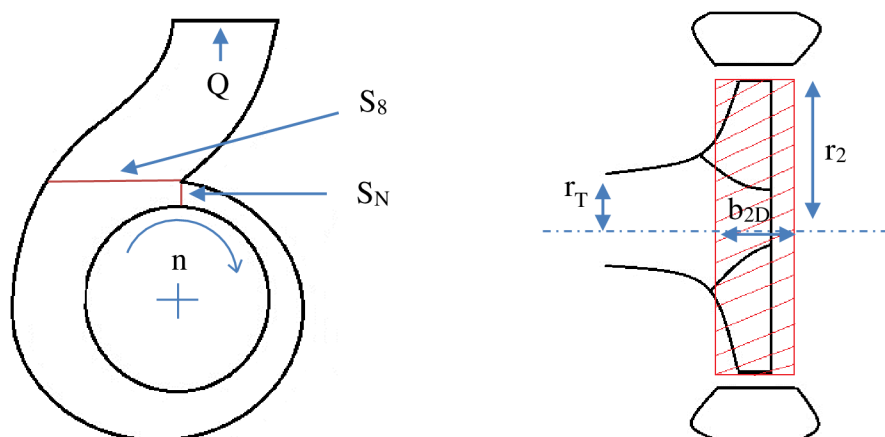
### 3 VÝPOČET SIL

Pro návrh a vhodné dimenzování magnetických ložisek čerpacího zařízení je důležité znát velikosti sil, které za chodu hydraulického stroje budou působit. Cílem práce je navrhnout kompletní ložiskový systém stroje, proto je nutné určit jak radiální, tak axiální síly.

Zadané parametry čerpadla pro výpočty v kapitolách (3.1) a (3.2) jsou uvedeny v Tab. 1. Obr. 15 znázorňuje oběžné kolo s vyznačenými zadanými parametry.

Tab. 1: Zadané hodnoty pro výpočet sil působících na oběžné kolo hydraulického stroje

$r_2$ [mm]	$b_{2D}$ [mm]	$S_N$ [mm <sup>2</sup> ]	$S_8$ [mm <sup>2</sup> ]	$\rho$ [kg·m <sup>3</sup> ]	$n$ [min <sup>-1</sup> ]	$r_T$ [mm]	$r_n$ [mm]	$Q_n$ [l·s <sup>-1</sup> ]
77,5	26	390	2123	1000	1450	31	0	10,83



Obr. 15: Nákres s parametry čerpadla pro výpočet působících sil na oběžné kolo

#### 3.1 Axiální síla

Axiální síla působící na oběžné kolo čerpadla  $F_{\check{c},ax}$  se skládá dle zdroje [25] ze tří složek: síla na nosný disk  $F_{az}$ , síla na krycí disk  $F_{ap}$  a síla od přitékající kapaliny  $F_c$ .

$$F_{\check{c},ax} = F_{az} - F_{ap} - F_c \quad (3.1)$$

$$F_{az} = 2\pi \cdot \left( p_{2v} \cdot \frac{r_2^2 - r_n^2}{2} - \rho \cdot \frac{\omega_v}{2} \cdot \frac{(r_2^2 - r_n^2)^2}{4} \right) \quad (3.2)$$

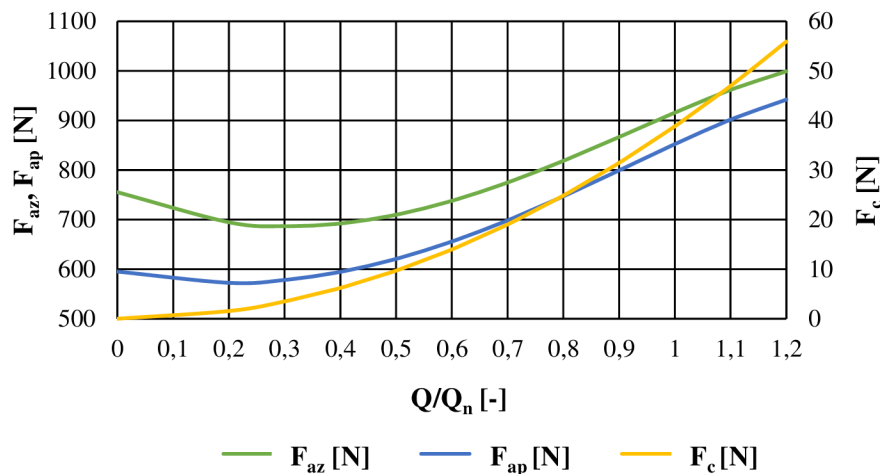
Síla působící na nosný disk  $F_{az}$  se vypočítá dle rovnice (3.2). Kde  $p_{2v}$  je tlak za nosným diskem,  $r_2$  je výstupní poloměr nosného disku,  $r_n$  je vstupní poloměr nosného (výtlačného) disku,  $\omega_v$  je úhlová rychlost kapaliny v prostoru nosného disku a  $\rho$  je hustota čerpané kapaliny. Obr. 16 zobrazuje průběh axiální síly na nosný disk vypočtený ze zadaných parametrů pomocí rovnice (3.2).

$$F_{ap} = 2\pi \cdot \left( p_{2s} \cdot \frac{r_2^2 - r_T^2}{2} - \rho \cdot \frac{\omega_s}{2} \cdot \frac{(r_2^2 - r_T^2)^2}{4} \right) \quad (3.3)$$

Rovnice (3.3) vyjadřuje sílu, která působí na krycí disk  $F_{ap}$ . Veličina  $\omega_s$  značí úhlovou rychlost kapaliny v prostoru krycího disku,  $r_T$  označuje vstupní poloměr krycího (sacího) disku a  $p_{2s}$  je tlak před krycím diskem. Obr. 16 zobrazuje průběh axiální síly na nosný disk vypočtený ze zadaných parametrů pomocí rovnice (3.3). Hodnoty veličin  $p_{2v}$ ,  $p_{2s}$ ,  $\omega_v$  a  $\omega_s$  potřebné pro výpočet byly určeny na základě popisu uvedeném v literatuře [25].

$$F_c = 2\pi \cdot \left( p_1 \cdot \frac{r_T^2}{2} + \rho \cdot c_{m0}^2 \cdot \frac{r_T^2}{4} \right) \quad (3.4)$$

Axiální síla vyvolaná přitékající kapalinou  $F_c$  je vyjádřena vztahem (3.4), kde  $p_1$  je vstupní tlak,  $c_{m0}$  je rychlost média na vstupu do oběžného kola. Obr. 16 zobrazuje průběh axiální síly na nosný disk vypočtený ze zadaných parametrů pomocí rovnice (3.4). Vstupního tlak je uvažován 0 Pa a hodnota  $c_{m0}$  byla určena na základě literatury [25].



Obr. 16: Průběh axiální síly na nosný disk čerpadla, krycí disk čerpadla a od přitékající kapaliny v závislosti na poměrném průtoku čerpadlem

Výtlačná síla má opačný směr než síla působící na sací disk a od přitékající kapaliny. Výsledná hodnota síly bude rozdílem síly výtlačné a součtem zbylých dvou sil (viz rovnice (3.1)). Obr. 18 zobrazuje průběh axiální síly na nosný disk vypočtený ze zadaných parametrů pomocí rovnice (3.1).

$$F_{dim,ax} = F_{ax} \cdot k_b \quad (3.5)$$

Z výsledné grafické závislosti celkové axiální síly (Obr. 18) je zřejmé, že nejvyšší zatížení 160 N nastane v okamžiku spuštění čerpacího stroje. Pro dimenzování axiální ložiskové soustavy je nutné předchozí výsledek ještě vynásobit bezpečnostním koeficientem  $k_b$  se zvolenou hodnotou 1,2 (rovnice (3.5)). Celková síla  $F_{dim,ax}$ , na kterou axiální ložisko bude dimenzováno, je poté rovna 192 N.





### 3.2 Radiální síla

Celková radiální síla se skládá ze síly od oběžného kola  $F_{\check{c},rad}$ , tíhy rotoru stroje  $F_g$  a síly způsobené radiálním vychýlením axiálního ložiska  $F_{r,axl}$ .

V čerpacích odstředivých strojích s nesymetrickým difuzorem vzniká mimo optimální otáčky nerovnoměrné rozložení tlaků po obvodu oběžného kola. Tlaková nevyvaha působí silou  $F_{\check{c},rad}$  na hřídel stroje. U běžných mechanických ložisek tato síla způsobuje jejich velké opotřebení, dále pak je namáhána hřídel ohybem, což může zapříčinit únavu materiálu a následnou poruchu čerpadla. Dynamický charakter sil může vyvolat vznik nepříznivých vibrací celého stroje.

Pro výpočet působící radiální síly od oběžného kola existuje řada empirických vztahů např.: Stephanoff, Biheller, Agostinelli, Mackay. Dle zdroje [24] je pro dimenzování nejvhodnější Bihellerův vzorec (3.6), který poskytuje nejlepší výsledky statické složky radiální síly.

$$F_{\check{c},rad} = 0,221 \cdot u^2 \cdot S \cdot \rho \cdot 10^{-1,13 \cdot \frac{S_N}{S_8}} \cdot \sqrt{1 + k^2 \cdot \left(\frac{Q}{Q_N}\right)^2 - 2 \cdot k \cdot \frac{Q}{Q_N} \cdot \cos \left[ \frac{3}{8} \cdot \theta_v - \frac{\pi}{2} + \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta_v}{4}\right) \cdot \frac{Q}{Q_N} \right]} \quad (3.6)$$

$$\cdot \sqrt{1 + k^2 \cdot \left(\frac{Q}{Q_N}\right)^2 - 2 \cdot k \cdot \frac{Q}{Q_N} \cdot \cos \left[ \frac{3}{8} \cdot \theta_v - \frac{\pi}{2} + \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta_v}{4}\right) \cdot \frac{Q}{Q_N} \right]}$$

Kde  $\rho$  je hustota čerpané kapaliny,  $S_N$  je označena plocha mezi kolem a stěnou difuzoru v nejužším místě a  $S_8$  plocha vyústění čerpadla. Koeficient  $k$  se u odstředivých čerpadel rovná 1, naopak koeficient úhlové vzdálenosti  $\theta_v$  je pro spirální čerpadla roven 0. Poměr průtoků  $Q/Q_n$  značí různé stavy čerpadla vůči jmenovitému průtoku, pokud tento poměr vychází v daný okamžik menší jak jedna, čerpá se pod optimální průtok a naopak. Dále  $u$  ve vzorci značí obvodovou rychlost oběžného kola dle rovnice (3.7) o průměru kola  $D_2$  a otáčkách za minutu  $n$ .  $S$  je plocha řezu oběžného kola vypočtená pomocí rovnice (3.8) z poloměru výstupu nosného disku  $r_2$  a šířky kola  $b_{2D}$ .

$$u = \frac{D_2}{2} \cdot \frac{2\pi \cdot n}{60} \quad (3.7)$$

$$S = 2 \cdot r_2 \cdot b_{2D} \quad (3.8)$$

Pomocí Bihellerova empirického vzorce byla vytvořena grafická závislost (Obr. 17) působící radiální síly od oběžného kola na poměru průtoků k jmenovitému průtoku. Z průběhu je patrné, že při optimálním (jmenovitém) průtoku čerpadla je působící radiální síla nulová. Avšak v praxi existuje malá síla i při tomto průtoku. Provozní režim čerpadla se bude pohybovat od nejmenších průtoků po průtoky, kdy  $Q/Q_n > 1$ , proto je nutné pro dimenzování radiálního ložiska uvažovat sílu přibližně 81 N.

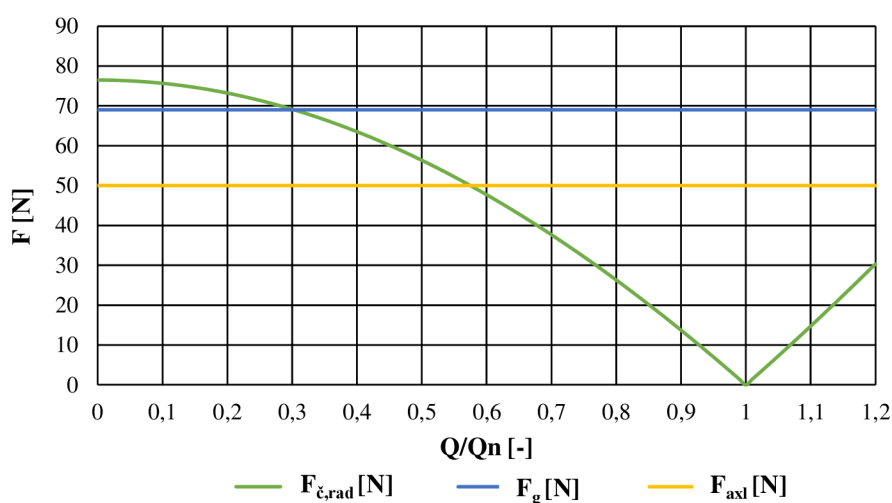
$$F_g = m_{kolo} \cdot g \quad (3.9)$$

Jak již bylo na počátku kapitoly naznačeno, je nutné započíst taktéž tíhu samotného rotoru s oběžným kolem. Hmotnost sestavy (hřídel s oběžným kolem)  $m_{kolo}$  byla určena stolní váhou na 7 kilogramů. Dosazením změřené hodnoty do vztahu (3.9) byla určena tíhová síla 69 N. Konstanta  $g$  ve vzorci značí tíhové zrychlení s uvažovanou hodnotou  $9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ .

Pomocí programu ANSYS Maxwell bylo axiální ložisko podrobena simulaci (kapitola 5.3). Výpočtová hodnota parazitní radiální síly byla vyčíslena na velikost 50 N při axiálním vychýlení o 2 mm a radiálním vychýlení 0,6 mm. Dále pokud nebude rotor spolu s oběžným kolem dostatečně vyvážen, může dojít ke vzniku setrvačné síly (odstředivé)  $F_s$ . Při výpočtu výsledné síly bude uvažován vyvážený rotor s  $F_s$  rovnou 0 N.

$$F_{rad} = F_{\check{c},rad} + F_g + F_{r,axl} + F_s \quad (3.10)$$

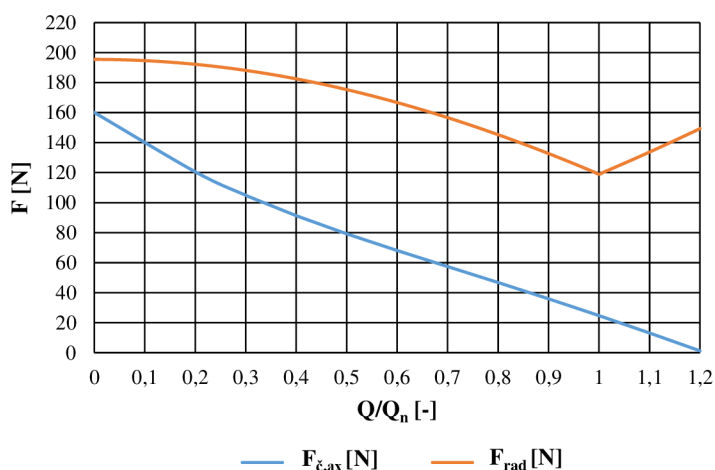
Celkové radiální zatížení je popsáno rovnicí (3.10). Pak výsledná hodnota zatížení je rovna 200 N. Na Obr. 18 je zobrazen průběh celkové radiální síly v závislosti na poměrném průtoku.



Obr. 17: Průběh sil zatěžující radiální ložisko v závislosti na poměrném průtoku

$$F_{dim,rad} = F_{rad} \cdot k_b \quad (3.11)$$

Za účelem dimenzování radiálního ložiska na statické účinky je zapotřebí předchozí výsledek (200 N) vynásobit bezpečnostním koeficientem  $k_b$  se zvolenou hodnotou 1,2 podle rovnice (3.11). Radiální ložisko bude dimenzováno na statické zatížení 240 N.



Obr. 18: Průběh celkové radiální a axiální síly v závislosti na poměrném průtoku



## 4 ANSYS MAXWELL

Jedná se o účinný software pro simulace a analýzu nízkofrekvenčních elektromagnetických polí [15]. Použitím počítačové podpory při návrhu budoucích konstrukcí je možné dosáhnout optimálního uspořádání daného zařízení, a tím získat lepší parametry a snížit koncové náklady. Simulace jsou velmi přínosné zejména pro elektrické stroje např.: motory, generátory, transformátory, induktory, magnety nebo elektroniku [12][14].

Když v roce 1873 James Clerk Maxwell vyslovil soustavu rovnic, která popisovala veškeré elektromagnetické úkazy, nastal velký rozvoj v oblasti elektromagnetizmu [12].

Společnost ANSYS vyvinula pro řešení problematiky spojené s elektromagnetizmem program s názvem Maxwell. Software využívá k nalezení řešení soustavy Maxwellových rovnic metodu konečných prvků (MKP). Tato metoda spočívá v rozložení celého řešeného problému do jednotlivých elementů různých tvarů, ke kterým jsou přiřazeny určité vlastnosti. Vzniklé elementy vytvoří tzv. výpočetní síť (mesh) [12].

Uživatel programu Maxwell má k dispozici 6 solverů, z nich každý je optimalizován na určitý problém. Program je schopný provádět analýzy: stacionární, nestacionární, frekvenční nebo s harmonickými elektromagnetickými zdroji. K základním schopnostem také patří práce s nelineárními vlastnostmi BH charakteristik nebo s lištěnými vzájemně izolovanými plechy [12][13].

Program má implementovaný účinný inteligentní algoritmus pro vytvoření výpočetní sítě, schopný sám v problematických místech danou síť zjemnit. V místech, kde program zjistí velkou chybu, je síť opět optimalizována a dané místo přepočítáno. Avšak uživatel má možnost ovlivnit síťování manuálně. Pro návrh elektrických strojů obsahuje Maxwell dva expertní moduly: RMxprt – sloužící k návrhu točivých strojů a PExprt – zabývající se transformátory. Pro optimalizaci simulovaného stroje je k dispozici sada implementovaných nástrojů: parametrické studie, hledání extrémů, citlivostní analýza [12][13].

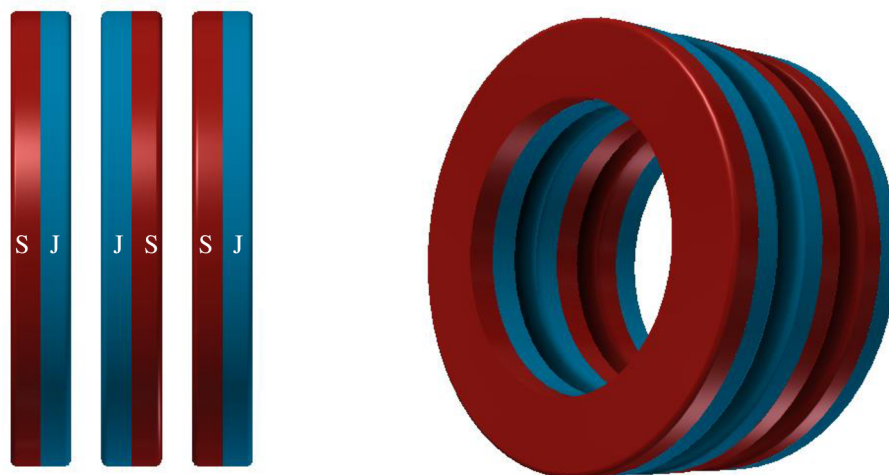
V reálném světě existují spousta fyzikálních jevů, které navrhované zařízení ovlivňují. Společnost ANSYS na tuto skutečnost myslela, proto vytvořila prostředí Workbench umožňující předávání jednotlivých návrhů mezi různými programy od firmy ANSYS. Příkladem může být návrh elektromotoru do elektromobilu, kde je kladen velký důraz na co nejnižší hmotnost při dosažení maximálních výkonových poměrů. To sebou nese riziko přehřívání stroje vlivem ztrát, proto musí být navržen dobře i po tepelné stránce (např.: odvod tepla), prostřednictvím Workbench je problematika převedena do programu ANSYS Mechanical [12][13].

Prostředí programu Maxwell umí pracovat se dvěma druhy energie, a to energií mechanickou a elektromagnetickou. Elektromagnetická energie vyvolává silové účinky, které zapříčiní pohyb součástí (např.: otáčivý pohyb rotoru). Vzniklý pohyb může způsobit indukovaní vířivých proudů a ty následně zahřívají celý navrhovaný stroj. Předcházející děje mohou způsobit změnu rozložení elektromagnetického pole, se kterými Maxwell také počítá [12].

Pro specifikaci fyzikálních vlastností je v programu implementována rozsáhlá databáze materiálů, parametry materiálů lze editovat nebo přidat materiál nový [14].

## 5 NÁVRH PASIVNÍHO MAGNETICKÉHO LOŽISKA

Cílem je navrhnout pasivní magnetické ložisko pro přečerpávací zařízení. Ložisko je koncipováno jako axiální, které spolu se dvěma aktivními radiálními ložisky bude tvořit celý ložiskový systém daného stroje. Návrh byl prováděn pomocí metody konečných prvků v programu ANSYS Maxwell.



Obr. 19: Uspořádání permanentních magnetů pasivního magnetického ložiska

Konstrukce ložiska je tvořena třemi magnetickými prstenci polarizovanými v axiálním směru, uspořádání je vyobrazeno na Obr. 19. Vzhledem k snadnějšímu uchycení magnetických prstenců ve statoru oproti rotoru bylo zvoleno následující uspořádání: dvojice permanentních magnetů je uchycena ve statoru ložiska a třetí prsteneček je umístěn na hřídel. Pro levitaci bylo zvažováno, zdali využít odpudivých nebo přitažlivých magnetických sil. Ve zdroji [10] a [17] je charakter magnetického ložiska využívající odpudivých sil přirovnáván k tělesu umístěnému na pružině. V případě axiálního vychýlení hřídele z rovnovážné polohy dochází k nárůstu odpudivé síly od permanentního magnetu, ke kterému je hřídel vychylována, naopak odpudivá síla od protilehlého magnetu klesá. Přitažlivé síly mají chování opačné: s vychýlením hřídele dochází k nárůstu přitažlivé síly ve směru vychýlení, naopak přitažlivá síla od opačného magnetu se snižuje. Takový výsledný silový projev je nevhodný, proto byla zvolena první varianta (odpudivé síly). Pro dosažení odpudivých magnetických sil je zapotřebí jednotlivé magnety vůči sobě patřičně orientovat tak, aby přilehlé strany dvou sousedních magnetů byly magnetizovány ve stejném smyslu, tedy SJ|JS|SJ, viz Obr. 19.

Tab. 2: Výchozí hodnoty pro návrh pasivního magnetického ložiska

Průměr hřídele	10 mm
Axiální vzduchová mezera	2 mm
Radiální vzduchová mezera	7 mm
Minimální síla při vychýlení o 1 mm	100 N

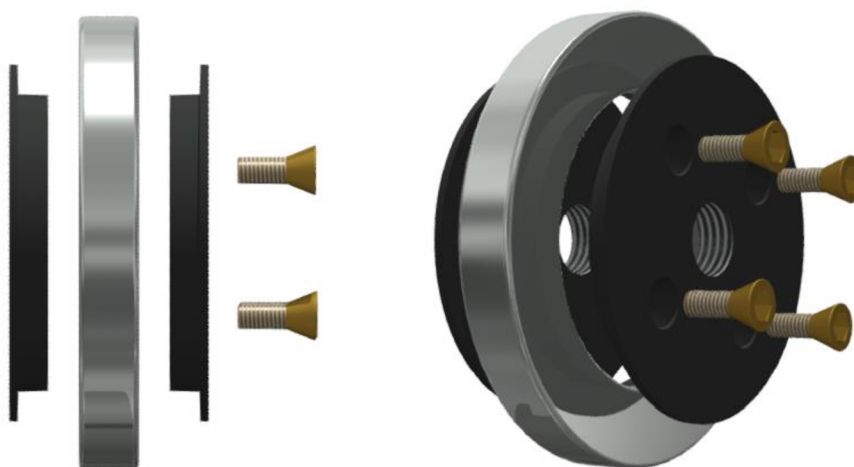
## 5.1 Volba typu a rozměrů permanentních magnetů

Návrh byl realizován pro předem dané parametry: průměr hřídele, axiální vzduchová mezera, radiální vzduchová mezera a minimální síla při axiálním vychýlení hřídele o 1mm (číselné hodnoty jsou zobrazeny v Tab. 2). Pro dosažení nejmenších rozměrů při co možná největší odpudivé síle byly zvoleny neodymové permanentní magnety (NdFeB). Před výběrem ze standardizovaných rozměrů toroidních permanentních magnetů byly provedeny předběžné simulace, které nastínily přibližné rozměry magnetických mezikruží.

Tab. 3: Vlastnosti prstencového permanentního magnetu 75×49×10 (mm)[18]

Materiál	Typ	Max pracovní teplota	Curierová teplota	Hmotnost	Antikorozní ochrana
NdFeB	N42M	100°C	310°C	190 g	Ni + Cu + Ni

Následoval výběr permanentních magnetů z firemních katalogů. Teplota okolního prostředí byla uvažována 80°C. Za účelem teplotního dimenzování permanentních magnetů byly vybírány typy s pracovní teplotou do 100°C. Na základě simulací v programu Maxwell a zadaných parametrů byla zvolena jako vhodná následující trojice magnetů (vnější průměr × vnitřní průměr × výška): 55×12×25, 55×25×15 a 75×49×10 (mm). Vzhledem ke snaze docílit co nejmenších axiálních rozměrů ložiska, byl vybrán permanentní magnet o rozměrech 75×49×10 mm od firmy Neomag. V Tab. 3 jsou vloženy specifické vlastnosti zvoleného magnetu udávané výrobcem, dále pak v Příloze 1 se nachází katalogový list s vlastnostmi různých typů NdFeB magnetů. Ze zmíněného katalogového listu byly odečteny následující údaje: střední hodnota remanentní indukce  $B_r$  1,3 T a koercitivní síla  $H_c$  923 kA·m<sup>-1</sup>, které v následujících kapitolách sloužily jako vstupní hodnoty pro simulace v programu ANSYS Maxwell. Veškeré předcházející simulace permanentních magnetů pro nalezení vhodného rozměru probíhaly v axisymetrickém rozložení s válcovou vztažnou soustavou.

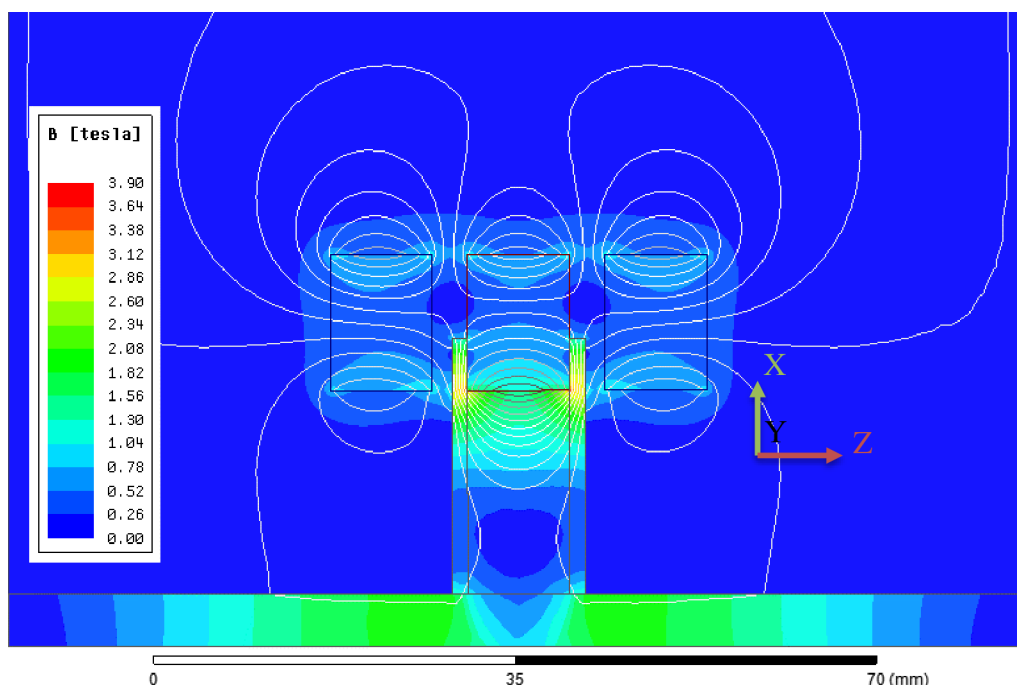


Obr. 20: Sestava rotoru pasivního magnetického ložiska

## 5.2 Návrh mechanických částí ložiska

Dalším bodem návrhu bylo vytvořit uchycení magnetického prstence na hřídeli ložiska. Zvolené magnetické mezikruží má velký vnitřní průměr oproti zadané hřídeli, proto byla jako řešení zvolena ocelová válcová podložka. Během provozu působí na magnet velké dynamické síly ve směru osy hřídele, z tohoto důvodu byla válcová podložka vybavena postranními lemy. Vzhledem k montáži magnetického prstence se podložka skládá ze dvou polovin spojených pomocí čtyř šroubů M4 (Obr. 20). Zamezení rotace magnetu na hřídeli ložiska je zajištěno celoplošnou fixací speciálním lepicím prostředkem. Válcová podložka je na hřídeli zajištěna pomocí závitů M12.

Struktura složená ze tří zvolených toroidních magnetů, hřídele a vymežovací podložky byla podrobena simulaci na rozložení magnetické indukce. Analýza odhalila uzavírání magnetického toku skrze ocelovou podložku a hřídel (Obr. 21). Pro jeho odstranění byl hledán magneticky nevodivý materiál (např. hliník). Avšak namísto kovového materiálu byl pro výrobu zvolen plast PVC-U<sup>1</sup> (polyvinylchlorid neměkčený) pro jeho snazší obrobitelnost a současně se zabránilo vzniku vířivých proudů změnami magnetického pole. To by mělo za následek vytváření elementárních magnetických polí zeslabující výsledné pole permanentních magnetů. Šrouby spojující obě poloviny válcové podložky jsou zhotoveny z mosazi, která je také magneticky nevodivá. Obr. 24 zobrazuje rozložení magnetické indukce a siločar v hřídeli a válcové podložce vyrobené z PVC-U.



Obr. 21: Uzavírání magnetické indukce a siločar přes ocelovou hřídel a válcovou podložku

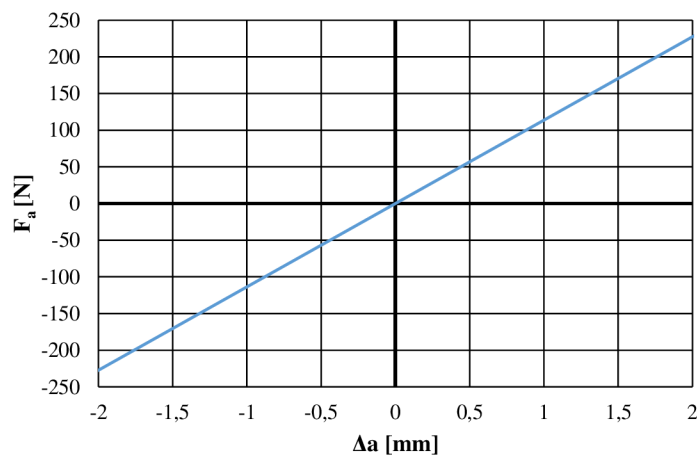
Boční lem způsobil zvětšení vzdálenosti mezi jednotlivými magnety (nutno zachovat zadanou axiální vzduchovou mezeru 2 mm). To mělo nepříznivý vliv na tuhost ložiska při vychýlení

<sup>1</sup> PVC-U – jedná se o velmi pevný, tuhý a zároveň snadno svařitelný a lepitelný materiál. Nachází uplatnění ve strojírenském, chemickém, sklářském a taktéž v potravinářském a nápojářském průmyslu [19] [20].

hřídele rovnovážné polohy. Proto bylo nutné zmenšit tloušťku bočního okraje na minimum. Postup korekce a výsledné rozměry jsou uvedeny v kapitole 5.5, kde tato úprava probíhala na základě pevnostní analýzy v programu Autodesk Inventor.

### 5.3 Simulace navrženého ložiska

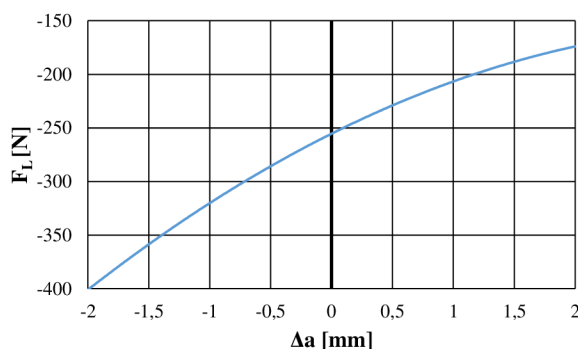
Pro zkoumání průběhu síly při axiálním vychýlení hřídele byl v programu ANSYS Maxwell využit modul Optimetrics. Závislost síly na posunutí hřídele je zobrazena na Obr. 22. Průběh má lineární charakter. Záporné a kladné hodnoty v grafu vyjadřují směr působící síly popřípadě směr posunutí hřídele, kde záporné hodnoty jsou vztaženy k levé straně ložiska a naopak.



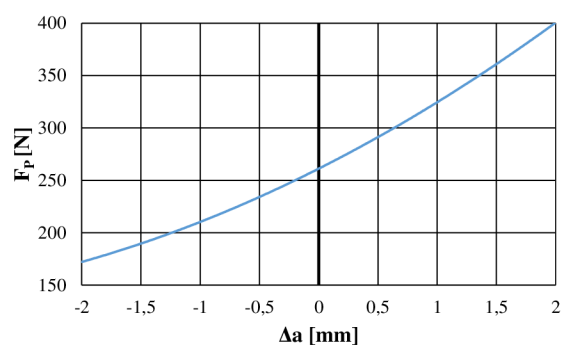
Obr. 22: Průběh silového působení na středový magnet v závislosti na posunutí hřídele

Vedle výsledné síly na středový magnet byl taktéž sledován průběh dílčích silových působení jednotlivých statorových magnetů. Obr. 23 zobrazuje působící sílu od a) levého, b) pravého statorového magnetu na rotorový magnet.

$$F_{STŘ} = F_L + F_P \quad (5.1)$$



a)



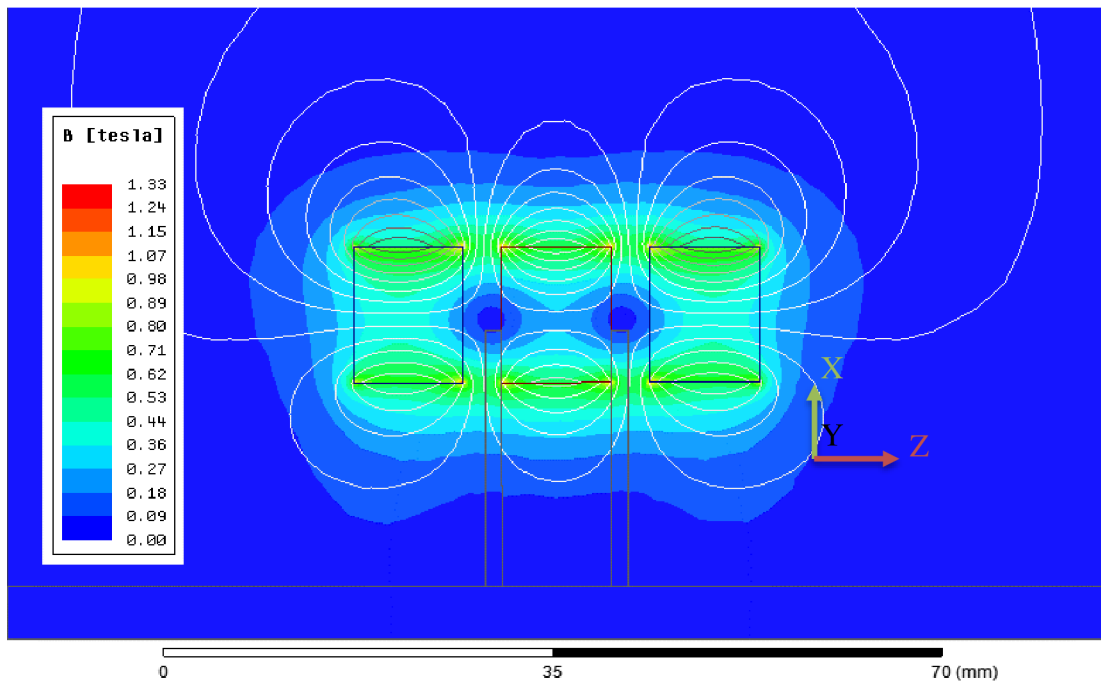
b)

Obr. 23: Průběh vyzvozané síly od a) levého b) pravého statorového magnetu

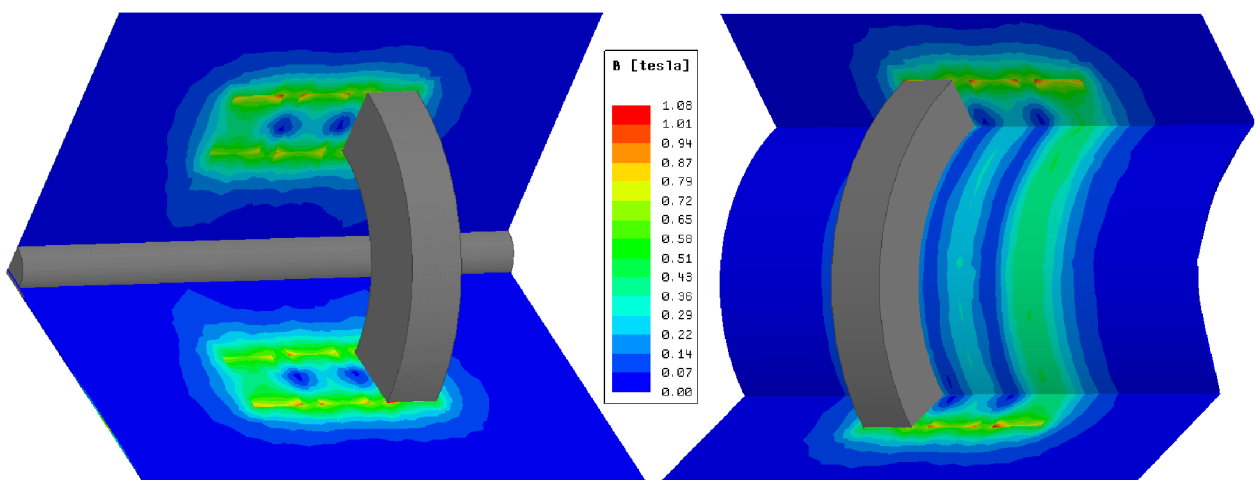
Výsledné silové působení na středový magnet  $F_{STŘ}$  je popsáno rovnicí (5.1), kde  $F_L$  je síla, kterou vytváří levý magnet na středový a  $F_P$  síla, kterou vytváří pravý magnet na středový. Oba

průběhy jsou nelineární a tvarem se blíží části paraboly. Superpozicí obou průběhů dle rovnice (5.1) se dostává lineární závislost, jak zobrazuje Obr. 22.

Předchozí princip linearizace se často využívá u aktivních magnetických ložisek, kde se tímto způsobem obchází složité nelineární řízení. Tudíž je výhodné využívat sudý počet pólů umožňující vzájemné sčítání [17].



Obr. 24: Uzavírání magnetické indukce a siločar přes hřídel a plastovou válcovou podložku (axisymetrická simulace)



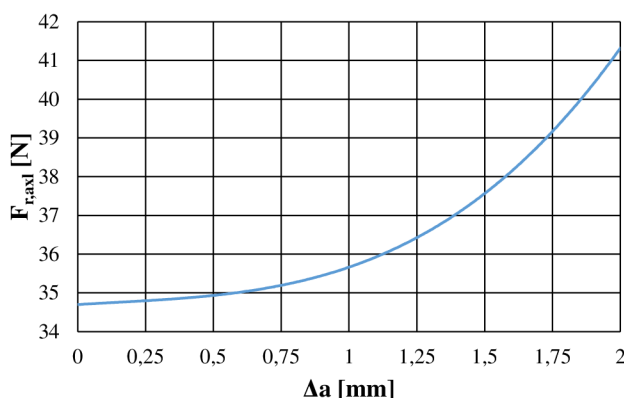
Obr. 25: Rozložení magnetické indukce – zobrazena 1/4 ložiska (3D simulace)

Ložisko s výslednými parametry bylo opět podrobena analýze. Na Obr. 24 je zobrazena axisymetrická simulace s rozložením magnetické indukce a siločar. Hřídel a podložka jsou z magneticky nevodivého materiálu (PVC-U). Axisymetrické rozložení bylo dále převedeno do



trojrozměrného a provedena rovněž simulace na rozložení magnetické indukce. Obr. 25 zobrazuje pouze výřez  $\frac{1}{4}$  ložiska.

Pro návrh aktivního radiálního ložiska je zapotřebí znát přírůstek radiální síly od navrženého pasivního magnetického ložiska při maximálním radiálním vychýlení o 0,6 mm. Pro získání lepší představy o průběhu parazitní radiální síly byla pomocí modulu Optimetrics programu Maxwell vytvořena grafická závislost. Vstupními hodnotami pro simulaci bylo radiální vychýlení ložiska o 0,6 mm a axiální vychýlování ložiska z rovnovážné polohy do mezní polohy. Výsledný průběh radiální síly na vychýlení ložiska je na Obr. 26. Je patrné, že se zvyšujícím se axiálním vychýlením roste radiální síla přibližně kvadraticky. Maximální hodnota radiální síly dle simulace je 41,3 N. V rámci dimenzování radiálního ložiska bude uvažováno se silou 50 N.



Obr. 26: Průběh parazitní radiální síly pasivního axiálního magnetického ložiska v závislosti na axiálním vychýlení při radiálním vychýlení 0,6 mm

## 5.4 Porovnání výsledků z 2D a 3D MKP

V Tab. 4 jsou vloženy hodnoty silových účinků v závislosti na posunutí hřídele z rovnovážné polohy získaných z 2D a 3D metody konečných prvků. Pro porovnání výsledků byla vypočtena relativní odchylka. Výpočty z 3D simulace dosahují přesnějších výsledků, proto byly při určování relativní odchylky považovány za etalon. Použitá výpočetní síť pro axisymetrické rozložení se nachází na Obr. 27. Hustota výpočetní sítě uvnitř permanentních magnetů byla zadána na maximální velikost hrany trojúhelníku výpočetní buňky 1 mm.

Tab. 4: Hodnoty působící síly získané z 2D a 3D metody konečných prvků

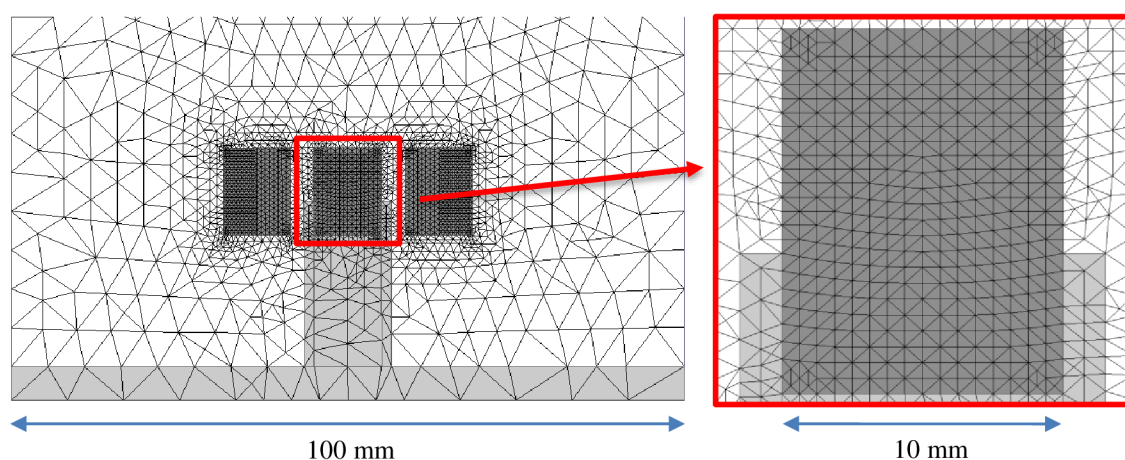
$\Delta a$ [mm]	2D MKP		3D MKP		$\delta F_P$ [%]	$\delta F_{STŘ}$ [%]
	$F_{STŘ}$ [N]	$F_P$ [N]	$F_{STŘ}$ [N]	$F_P$ [N]		
0,5	54,47	290,32	55,12	288,87	-1,2	0,5
1,0	111,72	323,44	111,03	321,54	0,6	0,6
1,5	170,77	361,90	168,68	358,17	1,2	1,0
2,0	233,62	400,02	232,40	404,43	0,5	-1,1

Pozn.: Rotor ložiska byl vychýlován k pravému statorovému magnetu

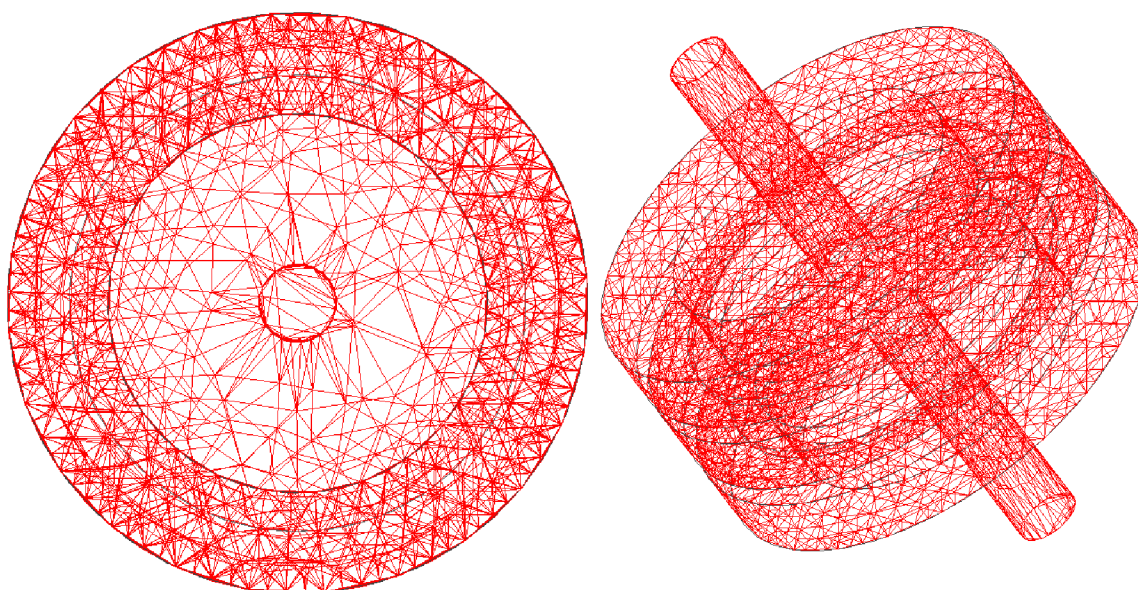
Obr. 28 znázorňuje rozložení hustoty mřížky pro 3D metodu. Velikost buňky uvnitř permanentních magnetů byla omezena na maximální velikost 10 mm. Malý počet výpočetních elementů nebo naopak příliš hustá výpočetní síť může zanášet do vypočtených hodnot značné chyby. Odlišnost hodnot obou metod nepřekračuje 1,5 %.

$$\delta F = \frac{F_{2D} - F_{3D}}{F_{3D}} \cdot 100 \quad (5.2)$$

Relativní odchylka sil  $\delta F$  v Tab. 4 byla vypočítána dle rovnice (5.2). Kde  $F_{2D}$  je síla vypočtená pomocí 2D metody konečných prvků a  $F_{3D}$  síla vypočtená pomocí 3D metody konečných prvků.



Obr. 27: Výřez použitého rozložení výpočetní sítě pro 2D metodu konečných prvků



Obr. 28: Výřez použitého rozložení výpočetní sítě pro 3D metodu konečných prvků

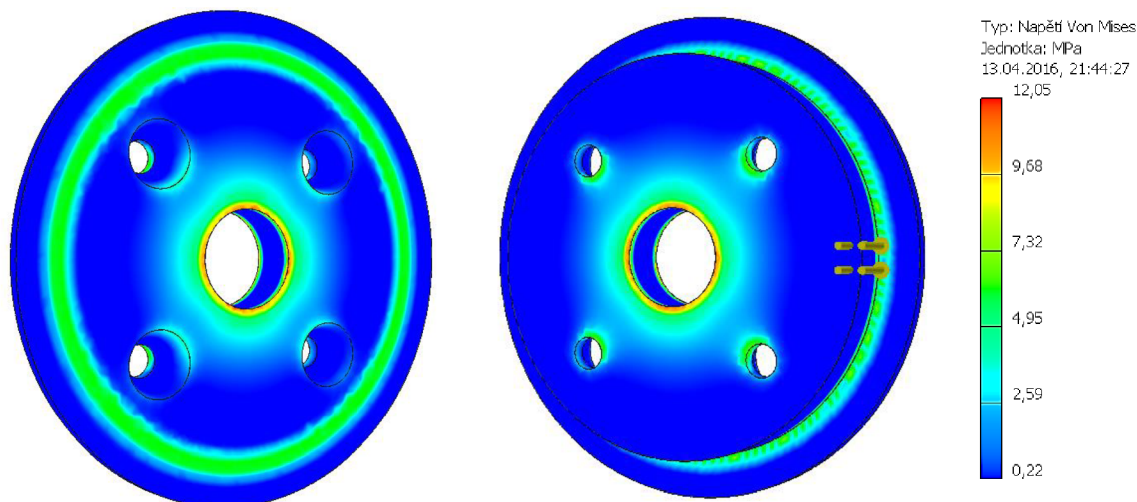
## 5.5 Pevnostní analýza mechanických součástí ložiska

Kontrola mechanického namáhání jednotlivých součástí ložiska probíhala v prostředí Autodesk Inventor. Kde tlaková napětí jsou vyjádřena prostřednictvím ekvivalentního napětí tzv. napětí von Mises, které se také často označuje jako pevnostní teorie  $HMH^2$ .

### 5.5.1 Válcová podložka

Jak bylo uvedeno v kapitole 5.2, šířka bočního lemu podložky musí být co možná nejmenší. Postranní lem zvětšuje vzdálenost permanentních magnetů při maximálním axiálním vychýlení, to má za následek snížení výsledné odpudivé síly. Určení tloušťky probíhalo v několika po sobě jdoucích krocích:

1. Odhadnout potřebnou tloušťku postranního lemu.
2. Určit za pomoci programu Maxwell sílu působící na středový magnetický prstenec při maximálním vychýlení hřídele (2 mm).
3. Pevnostní analýzou v programu ANSYS Inventor vystavit válcovou podložku silovému namáhání.
4. Porovnat výsledek pevnostní analýzy s hodnotou meze kluzu PVC-U.
5. V případě nesouladu bodu 4: úprava tloušťky stěny a opakování bodů 2, 3, 4 popř. 5.



Obr. 29: Pevnostní analýza válcové podložky při axiálním zatížení 234 N

Na základě odhadu byla zvolena tloušťka 2 mm. Síla při plném vychýlení v axisymetrickém rozložení dosahovala 206 N. Pevnostní analýza zobrazovala největší namáhání okolo 3 MPa, hodnota meze kluzu<sup>3</sup> materiálu PVC-U určená dle normy ČSN EN ISO 527<sup>4</sup> je 58 MPa [23]. Na základě předchozího výsledku simulace byla tloušťka upravena na hodnotu 1,5 mm a následně opět ověřena pevnostní analýzou. Síla s novým rozměrem dosahovala 234 N. Pevnostní analýza

<sup>2</sup> Teorie ( $HMH$  = Huber – Mises – Henckyova teorie) objemové hustoty deformační energie pro změnu tvaru říká, že materiál se poruší pouze působením energie, která zapříčiní změnu tvaru tělesa [21].

<sup>3</sup> Mez kluzu patří mezi snadno zjistitelné materiálové parametry. Jedná se o základní hodnotu pro pevnostní dimenzování a výpočty. Pokud silové působení překročí mez kluzu daného materiálu, dochází k deformaci tělesa i při konstantním nebo zmenšeném namáhání [21].

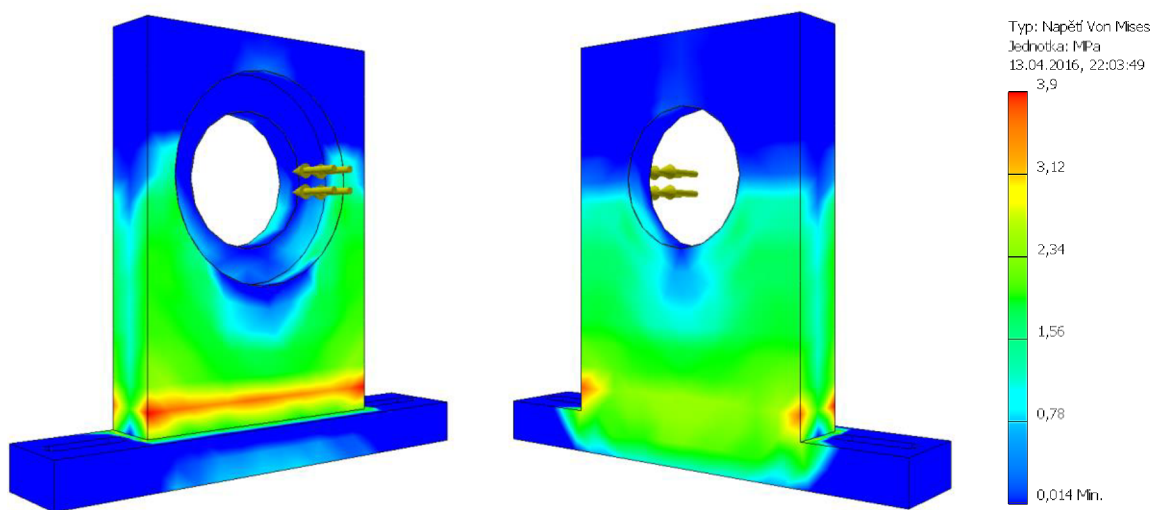
<sup>4</sup> Norma ČSN EN ISO 527 definuje všeobecné zásady pro stanovení vlastností v tahu plastových materiálů [22].

indikovala maximální namáhání 7,5 MPa, viz Obr. 29. Menší tloušťka stěny nebyla volena s ohledem na možné riziko poškození tenčích okrajů při montáži ložiska.

### 5.5.2 Konzole pro upevnění statorových permanentních magnetů

Před vlastní aplikací ložiska do čerpacího stroje bylo zapotřebí experimentálně ověřit, zda výsledky ze simulací jsou shodné s reálným prototypem. Samotné ložisko je axiálně stabilní pouze v případě, pokud se současně zajišťuje radiální stabilita (Earnshawův teorém [9]). Podmínka stability při experimentu byla splněna pomocí teflonových pouzder pro uložení hřídele s rotorem, ve kterých je možný axiální posun nikoliv však radiální pohyb. Statorové magnetické prstence bylo nutné z důvodu absence statoru čerpacího stroje provizorně upevnit. Funkci statoru zastávala dvojice konzolí (ložiskových domků). Výsledky praktických zkoušek axiálního pasivního magnetického ložiska se nachází v kapitole 5.6.

Statorový ložiskový domek se skládá ze dvou částí. Hlavní je samotný přípravek pro uchycení permanentního magnetu. Jedná se o kvádr, v němž jsou pomocí frézy vytvořeny dva soustředné kruhové otvory. Otvor s větším průměrem slouží pro uložení permanentního magnetu. Magnetické mezikruží je lícované s čelní stěnou (strana přilehlá k rotoru ložiska), aby nenastalo zvětšení axiální vzduchové mezery. Otvor o menším průměru slouží k průchodu hřídele skrze ložiskový domek. Zafixování magnetu bylo uskutečněno prostřednictvím speciálního lepicího prostředku. Druhou částí je příruba, která je nutná pro pevné a nehybné spojení se základnou. Pro variabilitu uchycení je v přírubě vytvořena příčná drážka o průměru 8 mm. Základnou je hliníkový monolit s vyfrézovanými T drážkami.



Obr. 30: Pevnostní analýza ložiskového domku při maximálním axiálním zatížení 400 N

Při návrhu konzole pro upevnění statorových magnetických prstenců bylo nutné počítat s velkým statickým zatížením. Použitým materiálem na výrobu byl PVC-U. Důvody zvolení tohoto materiálu jsou stejné, jak již bylo popsáno dříve. Opět bylo využito pevnostní analýzy v prostředí Autodesk Inventor. Pro získání vstupní hodnoty silového zatížení byla využita simulace v axisymetrickém rozložení v ANSYS Maxwell. Návrh je koncipován na nejnepříznivější možný stav silového působení. Ten nastane, pokud vlivem vnějších sil se hřídel vychýlí od rovnovážné polohy o 2 mm. Silové působení v tomto bodě je simulací vyčísleno na hodnotu 400 N. Výsledky

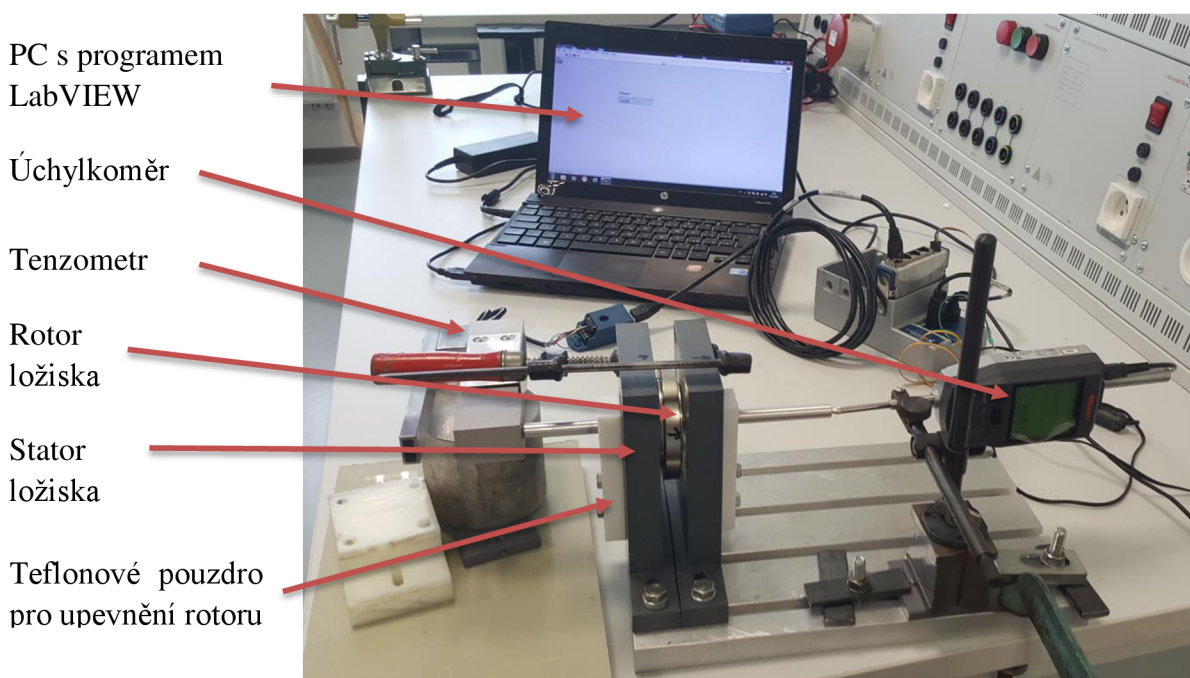
pevnostní analýzy s rozložením napětí von Mises jsou zobrazeny na Obr. 30. Maximální hodnota namáhání se pohybuje okolo 3 MPa. Namáhání o této hodnotě je vyhovující, neboť mez kluzu pro PVC-U je 58 MPa. Náčrtky s rozměry obou polovin válcové podložky, hřídele a konzole jsou součástí Přílohy 3, 4, 5 a 6.

## 5.6 Experimentální měření pasivního axiálního magnetického ložiska

Cílem provedeného experimentálního měření pasivního magnetického ložiska bylo ověřit hodnoty síly získané metodou konečných prvků ze software ANSYS Maxwell. Za tímto účelem byly v kapitole 5.2 a 5.5 navrženy některé komponenty pro uskutečnění tohoto měření.

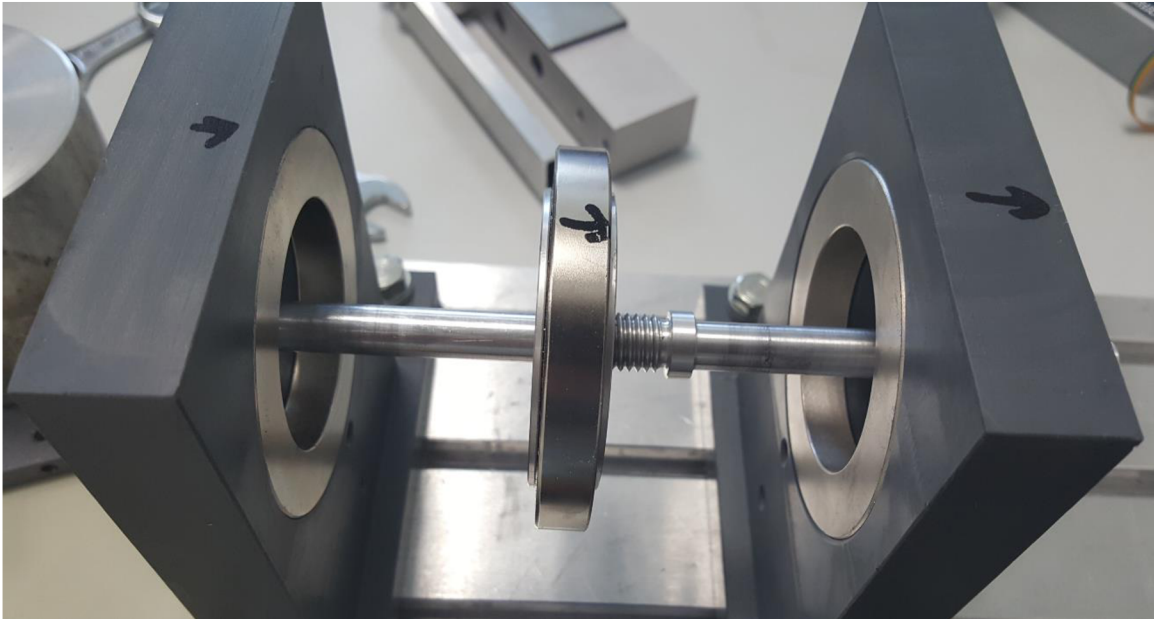
Maximální dosažitelné axiální vychýlení ložiska bylo pouze 1,6 mm, a to z důvodu větší šířky vyrobeného přídržného lemu válcové podložky rotorové magnetu. I přesto zkušební model odpovídal navrženému uspořádání a původní vzdálenost mezi statorovými permanentními magnety (17 mm) zůstala zachována. Komponenty válcová podložka a hřídel ložiska nebyly pro účely zkušebního měření zhotoveny z navrženého PVC-U (kapitola 5.5), ale z hliníku.

Axiální vychylování ložiska se provádělo za pomoci svěrky se závitovou tyčí. Pro odečítání velikosti vychýlení sloužil digitální úchylkoměr. Měření působící síly na rotor zajišťoval tenzometr s rozsahem do 50 kg, který komunikoval s PC pomocí programu LabVIEW. Fotografie měřícího pracoviště se nachází na Obr. 31.



Obr. 31: Pracoviště pro experimentální měření axiálního magnetického ložiska

Permanentní magnety použité při měření odpovídají permanentním magnetům navrženým v kapitole 5.1; tedy typu NdFeB N42 s rozměry mezikruží (vnější průměr x vnitřní průměr x šířka) 75x49x10 (mm) a s axiální magnetizací. Detail na uložení magnetů ve statoru a rotoru se nachází na Obr. 32.



Obr. 32: Detail na uložení permanentních magnetů ve statoru a rotoru ložiska (pozn.: směry šipek na fotografii neodpovídají směřům magnetizace magnetů, sloužily pouze k orientaci v době montáže ložiska)

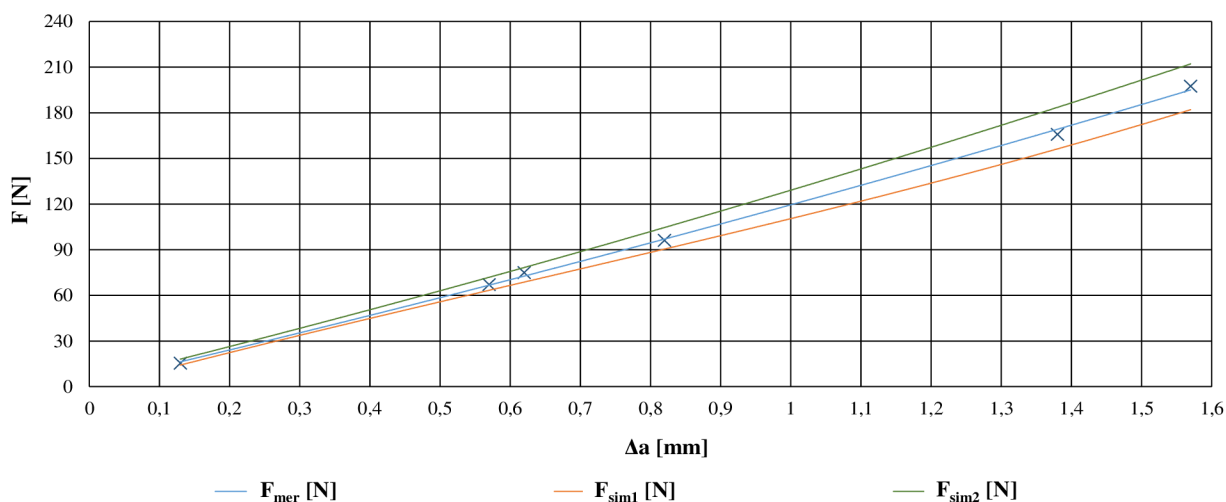
Tab. 5: Porovnání změřených a simulací vypočtených hodnot síly při vychylování axiálního pasivního ložiska

$\Delta a$ [mm]	$F_{mer}$ [N]	$F_{sim1}$ [N]	$\delta F_{mer,sim1}$ [%]	$F_{sim2}$ [N]	$\delta F_{mer,sim1}$ [%]
0,13	15,5	14,3	8,4	16,5	-6,1
0,57	67,1	62,8	6,8	73,3	-8,5
0,62	74,9	68,9	8,7	81,2	-7,8
0,82	96,2	90,9	5,8	104,1	-7,6
1,38	165,8	155,9	6,4	176,6	-6,1
1,59	197,4	182,2	8,3	217,0	-9,0

Pozn.:  
velikost síly  $F_{sim1}$  je simulována při  $B_r = 1,3$  T a  $H_c = 923$  kA·m<sup>-1</sup>  
velikost síly  $F_{sim2}$  je simulována při  $B_r = 1,35$  T a  $H_c = 1027$  kA·m<sup>-1</sup>

Pro možnost porovnání měřených výsledků axiálních sil ( $F_{mer}$ ) byly ve stejných bodech vychýlení provedeny axisymetrické simulace v programu ANSYS Maxwell. Při první simulaci axiální síly ( $F_{sim1}$ ) byl materiál permanentních magnetů definován pro hodnoty remanentní indukce a koercitivní síly dle výrobce Neomag, tedy souhlasně s kapitolou 5.1 ( $B_r = 1,3$  T,  $H_c = 923$  kA·m<sup>-1</sup>). Ve druhé simulaci axiální síly ( $F_{sim2}$ ) byly definovány hodnoty pro permanentní magnety NdFeB N42 dle katalogu firmy Arnoldmagnetics (Příloha 8). S tím rozdílem, že nebyly vybrány střední hodnoty, ale maximální hodnoty pro daný typ, tedy remanentní indukce  $B_r$  1,35 T

a koerčitivní síla  $H_c$   $1027 \text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$ . Změřené hodnoty sil spolu s hodnotami získanými ze simulací v závislosti na axiální výchylce jsou uvedeny v Tab. 5. Dále byla na základě zmíněné tabulky vytvořena grafická závislost (Obr. 33) pro změřené body a oba simulované průběhy. Křížky v grafu značí změřené body. Při výpočtu relativních odchylek byly za etalon považovány hodnoty získané z MKP. Simulace ve 3D rozložení nebyly prováděny, neboť již dříve bylo zjištěno, že axisymetrické rozložení poskytuje výsledky s dostatečnou přesností (kapitola 5.4).



Obr. 33: Změřený průběh axiální síly spolu s průběhy sil určenými simulacemi

Při porovnání sil měřených ( $F_{mer}$ ) a získaných simulací ( $F_{sim1}$ ,  $F_{sim2}$ ) je patrné, že maximální odchylka hodnot (viz Tab. 5) se pohybuje do 9,0 % a minimální odchylka je 5,8 %. Menší průměrná relativní odchylka výsledků (7,4 %) vychází při uvažování středních hodnot  $B_r$  a  $H_c$  z katalogu firmy Neomag. Průměrná relativní odchylka pro maximální hodnoty  $B_r$  a  $H_c$  dle firmy Arnoldmagnetics je -7,5 %. Odchylky výsledků mohly být zapříčiněny několika následujícími vlivy působícími v průběhu experimentálního měření:

- nekonstantní vzduchová mezera způsobená excentricitou rotoru ložiska,
- výrobní tolerance permanentních magnetů (remanentní indukce, koerčitivní síla),
- nedokonalé radiální usazení rotoru (nenulová radiální výchylka),
- chyba měření,
- chybně určená nulová (rovnovážná) axiální poloha rotoru ložiska,
- tření v radiálních pouzdrech ložiska a následné pnutí,
- možný ohyb statorových konzolí při vyvíjení axiální síly pro vychýlení rotoru ložiska.

Dosažená přesnost nulové axiální polohy rotoru zahrnující i excentricitu rotoru byla na základě měření mosaznými listovými spároměrkami stanovena na hodnotu 0,2 mm. Excentricita rotoru ložiska byla zapříčiněna výrobními nepřesnostmi válcové podložky rotorového permanentního magnetu.

Pro získání poznatku o vlivu výrobních nepřesností permanentních magnetů byla provedena citlivostní analýza. Ta je založena na různém rozmístění permanentních magnetů s dolními a horními popř. středními hodnotami remanentní indukce  $B_r$  a koerčitivní síly  $H_c$  udávané výrobcem. Zdrojem mezních a středních hodnot remanentní indukce a koerčitivní síly byl



katalogový list firmy Arnoldmagnetics (Příloha 8). V Tab. 6 jsou uvedeny výsledky simulace citlivostní analýzy. Velikosti axiálních sil v tabulce platí pro střední vychýlení rotoru ložiska 0,8 mm, kdy rotor ložiska byl vychýlen k „levému krajnímu PM“.

Tab. 6: Citlivostní analýza axiální síly ložiska na výrobních tolerancích permanentních magnetů

Krajní levý PM	Středový PM	Krajní pravý PM	$F$ [N]		Dolní mez	Střední hodnota	Horní mez
Horní mez	Horní mez	Dolní mez	155	$B_r$ [T]	1,35	1,315	1,28
Horní mez	Dolní mez	Dolní mez	129	$H_c$ [kA·m <sup>-1</sup> ]	1027	943	860
Horní mez	Horní mez	Horní mez	104				
Střední hodnota	Střední hodnota	Střední hodnota	92				
Dolní mez	Horní mez	Dolní mez	91				
Horní mez	Dolní mez	Horní mez	89				
Dolní mez	Dolní mez	Dolní mez	78				
Dolní mez	Horní mez	Horní mez	46				
Dolní mez	Dolní mez	Horní mez	40				

Rotor ložiska (středový PM) byl vychylován k levému krajnímu PM.

Uvedené velikosti axiálních sil jsou pro střední vychýlení ložiska z rovnovážné polohy tedy o 0,8 mm.

Z výsledků analýzy je patrné: pokud by nastalo nejnepríznivější uspořádání, je výsledná síla 2,3 krát menší než při průměrných hodnotách  $B_r$  a  $H_c$  všech tří magnetů. V opačném případě může být síla i větší, a to o 1,7 násobek oproti velikosti síly při průměrných hodnotách  $B_r$  a  $H_c$  všech tří magnetů. V praxi je velmi malá pravděpodobnost setkání dvou PM v navzájem mezních hodnotách. Tato skutečnost i při menších výrobních odchylkách má zcela určitě vliv na rovnovážnou polohu rotoru axiálního ložiska a zeslabení popřípadě zesílení odpudivé axiální síly na danou stranu ložiska. Magnetická rovnovážná poloha se vždy posouvá do pozice, kde platí, že výslednice sil na rotor ložiska je nulová.

## 5.7 Další možná konstrukční řešení pasivního magnetického ložiska

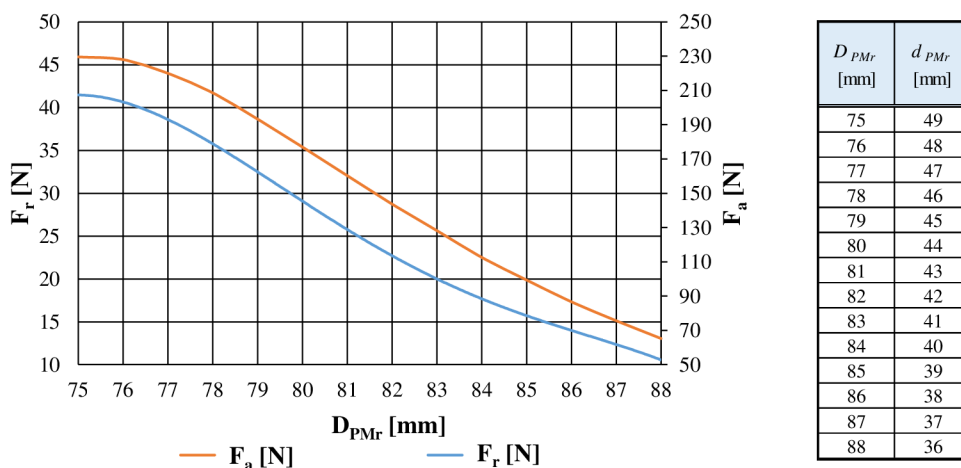
Navržené ložisko v předchozí kapitole splňuje požadavky na generovanou axiální sílu při daném vychýlení ložiska. V návaznosti na kapitulu 3.2, kde byl řešen také parazitní jev radiální síly pasivního magnetického ložiska, byla provedena další konstrukční řešení.

### 5.7.1 Změna vnitřního a vnějšího průměru permanentních magnetů

Příčinou vzniku velkých parazitních radiálních sil je shodný průměr všech tří magnetických mezikruží. První představené řešení je proto založeno na ponechání rozměrů krajních (statorových), popřípadě rozměrů prostředního (rotorového) permanentního magnetu. Hodnoty

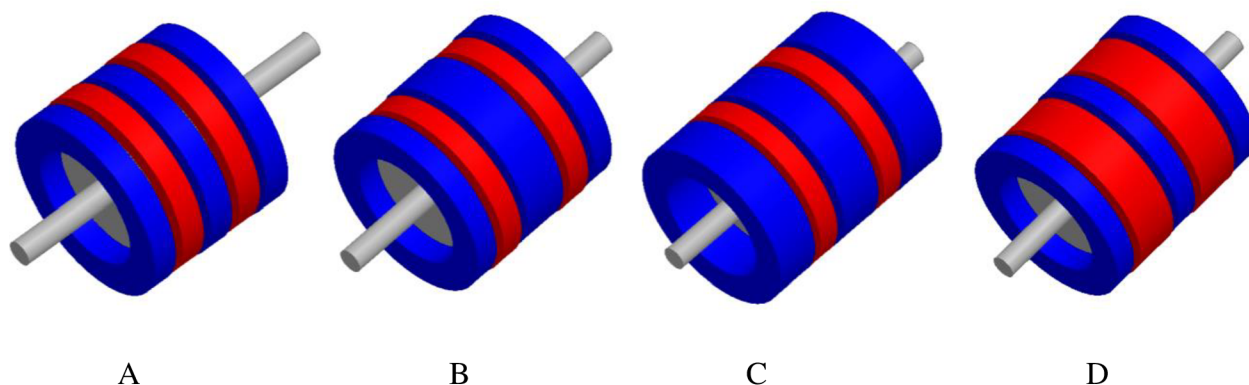


z programu Maxwell ukázaly, že nezáleží zda je zvětšován rozměr obou krajních magnetů, nebo pouze středového rotorového. Proto z případného ekonomického hlediska bude zvětšován pouze rotorový PM a statorové magnety budou mít již dříve navržený rozměr 75x49x10 (mm).



Obr. 34: Průběh radiální a axiální síly v závislosti na symetrické změně vnitřního a vnějšího průměru rotorového PM při radiálním vychýlení 0,6 mm a axiálním vychýlení 2 mm (na ose  $x$  je vynesena velikost vnějšího průměru rotorového PM, odpovídající vnitřní průměr uvádí tabulka v pravé části obrázku)

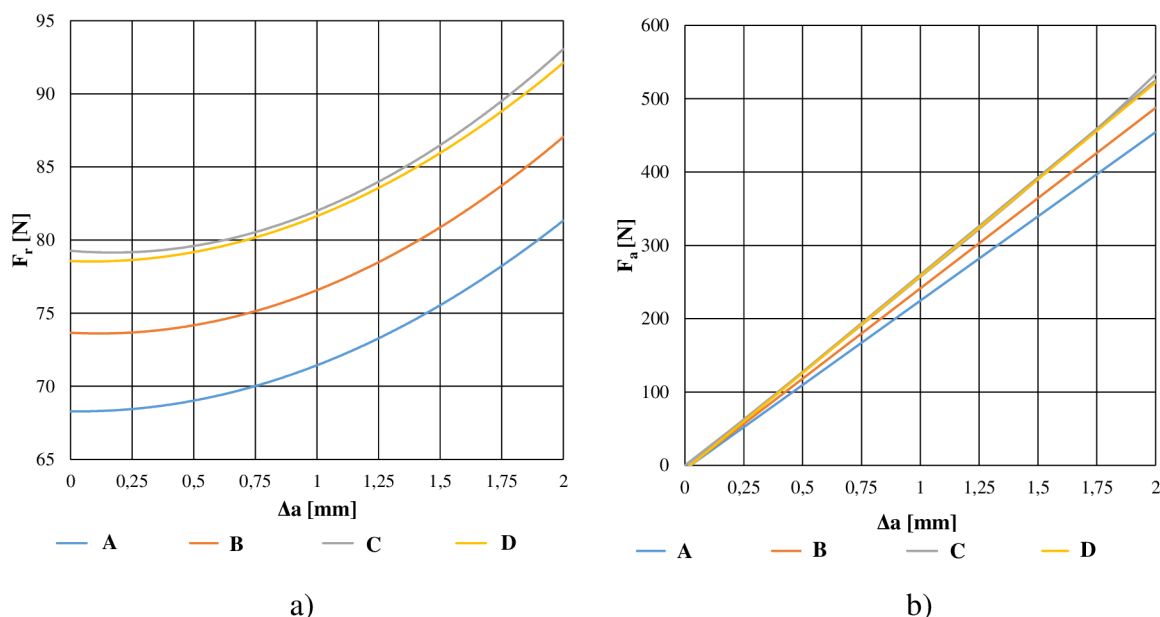
Na Obr. 34 je zobrazen průběh radiální a axiální síly v závislosti na změně průměrů rotorového permanentního magnetu při radiálním vychýlení o 0,6 mm a axiálním vychýlení ložiska 2 mm. Změna velikosti průměrů rotorového PM (vnitřního a vnějšího) probíhala symetricky, tj. vnitřní průměr byl při každém kroku zmenšen o shodnou velikost, o kterou byl naopak zvětšen vnější průměr (na ose  $x$  v Obr. 34 je vynesena velikost vnějšího průměru rotorového PM  $D_{PMr}$ , odpovídající vnitřní průměr  $d_{PMr}$  je uveden v tabulce nacházející se v pravé části obrázku). Z grafu je patrné, že radiální sílu se zvětšujícím rotorovým magnetem lze úspěšně snížit, ale na úkor výsledné potřebné axiální síly. Z toho lze odvodit, že největší axiální síly se dosáhne shodnými velikostmi rotorových a statorových magnetů. V daném konstrukčním řešení znamená každé snížení parazitní radiální síly o 3 N, pomocí zvětšení průměru rotoru o 1mm, pokles výsledné axiální síly přibližně o 15 N. Je třeba si povšimnout menšího sklonu obou křivek při malém rozdílu mezi statorovými a rotorovým PM.



Obr. 35: Uvažovaná uspořádání pasivního magnetického ložiska s pěti permanentními magnety

### 5.7.2 Axiální magnetické ložisko s pěti permanentními magnety

Další koncepce ložiska je založena na zvýšení celkového počtu permanentních magnetů. Konkrétně se jedná o použití pěti magnetů, kde tři jsou umístěny na statoru a dva zbývající na rotoru. Větší počet PM na statoru je z důvodu snazšího upevnění oproti hřídeli. Uvažovaná uspořádání ložiska jsou vyobrazena na Obr. 35. Permanentní magnety stejné barvy značí souhlasnou polarizaci a naopak. Současně magnety obarvené červeně jsou rotorové a modré jsou statorové. Představené varianty se liší pouze šířkou použitých PM, která je 10 mm nebo 20 mm, rozměry vnitřního průměru (49 mm) a vnějšího průměru mezikruží (75 mm) jsou vždy shodné.



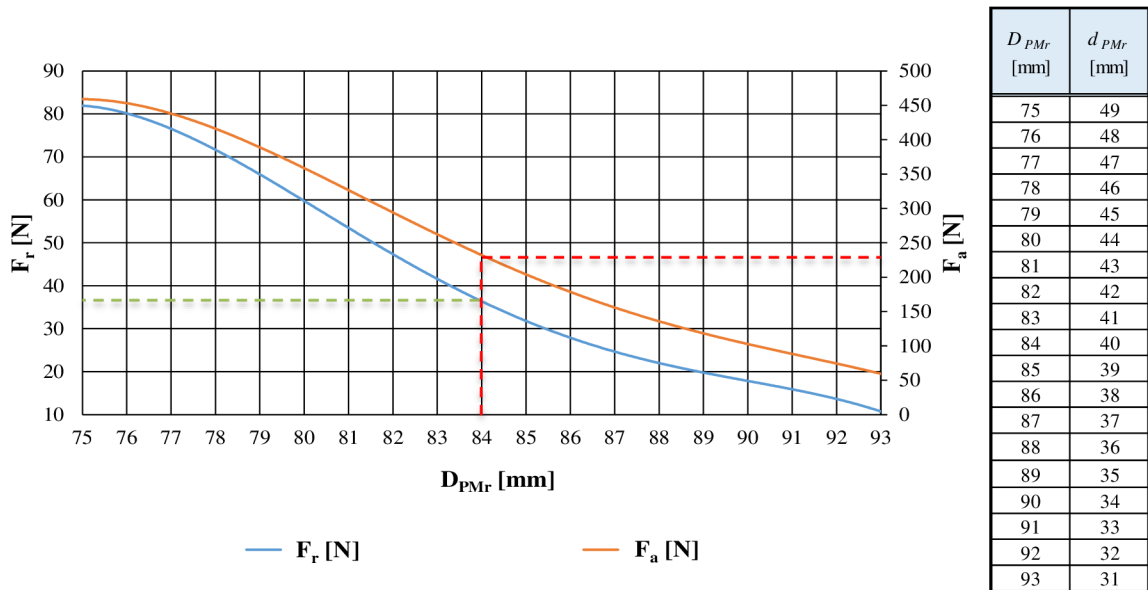
Obr. 36: Průběh a) radiální b) axiální síly v závislosti na axiálním vychýlení při radiálním vychýlení 0,6 mm pro čtyři varianty pasivního ložiska s pěti permanentními magnety

Všechny čtyři modely byly analyzovány na radiální a axiální sílu, viz. průběhy na Obr. 36. Označení jednotlivých ložisek v legendě grafů (A, B, C, D) odpovídá značení modelů v Obr. 35. Z výsledných průběhů je zřejmé, že nejnižší parazitní radiální síly dosahuje varianta A, ale disponuje také nejnižší axiální silou. Ložiska C a D nabývají téměř shodných průběhů a dosahují nejvyšších axiálních sil. Při srovnání průběhů A a B by se mohlo zdát, že s rostoucím počtem magnetů o větší šířce rostou úměrně i jednotlivé síly. To samé ovšem neplatí pro variantu C a D, které obsahují rozdílný počet PM o šířce 10 mm a 20 mm a výsledné síly jsou srovnatelné.

Zamýšlenou možností bylo také sériové zařazení dvou ložisek navržených v kapitole 5.1. Výsledné síly by musely být dvojnásobné. Po porovnání grafů na Obr. 34 a Obr. 36 je zřejmé, že stejného výsledku se dosáhne i představenou variantou s pěti permanentními magnety. Radiální síla navrženého ložiska v kapitole 5.1 dosahuje hodnoty 41 N a axiální síly 230 N při axiálním vychýlení 2 mm. Varianta A v kapitole 5.7.2 při stejném vychýlení dosahuje přibližně radiální síly 82 N a axiální síly 450 N.

Dosažené axiální síly jsou dostatečné, proto by bylo možné odstranit parazitní radiální sílu již dříve popsaným způsobem (zvětšováním PM rotoru). Pro tuto analýzu byla vybrána za vhodnou varianta A. Na Obr. 37 je výsledný graf působících sil. Na ose x v Obr. 37 je vynesena velikost

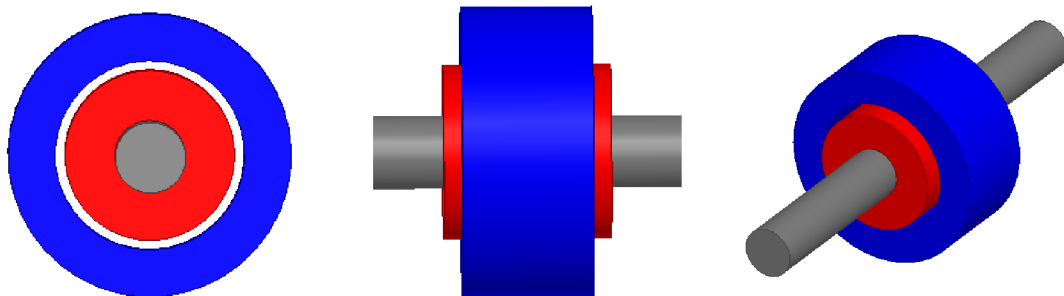
vnějšího průměru rotorového PM  $D_{PMr}$ , odpovídající vnitřní průměr  $d_{PMr}$  je uveden v tabulce, nacházející se v pravé části obrázku. Odečtem hodnot z grafické závislosti tak, aby axiální síla odpovídala přibližně 230 N při vychýlení 2 mm. Bylo zjištěno, že při rozměrech rotorových PM 84x40x10 (mm) je výsledná radiální síla 36 N (odečet hodnot je v grafu vyznačen čarami). Tento typ uspořádání je tedy schopen uspořit 5 N radiální síly při zachování původních hodnot síly axiální. Je diskutabilní, zda se tato úspora ekonomicky vyplatí.



Obr. 37: Průběh radiální a axiální síly ložiska s pěti PM (varianta A) v závislosti na změně vnitřních a vnějších průměrů rotorů (na ose  $x$  je vynesena velikost vnějšího průměru rotorového PM, odpovídající vnitřní průměr uvádí tabulka v pravé části obrázku)

### 5.7.3 Pasivní radiální magnetické ložisko

Dalším návrhem bylo za pomoci pasivního radiálního ložiska „odlehčit“ aktivnímu radiálnímu ložisku. Základem ložiska jsou dva soustředné válce, které jsou radiálně polarizovány kolmo k povrchu. Nákres radiálního pasivního ložiska se nachází na Obr. 38. Analyzováním hodnot z programu ANSYS Maxwell v programu Microsoft Excel bylo zjištěno, že odlehčení 1 N aktivnímu radiálnímu ložisku by znamenalo zatížení 3 N axiálního ložiska. Z tohoto důvodu byla tato koncepce řešení zavržena.



Obr. 38: Model radiálního pasivního magnetického ložiska

## 6 NÁVRH AKTIVNÍHO MAGNETICKÉHO LOŽISKA

Stabilita pěti stupňů volnosti hřídele čerpadla je zajištěna prostřednictvím dvojice radiálních magnetických ložisek spolu s navrženým axiálním magnetickým ložiskem z kapitoly 5. Obě radiální ložiska se uvažují totožná.

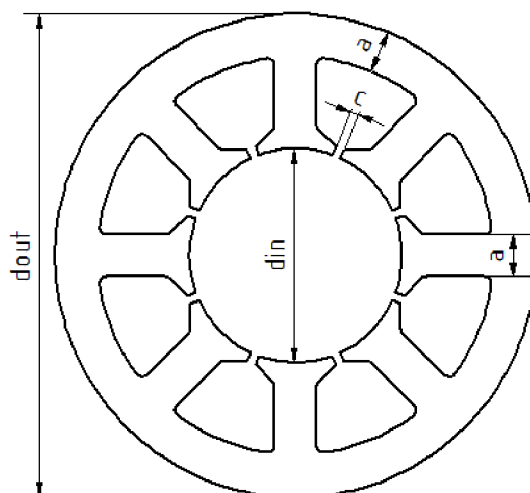
Při konstrukci ložiska se vycházelo z předem daného oběžného kola s hřídelí. Čerpadlo je odstředivého typu (viz kapitola 3 – výpočet sil) a sání je provedeno skrze hřídel, která je proto dutá. Zadané parametry průměru hřídele  $d_{rotor}$ , tloušťky stěny duté hřídele  $t_{rotor}$  a vzduchové mezery mezi rotorem a statorom ložiska  $\delta$  slouží jako výchozí hodnoty pro návrh aktivního magnetického ložiska a jsou uvedeny v Tab. 7. Velikost vzduchové mezery vychází z požadavků funkčnosti těsnícího labyrintu, který je tvořen osmi příčnými spárami kruhového průřezu s poloměrem 1,5 mm a brání průniku čerpaného média. Nákres labyrintu se nachází v příloze 2. Pak celková délka paketu ložiska  $l_{Fe,lab}$  bude rovna aktivní délce ložiska  $l_{Fe}$  navýšené o 24 mm. Pro kompletní návrh a konstrukční úpravy byl použit simulační program ANSYS Maxwell.

Tab. 7: Výchozí hodnoty pro návrh magnetického ložiska

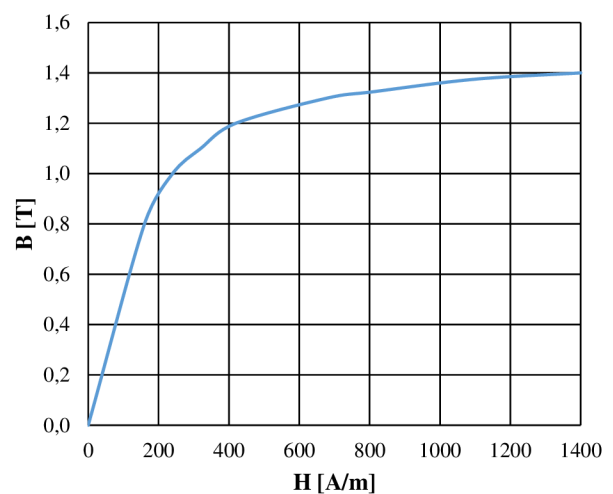
$d_{rotor}$ [mm]	$t_{rotor}$ [mm]	$\delta$ [mm]
74	4	0,6

### 6.1 Návrh magnetického obvodu statoru

Rozměry jednotlivých částí magnetického obvodu (statorového plechu) byly voleny dle doporučených poměrů uvedených v literatuře [26]: vnější průměr statoru  $d_{out}$  má být o něco větší než dvojnásobek vnitřního průměru statoru  $d_{in}$ ; šířka pólu  $a$  má odpovídat poloviční pólové rozteči  $\tau_{p,1/2}$ ; šířka jha statoru má být shodná s rozměrem pólu  $a$ . Obr. 39 a) zobrazuje statorový plech s vyznačenými parametry.



a)



b)

Obr. 39: a) Náčrtek statorového plechu b) B-H křivka dynamo plechu M22-26G



Materiálem pro magnetický obvod ložiska byl dynamový plech M22-26G, jeho B-H křivka je vyznačena na Obr. 39 b). Materiál rotoru nebyl přesně znám, proto byla za účelem simulací vybrána konstrukční ocel 1010. B-H charakteristika oceli 1010 je uvedena v příloze 7. Vypočtená potřebná radiální síla v kapitole 3 je 240 N. Tato hodnota odpovídá statickému zatížení ložiska. Pro vykompenzování dynamických účinků, které během provozu mohou nastat je nutné podle literatury [26] dimenzovat ložisko na dvojnásobek statického zatížení, tedy na hodnotu okolo 480 N. Radiální stabilita bude udržována dvěma shodnými ložisky spojenými hřídelí, jestliže jsou všechna zatížení uvažována na spojnicí obou ložisek, působí pak na každé poloviční síla tedy 240 N. Dále je nutné uvažovat, že zmíněný dynamický přechodový jev může nastat při maximálním radiálním vychýlení ložiska o 0,6 mm.

V programu Maxwell při vytváření statorového plechu byla na záložce „Draw“ využita funkce „User defined primitive“, kde je možné zvolit předdefinované modely statorů, rotorů a vinutí z modulu RMXprt. U těchto předloh je možné v prostředí Maxwell libovolně měnit rozměry. Požadavkům pro tvar statorového plechu, který je vhodný pro aktivní magnetická ložiska dle doporučení v literatuře [27] vyhověl model „Salient pole core“. Jedná se o statorový plech obsahující vyniklé póly viz Obr. 39 a).

$$d_{in} = d_{rotor} + 2 \cdot \delta \quad (6.1)$$

$$a = \tau_{p,1/2} = \frac{\pi \cdot d_{in}}{4 \cdot p} \quad (6.2)$$

Pro předběžný návrh se vycházelo z daných parametrů v Tab. 7 a doporučených poměrných rozměrů uvedených na začátku této kapitoly. Zvolené předběžné rozměry vnějšího průměru  $d_{out}$ , mezery mezi pólovými nástavci  $c$  a délka paketu  $l_{Fe}$  jsou spolu s vypočtenými parametry dále zmíněnými v tomto odstavci uvedeny v Tab. 8. Délkou paketu je možné upravit výslednou působící sílu, z tohoto důvodu byla délka předběžně stanovena na hodnotu 50 mm. Rozměry vnitřního průměru  $d_{in}$ , šířky pólu (současně šířka jha)  $a$  byly vypočteny na základě rovnic (6.1) a (6.2), kde  $p$  je počet pólových dvojic (v daném případě je  $p$  rovno čtyřem). Pro vyvolání co možná největší přitažlivé síly na rotor je nutné, aby účinná plocha pólového nástavce byla co největší (nejmenší rozměr  $c$ ). Velikost  $c$  musí být dostatečná, aby bylo jednak umožněno navinutí cívek na jednotlivé póly statoru a současně nedocházelo v tomto místě k uzavírání magnetického toku mezi sousedními pólovými nástavci, a tím nenastalo snížení výsledné přitažlivé síly.

Tab. 8: Rozměry statorového paketu

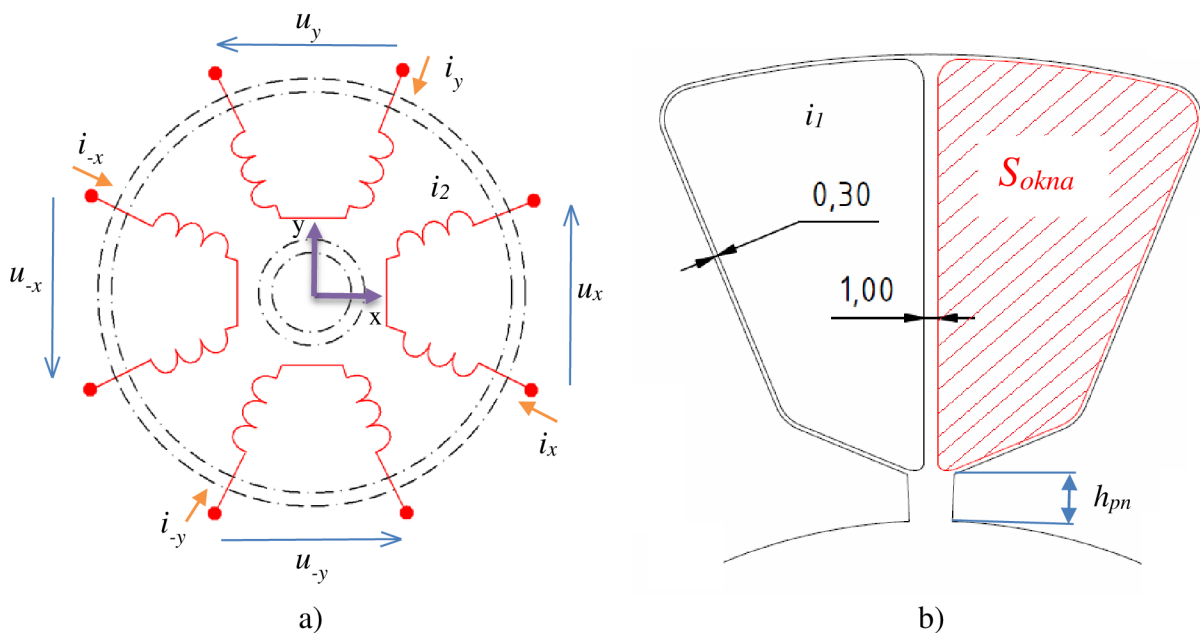
$d_{in}$ [mm]	$d_{out}$ [mm]	$a$ [mm]	$c$ [mm]	$l_{Fe}$ [mm]
75,2	170	15	3	70 (50)
Pozn.: Hodnoty mimo závorky platí pro výsledný návrh				

## 6.2 Návrh vinutí statoru

Navrhované ložisko je tvořeno čtyřmi elektromagnety, které vytváří čtyři nezávislé elektrické obvody. Dané magnetické ložisko obsahuje osm pólů a každý z těchto pólů je opatřen cívkou. Jeden

elektromagnet je tvořen dvojicí cívek zapojených sériově. Schématické zapojení jednotlivých elektromagnetů je naznačeno na Obr. 40 a).

Pro návrh vinutí je nutné určit maximální proud vinutím  $I_{max}$  a současně příslušný průměr vodiče  $d_{cu}$  tak, aby nebyla překročena maximální proudová hustota  $\sigma_{max}$ . Podle průměru vodiče určit počet závitů cívky  $N$ . Požadavkem pro vytvoření maximální přitažné síly je generace co největšího možného magnetického napětí  $F_m$ , tj. aby součin proudu a počtu závitů byl co možná největší.



Obr. 40: a) Schéma zapojení cívek v AML b) detail statorové drážky s izolací

V drážkách statoru spolu s vinutím je uložena drážková izolace o tloušťce 0,3 mm. Izolační vzdálenost mezi sousedními cívkami v jedné drážce je 1 mm. Obr. 40 b) zobrazuje detail statorové drážky s vyznačenými rozměry izolací. Tato skutečnost způsobí zmenšení výsledného prostoru pro uložení vinutí.

$$S_{cu} = S_{okna} \cdot k_{pcu} \quad (6.3)$$

Program Maxwell vypočetl plochu okna  $S_{okna}$  na hodnotu  $366 \text{ mm}^2$ . V praxi není možné celý prostor ideálně zcela vyplnit vodiči, proto je zaveden tzv. činitel plnění mědi  $k_{pcu}$ . Pro činitel plnění mědi byla zvolena hodnota 0,7. Pak plocha pro uložení vodičů  $S_{cu}$  je dle vztahu (6.3)  $256 \text{ mm}^2$ .

$$N = \frac{S_{cu}}{m \cdot (d_{cu,izolace})^2} \quad (6.4)$$

Dále pro výpočet počtu závitů  $N$  je zapotřebí uvažovat plochu čtverce opisující daný průřez vodiče s tím, že průměr vodiče je brán i s přírůstkem izolace  $d_{cu,izolace}$ . Symbolem  $m$  je ve vzorci (6.4) značen počet vodičů tvořící jeden závit. Rozměry vodičů s izolacemi byly převzaty ze zdroje [28].

$$F_m = N \cdot I \quad (6.5)$$

$$I_{max} = \sigma_{max} \cdot m \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{cu}}{2}\right)^2 \quad (6.6)$$

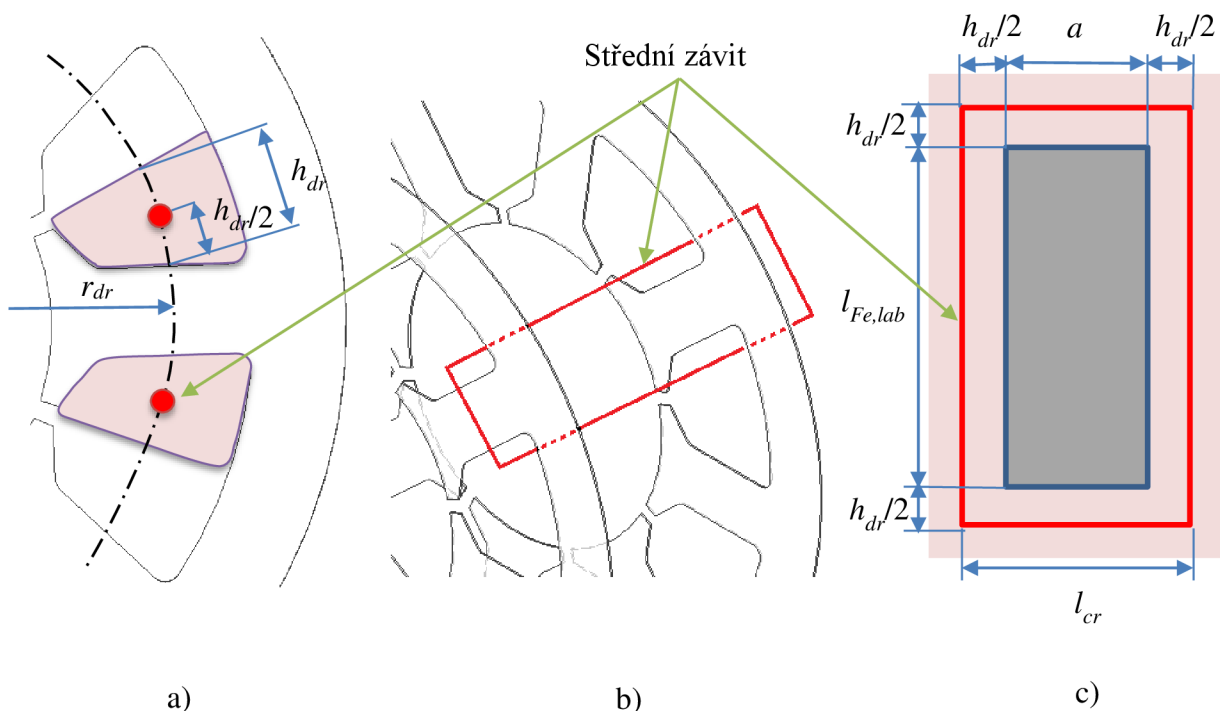
Maximální proud vodičem  $I_{max}$  je omezen maximální dovolenou proudovou hustotou  $\sigma_{max}$  dle vzorce (6.6), kde  $m$  značí počet vodičů tvořící jeden závit. S ohledem na zamezení přehřívání ložiska byla stanovena maximální proudová hustota na hodnotu  $\sigma_{max} 3 \text{ A/mm}^2$ .

Pro vinutí cívek bylo uvažováno několik možných průřezů, viz Tab. 9. Horní mezní hodnotou byl stanoven průměr vodiče 1 mm, a to s ohledem na dostatečný ohyb okolo pólových nástavců při navijení statoru. Magnetické napětí  $F_m$  uvedené v tabulce je vypočtené dle vztahu (6.5).

Tab. 9: Uvažované průřezy vodičů pro AML

m [-]	$d_{cu}$ [mm]	$d_{cu+izolace}$ [mm]	N [-]	$I_{max}$ [A]	$F_m$ [A]
2	0,6	0,674	281	1,70	476,7
3	0,6	0,674	187	2,54	475,9
2	1	1,094	106	4,71	499,5
1	1	1,094	213	2,36	501,9

Za vhodné bylo přijato navinout cívky pro AML vodičem o průměru 1 mm s jedním vodičem na závit. Každá cívka bude obsahovat 213 závitů a maximální dovolený proud bude 2,36 A.



Obr. 41: Doprovodné nákresy pro výpočet střední délky závitu



Napájení aktivního magnetického ložiska bude uskutečněno zdrojem proudu, který bude řízen pulzně šířkovou modulací. Proto je nutné znát potřebné maximální napětí, při kterém vinutím prochází maximální dovolená velikost proudu  $I_{max}$ . Vlivem činnosti ložiska dojde k oteplení vinutí vůči okolnímu prostředí. Za počáteční teplotou je uvažováno  $20^{\circ}\text{C}$ . Ustálená teplota je předpokládána  $80^{\circ}\text{C}$ . Odvod tepla je uvažován prostřednictvím čerpaného média procházejícího skrze dutý rotor ložiska.

$$r_{dr} = \frac{d_{in} + 2 \cdot h_{pn} + d_{out} - 2 \cdot a}{4} \quad (6.7)$$

$$l_{cr} = h_{dr} + a \quad (6.8)$$

$$l_{vodič, stř} = 2 \cdot l_{Fe, lab} + 2 \cdot l_{cr} + 4 \cdot \frac{h_{dr}}{2} \quad (6.9)$$

Pro velikost napájecího napětí je zapotřebí určit odpor vinutí. Zdroj [30] uvádí hodnotu měrného odporu mědi při  $20^{\circ}\text{C}$   $\rho_{cu, 20}$   $17,5 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}$ . Odpor vodiče o délce  $l_{vodič}$  a průřezu  $S_{vodič}$  při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$  je dán vztahem (6.12). Průřez vodiče  $S_{vodič}$  je určen z průměru vodiče  $d_{cu}$  vzorcem (6.11). Délka vodiče  $l_{vodič}$  bude určena na základě vztahu (6.10), kde  $l_{vodič, stř}$  je střední délka vodiče na závit a  $N$  je počet závitů na jedné cívce. Vztah (6.10) je násoben dvěma, z důvodu sériového zapojení dvou cívek každého elektromagnetu (viz Obr. 40 a)).

Tab. 10: Vybrané rozměry modelu ložiska pro výpočet střední délky závitu spolu s vypočtenými hodnotami dle rovnic (6.7), (6.8) a (6.9)

$d_{in}$ [mm]	$d_{out}$ [mm]	$a$ [mm]	$r_{dr}$ [mm]	$h_{pn}$ [mm]	$l_{Fe, lab}$ [mm]	$h_{dr}$ [mm]	$l_{cr}$ [mm]	$l_{vodič, stř}$ [mm]
75,2	170	15	55,3	3	94	14	29	274

$$l_{vodič} = 2 \cdot l_{vodič, stř} \cdot N \quad (6.10)$$

$$S_{vodič} = \pi \cdot \left(\frac{d_{cu}}{2}\right)^2 \quad (6.11)$$

$$R_{vodič, 20} = \rho_{cu, 20} \cdot \frac{l_{vodič}}{S_{vodič}} \quad (6.12)$$

Střední délka závitu  $l_{vodič, stř}$  se skládá dle rovnice (6.9) ze součtu dvojnásobku celkové délky paketu ložiska  $l_{Fe, lab}$ , dvojnásobku osové vzdálenosti středů vinutí  $l_{cr}$  a čtyřnásobku poloviny průměrné šířky cívky v drážce  $h_{dr}$ . Hodnota  $h_{dr}$  byla určena implementovanou funkcí měřením v programu Inventor jako šířka cívky při poloměru  $r_{dr}$  od osy otáčení rotoru. Parametr  $r_{dr}$  byl vypočten dle rovnice (6.7), kde  $d_{in}$  je vnitřní průměr statorového plechu,  $d_{out}$  je vnější průměr statorového plechu,  $a$  je šířka jha (pólu) a  $h_{pn}$  je výška pólového nástavce nejužším místě (viz. Obr. 40 b)). Osová vzdálenost středů vinutí  $l_{cr}$  je vyjádřena vztahem (6.8). Na Obr. 41 jsou vyznačeny zmíněné parametry vztahující se k výpočtu střední délky jednoho závitu cívky. Změřené rozměry na modelu ložiska potřebné pro výpočet střední délky závitu spolu s vypočtenými hodnotami dle rovnic (6.7), (6.8) a (6.9) se nachází v Tab. 10.





$$R_{vodič,80} = \alpha_{cu} \cdot [1 + \alpha_{cu} \cdot (t_2 - 20)] \quad (6.13)$$

Dále je třeba zohlednit lineární růst odporu s teplotou při oteplení ložiska během provozu. Maximální uvažovaná ustálená teplota je 80°C. Teplotní součinitel odporu mědi  $\alpha_{cu}$  má hodnotu jak uvádí zdroj [30] 0,0068 K<sup>-1</sup>. Výsledný odpor při oteplení je dán rovnicí (6.13). Kde  $t_2$  je teplota při níž je daný odpor zjišťován,  $R_{vodič,20}$  je odpor vodiče při 20°C.

$$U_{zdroje} = R_{vodič,80} \cdot I_{max} \quad (6.14)$$

$$P_z = R_{vodič,80} \cdot I_{max}^2 \quad (6.15)$$

Potřebné napájecí napětí se určí dle Ohmova zákona (vztah (6.14)), kde  $R_{vodič,80}$  je odpor vodiče při 80°C a  $I_{max}$  je maximální dovolený procházející proud. Ztráty ve vinutí se stanoví z rovnice (6.15). Hodnoty vypočtené pomocí rovnic (6.10), (6.11), (6.12), (6.13), (6.14) a (6.15) pro navrhované ložisko jsou uvedeny v Tab. 11. Vstupními údaji o vodiči byl zeleně označený řádek v Tab. 9. (pozn.: veškeré výpočty v Tab. 11 platí pro konečný návrh celkové délky ložiska 94 mm viz kapitola 6.3)

Tab. 11: Parametry vinutí vypočtené dle rovnic (6.10), (6.11), (6.12), (6.13), (6.14) a (6.15).

$l_{vodič}$ [m]	$R_{vodič,20}$ [Ω]	$R_{vodič,80}$ [Ω]	$U_{zdroje}$ [V]	$P_z$ [W]
117	2,61	3,67	9	20

### 6.3 Simulace a úprava ložiska v programu ANSYS Maxwell

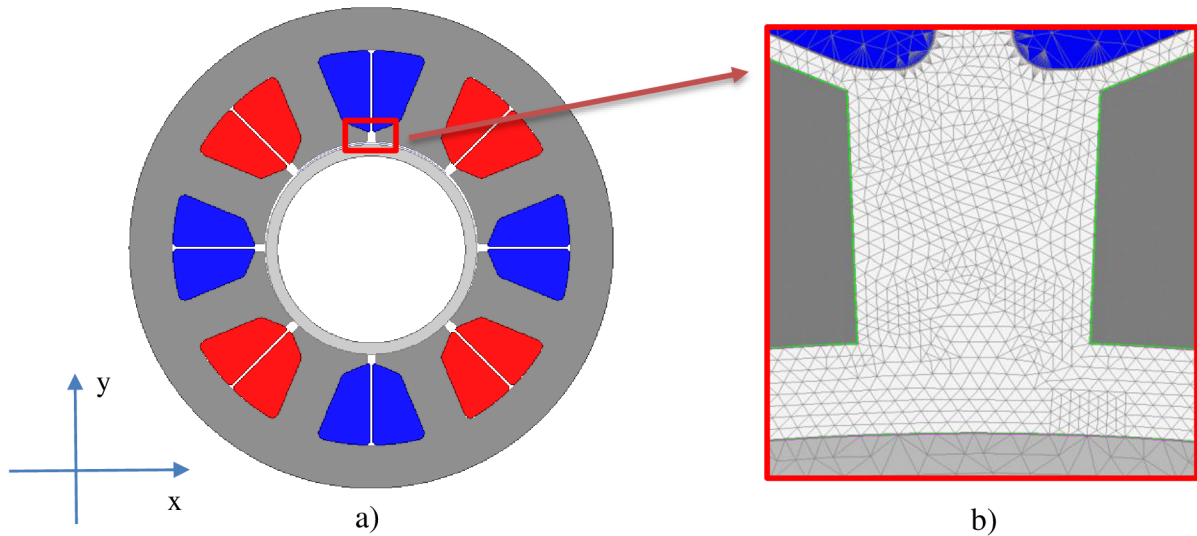
Vstupními hodnotami pro program ANSYS Maxwell byla Tab. 8 a poslední řádek (vyznačený zeleně) z Tab. 9. Veškeré simulace probíhaly ve dvojrozměrném rozložení s kartézskými souřadnicemi. Pro možnost nastavení hloubky modelu (model depth) byl zvolen řešič „transient“ v nabídce „solution type“, kterou je možno nalézt na záložce „Maxwell 2D“.

Tab. 12: Maximální rozměry buněk výpočetní sítě pro simulaci AML

statorový plech	rotor	vinutí	vzduchová mezeře	okolní prostředí	vnitřní prostor rotoru
2	1	1	0,25	20	5
Pozn.: Rozměry jsou udány v milimetrech					

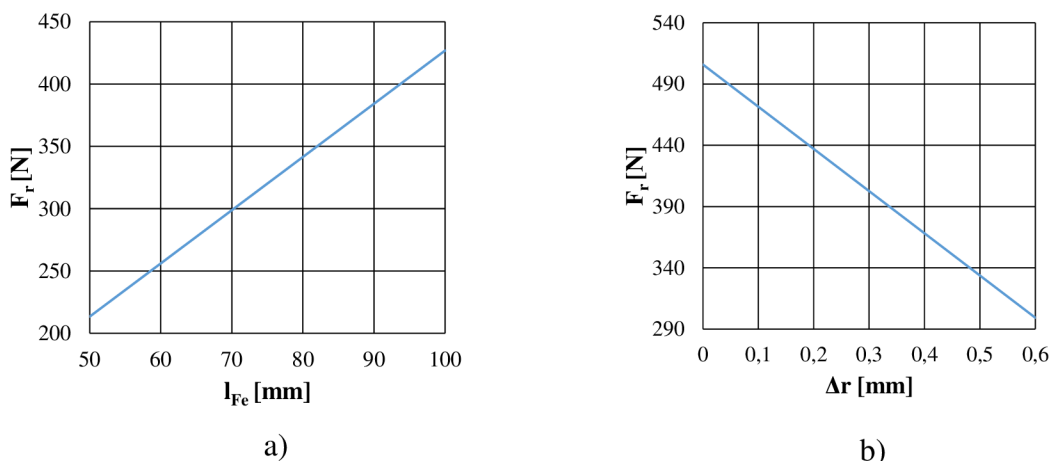
Nastavení maximálních velikostí prvků výpočetní sítě jsou uvedena v Tab. 12. Výpočetní síť ve vzduchové mezeře se volila, tak aby při vychýleném rotoru o 0,59 mm vzniklo mezi rotorem a státorem alespoň 8 prvků. Vykreslená síť ve vzduchové mezeře spolu s dvojrozměrným modelem aktivního magnetického ložiska se nachází na Obr. 42, kde jsou barvami (červená a modrá) odlišeny směry proudů ve vinutí. Směr proudu „vycházejícího“ z ložiska je značen červeně a naopak modrá značí proud tekoucí směrem do ložiska. Program ANSYS Maxwell neumožnil provádět simulaci při plném vychýlení rotoru 0,6 mm, proto veškeré analýzy při maximálním radiálním vychýlení byly nastaveny na vychýlení rotoru 0,59 mm a chybějící data byla popřípadě

aproximována. Příčinou nefunkčnosti simulace při vychýlení 0,6 mm je nulová délka vzduchové mezery na straně, ke které byl rotor vychýlen.



Obr. 42: a) 2D model ložiska pro MKP b) detail výpočetní sítě vzduchové mezery pro MKP při vychýleném rotoru o 0,59 mm

Pomocí implementované funkce „move“ v programu Maxwell byl rotor ložiska radiálně vychýlen z rovnovážné polohy o 0,59 mm ve směru záporné osy y (značení os odpovídá Obr. 42). Pro získání informace o velikosti přitažlivé síly ložiska při mezním vychýlení bylo v simulaci definováno pouze vinutí ve směru kladné osy y. Veškeré následující simulace a analýzy probíhaly při zadaném maximálním dovoleném proudu  $I_{max}$ .

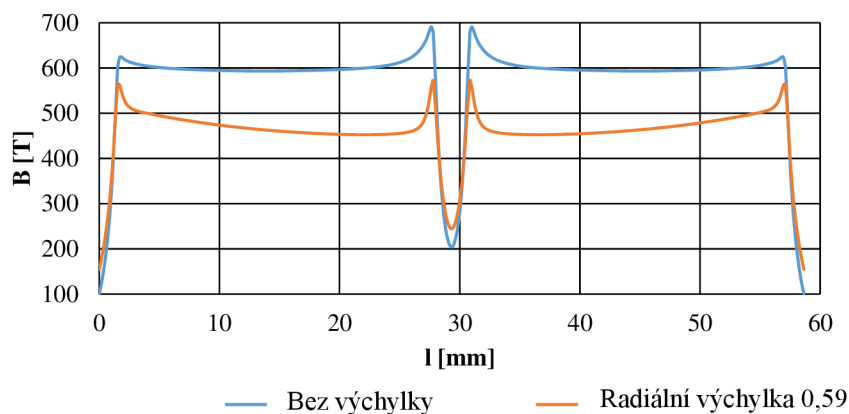


Obr. 43: a) Závislost přitažlivé síly na délce železa při maximálním radiálním vychýlení ložiska b) Závislost přitažlivé síly na radiálním vychýlení pro délku železa 70 mm

Simulací vyčíslená síla přitahující rotor při radiálním vychýlení 0,59 mm byla 213 N. Požadavkem pro vhodné dimenzování ložiska je 240 N. Jak již bylo dříve uvedeno, zvětšení přitažlivé síly je možno dosáhnout změnou délky aktivní části ložiska  $l_{Fe}$ . Pro nalezení správné délky ložiska byl využit modul Optimetrics. Vytvořená grafická závislost přitažlivé síly na délce paketu je zobrazena na Obr. 43 a). Zvolený nový rozměr  $l_{Fe}$  je 70 mm a výsledná přitažlivá síla při

radiálním vychýlení o 0,59 mm je 299 N. Zvolená větší délka paketu zohledňuje plnění železa  $k_{pFe}$  s hodnotou 0,82.

Dále bylo provedeno porovnání průběhu magnetické indukce uprostřed vzduchové mezery při rovnovážném stavu a vychýlené poloze rotoru o 0,59 mm (viz Obr. 44). Při vychýlení klesne magnetická indukce ve středu vzduchové mezery pod pólovým nástavcem průměrně o 130 mT.



Obr. 44: Průběh magnetické indukce uprostřed vzduchové mezery pod jednou pólovou dvojicí AML v rovnovážném stavu a při radiálním vychýlení o 0,59 mm

$$F_{r,vyp} = \frac{B_{\delta}^2}{\mu_0} \cdot S_{Fe} \quad (6.16)$$

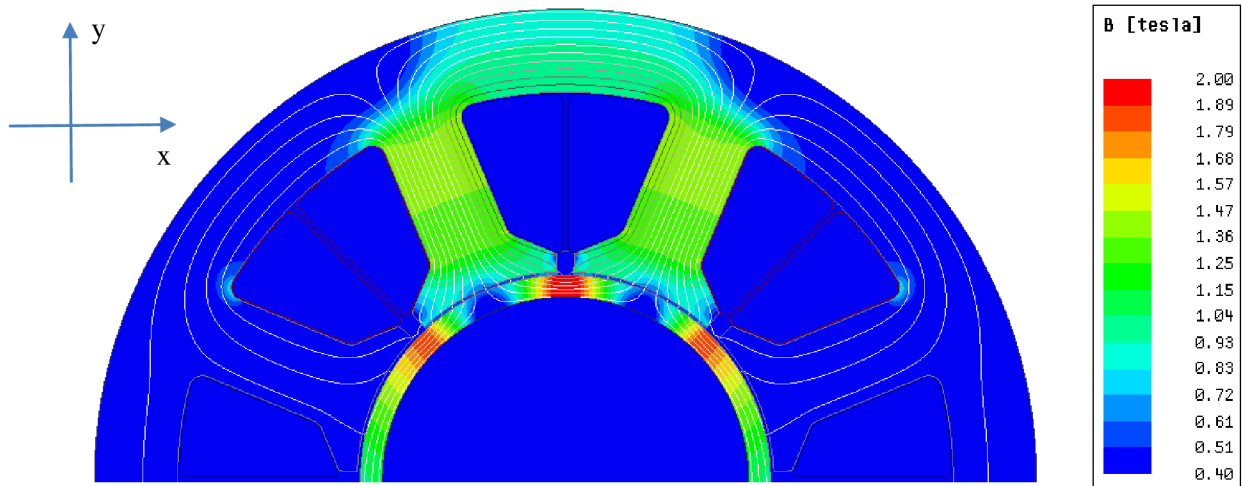
V literatuře [26] je odvozen vztah (6.16), pomocí kterého je možné analyticky určit přitažlivou sílu ložiska při nevychýleném rotoru. Kde  $B_{\delta}$  je střední hodnota indukce ve středu vzduchové mezery pod pólovým nástavcem,  $S_{Fe}$  je průřez jednoho pólového nástavce statoru a  $\mu_0$  je permeabilita vakua. Pomocí implementovaného měření plochy v programu Maxwell bylo určeno  $S_{Fe}$ . Velikost  $B_{\delta}$  byla určena z průběhu na Obr. 44 prostřednictvím programu Microsoft Excel. Výsledná vypočtená přitažlivá síla při nulové radiální vychylce  $F_{r,vyp}$  je 520 N. Odchyłka analytického výpočtu od MKP  $\delta F_{r,vs}$  je 3,4 %, ta může být způsobena rozptylovými toky nebo nelinearitou feromagnetických materiálů. Shrnutí hodnot pro určení přitažlivé síly dle vzorce (6.16) společně s výsledkem je uvedeno v Tab. 13.

Tab. 13: Shrnutí hodnot analytického výpočtu přitažlivé síly ložiska

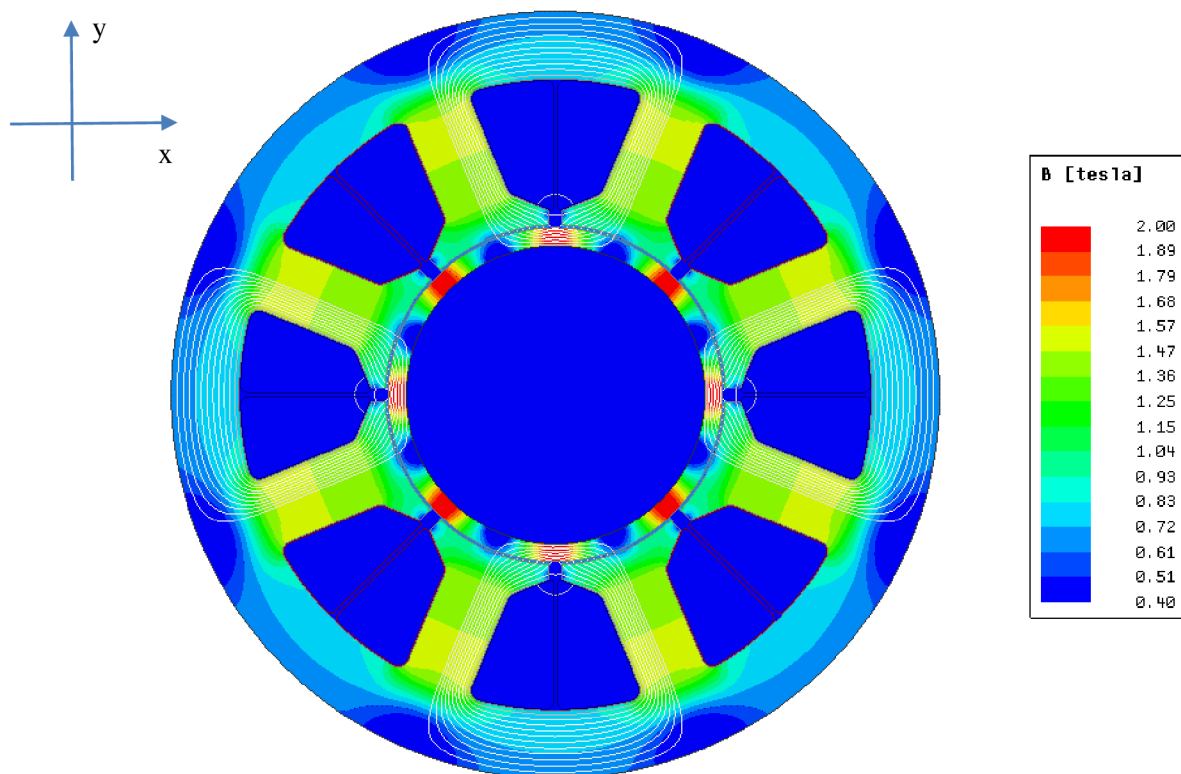
$B_{\delta}$ [T]	$S_{Fe}$ [mm <sup>2</sup> ]	$F_{r,vyp}$ [N]	$F_{r,sim}$ [N]	$\delta F_{r,vs}$ [%]
0,601	1810	520	503	3,4

Na Obr. 45 je zachyceno rozložení magnetické indukce a siločar elektromagnetu ve směru kladné osy y. Vinutí při této simulaci bylo napájeno maximálním dovoleným proudem  $I_{max}$  a rotor nebyl vychýlen. Z analýzy je patrné, že magnetický obvod rotoru ložiska je přesycen. Část magnetického toku prochází i přes pólové nástavce, kde není žádný zdroj magnetického napětí, to způsobuje přesycování rotoru i v místech přechodu mezi nenapájeným a napájeným pólovým

nástavcem. Pro omezení přesycení rotoru by bylo zapotřebí upravit tloušťku pláště hřídele, která je však pro návrh výchozí a nelze ji změnit. Dále bylo definováno vinutí všech 4 elektromagnetů, výsledné rozložení magnetické indukce a siločar je zachyceno na Obr. 46



Obr. 45: Rozložení magnetické indukce a siločar v ložisku při maximálním dovoleném proudu (napájen pouze elektromagnet ve směru kladné osy y, bez radiálního vychýlení)



Obr. 46: Rozložení magnetické indukce a siločar v ložisku při maximálním dovoleném proudu (při napájení všech elektromagnetů, bez radiálního vychýlení)

## 6.4 Semi-analytické určení magnetické indukce ve vzduchové mezeře

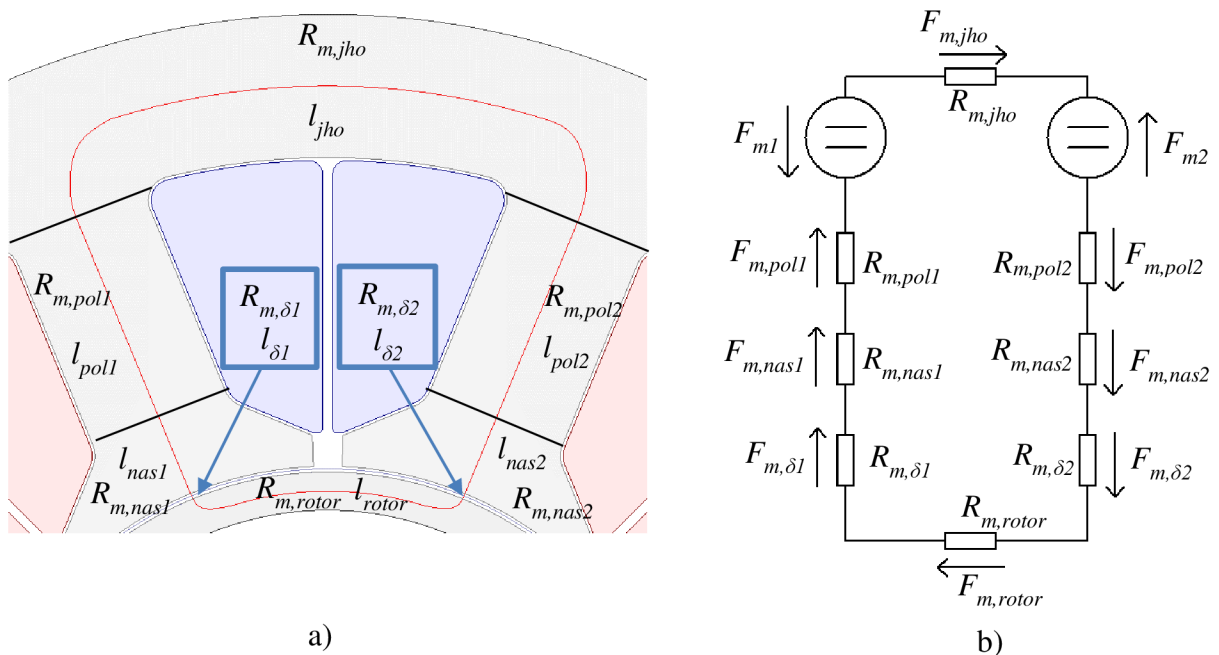
Semi-analytický výpočet je založený na analogii magnetického obvodu s elektrickým obvodem. Zdrojem magnetického napětí  $F_m$  jsou cívky, jimiž prochází proud. Obdobně jako vodič klade odpor procházejícímu proudu, tak prostředí klade odpor magnetickému toku. To způsobí úbytek magnetického napětí na daném prostředí. Při analytickém řešení magnetických obvodů se využívá tzv. střední siločáry, která je znázorněna na Obr. 47 a).

$$F_{m1} + F_{m2} = F_{m,pol1} + F_{m,pol2} + F_{m,nas1} + F_{m,nas2} + F_{m,\delta1} + F_{m,\delta2} + F_{m,rotor} + F_{m,jho} \quad (6.17)$$

$$2 \cdot F_m = 2 \cdot F_{m,pol} + 2 \cdot F_{m,nas} + 2 \cdot F_{m,\delta} + F_{m,rotor} + F_{m,jho} \quad (6.18)$$

$$2 \cdot N \cdot I = 2 \cdot H_{pol} \cdot l_{pol} + 2 \cdot H_{nas} \cdot l_{nas} + H_{rotor} \cdot l_{rotor} + H_{jho} \cdot l_{jho} + 2 \cdot \frac{B_\delta}{\mu_0} \cdot \delta \quad (6.19)$$

Celkový magnetický odpor jednoho elektromagnetu navrženého aktivního magnetického ložiska se skládá z odporu jha satoru  $R_{jho}$ ; odporu obou pólů  $R_{pol1}, R_{pol2}$ ; odporu pólových nástavců  $R_{nas1}, R_{nas2}$ ; odporu dvou vzduchových mezer  $R_{\delta1}, R_{\delta2}$  a odporu rotoru  $R_{rotor}$ . Celé schéma obvodu se nachází na Obr. 47 b). Dle zmíněného schématu lze aplikací druhého Kirchhoffova zákona (součet všech napětí v uzavřené smyčce je roven nule) sestavit rovnici (6.17). Následně lze předchozí rovnice zjednodušit v rovnici (6.18) za předpokladu, že shodné segmenty vyvolají identický úbytek magnetického napětí a oba zdroje vytváří shodné magnetické napětí. Vyjádřením členů magnetického napětí v rovnici (6.18) magnetickými intenzitami popřípadě magnetickou indukcí se získá vztah (6.19).



Obr. 47: a) Střední siločára jedné pólové dvojice AML b) magnetický obvod jedné pólové dvojice (analogie elektrického a magnetického obvodu)



$$B_{\delta,vyp} = \frac{2 \cdot (N \cdot I - H_{pol} \cdot l_{pol} - H_{nas} \cdot l_{nas}) - H_{rotor} \cdot l_{rotor} - H_{jho} \cdot l_{jho}}{\frac{2 \cdot \delta}{\mu_0}} \quad (6.20)$$

Úpravou rovnice (6.19) a vyjádřením magnetické indukce ve vzduchové mezeře  $B_{\delta}$  se dostane vztah (6.20), kde indexy veličin magnetické intenzity a délky střední siločáry odpovídají indexům příslušných magnetických odporů na Obr. 47 b).

Hodnoty veličin magnetických intenzit  $H_{rotor}$ ,  $H_{pol}$  a  $H_{jho}$  byly určeny pomocí funkce „Calculator“ v nabídce „Field Overlays“ v programu ANSYS Maxwell. Pro určení délky střední siločáry na Obr. 47 a)  $l_{rotor}$ ,  $l_{pol}$ ,  $l_{nas}$  a  $l_{jho}$  se využila implementovaná funkce měření hran. Tab. 14 uvádí zjištěné délky zmíněných segmentů střední siločáry.

Tab. 14: Délky úseků střední siločáry

$l_{jho}$ [mm]	$l_{pol}$ [mm]	$l_{nas}$ [mm]	$\delta$ [mm]	$l_{rotor}$ [mm]
71,7	20,5	8,6	0,6	29,5

Nejprve byla magnetická indukce ve vzduchové mezeře zjišťována při maximálním dovoleném proudu (2,36 A). Zjištěné hodnoty magnetických intenzit  $H$  v jednotlivých částech magnetického obvodu pro výpočet magnetické indukce za pomoci vztahu (6.20) se nachází v Tab. 15. Srovnáním semi-analyticky vypočtené hodnoty magnetické indukce  $B_{\delta,an}$  s hodnotou určenou simulací  $B_{\delta,sim}$  byla zjištěna relativní odchylka  $\delta B_{\delta,sym,vyp}$  22,4 %. To je způsobeno přesycením magnetického obvodu zejména rotoru a obou pólů, které mělo za následek umístění pracovního bodu do nelineární části B-H charakteristiky daných materiálů.

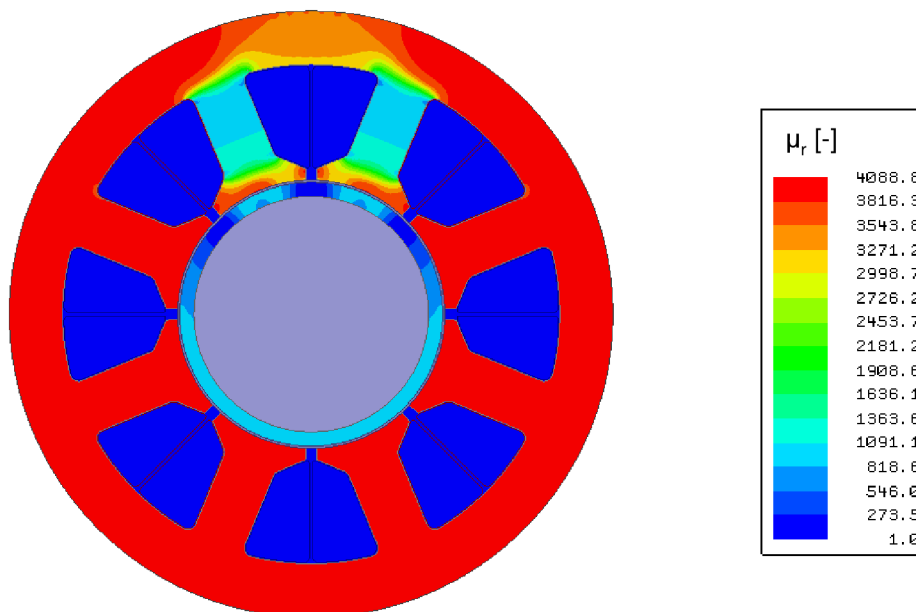
Tab. 15: Zjištěné a vypočtené hodnoty pro semi-analytický výpočet magnetické indukce

I [A]	N [-]	$H_{jho}$ [A·m <sup>-1</sup> ]	$H_{pol}$ [A·m <sup>-1</sup> ]	$H_{nas}$ [A·m <sup>-1</sup> ]	$H_{rot}$ [A·m <sup>-1</sup> ]	$B_{\delta,sim}$ [mT]	$B_{\delta,vyp}$ [mT]	$\delta B_{\delta,sym,vyp}$ [%]
2,36	213	234,5	1042,0	344,8	7991,7	602	737	22,4
0,50	213	55,2	84,3	61,4	474,7	195	200	2,5

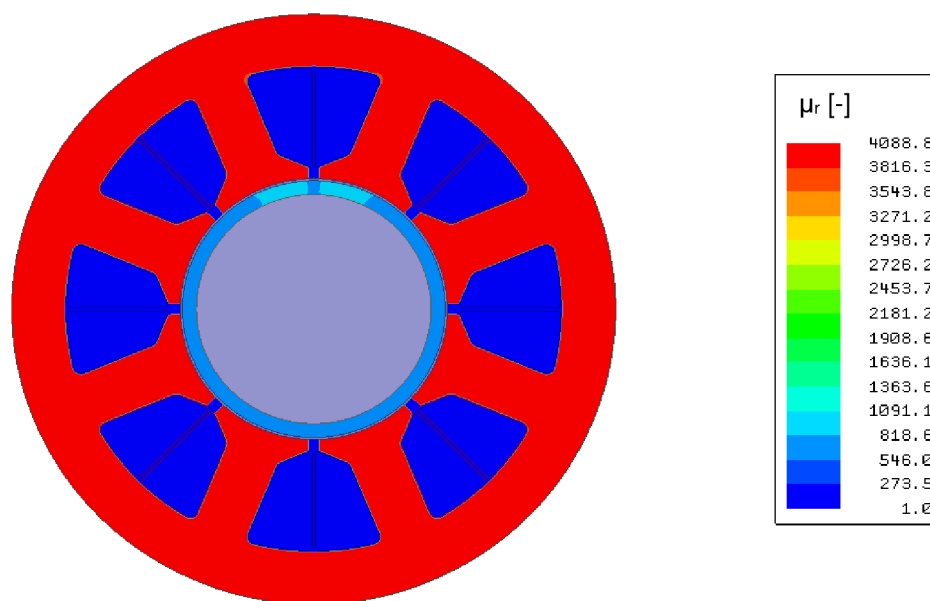
Pro lepší přesnost výsledku je nutná úprava velikosti proudu procházejícího vinutím elektromagnetu magnetického ložiska, tak aby nedocházelo k přechodu do nelineární části B-H charakteristik materiálů. Za tímto účelem bylo v prostředí Maxwell definováno pole relativní permeability pomocí nástroje „Calculator“. V důsledku nelineární B-H křivky feromagnetického materiálu M22-26G není relativní permeabilita konstantní veličinou při vyšší hodnotě sycení. Naopak při malé hodnotě sycení je možné uvažovat relativní permeabilitu za konstantní veličinu. Na základě provedených simulací bylo zjištěno, že relativní permeabilita v řezu ložiska nabývá přibližně stejných hodnot při proudu 0,5 A. Na Obr. 48 se nachází rozložení relativní permeability při maximálním dovoleném proudu 2,36 A a na Obr. 49 při proudu 0,5 A.

Hodnoty magnetických intenzit v jednotlivých částech magnetického obvodu při proudu 0,5 A se nachází v Tab. 15. Porovnáním magnetické indukce vypočtené semi-analyticky a hodnoty určené na základě simulace byla zjištěna relativní odchylka 2,5 %.

Další možné řešení pro dosažení přesnějšího výsledku je snížení magnetické intenzity v rotoru, zvětšením jeho tloušťky. To však není možné, neboť tloušťka rotoru sloužila jako výchozí parametr pro návrh daného aktivního magnetického ložiska.



Obr. 48: Rozložení relativní permeability v řezu aktivního magnetického ložiska při maximálním dovoleném proudu 2,36 A



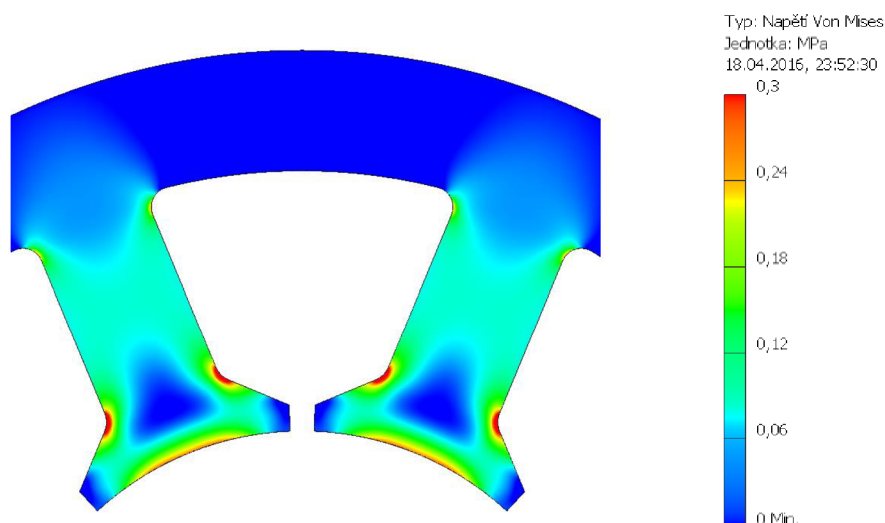
Obr. 49: Rozložení relativní permeability v řezu aktivního magnetického ložiska při proudu 0,5 A

## 6.5 Pevnostní analýza dynamového plechu

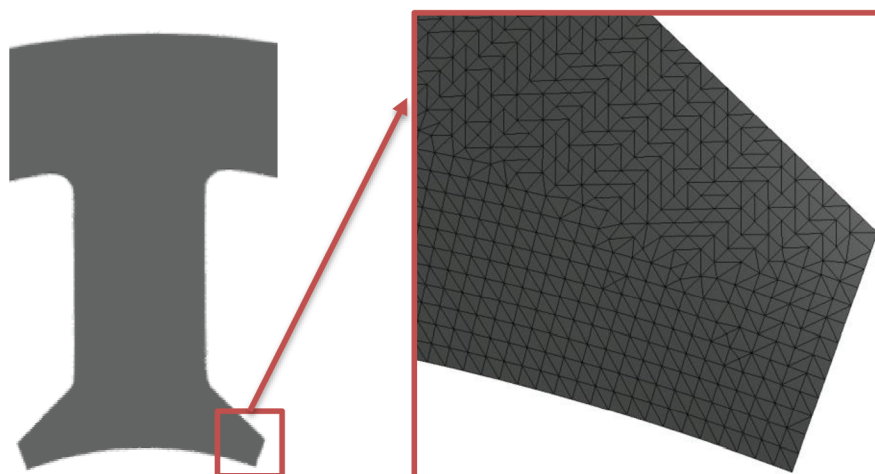
Pevnostní analýza probíhala v prostředí Autodesk Inventor. Ověření se zaměřilo na jednu pólovou dvojici ložiska. Paket ložiska bude tvořen dynamovými plechy M22-26G o tloušťce  $t_{plech}$  0,5 mm. Za účelem dimenzování se bude uvažovat síla  $F_{rad,dim}$  600 N.

$$F_{pol,plech} = \frac{\frac{F_{rad,dim}}{2}}{\frac{l_{Fe}}{t_{plech}}} \quad (6.21)$$

Dle rovnice (6.21) je síla působící na jeden pól dynamového plechu 2,14 N. Pro účely simulace bylo v programu Autodesk Inventor namáhání definováno jako tlak působící kolmo na aktivní plochu pólového nástavce. Na Obr. 50 je zobrazen výsledek pevnostní analýzy jednoho dynamového plechu. Mez kluzu v tahu se u dynamové plechu podle zdroje [29] pohybuje okolo 300 MPa. Z výsledků je patrné, že namáhání se vyskytuje v bezpečných velikostech a nevzniká nebezpečí trvalé deformace. Výpočetní síť použitá pro analýzu je znázorněna na Obr. 51.



Obr. 50: Pevnostní analýza statorového pólu AML



Obr. 51: Pohled na část výpočetní sítě pro pevnostní analýzu





## 7 ZÁVĚR

V současnosti si magnetická ložiska našla cestu k mnoha oborům, kde posouvají dosavadní technické hranice. Cílem bakalářské práce bylo navrhnout magnetický ložiskový systém pro odstředivé čerpadlo. Použití magnetických ložisek vychází z požadavku zamezení kontaktu čerpaného média s jakýmkoliv mazacím prostředkem.

Součástí této práce je literární rešerše na téma aktivních a pasivních magnetických ložisek. Kapitola s pasivními ložisky je zaměřena na axiální konstrukce. U aktivních ložisek je kladen důraz na konstrukce hybridních a radiálních ložisek.

Pro zvolení konstrukce a následné dimenzování ložisek bylo nejprve zapotřebí určit velikosti sil působících při provozu čerpadla. Podle výpočetních vztahů a výsledných grafických závislostí vzniká největší axiální zatížení při rozběhu čerpadla. Radiální zatížení se skládá ze síly na oběžné kolo čerpadla, tíhové síly rotoru čerpadla a parazitní radiální síly pasivního axiálního ložiska. Síla na oběžné kolo je minimální při nominálním (optimálním) průtoku média čerpadlem. Radiální síla na oběžné kolo byla vypočtena pomocí Bihellerova empirického vzorce. Axiální ložisko je dimenzováno na hodnotu síly 192 N a radiální ložisko na hodnotu síly 240 N.

V další části práce bylo navrženo axiální pasivní magnetické ložisko, které se skládá ze tří magnetických mezikruží. Dva krajní magnety jsou uloženy ve statoru stroje a středový magnet je součástí hřídele. Axiální stability v rovnovážné poloze bylo docíleno pomocí odpudivých magnetických sil. Zvolený typ a rozměr permanentních magnetů byl určen na základě opakovaně prováděných axisymetrických simulací modulem Optimetric v programu ANSYS Maxwell. Použité permanentní magnety jsou NdFeB typu N42 s rozměry prstence 75 x 49 x 10 (mm). Pro uchycení mezikruží na hřídel o průměru 10 mm byla navržena válcová podložka s postranními lemy. Z důvodu uzavírání magnetické indukce přes válcovou podložku je celý kompozit vyroben z PVC-U. Zvoleným materiálem se současně zabránilo indukování vířivých proudů, které by způsobily snížení výsledného magnetického pole. Stanovení tloušťky lemu válcové podložky a zároveň ověření na mezní statické silové účinky bylo provedeno za pomoci implementovaného modulu pevnostní analýzy v programu Autodesk Inventor.

Maximální možné vychýlení rotoru z rovnovážné polohy ve směru osy hřídele jsou 2 mm. Při tomto mezním vychýlení působí na rotor ložiska axiální síla 232 N. Současně stator, k němuž byl rotor vychýlen, je zatížen silou o velikosti 400 N. Při provádění simulací byla použita střední hodnota remanentní indukce  $B_r$  1,3 T a koercitivní síly  $H_c$  923 kA·m<sup>-1</sup> dle výrobce Neomag.

Součástí návrhu pasivního magnetického ložiska bylo také experimentální ověření výsledků získaných z MKP programu ANSYS Maxwell. Maximální relativní odchylka hodnot byla 9,0 % a průměrná 7,5 %. Vzniklá odchylka může být způsobena následujícími vlivy: nekonstantní vzduchová mezera způsobená excentricitou rotoru ložiska, výrobní tolerance permanentních magnetů (remanentní indukce, koercitivní síla), chyba měření, nedokonalé radiální usazení rotoru (nedosažení nenulové radiální výchylky), chybně určená nulová (rovnovážná) axiální poloha rotoru ložiska, tření v radiálních pouzdrech ložiska, možný ohyb statorových konzolí při vyvíjení axiální síly pro vychýlení rotoru ložiska.

V okamžiku vychýlení radiálního ložiska z rovnovážného stavu vzniká v axiálním ložisku parazitní radiální síla ve směru radiálního vychýlení. Bylo zjištěno, že v mezním stavu radiálního



vychýlení 0,6 mm je tato parazitní síla schopna dosáhnout hodnoty 41 N. Pro omezení tohoto jevu byly vytvořeny tři konstrukční řešení. Dvě spočívaly v úpravě stávajícího uspořádání axiálního ložiska. Třetí konstrukční řešení se zabývalo pasivním radiálním magnetickým ložiskem.

V rámci simulací byly srovnány získané výsledky sil z axisymetrické a trojrozměrné metody konečných prvků pro různá osová vychýlení rotoru axiálního ložiska. Hodnota relativní odchylky mezi oběma metodami nepřesáhla 1,2 %.

V další části práce bylo navrženo osmipólové aktivní radiální magnetické ložisko, tvořené lištěným státorem z dynamových plechů M22-26G. Vinutí ložiska je dvouvrstvé soustředné navinuté smaltovaným vodičem o průměru 1 mm. Každá pólová dvojice obsahuje 426 závitů. Odpor vinutí jedné pólové dvojice při uvažovaném oteplení 80° C je 3,67 Ω. Potřebné napájecí napětí pro dosažení maximálního dovoleného proudu 2,36 A je 9 V. Rotor ložiska je dutý, neboť současně slouží jako přívod čerpané kapaliny k oběžnému kolu odstředivého čerpadla.

Radiální ložisko je vybaveno těsnícím labyrintem, který tvoří vzduchová mezera ložiska 0,6 mm a osm příčných půlkruhových drážek. Celková délka paketu je 94 mm. Ložisko dosahuje vnějšího průměru 170 mm. Provedená simulace na rozložení magnetické indukce při maximálním dovoleném proudu vinutím zobrazila přesycení magnetického obvodu rotoru. Pro omezení přesycení by bylo vhodné upravit tloušťku pláště hřídele, která je však pro návrh výchozí a nelze ji změnit.

Dále byla v práci srovnána hodnota přitažlivé síly z analytického výpočtu a metody konečných prvků. Relativní odchylka obou metod byla 3,4 %.

V dalším kroku byl proveden semi-analytický výpočet magnetické indukce ve vzduchové mezeře ložiska. Na správnost výpočtu má velký vliv hodnota magnetického sycení ložiska. Při přesycení použitých materiálů vnáší jejich nelineární B-H charakteristika velké chyby do semi-analytického výpočtu. Při umístění pracovního bodu do lineární části charakteristiky materiálu M22-26G se magnetická indukce určená semi-analyticky od hodnoty určené simulací lišila o 2,5 %.

Při provozu ložiska budou jednotlivé dynamo plechy zatíženy tahovými silami. Pomocí programu Autodesk Inventor byla provedena pevnostní analýza statorového plechu. Určené maximální tahové napětí 0,3 MPa bezpečně leží v hodnotách, kde nemůže nastat trvalá deformace křemíkového plechu.



## LITERATURA

- [1] TIR, Milad Alizadeh a Seyyed Mehdi MIRIMANI. Design of a new structure passive magnetic bearing with radial magnetization using FEM. *2014 22nd Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. IEEE, 2014: 798-802. DOI: 10.1109/IranianCEE.2014.6999645. ISBN 978-1-4799-4409-5 [cit. 2015-11-01]. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6999645>
- [2] SPONSORED BY CHINA ELECTROTECHNICAL SOCIETY (CES) .. [ET AL.], ORGANIZED BY HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY a ED. BY C. L. GU. [ET AL.]. ICEMS' 2008: the 11th International Conference on Electrical Machines and Systems, 17-20 October 2008, Wuhan, China : digests [online]. S.l.: World Publishing Corp, 2008 [cit. 2015-11-01]. ISBN 9787506292214. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4770731>
- [3] ZHU, Z. Q. Recent Development of Halbach Permanent Magnet Machines and Applications. *2007 Power Conversion Conference - Nagoya*. IEEE, 2007: K-9-K-16. DOI: 10.1109/PCCON.2007.372911 [cit. 2015-11-12]. ISBN 1-4244-0843-1. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4239126>
- [4] ZHU, Z.Q. a D. HOWE. Halbach permanent magnet machines and applications: a review. *IEE Proceedings - Electric Power Applications*. 2001, 148(4): 299-. DOI: 10.1049/ip-epa:20010479 [cit. 2015-11-14]. ISSN 13502352. Dostupné také z: [http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-epa\\_20010479](http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-epa_20010479)
- [5] *GaussBoys Super magnets* [online]. 2012 [cit. 2015-11-01]. Dostupné z: <http://www.gaussboys.com/store/index.php/magnet-information/halbach-array-info.html>
- [6] 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 [cit. 2015-11-20]. ISSN 0018-9464. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6684287>
- [7] ORGANIZED BY KIEE, IEEJ CO-ORGANIZED BY CES a IEEE TECHNICAL CO-SPONSOR. *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2010 International Conference on*. Piscataway: IEEE, 2010, s. 1695 – 1700 [cit. 2015-11-19]. ISBN 9781424477203. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5663697>
- [8] KRUPIČKA, Svatopluk. FYZIKÁLNÍ ÚSTAV AV ČR. Magnetismus: historie a současnost: Od magnetitu a kompasu k magnetickému disku a spinovému tranzistoru [online]. 2007, 67 s. [cit. 2015-11-06]. Dostupné z: [http://www.learned.cz/userfiles/pdf/prednasky-cleny-odborne/svatopluk.krupicka\\_0207.pdf](http://www.learned.cz/userfiles/pdf/prednasky-cleny-odborne/svatopluk.krupicka_0207.pdf)



- [9] LINZ CENTER OF MECHATRONICS GMBH. *Magnetic bearing* [online]. 2011 [cit. 2015-11-06]. Dostupné z: <http://www.magneticbearings.org>
- [10] KIONG LAM, Siu. *Design and optimization of an active magnetic thrust bearing for flywheel energy storage systems*. San Francisco, 2011. 1500638. Dissertation [cit. 2015-11-04]. The Faculty of the Department of Electrical Engineering San José State University.
- [11] 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)*. IEEE, 2010: 1-9. DOI: 10.1109/PCIC.2010.5666819 [cit. 2015-11-05]. ISBN 978-1-4244-6800-3. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5666819>
- [12] HROMÁDKA, Jakub, Petr KOLÁŘ a Jindřich KUBÁK. Elektromagnetismus a multidisciplinární analýzy. *CAD* [online]. 2009 [cit. 2015-11-06]. Dostupné z: <http://www.cad.cz/component/content/article/2961.html>
- [13] ANSYS Maxwell. *Techsoft Engineering* [online]. 2012 [cit. 2015-11-06]. Dostupné z: <http://www.techsoft-eng.cz/produkty/ansys/ansys-maxwell/>
- [14] ANSYS. *ANSYS Maxwell* [online]. 2015, 2 s. [cit. 2015-11-06]. Dostupné z: <http://www.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resourcelibrary/brochure/ansys-maxwell-brochure.pdf>
- [15] XU, Shilei a Jinji SUN. Decoupling Structure for Heteropolar Permanent Magnet Biased Radial Magnetic Bearing With Subsidiary Air-Gap. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2014, 50(8): 1-8. DOI: 10.1109/TMAG.2014.2312396 [cit. 2015-11-01]. ISSN 0018-9464. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6775321>
- [16] FENGXIANG WANG, JIQIANG WANG, ZHIGUO KONG a LONGYA XU. A novel BLDC motor with passive magnetic bearings for blood pump application. *38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 2003*. IEEE, 2003: 1429-1433. DOI: 10.1109/IAS.2003.1257741 [cit. 2015-11-20]. ISBN 0-7803-7883-0. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1257741>
- [17] FILATOV, Alexei a Larry HAWKINS. CALNETIX TECHNOLOGIES LLC. *GENERAL EXPLANATION OF HOW MAGNETIC BEARINGS WORK* [online]. Cerritos, CA, USA, 2013, 16 s. [cit. 2015-11-15]. Dostupné z: [http://www.calnetix.com/sites/default/files/CALNETIX\\_HOW\\_MAGNETIC\\_BEARINGS\\_WORK.pdf](http://www.calnetix.com/sites/default/files/CALNETIX_HOW_MAGNETIC_BEARINGS_WORK.pdf)
- [18] NEOMAG. *Neodymové magnety NdFeB* [online]. 2015 [cit. 2015-11-15]. Dostupné z: <http://www.neomag.cz/>



- [19] PVC-U. *Aliaxis: Utilities & industry* [online]. 2013 [cit. 2015-11-27]. Dostupné z: <http://www.aliaxis-ui.cz/produkty/prumyslove-potrubni-systemy/pvc-u.html>
- [20] PVC-U. *Titan: Multiplast* [online]. 2015 [cit. 2015-11-27]. Dostupné z: [http://www.titan-multiplast.cz/produkty/vyroba-technologicky-nadrzi-24/desky-tyce-a-profilu-pvc-107/#tab\\_catalogue-detail-text](http://www.titan-multiplast.cz/produkty/vyroba-technologicky-nadrzi-24/desky-tyce-a-profilu-pvc-107/#tab_catalogue-detail-text)
- [21] RAČEK, Jiří. *Technická mechanika: mechanika poddajných těles*. Vyd. 2. Brno: Novpress, 2011 [cit. 2015-11-27], 104 s. ISBN 978-80-214-4280-1.
- [22] ŘEZNÍČEK, Jiří. *Technor. ČSN EN ISO 527* [online]. 2005 [cit. 2015-11-27]. Dostupné z: [http://www.technicke-normy-csn.cz/640604-csn-en-iso-527-1\\_4\\_26028.html](http://www.technicke-normy-csn.cz/640604-csn-en-iso-527-1_4_26028.html)
- [23] PVC-U. *LPM* [online]. 2008 [cit. 2015-11-27]. Dostupné z: <http://www.lpm.cz/cgi-bin/riweta.cgi?nr=2690&lng=1>
- [24] ZAVADIL, Lukáš a Sylva DRÁBKOVÁ. Stanovení radiální síly v hydrodynamickém čerpadle s využitím numerického modelování. *Transaction of VŠB - Technical University of Ostrava, Mechanical Series*. 2010, (1).
- [25] GANČO, M.: Axiálna sila hydrodynamických čerpadiel s radiálnym obežným kolesom. *Strojnícky časopis* 47, 1996, č.2, str. 94-105
- [26] LÁNÍČEK, Tomáš. *Optimalizace magnetických a elektrických obvodů integrovaného systému motorek - magnetické ložisko*. Brno, 2007. Doktorská práce. VUT v Brně - FEKT. Vedoucí práce Doc. Ing. Josef Lapčík, CSc.
- [27] TRAXLER, Alfons. *Eigenschaften und Auslegung von beruehrungsfreien elektromagnetischen Lagern*. ETH Zurich, 1985. Dostupné také z: <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:36878/eth-36878-02.pdf>. Doktors der Technischen wissenschaften. Eidgenessischen technischen Hochschule zuerich. Vedoucí práce Prof. Dr. G. Schweltzer.
- [28] Měděné dráty. Elviko s.r.o.: Veselí nad Moravou [online]. 2008 [cit. 2016-04-06]. Dostupné z: <http://www.elviko.cz/zbozi/medene-draty/>
- [29] *Cogent: Electrical steel* [online]. 2015 [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: <http://cogent-power.com/>
- [30] Měrný odpor. Converter [online]. Holešov: Jiří Bureš, 2002 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/merny-odpor.htm>
- [31] NdFeB: N42. *Arnold: Magnetic Technologies* [online]. 2015 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://www.arnoldmagnetics.com/Portals/0/Files/Catalogs%20and%20Lit/Neo/151021/N42%20-%20151021.pdf?ver=2015-12-07-103817-020>



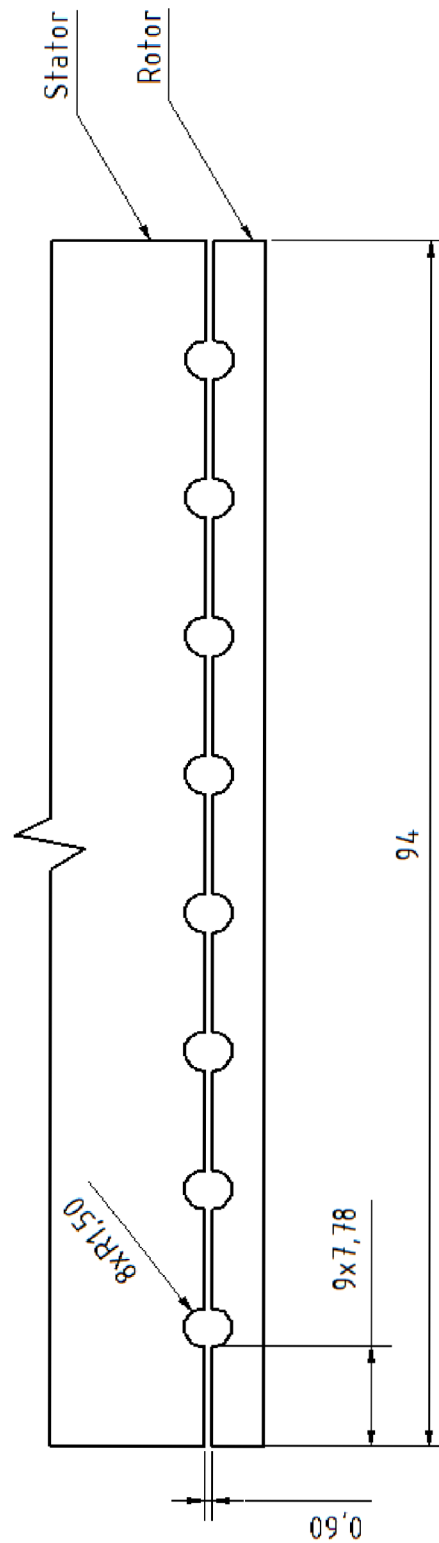
## PŘÍLOHY

Příloha 1: Katalogový list s vlastnostmi permanentních magnetů NdFeB [18]

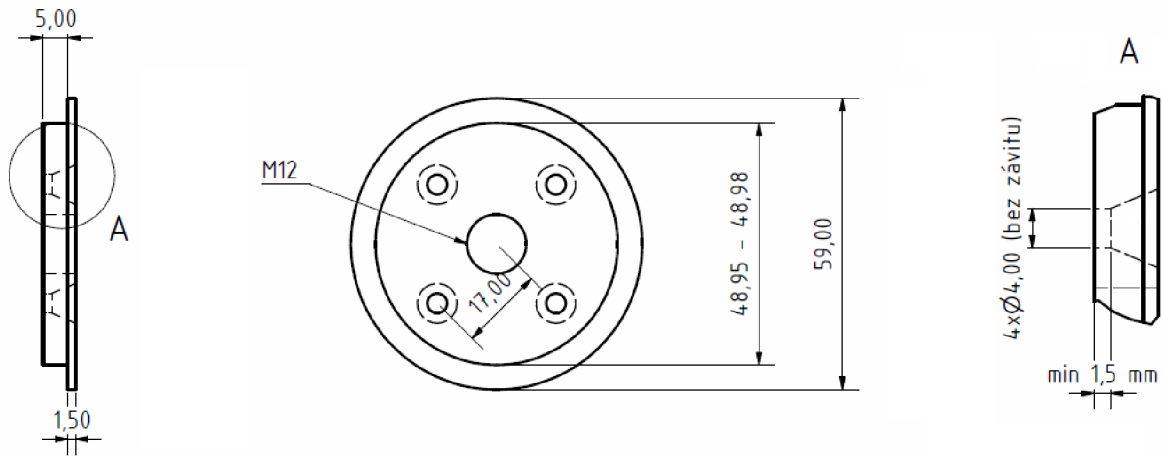
Typ materiálu	Remanence Br		Koercivita H <sub>cb</sub>		Vnitřní koercivita H <sub>ci</sub>		Hustota energie (BH) max		Maximální pracovní teplota	
	KG	T	KOe	KA/m	KOe	KA/m	MGOe	KJ/m <sup>3</sup>	°C	°F
N35	11.4-11.8	1.18-1.28	≥ 10.8	≥ 836	≥ 12	≥ 955	33-36	263-287	80	176
N38	11.8-12.3	1.18-1.28	≥ 10.8	≥ 860	≥ 12	≥ 955	36-39	287-310	80	176
N40	12.7-12.9	1.27-1.29	≥ 11.0	≥ 876	≥ 12	≥ 955	38-41	303-326	80	176
N42	12.9-13.3	1.29-1.33	≥ 10.5	≥ 836	≥ 12	≥ 955	40-43	318-342	80	176
N45	13.3-13.8	1.33-1.38	≥ 9.5	≥ 756	≥ 12	≥ 955	43-46	342-366	80	176
N48	13.8-14.2	1.38-1.42	≥ 10.5	≥ 835	≥ 12	≥ 955	46-49	366-390	80	176
N50	13.8-14.5	1.38-1.45	≥ 10.5	≥ 835	≥ 11	≥ 955	47-51	374-406	80	176
N52	14.3-14.8	1.43-1.48	≥ 10.8	≥ 860	≥ 11	≥ 876	50-53	398-422	80	176
33M	11.4-11.8	1.14-1.18	≥ 10.3	≥ 820	≥ 14	≥ 1114	31-33	247-263	100	212
35M	11.8-12.3	1.18-1.23	≥ 10.8	≥ 860	≥ 14	≥ 1114	33-36	263-287	100	212
38M	12.3-12.7	1.23-1.27	≥ 11.0	≥ 876	≥ 14	≥ 1114	38-41	303-326	100	212
40M	12.7-12.9	1.27-1.29	≥ 11.4	≥ 907	≥ 14	≥ 1114	38-41	303-326	100	212
42M	12.8-13.2	1.28-1.32	≥ 11.6	≥ 923	≥ 14	≥ 1114	40-43	318-342	100	212
45M	13.2-13.8	1.32-1.38	≥ 11.8	≥ 939	≥ 14	≥ 1114	43-46	342-366	100	212
48M	13.6-14.0	1.36-1.40	≥ 11.8	≥ 939	≥ 14	≥ 1114	46-49	366-390	100	212
50M	14.0-14.5	1.40-1.45	≥ 13.0	≥ 1033	≥ 14	≥ 1114	48-51	382-406	100	212
30H	10.8-11.4	1.08-1.14	≥ 10.2	≥ 812	≥ 17	≥ 1353	28-31	223-247	120	248
33H	11.4-11.8	1.14-1.18	≥ 10.6	≥ 844	≥ 17	≥ 1353	31-33	247-263	120	248
35H	11.8-12.3	1.18-1.28	≥ 11.0	≥ 876	≥ 17	≥ 1353	33-36	263-287	120	248
38H	12.3-12.7	1.23-1.27	≥ 11.2	≥ 890	≥ 17	≥ 1353	36-39	287-310	120	248
40H	12.7-12.9	1.27-1.29	≥ 11.5	≥ 915	≥ 17	≥ 1353	38-41	303-326	120	248
42H	12.8-13.2	1.28-1.32	≥ 12.0	≥ 955	≥ 17	≥ 1353	40-43	318-342	120	248
45H	13.2-13.5	1.32-1.38	≥ 12.0	≥ 955	≥ 17	≥ 1353	42-46	335-366	120	248
46H	13.3-13.8	1.33-1.38	≥ 12.2	≥ 972	≥ 16	≥ 1274	44-47	350-374	120	248
48H	13.6-14.3	1.36-1.43	≥ 12.5	≥ 995	≥ 16	≥ 1274	46-49	366-390	120	248
30SH	10.8-11.4	1.08-1.14	≥ 10.0	≥ 796	≥ 20	≥ 1672	28-31	223-247	150	302
33SH	11.4-11.8	1.14-1.18	≥ 10.5	≥ 836	≥ 20	≥ 1672	31-34	247-276	150	302
35SH	11.8-12.3	1.18-1.23	≥ 11.0	≥ 876	≥ 20	≥ 1672	33-36	263-287	150	302
38SH	12.3-12.7	1.23-1.27	≥ 11.4	≥ 907	≥ 20	≥ 1972	36-39	287-310	150	302
40SH	12.5-12.8	1.25-1.28	≥ 11.8	≥ 939	≥ 20	≥ 1972	38-41	302-326	150	302
42SH	12.8-13.2	1.28-1.32	≥ 11.8	≥ 939	≥ 20	≥ 1672	40-43	320-343	150	302
45SH	13.2-13.8	1.32-1.38	≥ 12.6	≥ 1003	≥ 20	≥ 1592	43-46	342-366	150	302
30UH	10.8-11.4	1.08-1.14	≥ 10.2	≥ 812	≥ 25	≥ 1990	28-31	223-247	180	356
33UH	11.3-11.7	1.13-1.17	≥ 10.7	≥ 852	≥ 25	≥ 1990	31-33	247-263	180	356
35UH	11.7-12.1	1.17-1.21	≥ 10.7	≥ 852	≥ 25	≥ 1990	33-36	263-287	180	356
38UH	12.1-12.5	1.21-1.25	≥ 11.4	≥ 907	≥ 25	≥ 1990	36-39	287-310	180	356
40UH	12.5-12.8	1.25-1.28	≥ 11.4	≥ 907	≥ 25	≥ 1990	38-41	302-326	180	356
28EH	10.5-10.8	1.05-1.08	≥ 9.5	≥ 756	≥ 30	≥ 2388	26-29	207-231	200	392
30EH	10.8-11.4	1.08-1.14	≥ 9.5	≥ 756	≥ 30	≥ 2388	28-31	223-241	200	392
33EH	11.3-11.7	1.13-1.17	≥ 10.2	≥ 812	≥ 30	≥ 2388	31-33	247-263	200	392
35EH	11.7-12.1	1.17-1.21	≥ 10.2	≥ 812	≥ 30	≥ 2388	33-36	263-287	200	392
38EH	12.1-12.5	1.21-1.25	≥ 11.4	≥ 907	≥ 30	≥ 2388	36-39	287-310	200	392
30AH	10.8-11.3	1.08-1.13	≥ 10.2	≥ 812	≥ 35	≥ 2785	28-32	223-255	220	428
33AH	11.2-11.7	1.12-1.17	≥ 10.2	≥ 812	≥ 35	≥ 2785	31-34	247-271	220	428



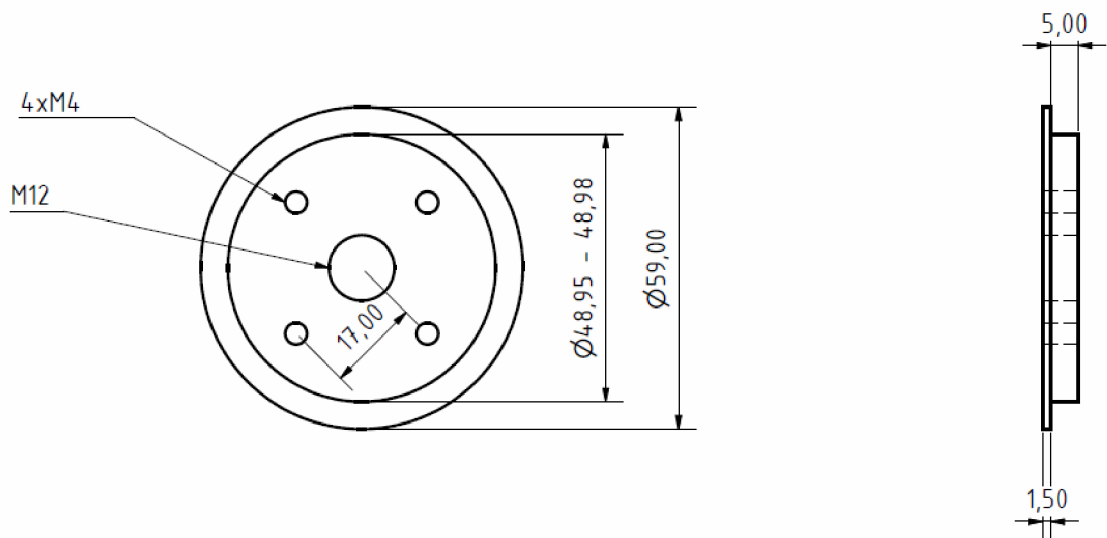
*Příloha 2: Nákres labyrintu pro aktivní radiální magnetické ložisko*



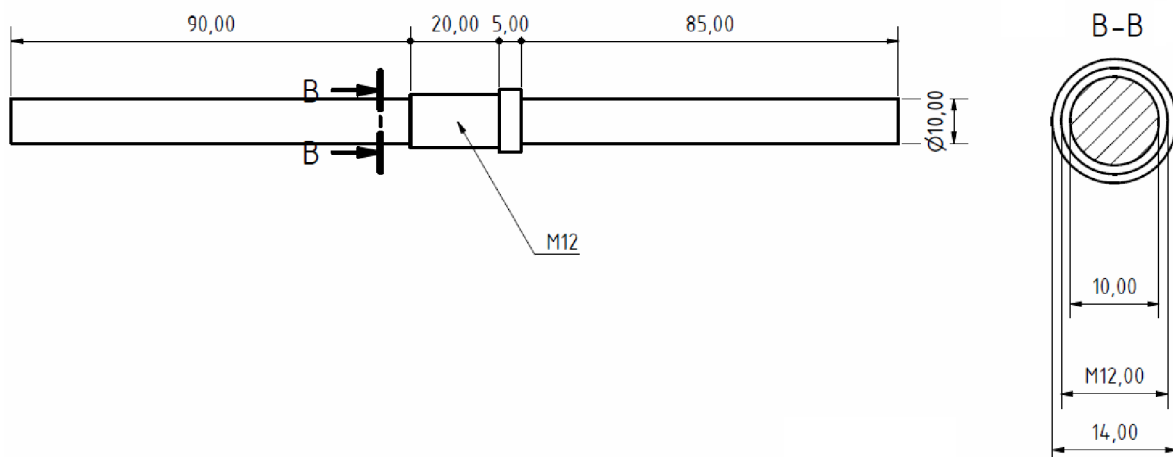
*Příloha 3: Levá polovina vymezovací podložky pasivního axiálního ložiska*



*Příloha 4: Pravá polovina vymezovací podložky pasivního axiálního ložiska*

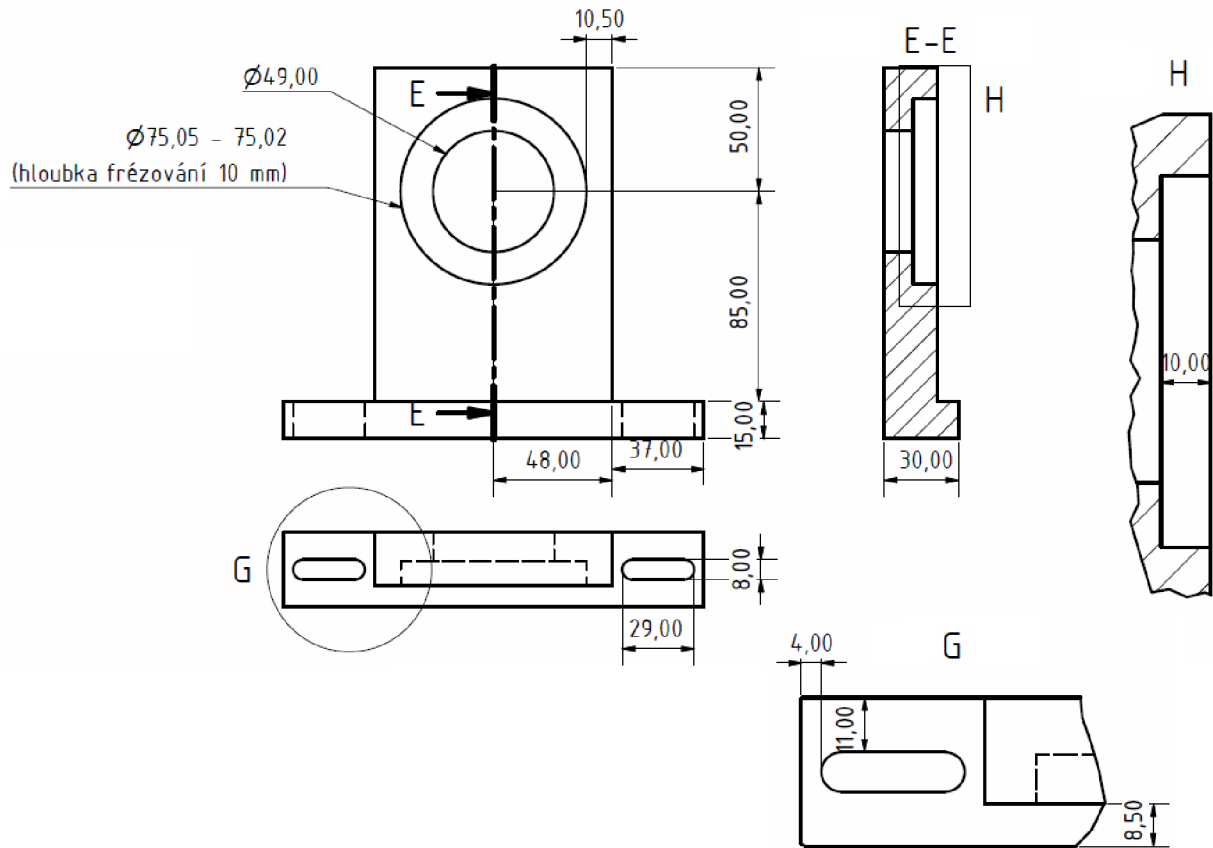


*Příloha 5: Hřídel pasivního axiálního magnetického ložiska*

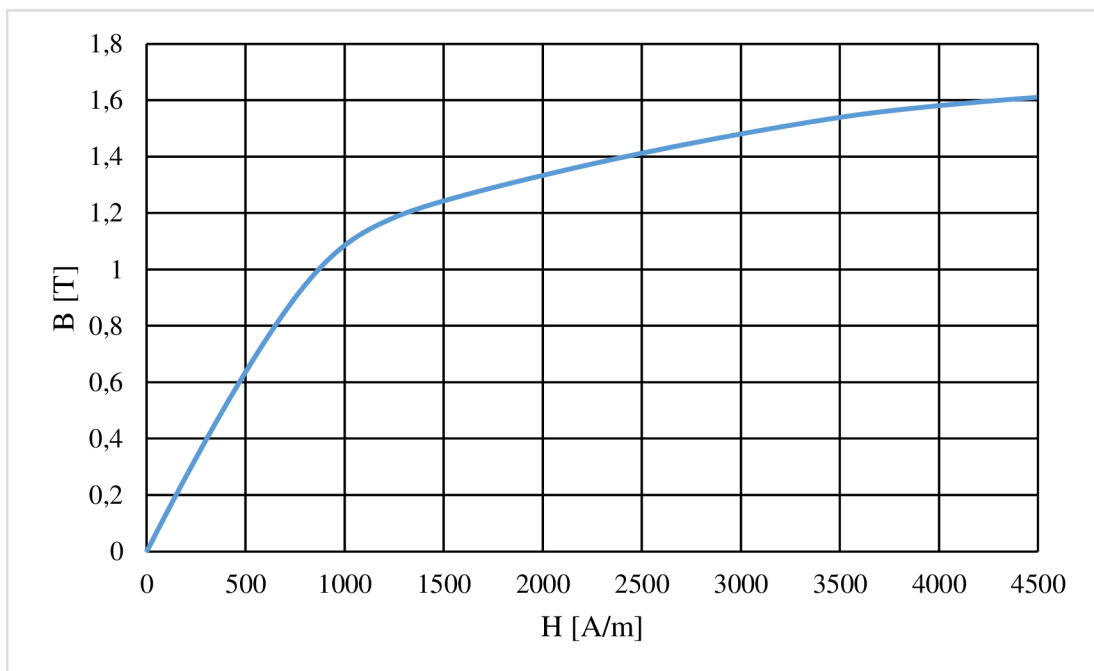




*Příloha 6: Ložiskový domek sloužící pro upevnění statorového permanentní magnetu pasivního axiálního magnetického ložiska při zkušebním měření*



*Příloha 7: B-H charakteristika konstrukční oceli 1010*





Příloha 8: Katalogový list permanentního magnetu NdFeB N42 firmy Arnolmagnetics [31]



**N42**

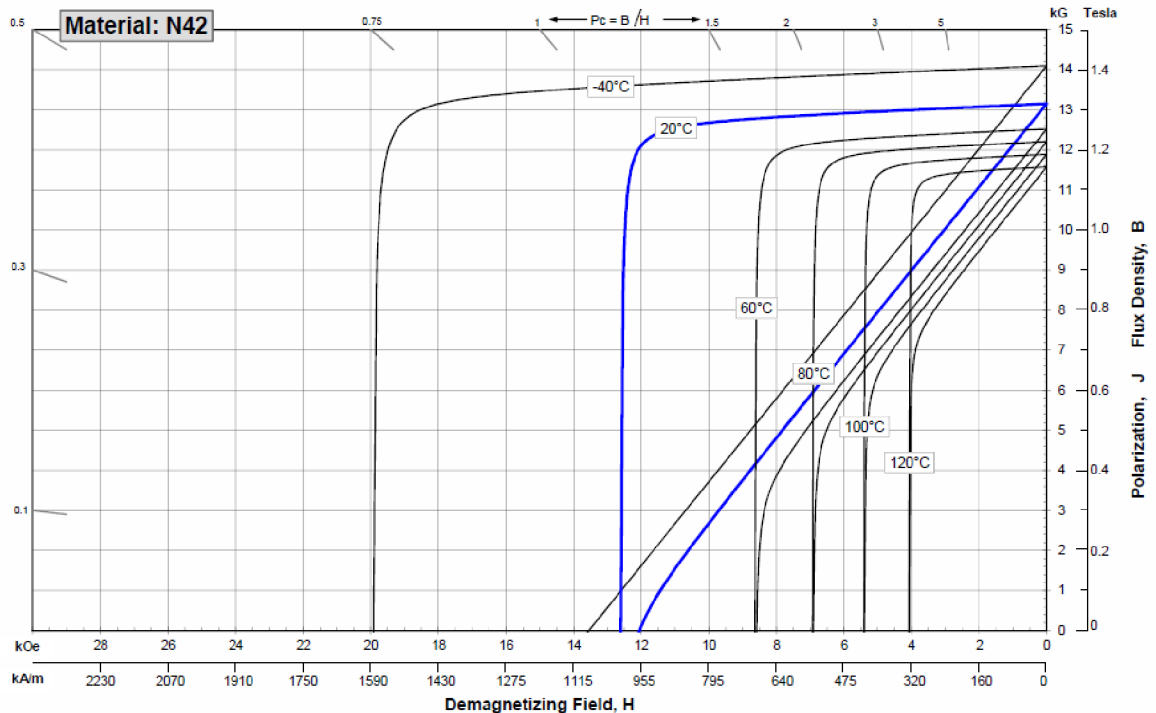
**Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets**

These are also referred to as "Neo" or NdFeB magnets. They offer a combination of high magnetic output at moderate cost. Please contact Arnold for additional grade information and recommendations for protective coating. Assemblies using these magnets can also be provided.

Characteristic	Units	Magnetic Properties		
		min.	nominal	max.
$B_r$ , Residual Induction	Gauss	12,800	13,150	13,500
	mT	1280	1315	1350
$H_{cB}$ , Coercivity	Oersteds	10,800	11,850	12,900
	kA/m	860	943	1027
$H_{cJ}$ , Intrinsic Coercivity	Oersteds	12,000		
	kA/m	955		
$BH_{max}$ , Maximum Energy Product	MGOe	40	42	44
	$\text{kJ/m}^3$	318	334	350

Characteristic	Units	Thermal Properties	
		C //	C ⊥
Reversible Temperature Coefficients <sup>(1)</sup>			
of Induction, $\alpha(B_r)$	%/°C		-0.120
of Coercivity, $\alpha(H_{cJ})$	%/°C		-0.750
Coefficient of Thermal Expansion <sup>(2)</sup>			
	$\Delta L/L$ per °C $\times 10^{-5}$	7.5	-0.1
Thermal Conductivity			
	W / (m • K)	7.6	
Specific Heat <sup>(3)</sup>			
	J / (kg • K)	460	
Curie Temperature, $T_c$			
	°C	310	
Other Properties			
Flexural Strength	psi	41,300	
	MPa	285	
Density	$\text{g/cm}^3$	7.5	
Hardness, Vickers	Hv	620	
Electrical Resistivity, $\rho$	$\mu\Omega \cdot \text{cm}$	180	

Notes: (1) Coefficients measured between 20 and 80 °C  
(2) Between 20 and 200 °C  
(3) Between 20 and 140 °C



Notes The material data and demagnetization curves shown above represent typical properties that may vary due to product shape and size. Magnets can be supplied thermally stabilized or magnetically calibrated to customer specifications. Additional grades are available. Please contact the factory for information.