

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra technologií a měření

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Využití ferokapalin v elektromechanických systémech

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ján KUČHTA**
Osobní číslo: **E09B0228P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Využití ferokapalin v elektromechanických systémech**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování:

1. Popište strukturu, fyzikální vlastnosti, složení a způsob výroby ferokapalin.
2. Naznačte možnosti užití ferokapalin v elektromechanických systémech.
3. Sestavte model elektromechanického systému využívajícího ferokapalinu, experimentálně a matematicky ověřte vhodnost jejího užití.
4. Zhodnoťte možnosti těchto materiálů pro elektromechanické aplikace.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tiskárenská/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Mayer, Daniel: Magnetické kapaliny a jejich použití: Elektro. ISSN 1210-0880. Roč. 17, č. 3 (2007), s. 78-79
2. Odenbach, S: Magnetoviscous Effects in Ferrofluids, Springer, 2002, ISSN 0940-7677 ISBN 3-540-43068-7
3. Další bude předáno při konzultaci.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Polcar**
Katedra teoretické elektrotechniky

Data zadání bakalářské práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá v první části ferokapalinami, popsáním jejich struktury, vlastností, složení a způsobu výroby.

V druhé části je naznačeno využití ferokapalin v elektromechanických systémech.

V další části je popsán postup sestavení elektromechanického systému využívajícího ferokapalinu, experimentální a matematické ověření vhodnosti jejího užití. Konkrétně se jedná o Magnetorheologickou brzdu.

Poslední část pojednává o možnosti těchto materiálů pro elektromechanické aplikace.

Klíčová slova

ferokapalina, nanočástice, magnetická kapalina, magnetorheologická kapalina, magnetoviskózní jev, magnetorheologická brzda, magnetorheologická tlumič, magnetorheologická spojka

Abstract

The presented thesis deals in the first part with ferrofluids, describing their structure, properties, composition and methods of manufacture.

The use of ferrofluids in electromechanical systems is implied in the second part. The next section describes how to build an electromechanical system using ferrofluid, experimental and mathematical verification of the suitability of its usage, specifically of the Magnetorheological brake.

The last part deals with the possibilities of these materials for electromechanical applications.

Key words

ferrofluid, nanoparticles, magnetic fluid, magnetorheological fluid, magnetoviscous effect, magnetorheological brake, magnetorheological damper, magnetorheological clutch

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 30. 5. 2012

Ján Kuchta

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Polcarovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

1 Obsah

2	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN.....	9
3	ÚVOD.....	10
4	MAGNETICKÉ KAPALINY.....	10
4.1	STRUČNÁ CHARAKTERISTIKA MAGNETICKÝCH KAPALIN.....	10
4.2	FEROKAPALINY.....	11
4.3	MAGNETORHEOLOGICKÉ KAPALINY.....	14
5	ZPŮSOBY VÝROBY FEROKAPALIN.....	14
5.1	HEMATITOVÉ ČÁSTICE (Fe_2O_3).....	15
5.2	PRÁŠKOVÉ ŽELEZO.....	15
5.3	MAGNETITOVÉ ČÁSTICE - HYDROLÝZA MOČOVINY.....	15
5.4	VÝROBA MAGNETITOVÝCH ČÁSTIC KOPRECIPACÍ Z VODNÍCH ROZTOKŮ.....	15
6	KOMPOZITNÍ NANOČÁSTICE.....	16
6.1	Fe_3O_4 -PMMA (POLYMETYLMETAKRYLÁT) NANOKOMPOZITNÍCH ČÁSTIC.....	16
6.2	FE-NI KOMPOZITNÍ ČÁSTICE.....	16
6.3	Fe_3O_4 -PS KOMPOZITNÍ ČÁSTICE.....	17
7	VYUŽITÍ FEROKAPALIN V ELEKTROMECHANICKÝCH SYSTÉMECH.....	18
7.1	MAGNETORHEOLOGICKÝ TLUMIČ.....	18
7.2	MAGNETORHEOLOGICKÁ SPOJKA.....	20
7.3	FEROHYDRODYNAMICKÉ TĚSNĚNÍ.....	21
7.4	PROUDĚNÍ FEROKAPALINY BEZ POUŽITÍ MECHANICKÝCH ČÁSTÍ.....	21
7.5	MAGNETORHEOLOGICKÁ BRZDA.....	22
8	NÁVRH, KONSTRUKCE A VÝROBA MAGNETORHEOLOGICKÉ BRZDY (PRAKTICKÁ ČÁST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE).....	23
8.1.1	ÚVOD DO PROBLEMATIKY.....	23
8.2	METODIKA VYPRACOVÁNÍ PRÁCE.....	25
8.2.1	REŠERŠE.....	25
8.2.2	MATEMATICKÝ NÁVRH MAGNETICKÉHO OBVODU.....	25
8.2.3	KONSTRUKCE A VÝROBA.....	26
8.2.4	MĚŘENÍ.....	26
9	VYPRACOVÁNÍ.....	26
9.1	REŠERŠE.....	26
9.2	MATEMATICKÝ NÁVRH MAGNETICKÉHO OBVODU.....	27
9.2.1	VÝPOČET KOEFICIENTU PLNĚNÍ.....	28
9.3	KONSTRUKCE.....	33

9.4	VÝROBA	34
9.5	MĚŘENÍ	34
9.6	BRZDNÝ MOMENT	37
9.7	ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ:	38
10	ZHODNOCENÍ MOŽNOSTÍ TĚCHTO MATERIÁLŮ PRO ELEKTROMECHANICKÉ APLIKACE	39
11	ZÁVĚR	40
12	PŘÍSTROJE POUŽITÉ PŘI MĚŘENÍ:	42
13	SEZNAM ODBORNÉ LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	43
14	PŘÍLOHY:	45
14.1.1	TABULKA 1: MĚŘENÍ VELIKOSTI MAGNETICKÉ INDUKCE.....	45
14.1.2	TABULKA 2: ZÁVISLOST VELIKOSTI MOMENTU NA VELIKOSTI PROUDU, KTERÝ PROCHÁZÍ CÍVKOU.....	46

2 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

EM - elektromagnetické

FK- ferokapalina

MRK - magnetorheologické kapaliny

MRB - magnetorheologická brzda

MR - magnetorheologická

MO – magnetický obvod

m - hmotnost [kg]

M - moment [$N \cdot m^{-1}$]

F - brzdná síla [N]

H - intenzita magnetického pole [$A \cdot m^{-1}$]

B - intenzita magnetického pole [T]

U_m - magnetické napětí [A]

Φ - magnetický tok [W]

J - proudová hustota [$A \cdot m^{-1}$]

k - koeficient plnění

N - počet závitů, (79)

I - proud procházející vodičem závitu [A]

S - průřez vodiče závitu [m^2]

μ_{Fe} - relativní permeabilita železa

μ_{kap} - relativní permeabilita magnetorheologické kapaliny

CI - karbonylové železo

PS - polystyren

PMMA - polymethylmetakrylát

3 ÚVOD

Oblast ferokapalin (dále také „FK“) má multidisciplinární charakter. Ferokapaliny jsou jedinečné svým složením, díky kterému mají schopnost reagovat na magnetické pole.

V první části bakalářské práce byly stručně popsány magnetické kapaliny, jejich struktura, vlastnosti, složení a způsoby výroby. Následně byly popsány způsoby využití FK a magnetorheologických kapalin (dále také „MRK“) v elektromechanických systémech a stručné srovnání jejich vlastností.

Druhá část bakalářské práce je věnována popisu konstrukce a výrobě Magnetorheologické brzdy (dále také „MRB“), jako systému, který využívá magnetické kapaliny.

Cílem praktické části bakalářské práce bylo vytvořit Magnetorheologickou brzdou, pomocí které by se experimentálně prokázali vlastnosti magnetorheologických kapalin. Zvláště změna její viskozity, jako reakce na elektromagnetické pole, tzv. magnetoviskózní jev. Výstup bakalářské práce byla použita pro další výzkum na Katedře Teoretické Elektrotechniky.

4 MAGNETICKÉ KAPALINY

4.1 STRUČNÁ CHARAKTERISTIKA MAGNETICKÝCH KAPALIN

Magnetické kapaliny jsou tvořeny suspenzí velmi jemných feromagnetických nebo feromagnetických částic rozptýlených v nosné kapalině. Tyto částice o velikosti v řádech nanometrů (obvykle 3 – 15 nm) se nazývají nanočástice. Nejčastějšími materiály pro výrobu feromagnetických částic jsou magnetit (Fe_3O_4), maghemit (Fe_2O_2), kobalt (Co), železo (Fe) nebo nitrid železa (Fe_xN). Nosnou kapalinou pak může být voda, oleje (obvykle syntetické na uhlovodíkové bázi) a jejich směsi. Typická ferokapalina je

tvořena: 5% feromagnetických nanočástic, 10% detergentu a 85% nosné kapaliny. Nosná kapalina určuje chemické a mechanické vlastnosti kapaliny. Magnetické vlastnosti určují nanočástice, tedy materiál, ze kterého jsou vyrobeny, a jejich koncentrace.

Magnetické vlastnosti ztrácejí při dosažení Curierovy teploty, která je pro železo 770°C.

4.2 FEROKAPALINY

Ferokapaliny lze díky jejich vlastnostem zařadit mezi tzv. „chytré kapaliny“. Jestliže na ně působí dostatečně silné magnetické pole, vytvarují se v jehlanovité útvary ve směru siločar (viz obr. 1). Děje se to z důvodu minimalizace energie systému. Jak uvádí [1], každá nanočástice tvoří Weissovu doménu se spontánní magnetizací; nanočástice tedy má magnetický moment, tj. představuje miniaturní permanentní magnet. Je tedy výhodné, aby sousední magnetické momenty měli shodný směr [9]. Po fyzikální stránce se chovají jako paramagnetika, často jsou nazývány superparamagnetika. [1]

Superparamagnetismus je formou magnetismu materiálů, které jsou tvořeny z malých feromagnetických clusterů (krystalitů). Tyto clustery jsou tak malé, že mohou náhodně měnit orientaci (pod vlivem termálních fluktuací). Výsledkem je, že materiál jako celek vykazuje magnetickou indukci, pouze pokud je vystaven vnějšímu magnetickému poli [3].



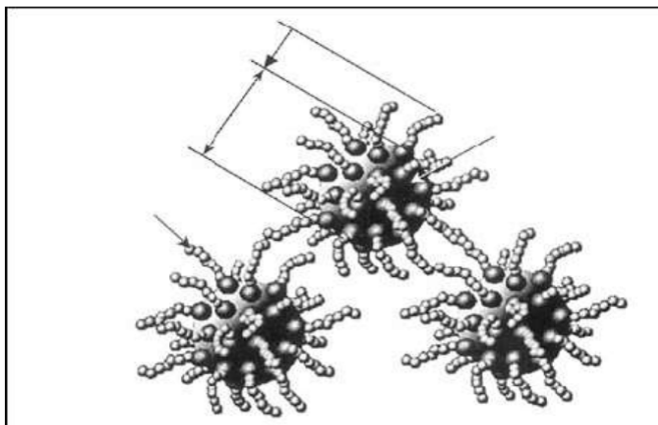
OBRÁZEK 1: CHOVÁNÍ FEROKAPALIN V MAGNETICKÉM POLI [9]

Ferokapaliny reagují na změny velikosti intenzity magnetického pole, rychlost této reakce je řádově v setinách sekundy. Skládají se z tří základních látek: nosné kapaliny, nanočástic sloučenin železa a detergentu.

Nanočástice jsou z práškového železa nebo z látky obsahující ionty Fe^{2+} nebo Fe^{3+} (např. oxid železa – magnetit Fe_3O_4 nebo maghemit), niklu, feritu aj. [1]. Jejich velikost je asi 3 - 15 nm, lze je tedy zkoumat pod elektronovým mikroskopem. Nosnou kapalinou je většinou minerální nebo syntetický olej, tato kapalina tvoří převážnou část objemu látky. Vyjádřeno v procentech, ferokapalina obsahuje 5% feromagnetických nanočástic, 10% detergentu a 85% nosné kapaliny. Detergent neboli surfaktant je polymer (například kyseliny mastné), který obaluje nanočástice a vytváří řetězce, které odpuzují částice železa od sebe, aby se vlivem Van der Walsových sil neshlukovali. Je to povrchově aktivní činidlo. Surfaktant má polární hlavu a nepolární ocas, z nichž jeden adsorbuje k částice, zatímco nepolární ocas je spjat s nosným médiem (viz obr. 2). Velikost těchto ocasů je 1 až 2 nm.

Díky velikosti částic a detergentu FK vydrží dlouho koloidní, gravitace částice téměř neovlivňuje, jsou rozptýleny Brownovým pohybem.[1]

(koloidní - jedná se o látku, která tvoří heterogenní disperzní soustavu obsahující částice o velikosti výše zmíněné, tj. v rozmezí 1 nm až 1000 nm.)

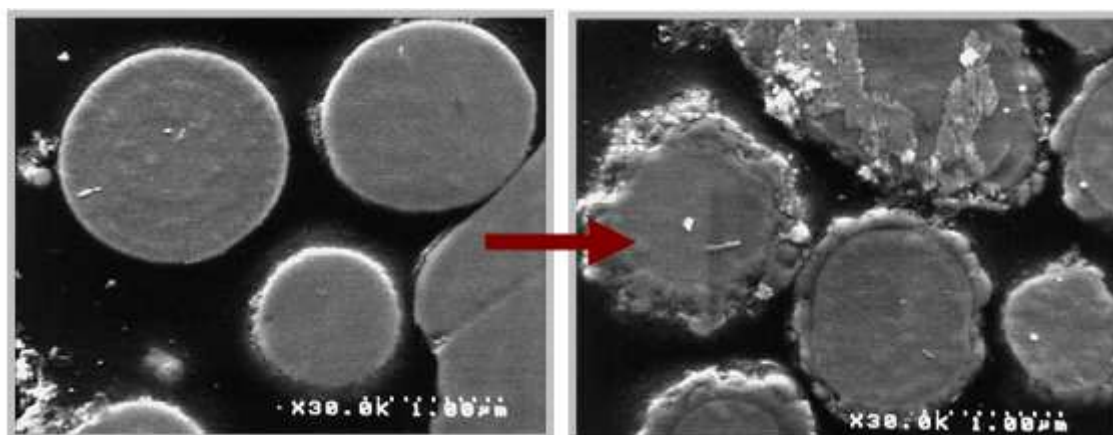


OBRÁZEK 2: ZVĚTŠENÉ NANOČÁSTICE FEROKAPALIN [1]

Ferokapaliny jsou koloidně mnohem stabilnější než magnetorheologické kapaliny. Využívají se k izolování, odvodu tepla a k tlumení vibrací.

Životnost magnetických kapalin závisí na teplotě a velikosti částic. Vlivem vyšších teplot se tyto surfaktanty chemicky destabilizují a zkracuje se životnost, i přesto je jejich životnost několik let. Podle Ulicnyho experimentu při vyšších teplotách MRK více oxidují, kvůli vyšší kinetické energii částic a tedy vyšší reaktivitě (viz obr. 3). V MR kapalinách s menšími částicemi, ty zase tvoří větší plochu, která přichází do kontaktu s kyslíkem [3].

Ve střídavých magnetických polích o určitých frekvencích dochází k poklesu viskozity při současném nárůstu intenzity magnetického pole. Teplota ovlivňuje viskozitu FK také negativně. Ta klesá při nárůstu teploty exponenciálně. V některých aplikacích je nutné FK chladit. [1]



OBRÁZEK 3: OXIDACE NANOČÁSTIC MR KAPALINY [3]

4.3 MAGNETORHEOLOGICKÉ KAPALINY

MR kapaliny obsahují multidoménné částice sloučenin železa o velikosti několika mikronů a jsou výjimečné v tom, že v magnetickém poli prudce vzroste jejich viskozita. V klidovém stavu jsou hustotou podobny oleji, při působení magnetického pole ztuhnou a jsou podobny gelu. Tento děj se nazývá magnetoviskózním jevem a spolu s okamžitou reverzibilitou je využíván v řadě aplikací. MRK tedy na rozdíl od FK obsahují mikročástice železa o velikosti asi 5 μm , jsou těžší a tudíž víc a dříve sedimentují. Nemohou být rozptýleny Brownovým pohybem. Spolu s jejich větší reaktivitou s kyslíkem je to jejich hlavní nevýhoda. Další nevýhodou je jejich ekonomická náročnost výroby. Výzkum se zaměřuje také na zlepšení těchto parametrů.

Provozní teplota MRK se může pohybovat od -125 do 200 °C. MRK obsahují asi 70% z hmotnosti mikročástice sloučenin železa [1]. U FK je magnetoviskózním jev zanedbatelný, proto byla pro konstrukci MR brzdy, kterou se zabývá druhá část BP, použita MRK s označením MRHCCS4-B.

5 ZPŮSOBY VÝROBY FEROKAPALIN

Ferokapaliny obsahují částice sloučenin železa, do budoucna se počítá s kompozitními částicemi, které vykazují lepší vlastnosti v mnoha ohledech.

K nejstarším způsobům výroby FRK patří drcení feromagnetických částic (magnetitových nebo feritových) za přítomnosti detergentu. Tento proces je fyzikálně-chemický a trvá přibližně 1000 hodin. Hrubší částice se následně separují odstřediváním. [1]

5.1 HEMATITOVÉ ČÁSTICE (Fe_2O_3)

Nucená hydrolyza železných solí různými způsoby je původní náročná výrobní metoda. Metoda GEL-SOL je efektivní, produkuje velké množství hematitových částic velikostech (0.1 až 5 μm). Základ tvoří chlorid železitý ($FeCl_3$), cenově relativně dostupná železná sůl. Velikost a tvar se dá snadno ovlivňovat. Z těchto částic se dále vyrábí práškové železo redukcí vodíkem. [3]

5.2 PRÁŠKOVÉ ŽELEZO

Vyrábí se redukcí vodíkem nebo rozkladem pentakarbonylu železa. Základem jsou hematitové částice. Částice obaleny oxidem křemičitým se v trubicovém reaktoru redukuje vodíkem. Druhý způsob výroby se provádí tepelným rozkladem pentakarbonylu železa ($Fe(CO)_5$) [3].

5.3 MAGNETITOVÉ ČÁSTICE - HYDROLÝZA MOČOVINY

Zahřátím roztoku močoviny chloridu železitého a chloridu železnatého na určitou teplotu se syntetizuje magnetit. Chlorid železitý a močovina se rozpustí v destilované vodě v předepsaném poměru. Chlorid železnatý se rozpouští probubláváním v dusíku. Potom jsou produkty filtrovány vařící vodou, sušeny a vakuovány na prášku oxidu fosforečného. Poměrem množství močoviny ke kationtu Fe^{3+} se ovlivňuje velikost částic. [3]

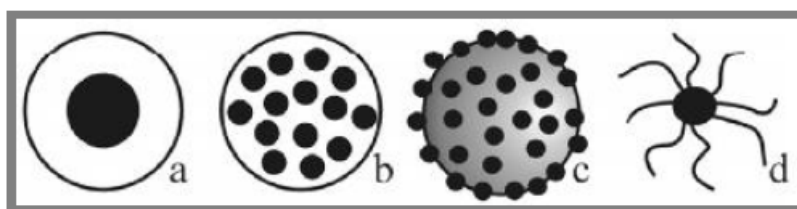
5.4 VÝROBA MAGNETITOVÝCH ČÁSTIC KOPRECIPITACÍ Z VODNÍCH ROZTOKŮ

Příprava probíhá ze soustavy roztoků, stejného složení za stálé teploty. Přístupu vzduchu se zamezuje probubláváním dusíkem. Tvar a velikost částic závisí na teplotě, pH roztoku, ionizaci základního roztoku a době od skončení precipitace (vznik nové

oddělené pevné fáze ve fázi kapalné). Jedná se o roztoky: $Fe(NO)_3$, $FeCl_2$ a soli $NaNO_3$, NH_4NO_3 nebo $N(CH_3)_4NO_3$. [3]

6 KOMPOZITNÍ NANOČÁSTICE

Kompozitní nanočástice jsou slibnými strukturami nanočástic budoucnosti. Jejich vývojem se vědci snaží odstranit negativní vlastnosti dosavadních nanočástic, jako jsou například oxidace a sedimentace.[3]



Obrázek 4: Struktura kompozitních nanočástic [3]

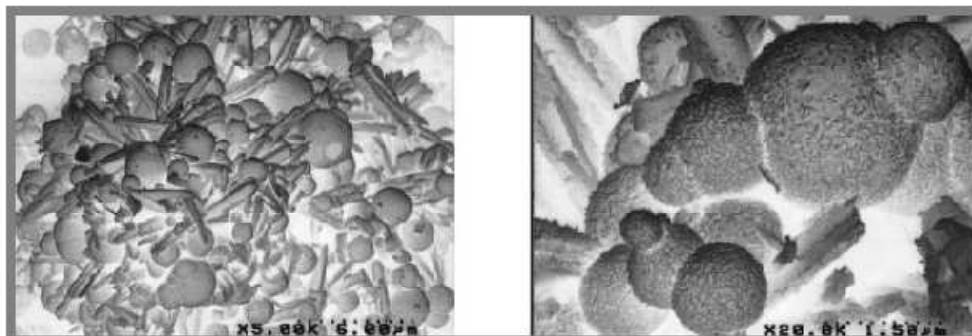
6.1 Fe_3O_4 -PMMA (POLYMETYLMETAKRYLÁT) NANOKOMPOZITNÍCH ČÁSTIC

Tato látka řeší problém sedimentace magnetorheologických kapalin. Magnetitové nanočástice jsou rovnoměrně rozptýleny v polymerové matrici. MRK s přídavkem této látky mají pak o 30 až 50 % lepší stabilitu. Nevýhodou této struktury je nízká teplota tání: $130^\circ C$, často totiž dochází k lokálním tepelným extrémům. Dané množství $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ a laurylsulfonátu sodného se rozpustí v destilované vodě a vznikne koloidní roztok.[3]

6.2 Fe-Ni KOMPOZITNÍ ČÁSTICE

Jsou to částice karbonylového železa (CI) obalené niklem, k efektivnímu zabránění oxidaci. Této struktury se dosáhne neelektrickou pokovovací metodou.

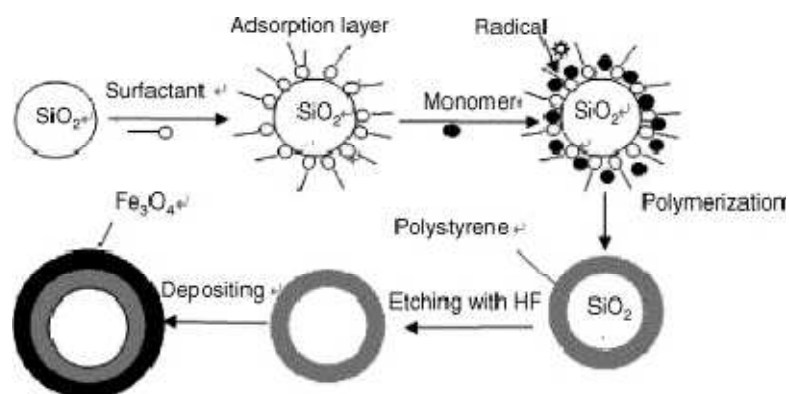
Hlavní negativum této struktury je snížení magnetické saturace až o 18 – 34% díky Ni-povlaku.[3]



Obrázek 5: Fe-Ni kompozitní částice [3]

6.3 Fe_3O_4 -PS KOMPOZITNÍ ČÁSTIC

Tyto částice byly vyvinuty pro zlepšení sedimentační stability, snížení hustoty a viskozity MRK v klidovém režimu. Jsou složeny z dutého polystyrenového jádra a magnetitového obalu. V MRK vykazují asi o 33% vyšší sedimentační stabilitu než klasické MRK. Díky jejich struktuře se u nich předpokládá rychlejší oxidace.



Obrázek 6: Výroba a struktura Fe_3O_4 -PS dutých kompozitních částic [3]

7 VYUŽITÍ FEROKAPALIN V ELEKTROMECHANICKÝCH SYSTÉMECH

Ferokapaliny se využívají v řadě aplikací v mnoha oborech, jak například lékařství, automobilový průmysl, strojírenství, akustika a jiné.

V této části je popsáno několik nejznámějších aplikací FK v elektromechanických systémech.

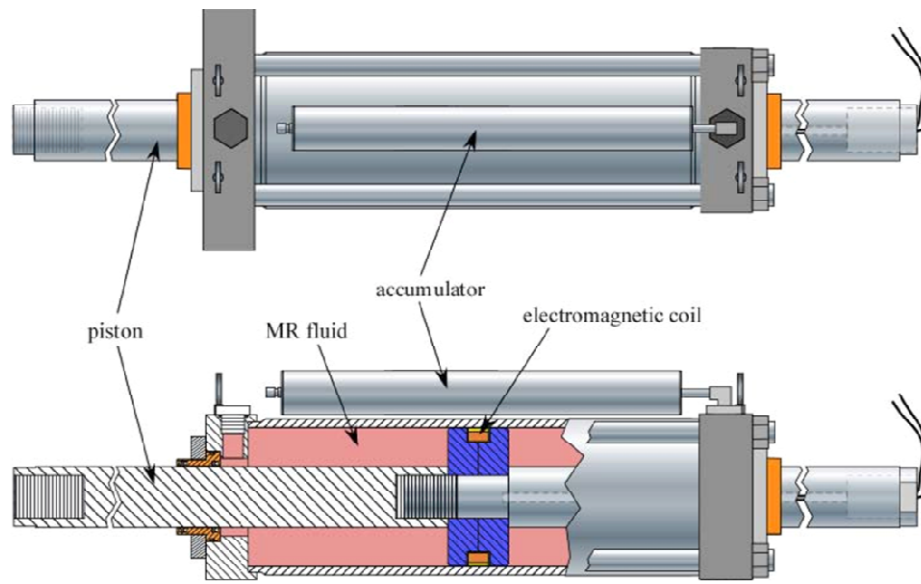
7.1 MAGNETORHEOLOGICKÝ TLUMIČ

MR tlumič je tlumič zcela naplněný MRK, její viskozitu ovládá elektromagnetické pole elektromagnetu. Řízení velikosti intenzity elektromagnetického pole dovoluje regulovat tlumící schopnost.

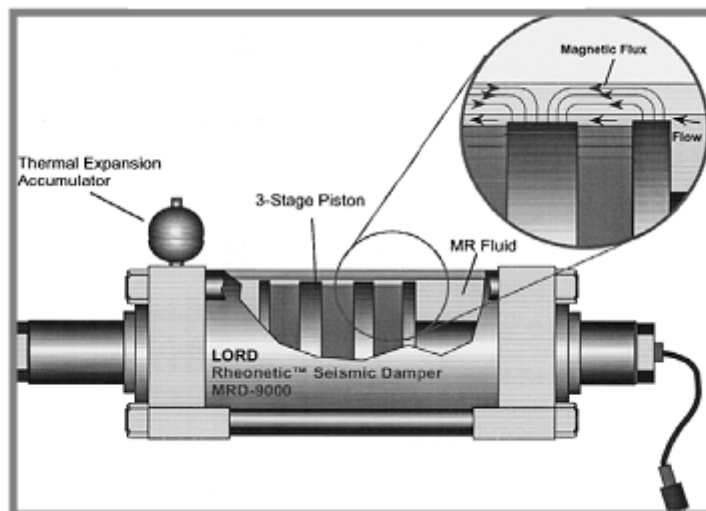
MR tlumiče tlumí efektivněji a rychleji než klasické tlumiče, proto se v současnosti i přes jejich cenu a někdy náročnost řízení začínají používat v praxi převážně v automobilech.

Nejčastěji používaný typ MR tlumiče je lineární, pístem rozdělen na dvě komory. MRK je v celém tlumiči a změnou její viskozity se reguluje tlumení. To je výhoda oproti konvenčním tlumičům, které obvykle vykazují konstantní tlumení. MRK proudí z jedné komory do druhé přes otvor ve vnitřním kroužku, v kterého otvorech je navinuta cívka (obr. 7). Její magnetické pole je kolmé na pohyb pístu. Čas odezvy takto sestrojeného tlumiče je při proudu na cívce do 1.5 A menší než 23 ms [3].

Další využití MR tlumičů je v stavebnictví. Vysoké a lehké budovy, např. velké mosty, stěží tlumí nárazy větru nebo zemětřesení a proto je do konstrukcí vhodné zabudovat aktivní nebo pasivní systémy MR tlumení. Oba systémy tlumí velmi dobře, ale jenom aktivní se pomocí speciálních algoritmů dokáže dobře přizpůsobit průběhu zemětřesení. Z toho vyplývá potřeba elektrického zdroje. Tlumiče nepotřebují více než 50W, tudíž se jejich napájení řeší z baterií. [3]



OBRÁZEK 7: LINEÁRNÍ MR TLUMIČ [8]



OBRÁZEK 8: MODEL MR SEIZMICKÉHO TLUMIČE FIRMY LORD [3]



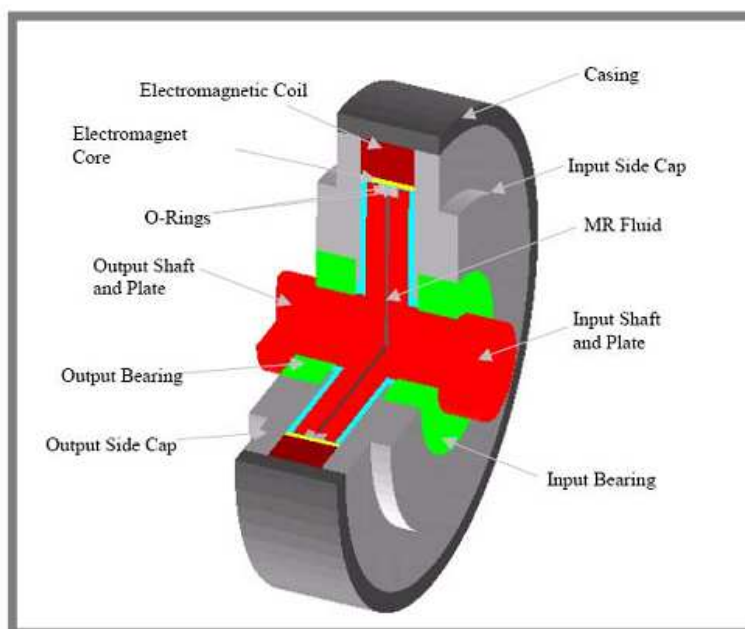
OBRÁZEK 9: DETAIL MR VENTILU [3]

Společnost Lord Corporation North Carolina navrhla také MR pračku. Magnetické tlumiče uvnitř pračky snižují hluk, vibrace a šetří energii. Také vyvíjí MR technologii pro pásy v autách a airbagy, ty by se měli přizpůsobit váze pasažéra.

7.2 MAGNETORHEOLOGICKÁ SPOJKA

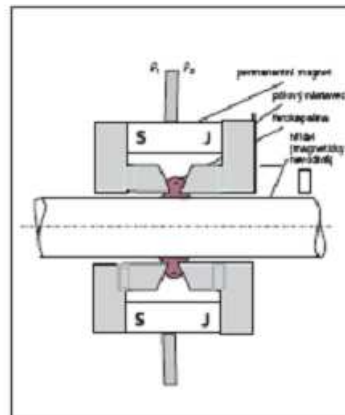
Pro přenos kroutícího momentu se dosud používali hydro spojky, velikost přeneseného kroutícího momentu ale závisela na velikosti otáček. Při použití MRK je možné měnit velikost přenášeného momentu nezávisle na otáčkách, a to díky změně viskozity MRK. V neaktivovaném stavu je provoz energeticky nenáročný a šetří palivo. Konstrukce dvoulamповé MR spojky lze vidět na obr. 10.

Viskozita MR kapaliny, která je mezi lamelami, se řídí proudem procházející cívkou namotanou po obvodu spojky. Při zvýšení viskozity se zvýší tření mezi lamelami a můžeme tedy okamžitě převádět kroutící moment s možností okamžité změny jeho velikosti [3].



OBRÁZEK 10: MODEL DVOJLAMELOVÉ MR SPOJKY [3]

7.3 FEROHYDRODYNAMICKÉ TĚSNĚNÍ



OBRÁZEK 11: TĚSNĚNÍ ROTUJÍCÍ MAGNETICKY NEVODIVÉ HŘÍDLE FEROKAPALINOU [1]

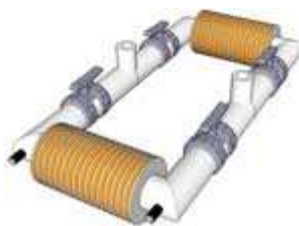
FK je umístěná v prostoru mezi hřídelí a permanentním magnetem, kam je nasměrováno magnetické pole a udržuje tam FK. Vzdálenost mezi hřídelí a magnetem je jen několik desetin milimetru. FK je tedy médiem, které odděluje dva prostory. Při rozdílných tlacích se použije vícenásobné těsnění, které je schopné vydržet tlaky až 100 kPa. Při vysokých otáčkách potřebuje chlazení. Největší pozitivum tohoto těsnění je, že i v prašném prostředí je vnitřní část motoru dokonale oddělena od okolí. Nepotřebuje údržbu, prodlužuje životnost chráněného ložiska a extrémně málo prosakuje. Zároveň působí jako lubrikant a pracuje při teplotách od -100°C do 200°C . Jeho životnost je deset až patnáct let [1]. Používá se v řadě aplikací jako například pohony pevných disků, ve vakuových čerpadlech, vakuových průchodkách a jiné [1].

7.4 PROUDĚNÍ FEROKAPALINY BEZ POUŽITÍ MECHANICKÝCH ČÁSTÍ

Ferokapliny je možné kontrolovaně přečerpávat, bez toho aby se jakákoliv součást systému mechanicky pohybovala.

Cívky navinuté kolem PVC trubice, kterou proudí ferokapalina, generují magnetické pole, které způsobí rotaci nanočástic ferokapaliny. U stěny trubice proudí částice rychleji než blíž ke středu. Intenzita magnetického pole má vlastnosti (jako je

směr, velikost, frekvence) dle proudu, který protéká cívkou. Ten způsobuje rotaci nanočástic ferokapalin uvnitř ferokapaliny (viz obr.7). [10]



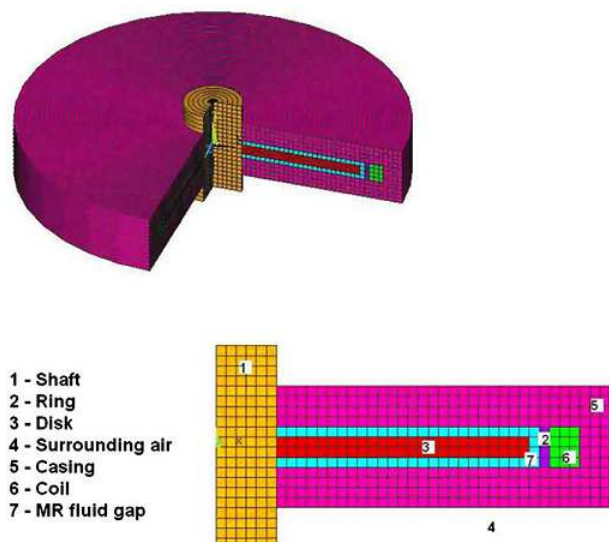
OBRÁZEK 7: OBVOD S FEROKAPALINOU JAKO POHONNÝM MECHANIZMEM [10]

FK byly v NASA původně vyvinuty k nemechanickému čerpání paliva raketoplánu v beztížném stavu. V současné době se uvažuje o efektivním chlazení PC a notebooků. Díky tomuto systému by mohla být výpočetní technika mnohem lehčí, tenčí a rychlejší. [10]

7.5 MAGNETORHEOLOGICKÁ BRZDA

Základní model MR brzdy se skládá magnetického obvodu, cívkou a několika brzdících kotoučů. Cívka je tvořena mnoha závity tenkého vodiče, kvůli malé energetické náročnosti.

Generuje magnetické pole, které pomocí magnetického obvodu (dále také „MO“) koncentruje do vzduchové mezery, která je zcela vyplněna MRK. V MR kapalině se s rostoucí intenzitou magnetického pole zvyšuje viskozita, zvyšuje tření a brzdí se rotující kotouče, instalované paralelně, sousedě, ponořené do MR kapaliny (viz obr. 12).



OBRÁZEK 12: MODEL MR BRZDY [5]

Výhodou MR brzdy je elektronické ovládání, jednoduchá diagnostika a konstrukce. Z toho vyplývá snadná kombinace s ostatními elektronickými systémy, v autě např. ABS. [3]

8 NÁVRH, KONSTRUKCE A VÝROBA MAGNETORHEOLOGICKÉ BRZDY (PRAKTICKÁ ČÁST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE)

8.1.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Cílem této části bakalářská práce bylo zkonstruovat, vyrobit a experimentálně a matematicky ověřit funkčnost magnetorheologické brzdy (dále také „MR brzda“).

Ta byla vyrobena ve dvou provedeních. Na prvním byla vyzkoušena funkčnost (viz obr. 13) a podle něj byla zadána výroba menší verze MR brzdy (viz obr. 14).



OBRÁZEK 13: PRVNÍ PROTOTYP MAGNETORHEOLOGICKÉ BRZDY



OBRÁZEK 14: VYROBENÁ MAGNETORHEOLOGICKÁ BRZDA

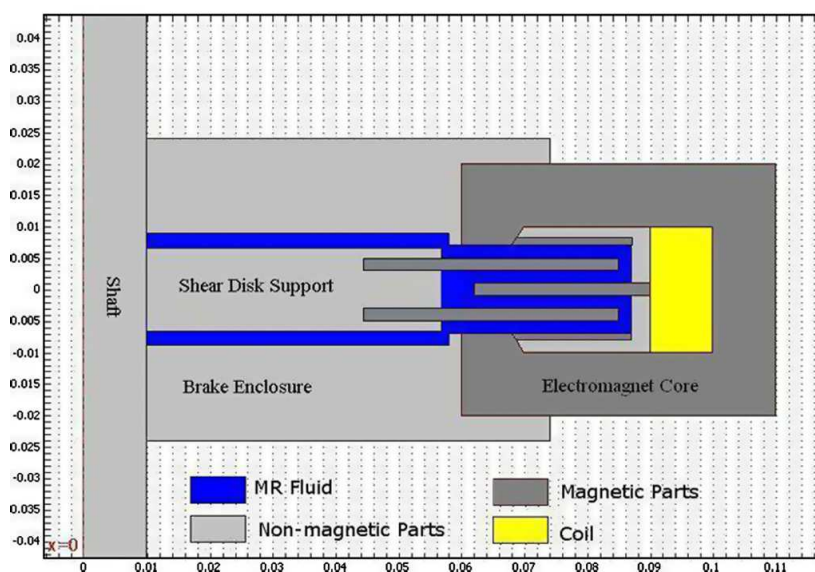
MR kapalina reaguje na magnetické pole již od nejnižších hodnot velikosti magnetické indukce. Pro dosažení měřitelných hodnot brzdného momentu je potřeba poměrně silné magnetické pole, vzhledem k rozměrům magnetického obvodu (dále také „MO”) a velikosti vzduchové mezery.

Výpočtem v programu Agros2D se získala přibližná představa o velikosti potřebných parametrů MO a zdroji U_m . Velikost magnetické indukce byla odvozena ze základních vztahů pro stacionární magnetické pole. Velikost brzdné síly byla změřena pomocí siloměru a páky. Od brzdné síly byl odvozen brzdný moment.

8.2 METODIKA VYPRACOVÁNÍ PRÁCE

8.2.1 REŠERŠE

V první části byli vyhledáni informace o MR kapalinách a o dosud zkonstruovaných zařízeních využívajících MR kapaliny. Na základě těchto informací byl vyvozen optimální postup konstrukce MRB.



OBRÁZEK 15: UKÁZKA DESIGNU MR BRZDY [5]

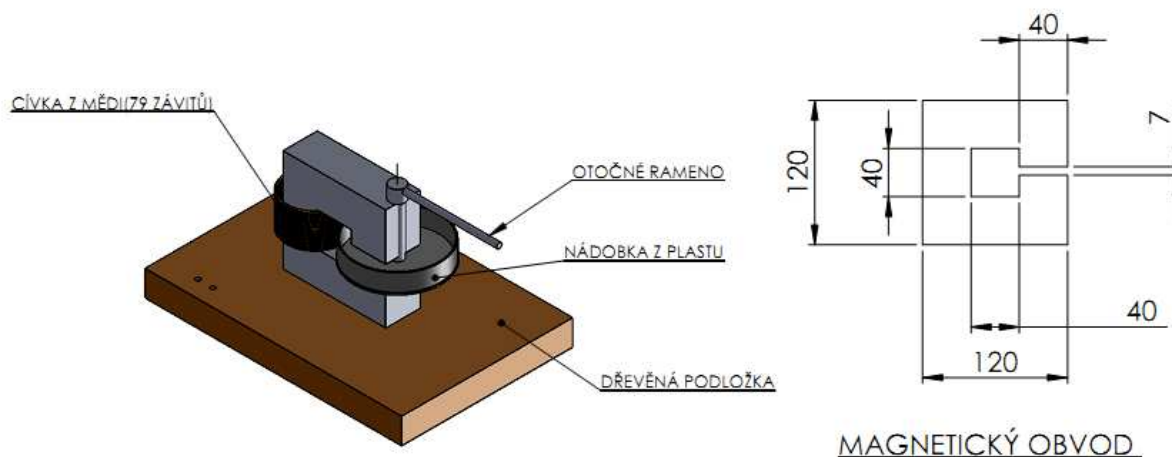
8.2.2 MATEMATICKÝ NÁVRH MAGNETICKÉHO OBVODU

Byl proveden orientační výpočet v aplikaci Agros2D za účelem zjištění, zdali je v mezeře dostatečná hodnota magnetické indukce k měřitelnému vybuzení MR kapaliny.

Poté byla odvozená závislost velikosti magnetické indukce na proudu protékajícím vodičem cívky.

8.2.3 KONSTRUKCE A VÝROBA

Byla vytvořena optimální varianta, vzhledem k omezeným technickým možnostem a schopnostem. Prototyp byl vyroben převážně v dílně Katedře teoretické elektrotechniky na FEL ZČU v Plzni. Magnetický obvod byl vyroben na zakázku.



OBRÁZEK 16: 3D MODEL MR BRZDY A ROZMĚRY MAGNETICKÉHO OBVODU V MM

8.2.4 MĚŘENÍ

Na MRB byla otestována funkčnost a změřena závislost velikosti magnetické indukce na velikosti proudu procházejícího vodičem cívky. Dále byla změřena závislost velikosti brzdě síly na velikosti proudu.

9 VYPRACOVÁNÍ

9.1 REŠERŠE

V řadě zhotovených MRB se používá několika brzdých kotoučů, ke zvětšení brzdě plochy, v tomto případě byla použit jeden. Pro zhotovení budicí cívky byl použit

měděný vodič o průměru 2 mm. Cívka zdroje magnetického napětí byla záměrně navinuta tak, aby měla méně závitů z důvodu snazšího navíjení, pokud by výsledná brzda nefungovala a bylo potřeba cívku převinout. V praxi se používají tenčí vodiče s mnoha závity, takové řešení je energeticky méně náročné, postačí buzení proudy do několika ampérů. Velikost proudové hustoty v ideálním případě, kdy je celý průřez okna cívky vyplněn mědí, závisí na průměru použitého vodiče a velikosti budícího proudu.

$$J = \frac{I}{S} \quad (1)$$

Stejných hodnot proudové hustoty lze tedy docílit jak použitím tenkého vodiče a nízkých hodnot proudu, tak využitím silného vodiče a vysokých proudových hodnot. Reálný vodič je ovšem izolován vrstvou laku, celý průřez okna cívky tedy nebude nikdy vyplněn pouze mědí. Tento fakt respektuje tzv. koeficient vinutí, který je tedy při užití silnějšího drátu vyšší, protože lak na tenkém vodiči má přibližně stejnou tloušťku jak lak na silnějším vodiči. Vyšší možný koeficient plnění byl cílem, protože cívka byla navíjená ručně, tedy nehomogenně, a tím se koeficient plnění snížil.

Předpokládáme buzení stejnosměrným napětím, nenastává tedy problém skin efektu.

9.2 MATEMATICKÝ NÁVRH MAGNETICKÉHO OBVODU

V programu Agros2D byla simulována indukce ve vzduchové mezeře magnetického obvodu. Cívka byla definována pomocí proudové hustoty, kterou lze snadno spočítat dle vzorce:

$$J = \frac{N \cdot I}{S \cdot k} \quad (2)$$

kde:

J	$[A \cdot m^{-2}]$	- proudová hustota
k		- koeficient plnění
N		- počet závitů, (79)
I	$[A]$	- proud procházející vodičem závitů
S	$[m^2]$	- průřez vodiče závitů cívky

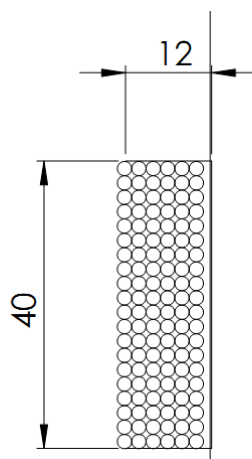
Pomocí programu byla pomocí metody konečných prvků spočítána velikost magnetická indukce B v mezeře MO.

Relativní permeabilita byla zvolena 500, protože ideální železo má relativní permeabilitu blízkou nekonečnu a na výrobu magnetického obvodu bylo použito železo neznámé permeability.

Koeficient plnění zvolen 0.5, vzhledem k ručnímu navíjení cívky. Skutečné hodnoty byly později spočteny na základě měření magnetické indukce pomocí teslametru s Hallovou sondou a použity v druhém modelu.

9.2.1 VÝPOČET KOEFICIENTU PLNĚNÍ

Koeficient plnění k je poměr průřezu čisté mědi k ploše osového řezu okna pro cívku.



OBRÁZEK 17: ROZLOŽENÍ VODIČE V CÍVCE V IDEÁLNÍM PŘÍPADĚ

$$k = \frac{S_v}{S_{cv}} = \frac{S_{1v} * n}{S_{cv}} = \frac{S_{1v} * n}{S_{cv}} = \frac{3.14 * 10^{-6} * 79}{4.8 * 10^{-4}} = 0.62 \quad (3)$$

kde:

rozměry průřezu cívky: $a = 0.04 \text{ m}$

$b = 0.012 \text{ m}$

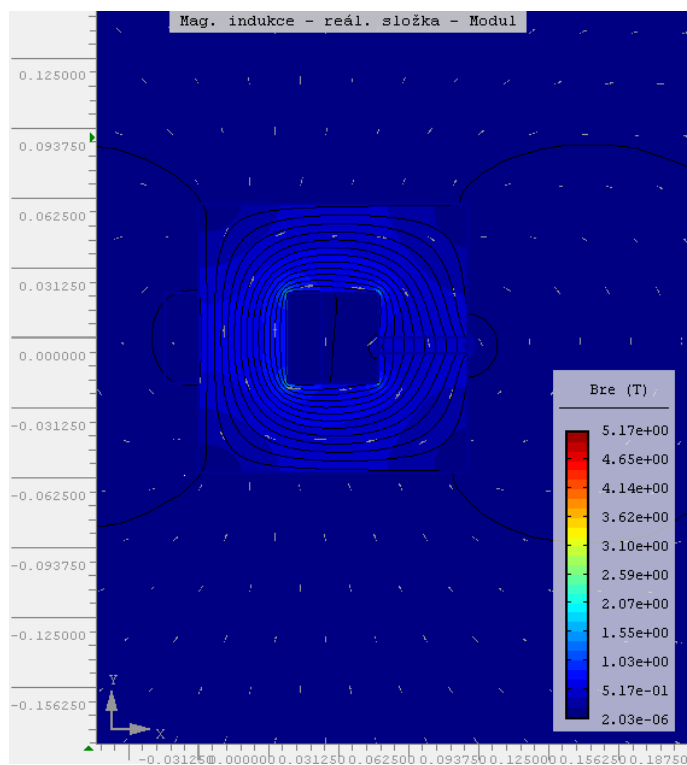
průřez cívky: $S_{cv} = a * b = 4.8 * 10^{-4} \text{ m}^2$

průřez vodiče: $S_{1v} = \pi * r^2 = 3.14 * 1.10^{-6} \text{ m}^2 = 3.14 * 10^{-6} \text{ m}^2$

počet závitů: $n = 79$

Vzhledem k ručnímu navíjení cívka nerovnoměrně navinuta, výpočet koeficientu plnění byl proveden na základě je poměru změřené a spočítané magnetické indukce B .

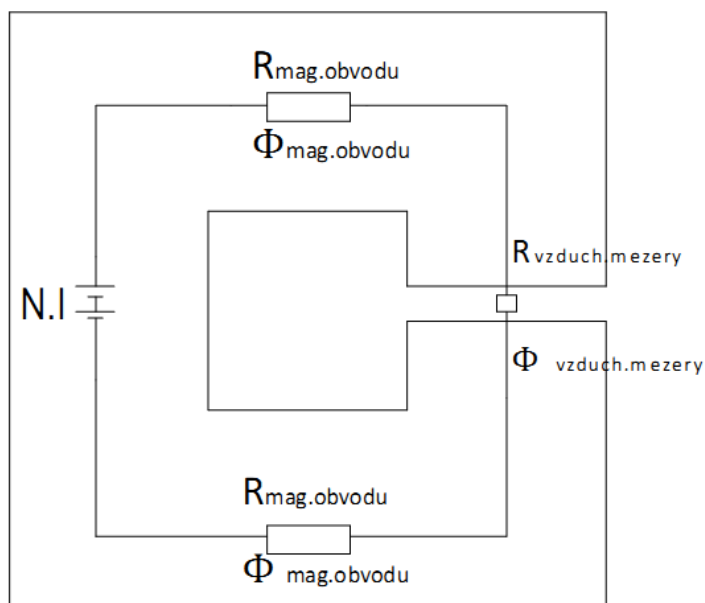
Rozměry MO byly navrženy tak, aby bylo dosaženo dostatečné magnetické indukce a tudíž i dostatečné brzdové síly. Reálné výsledky se mohou lišit díky rozdílným hodnotám koeficientu plnění cívky, relativní permeability železa a částečně i nepřesností numerického výpočtu v aplikaci Agros2D.



OBRÁZEK 18: ZOBRAZENÍ VÝSLEDKŮ SIMULACE MAGNETICKÉ INDUKCE POUŽITÉHO MAGNETICKÉHO OBVODU V PROGRAMU AGROS2D

V mezeře magnetického obvodu je podle výpočtu v program Agros2D $B = 185\text{mT}$ při proudu $I = 17\text{ A}$, při předpokládaném koeficientu vinutí $k = 0.5$ a při relativní permeabilitě železa $\mu_r = 80$. (Vzduch má relativní permeabilitu $\mu_r = 1$, použitá MRK $\mu_r = 2$).

Pro srovnání a určení neznámých materiálových permeabilit byla zároveň provedena analýza problému s využitím teorie magnetických obvodů.



OBRÁZEK 19: SCHÉMA MAGNETICKÉHO OBVODU

Vzor výpočtu velikosti magnetické indukce pro stacionární magnetické pole:

$$U_m = N * I \quad (4)$$

$$R_m = R_{Fe} + R_{kap} = \left(\frac{l_{fe}}{\mu_{Fe}} + \frac{l_{mez}}{\mu_{kap}} \right) * S \quad (5)$$

$$\Phi = \frac{U_m}{R_m} = \frac{U_m}{\left(\frac{l_{fe}}{\mu_{Fe}} + \frac{l_{mez}}{\mu_{kap}} \right) * S} \quad (6)$$

$$\Phi = \int_S \mathbf{B}ndS = \int_S \mathbf{B}(\cos \alpha) dS, \alpha = 90^\circ, \sin \alpha = 1 \Rightarrow \quad (7)$$

$$\Phi = B * S \quad (8)$$

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{\frac{U_m}{\left(\frac{l_{fe}}{\mu_{Fe}} + \frac{l_{mez}}{\mu_{kap}}\right) * S}}{S}} = \frac{U_m}{\left(\frac{l_{fe}}{\mu_{Fe}} + \frac{l_{mez}}{\mu_{kap}}\right)} = \frac{N * I}{\left(\frac{l_{fe}}{\mu_{Fe}} + \frac{l_{mez}}{\mu_{kap}}\right)} \quad (9)$$

kde:

$$I = 40 \text{ A}$$

$$S = a^2 = 0.04^2 = 0.0016 \text{ m}^2$$

$$N = 79$$

$$l_{fe} = 0.31 \text{ mm}$$

$$l_{mez} = 0.0007 \text{ mm}$$

$$\mu_{kap} = 1$$

$$\mu_{Fe} = 500$$

$$\alpha = 90^\circ \text{ (v mezeře je plocha mezery kolmá na siločáry)}$$

$$k = 0.5 \text{ (odhadovaný)}$$

Z tohoto vztahu vyplývá přímá závislost intenzity magnetické pole H na velikosti proudu, počtu závitů a nepřímo úměrná závislost na délce magnetického obvodu.

K dosažení H na vybudění dostatečného magnetického pole je potřeba velké proudové hustoty. Cívka namotána kolem MO musí být navinuta buď z tenkého vodiče s mnoha závity, nebo z robustního vodiče o méně závitech. Cívka je z měděného drátu o průměru 2 mm izolovaného lakem z polyuretanu. Má celkem 79 závitů. Horní hranice proudového zatížení vodiče je výrobcem udávána 11A. Při experimentech byla tato hodnota krátkodobě překročena bez měřitelných následků.

Magnetický obvod i v poměrně velké mezeře vyvolá dostatečně silné magnetické pole, které je postačí k vyvolání měřitelné změny brzdné síly. V mezeře je při použití maximálního proudu daného vodičem možné vygenerovat magnetické pole o maximální indukci $B = 639.9 \text{ mT}$ (je to změřená i spočtená hodnota). Tato hodnota je dostatečná pro vyvolání potřebných změn viskozity.



OBRÁZEK 20: REAKCE MR KAPALINY NA MAGNETICKÉ POLE

9.3 KONSTRUKCE

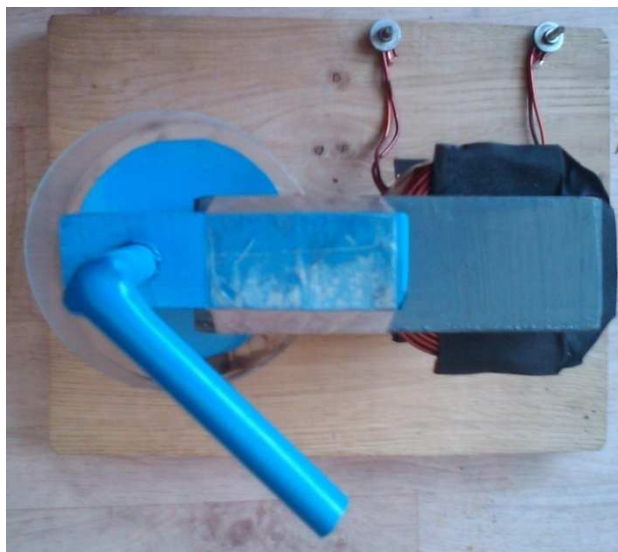
Magnetorheologická brzda byla vyrobena ve dvou provedeních. Na prvním byla vyzkoušena funkčnost brzdy v tomto jedinečném provedení (viz. obr. 13). Podle něj se nechala vyrobit finální podoba MR brzdy (viz obr. 14). Prototyp se skládá z položek objednaných a vlastnoručně vyrobených.

V obou případech jsou základními částmi magnetorheologické brzdy: magnetický obvod, cívka – zdroj elektromagnetického pole, brzdny kotouč a nádobka na MR kapalinu. Dalšími částmi jsou otočná osa, otočné rameno a podložka, viz obr. 21.

Nejdůležitější pro MRB je magnetický obvod, který musí být schopen ve vzduchové mezeře vyvolat dostatečně velkou intenzitu magnetického pole.

Nádobka na MRK je z plastu, aby nedocházelo k nechtěným ztrátám a magnetické pole se rozptylovalo co nejméně. Brzdny kotouč je plastový ze stejných důvodů jako nádobka, je připevněn na otočnou osu, která je částečně ze dřeva a částečně z mosaze kvůli uchycení brzdny kotouče. V první verzi byl použit kotouč ze železného plechu, kvůli pevnosti jeho uchycení na otočnou osu. Užitím vodivého

materiálu ale vznikla zároveň brzda vířivými proudy, proto byl železný plech nahrazen plastem.



OBRÁZEK 21: VERZE Č. 1 PRVNÍHO PROTOTYPU S PLECHOVÝM KOTOUČEM

9.4 VÝROBA

Tloušťka stěny magnetického obvodu je 40 mm. Jelikož je aplikováno stejnosměrné magnetické pole MO, nemusí být složený obvod z transformátorových plechů, protože zde nevznikají žádné vířivé proudy. V opačném případě je nutno použít transformátorových plechů, které obsahují příměs křemíku, jsou vyrobeny z magneticky tvrdé oceli. Tak minimalizují hysterezní ztráty, které vznikají neustálým přemagnetováním při působení střídavého EM pole.

Vzduchová mezera druhého modelu má délku 7mm, MO je ze dvou částí, vzájemně spojených kovovým šroubem. Je poskládaný z neizolovaných železných plechů, každý je asi 1 cm hrubý, kvůli snazší konstrukci.

9.5 MĚŘENÍ

Na MRB byla změřena závislost velikosti magnetické indukce a odporové síly na velikosti proudu procházející vodičem cívky.

Byl použitý stejnosměrný laboratorní zdroj proudu, který je schopný při napětí několika voltů generovat proud do $I = 60$ A. Magnetická indukce ve vzduchové mezeře byla změřena pomocí teslametru při proudu od $I = 8.9$ A do $I = 32$ A, při napětí do několika voltů (viz příloha, tab. 1). Velikost síly se měřila pomocí elektronického siloměru jen do velikosti brzděného momentu $M = 0.66$ N/m při proudu do $I = 11.4$ A, a to z důvodu mechanické pevnosti zařízení. Siloměr byl tahán kolmo k páce ve vodorovné rovině páky. Toto měření je informativní, slouží k ověření závislosti velikosti brzděné síly na velikosti proudu protékajícím cívkou.

V experimentu je změřená minimální hodnota magnetické indukce dostatečná pro měřitelné vybuzení MRK přibližně $B = 130.6$ mT při nejnižším dosaženém napětí $U = 0.8$ V a proudu $I = 8.9$ A (viz tab. 1 v příloze). Saturace MRK se uvádí na $B = 1.3$ T. Nejvyšší hodnota B , která byla změřena v experimentu je $B = 513.2$ mT, při proudu $I = 32$ A a napětí $U = 4.3$ V.

Ferokapaliny mají průběh závislosti magnetické indukce B na intenzitě magnetického pole H obdobný průběh u feromagnetik: s rostoucí intenzitou magnetického pole se indukce magnetického pole asymptoticky blíží hodnotě ve stavu saturace (nasycení) [1] (viz graf 1).

Ze změřené magnetické indukce byla spočtena relativní permeabilita železa a následně byla spočtena B , podle vzorce se skutečnou relativní permeabilitou.

Odvození výpočtu relativní permeability železa použitého na MO:

z rovnice (9) plyne:

$$\frac{1}{B} = \frac{\left(\frac{l_{fe}}{\mu_{Fe}} + \frac{l_{mez}}{\mu_{kap}}\right)}{U_m} \quad (11)$$

$$\frac{U_m}{B} = \left(\frac{l_{fe}}{\mu_{Fe}} + \frac{l_{mez}}{\mu_{kap}}\right) \quad (12)$$

$$\frac{l_{fe}}{\mu_{Fe}} = \frac{U_m}{B} - \frac{l_{mez}}{\mu_{kap}} \quad (13)$$

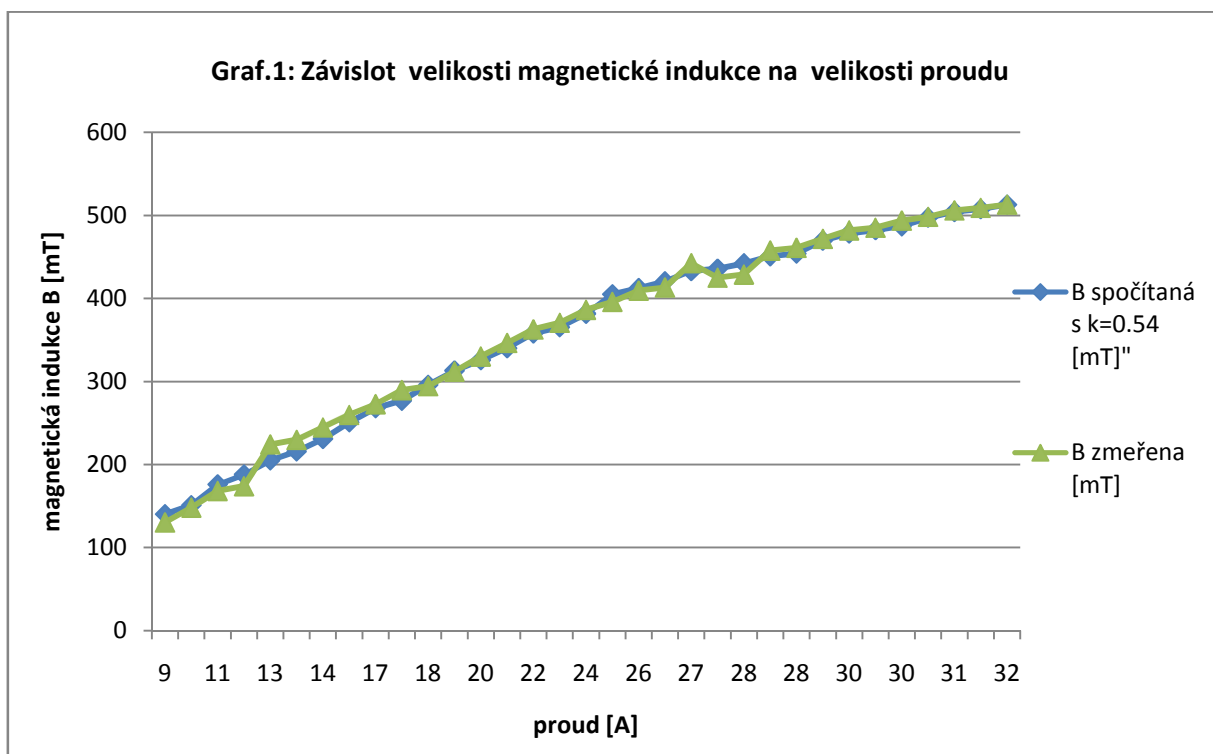
$$\frac{l_{fe}}{\mu_{Fe}} = \frac{U_m}{B} - \frac{l_{mez}}{\mu_{kap}} = \frac{U_m - B * \frac{l_{mez}}{\mu_{kap}}}{B} \quad (14)$$

$$\frac{\mu_{Fe}}{l_{fe}} = \frac{B}{U_m - B * \frac{l_{mez}}{\mu_{kap}}} \quad (15)$$

$$\mu_{Fe} = \frac{B}{U_m - B * \frac{l_{mez}}{\mu_{kap}}} * l_{fe} \quad (16)$$

$$\mu_{Fe} = \frac{B}{N * I - B * \frac{l_{mez}}{\mu_{kap}}} * l_{fe} \quad (17)$$

Pro každou hodnotu magnetické indukce byla relativní permeabilitu železa spočtena zvlášť a pak určena průměrná relativní permeabilitu železa, ta je $\mu_{Fe} = 80$.



(pozn.: Ve výpočtu pro B spočítaná je zahrnutý experimentálně určený koeficient vinutí, který je $k = 0.54$.)

9.6 BRZDNÝ MOMENT

Mechanický odpor vyjádřená brzdným momentem M , který klade zařízení v klidovém stavu je $M = 0.02 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ při nulovém proudu.

základní vztah:

$$M = l_r * F$$

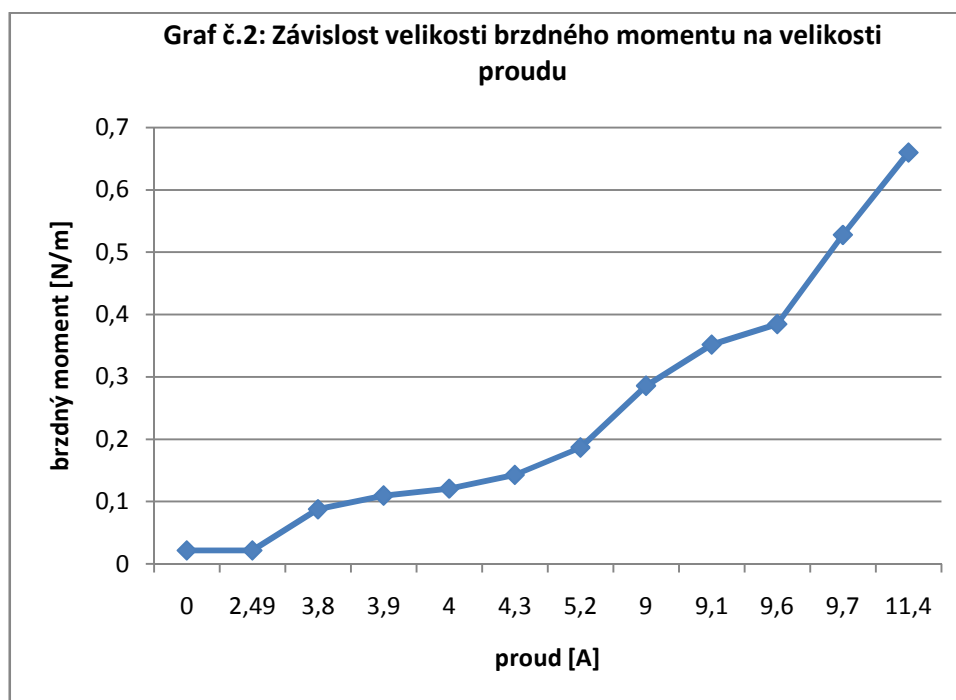
kde:

$l_r = 0.11 \text{ m}$ délka rameno

F - brzdná síla [N]

M - moment [$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$]

Maximální brzdný moment, který je podle měření MR brzda schopna generovat je $M = 0.64 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ při proudu $I = 11 \text{ A}$ a napětí $U = 1.1 \text{ V}$.



9.7 ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ:

Momentová charakteristika se chovala dle očekávání: $M = f(I)$

S rostoucím proudem téměř přímo-úměrně rostl i brzdny moment (viz graf č. 2). Chyby měření jsou zapříčiněny lidským faktorem. Při měření síly je nepřesnost způsobená měřením pomocí siloměru. Nerovnoměrný pohyb ruky zapříčinil proměnné, nekvantifikovatelné zkreslení. Sestrojený prototyp je dimenzován na zatížení do jednotek Newtonů. Největší mechanické namáhání vzniklo v místě spojení plastového šroubu a brzdného kotouče rovněž z plastového materiálu.

I přes omezené možnosti se podařilo sestavit plně funkční MR brzdu a demonstrovat magnetoviskózní jev MRK.

V profesionálním modelu byly přidány součásti, pomocí kterých se brzdny moment změřil přesněji. Konkrétně motor, který pohání brzdny kotouč a působí proti brzdné síle a převodní zařízení.

Brzdny moment se měřil pomocí proudového odběru motoru a pomocí reflexního snímače se snímali otáčky (viz obr. 22).



OBRÁZEK 22: MR BRZDA SE ZAPOJENÝMI PŘÍSTROJI

10 ZHODNOCENÍ MOŽNOSTÍ TĚCHTO MATERIÁLŮ PRO ELEKTROMECHANICKÉ APLIKACE

V současnosti je používaným produktem výzkumu v této oblasti zejména MR tlumič, který se osvědčil v automobilovém průmyslu a implementuje se zkušebně i do konstrukce staveb. Další všestranně výhodná a jedinečná aplikace FRK je těsnění. Zde je ale největším problémem stabilita MR kapalin při zvýšených teplotách a otáčkách. Dobrá tepelná vodivost se využívá v akustice k odvodu tepla. Magnetorheologická brzda byla s úspěchem aplikována v propojení s ostatními pomocnými elektronickými systémy do umělých protéz lidských kloubů [7].



Obrázek 23: Rheoknee / kolenová protéza založena na MR brzdě prodávaná spol. OSSUR [7]

S využitím MR spojkou se uvažovalo v souvislosti s menšími výkony, ale výrazné uplatnění zatím nenašla.

Budoucnost magnetických kapalin spočívá také ve výzkumu kompozitních částicích, které mají lepší vlastnosti než dosud používané částice. To otvírá dveře novým možnostem, lepší životnosti a vlastnostem magnetických kapalin, o kterých se píše výš.

11 ZÁVĚR

V první, teoretické části této bakalářské práce byli stručně popsány ferokapaliny a magnetorheologické kapaliny, jejich struktura, vlastnosti, složení a způsob výroby. Následně byly popsány způsoby využití ferokapaliny a magnetorheologické kapaliny v elektromechanických systémech a stručné srovnání jejich vlastností. V praktické části byla zkonstruována a vyrobena magnetorheologická brzda.

Výsledky dokazují vlastnosti magnetorheologických kapalin. Magnetorheologická brzda je použitelná pro aplikace, kde stačí malé brzdící síly a je

žádaná okamžitá reakce. Nevýhodou je poměrně vysoká cena magnetorheologické kapaliny.

Při větším počtu závitů stačí menší budící proud, tudíž magnetorheologická brzda je z hlediska energetické náročnosti použitelná téměř v každém případě.

Hlavní přínos práce je zkonstruování funkční magnetorheologické brzdy k praktickému ověření platnosti magnetoviskózního jevu magnetorheologických kapalin.

12 PŘÍSTROJE POUŽITÉ PŘI MĚŘENÍ:

Proudový zdroj MANSION SPS9600 - Stejnoseměrný laboratorní zdroj

Regulovatelný kanál: 1..15V/60A

ELEKTRONICKÝ PRŮMYSLNÝ SILOMĚR OMEGA – MODEL NO. DFG60

přesnost: $\pm 0.2\%$ FS ± 1 LSD

Teslametr Elimag MP-1 - mikroprocesorem řízený 3-D teslametr

Princip měření: Hallova sonda

Přesnost měření: 1 % z rozsahu

13 SEZNAM ODBORNÉ LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

[1] MAYER, D. *Magnetické kapaliny - nový perspektivní elektrotechnický materiál*. Praha : FCC Public, 2008. ISBN 978-80-86534-13-8. s. 251-266.

[2] Nováček, V. *Technologie výroby magnetorheologických kapalin*. Brno, 2009. [online]. [cit. 2012-10-03]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=13980.
Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. J. Roupec.

[3] Nováček, V. *Konstrukce Magnetorheologické spojky*. Brno, 2011. [online]. [cit. 2012-10-07]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=13980.
Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. J. Roupec.

[4] Amazing magnetic fluids, NASA Science News, [online]. 2003, Robot Blood, [cit. 2012-05-09]. Dostupné z http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2003/02apr_robotblood/

[5] Karakoc, K., Park, E.J., Suleman, A. *Design considerations for an automotive magnetorheological brake*, Elsevier Ltd. [online]. 2008, vol. 18, no. 8, s. 434-447 [cit. 2012-05-09]. Dostupné z http://bsl.ensc.sfu.ca/publications/Karakoc_DesignConsiderations-MRB_Mechatronics_2008_inprint.pdf

[6] A. M. Testa, a) S. Foglia, L. Suber, and D. Fiorani. *Unconventional magnetic behavior of iron-oxide nanoparticles in polymeric matrices*, JOURNAL OF APPLIED PHYSICS [online]. 1 AUGUST 2001, vol. 90, no. 3, s. 1534-1539 [cit. 2012-05-09]. Dostupné z <http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/22098/1/515727.pdf>

- [7] The Design of the RHEO KNEE®, Össur Americas [online]. 2002 [cit. 2012-05-09]. Dostupné z <http://www.ossur.com/?PageID=15766>
- [8] Zhaoshuo Jiang; Richard Christenson, Hyperbolic Tangent Model for 200 kN Large-Scale Magneto-Rheological Fluid (MR) Damper, [online]. 2011, [cit. 2012-02-05]. Dostupné z: <http://nees.org/resources/3479>.
- [9] VIDLÁKOVÁ, Zuzana. Realizace adaptivní optiky pro ferokapalinová deformovatelná zrcadla. [online]. AGA & Štefánikova hvězdárna v Praze, 2008, ročník 6, Číslo 40 (vyšlo 26. září) [cit. 2012-02-05]. ISSN 1214-1674. Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2008_40_fer.php
- [10] COMMISSARIAT, Tushna. Ferrofluid pump has no moving parts. *Physics World*[online]. 2011, roč. 2011, Sep 26 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://physicsworld.com/cws/article/news/2011/sep/26/ferrofluid-pump-has-no-moving-parts>

14 PŘÍLOHY:

14.1.1 TABULKA 1: MĚŘENÍ VELIKOSTI MAGNETICKÉ INDUKCE

napětí U [V]	proud I [A]	indukce B [mT]	proudová hustota J [A.m ⁻²] *	spočítaná indukce B [mT] *
0,8	8,9	130,6	2170062	140,4
0,9	9,4	148,5	2291975	151,2
1	11	168,5	2682099	176,04
1,1	11,7	174,2	2852778	187,92
1,2	12,8	224,5	3120988	205,2
1,3	13,6	230	3316049	216
1,4	14,4	245	3511111	231,12
1,5	15,7	260	3828086	251,1
1,6	16,7	273	4071914	267,84
1,7	17,3	289,9	4218210	277,02
1,8	18,4	294,6	4486420	295,92
1,9	19,5	312,2	4754630	313,2
2,1	20,3	330,4	4949691	325,89
2,2	21,2	346,7	5169136	340,2
2,3	22,3	363	5437346	358,02
2,4	22,8	371	5559259	365,58
2,5	23,8	386,6	5803086	381,78
2,6	24,9	396,1	6071296	405
2,7	25,7	409,7	6266358	412,56
2,8	26,1	413,5	6363889	420,66
3,1	27	442,8	6583333	433,08
2,9	27,2	425,3	6632099	435,78
3	27,6	429	6729630	442,26
3,3	28,1	458	6851543	450,9

3,4	28,3	461,3	6900309	454,14
3,5	29,2	472,1	7119753	469,8
3,6	29,8	482,2	7266049	478,44
3,7	30	485,5	7314815	482,22
3,8	30,4	494	7412346	487,08
3,9	31	498,5	7558642	497,34
4,1	31,4	506,4	7656173	504,36
4,2	31,6	509,4	7704938	507,6
4,3	32	513,2	7802469	513

(* spočteno při $k = 0.54$)

14.1.2 TABULKA 2: ZÁVISLOST VELIKOSTI MOMENTU NA VELIKOSTI PROUDU, KTERÝ PROCHÁZÍ CÍVKOU

napětí [V]	proud [A]	délka rameno [m]	síla [N]	moment [N/m]
0	0	0,11	0,2	0,02
0,4	2,49	0,11	0,2	0,02
0,8	3,8	0,11	0,8	0,09
0,9	3,9	0,11	1	0,11
0,9	4	0,11	1,1	0,12
0,9	4,3	0,11	1,3	0,14
1,2	5,2	0,11	1,7	0,19
0,8	9	0,11	2,6	0,29
0,8	9,1	0,11	3,2	0,35
0,8	9,6	0,11	3,5	0,39
1	9,7	0,11	4,8	0,53
1,1	11,4	0,11	6	0,66

