ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Magnetická pasivní ložiska

Oleg Sharov **2016**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: **2015/2016**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Oleg SHAROV**
Osobní číslo:	**E13B0221P**
Studijní program:	**B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Elektronika a telekomunikace**
Název tématu:	**Magnetická pasivní ložiska**
Zadávající katedra:	**Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši typů ložisek a možnosti jejich použití se zaměřením na magnetická ložiska.
2. Navrhněte ložiska pro levitující hřídel motoru.
3. Sestavte matematický model a využijte numerické modelování pro návrh technického řešení.
4. Realizujte navržené řešení, experimentálně ověřte jeho funkčnost a výsledky porovnejte s numerickým výpočtem.

Rozsah grafických prací:	**podle doporučení vedoucího**
Rozsah kvalifikační práce:	**30 - 40 stran**
Forma zpracování bakalářské práce:	**tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Gerhard Schweitzer, Eric H. Maslen: Magnetic Bearings: Theory, Design, and Application to Rotating Machinery

Vedoucí bakalářské práce:	**Ing. Lukáš Koudela, Ph.D.** Regionální inovační centrum elektrotechniky
Datum zadání bakalářské práce:	**15. října 2015**
Termín odevzdání bakalářské práce:	**2. června 2016**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan

L.S.

Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Tato práce se zabývá ložisky s důrazem na ložiska magnetická. Magnetická ložiska mají velké zastoupení například v plynovém průmyslu nebo v továrnách na výrobu polovodičových zařízení. Cílem práce je navrhnout pasivní magnetická ložiska pro levitující hřídel motoru, návrh realizovat a provést numerickou simulaci kompletního zařízení.

Klíčová slova

Valivá ložiska, kluzná ložiska, magnetická pasivní ložiska, magnetická aktivní ložiska, návrh magnetických pasivních ložisek, levitující hřídel motoru, Mendocino motor, numerický model pasivních magnetických ložisek

Abstract

This thesis is focused on bearings, especially on the magnetic bearings. Magnetic bearings are abundantly used for example in the gas industry or in factories for semiconductor devices. The purpose of this thesis is to design the passive magnetic bearings for levitating shaft, implement the design and make numerical simulation of complete device.

Key words

Roller bearings, plain bearings, passive magnetic bearings, active magnetic bearings, design of passive magnetic bearings, levitating shaft, Mendocino motor, numerical model of the passive magnetic bearings

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Prohlašuji, že veškerý software použitý při řešení této bakalářské práce je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 31.5.2016 Oleg Sharov

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Lukáši Koudelovi, Ph.D. za profesionální vedení a za cenné rady, které mi byly poskytovány při tvorbě této práce.

Obsah

OBSAH **8**

ÚVOD **9**

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK **10**

1 LOŽISKA **11**

1.1 OBECNÉ INFORMACE 11
1.2 VALIVÁ LOŽISKA 11
1.2.1 Základní popis valivých ložisek *11*
1.2.2 Rozdělení valivých ložisek *12*
1.2.3 Jednořadá kuličková ložiska *12*
1.2.4 Jednořadá kuličková ložiska s kosoúhlým stykem *13*
1.2.5 Dvouřadá kuličková ložiska *13*
1.2.6 Jednořadá válečková ložiska *14*
1.2.7 Jehlová ložiska *15*
1.3 KLUZNÁ LOŽISKA 16
1.3.1 Základní popis kluzných ložisek *16*
1.3.2 Rozdělení kluzných ložisek *17*
1.4 MAGNETICKÁ LOŽISKA 17
1.4.1 Základní informace *17*
1.4.2 Použití aktivních magnetických ložisek *18*
1.4.3 Únosnost aktivních magnetických ložisek *21*
1.4.4 Řízení aktivních magnetických ložisek *25*

2 NÁVRH PASIVNÍHO MAGNETICKÉHO LOŽISKA **26**

2.1 MENDOCINO MOTOR 26
2.1.1 Výroba Mendocino motoru *27*
2.2 NÁVRH PASIVNÍCH MAGNETICKÝCH LOŽISEK PRO LEVITUJÍCÍ HŘÍDEL 29

3 NUMERICKÝ MODEL PASIVNÍHO MAGNETICKÉHO LOŽISKA **32**

3.1 MATEMATICKÝ MODEL 32
3.2 MODEL V PROGRAMU COMSOL MULTIPHYSICS 5.0 33
3.3 VÝSLEDKY SIMULACE V COMSOLU 35

ZÁVĚR **41**

SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ **42**

SEZNAM PŘEVZATÝCH OBRÁZKŮ **43**

Úvod

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na ložiska, s důrazem na magnetická ložiska. Ložiska jsou součásti technických zařízení, která snižují tření při vzájemném otáčivém nebo posuvném pohybu. Předpokládaný vznik prvních ložisek se datuje do doby vynálezu kola a první doložené informace o použití ložisek pochází ze starověkého Egypta. Postupem času byla ložiska zdokonalována a byly vyvíjeny nové způsoby minimalizace tření. Nejnovějším způsobem minimalizace tření je použití magnetických ložisek pro levitaci otočné části. Magnetická ložiska se vzhledem k rozvoji řídicí elektroniky začala hojně používat v 90. letech 20. století a mimo jiné přinesla nové možnosti výroby polovodičových součástek a zpracování surovin v těžařském průmyslu.

Text práce je rozdělen na tři části, v první je provedena rešerše ložisek s důrazem na magnetická ložiska, jejich vlastnosti a použití. Druhá část se zabývá návrhem pasivních magnetických ložisek pro levitující hřídel motoru a výrobou tohoto motoru. Ve třetí části je provedena simulace těchto ložisek v programu COMSOL.

Seznam symbolů a zkratek

$\vec{H}$ ..... Intenzita magnetického pole [A/m]

$\vec{B}$..... Magnetická indukce [T]

$\vec{J}$..... Proudová hustota [A/m^2]

$\vec{D}$..... Elektrická indukce [C/m^2]

$\vec{\Psi}$ ..... Posuvný proud [A]

$\vec{E}$..... Intenzita elektrického pole [V/m]

ρ_v..... Objemová hustota náboje [C/m^3]

I..... Stejnosměrný proud [A]

N ..... Počet závitů cívky

μ_0..... Permeabilita vakua [H/m]

V_m ..... Magnetický skalární potenciál [A]

μ_r..... Permeabilita materiálu [H/m]

$d\vec{l}$..... Element délky

S..... Plocha [m^2]

α ..... Úhel [°]

W ..... Energie [J]

F..... Síla [N]

δ ..... Délka vzduchové mezery [m]

r..... Poloměr [m]

d ..... Průměr [m]

b ..... Délka magnetické části rotoru [m]

1 Ložiska

V následující kapitole jsou uvedeny druhy ložisek, popsány jejich základní principy, konstrukce a použití. Hlavní část kapitoly se věnuje aktivním magnetickým ložiskům.

1.1 Obecné informace

Zachycení otočných součástí a jejich udržení v žádané poloze zajišťují ložiska. V ložiskách jsou uloženy čepy hřídelů, které přenášejí otáčivý pohyb, úkolem ložisek je minimalizace tření součástí, které se vzájemně pohybují. Minimalizace tření umožňuje hladký a nerušený chod přístroje a také jeho hospodárnější provoz.

Ložiska se rozdělují dle toho, jakým způsobem dochází k odstranění suchého smykového tření v plochách styku. Můžeme je tedy rozlišit na ložiska valivá, kluzná a ložiska se vzduchovou mezerou, tedy ložiska magnetická.

1.2 Valivá ložiska

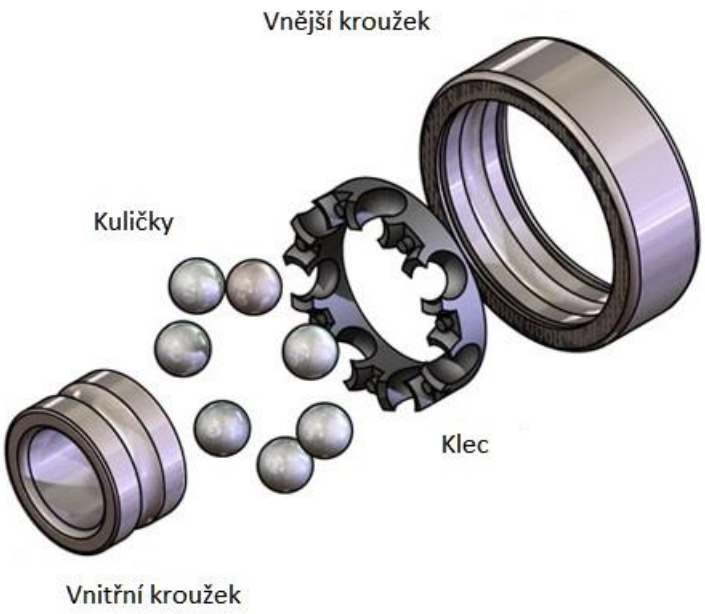
Tato podkapitola se věnuje valivým ložiskům a je zaměřena na jejich rozdělení a popis každého druhu.

1.2.1 Základní popis valivých ložisek

Valivá ložiska mají malou ložiskovou vůli, malou délku a jejich obsluha není náročná, protože mají malou spotřebu maziva. U valivých ložisek je malý rozdíl mezi třecím momentem v době rozběhu a při plném provozu. Mezi výhody patří použití valivých ložisek pro vysoké otáčky a velké zatížení. Velký vnější průměr, značná citlivost na rázy a také hlučný chod jsou nevýhodami valivých ložisek.

Valivé ložisko je obvykle vyrobeno ze čtyř částí, jak je naznačeno na obr. 1. Jsou to valivá tělíska, klec, vnější a vnitřní kroužek. Ve speciálních případech není nutné, aby ložisko mělo všechny čtyři části a vynechání určité části může být nahrazeno vhodnou stavební úpravou. Tvar kroužků je závislý na valivých tělískách, která právě zmenšují tření.

Mezi nejčastější tvary valivých tělísek patří tvary kuličkové, válečkové a jehlové. Klec je součástka, pomocí které jsou valivá tělíska rovnoměrně rozdělena po kroužku a také zabraňuje tomu, aby se valivá tělíska navzájem dotýkala. [1]



Obr.1 Konstrukce valivého kuličkového ložiska (převzato z [a])

1.2.2 Rozdělení valivých ložisek

Valivá ložiska se rozdělují podle toho, jaký typ valivých tělísek je v nich použit. Typ valivých tělísek má vliv na to, jaké síly je valivé ložisko schopno přenášet, buď v axiálním nebo radiálním směru. Mnohé typy valivých ložisek jsou schopny přenášet síly v obou směrech, ale v jednom směru vždy lépe než ve druhém. Pro které směry jsou ložiska vhodná je uvedeno v popisu každého druhu valivého ložiska.

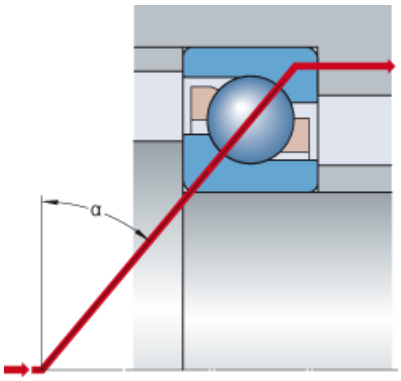
1.2.3 Jednořadá kuličková ložiska

Jedná se o nejpoužívanější druh valivového ložiska, je vyobrazeno na Obr. 2. Jejich kroužky mají hluboké drážky pro odvalující se kuličky, které mají velký průměr. To zaručuje dobrý dotek s ložiskovými kroužky, a proto se jednořadá kuličková ložiska hodí pro přenos jak radiálních, tak i axiálních sil. Jednořadá kuličková ložiska nejsou vhodná pro použití u pružných hřídelů, kde nastává v ložisku značnější sklon osy hřídele. [2] [3]

Obr. 2 Valivé kuličkové ložisko
(převzato z [b])

1.2.4 Jednořadá kuličková ložiska s kosoúhlým stykem

Oběžné dráhy vnitřních a vnějších kroužků kuličkových ložisek s kosoúhlým stykem jsou vzájemně přesazeny ve směru osy ložiska. Tato ložiska jsou tedy obzvláště vhodná pro přenášení kombinovaných zatížení, tzn. současně působících radiálních a axiálních zatížení. Axiální únosnost kuličkových ložisek s kosoúhlým stykem vzrůstá s rostoucím úhlem styku α. Úhel styku je definován jako úhel, který svírá spojnice stykového bodu kuličky a oběžných drah v radiální rovině, po níž je přenášeno zatížení z jedné oběžné dráhy na druhou, s kolmicí k ose ložiska. Toto řešení je vyobrazeno na Obr. 3.[4]

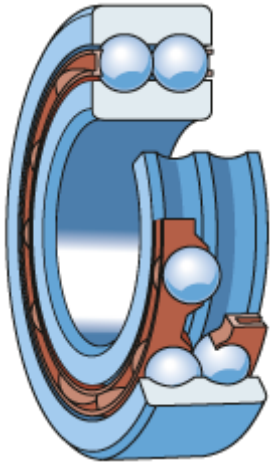


Obr.3 Kuličkové ložisko s kosoúhlým stykem
(převzato z [c])

1.2.5 Dvouřadá kuličková ložiska

Dvouřadá kuličková ložiska jsou konstrukčně shodná s jednořadými kuličkovými ložisky.

Jejich hluboké nepřerušené oběžné dráhy mají vysoký stupeň přimknutí s kuličkami, což umožňuje přenášet radiální a axiální zatížení v obou směrech. Dvouřadá kuličková ložiska jsou velmi vhodná pro uložení, kde únosnost jednořadého ložiska je nedostačující. Dvouřadá kuličková ložiska, která mají stejný vnější průměr a průměr díry jako jednořadá ložiska, jsou o něco širší než jednořadá kuličková ložiska, ale mají podstatně vyšší únosnost. [5][6]



Obr.4 Dvouřadé kuličkové ložisko
(převzato z [d])

1.2.6 Jednořadá válečková ložiska

U válečkových ložisek jsou valivými tělísky, jak název napovídá, válečky. Toto řešení je vyobrazeno na Obr. 5. Výhodou válečkových ložisek je to, že jsou schopna přenášet větší síly v radiálním směru než kuličková ložiska. Mezi nevýhody válečkových ložisek patří nemožnost přenášet síly v axiálním směru kvůli jejich konstrukci, vyšší cena v porovnání s ložisky kuličkovými, dále v porovnání s kuličkovými ložisky mají jednořadá válečková ložiska větší ztráty třením a nesnesou tak vysoké otáčky.[6]

Obr.5 Jednořadé válečkové ložisko
(převzato z [e])

1.2.7 Jehlová ložiska

Jehlová ložiska jsou zvláštním druhem válečkového ložiska. Jejich valivá tělíska jsou také válečky, ale mají mnohem menší průměr a větší délku, tudíž svým tvarem připomínají jehly. Jehlové ložisko je vyobrazeno na Obr. 6. Výhodou jehlových ložisek je malý rozměr a velká radiální únosnost, která je až 8x větší než u kuličkových ložisek srovnatelného tvaru. Mezi nevýhody, podobně jako u ložisek válečkových, patří nemožnost přenosu sil v axiálním směru a také to, že nesnesou vysoké otáčky.[6]

Obr.6 Jehlové ložisko
(převzato z [f])

1.3 Kluzná ložiska

Tato podkapitola je zaměřena na speciální oblast kluzných ložisek a objasňuje jejich základní principy a rozdělení. Informační zdroje ke kluzným ložiskům jsou omezené.

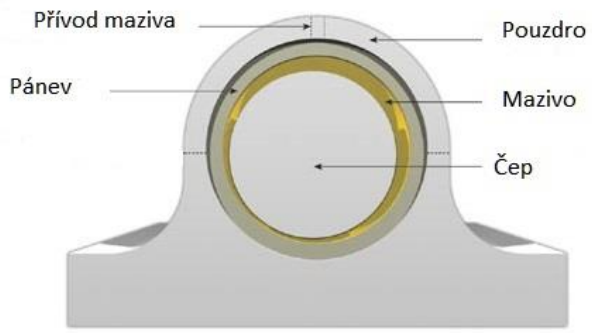
1.3.1 Základní popis kluzných ložisek

Hlavní rozdíl mezi kluznými a valivými ložisky je ten, že u valivých ložisek docházelo k suchému tření, zatímco u ložisek kluzných dochází ke tření polosuchému nebo kapalinnému.

Polosuché tření je dosaženo tím, že mezi dva dotýkající se povrchy je přivedeno mazivo. Tlak se zmenší, protože už na sebe nedoléhají pouze výstupky, ale kvůli mazivu na sebe třecí plochy doléhají celým svým povrchem. Ke kapalinnému tření dochází tehdy, když jsou třecí povrchy při pohybu plně odděleny vrstvou maziva a tření tedy nastává pouze v mazivové vrstvě.

Hlavní částí kluzných ložisek je ložisková pánev, která se stýká s čepem, což je část hřídele, která je právě určená pro styk s ložiskem. Poloměr pánve bývá o 1 až 2 milimetry větší než poloměr čepu, tento rozdíl dává vzniknout mazací mezeře.

Kluzná ložiska mají jenom málo nevýhod, které jsou spojeny s tím, že je nutné přivádět mazivo do ložiska. Pokud by byl přívod maziva nedostatečný, mohlo by dojít k zadření. Na druhou stranu mají kluzná ložiska mnoho výhod. Jejich konstrukce je velmi jednoduchá, mají malý průměr, umožňují tichý a klidných chod při vysokých otáčkách a jsou schopna tlumit rázy a chvění, což je značná výhoda oproti ložiskům valivým, která jsou na rázy citlivá.[7]



Obr.7 Konstrukce kluzného ložiska (převzato z [g])

1.3.2 Rozdělení kluzných ložisek

Kluzná ložiska se dělí podle toho, jakým způsobem je realizována mazací vrstva mezi třecími plochami a podle oblasti tření, ve které ložisko pracuje. Kluzná ložiska se dělí na ložiska s kapalinným třením a hydrodynamickým mazáním, ložiska pracující s mezním třením a ložiska s hydrostatickým mazáním.

- Kluzná ložiska s kapalinným třením a hydrostatickým mazáním potřebují pro správnou funkci určitou minimální kluznou rychlost, která závisí na ložiskové vůli a viskozitě maziva.
- Kluzná ložiska pracující s mezním třením se používají tam, kde se uvažuje jednodušší konstrukční provedení a to i za cenu většího opotřebení.
- Kluzná ložiska s hydrostatickým mazáním jsou nezávislá na kluzné rychlosti. Pro jejch spolehlivou funkci je zapotřebí velmi spolehlivý mazací systém.[7][8]

1.4 Magnetická ložiska

V této podkapitole, která je zaměřena převážně na magnetická ložiska, jsou vysvětleny principy funkce aktivních i pasivních magnetických ložisek, jejich základní konstrukce a omezení a v případě aktivních ložisek jejich použití a možnosti řízení.

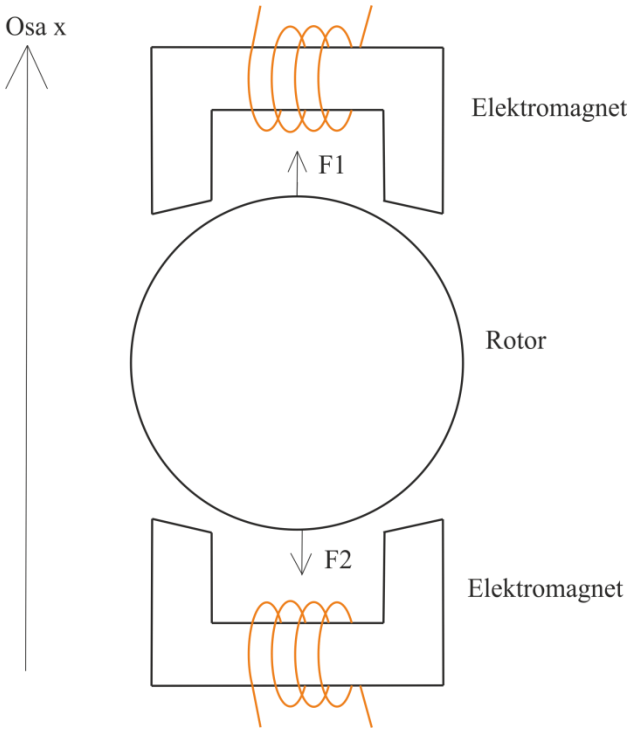
1.4.1 Základní informace

Magnetická ložiska jsou taková ložiska, která zachycují a udržují otočné části pomocí magnetické levitace. Přitom nedochází k fyzickému kontaktu mezi rotující částí a samotným ložiskem, což je základní výhoda tohoto typu ložisek.

U pasivních magnetických ložisek jsou k tomuto účelu použity permanentní magnety, není zapotřebí přivádět žádnou další energii k činnosti těchto ložisek. Konstrukce magnetických ložisek s permanentními magnety je ale velmi složitá a v jejich vývoji prozatím nedošlo k takovému pokroku, aby bylo možné je bezpečně používat. Základním limitem pasivních magnetických ložisek je Earnshawův teorém, který byl zformulován již v 19. století. Z tohoto teorému vychází pro nás velmi důležitý poznatek. Působením pouze permanentních magnetů není možné dosáhnout stabilní levitace, o čemž se přesvědčíme v následujících kapitolách. Z tohoto důvodu jsou používána především aktivní magnetická ložiska, a proto se v dalších částech této kapitoly budeme zabývat pouze aktivními magnetickými ložisky.

Základní konstrukce aktivních magnetických ložisek obsahuje elektromagnety s příslušným napájením a aktivní regulační systém, který slouží ke stabilizaci hřídele ve vzduchové mezeře. Podmínkou funkce je, aby hřídel byla vyrobena z feromagnetického materiálu a tím mohla být zajištěna interakce s elektromagnety. Na Obr. 8 je znázorněn tento princip se dvěma elektromagnety. Proudy elektromagnetů jsou řízeny tak, aby rotor levitoval působením sil F_1 a F_2 a byl neustále udržován v jedné poloze.

V praxi se ovšem konstruují aktivní magnetická ložiska s minimálně čtyřmi elektromagnety. Nezřídka se také používá kombinace permanentních magnetů a elektromagnetů, kdy permanentní magnety slouží k udržení otočné části a pomocí elektromagnetů je možné regulovat pozici této části, dojde-li k jejímu vychýlení z požadované polohy. Tato vychýlení neustále monitorují snímače vzduchové mezery, jejich vyhodnocení jsou odesílána řídícím obvodům, které dále upravují napájení elektromagnetů dle potřeby. [9][10][11]



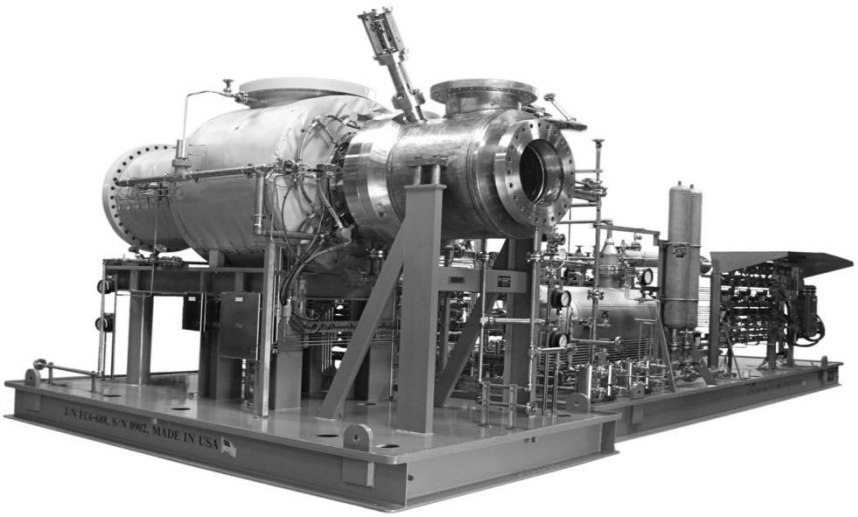
Obr.8 Aktivní magnetické ložisko se dvěma elektromagnety

1.4.2 Použití aktivních magnetických ložisek

V magnetických ložiskách se nevyskytují žádná maziva, a tak jsou vhodná pro stroje pracující ve vakuu, při velmi vysokých nebo naopak velmi nízkých (kryogenních)

teplotách, tedy -180 °C a nižších. Případně je možné je používat v agresivním prostředí, např. v kyselinách.

Magnetická ložiska se využívají v takových strojích, ve kterých nesmí dojít ke kontaminaci s mazivy nebo částicemi otěru, čím dál časteji se používají v průmyslových strojích jako jsou kompresory, turbíny, motory, pumpy a generátory. Kompresor s aktivními magnetickými ložisky je zobrazen na Obr. 10. Magnetická ložiska se hojně používají při zpracování ropy, v plynových centrifugách pro separaci plynů s různou molekulární váhou, při transportu plynu a v turboexpandérech, což jsou zařízení, která umožňují získání tekutého vodíku, kyslíku a jiných kryogenních plynů. Příklad tohoto zařízení je na Obr. 9. Využívají se také při obohacování uranu a v turbomolekulárních pumpách, kde ložiska s mazivy by byla právě zdrojem kontaminace.



Obr.9Turboexpandér s aktivními magnetickými ložisky (převzato z [h])

Dále se aktivní magnetická ložiska používají tam, kde je používání maziv vyloučeno kvůli výrobnímu postupu. To je typické pro linky na výrobu polovodičových součástek a potravinářský průmysl.

Vzhledem k tomu, že magnetická ložiska mají minimální ztráty, je možné pro stejnou aplikaci zvolit motor s menším výkonem, čímž bude zajištěna vyšší účinnost. Kvůli nízkým ztrátám jsou provozní teploty zpravidla mnohem menší než právě u ložisek valivých a kluzných, a tudíž není nutné tolik celé zařízení chladit.

Díky tomu, že magnetická ložiska pracují s řízením velikosti vzduchové mezery, je

možné je rovnou použít v procesech, které vyžadují průtok požadované kapaliny. Dále se využívají ve farmaceutickém průmyslu a při zpracování živých buněk. Magnetická ložiska je možné hermeticky utěsnit a tak jsou vhodná pro procesy, které jsou založeny na použití agresivních kapalin, které by mohly poškodit vinutí nebo vrstvení.

Běžně se magnetická ložiska používají v přístrojích, které měří spotřebu elektrické energie v domácnostech. Magnetická ložiska mají velké uplatnění v maglev (magneticky levitujících) vlacích, kde slouží ke snížení hluku, zaručení hladké jízdy vlaku a k eliminaci kontaktu s povrchem. Tratě pro Maglev jsou velmi nákladné a musejí být z bezpečnostních důvodů stavěny na mostech nebo v tunelech, což prodražuje a zpomaluje vývoj této technologie. Rychlost těchto vlaků je obrovská, rychlostní limit vytvořili v Japonsku v roce 2015, když vlak dosáhl rychlosti 603 km/h. Rychlost je především limitována spotřebou energie a aerodynamickým odporem. Tento problém se snažil vyřešit projekt Swissmetro tím, že navrhuje provozovat dráhu v tunelech zbavených vzduchu až ke hranici vakua. Takové řešení bylo navrženo i pro transatlantický tunel, ale vzhledem k enormním nákladům nebylo realizováno. [9][10][11]

Obr.10 Kompresor s aktivními magnetickými ložisky pro zpracování plynu (převzato z [i])

1.4.3 Únosnost aktivních magnetických ložisek

Únosnost aktivních magnetických ložisek závisí na geometrickém uspořádání elektromagnetů, magnetických vlastnostech materiálu a řídící elektronice. Vzhledem k tomu, že síly vznikající vlivem vibrací a chvění mají často nestacionární charakter, tak jsou dynamické požadavky na ložiska důležitější než statické hodnoty únosné síly.

Magnetické síly jsou vytvářeny v magnetických polích, která jsou vytvářena elektrickým proudem nebo permanentními magnety. Rotační magnetické pole je vytvářeno kolem přímého tenkého vodiče, viz Obr. 11.

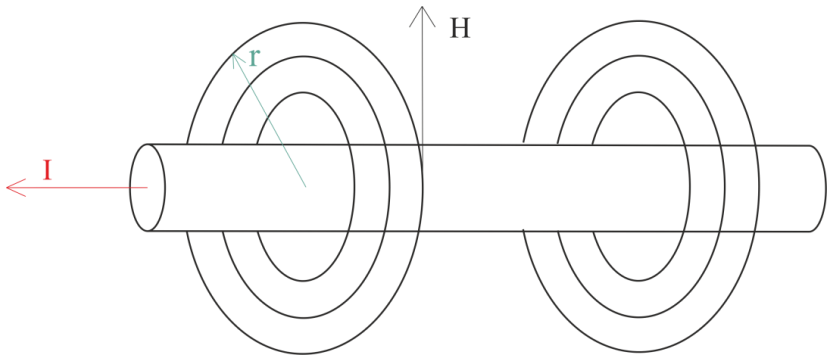
Ze vzorce

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = I + \frac{\partial \vec{\Psi}}{\partial t} \quad , \tag{1}$$

kde $\vec{H}$ je intenzita magnetického pole, $d\vec{l}$ je element délky, I je budící proud a $\frac{\partial \vec{\Psi}}{\partial t}$ je posuvný proud, můžeme vyjádřit rozložení magnetického pole kolem vodiče. Protože budící proud je stejnosměrný, posuvný proud neuvažujeme a intenzitu magnetického pole vyjádříme

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad , \tag{2}$$

kde $2\pi r$ je délka kružnice, viz Obr. 11.



Obr.11 Tenký přímý vodič protékaný proudem, vytvářející magnetické pole

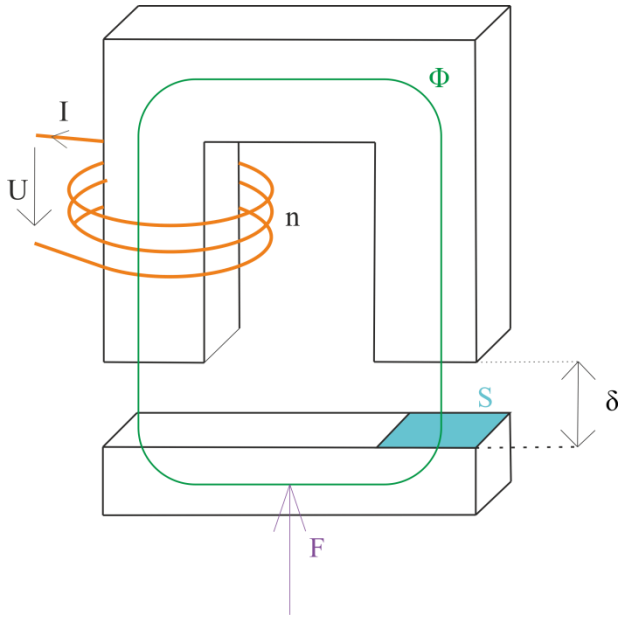
Z toho plyne, že magnetické pole je nezávislé na materiálu kolem vodiče, který toto pole vytváří. Je-li v integrační cestě několik proudových smyček, jako například v případě cívky se vzduchovým jádrem, platí následující vzorec:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = N\, I \tag{3}$$

kde N je počet závitů cívky a posuvný proud, který byl vyjádřen v rovnici (1) opět

neuvažujeme, protože budící proud je stále stejnosměrný.

V ložiskách cirkuluje magnetický tok ve smyčce. Magnetický tok Φ je možné znázornit pomocí siločár. Toto je ilustrováno na Obr. 12, pro přehlednost je znázorněna pouze jedna siločára.



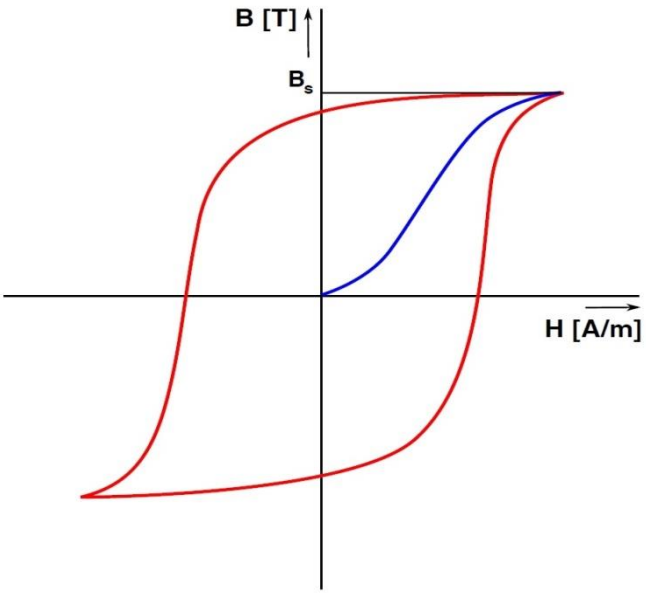
Obr.12 Elektromagnet z feromagnetického materiálu

Vztah mezi magnetickou indukcí a intenzitou magnetického pole je

$$B = \mu_0 \, \mu_r \, H \ , \qquad (4)$$

kde μ_r je permeabilita daného materiálu a μ_0 permeabilita vakua.

Při použití feromagnetických materiálů, u kterých μ_r je mnohem větší než 1, je magnetický tok koncentrován v tomto materiálu. Chování feromagnetického materiálu je znázorněno diagramem na Obr. 13, ve kterém je vykreslena hysterezní smyčka a saturační oblast. Saturace znamená, že magnetická indukce B dosáhla svého maxima a už se nebude dále zvyšovat a to i přesto, že se intenzita magnetického pole H a proud, který ji vytváří, zvyšuje.



Obr.13 Hysterezní smyčka
(převzato z [j])

Energie ve vzduchové mezeře pro případ z Obr. 12 vychází ze vztahu:

$$W = \frac{1}{2} B H S 2\delta \quad , \tag{5}$$

kde S je plocha, kterou prochází siločáry magnetického toku Φ a δ je délka vzduchové mezery, viz Obr. 12.

Síla, kterou je rotor na Obr. 12 přitahován, je dána derivací vztahu (5) dle proměnné δ, tedy:

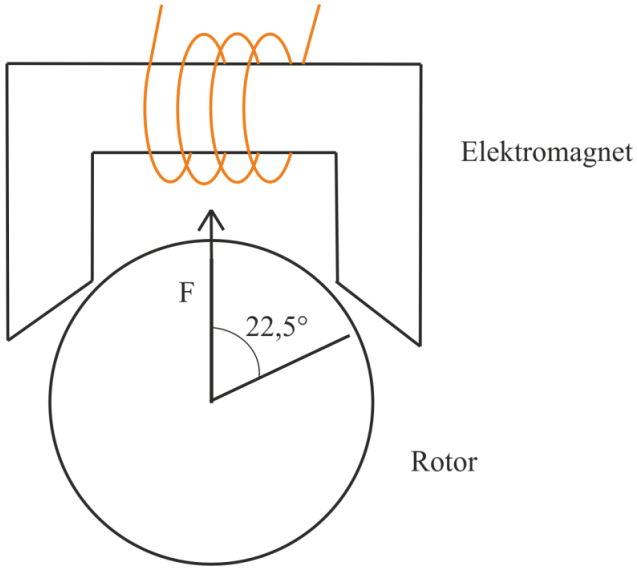
$$F = \frac{B^2 S}{\mu 0}. \tag{6}$$

V rozmezí, ve kterém je magnetická indukce B úměrná intenzitě magnetického pole H a ji vyvolávajícímu proudu I, je síla dána tímto vztahem:

$$F = \mu_0 S \left(\frac{N I}{2 \delta}\right)^2 = \frac{1}{4} \mu_0 N^2 S \frac{I^2}{\delta^2} \ . \tag{7}$$

V případě reálných magnetických ložisek působí oba magnetické póly na rotor pod úhlem α, a to z důvodu jejich geometrického uspořádání, jak je vyobrazeno na Obr.14. U ložiska se dvěma magnety se jedná o úhel α = 22,5° a vztah pro sílu je nutné dle toho upravit

$$F = \mu_0 S \left(\frac{N I}{2 \delta}\right)^2 \cos \alpha = \frac{1}{4} \mu_0 N^2 S \frac{I^2}{\delta^2} \cos \alpha. \tag{8}$$



Obr.14 Působení magnetických polů na rotor pod úhlem 22,5°

Dosáhne-li proud vytvářející intenzitu magnetického pole H hodnoty, kdy se magnetická indukce ocitne v saturaci, dosáhne únosná síla svého maxima a i přes zvyšující se hodnotu proudu se síla nebude nadále zvětšovat. V dnešní době při použití materiálů v ložiskových magnetech je maximální magnetická indukce B=1,5 T. Dále vzhledem k praktickým konstrukcím aktivních magnetických ložisek uvažujeme, že plocha S, symbolicky vyznačená na Obr. 12, je dána vztahem:

$$S = \frac{d\,\pi}{16}\,b \quad , \tag{9}$$

kde d je poloměr rotoru a b je délka magnetické části rotoru.

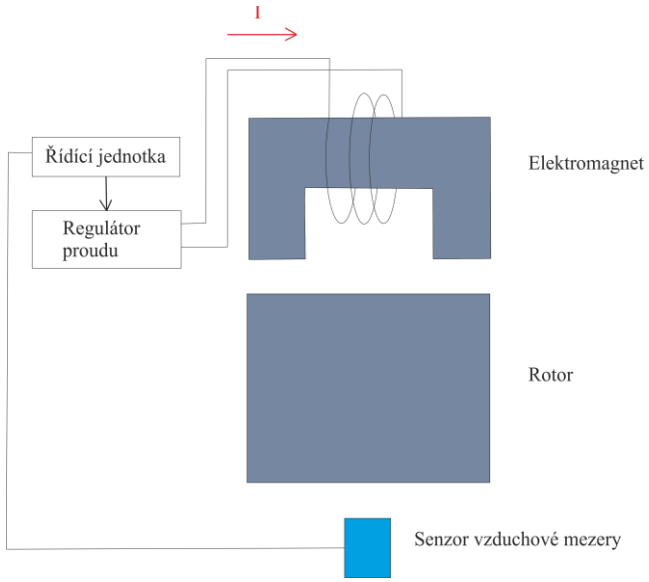
Z těchto poznatků jsme schopni odvodit maximální sílu působící na 1 cm^2. Dosadíme tuto plochu S do rovnice (6) a rovnici vynásobíme cos α, jak jsme vysvětlili u rovnice (8). Vyjádříme tedy F_{max} na 1 cm^2 :

$$\frac{F_{max}}{d\,b} = \frac{B^2\pi}{16\,\mu_0}\cos\alpha = \frac{1{,}5^2\pi}{16\,\mu_0}\cos 22{,}5° = 32{,}48\ \frac{N}{cm^2} \tag{10}$$

Vypočetli jsme, že maximální síla působící na 1 cm^2 rotoru je v aktivních magnetických ložiskách 32,48 N/ cm^2 . Tato únosnost je až 4x menší než únosnost ložisek valivých nebo kluzných. [12][13]

1.4.4 Řízení aktivních magnetických ložisek

Pro správnou funkci aktivních magnetických ložisek je zapotřebí sofistikovaného řízení. Protože se rotor neustále vychyluje z ideální polohy, došlo by bez tohoto řízení ke kolizi rotoru s magnetem. Řídicí obvody, které těmto kolizím brání, umožňují levitaci a udržují rotor ve stabilní poloze, se skládají ze senzorů vzduchové mezery a řídicí jednotky. Součástí řídicí jednotky je i regulátor proudu dodávaného elektromagnetům. Na Obr. 15 je pro přehlednost znázorněno řízení jednoho elektromagnetu.



Obr.15 Řídicí prvky aktivního magnetického ložiska

Na senzory jsou kladeny vysoké požadavky, protože musí snímat polohu s velmi vysokou přesností. Senzory mohou být laserové, které jsou sice velmi přesné, ale náročné na čistotu prostředí a na finance. Dále se používají senzory indukční, které nejsou náchylné na znečištění, ale nejsou tak přesné jako senzory laserové. Pro práci ve vyšších teplotách se pak používají kapacitní senzory, které jsou velmi přesné. Senzory změří vzdálenosti vzduchové mezery a posílají dané hodnoty do řídící jednotky. Řídící jednotka se skládá ze tří částí, a to části s procesorem digitálního signálu (DSP), napájecího zdroje a regulátoru. DSP je řídící centrum magnetického ložiskového systému. V závislosti na údajích ze senzorů reguluje proud přicházející do ovládacích jednotek až 10 000x za sekundu. Napájecí zdroj převádí střídavý proud na stejnosměrný, který je nutný pro ložiskové regulátory, které regulují proud přiváděný do ložisek podle nastavených hodnot v elektronice DSP. [14]

2 Návrh pasivního magnetického ložiska

Tato kapitola je zaměřena na popis a návrh pasivních magnetických ložisek pro levitující hřídel motoru, která budou demonstrována na experimentálním modelu Mendocino motoru.

2.1 Mendocino motor

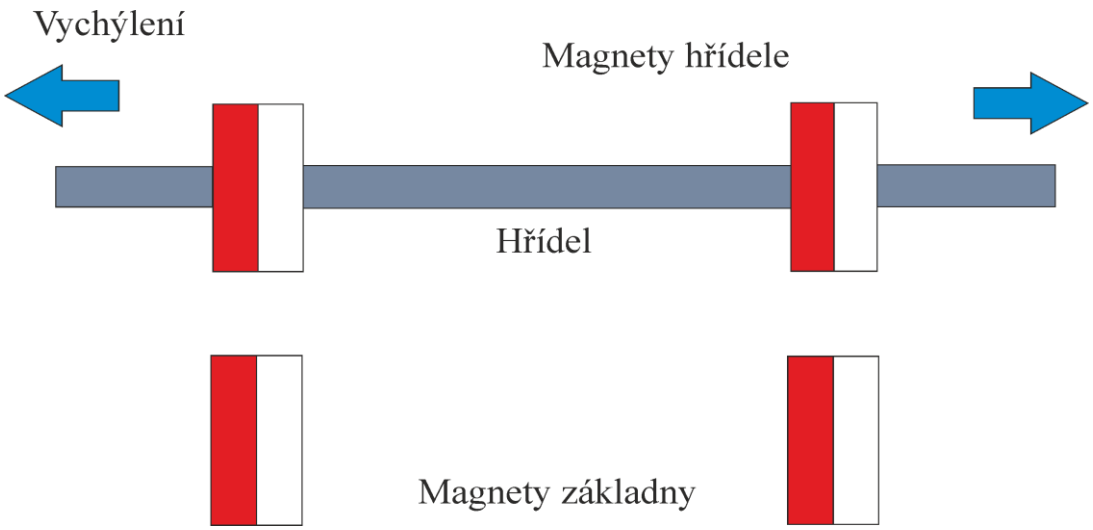
V roce 1994 byl poprvé postaven stejnosměrný motor, který byl napájen fotovoltaickými články a jeho hřídel byla nesena permanentními magnety, tedy jednoduchými pasivními magnetickými ložisky. Tento motor vyrobil konstruktér a popularizátor vědy Larry Spring a pojmenoval tento motor podle okresu ve kterém žil, tedy Mendocino, což je okres státu Kalifornie v USA.

Mendocino motor se skládá ze třech hlavních částí, ze základny, hřídele a opěrné stěny. Na hřídeli je rotorový a fotovoltaický blok a dva permanentní magnety. Rotorový blok je nejčastěji složen ze čtyř, šesti nebo osmi cívek. Každá tato cívka je napájena jedním fotovoltaickým článkem, který se nachází na fotovoltaickém bloku. Dále na každé straně hřídele je po jednom permanentním magnetu. Základna Mendocino motoru se skládá z magnetů, které se nacházejí pod magnety hřídele a budících magnetů, které se nacházejí pod rotorovým, a vlastně i fotovoltaickým blokem hřídele.

Permanentní magnety na základně a na hřídeli na sebe působí odpudivě a tak by zdánlivě mohla vzniknout levitace, viz Obr. 16. Ovšem jak říká Earnshawův teorém, takovým způsobem není možné dosáhnout stabilizovaného stavu, a hřídel by se vychýlila na levou či pravou stranu, jak je znázorněno šipkama na Obr. 16. Tento problém bude řešen později. Nyní se vraťme na okamžik k aktivním magnetickým ložiskům. U aktivních mangnetických ložisek bychom stabilizovaného stavu bez neustálého řízení proudů cívek nemohli nikdy dostáhnout. U pasivních magnetických ložisek o řízení neuvažujeme a vychýlení hřídele na levou či pravou stranu se nevyhneme. Proto součástí tohoto motoru je i opěrná stěna, do které se zapírá hřídel svojí jednou stranou. Velmi důležitým poznatkem je to, že pokud by magnety na hřídeli byly naprosto přesně pod opěrnými magnety na základně, nebyli bychom schopni určit, na kterou stranu se hřídel vychýlí, a nebylo by možné určit polohu opěrné stěny. Proto jsou magnety na hřídeli nepatrně posunuty oproti magnetům na bázi tím směrem, kde je umístěna opěrná stěna. Z toho vyplývá, že se v Mendocino motoru objevuje tření o pevnou plochu. Ke zmenšení tohoto tření se na stranu hřídele, která je zapřená do stěny, montuje jehla, díky které se zmenšuje dotyková

plocha a tím tedy i celkové tření. Po zhodnocení těchto poznatků můžeme říci, že se v tomto případě nejedná o čistou levitaci hřídele, ale o pseudolevitaci.

Princip samotné rotace hřídele je velmi jednoduchý. Při dopadu světla na fotovoltaický článek je cívka napájena, a kolem ní vzniká magnetické pole. Magnetické pole cívky reaguje s magnetickým polem budících magnetů, které jsou na základně a cívka je odpuzena. Tím se změní jak poloha cívek, tak i patřičně poloha fotovoltaických článků. Cívka, která se nyní dostává do magnetického pole budících magnetů, je nově napájena fotovoltaickým článkem, který se nyní posunul na pozici, kam dopadá světlo. Tato cívka je opět odpuzena a celý proces se neustále opakuje. Jedná se tedy vlastně o stejnosměrný motor se světelnou komutací.

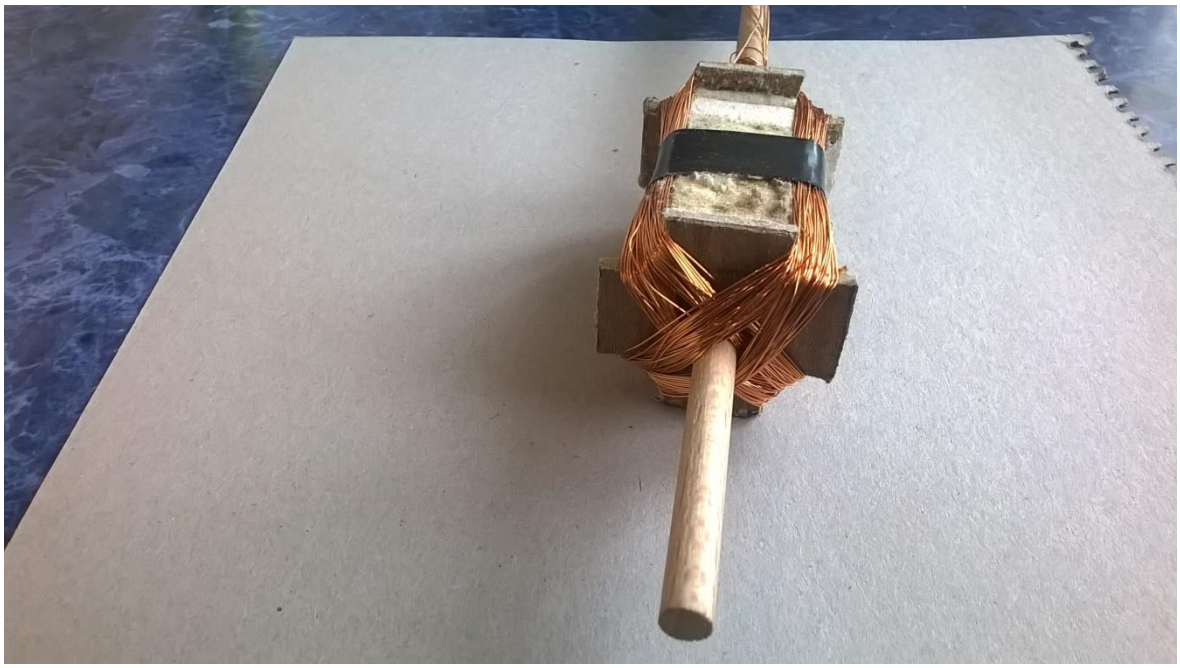


Obr.16 Vychýlení hřídele

2.1.1 Výroba Mendocino motoru

Při výrobě Mendocino motoru je nutné mít na paměti, že vzhledem k napájení solárními články má tento motor velmi malý výkon, a tudíž k tomu, aby byl schopen se sám roztočit, je potřeba zajistit co nejmenší hmotnost hřídele. Tuto hmotnost je možné ovlivnit pouze nosným materiálem a počtem měděných závitů cívky, protože při výběru magnetů na hřídeli jsme omezeni magnety dostupnými na trhu. Jako materiál hřídele jsem zvolil lehké dřevo. Jedná se o tyč o průměru 6 mm. Tento rozměr jsem zvolil kvůli geometrickým rozměrům magnetů, které jsem na hřídel nasadil. Dále jsem vybral solární články se jmenovitými hodnotami 0,5 V a 200 mA. Pro závity cívek jsem použil měděné dráty o průměru 0,28 mm. Konstrukce, na kterou jsem namotal cívky je ovlivněna geometrickými rozměry solárních článků, jejichž délka je 5,5 cm a šířka 3,6 cm, takže

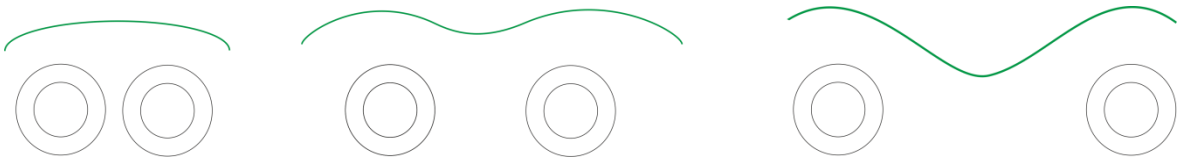
těmito rozměry byla ovlivněna i délka jednoho závitu cívky, která je 13 cm. Nyní bylo nutné zvolit takový počet závitů cívky, aby byl tento počet nejvyšší při tom, aby nedošlo k poklesu jmenovitého proudu protékaného cívkou. Z Ohmova zákona vyšlo, že při takové podmínce je maximální odpor celé cívky 2,5 Ω. Z tabulkové hodnoty jsem vyčetl, že měrný odpor měděného drátu o průměru 0,28 mm je 0,28 Ω / m. Dále bylo dopočítáno, že celková délka cívky musí být 8,93 m, aby bylo dosaženo celkového odporu právě 2,5 Ω. Po vydělení této délky délkou jednoho závitu, což je výše zmiňovaných 13 cm, jsem došel k závěru, že je nutné namotat 68 závitů pro jednu cívku. Namotání cívek je zobrazeno na obr. 17. Poté jsem začátky cívek připájel na mínusy příslušných solárních článků a konce cívek na plusy. Solární články jsem poté umístil na tuto dřevěnou konstrukci nad cívky a vteřinovým lepidlem je zafixoval. Poté jsem solární články ještě víc zpevnil průhlednou izolepou, aby při rotaci hřídele nedocházelo vůbec k žádným pohybům článků, což by mělo za následek vychylování hřídele. Tímto byla dokončena výroba hřídele a samotným ložiskům je věnována následující kapitola.



Obr.17 Namotané cívky na dřevěné konstrukci

2.2 Návrh pasivních magnetických ložisek pro levitující hřídel

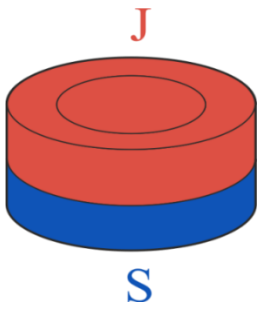
Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, pasivní magnetické ložisko Mendocino motoru se skládá ze dvou magnetů na základně a jednoho magnetu na hřídeli. Základním parametrem pro realizaci takového ložiska je rozložení magnetického pole mezi dvěma magnety na základně. Na obr. 18 je patrné, na jakém principu je tato myšlenka založena.



Obr.18 Různé verze rozložení magnetického pole pomocí základových magnetů

První verze rozložení magnetického pole, kdy magnety na základně jsou velmi blízko sebe, je pro tento návrh zcela nevyhovující. Pokud bychom na takové pole umístili hřídel, resp. magnet na hřídeli, docházelo by k posunu hřídele na levou či pravou stranu a nebylo by možné dosáhnout stabilního stavu v klidu, natož potom při rotaci hřídele. Druhá verze rozložení magnetického pole je pro náš návrh vhodnější než verze předchozí. Pokud bychom do vzduchové kapsy, která vznikla oddálením magnetů a zeslabením pole mezi nimi vložili hřídel s magnetem, dosáhli bychom stabilního stavu v klidu, tzn. pokud by hřídel nerotovala. Ovšem při roztáčení hřídele by se v tomto případě mohlo stát, že magnet na hřídeli by z této velmi mělké kapsy vyskočil a opět by došlo k vychýlení hřídele na jednu ze stran. Třetí verze rozložení magnetického pole je nejvhodnější pro návrh levitující hřídele. Vzduchová kapsa je dostatečně hluboká na to, aby i při roztáčení hřídele nemohlo dojít k jejímu úniku z této kapsy.

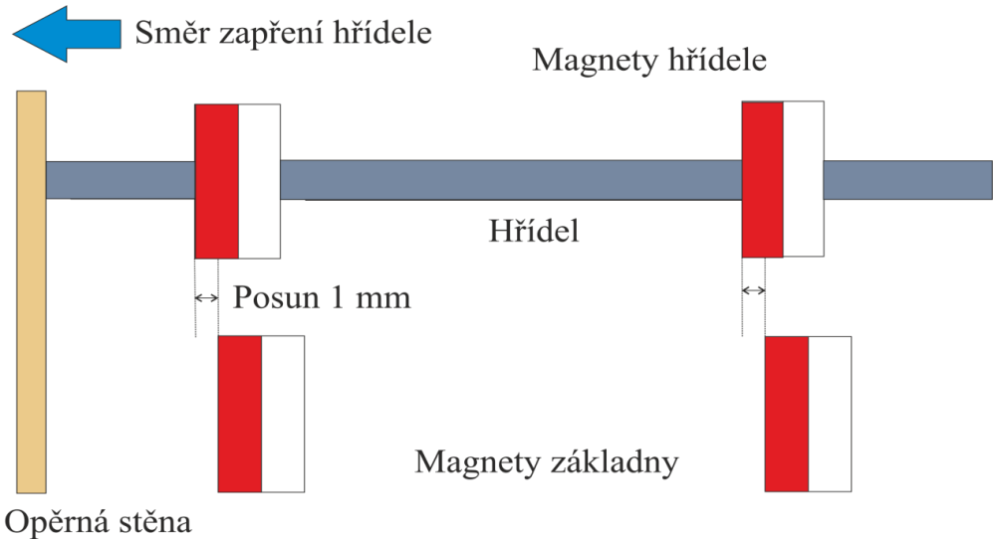
Magnety, které jsem vybral pro tento návrh byly neodymové NdFeB magnety z toho důvodu, že jsou až o 13% lehčí než samarium kobaltové nebo feritové magnety. Oproti samarium kobaltovým magnetům nejsou neodymové magnety tolik křehké, a oproti feritovým magnetům mají až 10x větší magnetickou indukci, konkrétně 1,18 T. Nevýhodou neodymových magnetů je to, že jejich maximální pracovní teplota je poměrně nízká, pohybuje se od 80°C do 130°C, což pro danou aplikaci není problém. Námi zvolené magnety mají prstencový tvar, což je vhodné pro montáž na hřídel i na základnu, a také nám tento tvar umožňuje nerušenou rotaci hřídele. Na Obr. 19 je ukázáno, jakým způsobem jsou rozloženy póly těchto magnetů.



Obr.19 Rozložení pólů prstencových magnetů

Nyní je nutné uvést konkrétní parametry magnetů. Vzhledem k tomu, že se mi povedlo dosáhnout nízké hmotnosti hřídele, kontrétně 177,2 gramů, měl jsem na internetovém obchodě www.neomag.cz na výběr mnoho magnetů pro základnu. Pro magnety na základně jsem tedy z dostupných magnetů zvolil magnety o vnějším průměru 25 mm, vnitřním průměru 12 mm a výšce 8 mm. Jak je vidět na Obr. 19, magnetování u těchto magnetů je právě na výšku. Mnou zvolené magnety umístěné na hřídel mají jiné geometrické uspořádání, jejich vnitřní průměr je mnohem menší z toho důvodu, že na tomto průměru je závislý i průměr hřídele, a tedy i celá váha hřídele. Vnější průměr hřídelových magnetů je tedy 30 mm, vnitřní průměr 6 mm a výška 10 mm.

Poté, co byly vybrány magnety, bylo nutné nastavit magnety na základně tak, aby bylo pole rozloženo jako na Obr. 18, 3. varianta. Nyní se musíme vrátit k poznatku, který ilustruje Obr. 16. Tedy že bez posunu magnetů na hřídeli vůči magnetům na základně by docházelo k vychýlení hřídele na levou či pravou stranu. Proto jsem magnety na hřídeli posunul o 1 mm oproti magnetům na základně ve směru, ve kterém je opěrná stěna do které se zapírá hřídel. Tímto posunem jsem zmenšil celkovou sílu, protože byla zmenšena plocha, kterou se magnety na základně a hřídeli překrývají, ale dosáhl jsem toho, že se hřídel nevychýlí ze stabilní polohy. Tento posun je ilustrován na Obr. 20. Jako vzdálenost jednoho páru základových magnetů od protějšího páru, což je stejná vzdálenost jako vzdálenost dvou hřídelových magnetů, jsem zvolil 210 mm. Delší vzdálenost samozřejmě znamená větší hmotnost hřídele, ale tato vzdálenost je nutná proto, aby na sebe už nepůsobily základové magnety a magnety budící, nacházející se pod cívkami rotorové části hřídele.



Obr.20 Znázornění posunu hřídelových magnetů

Poté, co jsem nainstaloval hřídelové magnety a tím určil i vzdálenost párů základových magnetů, bylo nutné dosáhnout rozložení magnetického pole základových magnetů podobného jako na Obr. 18, verze 3. Takového rozložení jsem v této konstrukci mohl dosáhnout pouze posuny základových magnetů. Výhodou mé konstrukce bylo, že hřídel byla symetrická, tudíž vzdálenost magnetů u obou párů základových magnetů byla stejná.
U mé poměrně jednoduché konstrukce jsem mohl hýbat základovými magnety a protože hřídel byla již vyrobena, mohl jsem pomocí experimentů zkoušet, jaká vzdálenost základových magnetů je vhodná, aby bylo dosaženo vhodného rozložení magnetického pole. Po mnoha experimentech jsem přišel na to, že nejlepší vzdálenost středů dvou magnetů na základně je 8 cm. Při takové vzdálenosti jsem zaznamenal plynulý a nerušený rozběh hřídele, nerušenou rotaci a také bezproblémové zastavení při vypnutí zdroje světla, který svítil na solární články. Při tomto rozpoložení levituje hřídel ve výšce 3 cm od horního kraje stěny, na které jsou upevněny základové magnety.

3 Numerický model pasivního magnetického ložiska

V této kapitole se budeme věnovat numerickému modelu pro návrh magnetického ložiska sestaveného experimentálního zařízení. Vzledem k rozpoložení magnetických pólů bylo nutné řešit problém v trojdimenzionální geometrii a proto byl zvolen program Comsol Multiphysics 5.0.

3.1 Matematický model

Řešení magnetického pole vychází z Maxwellových rovnic, díky kterým je možné vypočítat rozložení a hodnoty veličin magnetického pole. Základní Mawellovy rovnice jsou:

$$rot\ \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad , \tag{11}$$

$$rot\ \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad , \tag{12}$$

$$div\ \vec{B} = 0 \quad , \tag{13}$$

$$div\ \vec{D} = \rho_v \quad , \tag{14}$$

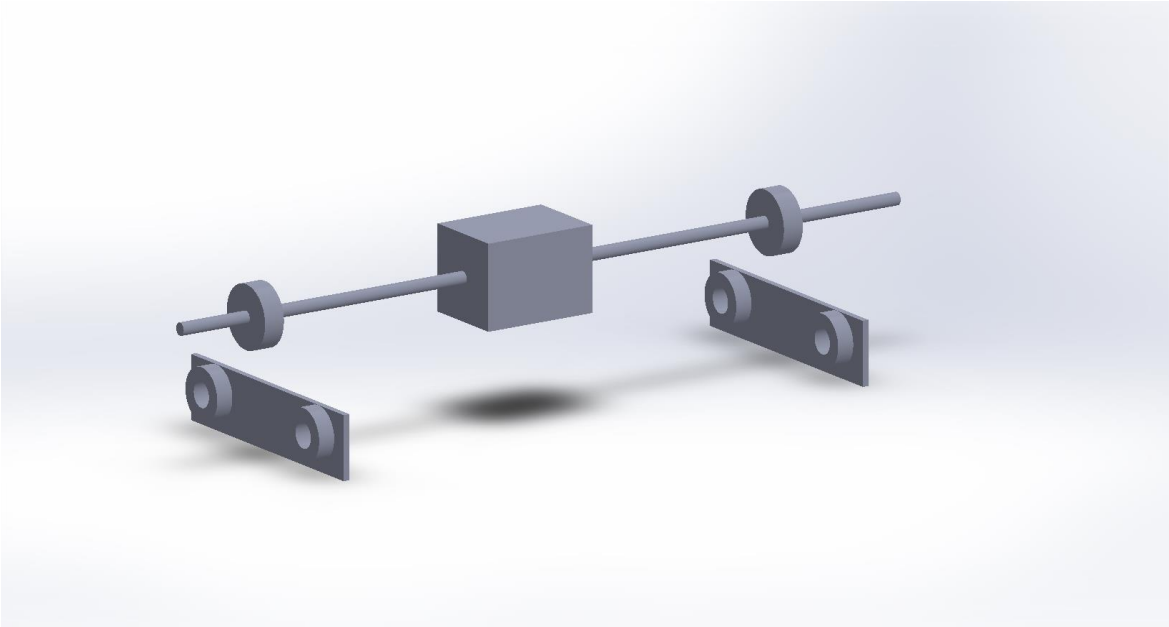
kde v první rovnici $\vec{H}$ je intenzita magnetického pole, $\vec{J}$ představuje proudovou hustotu, $\vec{D}$ je vektor elektrické indukce a t je čas. Ve druhé rovnici je $\vec{E}$ intenzita elektrického pole a $\vec{B}$ představuje magnetickou indukci. V poslední rovnici výraz ρ_v zastupuje objemovou hustotu náboje. Pro simulaci byl zvolen Comsol, který umožňuje numerické řešení pomocí metody konečných prvků. K vyřešení těchto rovnic je potřeba nastavit okrajové podmínky a materiálové parametry. V modelu pasivních magnetických ložisek je vhodné použít AC/DC Module s nastavením Magnetic Fields, No Currents. Potom tento modul poskytuje řešení pro magnetický skalární potenciál V_m:

$$div\ (-\mu\ div\ V_m) = 0 \quad , \tag{15}$$

kde μ je permeabilita materiálu a $\vec{B} = -\mu\ div\ V_m$. Tento modul je vhodný pro simulaci aplikací s permanentními magnety.

3.2 Model v programu Comsol Multiphysics 5.0

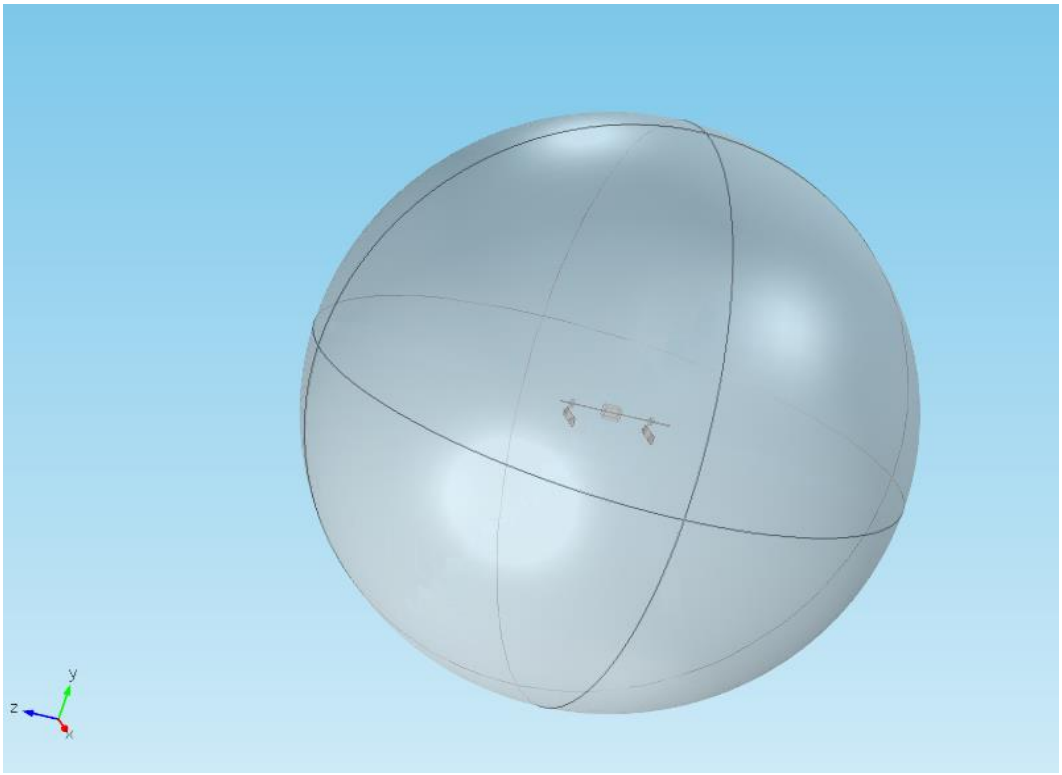
K tomu, aby bylo možné vytvořit numerický model v Comsolu, jsem nejdříve vytvořil model motoru v programu SolidWorks. V tomto programu byly namodelovány přesně ty součásti motoru, které jsou nezbytné pro modelování v Comsolu, jedná se tedy o levitující hřídel s permanentními magnety, a oblastí představující solární články. Dalšími nezbytnými částmi pro numerický model byly stěny nesoucí základové magnety. Tento model ze SolidWorks je vyobrazen na Obr. 21.



Obr.21 Model motoru namodelovaný v programu SolidWorks

Po vytvoření tohoto modelu v SolidWorks jsem ho uložili ve formátu .x_t, který je vhodný pro otevření v programu Comsol a je možné s tím dále pracovat. Po otevření modelu v Comsolu jsem nejdříve nadefinoval materiály, které byly poté použity. Jedná se o vzduch, dřevo a materiál magnetu. Materiál pro vzduch a dřevo byl nadefinovaný v knihovně programu, materiál magnetu jsem definoval manuálně. Jediný parametr, na kterém závisí výpočet, je relativní permeabilita, tu jsem tedy nastavil na 1,05 dle toho, jak udává výrobce magnetů. Poté jsem nastavil materiál hřídele a stěn na dřevo a materiál magnetů na mnou definovaný materiál. Nyní bylo nutné nadefinovat okolní prostředí jako vzduch. K modelu motoru jsem přidal kouli o poloměru 1 metr a vložil do této koule model motoru. Materiál koule jsem nadefinoval jako vzduch, tímto bylo vyřešeno okolní prostředí.

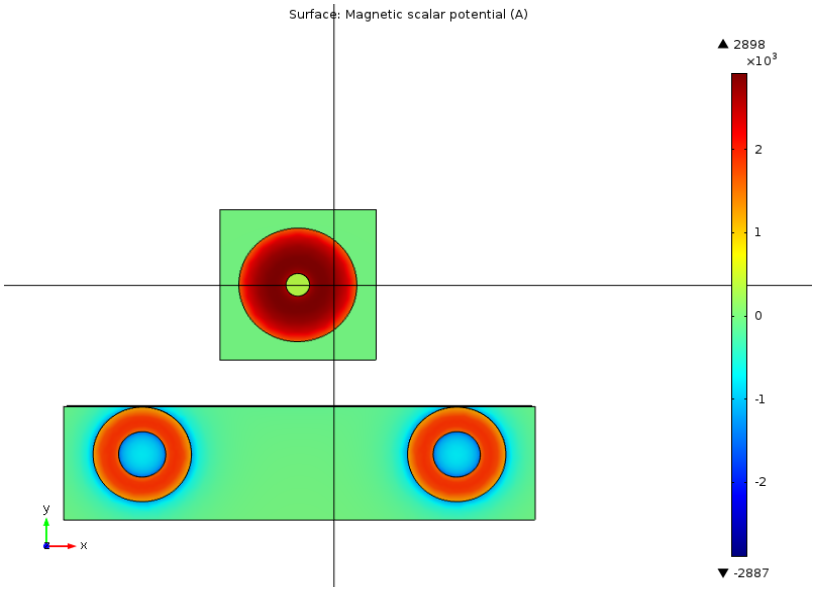
Dále jsem nastavil na povrch této koule okrajovou podmínku, a to nulový skalární magnetický potenciál, což je nezbytná okrajová podmínka pro správný výpočet. Magnetům základny a hřídele jsem nastavil remanentní magnetickou indukci 1,18 T ve směru osy z, což je směr, ve kterém se nachází stěna, do které se zapírá hřídel. Poté jsem k projektu přidal diskretizační síť, nutnou pro výpočet a rozlišení této sítě jsem nastavil na nejjemnější, aby bylo dosaženo co nejpřesnějších výsledků, a to i za cenu dlouhé doby výpočtu. Tímto bylo dokončeno nastavování geometrie, materiálu a podmínek pro simulaci magnetického pole.



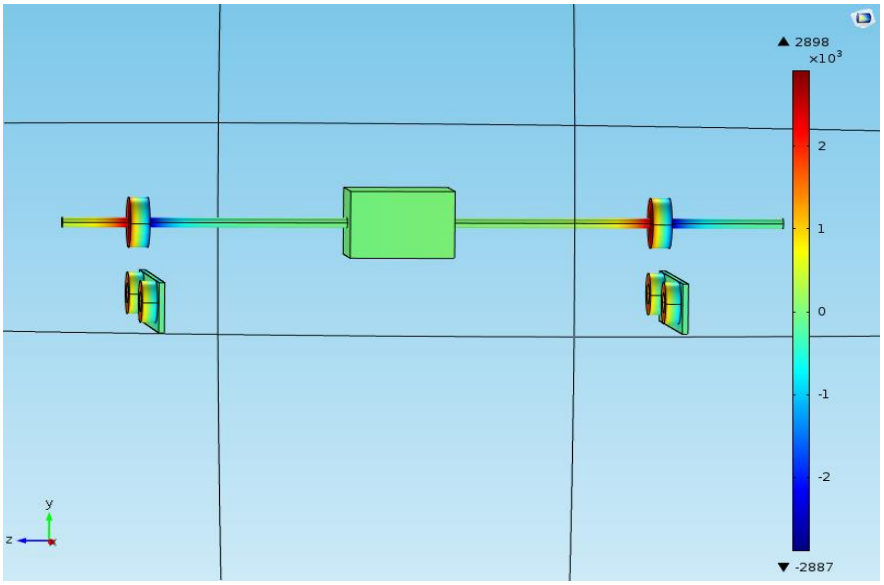
Obr.22 Celková geometrie modelu v programu Comsol

3.3 Výsledky simulace v Comsolu

Po spočtení sítě v Comsolu jsme dostali model, na kterém jsme byli schopni zobrazit všechny požadované parametry. Jako první si zde uvedeme rozložení skalárního magnetického potenciálu z toho důvodu, abychom si ověřili, že jsem správně nastavil směr magnetování u hřídelových a základových magnetů. V sekci Results jsem přidal položku 3D Plot Group a do této položky vložil položku Surface, které jsem nastavil zobrazování magnetického skalárního potenciálu. Na Obr. 23 je zobrazen skalární magnetický potenciál v pohledu zepředu, tj. v rovině os XY a na Obr. 24 v pohledu zboku, tj. v rovině YZ.



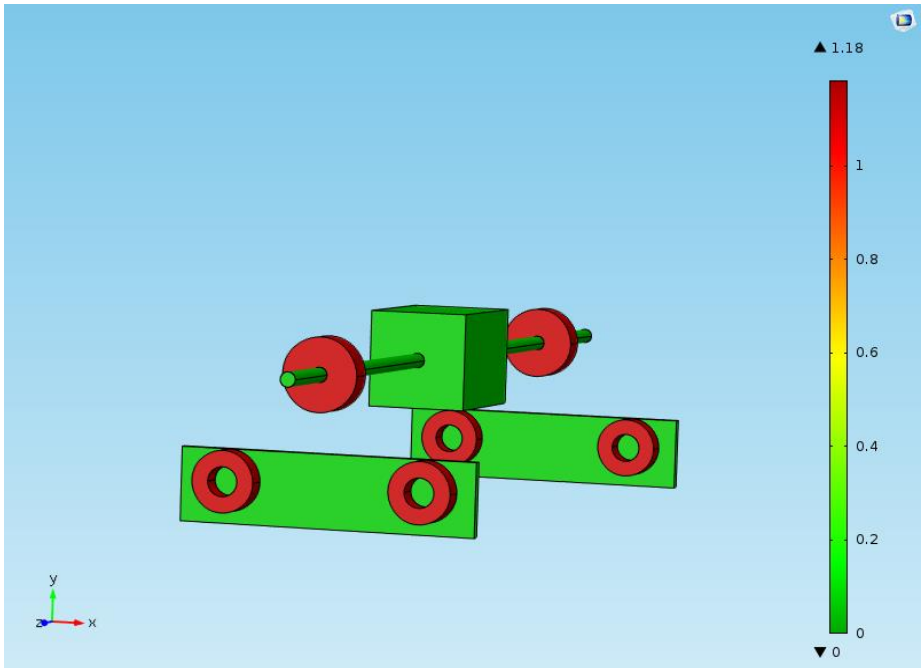
Obr.23 Rozložení skalárního mag. potenciálu v rovině XY



Obr.24 Rozložení skalárního mag. potenciálu v rovině YZ

Z Obr. 23 a 24 je patrné, že směr magnetování v numerickém modelu odpovídá reálnému směru magnetování, jak je uvedeno na Obr. 19.

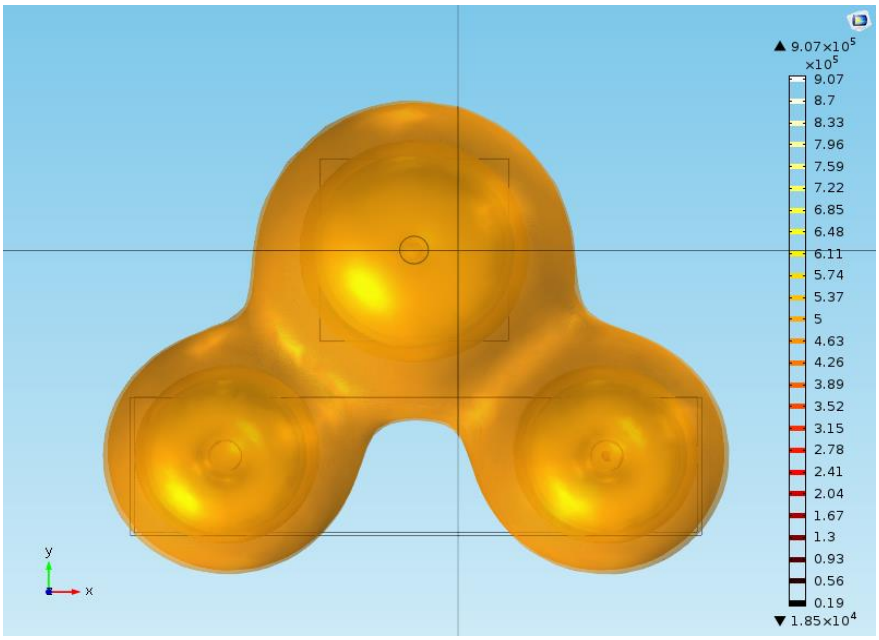
Dále bylo nutné ověřit, že jsem správně nastavil velikost remanentní indukce u použitých magnetů. K tomu jsem do položky 3D Plot Group přidal položku Volume, které bylo nastaveno, aby zobrazovala remanentní magnetickou indukci.



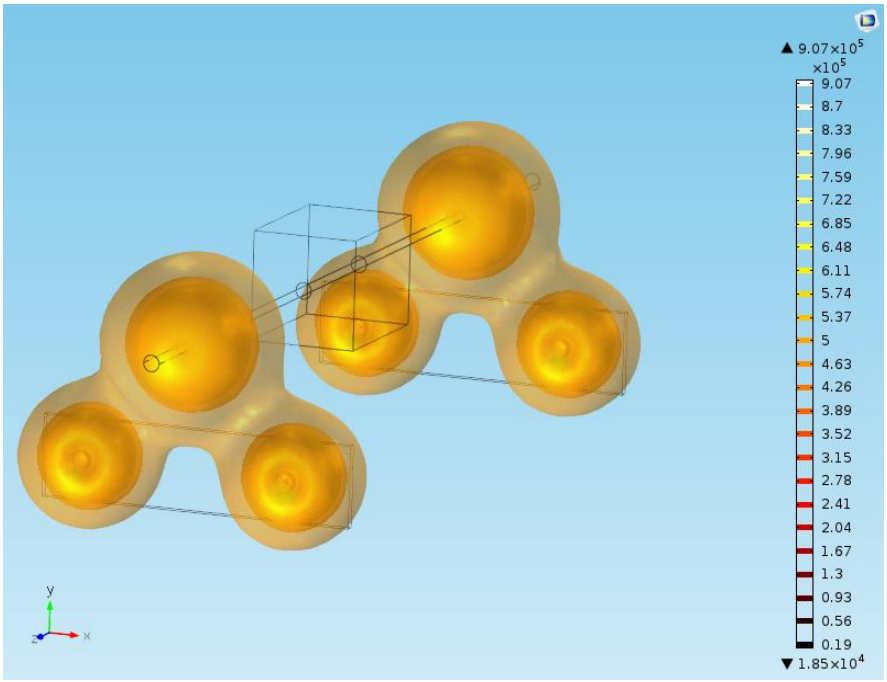
Obr.25 Zobrazení remanentní magnetické indukce

Na Obr. 25 vidíme, že remanentní magnetická indukce je v modelu nastavena na 1,18 T, což odpovídá realitě.

Ověřili jsme si, že parametry magnetů jsou nastaveny správně a můžeme přejít k podstatnějším veličinám, tj. intenzitě magnetického pole a síle působící na hřídel. K tomu jsem přidal do položky 3D Group Plot položku Isosurface, a nastavil ji nejprve na zobrazování magnetické indukce, což vidíme na Obr. 26 a 27 nejprve v rovině a poté v prostoru.



Obr.26 Intenzita magnetického pole zobrezná v rovině XY

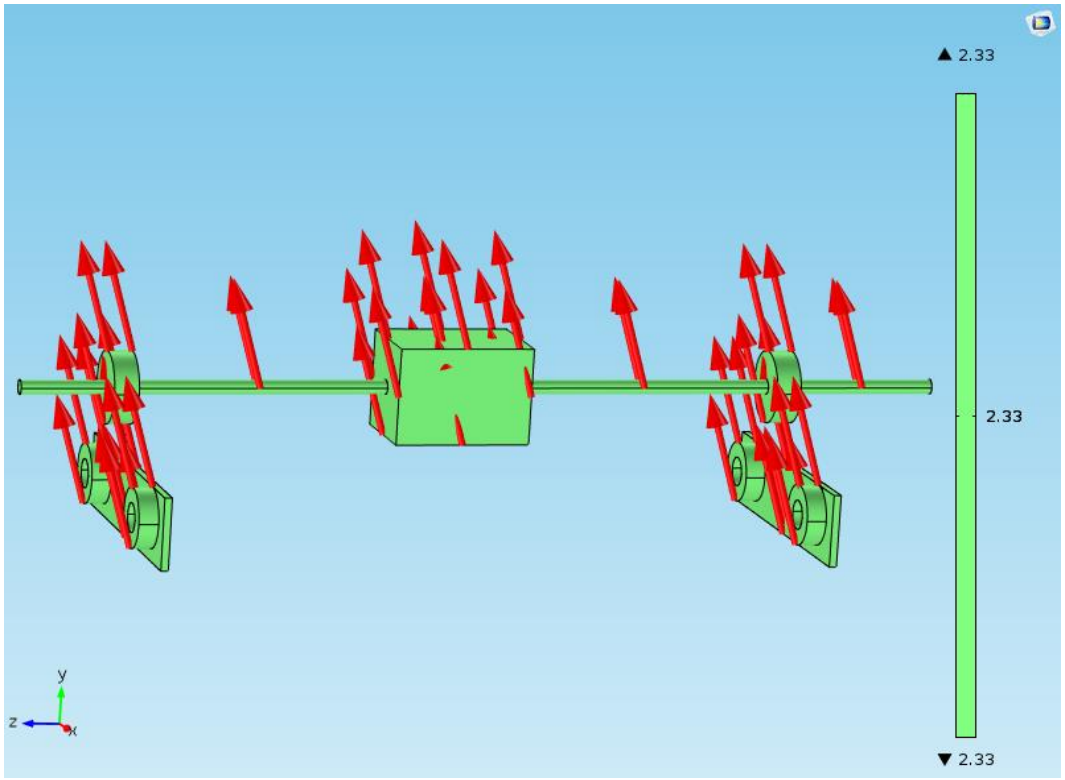


Obr.27 Intenzita magnetického pole zobrazená v prostou

Na obrázcích 26 a 27 vidíme, že rozložení intenzity magnetického pole připomíná Obr. 18, 3. verzi. Mezi základovými magnety je magnetické pole oslabeno a v těchto prohlubních leží hřídelové magnety.

Další důležitou veličinu, kterou jsme dostali z numerického modelu, je síla působící na hřídel. V položce Results jsme otevřeli položku Global Evaluation. K tomu, abychom dostali celkovou sílu působící na hřídel, bylo do příkazu pro výpočet síly nutné napsat

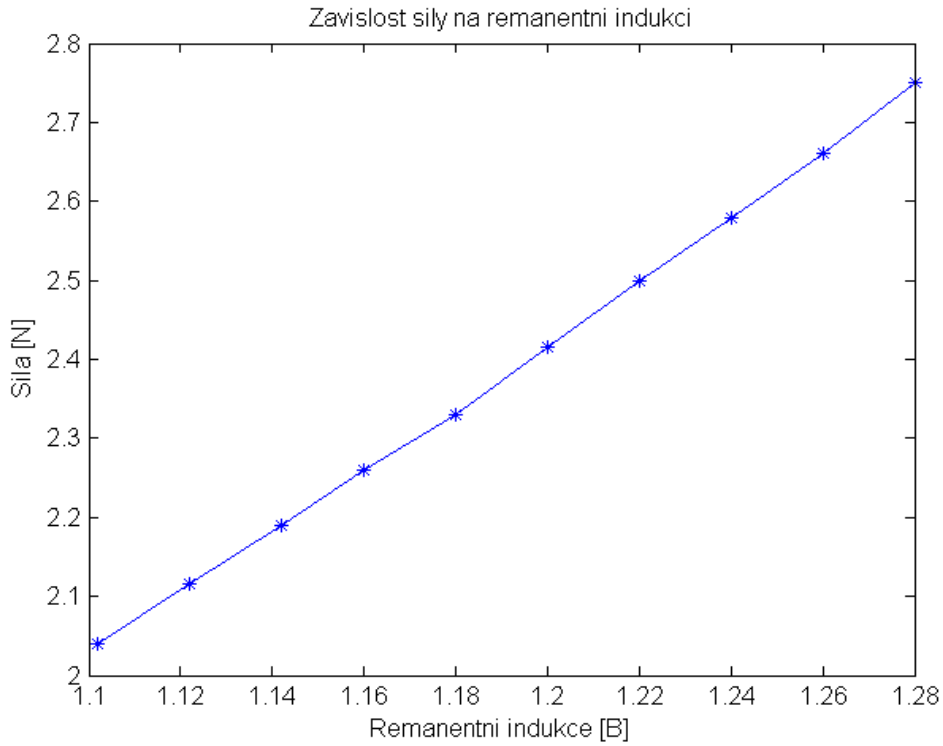
následující příkaz: sqrt(mfnc.Forcex_0^2+mfnc.Forcey_0^2+mfnc.Forcez_0^2).
Po provedení tohoto příkazu jsme dostali celkovou sílu 2,56 N. Směr působení této síly je znázorněn na Obr. 28.



Obr.28 Znázornění směru síly

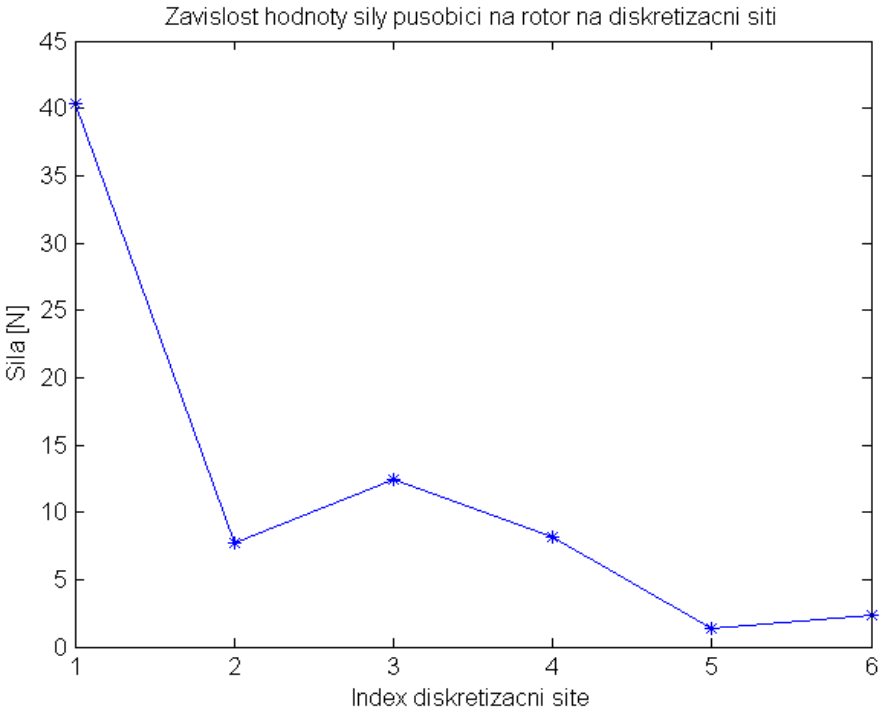
Je patrné, že směr síly není pouze ve směru osy Y, ale hřídel je mírně tlačena i ve směru osy Z. Reálně se ve směru osy Z nachází stěna, do které se hřídel zapírá, takže je zaručena stabilita hřídele. Vzhledem k tomu, že váha hřídele je 177 gramů, je síla dostačující k tomu, aby hřídel levitovala.

Nyní se budeme zabývat dvěma kritérii, která mají vliv na výslednou sílu. Prvním je remanentní magnetická indukce hřídelových a základových magnetů. Výrobcem udávaná hodnota je 1,18 T ± 10%. My jsme v našich dosavadních výpočtech uvažovali 1,18 T, tedy ideální hodnotu. Nyní jsem v modelu v Comsolu provedl deset simulací, při kterých jsem měnil hodnotu remanentní indukce magnetů a odečítal jsem výslednou celkovou sílu. Rozsah hodnot remanentní magnetické indukce jsem zvolil od 1,1 T do 1,28 T s krokem 0,02. To, jak se mění celková síla s hodnotou remanentní indukce ilustruje Obr. 29.



Obr.29 Závislost síly na remanentní magnetické indukci

Z obrázku vidíme, že závislost velikosti síly na remanentní magnetické indukci je lineární. Při uvažování ideální hodnoty 1,18 T jsme dostali výslednou sílu působící na rotor 2,33 N, nyní ale vidíme, že se v praxi tato hodnota může lišit. Druhým kritériem, kterým je ovlivněna celková velikost síly, je tentokrát dáno samotným programem Comsol. Jedná se o jemnost diskretizační sítě, která je použita při simulaci a výpočtech. Comsol nabízí široké spektrum programem předdefinovaných diskretizačních sítí, od extrémně hrubých po extrémně jemnou síť. V předešlých výpočtech a simulacích jsme používali nejjemnější síť – extrémně jemnou. Nyní si ukážeme, jaké hodnoty výsledné síly bychom dostali, pokud bychom měnili jemnost diskretizační sítě. Při těchto simulacích jsem nastavil remanentní magnetickou indukci na 1,18 T a měnil pouze jemnost sítě. Jak si ukážeme na Obr. 30, je použití dostatečně jemné diskretizační sítě zásadní.



Obr.30 Závislost síly na jemnosti diskretizační sítě

Z obrázku vidíme, že se velikost výsledné síly velmi liší v závislosti na diskretizační síti. Nyní si popíšeme indexy diskretizační sítě:

1. Extrémně hrubá diskretizační síť
2. Velmi hrubá diskretizační síť
3. Hrubá diskretizační síť
4. Středně jemná diskretizační síť
5. Velmi jemná diskretizační síť
6. Extrémně jemná diskretizační síť

Je patrné, že použití extrémně hrubé diskretizační sítě nám dává nesmyslný výsledek, velmi nepřesné výsledky jsou také při použití velmi hrubé, hrubé a středně jemné diskretizační sítě. Vzhledem k tomu, že výpočet při použití extrémně jemné diskretizační sítě trval mnohonásobně déle než výpočty při použití ostatních sítí se dá předpokládat, že se výsledek blíží realitě.

Závěr

V první kapitole byla provedena rešerše ložisek s důrazem na magnetická ložiska, byly popsány jejich základní konstrukce, použití, výhody a nevýhody. U magnetických ložisek je odvozena jejich únosnost a popsáno řízení.

Ve druhé kapitole byl popsán návrh pasivního magnetického ložiska, jeho princip, a další informace o Mendocino motoru. Byl také popsán postup výroby tohoto motoru, který byl vyroben a je funkční.

Třetí kapitola popisuje numerickou simulaci tohoto návrhu, do které patří ověření správnosti nastavení geometrického modelu a získání dat potřebných pro vyhodnocení. Do této simulace jsou zahrnuty i možné chyby, a to jak nepřesnosti parametrů magnetů tak i nepřesnosti diskretizační sítě. Na základně výše uvedených poznatků lze říci, že byly splněny všechny body zadání.

Mendocino motor zatím vzhledem k malému výkonu nemá praktického využití. Je vhodný pro prezentaci na dnech otevřených dveří, protože se jedná o atraktivní a funkční zařízení. Mendocino motor je zobrazen na Obr. 31. Tento experiment také ilustruje možnosti a limity pasivních magnetických ložisek a je vhodný pro výuku numerického modelování.

Obr.31 Mendocino motor

Seznam literatury a informačních zdrojů

[1] KLEPŠ, Zdeněk, František Kysela. Mechanické součásti a systémy. 1. vyd. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1986. 47 s.

[2] KLEPŠ, Zdeněk, František Kysela. Mechanické součásti a systémy. 1. vyd. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1986. 48 s.

[3] BUREŠ, Vlastimil. Části strojů 1. 1. vyd. Plzeň: VŠSE v Plzni- ediční středisko, 1988. 145 s.

[4] Kuličková ložiska s kosoúhlým stykem. Exvalos [online]. [cit. 2016-03-12]. Dostupné: http://www.exvalos.cz/soubory/File/Hlavni_katalog_SKF/6000_CS_02_Kulickova%20loziska%20s%20kosouhlym%20stykem.pdf

[5] KLEPŠ, Zdeněk, František Kysela. Mechanické součásti a systémy. 1. vyd. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1986. 48 s.

[6] BUREŠ, Vlastimil. Části strojů 1. 1. vyd. Plzeň: VŠSE v Plzni- ediční středisko, 1988. 146 s.

[7] KLEPŠ, Zdeněk, František Kysela. Mechanické součásti a systémy. 1. vyd. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1986. 63 s.

[8] BUREŠ, Vlastimil. Části strojů 1. 1. vyd. Plzeň: VŠSE v Plzni- ediční středisko, 1988. 133 s.

[9] CHIBA, Akira. Magnetic bearings and bearingless drives. London: Elsevier/Newnes, 2005. 1-3 s.

[10] Magnetická ložiska. Snr [online]. Moskva (RU), 2010 [cit. 2016-03-12]. Dostupné z: http://www.snr.com.ru/e/about_bearings/about_bearing.htm

[11] HARRIS, Tim a Linda WIDBRO. Magnetická ložiska. MM Průmyslové spektrum. 2005, 2005(1), 82.

[12] CHIBA, Akira. Magnetic bearings and bearingless drives. London: Elsevier/Newnes, 2005. 19-40 s.

[13] SCHWEITZER, Gerhard. *Active magnetic bearings - chances and limitations* [online]. In: . Curych (CH): International Centre for Magnetic Bearings, 2013, s. 14 [cit. 2016-03-12]. Dostupné z: http://www.mcgs.ch/web-content/AMB-chances_and_limit.pdf

[14] CHIBA, Akira. Magnetic bearings and bearingless drives. London: Elsevier/Newnes, 2005. 17 s.

[15] Position sensor. *Waukbearing* [online]. Pewaukee (USA), ©2012-2016 [cit. 2016-03-12]. Dostupné z: http://www.waukbearing.com/en/magnetic-bearing-systems/system-details/position-sensor/

Seznam převzatých obrázků

[a] http://bonesbearings.com/support/maintenance/

[b] https://shaikmoin.wordpress.com/2013/06/16/ball-bearing/

[c] http://www.skf.com/cz/products/bearings-units-housings/ball-bearings/angular-contact-ball-bearings/index.html

[d] http://www.skf.com/cz/products/bearings-units-housings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/double-row-deep-groove-ball-bearings/index.html

[e] http://www.nke.at/en/downloads/photos-graphics/products/

[f] http://www.loziska-vokoun.cz/loziska/jehlova-loziska-s-lisovanymi-pouzdry/

[g] http://www.machinerylubrication.com/Read/243/sleeve-bearing-lubrication

[h] http://www.toreuse.com/category/mining-and-geology/machinery-and-equipment-for-gas-rigs/turboexpanders/

[i] http://www.upstreampumping.com/article/production/low-vibration-compressor-motors

[j] http://www.magnety.cz/poradna/2983/