

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

PASIVNÍ AXIÁLNÍ MAGNETICKÉ LOŽISKO

PASSIVE AXIAL MAGNETIC BEARING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Patrik Dostál

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radomír Pruša

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Patrik Dostál**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Radomír Pruša**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Pasivní axiální magnetické ložisko

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Předmětem bakalářské práce je experimentální měření na axiálním pasivním magnetickém ložisku. Dané ložisko bylo navrženo pro funkci v inovativním bezucpávkovém čerpadle. V rámci práce bude současně provedena literární rešerše na téma pasivních magnetických ložisek.

Cíle bakalářské práce:

Literární rešerše na téma pasivních magnetický ložisek.
Vytvoření magnetického MKP modelu pasivního axiálního magnetického ložiska.
Experimentální určení vlastností a charakteristik funkčního vzorku ložiska.
Porovnání výsledků z MKP analýzy s experimentálním měřením.
Vlastní závěr a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

MAYER, Daniel a Bohuš ULRYCH, 2008. Elektromagnetické aktuátory. Praha: BEN - technická literatura. ISBN 978-80-7300-216-9.

CHIBA, Akira, Tadashi FUKAO, Osamu ICHIKAWA, Masahide OSHIMA, Masatugu TAKEMOTO a David DORRELL, 2005. Magnetic Bearings and Bearingless Drives. Amsterdam: Elsevier. ISBN 0-7506-5727-8.

POLAJZER, Bostjan, 2010. Magnetic Bearings: Theory and Applications. Rijeka: InTech. ISBN 978-953-307-148-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem bakalářské práce je určení vlastností pasivního magnetického ložiska. Praktická část práce se skládá ze dvou pasáží – experimentální měření vlastností již realizovaného pasivního axiálního magnetického ložiska a následné simulace hodnot pomocí metody konečných prvků v programu FEMM. Zároveň byly také simulovány účinky teploty. Bylo zjištěno, že s rostoucí teplotou se zásadně snižuje tuhost ložiska. Rovněž byly zkoumány další vlivy ovlivňující tuhost ložiska, jako například rozměry magnetů a vzdálenosti mezi nimi. Hodnoty experimentálního měření a simulovaných hodnot byly v závěru práce vzájemně porovnány. Analyzované ložisko je určeno pro užití v bezucpávkovém odstředivém čerpadle. Z hodnot zjištěných simulací a experimentálním měřením byly vyvozeny závěry pro použití ložiska v praxi. Součástí této práce je také rešerše na téma pasivní magnetická ložiska. Rešerše se zabývá samotným principem funkce ložisek, jejich konstrukcí a využitím v praxi.

ABSTRACT

The goal of the bachelor thesis is to measure the characteristics of a passive magnetic bearing. The practical part of the thesis consists of two segments – experimental measurement of properties of a passive axial magnetic bearing and a simulation of this bearing using the finite element method in the FEMM application. The simulation also dealt with the effects of temperature on the bearing. It was discovered that high temperatures considerably lower the axial stiffness of the magnetic bearing. Other effects on the stiffness of the bearing were taken into consideration, especially the dimensions of used magnets and the distance between them. The values that were determined by the experimental measurement and the FEMM simulation were mutually compared. The analysed bearing was built for use in a seal-less centrifugal pump. The values determined by the simulation and the measurement were applied to the practical use in pumps. A part of the thesis was concerned with a research on passive magnetic bearings. The research dealt with the principle of the bearings, their structure and their application.

KLÍČOVÁ SLOVA

Pasivní magnetické ložisko, magnetismus, metoda konečných prvků, magnetická levitace

KEYWORDS

Passive magnetic bearing, magnetism, finite element method, magnetic levitation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DOSTÁL, P. *Pasivní axiální magnetické ložisko*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 60 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radomír Pruša

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu práce Ing. Radomírovi Prušovi za cenné rady a odbornou pomoc při vypracování bakalářské práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Radomíra Pruši a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 22. 5. 2019

.....

Dostál Patrik

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ	17
2.1	Magnetická levitace	17
2.1.1	Vlastnosti permanentních magnetů	19
2.2	Konstrukční řešení pasivních magnetických ložisek	20
2.2.1	Základní příklad konstrukce pasivního magnetického ložiska	20
2.2.2	Hybridní axiální a radiální magnetické ložisko	21
2.2.3	Kombinace mechanického a magnetického ložiska.	23
2.3	Využití v praxi	24
2.3.1	Srdeční čerpadla	24
2.3.2	Využití pasivních magnetických ložisek v setrvačnicích	26
3	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ SIL	27
3.1	Popis konstrukce a funkce axiálního magnetického ložiska	27
3.2	Postup a výsledky měření	29
4	SIMULACE V PROGRAMU FEMM	33
4.1	Příprava simulace	33
4.2	Výsledky simulace	35
4.3	Vliv teploty na ložisko	39
4.4	Změna rozměrů permanentních magnetů	40
5	POROVNÁNÍ SIMULOVANÝCH A MĚŘENÝCH HODNOT	45
7	DOPORUČENÍ PRO PRAXI	49
8	ZÁVĚR	51
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	53
10	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK	55
10.1	Seznam tabulek	55
10.2	Seznam obrázků	55
11	SEZNAM PŘÍLOH	57

1 ÚVOD

Cílem práce je určení vlastností pasivního magnetického ložiska. Tuhost ložiska se zjišťovala experimentálním měřením na prototypu ložiska určeném pro bezucpávková čerpadla. Zároveň byla provedena simulace metodou konečných prvků v programu FEMM. Hodnoty zjištěné simulací a experimentem byly v závěru porovnány. Součástí práce je také rešerše na téma pasivních magnetických ložisek, ve které je popsán princip jejich fungování a několik příkladů provedení a využití v praxi.

Magnetická ložiska přenášejí zatížení za pomoci magnetické levitace. Skládají se nejčastěji ze dvou nebo případně tří magnetů. Při postupném vychylování magnetů z rovnovážné polohy vzniká přitažlivá nebo odpudivá (záleží na konfiguraci magnetů a jejich polaritě) síla, která se snaží magnety uvést opět do rovnováhy. Nedochozí tedy k fyzickému kontaktu pohybujících se součástí.

První výzkum týkající se magnetických ložisek započal ve čtyřicátých letech minulého století na Virginské univerzitě pod vedením profesora Jesseho Beamse. První aplikace přišly až v šedesátých a sedmdesátých letech. Ložiska byla tehdy testována pro použití ve vakuu pod vedením NASA. Byla použita v turbomolekulárních pumpách nebo v satelitech. V poslední době došlo k nárůstu počtu aplikací magnetických ložisek, zejména kvůli rychlému vývoji výpočetní techniky. Dnes se magnetická ložiska využívají zcela běžně, například v prostředí, kde je třeba se kvůli kontaminaci vyvarovat mazání (lékařský průmysl, čerpadla), při větších obvodových rychlostech, nebo ve vakuu, kde je používání konvenčních maziv obtížné [1].

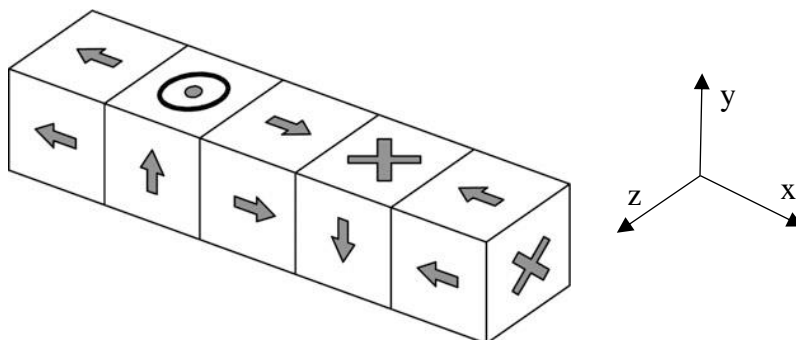
Magnetická ložiska se dělí na aktivní a pasivní. Aktivní ložiska využívají elektromagnety. Řídícím systémem lze modifikovat velikost působících sil. Oproti tomu jsou pasivní ložiska tvořena permanentními magnety a nepotřebují tedy přívod elektrické energie. Pasivní ložiska jsou mnohem méně častá než ložiska aktivní, využívají se především při menších zatíženích. Jejich největší výhodou je prakticky bezúdržbový režim, nepotřebují přívod elektrické energie a díky absenci mechanického kontaktu nedochází k opotřebení ložiska.

2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

2.1 Magnetická levitace

Magnetická levitace je ve vývoji již od roku 1912, kdy byl vypsán první patent na zařízení pracující na tomto principu. Jednou z možných aplikací magnetické levitace jsou vlaky Maglev (maglev je zkratka anglického termínu magnetic levitation, tento termín lze používat i pro popis samotného fyzikálního jevu magnetické levitace). Vlak se pohybuje díky magnetické levitaci – pomocí supravodivých magnetů zabudovaných ve vlaku. Vlak se vznáší pět až deset centimetrů nad povrchem trati. Další hojně využívanou aplikací jsou právě magnetická ložiska. V pasivních magnetických ložiscích se primárně využívají permanentní magnety. Permanentní magnety mají svoje vlastní trvalé magnetické pole. Trvalý magnet můžeme vytvořit zmagnetizováním feromagnetického materiálu (jako je například ferit) externím magnetickým polem. Takto si materiál zachová svoje magnetické vlastnosti i po odstranění magnetického pole. Hlavní výhodou trvalých magnetů je fakt, že nepotřebují být připojeny ke zdroji elektrického proudu. Z toho plynou další výhody, jako například menší náklady na údržbu, nebo relativně jednodušší konstrukce oproti aktivním magnetickým ložiskům. Na druhou stranu mají pasivní magnety i svoje nevýhody. Zvýšená teplota okolí může mít negativní vliv na magnetické pole. Oproti aktivním ložiskům také špatně snáší vibrace. Permanentní magnety mají jistá omezení v hustotě magnetického toku. Tato omezení se dají překonat uspořádáním permanentních magnetů, kterému se říká Halbachovo uspořádání. Toto rozložení magnetů bylo navrženo Klausem Halbachem. Magnety jsou orientovány tak, že magnetické pole na jedné straně tělesa je zesíleno, zatímco magnetické pole na druhé straně se úplně vyruší [2].

Na obr. 1 je vyobrazen příklad Halbachova uspořádání. Šipky znázorňují směr magnetického toku. Toto uspořádání zesiluje magnetický tok v horní části tělesa (tj. v kladném směru osy y), zatímco úplně vyruší magnetický tok na spodní části tělesa.



Obr. 1) Uspořádání magnetů [2]

K dosažení magnetické levitace musí magnetické síly překonat sílu tíhovou, případně jinou zatěžující sílu. Existují dva typy magnetické levitace – magnetostatická, které je využíváno v pasivních magnetických ložiscích nebo elektrodynamická, která se používá při aktivní levitaci.

Magnetická levitace využívá pouze permanentních magnetů. Informace o levitaci byly čerpány ze zdroje [3]. Velikost síly využitá při magnetostatické levitaci je závislá na vybraném materiálu magnetu (především na jeho hlavních vlastnostech – remanentní indukci a koercitivní síle) a velikosti využitých magnetů. V případě pasivních magnetických ložisek mají magnety nejčastěji tvar prstence, takže záleží na velikosti jejich vnitřních a vnějších průměrů a také na jejich šířce. Směr síly je dán vzájemným směrem magnetizace magnetů. Ložisko tak může využívat přitažlivých nebo odpudivých sil magnetů.

V případě magnetických ložisek, které se skládají ze tří magnetů, je například důležité zjistit sílu působící na prostřední magnet umístěný na rotoru. Tato síla ovlivňuje i celkovou tuhost magnetického ložiska.

Pro výpočet sil se nejčastěji využívají numerické metody, především metoda konečných prvků (MKP). Nevýhodou těchto metod mohou být vyšší nároky na výpočetní techniku při analýze složitějších soustav. Vysoké nároky ale při výpočtu sil u pasivních axiálních magnetických ložisek nečiní problém, protože se skládají pouze z magnetických prstenců, které leží proti sobě. Využívají se i analytické způsoby výpočtu sil, tyto metody jsou však složité (jen pro pasivní axiální ložiska je třeba řešit několik diferenciálních rovnic, aby se získala výsledná axiální síla) a proto se v praxi obvykle výpočty provádějí numericky za pomoci softwaru (v této práci použitý FEMM nebo například ANSYS).

Tyto metody často využívají tzv. Coulombovský model permanentního magnetu. Každý magnet je tedy ve výpočtu zastoupen dvěma nabitými deskami. Náboj těchto dvou desek je vzájemně opačný (což reprezentuje opačné póly magnetu).

Podle Earnshawova teorému, vydaném v roce 1842, je nemožné dosáhnout stabilní levitace pouze za pomoci permanentních magnetů. Proto se pasivní magnetická ložiska často využívají v kombinaci s mechanickými prvky nebo s aktivními magnetickými ložisky. Earnshawův teorém se však netýká časově proměnných magnetických polí, diamagnetických látek a supravodičů [4].

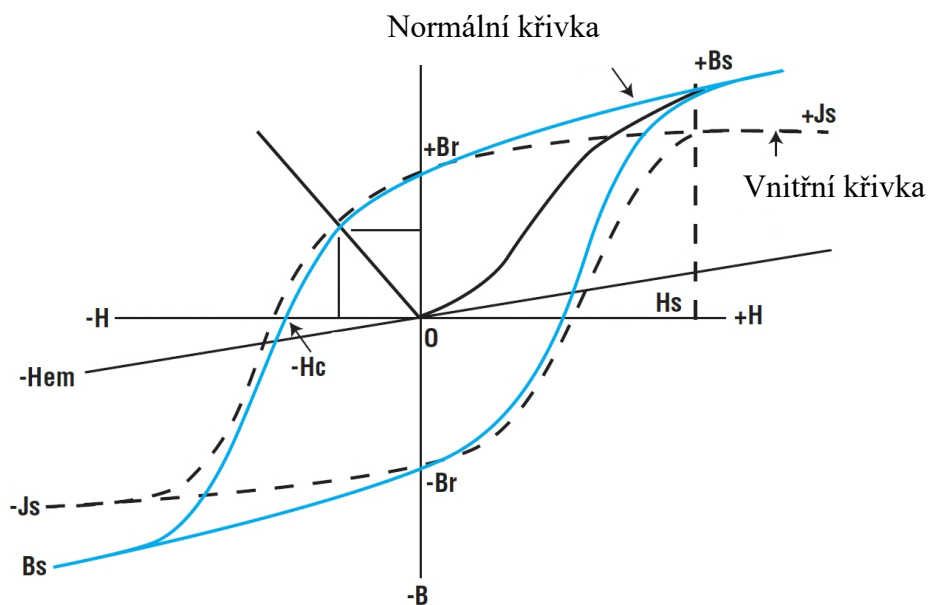
Levitace je dosažitelná tedy také za pomoci diamagnetických látek. Diamagnetické látky jsou látky, které projevují svoje magnetické vlastnosti pouze v přítomnosti vnějšího magnetického pole. Mezi takové materiály patří například grafit [4].

Magnetické levitace lze docílit i za pomoci supravodičů (Supravodiče jsou látky, které se za určitých teplot chovají jako ideální vodiče, tudíž nemají žádný elektrický odpor. Tyto teploty se nazývají kritické teploty a většinou bývají nižší než $-240\text{ }^{\circ}\text{C}$. Supravodiče 1. typu jsou supravodiče, které za účinku magnetického pole o určité kritické intenzitě magnetického pole H_c ztrácejí vodivost. Nejčastěji se jedná o čisté kovy. Supravodiče 2. typu ztrácejí vodivost v mnohem silnějších magnetických polích. Většinou se jedná o slitiny kovů. Pokud ale supravodič vystavíme elektrickému poli slabšímu než kritická hodnota H_c , tak je toto pole (jeho siločáry) vypuzováno ze supravodiče, což způsobuje levitaci. Supravodiče lze také díky jejich ideálním vlastnostem efektivně využít i při elektrodynamické levitaci [2].

2.1.1 Vlastnosti permanentních magnetů

Pro využití permanentních magnetů v praxi je třeba znát jejich vlastnosti. Pro určení vlastností je třeba znát takzvanou hysterezní smyčku. Příklad takové smyčky je uveden na obr. 2. Průběh této křivky se v praxi zjišťuje tak, že se ještě nezmagnetizovaný materiál umístí mezi dva póly elektromagnetu a je tak vystaven vnějšímu magnetickému poli. Tímto se zvyšuje hodnota H (intenzita magnetického pole). Zároveň se závisle na intenzitě magnetického pole mění magnetická indukce (B). Takto se při postupném zvyšování intenzity magnetického pole dostaneme po černé křivce až do bodu B_s , ve kterém je magnet již plně zmagnetizován. Při postupném snižování intenzity magnetického pole až na nulu dojdeme k bodu B_r . Tato hodnota se nazývá remanentní indukce. Jedná se o hodnotu indukce, která nadále působí i po skončení působení externího magnetického pole. Jakmile je obrácen průběh magnetizace (změnou směru elektrického proudu v cívce elektromagnetu), křivka postupuje až k záporným hodnotám intenzity magnetického pole, což je patrné z grafu. Postupně klesá až na nulovou hodnotu magnetické indukce, zatímco intenzita magnetického pole dosáhne hodnoty $-H_c$, která se nazývá koercitivní síla. Hodnota $-H_{ci}$ je vnitřní koercivita. Jedná se o hodnotu intenzity magnetického pole, při které je materiál plně demagnetizován. Tato hodnota je součástí druhé hysterezní smyčky, která se nazývá vnitřní. Tato smyčka vyjadřuje závislost magnetické polarizace (J) na intenzitě magnetického pole. Pokud je opět obrácen průběh magnetizace, postup křivkou se opět analogicky opakuje – procházíme bodem maximální magnetizace (magnetická indukce $-B_s$) a remanentní indukce (o hodnotě $-B_r$). Jediným rozdílem je opačná polarita magnetu. [5]

Vlastnosti permanentních magnetů jsou uvedeny vždy v katalogu dodaném výrobcem. Hlavními vlastnostmi, kterými je definován magnet (a které se používají v dalších výpočtech) je koercitivní síla a remanentní indukce.



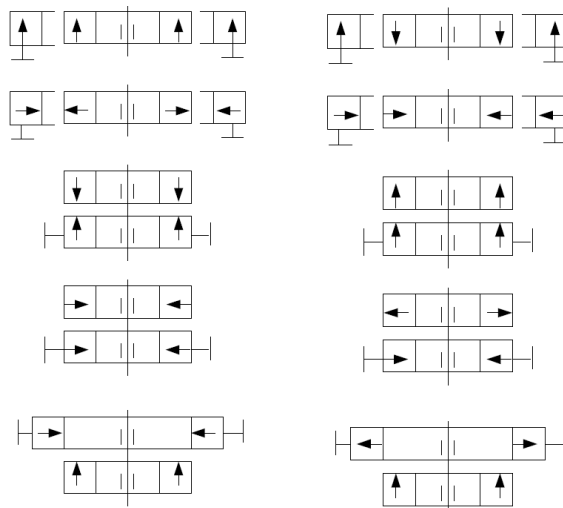
Obr. 2) Hysterezní smyčka permanentního magnetu ([5] – upraveno)

2.2 Konstrukční řešení pasivních magnetických ložisek

2.2.1 Základní příklad konstrukce pasivního magnetického ložiska

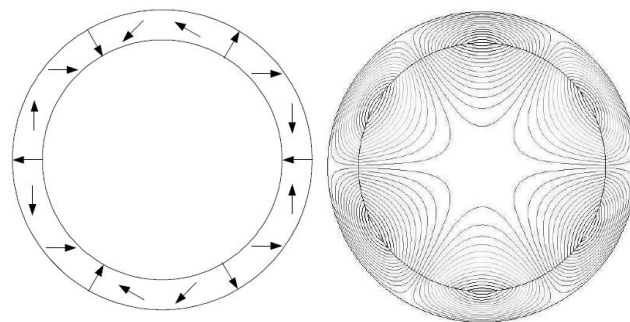
Levitace v ložisku lze dosáhnout mnoha způsoby, ať už jde o využití supravodiče nebo vířivých proudů. Nejjednodušším řešením je však využití permanentních magnetů. Jeho výhody spočívají ve vysoké spolehlivosti, relativně jednoduché konstrukci a vysoké tuhosti výsledné soustavy. Podle Earnshawova teorému nelze dosáhnout úplně stability pouze za využití permanentních magnetů – proto se často využívají zároveň s aktivními magnetickými ložisky nebo s mechanickými prvky. Permanentní magnety lze využít jak v radiálních, tak v axiálních ložiscích.

Obr. 3 uvádí uspořádání magnetů pro jednoduché konstrukce magnetických ložisek. Šipky naznačují směr magnetické indukce magnetu. Ložiska vlevo fungují na principu přitažlivých sil, zatímco ložiska vpravo fungují na principu sil odpuzivých. Tyto síly panují mezi rotující a nepohyblivou částí ložiska – rotorem a statorem. I v ložiscích s permanentními magnety lze využít Halbachova uspořádání. Jedná se o nejefektivnější uspořádání pro daný materiál. Kromě toho, že zesiluje magnetické pole uvnitř ložiska, také odstíní magnetické pole na vnější části ložiska [6].



Obr. 3) Jednoduché konfigurace magnetických ložisek [6]

Směry siločar pro případ ideálního Halbachova pole pro prstencový útvar jsou patrné z obr. 4. Na pravé části obrázku je vidět, že se na vnější části prstence nenachází žádné magnetické pole.



Obr. 4) Halbachovo uspořádání pro prstencec [6]

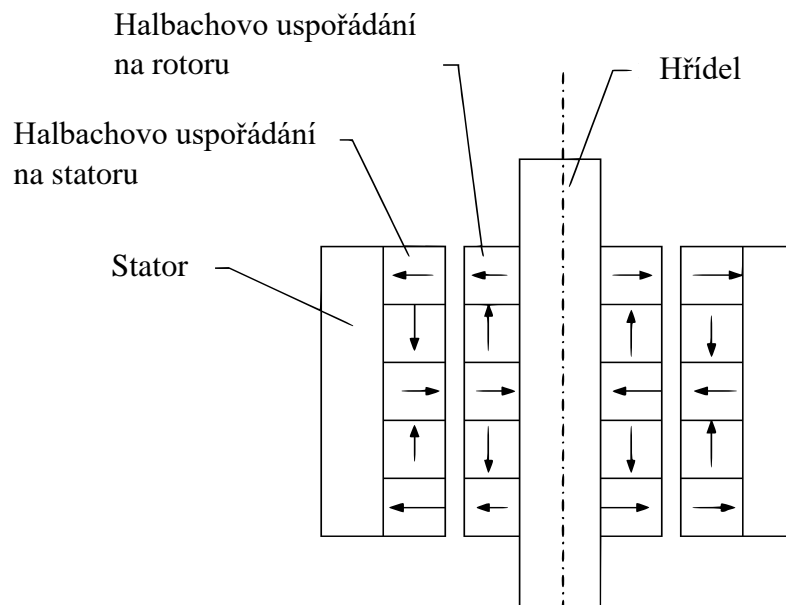
Na obr. 5 je naznačeno použití Halbachova uspořádání v praxi – průřez jednoduchým axiálním ložiskem, které je tvořeno rotorem, statorem a permanentními magnety, které jsou uspořádány na rotoru a statoru [6].

Důležitou vlastností ložisek je jejich tuhost. Tuhost vyjadřuje poměr působící síly a vychýlení, které je způsobeno touto silou. U ložisek nás většinou zajímá tuhost ve směru, jehož stupně volnosti ložisko ovládá (tzn. u axiálního ložiska nás primárně zajímá tuhost v axiálním směru).

Pro tuhost (v tomto případě axiální) platí rovnice (1):

$$K_z = -\frac{d}{dz} F_z \quad (1)$$

Tuhost také ovlivňuje samotná konstrukce ložiska. Pokud se nepoužije jednotný magnet, ale konstrukce rozdělená na části (například jako u ložiska na obr. 5), tak může tuhost pro danou soustavu až několikanásobně vzrůst [4].



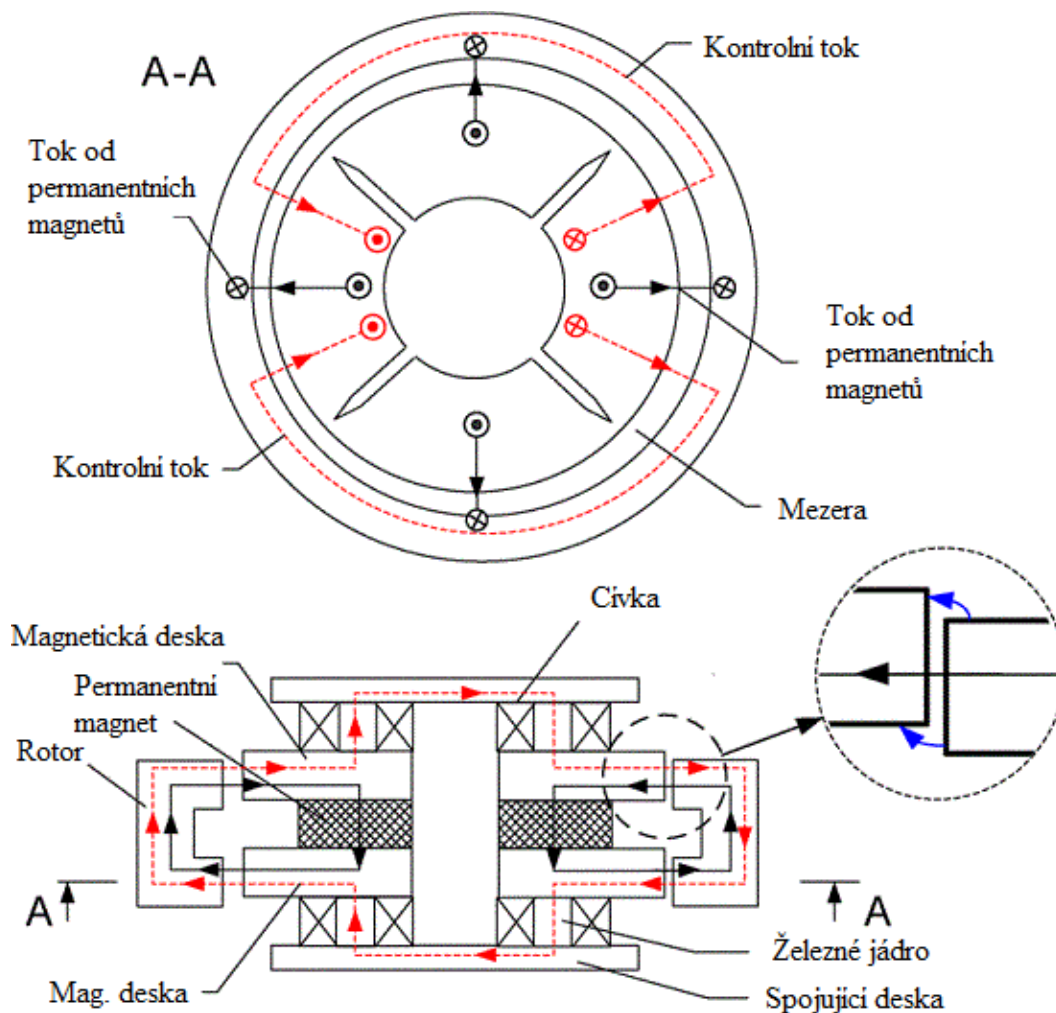
Obr. 5) Průřez ložiskem ([6] – upraveno)

2.2.2 Hybridní axiální a radiální magnetické ložisko

Hybridní axiální a radiální magnetické ložisko se v tomto případě skládá z radiálního aktivního magnetického ložiska a pasivního axiálního magnetického ložiska. Stator soustavy se skládá ze čtyř permanentních magnetů umístěných mezi dvě magnetické desky. Na statoru se dále nachází osm elektromagnetických cívek. Každá z nich je navinutá na železné jádro. Magnetické desky slouží k redukci ztrát způsobených vířivými proudy. Rotor je od statoru oddělen tenkou vzduchovou mezerou. Senzory, umístěné na statoru, zjišťují radiální vychýlení rotoru. Magnetický tok od permanentních magnetů je následně podle potřeby ovlivňován kontrolním tokem, který je vytvářen elektromagnetickými cívkami. Takto složené magnetické toky stabilizují rotor v radiálním směru. Magnetický tok je také přítomen na hranici mezi statorem a vzduchovou mezerou. Tento magnetický tok je rozložen symetricky nad a pod magnetickými deskami.

Pokud se rotor vychýlí v axiálním směru, tato rovnováha se naruší. Výsledkem narušení této rovnováhy je pasivní axiální magnetická síla, která stabilizuje rotor ve směru axiálním [4].

Na obr. 6 je popsáno hybridní magnetické ložisko. V přiblížené části je zobrazen nesymetrický tok mezi státorem a rotorem při axiálním vychýlení satoru. Právě při tomto vychýlení vzniká axiální stabilizační síla.



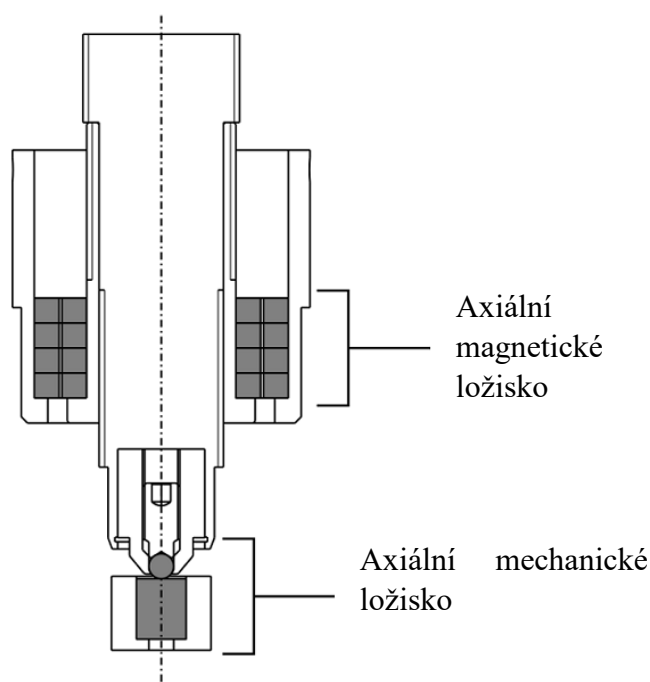
Obr. 6) Popis hybridního ložiska ([4] – upraveno)

2.2.3 Kombinace mechanického a magnetického ložiska.

V praxi se velice často využívá kombinace mechanických a magnetických ložisek. Tato kombinace se využívá proto, že za pomoci samotných permanentních magnetů (pasivních ložisek) nelze dosáhnout stabilní levitace. I přes tuto nevýhodu se pasivní ložiska stále využívají hlavně kvůli nízkým nákladům a relativní jednoduchosti konstrukce.

Stabilní levitace tak lze dosáhnout pomocí dodatečných aktivních ložisek, nebo mechanických prvků. Stabilního stavu lze dosáhnout tak, že odebereme stupeň volnosti soustavy mechanickým prvkem.

Na obr. 7 je vyobrazena soustava, která se skládá z pasivního axiálního magnetického ložiska a mechanického axiálního ložiska. Magnetické ložisko snižuje zatížení ložiska mechanického, zatímco mechanické ložisko stabilizuje ložisko magnetické. Zátěž mechanického ložiska se dá upravit změnou počtu nebo konfigurace magnetů v magnetickém ložisku. Zvýšení počtu magnetů má zároveň pozitivní vliv na tuhost soustavy, která se tímto způsobem zvětší [7].



Obr. 7) Soustava ložisek ([7] – upraveno)

2.3 Využití v praxi

Magnetická ložiska se využívají především kvůli minimalizaci tření. Z této vlastnosti plyne další výhoda magnetických ložisek – kvůli tomu, že nedochází ke kontaktu rotujících součástí, není nutno magnetická ložiska mazat. Této vlastnosti se často využívá ve vakuu, kde je mazání problematické. Pasivní magnetická ložiska se v praxi využívají díky své jednoduchosti a spolehlivosti. Magnetická ložiska se tedy využívají při malých zatíženích a v prostředích, kde na stroj nepůsobí silné vibrace. V podkapitole 2.3 je uvedeno několik zajímavých aplikací pasivních magnetických ložisek.

2.3.1 Srdeční čerpadla

Lékaři a inženýři se srdečním čerpadlem, jako alternativou transplantace srdce, zabývají od padesátých let minulého století. První pokusy o praktické zprovoznění čerpadla se prováděly na zvířatech. Tyto implantáty většinou pracovaly na principu membránového čerpadla. Konstrukteři se tak tedy snažili co nejvěrněji imitovat princip fungování skutečného srdce. První čerpadla nahrazovala pouze část činnosti srdce, nenahrazovala tedy úplně srdeční transplantaci.

První operace provedená na člověku byla vykonána až v roce 1982. Samotná operace sice proběhla úspěšně, pacient se ale musel potýkat s řadou pooperačních problémů. Tyto problémy způsobovaly především krevní sraženiny tvořící se v čerpadle. Krevní sraženiny mohou postupem času omezovat funkčnost pumpy.

Problémy činila i velikost čerpadla, díky které byla pumpa nepraktická a mohla způsobovat další zdravotní komplikace. Po prvních pokusech s membránovými čerpadly se začaly prosazovat jiné metody. Tyto metody pracovaly na naprosto odlišném principu než skutečné srdce.

V roce 1984 bylo poprvé použito odstředivé čerpadlo. Jednalo se o pokus na zvířeti a zároveň šlo o první případ, kdy čerpadlo kompletně nahradilo funkci srdce.

Od té doby se v konstrukci používají téměř výhradně odstředivá čerpadla. Postupně se také zmenšuje velikost čerpadel. Nejmenší velikost srdečního čerpadla je pouhých 27 gramů. Toto čerpadlo však nahrazuje činnost pouze levé komory srdce [8].

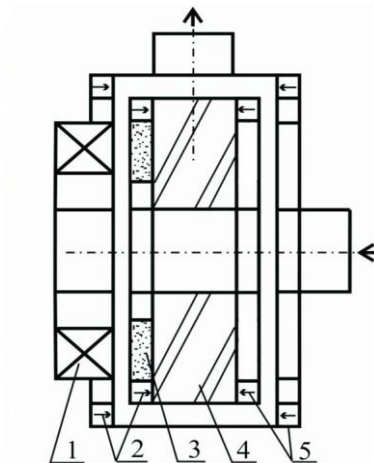
Zjistilo se, že účinky tření v ložisku čerpadla pravděpodobně způsobují krevní sraženiny. Tření je také nežádoucí z hlediska opotřebení ložiska – srdeční čerpadlo by mělo vydržet co nejdéle bez výměny, která by vyžadovala další zásah do zdraví pacienta.

Pro minimalizaci tření se tedy začala využívat aktivní magnetická ložiska. Jejich nevýhodou je však potřeba zdroje energie. Vědci z Tchajwanské univerzity navrhli čerpadlo, které funguje za pomoci pasivních magnetických ložisek [8].

Na obr. 8 je zobrazen řez tímto čerpadlem. Čerpadlo se skládá z cívky motoru (1), pasivního magnetického ložiska (2), magnetů na rotoru (3), lopatkového kola (4) a druhého pasivního magnetického ložiska (5). Šipky znázorňují směr proudění krve.

Stator zařízení je vyroben z polyuretanu. Na jeho levé straně se nahází cívka navinutá na železné jádro. Na obou stranách rotoru se nachází pasivní magnetická ložiska. Každé ložisko se skládá ze dvou magnetických prstenců. Malý prstenec je součástí rotoru a velký prstenec je vložen do statoru. Dva prstence zmagnetizované ve stejném směru se vzájemně odpuzují, čímž vytvářejí stabilizační axiální sílu. Přitažlivá síla mezi rotorem a státorem zároveň klade odpor proti radiálnímu vychýlení rotoru.

Prototyp čerpadla dokázal vyvinout objemový tok až 10 l/min při tlaku 100 mmHg (přibližně 13,33 kPa). Celé zařízení váží 150 g, na délku měří 35 mm a jeho maximální průměr je 42 mm.

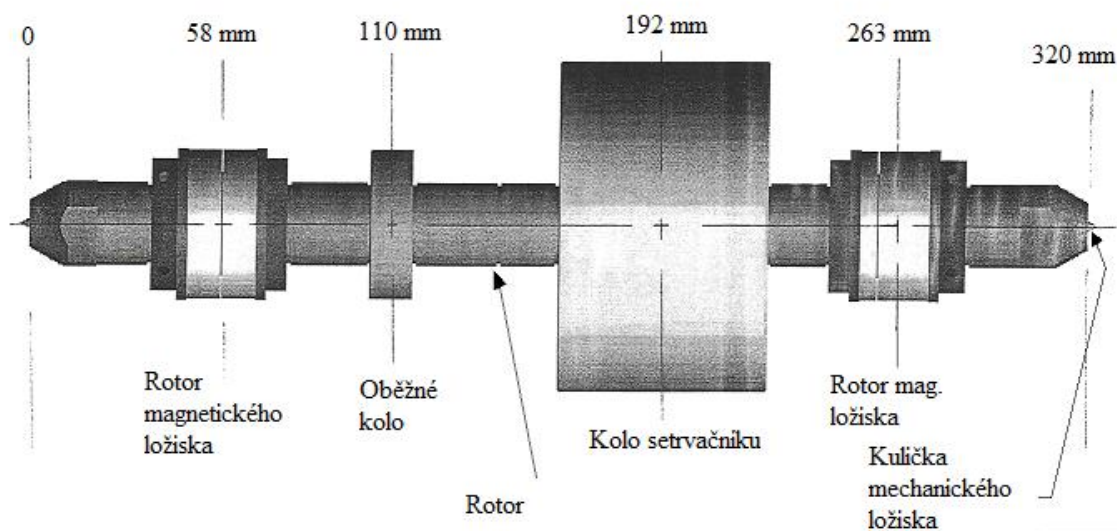


Obr. 8) Řez srdečním čerpadlem [8]

2.3.2 Využití pasivních magnetických ložisek v setrvačnicích

Kinetickou energii lze dočasně zachovat pomocí setrvačníků. Takto uchovaná kinetická energie se může později převést na energii elektrickou, která je znovu použitelná. Systém s konvenčními kuličkovými ložisky však není efektivní. Při využívání kuličkových ložisek dochází ke tření, které postupně kvůli zákonu zachování energie snižuje rychlost rotace setrvačnicku, čímž se postupně zmenšuje množství uložené kinetické energie. Proto je výhodné použít místo mechanických ložisek ložiska magnetická – dochází tak k minimalizaci třecích účinků.

Na obr. 9 je vyobrazen rotor setrvačnicku. Tento rotor byl zkonstruován pracovníky NASA v Clevelandu. Rotor je zajištěn radiálně pomocí dvou pasivních magnetických ložisek. Ložiska se skládají z magnetů umístěných na rotoru a magnetů umístěných na statoru. Tyto magnety se vzájemně odpuzují. Axiálně je hřídel zabezpečena pomocí speciálních mechanických ložisek. Tato ložiska využívají pro přenášení namáhání materiály jako je například syntetický safír nebo syntetický rubín. Výhodou oproti obyčejným mechanickým ložiskům je malý součinitel tření a velká odolnost proti opotřebení (proto se často využívají i v mechanických hodinkách). Jsou tedy ideální pro použití v setrvačnicku, protože minimalizují ztrátu energie. Samotný rotor setrvačnicku je pak roztáčen skrze oběžné kolo. Při testování bylo možné setrvačnick bez problému roztočit až na 5500 otáček za sekundu. Teoreticky by bylo možné dosáhnout i mnohem vyšších rychlostí, soustava ale nebyla při tomto konkrétním testování řádně zabezpečena proti vnějším vlivům, a tak nemohl experiment pokračovat [9].



Obr. 9) Rotor konstrukce setrvačnicku ([9] – upraveno)

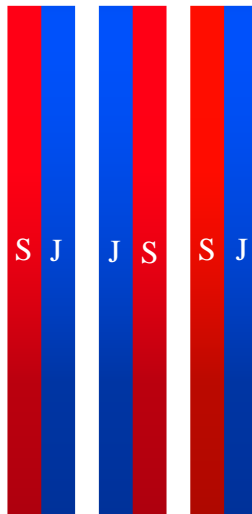
3 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ SIL

3.1 Popis konstrukce a funkce axiálního magnetického ložiska

Ložisko bylo již navrženo a zkonstruováno v rámci práce [11], všechny rozměry a technické parametry byly tedy čerpány odtud. Cílem bylo navrhnout pasivní axiální magnetické ložisko pro aplikaci v přečerpávacích zařízeních. Magnetické ložisko je realizováno pomocí tří magnetů (viz obr. 12). Z toho jsou dva magnety statorové, které jsou staticky uloženy. Mezi nimi se nachází rotorový magnet, který je připojen na hřídeli. Pro tuto konstrukci byly využity tři identické NdFeB magnety typu N42.

Magnety jsou prstencového tvaru o rozměrech 75 x 49 x 10 mm (vnější průměr x vnitřní průměr x tloušťka). Z materiálových katalogů (viz příloha 1) lze vyčíst, že pro daný magnet je zjištěna nominální hodnota remanentní indukce $B_r = 1,3 T$ a koercitivní síly o hodnotě $H_c = 943 kA/m$. Pro magnety jsou však dané i minimální i maximální hodnoty těchto vlastností (tj. hodnota vlastností by se měla pohybovat v určitém intervalu), což je třeba brát v potaz při srovnávání měřených hodnot s hodnotami zjištěnými simulací. Pracovní teplota byla uvažována jako 80 °C, magnet byl ale zvolen pro maximální pracovní teplotu do 100 °C.

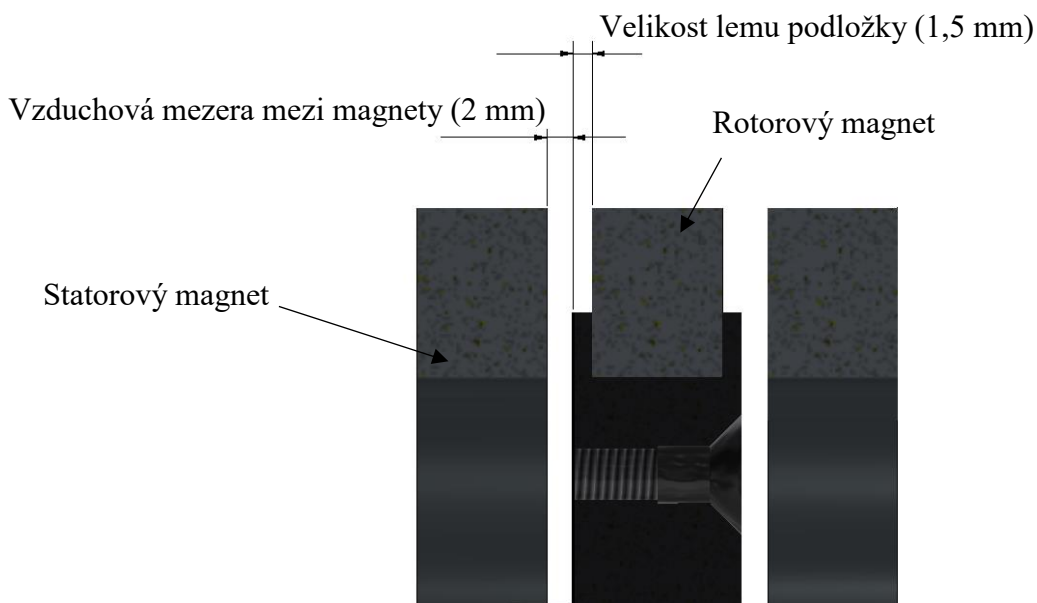
Statorové magnety se s rotorovým magnetem vzájemně odpuzují. Pokud se tedy střední (rotorový) magnet dostane blíže k jednomu ze statorových magnetů, bude na něj právě od tohoto magnetu působit větší síla. Tato síla jej bude odpuzovat, a tím pádem se magnet bude postupně vychylovat zpět do rovnovážné polohy. Orientace magnetů v ložisku je zobrazena na obr. 10.



Obr. 10) Orientace magnetů

Rotorový magnet je na hřídel o průměru 10 mm (hřídel je vyrobena ze slitiny hliníku, která je magneticky neaktivní a neovlivňuje tak magnetické pole) uchycen pomocí válcové podložky s postranními lemy o šířce 1,5 mm. Tyto lemy zvětšují axiální vzdálenost mezi rotorovým a statorovým magnetem. Podložka se skládá ze dvou částí, které jsou spojeny čtyřmi šrouby M4. Zamezení rotace magnetu je dosaženo fixací lepícím prostředkem.

Rozměry mezer mezi magnety jsou popsány na obr. 11.

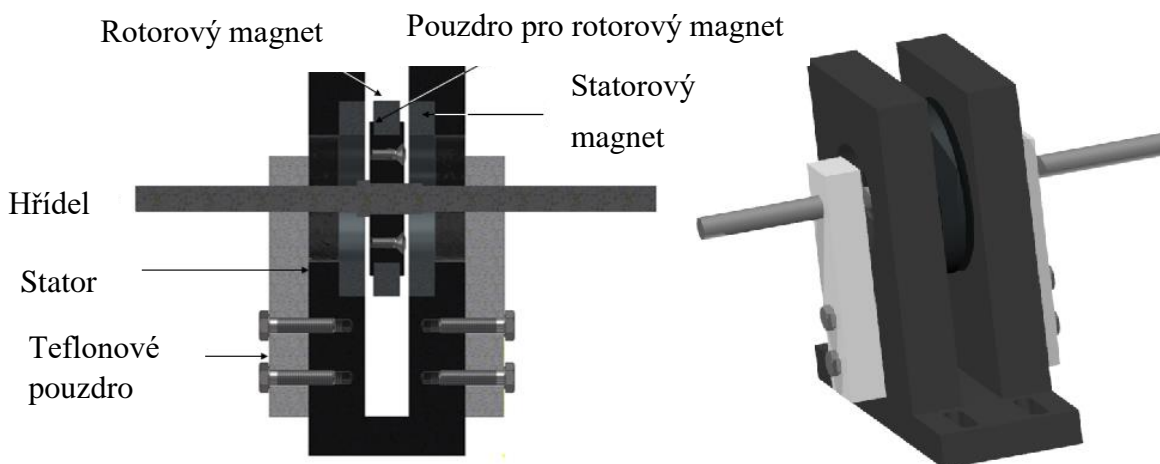


Obr. 11) Vzdálenosti mezi magnety

Konstrukce podložky byla vyrobena z neměkčeného polyvinylchloridu (PVC-U), který byl vybrán pro svou dobrou obrobiteľnosť a magnetickú nevodivosť. Podložka tak neovlivňuje magnetické pole v okolí magnetů.

Stator přečerpávacího zařízení byl pro potřeby měření sil nahrazen konzolou pro upevnění statorových magnetů. Konzola je také vyrobena z magneticky nevodivého materiálu. Magnety tak nejsou nijak ovlivňovány zbylými součástmi měřicí soustavy. Statorové magnety jsou v konzole zafixovány lepicím prostředkem. Statorové magnety jsou upevněny na upínací desce s T – drážkami. Rotor je vzhledem k celé konstrukci zajištěn pomocí teflonového pouzdra.

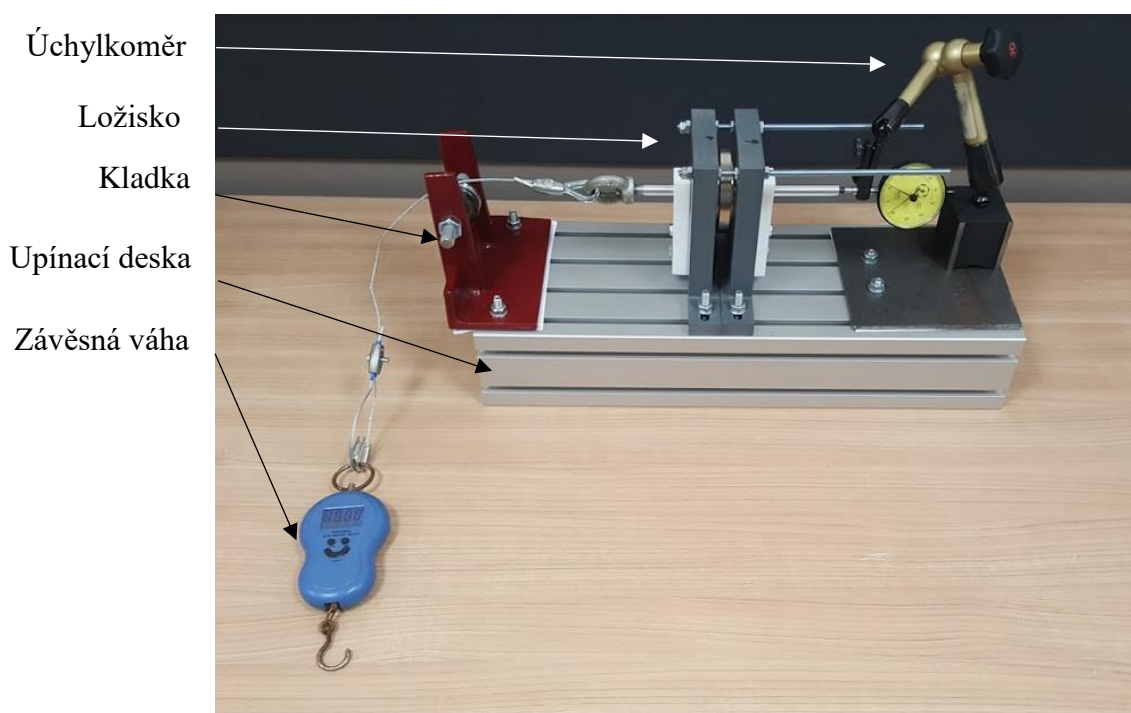
Tato původní konstrukce byla nedostatečně zajištěna vůči ohybu konzoly pro statorový magnet při zatěžování rotoru. Proto byla konstrukce zajištěna čtyřmi šrouby, které vychylování minimalizují (viz obr. 13).



Obr. 12) Konstrukce analyzovaného ložiska

Proběhla úprava axiálního vychýlování hřídele. Původně byla hřídel postupně vychýlována pomocí svěrky se závitovou tyčí. V upravené verzi měřicí soustavy se ložisko vychyluje pomocí závaží, které je k hřídeli připojeno pomocí kladky. Tímto je zajištěno působíště síly přesně v ose hřídele. Původně byl navržen nosič podobný konzole pro upevnění statorových magnetů, jednalo by se opět konstrukci vyfrézovanou z bloku neměkčeného polyvinylchloridu. Tento návrh byl ale zavržen a pro zjednodušení procesu nahrazen svařenou kovovou konstrukcí, viz obr. 13.

I přes úpravy měřicí soustavy může tato konstrukce stále negativně ovlivňovat výsledky měření. Mezi hřídelí a teflonovým pouzdem může vznikat tření, které bude mít vliv na velikost měřené síly. Podobně bude působit i tření v kladce. Dalším faktorem ovlivňujícím výsledky měření je házení rotorového magnetu. Takto měnící se vzdálenost mezi rotorovým a statorovým magnetem může mít negativní dopad na výsledky měření.



Obr. 13) Měřicí soustava

3.2 Postup a výsledky měření

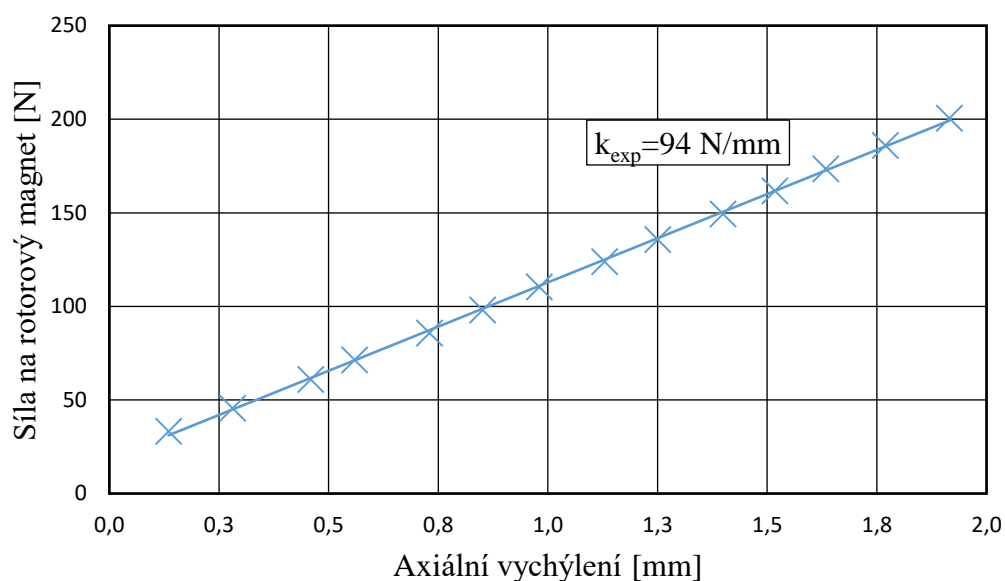
Konečná měřicí soustava je zobrazena na obr. 13. Pro vychýlení hřídele (a tím pádem i rotorového magnetu) musíme na hřídel působit určitým zatížením. Toto zatížení je vyvíjeno tíhovou silou závaží. Jako závaží byla použita nádoba s vodou. Takto lze snadno modifikovat velikost zatížení přiléváním vody.

Závaží je připojeno k hřídeli ocelovým lankem, změna směru síly je zprostředkována kladkou. Hmotnost závaží je měřena závěsnou vahou (viz obr. 13). Axiální vychýlení hřídele je měřeno úchylkoměrem, který je taktéž zachycen na obrázku.

Postupně se do nádoby přidává voda, což zvyšuje axiální zatížení hřídele. Toto zatížení vychyluje hřídel v axiálním směru.

Velikost zatížení je vypočtena jako součin hmotnosti nádoby s vodou a tíhového zrychlení ($g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$). Postupně je měřena hmotnost kbelíku s vodou a velikost vychýlení hřídele. Z těchto dat je posléze vykreslen graf závislosti axiálního vychýlení na síle.

Na obr. 14 je vykreslen graf závislosti naměřené síly na axiální výchylce hřídele. Tato závislost je lineární. Do obrázku byla doplněna i tuhost ložiska, která podle rovnice (1) odpovídá směrnici přímkové závislosti. Přímka byla proložena mezi naměřenými hodnotami metodou nejmenších čtverců. Přímka by ideálně měla procházet počátkem grafu, z obrázku je však viditelné, že přímka protíná vertikální osu výše než v nule. Tento jev je způsoben nepřesností měření. V tab. 1 je pro názornost uvedeno několik příkladů naměřených hodnot.



Obr. 14) Experimentálně zjištěné hodnoty

Tab. 1) Experimentálně zjištěné síly pro zvolené vychýlení

Vychýlení [mm]	Síla na rotorový magnet [N]
0,459	61
0,730	86
0,980	110
1,250	136
1,517	162
1,769	186
1,915	201

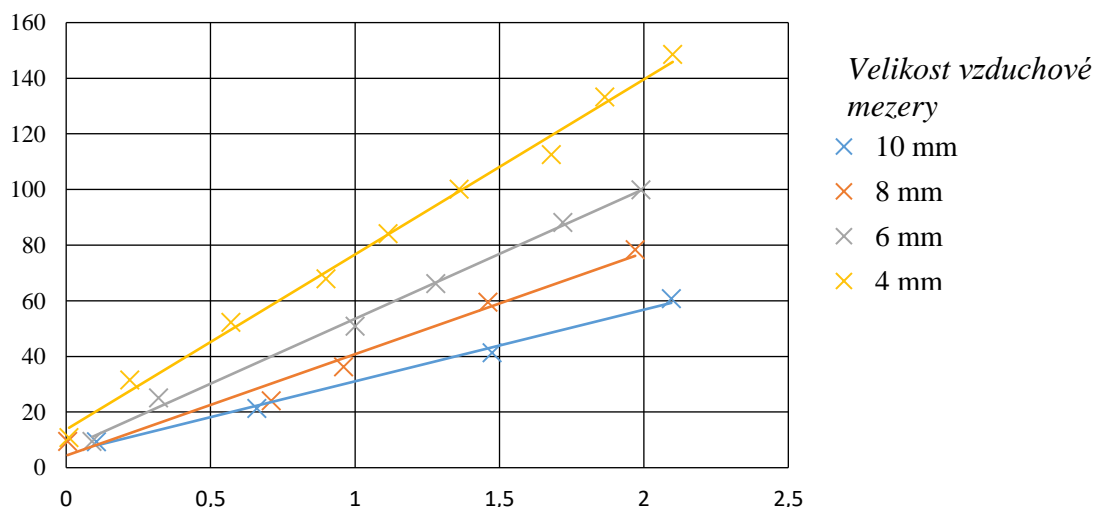
Dále byla experimentálně zkoumána změna sil při zvyšování vzduchové mezery mezi rotorovým a statorovým magnetem. Statory byly postupně posouvány dále od sebe. V tab. 2 jsou uvedeny velikosti tuhostí pro patřičné velikosti vzduchových mezer. Pro porovnání průběhů byly závislosti síly na vychýlení pro jednotlivé velikosti vzduchových mezer zakresleny do grafu (obr. 15).

Z tabulky s tuhostmi je patrné, že tuhost ložiska při zvyšování vzduchové mezery velmi rychle klesá. Toto je viditelné také z grafu, velikost sil pro určité vychýlení taktéž se zvyšující se vzduchovou mezerou rapidně klesá. Síly byly měřeny pouze pro vychýlení do přibližně 2 mm. Pokud bychom pro větší vzduchovou mezeru magnet vychylovali dále, síla pro úplné vychýlení rotorového magnetu (statorový magnet se tedy dotýká lemu rotorového magnetu) je vyšší než v původním případě (tj. pro původní velikost vzduchové mezery).

Tab. 2) Experimentálně zjištěné tuhosti pro různé velikosti vzduchových mezer

Vzduchová meze [mm]	Tuhost ložiska [N/mm]
2	94
4	62
6	47
8	36
10	26

Pozn.: Pojmem vzduchová meze se rozumí vzdálenost mezi statorovým magnetem a lemem podložky rotorového magnetu, viz obr. 11. Původní velikost vzduchové mezery je 2 mm.



Obr. 15) Závislosti sil pro rozdílné velikosti vzduchových mezer

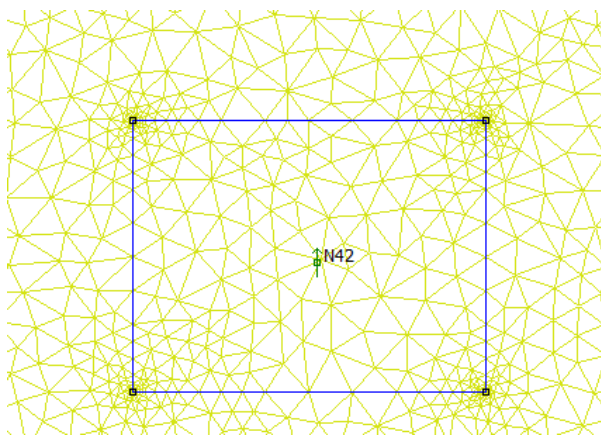
4 SIMULACE V PROGRAMU FEMM

Pro simulaci modelu magnetického ložiska byl využit program FEMM. Pro výpočty je v tomto programu využito metody konečných prvků. Metoda konečných prvků (často označována jako FEM z anglického finite element method) je numerická metoda, která je velmi často využívána ve vědě a inženýrství. Principem metody konečných prvků je přibližné řešení často analyticky neřešitelných diferenciálních rovnic. Celá vyšetřovaná součást je rozdělena na mnoho menších oblastí (například ve tvaru trojúhelníků), které se vzájemně nepřekrývají. Tyto části se nazývají konečné prvky a tvoří takzvanou výpočetní síť (mesh). Příklad těchto oblastí je uveden na obr. 16. V tomto případě je uvedeno rozdělení profilu jednoho z analyzovaných magnetů. V těchto oblastech je diferenciální rovnice aproximována jednoduchým polynomem. Tyto rovnice musí být vypočítány tak, aby se výsledky na hranicích jednotlivých oblastí vzájemně rovnaly. Výsledkem je součet řešení rovnic ve všech oblastech. Pokud je zkoumané těleso rozděleno na dostatečné množství oblastí, výsledek se přibližně rovná skutečným hodnotám. Naopak příliš jemná síť může způsobit chybu [12].

FEMM (z anglického Finite Element Method Magnetics) je volně dostupný program pro řešení magnetických výpočtů pomocí metody konečných prvků (MKP). Konkrétně je schopen řešit jak lineární, tak nelineární magnetostatické problémy. Také umí pracovat s časově závislým magnetickým polem a elektrostatickými problémy. Problémy řeší buď zadané planárně – tedy ve 2D, nebo axisymetricky, kdy je geometrie definována dvojrozměrně, ale program si rotací kolem osy převede výpočet do prostoru. Hlavními výhodami FEMMu je jeho snadná dostupnost, relativně nízké nároky na výpočetní techniku a velká nabídka uživatelských rozšíření a knihoven (program je napsán v jazyce LUA) [12]

4.1 Příprava simulace

Pro simulaci bylo využito axisymetrie, která je pro řešení daného problému nejvýhodnější. Celá geometrie (obr. 17) je tedy otáčena kolem osy z (vertikální osa).



Obr. 16) Výpočetní síť magnetu

Geometrii zkoumaných těles lze importovat z jiných aplikací (například Autodesk Inventor), což může být prospěšné pro složitější útvary. V tomto případě byla kvůli relativní jednoduchosti problému geometrie definována přímo v prostředí programu FEMM. Geometrie je určena body, které jsou definovány souřadnicemi. Tyto body jsou následně spojeny křivkami a úsečkami, které vytyčují oblasti. Vzdálenosti hran středního a bočního magnetu jsou v rovnovážné poloze 3,5 mm. Z toho 2 mm jsou vzduchová mezera a 1,5 mm je nevyužitelné místo dané konstrukcí ložiska (tloušťka lemu vymezující podložky, viz kapitola 4.1, popis konstrukce axiálního magnetického ložiska). Magnety mají tvar prstence a jejich rozměry jsou 75x49x10 mm (vnější průměr x vnitřní průměr x tloušťka). Byly modelovány pouze tři magnety (dva boční statorové magnety a prostřední rotorový magnet), materiály zbytku konstrukce ložiska nejsou magneticky aktivní (jsou užity polymery a slitiny hliníku, které nejsou magnetické), a tudíž nemají vliv na výsledek simulace. Obdélníková oblast obklopující magnety pouze vytyčuje úsek, na kterém probíhá výpočet, a může být modifikována do libovolných rozměrů a tvarů dle potřeby simulace.

Jednotlivým oblastem jsou přiřazeny vlastnosti. Tyto jsou vloženy do daných oblastí pomocí zelených ikon, viz. obr. 17. Vlastnosti oblastí lze vybrat z knihoven přiložených v programu. Půlkruhová oblast kolem magnetů je vyplněna vzduchem. Vzduch je charakterizován relativní permeabilitou μ_r , která je rovna jedné. Vlastnosti magnetů použitých v ložisku nejsou obsaženy v knihovnách materiálů v FEMM, bylo tedy třeba materiál definovat samostatně. Permanentní magnet je ve FEMM primárně charakterizován hodnotou koercitivní síly (H_c) a svou relativní permeabilitou. Hodnota koercitivní síly byla zjištěna z tabulek, viz příloha 1. Pro použitý magnet (N42) je hodnota koercitivní síly $H_c = 943 \text{ kAm}^{-1}$. V tabulkách je dáno rozpětí koercitivních sil, pro potřeby simulace byla použita střední hodnota.

Permeabilita magnetu se vypočítá podle rovnice (2), kde B_r je remanence magnetu, která byla také zjištěna z katalogů výrobce. Pro magnet N42 byla zjištěna hodnota $B_r = 1,3 \text{ T}$. Rovnice byly čerpány z literatury [10].

$$\mu = \frac{B_r}{H_c} \quad (2)$$

Následně byla z permeability vypočítána dle vztahu (3) relativní permeabilita magnetu, což je hodnota využitá pro definici magnetu v simulaci. Tímto způsobem vypočtená relativní permeabilita pro magnet N42 nabývá hodnoty 1,12.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (3)$$

Hodnota μ_0 je relativní permeabilita vakua jejíž hodnota je určena rovnicí (4).

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \text{H} \cdot \text{m}^{-1} \quad (4)$$

Pro permanentní magnety je nutné definovat směr magnetizace. Ten je znázorněn zelenými šipkami na obr. 17. Šipky ukazují ve směru severního pólu permanentního magnetu (tj. je zřetelné, že se boční magnety se středovým magnetem vzájemně odpuzují).

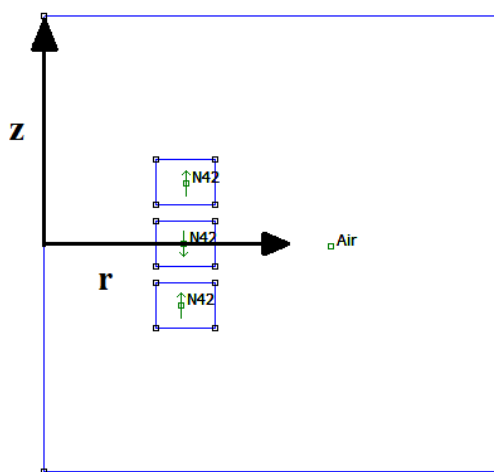
4.2 Výsledky simulace

Po vyřešení lze zjistit fyzikální vlastnosti ložiska. Jednou z nejdůležitějších vlastností je magnetická indukce, viz obr. 18. Ze siločar je zřejmé, že jsou magnety orientovány správně (siločáry rotorového magnetu jsou „vytlačovány“ ven z magnetu působením statorových magnetů). Magnetická indukce nabývá maximálních hodnot na vnitřních a vnějších průměrech magnetů (fialově zbarvená místa). Maximální hodnota magnetické indukce je 1,48 T. Malé velikosti magnetické indukce mezi magnety (modře zbarvená místa) jsou způsobené vzájemným vyrušením magnetických polí.

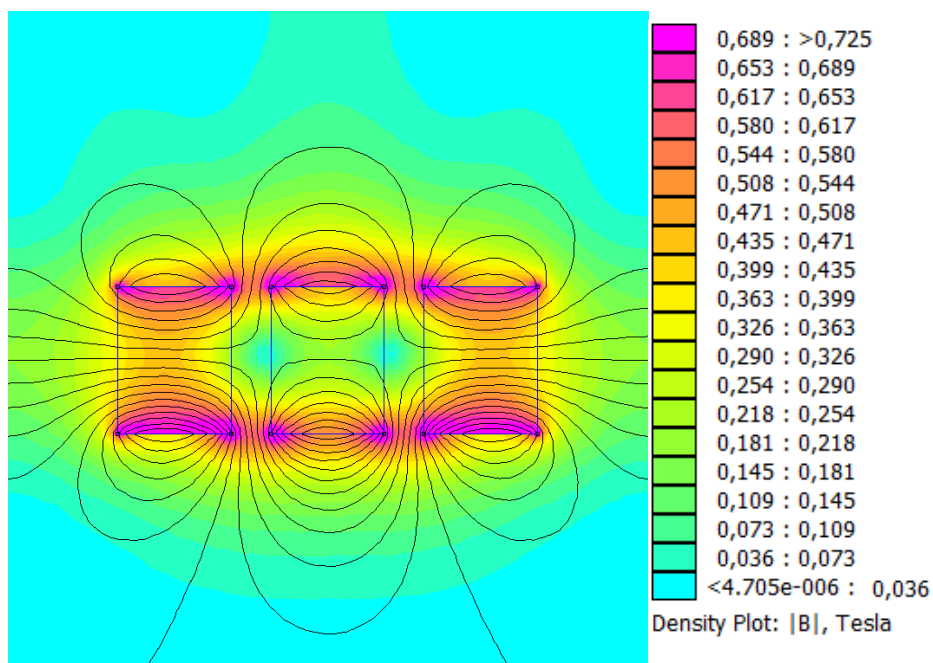
Hlavním úkolem výpočtů v programu FEMM bylo zjištění sil působících na prostřední magnet (na rotoru). Hodnoty byly později porovnány s naměřenými hodnotami na reálném ložisku. Tohoto bylo dosaženo modifikací geometrie postupným vychylováním magnetu z rovnovážné polohy. Pro názornost byla geometrie z obr. 17 orotována do polohy, ve které se ve skutečnosti používá (tj. osa z je nyní horizontální a osa r vertikální). Maximální vychýlení středního magnetu jsou dva milimetry. Síla na střední magnet je součtem účinků obou krajních magnetů. V tab. 3 je uvedeno několik příkladů síly pro dané vychýlení.

Tab. 3) Síla působící na magnet v závislosti na axiálním vychýlení

Vychýlení [mm]	Síla na prostřední magnet [N]
2,0	234
1,8	210
1,6	182
1,4	158
1,2	134
1,0	112
0,8	90
0,6	66
0,4	44
0,2	22

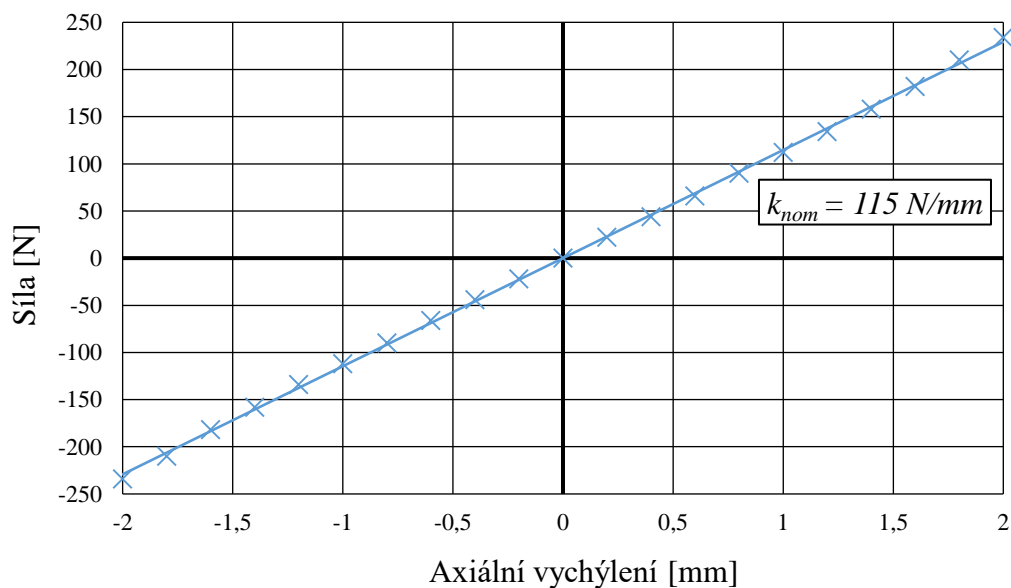


Obr. 17) Geometrie využitá v simulaci



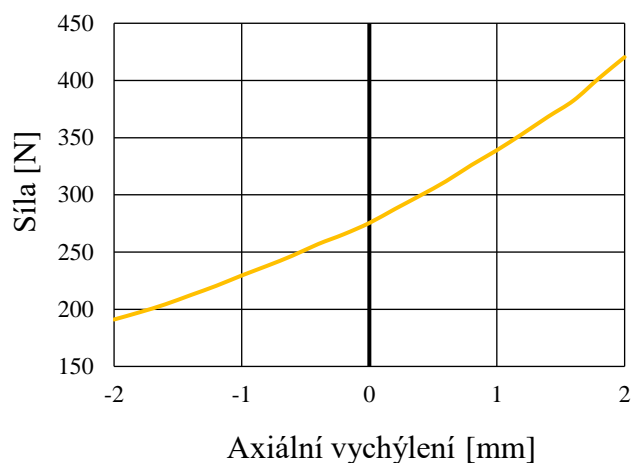
Obr. 18) Rozložení magnetické indukce

Na obr. 19 je graf závislosti působící síly na vychýlení rotorového magnetu. Tato závislost je přímková. Z rovnice (1) lze odvodit, že velikost tuhosti ložiska je rovna velikosti směrnice této přímky. Tato přímka byla proložena nasimulovanými daty pomocí metody nejmenších čtverců. Takto bylo zjištěno, že tuhost ložiska o nominálních hodnotách koercivity a remanentní indukce je $k_{nom} = 115 \text{ N/mm}$.

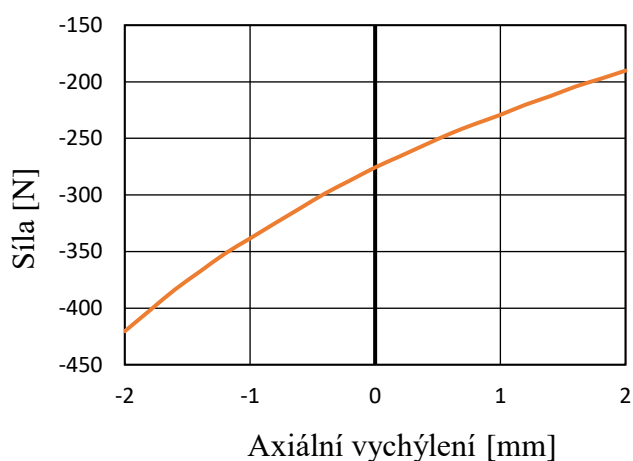


Obr. 19) Závislost síly na vychýlení středního magnetu

Dále byla také zkoumána závislost působící síly na vychýlení u obou statorových magnetů. Závislost je vyjádřitelná polynomem druhého stupně (obr. 20, obr. 21). Síla na středový magnet se dá také vyjádřit jako součet hodnot sil obou statorových magnetů.



Obr. 20) Závislost síly na levý statorový magnet



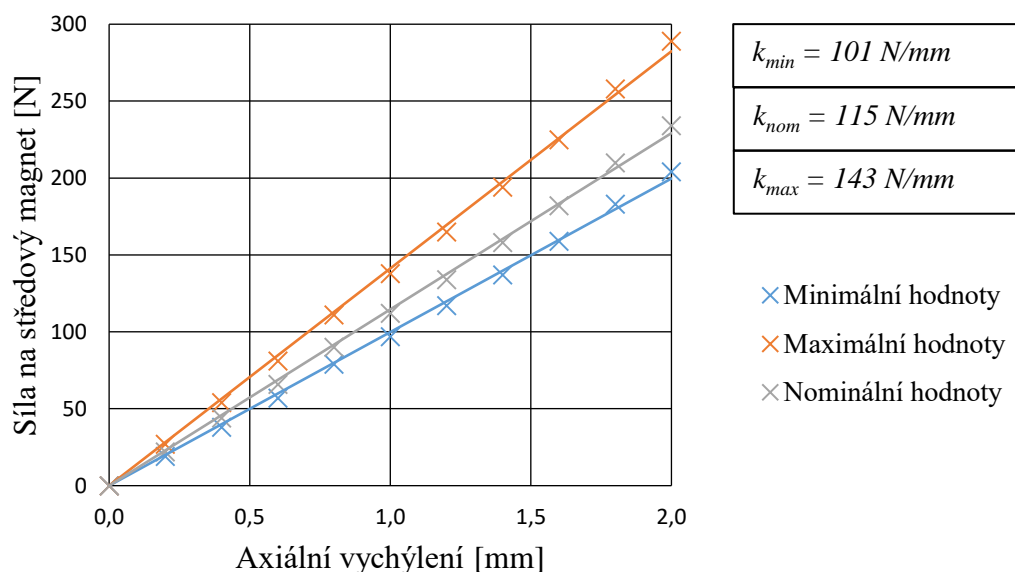
Obr. 21) Závislost síly pro pravý statorový magnet

Předchozí výpočty byly stanoveny pro nominální hodnoty koercitivních sil a remanentních indukci. Po výrobě permanentního magnetu se hodnoty těchto veličin mohou nacházet v intervalu mezi minimální a maximální hodnotou, které jsou uvedeny v katalogu pro každý materiál (viz příloha 1). V tab. 4 je uvedeno rozpětí těchto hodnot.

Zároveň byla podle předchozích postupů vypočtena relativní permeabilita, která je potřebná pro definici materiálu v programu FEMM. Pro několik příkladů vychýlení byla uvedena síla, která působí na stator ložiska jak při maximálních, tak minimálních hodnotách remanence a koercivity (obr. 22). Vlastnosti byly definovány vždy pro všechny tři magnety stejně.

Tab. 4) Rozpětí hodnot vlastností magnetu

	B_r [T]	H_C [kA/m]	μ_r [-]
Minimální hodnota	1,28	860	1,18
Nominální hodnota	1,32	943	1,12
Maximální hodnota	1,35	1 027	1,05



Obr. 22) Simulace pro minimální a maximální hodnoty vlastností magnetů

Byla zjištěna i tuhost pro minimální a maximální hodnoty koercitivní síly a remanentní indukce. Minimální tuhost je $k_{min} = 101 \text{ N/mm}$ a maximální tuhost se rovná $k_{max} = 143 \text{ N/mm}$.

V porovnání s nominálními hodnotami je mezi minimálními a maximálními hodnotami vidět znatelný rozdíl. To je třeba mít na paměti při srovnávání výsledků měření a simulace, protože není jisté, jaké mají magnety v reálném ložisku vlastnosti. Ideálně by ale měly spadat do intervalu hodnot uvedených výrobcem.

Pro názornost byly zvoleny ještě dva NdFeB magnety, jejichž nominální velikosti vlastností jsou popsány v tab. 5 (zdrojem jsou katalogy výrobce, přičemž byly vybrány střední hodnoty).

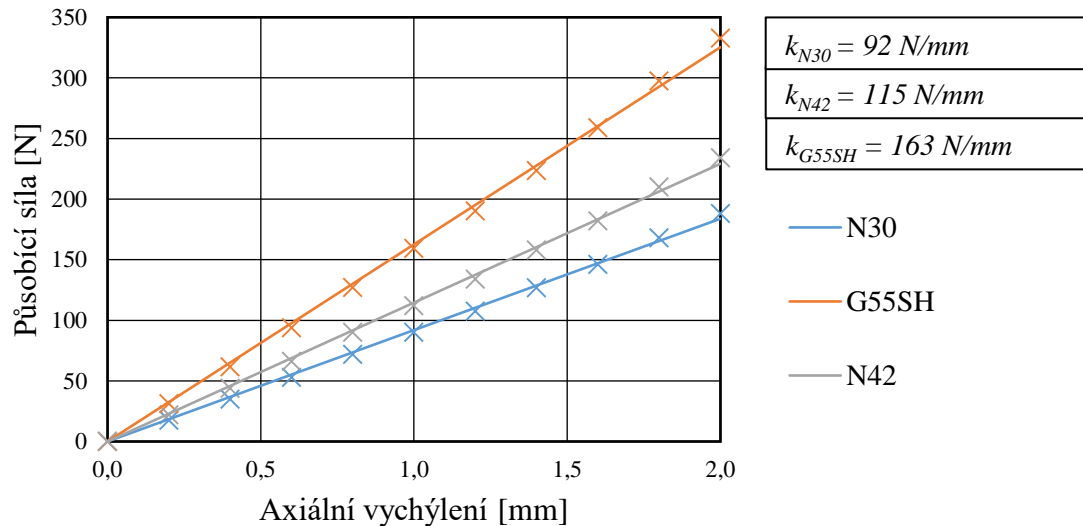
Tyto katalogy jsou součástí přílohy, viz příloha 2 pro magnet N30 příloha 3 pro magnet G55SH.

Na obr. 23 jsou znázorněny síly po axiálním vychýlení pro rozdílné magnety. Tento graf slouží k tomu, aby ukázal vliv vlastností magnetu na výslednou axiální sílu na střední magnet. Podle potřeby se musí vybrat vhodný magnet pro danou aplikaci.

Výběr magnetu ovlivňuje celkovou tuhost ložiska. Pro nominální hodnoty koercivity a remanentní indukce platí $k_{N30} = 92 \text{ N/mm}$ pro magnet N30 a $k_{G55SH} = 163 \text{ N/mm}$ pro magnet G55SH.

Tab. 5) Vlastnosti některých NdFeB magnetů

	B_r [T]	H_c [kA/m]	μ_r [-]
N30	1,12	828	1,06
G55SH	1,46	1 102	1,05
N42	1,30	943	1,12



Obr. 23) Velikosti sil pro rozdílné NdFeB magnety

4.3 Vliv teploty na ložisko

Teplota prostředí má zásadní vliv na efektivitu magnetu, a tudíž i na funkci celého ložiska. Se stoupající teplotou klesá koerzivní síla magnetu a zároveň stoupá relativní permeabilita. Je tedy nutné vyšetřit vliv teploty na sílu, kterou se navzájem odpuzují magnety v ložisku. Závislosti změny magnetických vlastností materiálu jsou definovány teplotními koeficienty, které jsou pro daný materiál uvedené v katalogu materiálů od výrobce (viz příloha 1). [13]

V rámci simulace byly měřeny změny vlastností magnetu N42, který je použit v reálném modelu ložiska. Hodnoty vypočtené v předchozích simulacích jsou vztaženy na teplotu 20 °C. Pro výpočet remanentní indukce za rozdílné teploty lze podle [13] využít následující vztah (5).

$$B_r = B_{r20} \cdot \left[1 + \frac{\alpha_B}{100} \cdot (T - 20) \right] \quad (5)$$

Přičemž B_{r20} je hodnotou remanentní indukce při 20 °C, α_B je teplotní koeficient změny remanentní indukce a T je teplota permanentního magnetu. Podobně lze určit velikost koerzivní síly dle vztahu (6).

$$H_c = H_{c20} \cdot \left[1 + \frac{\alpha_H}{100} \cdot (T - 20) \right] \quad (6)$$

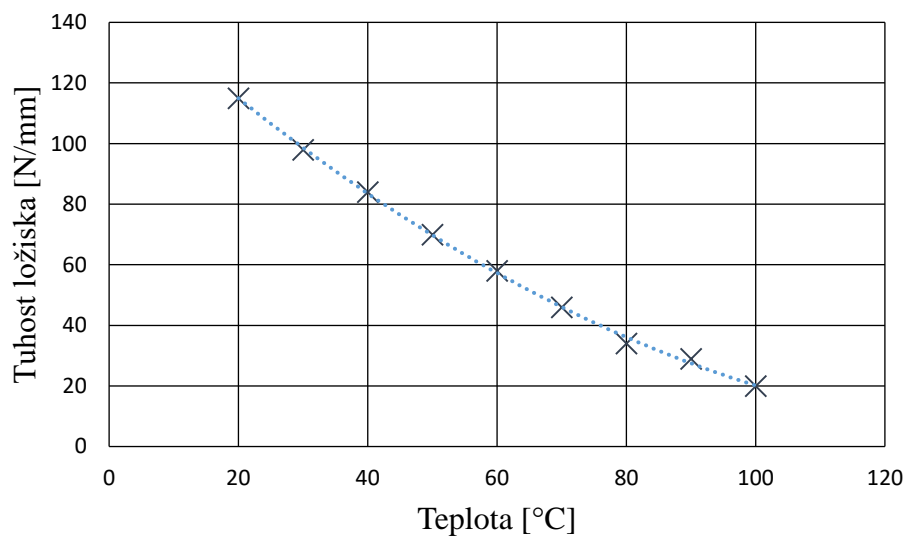
Podobně jako u vztahu (5) je H_{c20} koerzivní síla při 20 °C a α_H je teplotní koeficient změny remanentní indukce. Hodnoty vlastností magnetů pro teplotu 20 °C jsou vždy součástí katalogu materiálů dodaného výrobcem (viz příloha 1).

Pro magnet N42 je dle katalogu hodnota teplotních koeficientů $\alpha_B = -0,12$ a $\alpha_H = -0,75$. Vypočtené hodnoty vlastností magnetu pro některé teploty jsou uvedeny v tab. 6.

Tab. 6) Vlastnosti permanentního magnetu N42 pro rozdílné teploty

T [°C]	H_C [kA/m]	B_r [T]	μ_r [-]
20	943,00	1,30	1,1
40	784,55	1,27	1,3
60	646,10	1,24	1,5
80	507,65	1,21	1,9
100	369,20	1,18	2,5

Na obr. 24 byla vykreslena závislost tuhosti na teplotě okolí ložiska. Z grafu lze zjistit, že s teplotou velikost tuhosti podstatně klesá. Před využitím magnetického ložiska užívajícího pouze permanentní magnety je tedy třeba vybrat materiál, který je pro dané prostředí adekvátní (hodnoty teplotních koeficientů se pro každý materiál liší, tj. některé magnety mohou lépe odolávat vyšším teplotám). Teplota magnetu za žádných okolností nesmí dosáhnout hodnoty Curieovy teploty, při které permanentní magnet ztrácí své feromagnetické vlastnosti. Curieova teplota je součástí katalogových hodnot jednotlivých magnetů a konkrétně pro magnety N42 je rovna 310 °C.



Obr. 24) Tuhost ložiska pro různé teploty

4.4 Změna rozměrů permanentních magnetů

Dále bylo vyšetřováno, jak ovlivní změna rozměrů magnetů síly působící na rotorový magnet při určitém vychýlení. Tohoto může být využito, pokud je třeba minimalizovat náklady (při pořizování menších magnetů) nebo minimalizovat hmotnost soustavy při zachování funkčnosti ložiska pro požadované podmínky. Zároveň může zvětšení magnetu sloužit pro zvýšení magnetických sil, aniž by se pořizovaly nákladnější magnety o vyšší koercitivní síle.

Nejdříve bylo pozorováno, jak se mění velikost síly při změně tloušťky statorových magnetů. V simulaci se měnily tloušťky obou statorových magnetů, zatímco tloušťka rotorového magnetu má stále stejnou tloušťku (původní tloušťku 10 mm). Pro porovnání byly uvedeny i hodnoty sil při původní tloušťce magnetu. Dále byla postupně zvětšována tloušťka rotorového magnetu, zatímco velikosti statorových magnetů byly zachovány. Pro následující simulace byly využity nominální vlastnosti magnetů N42. Tuhosti pro takto pozměněné rozměry jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 7) Tuhost ložiska po změně tloušťky magnetu

Tloušťka statorového magnetu [mm]	Tloušťka rotorového magnetu [mm]	Tuhost ložiska [N/mm]
5	10	89
10		115
15		134
20		141
10	5	84
	10	115
	15	131
	20	141

Z výsledků je patrné, že tuhosti se při změně jak statorového, tak rotorového magnetu mění přibližně stejně. Pokud je tedy potřeba zvětšit axiální síly působící na rotorový magnet, je možné zvětšit pouze prostřední magnet. Takto můžeme ušetřit výdaje za materiál, protože budeme zvětšovat pouze jeden magnet.

Velikost síly ovlivňuje i změna průměru magnetů. Průměr může být nutné změnit kvůli celkové konstrukci stroje, ve které má být ložisko uloženo. Opět byl nejdříve měněn průměr obou statorových magnetů, zatímco byly zachovány tloušťky všech magnetů a průměr rotorového magnetu. Měněn byl vnitřní průměr, vždy krokem o velikosti 5 mm. Analogicky byly takto měněny také průměry rotorových magnetů, zatímco byly zachovány průměry statorových magnetů. Pro porovnání byla opět uvedena i původní hodnota průměrů (tj. 75 x 49 mm). Tuhosti pro takto pozměněné magnety jsou v tab. 8.

Při změně vnitřního průměru magnetů se vždy tuhost zmenšuje, ať jej zvětšujeme nebo zmenšujeme (to ale platí jen v případě změny rozměrů buď statorového, nebo rotorového magnetu, pokud měníme oba najednou, situace se mění, viz tab. 8). Síly pro změnu vnitřního průměru rotorového a statorového magnetu se přibližně rovnají. Je tedy jedno, jestli se mění vnitřní průměry rotorového magnetu nebo statorových magnetů, vždy dosáhneme přibližně stejné výsledné tuhosti ložiska.

Bylo také testováno, jak se změní tuhost při změně vnějšího průměru. Nejdříve byly měněny vnější průměry statorových magnetů, dále byly zjišťovány změny sil po změně vnějšího průměru rotorového magnetu. Všechny ostatní rozměry byly zachovány, podobně jako v minulém případě.

Z tabulky je patrné, že při zmenšování vnitřního průměru je změna tuhosti mnohem větší než při zmenšování průměru vnějšího. Stejně jako v předchozím případě jsou tuhosti po změně rozměrů statorových magnetů a rotorového magnetu přibližně stejné.

Tab. 8) Tuhost ložiska po změně průměru magnetu

	Průměry statorového magnetu [mm]	Průměry rotorového magnetu [mm]	Tuhost ložiska [N/mm]
Změny vnitřního průměru	75 x 39	75 x 49	74
	75 x 44		89
	75 x 49		115
	75 x 54		80
	75 x 49	75 x 39	73
		75 x 44	88
		75 x 49	115
		75 x 54	81
Změny vnějšího průměru	70 x 49	75 x 49	64
	75 x 49		115
	80 x 49		79
	85 x 49		52
	75 x 49	70 x 49	63
		75 x 49	115
		80 x 49	80
		85 x 49	53

Nakonec bylo analyzováno, jak se mění tuhosti ložiska při změně rozměrů všech magnetů najednou (tedy zároveň jak rozměry rotorového magnetu, tak statorového magnetu).

V tab. 9 jsou uvedeny tuhosti pro změněné tloušťky všech magnetů. Z hodnot je zřejmé, že ve srovnání s tab. 7 jsou hodnoty tuhosti ložiska vždy větší. Tato změna však není nijak zásadní. Ve většině případů je tedy pravděpodobně výhodnější zvětšení tloušťky pouze u rotorového magnetu.

Tab. 9) Tuhost ložiska po změně tloušťek všech magnetů

Tloušťka všech magnetů [mm]	Tuhost ložiska [N/mm]
5	66
10	115
15	138
20	155

Do tab. 10 byly zaznamenány tuhosti pro průběžnou změnu vnitřního průměru všech magnetů. Z tabulky vyplývá, že jakkoli změníme vnitřní průměr magnetů, celková tuhost magnetického ložiska se vždy zmenší. Změna tuhosti ložiska je pro změnu vnitřního průměru všech magnetů poměrně malá (oproti změnám samotného rotorového magnetu nebo změnám obou statorových magnetů).

V téže tabulce (tab. 10) jsou popsány tuhosti po změně vnějšího průměru všech magnetů. Tyto změny jsou oproti změnám sil při změně vnitřního průměru podstatnější. Lze si všimnout, že velikost působící axiální síly na rotorový magnet lze zvýšit zvětšením vnějších průměrů všech magnetů. Pro zvýšení tuhosti je tak třeba zvýšit vnější průměr magnetu.

Nejefektivnější možností zvýšení tuhosti je však zvýšení tloušťky pouze u rotorového magnetu. Z naměřených hodnot bylo zjištěno, že zvětšení tloušťky prostředního magnetu může zásadně ovlivnit tuhost ložiska. Zároveň je tato možnost výhodná i z ekonomického hlediska, protože zvětšujeme rozměry pouze jednoho magnetu.

Tab. 10) Tuhost ložiska po změně průměrů všech magnetů

	Průměry všech magnetů [mm]	Tuhost ložiska [N/mm]
Změna vnějších průměrů	70 x 49	88
	75 x 49	115
	80 x 49	126
	85 x 49	138
Změna vnitřních průměrů	75 x 39	104
	75 x 44	110
	75 x 49	115
	75 x 54	107

Síly podstatně ovlivňuje vzduchová mezera mezi statorovým a rotorovým magnetem. Proto byl dále zkoumán vliv velikosti této vzdálenosti. Velikost mezery byla postupně po dvou milimetrech zvětšována z původní hodnoty 2 milimetrů až na hodnotu 10 milimetrů.

Nejedná se ale o čistou vzdálenost mezi magnety, k hodnotě velikosti vzduchové mezery se musí ještě připočítat velikost tloušťky lemu pouzdra rotorového magnetu (velikost 1,5 mm).

Do tab. 11 byly vypsány tuhosti pro jednotlivé velikosti vzduchové mezery (včetně původní hodnoty vzduchové mezery 2 mm). Je vidět, že se tuhosti se zvětšující se vzduchovou mezerou velmi rychle zmenšují. Pro zvýšení tuhosti je tedy nutné velikost vzduchové mezery minimalizovat.

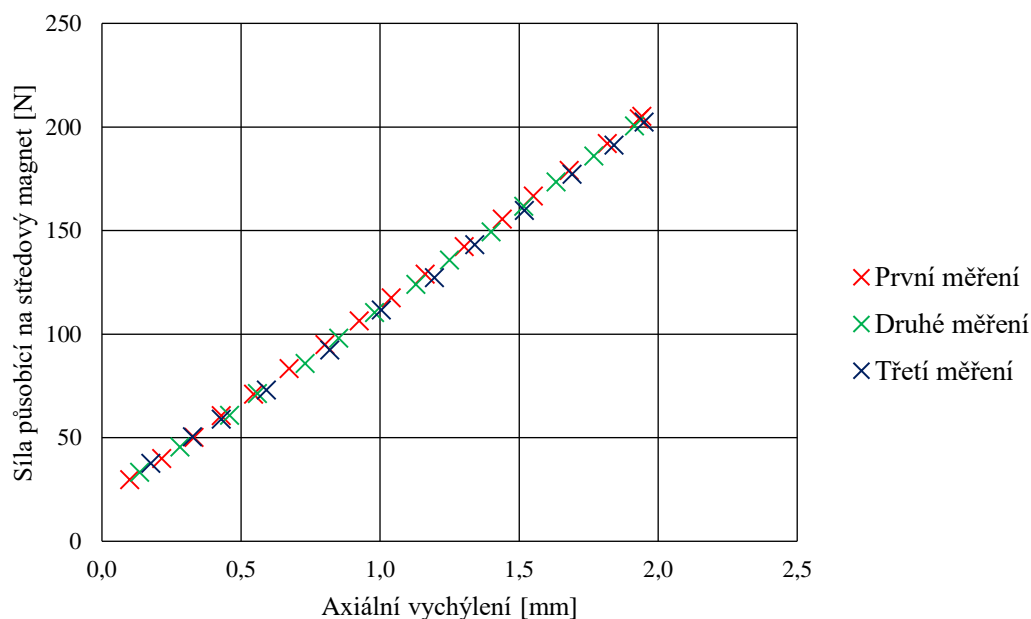
Tab. 11) Tuhost ložiska pro rozdílné velikosti vzduchové mezery

Vzduchová mezeza [mm]	Tuhost ložiska [N/mm]
2	115
4	71
6	48
8	34
10	25

5 POROVNÁNÍ SIMULOVANÝCH A MĚŘENÝCH HODNOT

Poslední kapitola práce se zabývá srovnáním hodnot vypočtených v programu FEMM a experimentálně zjištěných hodnot.

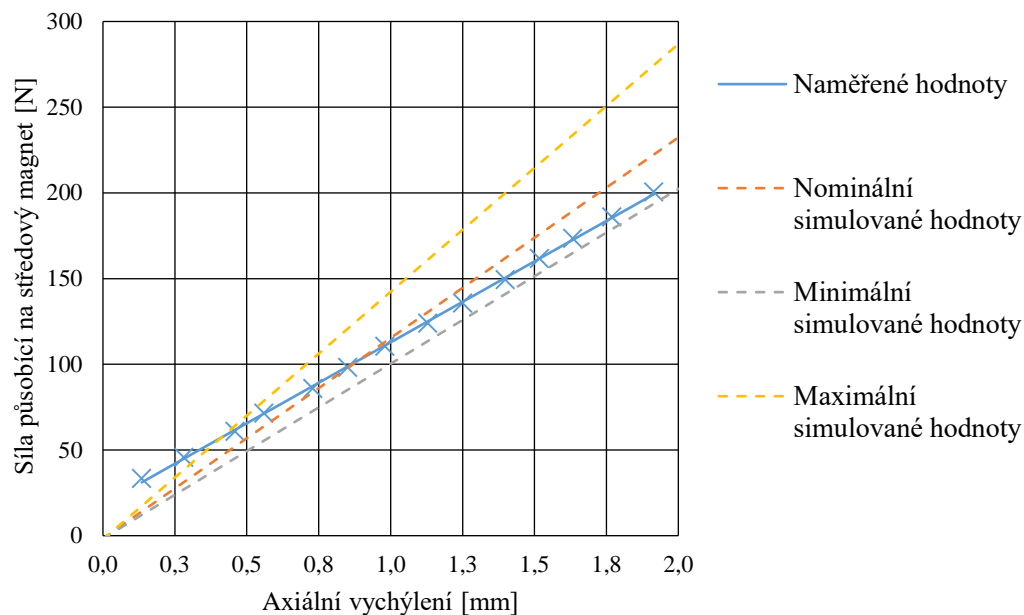
Experimentální měření bylo měření provedeno třikrát. Byla tak verifikována správnost měření na dané měřící soustavě. Naměřené hodnoty pro všechna tři měření spadají (s určitou odchylkou) na jednu přímku, měření tedy lze považovat za opakovatelné, viz obr. 25. Pro porovnání se simulovanými hodnotami byly vybrány hodnoty jednoho měření (konkrétně druhého).



Obr. 25) Opakovatelnost měření

V grafu (obr. 26) jsou znázorněny naměřené hodnoty a pro srovnání také hodnoty nasimulované (pro minimální, nominální i maximální hodnoty koercivity a remanentní indukce), přičemž v simulaci je předpokládáno, že všechny magnety mají stejné hodnoty koercitivní síly a remanentní indukce. Průběhy přímek zjištěné simulací jsou zakresleny přerušovanou čarou. Pro případ naměřených hodnot je uvedena přímka proložena naměřenými hodnotami, jejíž průběh byl zjištěn metodou nejmenších čtverců.

Z grafu je patrné, že naměřené hodnoty většinou patří do intervalu mezi minimální a maximální simulované hodnoty. Z obrázku je ale také vidět, že tuhost zjištěná při experimentálním měření je menší než minimální tuhost zjištěná simulací (přímka je méně strmá než přímky, jejichž průběh byl zjištěn simulací). V tab. 12 jsou srovnány hodnoty tuhostí simulovaných a měřených soustav. I z této tabulky je zřetelné, že experimentálně zjištěná tuhost je menší než minimální tuhost zjištěná simulací, odchylka mezi těmito hodnotami je přibližně 7 %. Odchylka od simulovaných hodnot je s nejvyšší pravděpodobností způsobena třením mezi hřídelí a teflonovými pouzdry pro hřídel. Pro přesnější výsledky měření je tedy nutné tření minimalizovat lepším ukotvením hřídele.



Obr. 26) Porovnání naměřených a simulovaných hodnot

Dalším vlivem ovlivňujícím měření je nepřesné upevnění magnetů. Vzdálenost mezi rotorovým a statorovým magnetem není konstantní (při otáčení rotoru je viditelné házení), což může být způsobeno i nepřesnostmi při výrobě prstence. Rotorový magnet zároveň nemusel být správně uveden do rovnovážné polohy (takže na začátku měření magnet mohl být lehce vychýlen oproti základnímu stavu). Odchylka mohla být zapříčiněna chybou měření (chyba při měření velikosti vychýlení úchylkoměrem).

Vliv na výsledné síly (tudíž i tuhost ložiska) má rovněž teplota prostředí, jejíž účinky nebyly při experimentálním měření uvažovány.

Tab. 12) Porovnání simulované a experimentální tuhosti

Pozn.: $k_{exp} = 94 \text{ N/mm}$	Velikost tuhosti [N/mm]	Odchylka od experimentálně zjištěné hodnoty [%]
Simulovaná hodnota (minimální koercivita a remanentní indukce)	101	7 %
Simulovaná hodnota (nominální koercivita a remanentní indukce)	115	18 %
Simulovaná hodnota (maximální koercivita a remanentní indukce)	143	34 %

Pro několik vybraných případů vychýlení je uvedeno srovnání simulovaných a experimentálně zjištěných hodnot (tab. 13). Experimentálně zjištěné hodnoty byly srovnány se simulovanými hodnotami pro nominální hodnoty koercitivní síly a remanentní indukce. V tabulce je také popsána velikost odchylky jednotlivých hodnot.

Tab. 13) Porovnání zvolených hodnot sil

Vychýlení [mm]	Síla na prostřední magnet – měření [N]	Síla na prostřední magnet – simulace [N]	Odchylka [%]
0,459	61	53	13
0,730	86	82	5
0,980	110	109	1
1,250	136	141	4
1,517	162	171	5
1,769	186	206	10
1,915	201	223	10

Dále byly srovnány velikosti hodnot tuhosti při zvyšování velikosti vzduchové mezery. Tyto hodnoty se spolu s velikostí odchylky experimentálních a simulovaných hodnot nacházejí v tab. 14. Experimentálně zjištěné hodnoty byly porovnávány pro hodnoty simulace, při které byly analyzovány magnety, které měly nominální hodnoty koercitivní síly a remanentní indukce.

Tab. 14) Porovnání tuhostí pro různé velikosti vzduchových mezer

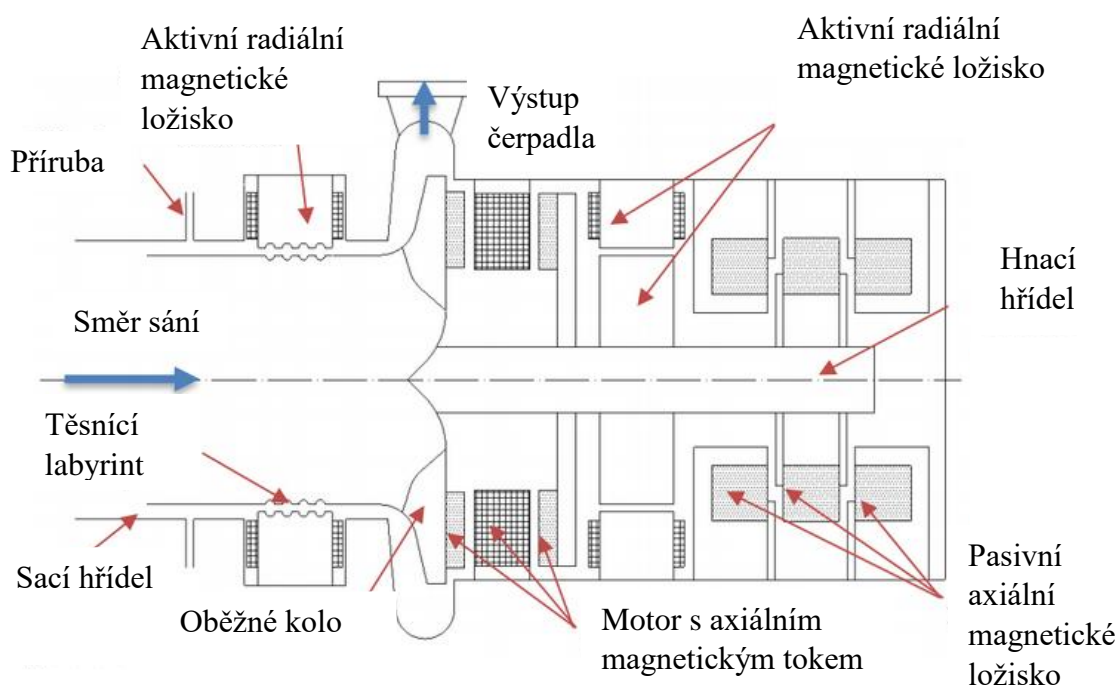
Velikost vzduchové mezery [mm]	Tuhost – simulace (nomin.) [N/mm]	Tuhost – experiment [N/mm]	Odchylka [%]
4	62	72	14
6	47	51	8
8	36	39	8
10	26	29	10

Původně bylo plánováno i porovnávání hodnot pro rozdílné teploty magnetu. Experimentální měření se však nakonec neuskutečnilo. Magnety měly být zahřívány proudem horkého vzduchu. Toto řešení bylo zavrhnuto, magnety by se tímto způsobem neohřály rovnoměrně a měření by bylo pravděpodobně značně nepřesné. Rovněž nebyly experimentálně ověřeny hodnoty tuhostí pro rozdílné rozměry magnetů. K dispozici byla pouze měřící soustava přizpůsobena pro magnety o rozměrech 75 x 49 x 10 mm (vnější průměr x vnitřní průměr x tloušťka). Pro měření magnetického ložiska, které využívá jiné rozměry než ty, které jsou použity v této práci, by bylo třeba modifikovat měřící soustavu, především uchycení statorových magnetů v konzole a zajištění rotorového magnetu v pouzdře.

7 DOPORUČENÍ PRO PRAXI

Zkoumané ložisko je určeno pro využití v bezucpávkových čerpadlech. Příklad konstrukce čerpadla je uveden na obr. 27. V tomto případě se jedná o odstředivé bezucpávkové čerpadlo. Tato čerpadla neobsahují žádný těsnicí materiál. Takto se zabráňuje kontaminaci. Bezucpávková čerpadla tak jsou hojně využívána v potravinářském nebo farmaceutickém průmyslu. Díky absenci těsnících prvků může čerpadlo pracovat i s chemicky agresivními kapalinami. Obecně se užívá pro kapaliny s nižší viskozitou [14].

Bezucpávkové ložisko na obr. 27 využívá pouze magnetických ložisek. Sací hřídel zajišťuje aktivní radiální ložisko (na levé části obr. 27). Hnací hřídel je uložena na aktivním radiálním ložisku a pasivním magnetickém ložisku (které bylo předmětem zkoumání této práce). Hnací hřídel je poháněna motorem s axiálním magnetickým tokem.



Obr. 27) Schéma bezucpávkového čerpadla [14]

Jak bylo zjištěno simulací v programu FEMM, teplota magnetů zásadně ovlivňuje tuhost ložiska. Pasivní axiální ložisko v tomto případě přichází přímo do styku s médiem. Funkce ložiska tedy závisí na teplotě čerpaného média. Se vzrůstající teplotou dle simulace výrazně klesá tuhost ložiska (viz kapitola 4.3 - Vliv teploty na ložisko). Je tedy třeba uvážit, jaká hodnota tuhosti je pro ložisko třeba. Pokud je třeba zachovat vysokou hodnotu tuhosti za vyšších teplot, je třeba vybrat materiál s nízkými teplotními koeficienty pro přepočítání koeficientu síly a remanentní indukce. Teplota média nesmí za žádných okolností přesáhnout Curieovu teplotu pro použitý magnet. Magnetické ložisko by tak ztratilo svoji funkčnost a hnací hřídel by nebyla axiálně zajištěna.

Funkčnost ložiska je ovlivněna velikostí vzduchové mezery mezi rotorovým a statorovým magnetem. Lze tak zvýšit toleranci axiálního pohybu hřídele, zatímco klesá tuhost ložiska. K úplnému vychýlení rotorového magnetu (až k statorovému magnetu) je po zvýšení vzduchové mezery třeba větší síla. Je tedy pro daný případ třeba zvážit do jaké míry je možné vychýlit hřídel a jaká tuhost ložiska je třeba.

Magnetické pole pasivního axiálního ložiska bude v tomto případě ovlivňováno magnetickým polem sousedícího aktivního radiálního ložiska. V rámci práce účinky externího magnetického pole nebyly zkoumány. Při návrhu čerpadla by však tyto účinky měly být přezkoumány; budou mít pravděpodobně vliv na vlastnosti ložiska.

Aktivní radiální ložisko potřebuje pro svou funkci elektrický proud. Při případném výpadku může dojít k radiálnímu vychýlení hřídele. Vychýlení v radiálním směru by pravděpodobně mělo dopad na tuhost pasivního ložiska. Pro další návrh čerpadla je nutné uvažovat možnost radiálního vychýlení a navrhnout řešení, jak mu co nejlépe předcházet. V rámci simulace možnost radiálního vychýlení nebyla uvažována. Program FEMM podporuje jen dvourozměrné a axisymetrické úlohy, magnet tedy není možné radiálně vychýlit. Vychýlení nebylo uvažováno ani při experimentálním měření. Pro měření vlastností by bylo třeba upravit měřicí soustavu tak, aby bylo možné přesně vychýlit hřídel v radiálním směru.

8 ZÁVĚR

Pasivní magnetická ložiska jsou čím dál častěji využívána kvůli jejich spolehlivosti, jednoduchému provedení a funkci bez nutnosti mazání. Obecně se tento typ ložisek využívá tam, kde je třeba minimalizovat tření nebo se vyvarovat kontaminaci mazivem. Práce se konkrétně zabývá axiálním magnetickým ložiskem určeným pro bezucpávkové čerpadlo. Cílem je určení vlastností ložiska simulací pomocí metody konečných prvků a experimentálního měření. Z takto zjištěných dat je vyvozeno doporučení pro užití v praxi.

Ložisko využívá tři pasivních FeNdB magnetů typu N42 prstencového tvaru, přičemž jeden z nich je rotorový a dva jsou umístěny ve statoru měřící soustavy. Experiment byl proveden na speciálně vytvořené měřící sestavě. Pro sestavu se vzduchovou mezerou o velikosti 2 mm byla z experimentálně naměřených hodnot vypočtena tuhost ložiska o velikosti 94 N/mm.

Vzduchová mezera byla postupně zvětšována a z naměřených hodnot bylo zjištěno, že se zvyšující velikostí vzduchové mezery velmi rychle snižuje velikost tuhosti ložiska (tím pádem se snižuje síla potřebná pro vychýlení rotoru o určitou vzdálenost).

Vlastnosti ložisek byly zkoumány simulací v programu FEMM. Pro simulaci byla využita metoda konečných prvků. Pro nominální hodnoty koercitivní síly a remanentní indukce byla pro vzduchovou mezeru o velikosti 2 mm zjištěna tuhost 115 N/mm. Rovněž byly zkoumány velikosti tuhostí pro minimální a maximální hodnoty koercitivních sil a remanentních indukcí, které jsou součástí katalogů výrobce.

V programu FEMM byl zároveň zkoumán účinek teploty na ložisko. S rostoucí teplotou klesá hodnota koercitivní síly a remanentní indukce a tím pádem znatelně klesá tuhost ložiska. Magnety je tedy třeba volit v závislosti na pracovní teplotě ložiska (jednotlivé typy magnetů mají různou náchylnost na vyšší teplotu).

Simulován byl i vliv geometrie na síly v ložisku, konkrétně tloušťky, vnějšího průměru a vnitřního průměru. Bylo zjištěno, že pokud je třeba zvýšit tuhost ložiska, je možné zvětšit pouze tloušťku středového magnetu. Tato změna tuhosti ložiska je téměř stejná jako při změně obou statorových magnetů. Tuhosti znatelně ovlivňují i změny vnitřních a vnějších průměrů magnetů.

V závěrečné části práce byly porovnávány experimentálně zjištěné hodnoty a hodnoty zjištěné v simulaci. Experimentálně zjištěná tuhost je menší než minimální simulovaná tuhost, odchylka činí přibližně 7 %. Měření bylo provedeno s určitou chybou, která je primárně způsobena třením v kladce a třením mezi hřídelí a teflonovým pouzdem.

Pro další měření by bylo vhodné upravit ukotvení hřídele tak, aby na hřídel působily menší třecí síly. Pro zpřesnění měření je dále třeba zajistit přesné umístění magnetů. Především je třeba zajistit přesnou polohu rotorového magnetu v rovnovážné poloze. Měření ovlivňuje nestálá vzdálenost mezi rotorovým a statorovým magnetem (při otáčení rotoru je vidět lehké házení rotorového magnetu). Měření se zpřesní i započtením teplotních účinků na magnety.

Zkoumané ložisko navrhnu pro užití v bezucpávkovém odstředivém čerpadle. Toto čerpadlo využívá pouze magnetických ložisek, dvou aktivních radiálních a jednoho axiálního pasivního. Z hodnot zjištěných simulací a experimentálním měřením byly vyvozeny závěry pro použití ložiska v praxi. Ložisko je v přímém kontaktu s čerpaným médiem. Jak bylo zjištěno v simulaci, magnety jsou ovlivňovány okolní teplotou. Funkce ložiska je tedy závislá na teplotě média, je tedy třeba tuto teplotu uvažovat a vybrat adekvátní typ magnetu.

Funkčnost ložiska je závislá na velikosti vzduchové mezery mezi rotorovým a statorovým magnetem. Zvýšením mezery se zároveň zvýší tolerance axiálního pohybu hřídele. Klesne ale celková tuhost ložiska. Je tedy třeba zvážit, jaká tuhost je pro danou aplikaci třeba a jak se může maximálně vychýlit hřídel.

Magnetické pole magnetů pasivního ložiska bude v čerpadle ovlivňováno magnetickým polem přilehlého aktivního radiálního ložiska. Účinky na funkci ložiska nebyly v rámci této práce zkoumány, pro další návrh čerpadla je ale nutné s účinky externího magnetického pole počítat (například modifikací měřicí soustavy tak, aby na ložisko působilo adekvátní vnější magnetické pole).

Případné radiální vychýlení hřídele (například po výpadku aktivního radiálního ložiska) s největší pravděpodobností ovlivňuje vlastnosti axiálního ložiska. V simulaci se s radiálním vychýlením nepočítalo z důvodů omezení programu FEMM (slouží jen pro 2D simulace a simulace axisymetrických problémů). Měřicí soustava by měla být upravena tak, aby bylo možné rovnoměrně vychýlit hřídel v radiálním směru. V rámci dalšího měření by měly být tyto účinky přezkoumány.

Část práce byla věnována rešerši na téma pasivní magnetická ložiska. Rešerše se zabývala samotným fyzikálním principem pasivních magnetických ložisek. Zmíněna byla i různá konstrukční řešení a uvedení několika užití v praxi.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] 2010 Record of Conference Papers Industry Applications Society 57th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference (PCIC) [online]. IEEE, 2010 [cit. 2018-10-27]. ISBN978-1-4244-6800-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5666819/>
- [2] HAN, Hyung-Suk a Dong-Sung KIM. *Magnetic Levitation: Maglev Technology and Applications*. 13th ed. Dordrecht: Springer, 2016. ISBN 978-94-017-7522-9.
- [3] RAVAUD, R., G. LEMARQUAND a V. LEMARQUAND. Force and Stiffness of Passive Magnetic Bearings Using Permanent Magnets. Part 1: Axial Magnetization. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2009, 1987, 45(7), 2996-3002 [cit. 2019-04-05]. DOI: 10.1109/TMAG.2009.2016088. ISSN 0018-9464. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5089905/>
- [4] WANG, Haoze, Kun LIU a Peng AO. Magnetic Field and Specific Axial Load Capacity of Hybrid Magnetic Bearing. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2013, 49(8), 4911-4917 [cit. 2018-11-8]. DOI: 10.1109/TMAG.2013.2248162. ISSN 0018-9464. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6468097/>
- [5] Understanding Permanent Magnets. In: *Arnold Magnetics* [online]. Rochester: Arnold Magnetic Technologies, 2018 [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/10/TN_9802_rev_150727.pdf
- [6] FEIPENG, Xu, Li TIECAI a Liu YAJING. A study on passive magnetic bearing with Halbach magnetized array. *International Conference on Electrical Machines and Systems* [online]. IEEE, 2008, 417-419 [cit. 2018-11-8]. ISBN: 978-1-4244-3826-6. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4770731>
- [7] FILION, Guillaume, Jean RUEL a Maxime DUBOIS. Reduced-Friction Passive Magnetic Bearing: Innovative Design and Novel Characterization Technique. *Machines* [online]. 2013, 1(3), 98-115 [cit. 2018-11-16]. DOI: 10.3390/machines1030098. ISSN 2075-1702. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2075-1702/1/3/98>
- [8] QIAN, Kun-Xi, Wei-Min RU, Hao WANG a Teng JING. A Mini Axial and a Permanent Maglev Radial Heart Pump. *The Open Biomedical Engineering Journal*. 2007, 1(1), 1-3. DOI: 10.2174/1874120700701010001. ISSN 18741207. Dostupné z: <http://benthamopen.com/ABSTRACT/TOBEJ-1-1>
- [9] SIEBERT, Mark, Ben EBIHARA, Ralph H. JANSEN a Andrew KENNY. A Passive Magnetic Bearing Flywheel. *Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference* [online]. 2002, 1(1) [cit. 2018-12-17]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/24293792_A_Passive_Magnetic_Bearing_Flywheel

- [10] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER, DUB, Petr, ed. *Fyzika. 2.*, přeprac. vyd. Brno: VUTIUM, c2013. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [11] PRUŠA, R., R. HUŽLÍK a V. HABAN. *Mechatronika (ME): proceedings of the 18th international conference on mechatronics* [online]. Brno: University of Technology, 2014 [cit. 2019-05-04]. ISBN 978-80-214-5544-3. Dostupné z: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8624879>
- [12] BALTZIS, Konstantinos B. The finite element method magnetics (FEMM) freeware package: May it serve as an educational tool in teaching electromagnetics?. *Education and Information Technologies*. 2010, 15(1), 19-36. DOI: 10.1007/s10639-008-9082-8. ISSN 1360-2357. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s10639-008-9082-8>
- [13] CONSTANTINIDES, Steve. Understanding and Using Reversible Temperature Coefficients. In: *Arnold Magnetism* [online]. Sheffield: Arnold Magnetic Technologies, 2009 [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: <http://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/10/Understanding-and-Using-Reversible-Temperature-Coefficients-Constantinides-Magnetics-2010-psn-hi-res.pdf>
- [14] PRUŠA, R. Pohon pro bezucpávkové čerpadlo. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 108 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

10 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

10.1 Seznam tabulek

TAB. 1) EXPERIMENTÁLNĚ ZJIŠTĚNÉ SÍLY PRO ZVOL. VYCHÝLENÍ.....	30
TAB. 2) EXPERIMENTÁLNĚ ZJIŠTĚNÉ TUHOSTI PRO RŮZNÉ VEL. VZDUCH. MEZER	31
TAB. 3) SÍLA PŮSOBÍCÍ NA MAGNET V ZÁVISLOSTI NA AXIÁLNÍM VYCHÝLENÍ.....	35
TAB. 4) ROZPĚTÍ HODNOT VLASTNOSTÍ MAGNETU	38
TAB. 5) VLASTNOSTI NĚKTERÝCH NDFEB MAGNETŮ.....	39
TAB. 6) VLASTNOSTI MAGNETU N42 PRO ROZDÍLNÉ TEPLoty	40
TAB. 7) TUHOST LOŽISKA PO ZMĚNĚ TLOUŠŤKY MAGNETU.....	41
TAB. 8) TUHOST LOŽISKA PO ZMĚNĚ PRŮMĚRU MAGNETU	42
TAB. 9) TUHOST LOŽISKA PO ZMĚNĚ TLOUŠŤĚK VŠECH MAGNETŮ	43
TAB. 10) TUHOST LOŽISKA PO ZMĚNĚ PRŮMĚRŮ VŠECH MAGNETŮ.....	43
TAB. 11) TUHOST LOŽISKA PRO ROZDÍLNÉ VEL. VZDUCH. MEZERY	44
TAB. 12) POROVNÁNÍ SIMULOVANÉ A EXPERIMENTÁLNÍ TUHOSTI	46
TAB. 13) POROVNÁNÍ ZVOLENÝCH HODNOT SIL	47
TAB. 14) POROVNÁNÍ TUHOSTÍ PRO RŮZNÉ VEL. VZDUCH. MEZER	47

10.2 Seznam obrázků

OBR. 1) USPOŘÁDÁNÍ MAGNETŮ	17
OBR. 2) HYSTEREZNÍ SMYČKA PERMANENTNÍHO MAGNETU	19
OBR. 3) JEDNODUCHÉ KONFIGURACE MAGNETICKÝCH LOŽISEK	20
OBR. 4) HALBACHOVO USPOŘÁDÁNÍ PRO PRSTENEC]	20
OBR. 5) PRŮŘEZ LOŽISKEM	21
OBR. 6) POPIS HYBRIDNÍHO LOŽISKA	22
OBR. 7) SOUSTAVA LOŽISEK	23
OBR. 8) ŘEZ SRDEČNÍM ČERPADLEM	25
OBR. 9) ROTOR KONSTRUKCE SETRVAČNÍKU	26
OBR. 10) ORIENTACE MAGNETŮ	27
OBR. 11) VZDÁLENOSTI MEZI MAGNETY.....	28
OBR. 12) KONSTRUKCE ANALYZOVANÉHO LOŽISKA	28

OBR. 13) MĚŘÍCÍ SOUSTAVA.....	29
OBR. 14) EXPERIMENTÁLNĚ ZJIŠTĚNÉ HODNOTY.....	30
OBR. 15) ZÁVISLOSTI SIL PRO ROZDÍLNÉ VEL. VZDUCH. MEZER.....	31
OBR. 16) VÝPOČETNÍ SÍŤ MAGNETU.....	33
OBR. 17) GEOMETRIE VYUŽITÁ V SIMULACI.....	35
OBR. 18) ROZLOŽENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE.....	36
OBR. 19) ZÁVISLOST SÍLY NA VYCHÝLENÍ STŘEDNÍHO MAGNETU.....	36
OBR. 20) ZÁVISLOST SÍLY NA LEVÝ STATOROVÝ MAGNET.....	37
OBR. 21) ZÁVISLOST SÍLY PRO PRAVÝ STATOROVÝ MAGNET.....	37
OBR. 22) SIMULACE PRO MIN. A MAX. HODNOTY VLAST. MAGNETŮ	38
OBR. 23) VELIKOSTI SIL PRO ROZDÍLNÉ NDFEB MAGNETY.....	39
OBR. 24) TUHOST LOŽISKA PRO RŮZNÉ TEPLoty.....	40
OBR. 25) OPAKOVATELNOST MĚŘENÍ.....	45
OBR. 26) POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH A SIMULOVANÝCH HODNOT.....	46
OBR. 27) SCHÉMA BEZUCPÁVKOVÉHO ČERPADLA.....	49

11 SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1) KATALOGOVÝ LIST MAGNETU N42	58
PŘÍLOHA 2) KATALOGOVÝ LIST MAGNETU N30	59
PŘÍLOHA 3) KATALOGOVÝ LIST MAGNETU G55SH.....	60

Příloha 1) Katalogový list magnetu N42



N42

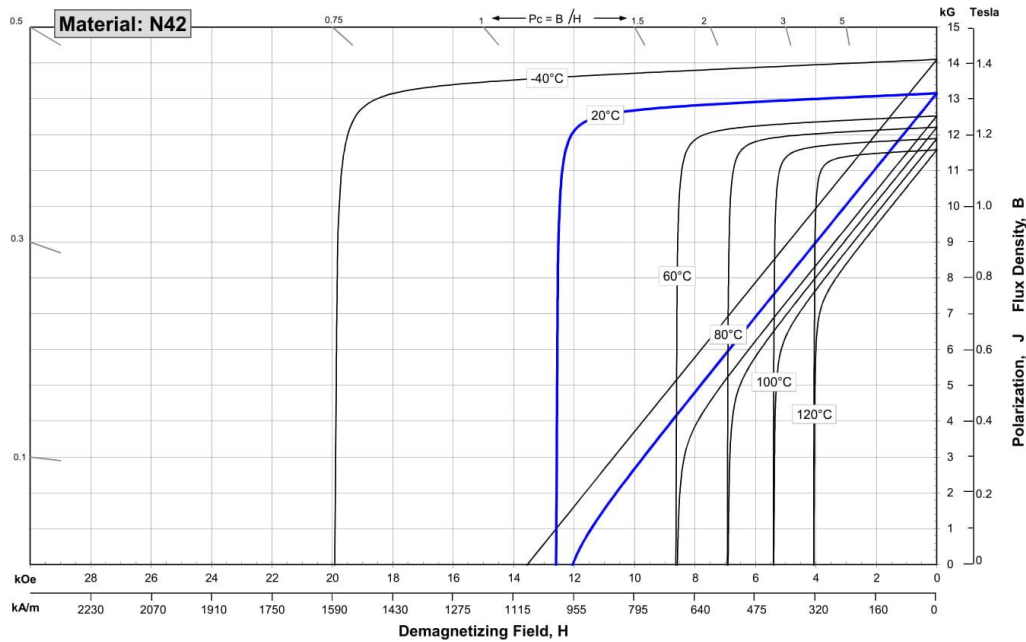
Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets

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.
Br , 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
	kJ/m ³	318	334	350

Characteristic	Units	Thermal Properties	
		C //	C ⊥
Reversible Temperature Coefficients ⁽¹⁾	of Induction, α(Br)	%/°C	-0.120
	of Coercivity, α(H _{cj})	%/°C	-0.750
	Coefficient of Thermal Expansion ⁽²⁾	ΔL/L per °C × 10 ⁻⁶	7.5
Thermal Conductivity	W / (m · K)	7.6	
Specific Heat ⁽³⁾	J / (kg · K)	460	
Curie Temperature, T _c	°C	310	
Other Properties	Flexural Strength	psi	41,300
		MPa	285
	Density	g/cm ³	7.5
	Hardness, Vickers	Hv	620
	Electrical Resistivity, ρ	μΩ · cm	180

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



1 kA/m = 12.566 Oe 1 kOe = 79.577 kA/m

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.

Příloha 2) Katalogový list magnetu N30



N30

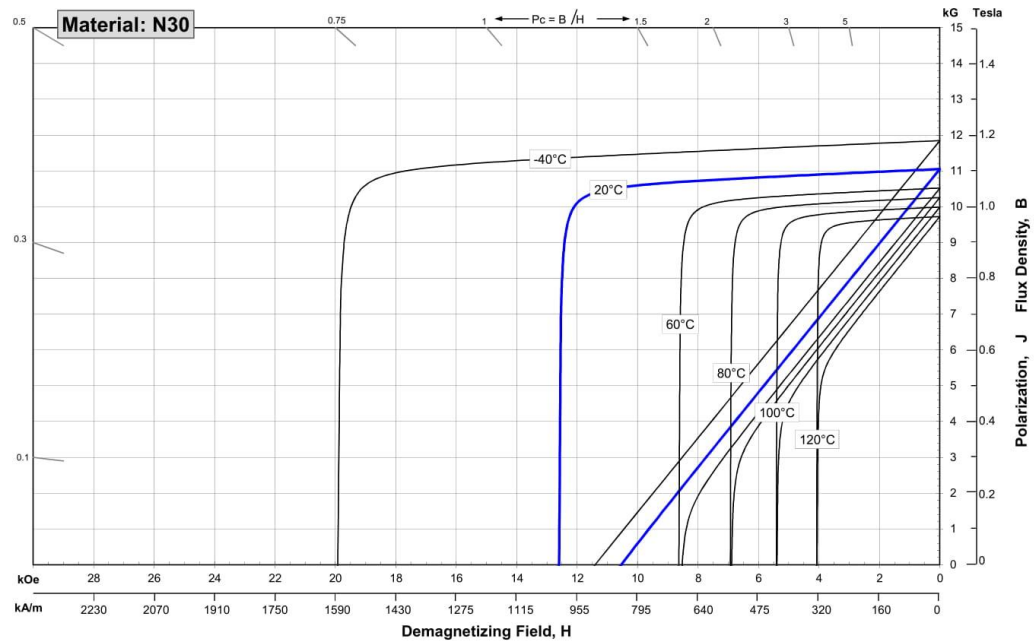
Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets

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.
Br , Residual Induction	Gauss	10,800	11,050	11,300
	mT	1080	1105	1130
H_{CB} , Coercivity	Oersteds	10,000	10,400	10,800
	kA/m	796	828	859
H_{CJ} , Intrinsic Coercivity	Oersteds	12,000		
	kA/m	955		
BH_{max} , Maximum Energy Product	MGOe	28	30	31
	kJ/m ³	223	235	247

Characteristic	Units	Thermal Properties		
		C //	C ⊥	
Reversible Temperature Coefficients ⁽¹⁾	of Induction, α(Br)	%/°C	-0.120	
	of Coercivity, α(H _{CJ})	%/°C	-0.750	
Coefficient of Thermal Expansion ⁽²⁾	ΔL/L per °C x 10 ⁻⁶	7.5	-0.1	
Thermal Conductivity	W / (m • K)		7.6	
Specific Heat ⁽³⁾	J / (kg • K)		460	
Curie Temperature, T _c	°C		310	
Other Properties	Flexural Strength	psi	41,300	
		MPa	285	
	Density	g/cm ³		7.5
	Hardness, Vickers	Hv		620
Electrical Resistivity, ρ	μΩ • cm		180	

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



1 kA/m = 12.566 Oe 1 kOe = 79.577 kA/m

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.

Příloha 3) Katalogový list magnetu G55SH



G55SH

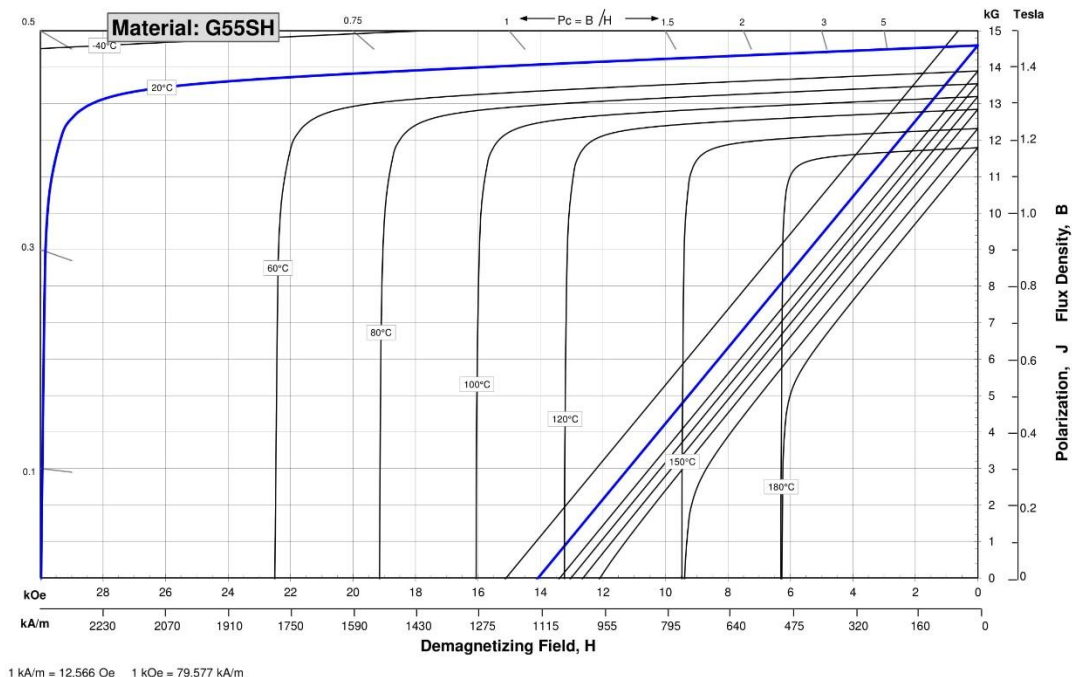
Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets

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.
Br , Residual Induction	Gauss	14,400	14,600	14,800
	mT	1440	1460	1480
H_{cB} , Coercivity	Oersteds	13,600	13,850	14,100
	kA/m	1083	1102	1122
H_{cJ} , Intrinsic Coercivity	Oersteds	19,000		
	kA/m	1,512		
BH_{max} , Maximum Energy Product	MGOe	50	53	55
	kJ/m ³	398	418	438

Characteristic	Units	Thermal Properties		
		C //	C ⊥	
Reversible Temperature Coefficients ⁽¹⁾				
of Induction, α(Br)	%/°C		-0.12	
of Coercivity, α(H _{cj})	%/°C		-0.55	
Coefficient of Thermal Expansion ⁽²⁾	ΔL/L per °C x 10 ⁻⁶	7.5	-0.1	
Thermal Conductivity	kcal/mh ² °C	5.3	5.8	
Specific Heat ⁽³⁾	cal/g°C		0.11	
Curie Temperature, T _c	°C		310	
Other Properties	Flexural Strength	psi	41,300	
		MPa	285	
	Density	g/cm ³		7.6
	Hardness, Vickers	Hv		620
	Electrical Resistivity, ρ	μΩ • cm		150 // 130 ⊥

Notes: (1) Coefficients measured between 20 and 150 °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. Demagnetization curves show nominal Br and minimum H_{cj}. Magnets can be supplied thermally stabilized or magnetically calibrated to customer specifications. Additional grades are available. Please contact the factory for information.