

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Viskózní vlastnosti magnetických kapalin

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

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

Jméno a příjmení: **Jan RÁB**
Osobní číslo: **E10B0105P**
Studijní program: **B2013 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Viskózní vlastnosti magnetických kapalin**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Stručně popište fyzikální vlastnosti, složení, členění, způsoby výroby a průmyslové aplikace magnetických kapalin.
2. Popište obecné viskózní vlastnosti těchto látek, jejich matematické modely, definujte statickou a dynamickou viskozitu.
3. Teoretické předpoklady experimentální ověření.

Anotace

Tato práce se zabývá viskózními vlastnostmi magnetických kapalin. V úvodní části jsou popsány obecné vlastnosti magnetických kapalin, jejich složení, výroba a využití v praxi. V další části je vysvětlen pojem viskozita. V poslední části jsou prakticky ověřeny teoretické poznatky o viskozitě magnetických kapalin.

Klíčová slova

magnetická kapalina, magnetoreologická kapalina, ferokapalina, nenewtonovská kapalina, statická viskozita, dynamická viskozita

Abstract

This thesis describes the viscous features of the magnetic fluids. General features of the magnetic fluids, their composition and their practical application are described in the first part. The viscosity is explained in the next part. In the last part there are practical provings of the theoretical knowledge about viscosity of the magnetic fluids.

Keywords

magnetic liquid, magnetorheological fluid, ferrofluid, non-newtonian fluid, static viscosity, dynamic viscosity.

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma Viskózní vlastnosti magnetických kapalin vypracoval samostatně pod vedením Ing. Petra Polcara s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu použité literatury, který je součástí této práce.

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

V Měčíně dne: 10.7.2013

Jan Ráb

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Bc. Josefu Českému, že mi umožnil spolupráci na experimentu s magnetoreologickou brzdou.

Také bych chtěl poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Petru Polcarovi za vedení a cenné rady.

Obsah

ÚVOD	11
1 MAGNETICKÉ KAPALINY	11
1.1 SLOŽENÍ MAGNETICKÝCH KAPALIN	13
1.2 ROZDĚLENÍ MAGNETICKÝCH KAPALIN	14
1.2.1 <i>Ferokapaliny</i>	14
1.2.2 <i>Magnetoreologické kapaliny</i>	14
1.3 MAGNETICKÉ VLASTNOSTI MAGNETICKÝCH KAPALIN.....	15
1.4 VÝROBA MAGNETICKÝCH KAPALIN.....	16
1.4.1 <i>Mokrý mletí</i>	16
1.4.2 <i>Srážecí metoda</i>	16
1.4.3 <i>Chemická substituce</i>	16
1.4.4 <i>Mikroemulzní technika</i>	17
2 VISKOZITA	17
2.1 VISKOZITA NENEWTONSKÝCH KAPALIN	17
2.2 VISKOZITA MAGNETICKÝCH KAPALIN	18
3 VYUŽITÍ MAGNETICKÝCH KAPALIN V PRAXI	18
3.1 MAGNETOREOLOGICKÝ TLUMIČ.....	18
3.2 MAGNETOREOLOGICKÁ BRZDA	19
3.3 REPRODUKTORY S MAGNETICKOU KAPALINOU	20
3.4 VYUŽITÍ FEROKAPALIN V OCHRANĚ ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ.....	21
3.5 VYUŽITÍ MAGNETICKÝCH KAPALIN V LÉKAŘSTVÍ	21
4 EXPERIMENTY	21
4.1 ZMĚNA VISKOZITY V MAGNETICKÉM POLI.....	21
4.1.1 <i>Graf závislosti viskozity na velikosti magnetického pole</i>	25
4.1.2 <i>Použité pomůcky</i>	25
4.2 MAGNETOREOLOGICKÁ BRZDA	25
4.2.1 <i>Použité pomůcky</i>	29
5 ZÁVĚR	30
6 LITERATURA:	31

Seznam symbolů a zkratek

η	Dynamická viskozita
ν	Statická viskozita
τ	Tečné napětí
T_c	Curieova teplota
T_t	Teplota tavení
H	Intenzita magnetického pole
B	Magnetická indukce
MR	Magnetoreologický
f	Frekvence
ω	Úhlová rychlost
P	Činný výkon
Q	Jalový výkon
S	Zdánlivý výkon
I	Elektrický proud

Úvod

Existují materiály, u kterých se výrazně projevuje vzájemné působení mezi kapalinou a magnetickým polem. Tyto materiály se nazývají magnetické kapaliny (ferofluida, koloidní ferokapaliny, nanokompozitní magnetika). Uvedené materiály našly využití v mnoha oblastech techniky, lékařství, biochemie a lze očekávat, že využití magnetických kapalin se dostane do mnoha dalších oborů.

1 Magnetické kapaliny

Kapaliny, u nichž se významně projevuje interakce mezi kapalinou a magnetickým polem. Tyto kapaliny se tak staly materiály, které nalézají výhodné využití v různých oblastech techniky, biochemie a lékařství, a lze očekávat, že se v budoucnu budou rozšiřovat jejich aplikace. Magnetické kapaliny (také bývají označovány jako koloidní ferokapaliny, ferofluida, nanokompozitní magnetika) byly vyvinuty v 60. letech dvacátého století v NASA pro řízení toku tekutého paliva kosmických raket v beztlížném stavu magnetickým polem. Dnes se pro tento účel již nepoužívají, ale našly využití v mnoha dalších oblastech. [1, 2]

Magnetické kapaliny jsou suspenze velmi jemných feromagnetických nebo ferimagnetických částic v nosné kapalině. Tyto částice mají přibližně kulový tvar a průměr řádově v nanometrech (10^{-9} m), zpravidla 3 až 15 nm, a proto se nazývají nanočástice. Nanočástice lze zobrazit elektronovým mikroskopem. [1]

Nanočástice jsou složeny 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. Každá nanočástice tvoří Weissovu doménu se spontánní magnetizací; nanočástice tedy má magnetický moment - představuje miniaturní permanentní magnet. Nanočástice se v nosné kapalině (např. vodě, minerálním nebo syntetickém oleji, glykolu aj.) pohybují náhodným tepelným (Brownovým) pohybem. Nepůsobí-li na kapalinu magnetické pole, jsou magnetické momenty nanočástic náhodně orientovány a kapalina se navenek jeví jako nemagnetická. [2]

Chemické a mechanické vlastnosti magnetické kapaliny určuje nosná kapalina, ale její magnetické vlastnosti určují nanočástice a jejich koncentrace. Základním problémem pro průmyslové využití magnetických kapalin je jejich koloidní stabilita. Magnetická kapalina je koloidně stabilní, nedochází-li vlivem přitažlivých sil (van der Walsových a magnetických sil) mezi nano-částicemi ke vzájemné agregaci, tj. shlukování jejich magnetických nanočástic. Toho se docíluje tím, že jednotlivé nanočástice jsou pokryty ochranným polymerním (makromolekulárním) obalem, tzv. detergentem (surfaktantem, povrchově aktivní látkou),

který zabraňuje přímému kontaktu mezi nanočásticemi. Tento polymer je tvořen dlouhými řetězci polárních molekul (např. kyseliny mastné). Každý řetězec je svým jedním koncem (hydrofilní hlavou) pevně vázán s magnetickou nanočásticí a svým druhým koncem (hydrofobním ocasem) je volněji přitahován molekulami nosného média. [2]

Působí-li na magnetickou kapalinu magnetické pole, budou se její suspendované nanočástice polarizovat, tj. budou se stáčet do směru magnetického pole. Na nanočástice budou působit magnetické síly. Magnetická kapalina je vtahována do magnetického pole ve směru jeho intenzity. Typická magnetická kapalina objemově obsahuje 5% pevných magnetických látek, 10% detergentu a 85% nosné kapaliny. [1, 2]

S rostoucí teplotou magnetické kapaliny klesá hodnota její magnetické susceptibility χ_m , až při Curieově teplotě (T_c) zcela ztrácí své magnetické vlastnosti: $\chi_m = 0$, tedy její relativní permeabilita je $\mu_r = 1$. Zatímco u feromagnetik nebo ferimagnetik je vždy jejich Curieova teplota $T_c < T_t$, kde T_t je teplota tavení, tj. magnetické domény těchto látek vždy ztrácejí svou spontánní magnetizaci, dříve než přejdou do kapalného stavu (např. pro železo je $T_c = 770$ °C, $T_t = 1535$ °C). [2]

Magnetické pole výrazně mění některé fyzikální vlastnosti magnetických kapalin. Jednou z důležitých vlastností ferokapalin je výrazné zvýšení jejich viskozity, s rostoucí intenzitou magnetického pole - tzv. magnetoviskózní jev. Vlivem detergentových řetězců však zůstává magnetická kapalina tekutá i v silném magnetickém poli. Odezva viskozity na změnu vnějšího magnetického pole se pohybuje v řádu milisekund. Pro chování magnetických kapalin v magnetickém poli je též důležitý časový průběh magnetického pole: jinak působí na magnetickou kapalinu stejnosměrné pole, jinak střídavé pole (působení závisí na jeho frekvenci) a jinak pulsní pole. V časově proměnném magnetickém poli dochází vlivem ztrát (hysterezních a vířivými proudy) při přemagnetování nanočástic k jejich ohřevu, a tím též k ohřevu magnetické kapaliny. Viskozita magnetických kapalin se mění s teplotou kapaliny tak, že s růstem teploty viskozita klesá, a to přibližně exponenciálně. Změny teploty chemicky znehodnocují detergentové řetězce na povrchu nanočástic, čímž snižují reverzibilitu změn viskozity. Vyšší teplota a teplotní změny zkracují životnost magnetických kapalin. Životnost ferokapalin se počítá na roky. [1, 2]

Magnetické pole mění i další vlastnosti ferokapalin, např. jejich optické vlastnosti. Ferokapaliny mají magneticky anizotropní charakter. Koloidní ferokapaliny se převážně získávají synteticky, v přírodě se volně nevyskytují. Pro jejich výrobu bylo vypracováno několik technologických postupů, které jsou většinou chráněny patenty. Mezi nejstarší způsob výroby magnetických kapalin patří fyzikálně-chemický postup založený na dlouhodobém

mechanickém drcení feromagnetických (nejčastěji magnetitových nebo feritových) částic. Tento proces trvá až 1 000 hodin a probíhá za přítomnosti vhodného detergentového roztoku; je označován jako mokré mletí. Následuje odstředivá separace hrubších částic. Rychlejší jsou výrobní technologie, které jsou založeny na různých fyzikálně-chemických procesech, např. na chemické precipitaci (vylučování) magnetických částic z roztoků železitých solí nebo na elektrolyze, odpařování, vločkování apod. Finální částí chemické výroby magnetických kapalin je opět jejich čištění (tj. odstranění větších nanočástic odstředováním nebo sedimentací za působení gravitace nebo nehomogenního magnetického pole) a ředění, aby bylo dosaženo vhodné koncentrace nanočástic. [2]

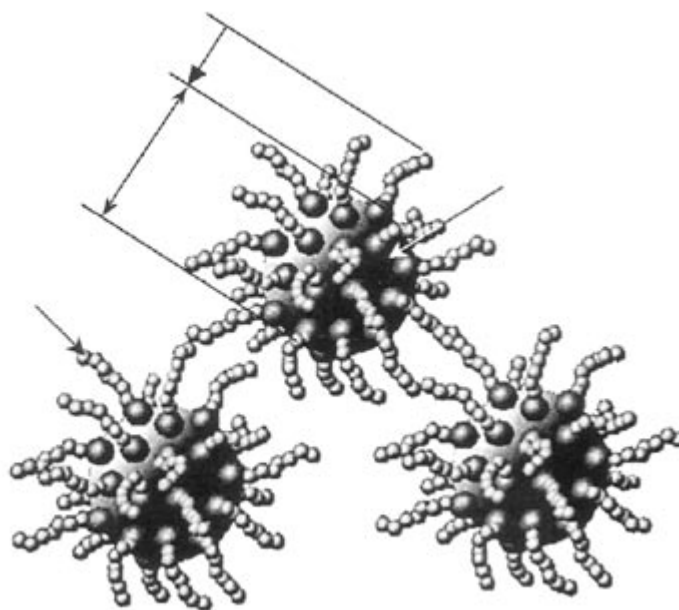
V některých aplikacích se používají magnetické kapaliny, které obsahují nekoloidní suspenzi feromagnetických mikročástic. Velikost částic je v řádu mikrometrů, jsou tudíž až o tři řády větší než nanočástice feroKapalin. Mikročástice jsou multidoménové (tedy nikoliv jednodoménové, jako je tomu u nanočástic), a pokud nejsou magneticky polarizovány, nemají magnetický moment. Jejich suspenze v nosné kapalině se nazývá magnetoreologická kapalina. V porovnání s feroKapalinami obsahují podstatně větší podíl pevných látek - až 70%. Od feroKapalin s nanočásticemi se liší především tím, že vnější magnetické pole extrémně zvyšuje jejich viskozitu, kapaliny ztrácejí svou tekutost a ztuhnou, tj. vykazují silný magnetoviskozní jev; to může být u mnohých aplikací vítané. Magnetoreologické kapaliny nejsou stabilní (magnetické částice sedimentují), což jejich použitelnost v praxi silně limituje. Cílem současného výzkumu je vyvinout stabilní magnetoreologické kapaliny. [1]

1.1 Složení magnetických kapalin

První magnetické kapaliny byly vyráběny v 60. letech minulého století mletím magnetitu s heptanem nebo polymerních uhlovodíků s mlecí přísadou (např. kyseliny olejně). Nejpoužívanější magnetické kapaliny jsou sraženiny železitých a železnatých vodních roztoků např. Fe_3O_4 , $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, MnFe_2O_4 a jiné. Pro speciální použití se však mohou použít i kapaliny na bázi jiných látek (např. na bázi přechodových prvků). Rozemleté částičky na sobě mají povlak z kyseliny olejně a jsou rozptýleny v nosné kapalině, kterou může být minerální voda, olej, rostlinný olej, petrolej nebo parafín a další. Přestože složení má vliv na vlastnosti magnetických kapalin, je zanedbatelný v porovnání s vlivem na magnetické, materiálové a mechanické vlastnosti, velikost a četnost rozemletých částiček. Velikost částiček je i hlavním kritériem pro dělení magnetických kapalin. Podle velikosti částiček se dělí na feroKapaliny a magnetoreologické kapaliny. [4]

V současné době se na každou částici chemicky navazuje řetězec povrchově aktivního

ochranného polymeru (tzv. detergentu nebo surfaktantu), ten má za úkol zabránit částicím vzájemnému dotyku a tím zajistit koloidní stabilitu magnetické kapaliny, to znamená, že se částice neshlukují ani za přítomnosti magnetického pole. Detergent je tvořen dlouhými polymerními řetězci, jeden z konců řetězce je pevně připojen k částici a druhý konec je přitahován molekulami nosné kapaliny. Vrstva detergentu je asi 1-2 nm široká a vyvolává odpudivé síly mezi jednotlivými částčkami. Koloidní stabilita má zásadní vliv na fyzikální vlastnosti magnetických kapalin. Objemově obsahuje magnetická kapalina přibližně 10% detergentu. [4, 5]



Obr. 2.1 Částice s detergentem (převzato z [2])

1.2 Rozdělení magnetických kapalin

1.2.1 Fero kapaliny

Jak již bylo řečeno fero kapaliny obsahují částice o velikosti v řádech nanometrů (3-15nm).[3] Typická fero kapalina obsahuje 5% pevných magnetických látek, 10% detergentu a 85% nosné kapaliny. [8] U fero kapalin se nenachází magnetoviskózní jev. Z toho vyplývá, že jejich viskozita není závislá na magnetickém poli.

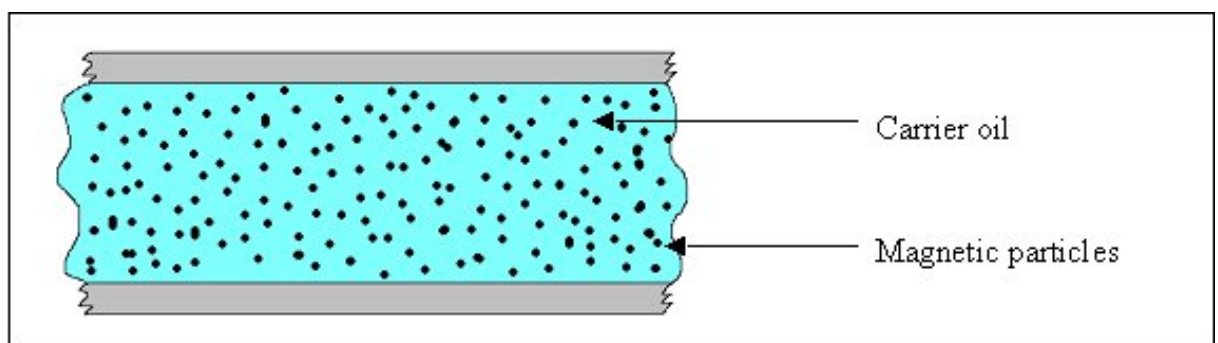
1.2.2 Magnetoreologické kapaliny

V některých aplikacích se používají fero kapaliny, v jejichž koloidní suspenzi se místo nanočástic nacházejí mikročástice tedy o tři řády vyšší. Použité mikročástice jsou na rozdíl od

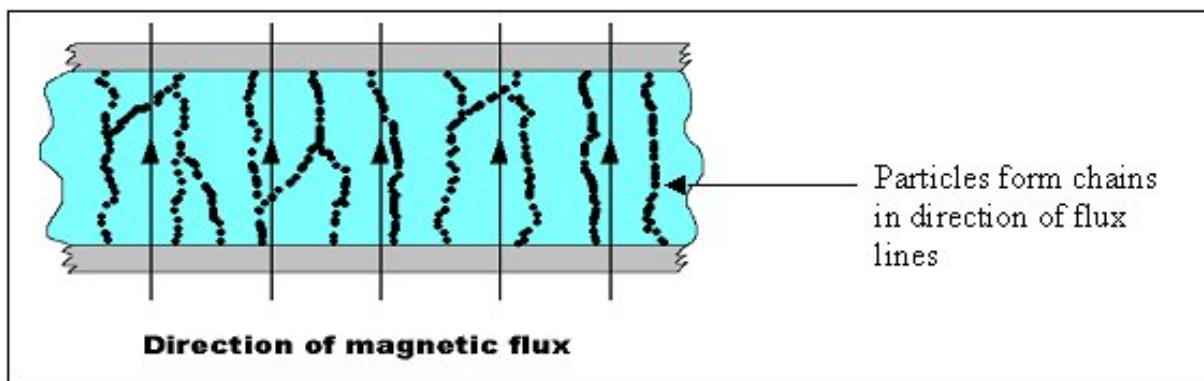
nanočástic multidoménové. Nanočástice, jsou pouze jednodoménové. Jestliže se mikročástice magneticky nepolarizují, nemají žádný magnetický moment. Jejich suspenze v nosné kapalině se nazývá magnetoreologická kapalina. Ta má oproti normální ferokapalině obsah pevných magnetických látek až 70%. Magnetoreologické kapaliny se od ferokapalin liší hlavně tím, že po vložení do vnějšího magnetického pole se jejich viskozita extrémně zvýší. Ztrácí svoji tekutost a ztuhnou, tzn, že vykazují velký magnetoviskózní jev, toho se také v mnoha aplikacích využívá. Magnetoreologické kapaliny jsou však mnohdy nestálé, jejich částice sedimentují, tj. usazují se na dně. To jejich použití značně omezuje. [8]

1.3 Magnetické vlastnosti magnetických kapalin

Pokud na magnetickou kapalinu nepůsobí vnější magnetické pole, chová se magnetická kapalina jako nemagnetická. Částice uvnitř kapaliny jsou volně rozptýlené. Pokud se magnetická kapalina vloží do magnetického pole, částice se uspořádají podle siločar přiloženého magnetického pole. Nejvíce částic se bude vyskytovat v místě největšího magnetického toku. Závislost magnetické indukce na intenzitě magnetického pole se chová podobně jako u feromagnetik. S rostoucím H se B blíží stavu nasycení. Stav nasycení u některých magnetických kapalin může dosahovat hodnoty až 1,3 T. Magnetické kapaliny se v magnetickém poli chovají jako paramagnetika. Bývají také označovány jako superparamagnetika. [3]



obrázek 2.3.a: Magnetická kapalina bez přítomnosti magnetického pole. Částice se volně vznášejí v nosné kapalině (převzato z [11])



obrázek 2.3.b: Magnetická kapalina vložená do magnetického pole. Částice tvoří řetězec ve směru toku magnetického pole. (převzato z[11])

1.4 Výroba magnetických kapalin

1.4.1 Mokrý mletí

Jde o původní způsob výroby magnetických kapalin na základě feritů, který vymyslel pan S. Papell. [9] Je to metoda mokrého broušení feritů v kulovém mlýnu za použití vhodného surfaktantu. Díky odstředování se oddělily velké částičky, které by mohly způsobit sedimentaci, od těch malých. Tento proces však trval dlouhou dobu (kolem 1000 hodin). Hlavně z toho důvodu byl nahrazen rychlejším a jednodušším způsobem srážení kovu soli ve vodném roztoku. [10]

1.4.2 Srážecí metoda

Srážecí metoda je velmi univerzální proces pro přípravu nanočástic magnetitu, maghemitu a feritů o různé velikosti částic (3-20 nanometrů v průměru). Tato reakce probíhá za teploty mezi 0-100 °C Velikost částic se dá řídit změnou molárního poměru látek, které jsou přítomny v reakci a změnou teploty. Je dokázáno, že řízením molárního poměru $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$, jejich koncentrace, prostředí a koncentrace alkalického média umožní vytvořit částice o požadované velikosti. [10]

1.4.3 Chemická substituce

Pro výrobu magnetické kapaliny lze použít metodu chemické substituce, tedy nahrazení nebo částečné nahrazení iontu pevné částice za jiný, nebo za kombinaci dvoumocných kovových iontů (např. Co^{2+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , atd.). Pro tento proces se používají látky, které se nechají snadno připravit srážecí metodou. Touto metodou lze připravit magnetickou kapalinu s pevnými částicemi z jakéhokoliv materiálu, který se nedá

snadno připravit srážecí metodou. [10]

1.4.4 Mikroemulzní technika

Kromě jednoduché srážecí metody je možné vyrobit částice pomocí mikroemulzní techniky, na přípravu feri nebo feromagnetických nanočástic za pomoci tzv. reverzních micel. Reverzní micela je mikroemulze vody v oleji obsahující dvě nemísitelné látky, které jsou stabilizované pomocí povrchově aktivní látkou (surfaktantem). Způsob přípravy částic spočívá v přípravě dvou mikroemulzí, z nichž jedna obsahuje vodný roztok soli kovu nebo směsí solí kovů a druhý vodný roztok a smíchání obou v daném poměru. Použití čisté povrchové látky má velmi úzké využití a tím je omezena i velikost částic. Nevýhodou této metody je, že použitá povrchově aktivní látka nemusí být kompatibilní pro příslušnou aplikaci. Jedinou možností jak vyřešit tento problém je použít jinou povrchově aktivní látku nebo použít dvě. [10]

2 Viskozita

Jedním z nejjednodušších kinematických prototypů konečné deformace je prostá smyková deformace. Odpovídající toková deformace posloužila Newtonovi ke zformulování představy o vnitřním tření tzv. viskozitě kapalin. Existuje viskozita newtonských kapalin a viskozita nenewtonských kapalin. Magnetické kapaliny jsou nenewtonovské kapaliny.[7]

Viskozita se dělí na statickou, značící se ν a dynamickou značící se η . Výpočet viskozity se udává vztahem:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy}, \text{ kde } \frac{dv}{dy} \text{ označuje gradient růstu rychlosti kolmém na směr rychlosti. } \tau \text{ je tečné}$$

napětí a η je součinitel vnitřního tření nebo dynamická viskozita. Statická viskozita má jednotky $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} (\text{Pa} \cdot \text{s})$ a dynamická $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} (\text{St} - \text{Stokes})$ [7],[18].

2.1 Viskozita nenewtonských kapalin

Měření viskozity běžnými viskozimetry se v závislosti na způsobu měření může lišit i o dekadické řády. Systematická měření vedla již ve dvacátých letech k závěru, že zdánlivé odchylky lze vysvětlit nelineární závislostí smykového napětí na smykové rychlosti.[7] Chování nenewtonských kapalin se nedá popsat lineárním Newtonovým zákonem. U těchto kapalin se mluví o tak zvané zdánlivé (nenewtonově) viskozitě. Hodnota zdánlivé viskozity závisí na několika parametrech, ať už na rychlosti smyku v kapalině, předchozí deformační historii kapaliny a dalších. Zjištění její hodnoty není tedy tak jednoduché jako u

newtonovských kapalin, kde je viskozita závislá pouze na teplotě a tlaku.[5]

Z hlediska časové stálosti se dají neneutronovské kapaliny rozdělit do několika kategorií: 1) Časově nezávislé, to znamená, že rychlost vnitřního smyku je závislá pouze na smykovém napětí.[5]

2) Časově závislé, to znamená, že závislost smykového napětí a rychlost vnitřního smyku je ve vztahu s dobou zatěžování kapaliny daným smykovým zatížením. Tyto kapaliny se dále dají dělit na tixotropní a reopektické. U tixotropních kapalin jejich smykové napětí časem klesá. U reopektických kapalin smykové napětí naopak roste.[5]

3) Viskoelastické kapaliny, u tohoto druhu neneutronovských kapalin můžeme pozorovat, jak elastomechanické vlastnosti pevných látek, tak i viskózní vlastnosti kapalin. [5]

2.2 Viskozita magnetických kapalin

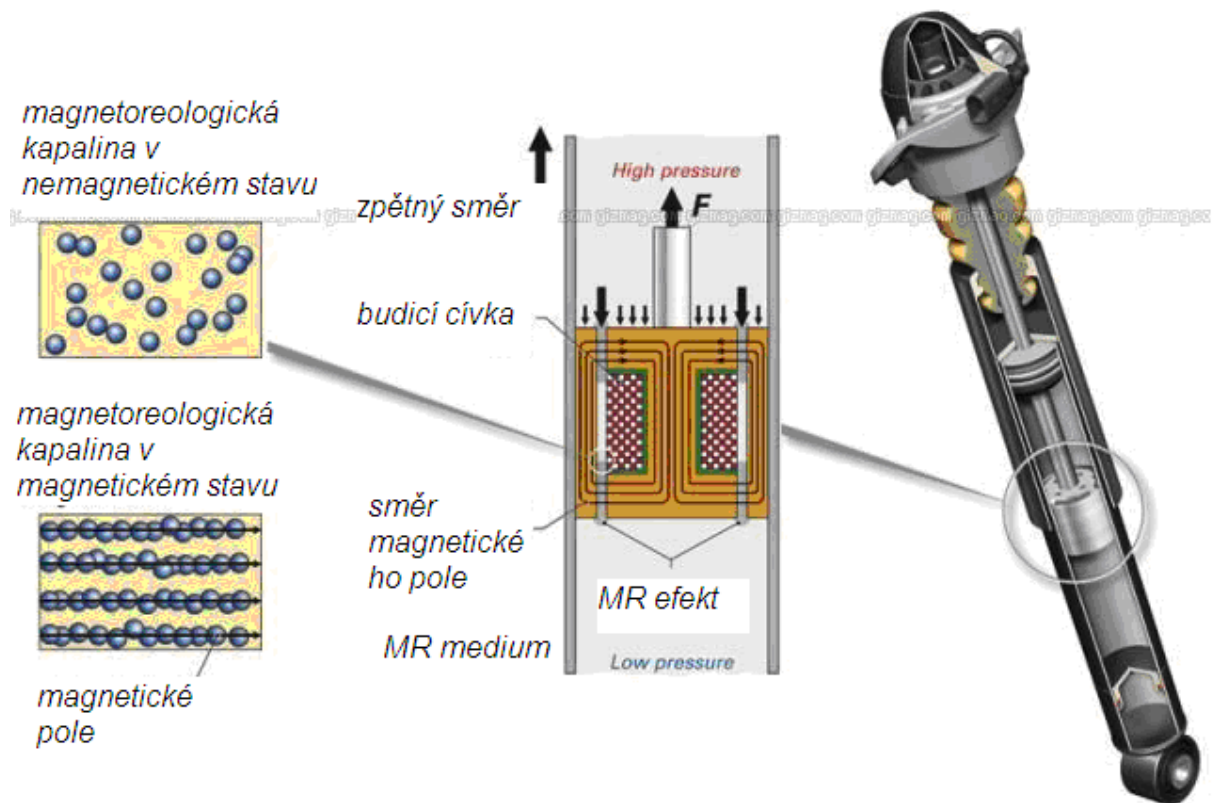
Jak již bylo řečeno, magnetické kapaliny se rozdělují na magnetoreologické kapaliny a ferokapaliny. Magnetoreologické kapaliny se vyznačují tzv. magnetoviskózním jevem (jejich viskozita je závislá na magnetickém poli). Čím silnější magnetické pole působí, tím má kapalina vyšší viskozitu. Magnetoviskózní jev je závislý na velikosti a koncentraci částic obsažených v nosné kapalině. Ferokapaliny magnetoviskózní jev vůbec nemají nebo mají, ale velmi malý. Je to způsobeno tím že ferokapaliny mají malou koncentraci částic. U ferokapalin můžeme říci, že jejich viskozita není závislá na magnetickém poli.

3 Využití magnetických kapalin v praxi

3.1 Magnetoreologický tlumič

Tlumič slouží k tlumení nežádoucích kmitů. Všechny tlumiče ať obyčejné, olejové nebo ty magnetoreologické nemohou pracovat s lineární charakteristikou tlumící síly, ale pracují s nelineární charakteristikou v závislosti na zdvihu. [12]

Magnetoreologický tlumič se skládá ze šasi, pístu, budící cívky a magnetickou kapalinu. V pístu jsou vytvořeny kanály, kudy proudí magnetická kapalina a je kolem nich navinuta budící cívka, která má za úkol vytvořit magnetické pole. Díky změně magnetického pole se mění i viskozita magnetické kapaliny a tím pádem i tlumící síla celého tlumiče. Výhodou tohoto principu je velmi rychlá změna tlumící síly, která se pohybuje okolo 5 ms. Klasický tlumič má tuto odezvu kolem 15 ms.[13]



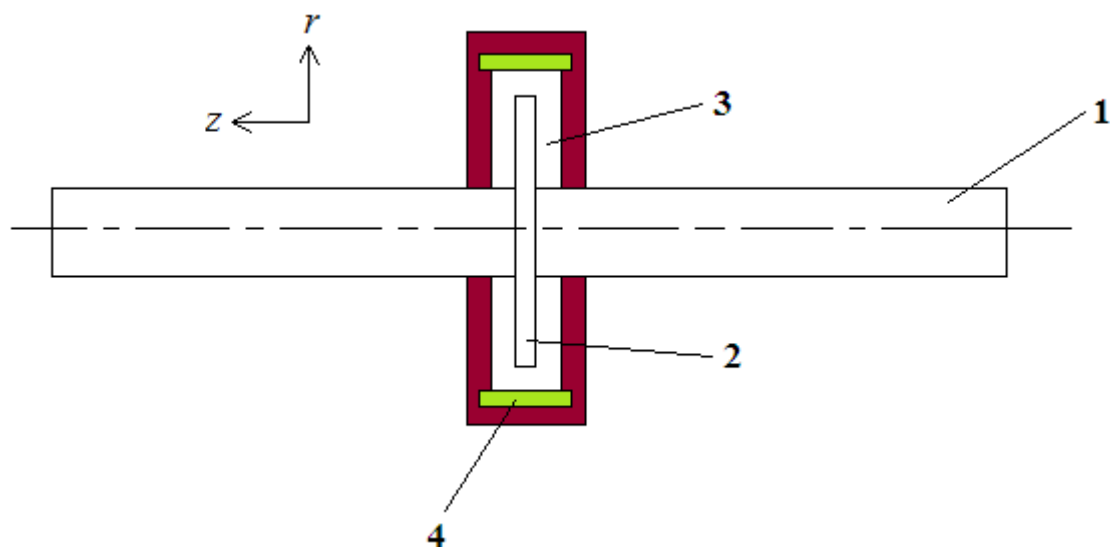
Obrázek 4.1: magnetoreologický tlumič (převzato z [14])

Magnetoreologické tlumiče zatím nejsou moc rozšířené. Hlavním důvodem je vysoká cena a nutnost umístění řídicí jednotky, která bude ovládat magnetické pole.

3.2 Magnetoreologická brzda

Magnetoreologická brzda používá principu změny viskozity magnetické kapaliny. Brzda se skládá z budicí cívky, hřídele, ložiska, rotoru, magnetické kapaliny a statoru. Za nepřítomnosti magnetického pole má kapalina viskozitu téměř jako voda a částičky se volně pohybují v nosné kapalině. Když na brzdu přivedeme magnetické pole, částičky se začnou formovat do řetězců a viskozita prudce stoupne. Tato změna trvá jen asi 0,02 s. [15]

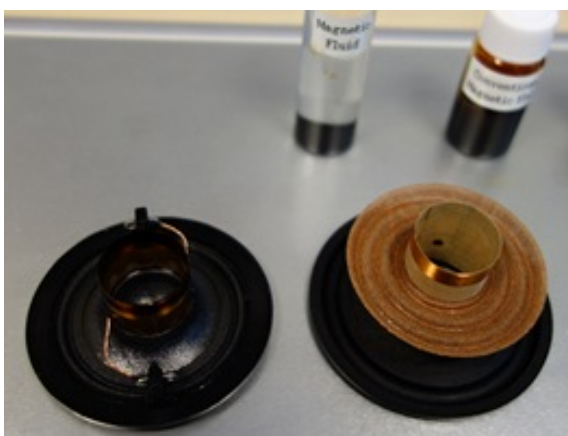
Magnetoreologická brzda má oproti jiným brzdícím systémům značnou spoustu výhod. Její konstrukce je velice jednoduchá a malá. Brzda nepotřebuje žádné brzdové destičky, takže nedochází k žádnému vzájemnému dotyku a tím pádem ani k opotřebení a její ovladatelnost je jednoduchá, protože již nepotřebujeme žádný převodník.[4]



Obrázek 5.2: Magnetoreologická brzda 1 – hřídel, 2 – brzdový kotouč, 3 – Magnetoreologická kapalina, 4 – budící cívka (převzato z [4])

3.3 Reproduktry s magnetickou kapalinou

Už v 70. letech minulého století se začíná experimentovat s touto konstrukční metodou reproduktorů. Jejich konstrukční provedení je vlastně úplně stejné. Jediným rozdílem je, že cívka napájená akustickým signálem nekmitá volně ve vzduchu, ale kmitá právě v magnetické kapalině. Magnetická kapalina je v této mezeře držena silným magnetickým polem. Tento způsob řešení má za následek lepší chlazení cívky a tím zmenšení tepelných ztrát. Tímto se mohl zvýšit akustický výkon při zachování velikosti reproduktoru. Zároveň se sníží akustické vibrace, to má za následek výrazné zlepšení akustické reprodukce.[5]



Obrázek 4.3: vlevo se nachází reproduktor s ferokapalinou vpravo je obyčejný reproduktor (převzato z[17])

3.4 Využití ferokapalin v ochraně životního prostředí

Vážený problém životního prostředí je, že odpadní vody obsahují velké množství ropných látek, těžkých kovů a jiných škodlivin. Pro odstranění ropných látek z vody je potřeba zvýšit jejich magnetickou susceptibilitu, to dosáhneme použitím vhodné ferokapaliny. Princip tohoto postupu spočívá v tom, že do vody přidáme vhodnou ferokapalinu mísitelnou s ropou. Když se obě látky promísí, tak u původně nemagnetické ropy dochází ke zvýšení magnetické susceptibility na dostatečně vysokou úroveň, aby bylo možné použít metodu magnetické separace.[16]

3.5 Využití magnetických kapalin v lékařství

Magnetické kapaliny se také dají používat v lékařství, konkrétně k dopravení medikamentu na místo postižení uvnitř těla. Na povrch částecek magnetické kapaliny se nanese vrstva medikamentu a pak se pomocí vnějšího magnetického pole dopraví na místo. Díky magnetickému poli se dají medikamenty udržet na jednom místě, jak dlouho je potřeba. Je možné také využít magnetických kapalin jako kontrastní látku při magnetické rezonanci.

Magnetická kapalina může také pacientovi zachránit zrak. Nejčastější poruchou zraku je poškozená sítnice, ať už následkem nemoci nebo zraněním. Aplikováním magnetické kapaliny pod sítnici můžeme pomocí magnetického pole dostat sítnici do požadované polohy.

Magnetické kapaliny by mohli v budoucnu také nahradit chemoterapii. Metoda nazývaná hypertermie spočívá v zavedení kapaliny do nádorové tkáně. Na kapalinu se působí magnetickým polem v rozmezí frekvencí 50kHz – 1,2 MHz. Rychlé přemagnetování způsobí, že se nanočástice zahřívají a tím působí cílené ničení nádorové tkáně. Musí se však dávat pozor, aby se částice nepřehřály. [5]

4 Experimenty

4.1 Změna viskozity v magnetickém poli

V této měřicí úloze jsem ověřil teoretické poznatky o viskozitě magnetických kapalin. Měl jsem k dispozici jednu magnetoreologickou kapalinu a jednu ferokapalinu. Jako první jsem měřil magnetoreologickou kapalinu. Tu jsem nalil do kádinky a vložil do ní viskozimetr, bez přítomnosti magnetického pole. Potom jsem přikládal různé magnety a změny viskozity zaznamenával. Měření by probíhalo lépe, kdybych použil homogenní magnetické pole. Kvůli nedostatku času jsem však musel použít snadnější metodu s magnety. Rozložení

magnetického pole je popsáno v následujících tabulkách.

Magnetoreologická kapalina

Tabulka 1. viskozita magnetoreologické kapaliny

	Viskozita [mPa·s]	Rozsah
viskozita bez působení mag. pole	315	R2
1. magnet	5940	R4
2. magnet	1630	R3



Obrázek 6.1a: umístění prvního magnetu Obrázek 6.1b: umístění druhého magnetu

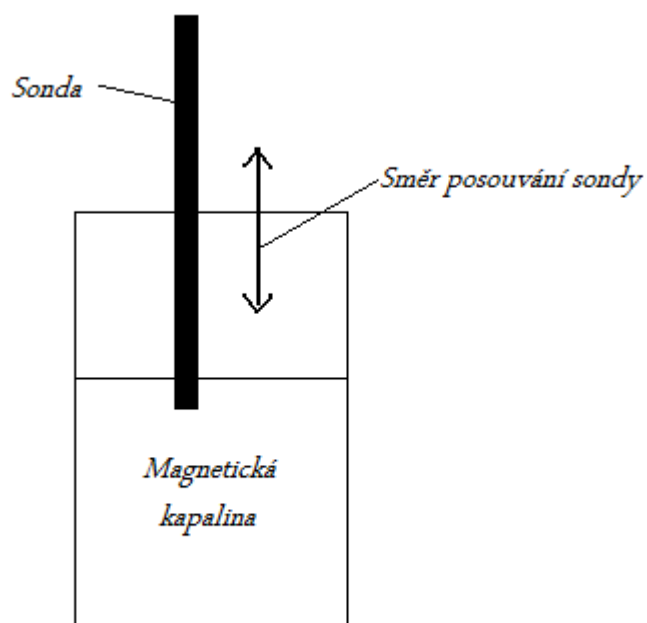
U každého přiloženého magnetu jsem také pomocí teslametru měřil velikost magnetického pole v závislosti na vzdálenosti od magnetu.

Tabulka 2: Velikost magnetické indukce prvním způsobem měření

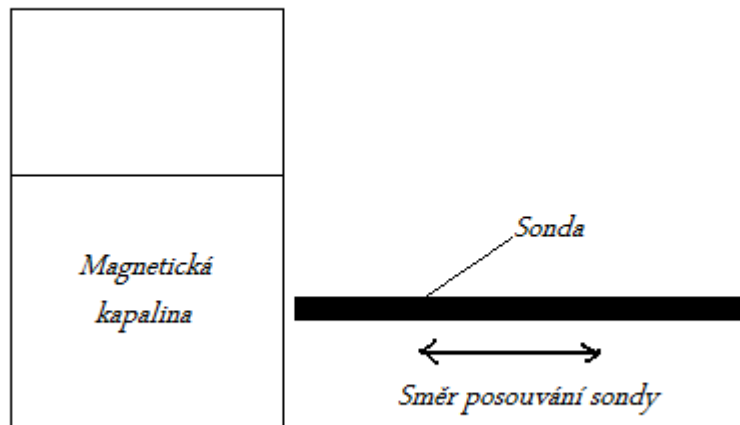
	B ve vzdálenosti 3 cm [mT]	B ve vzdálenosti 6 cm [mT]	B ve vzdálenosti 9 cm [mT]
1. magnet	11,2	6,2	2,2
2. magnet	3,2	0,5	0

Tabulka 3: Velikost magnetické indukce druhým způsobem

	B ve vzdálenosti 3 cm [mT]	B ve vzdálenosti 3 cm [mT]	B ve vzdálenosti 3 cm [mT]
1. magnet	8,9	5,6	2,7
2. magnet	0,3	0,1	0



Obrázek 6.1c: První způsob měření magnetické indukce



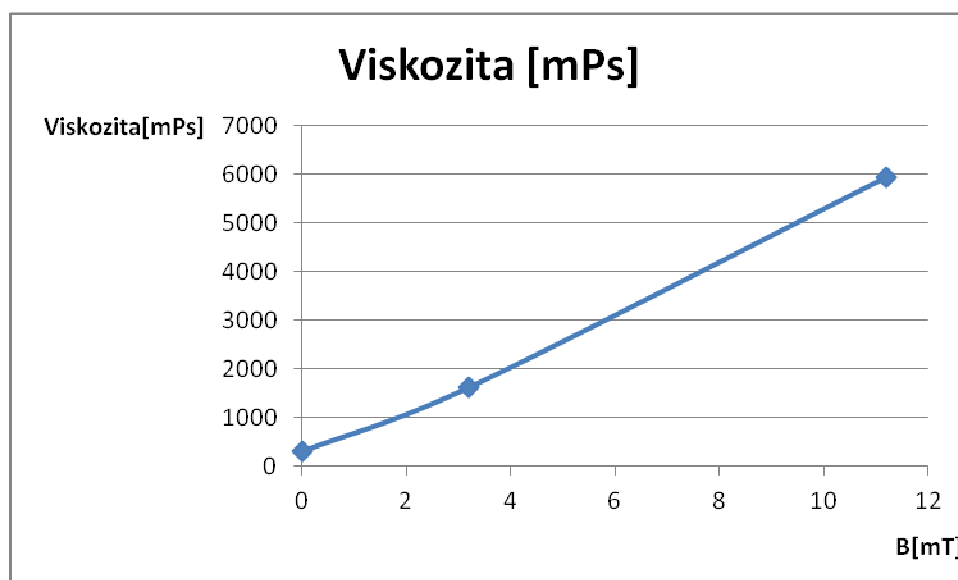
Obrázek 6.1d: Druhý způsob měření magnetické indukce

Jak je patrné z tabulek, tak při umístění magnetoreologické kapaliny do magnetického pole se její viskozita rapidně zvýšila. Proto jsem také musel měnit rozsahy viskozimetru. První magnet byl o hodně silnější, proto také viskozita byla vyšší. S tejným postupem jsem potom aplikoval i na ferokapalinu.

Viskozitu ferokapaliny udával výrobce $\eta < 6 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, použitý viskozimetr na rozsahu $0 - 2000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ měl chybu měření 4,5% a ukazoval hodnotu $0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$. Po přiložení magnetů se viskozita nezměnila, to dokazuje teoretický předpoklad, že ferokapalina má velice slabý magnetoviskózní jev.

4.1.1 Graf závislosti viskozity na velikosti magnetického pole

Viskozita se měřila ve vzdálenosti 3 cm od magnetu.



Graf 6.2: závislost viskozity na velikosti magnetického pole

4.1.2 Použité pomůcky

Ferokapalina: Ferotec EFH1

Magnetoreologická kapalina: LIQUIDS RESEARCH – MRHCCS4-B

Magnety

Teslametr : MP-1, Výrobní číslo: 33MP106

Hallova sonda: Výrobní číslo: 1D061

Viskozimetr: VP1020 Výrobní číslo: VP-0036

4.2 Magnetoreologická brzda

Jak již bylo řečeno magnetoreologická brzda pracuje na principu změny viskozity magnetoreologické kapaliny. Čím je viskozita větší tím více brzda brzdí. Na KTE brzdou mají, proto jsem magnetoreologický jev na ní demonstroval.

Frekvenční měnič dodává do sestavy elektrické otáčky, na něj je připojen motor, který

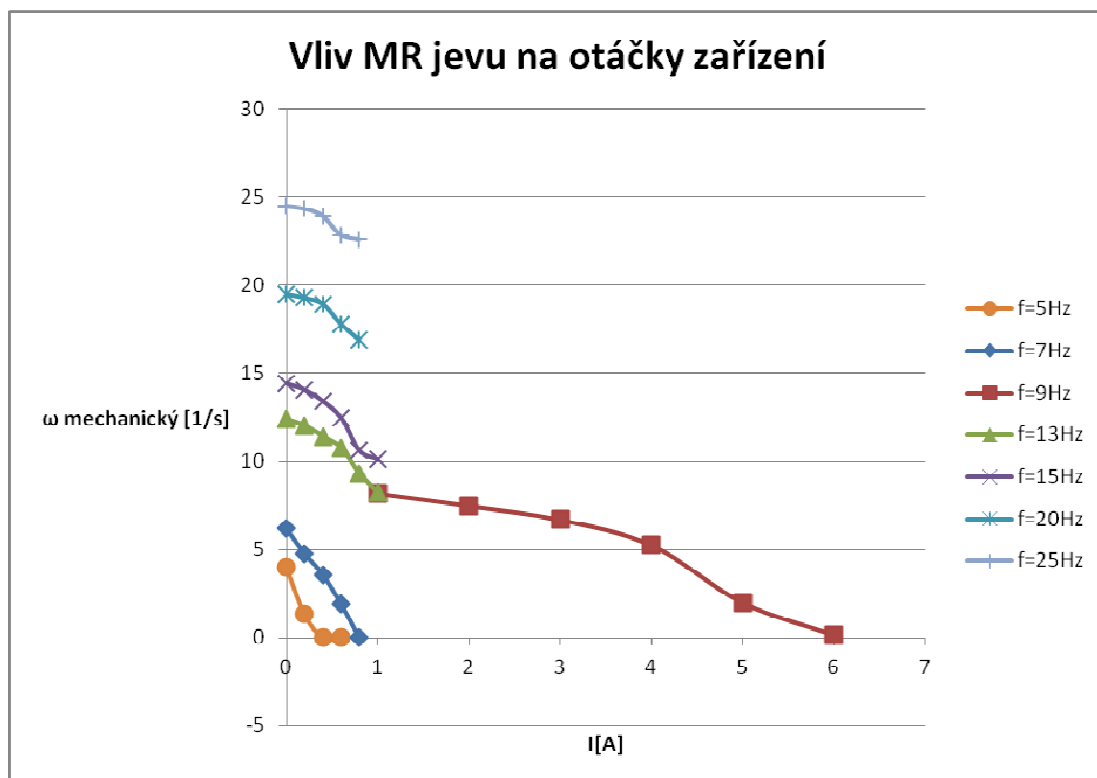
elektrické otáčky převádí na mechanické. Motor je pomocí řemenu spojen s hřídelí magnetoreologické brzdy. Samotná brzda je napájena stejnosměrným zdrojem, který má vliv na viskozitu kapaliny, která je v brzdě nalita. K celé soustavě je ještě připojen otáčkoměr, který hlídá mechanické otáčky brzdy a motoru, pokud jsou otáčky na brzdě menší než na motoru, znamená to, že brzda brzdí a řemen začíná prokluzovat. Do soustavy je také připojen analyzátor sítě, který ukazuje odběr motoru.

Měření probíhalo při různých elektrických otáčkách nastavených na frekvenčním měniči při různém buzení brzdy. Měřeny byly mechanické otáčky na motoru a brzdě (jejich poměr je dán převodem řemenice, a pokud není konstantní, lze konstatovat, že dochází k prokluzu, ten zkreslí měření, ale díky tomu se celá brzda nezničí) a činný výkon odebíraný motorem ze sítě, z něj lze poukazovat na zatížení motoru a brzdění brzdy. Tabulky naměřených veličin viz příloha.



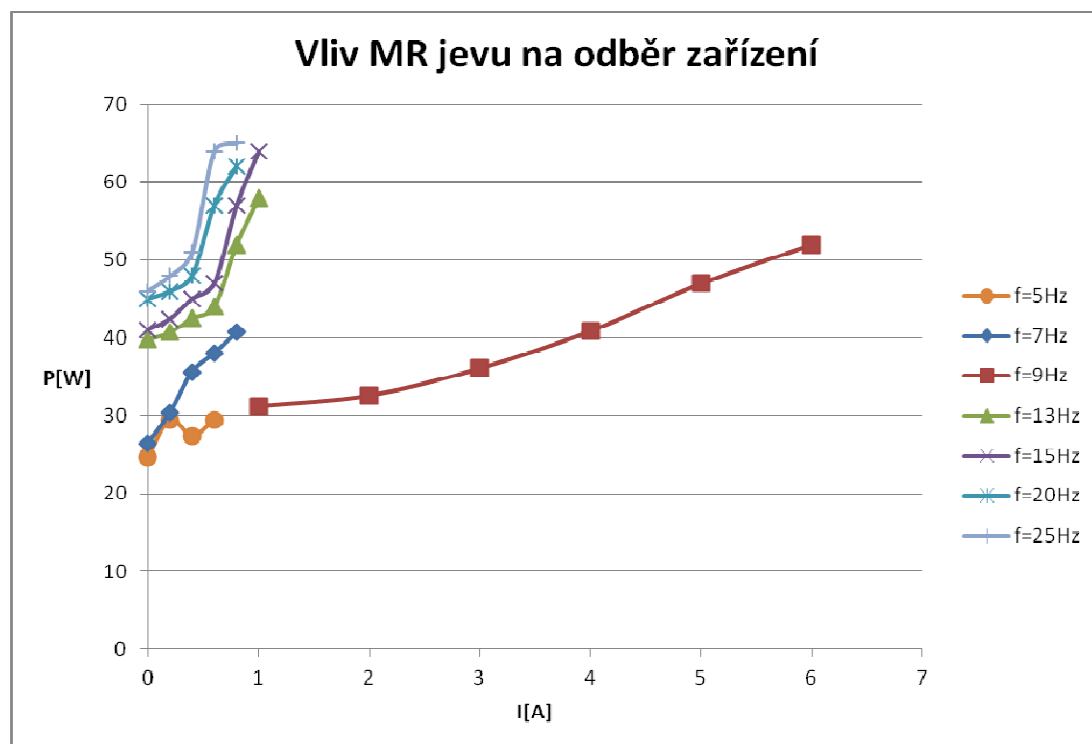
Obrázek 6.2: Sestava pro měření magnetoreologické brzdy

Z grafu 6.1a je patrné, jaký měl magnetoviskózní jev vliv na otáčky zařízení. Ve většině případů zvýšení proudu protékajícího brzdou, mělo za následek úplné zastavení brzdy.



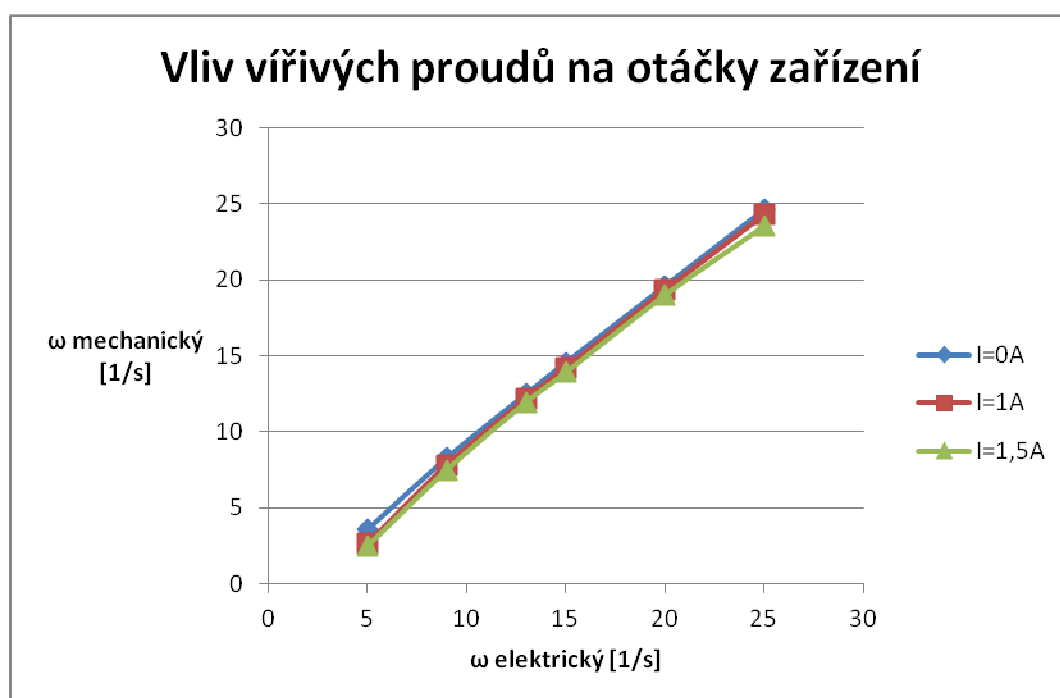
Graf 6.2a. Vliv Magnetoviskózního jevu na otáčky

Na grafu 6.2b je znázorněno, jaký vliv má zvyšování buzení brzdy a tedy zvyšování viskozity kapaliny na odběr motoru. Čím je viskozita vyšší, tím více musí motor odebírat ze sítě, aby udržel brzdu ve stejných otáčkách.

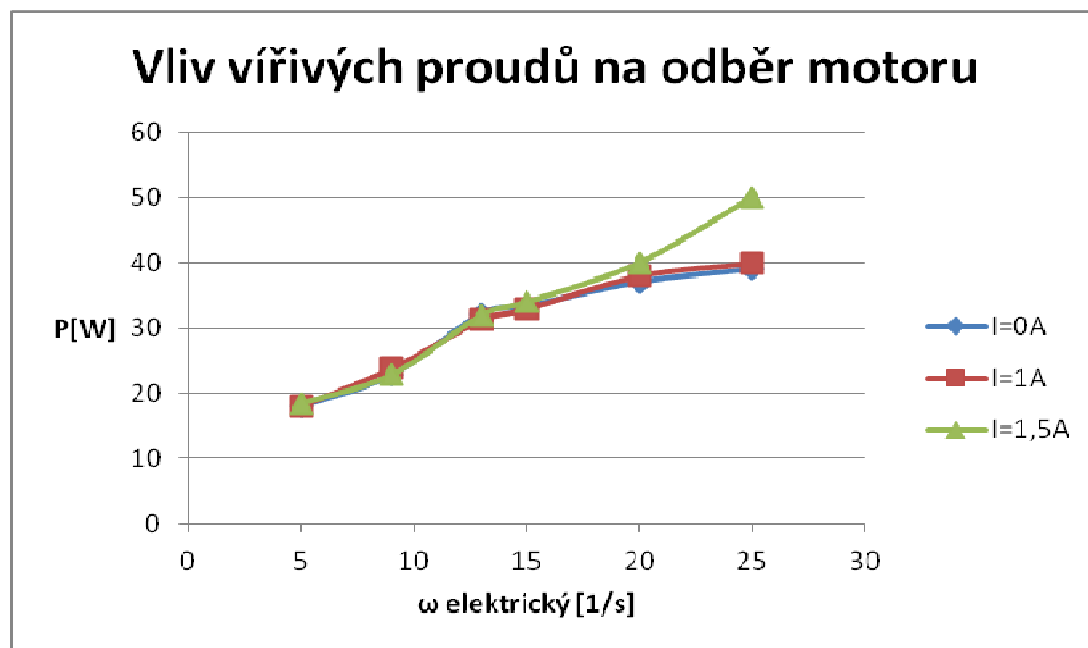


Graf 6.2b: Vliv magnetoviskózního jevu na odběr motoru

Ve dvojici grafů 6.2c a 6.2d je popsáno jaký mají vířivé proudy vliv na otáčky a na odběr motoru. I když je brzda nebuzená, tak brzdný kotouč je vyroben z kovu, tím pádem jsou zde přítomny i vířivé proudy. Jak je patrné tak žádný významný vliv ať už na otáčky nebo na odběr motoru nemají.



Graf 6.2c: Vliv vířivých proudů na otáčky



Graf 6.2d: vliv vířivých proudů na odběr motoru

U experimentu jsme používali magnetoreologickou kapalinu, která má velmi vysoký magnetoviskózní efekt, díky němu šlo dobře pozorovat brždění samotné brzdy. Kdybychom použili ferokapalinu, která nemá žádný nebo velmi malý magnetoviskózní jev, experiment by se nezdařil.

4.2.1 Použité pomůcky

Otáčkoměr: APROBEE TACH 20 evidenční číslo – 202585

Analyzátor sítě: C.A. 8332B, CHAVIN ARNOUX, evidenční číslo: 501173

Stejnoseměrný zdroj: STATRON 2225, Motor atlas Náchod FT4C52S

Frekvenční měnič: SKA 1200075 – 0,75 kW, EMERSON INDUSTRIAL AUTOMATION

Magnetoreologická kapalina: LIQUIDS RESEARCH – MRHCCS4-B

5 Závěr

Rešerše vlastností kapalin poukázala na MR jev u MR kapalin ale ne (nebo velmi slabý) u ferokapalin. Tento poznatek byl experimentálně ověřen. MR kapaliny je vhodné využít v takových zařízeních, kde vyžadujeme MR efekt (brzda, tlumič, ...), což bylo ověřeno na MR brzdě. MR jev u ferokapalin nebyl změřen při rozsahu 0-2000mPas, ferokapalinu lze tedy považovat za materiál s viskozitou neměnnou v závislosti na magnetickém poli.

6 Literatura:

- [1] Magnetické kapaliny. [online]. [cit. 2013-06-23]. Dostupné z WWW: <<http://fyzmatik.pise.cz/811-feromagneticka-kapalina.html>>
- [2] Mayer Daniel, Magnetické kapaliny: Magnetické kapaliny a jejich použití. Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2008_40/el030778.pdf
- [3] Kubát, Miroslav. Vyšetření permeability magnetických kapalin. Plzeň, 2013. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/wps/portal/prohlizeni>. Diplomová práce. ZČU. Vedoucí práce Ing. Petr Polcar
- [4] Polcer, Petr. Elektromechanický systém s magnetickou kapalinou. Plzeň, 2012. Dizertační práce. ZČU. Vedoucí práce Prof. Ing. Daniel Mayer, DrSc.
- [5] Stejskal, Jan. Proudění magnetické kapaliny s aplikací binghamova modelu. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Miloslav Haluza, CSc.
- [6] Mayer, Daniel. Magnetické kapaliny a jejich použití: část 2. ELEKTRO. 2007, roč. 17, č. 4, s. 4-8.
- [7] Wein Ondřej. Úvod do reologie. první. Brno: Malé Centrum, 1996. ISBN 96-9123.první. Brno: Malé Centrum, 1996. ISBN 96-9123.
- [8] Feromagnetická kapalina. [online]. 2009 [cit. 2013-06-22]. Dostupné z: <http://fyzmatik.pise.cz/811-feromagneticka-kapalina.html>
- [9] Papell S S 1965 Low viscosity magnetic fluid obtained by the colloidal suspension of magnetic particles. U S Patent 3,215,572
- [10] Charles, Stuart W. The Preparation of Magnetic Fluids [online]. Bangor, 2002 [cit. 2013-06-24]. Dostupné z: http://pages.csam.montclair.edu/~yecko/ferro/oldpapers/DIRECTORY_LNP594/Charles_Prep.pdf. University of Wales.
- [11] Becker, Will. Smart fluid off state.jpg. *En.wikipedia.org* [online]. 2006 [cit. 2013-06-25]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Smart_fluid_off_state.jpg
- [12] Lazar, Jaroslav. Magnetoreologický tlumič kmitání [online]. Brno, 2011 [cit. 2013-06-25]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/5479/2011_DP_Lazar.pdf?sequence=1. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.

- [13] Rozenberg, Jaromír. Automotive engineering journal. [online]. [cit. 2013-06-25]. Dostupné z: http://www.autopriemysel.sk/index.php?option=com_content&task=view&id=5919&Itemid=118
- [14] Techbox.sk. [online]. [cit. 2013-06-25]. Dostupné z: http://www.techbox.sk/diskusie/?theme_id=11822
- [15] Šváb, Vojtěch. Nové metody řízení vozidlových brzd [online]. Praha, 2009 [cit. 2013-06-25]. Dostupné z: http://measure.feld.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/zaverecne_prace/BP_2009_Svab_Vojtech_locked.pdf. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [16] Hubka, Tomáš. Extrakce významných metabolitů vznikajících biologickým rozkladem oxyethylenovaných 4-nonylfenolů z vody magneticky modifikovanými sorbenty [online]. Pardubice, 2008 [cit. 2013-06-26]. Dostupné z: http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/29088/1/HubkaT_Extrakce%20vyznamnych_KK_2008.pdf. Dizertační práce. Univerzita Pardubice.
- [17] Nývlt, Václav. Technet.idnes.cz. [online]. 2013 [cit. 2013-06-26]. Dostupné z: http://technet.idnes.cz/sony-novinky-2013-0iu-tec_video.aspx?c=A130311_121449_tec_video_nyv
- [18] Linhart, Jiří. *Mechanika tekutin I*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009. ISBN 978-80-743-766-7.

7 Přílohy:

Tabulka 8.1: Vliv vířivých proudů na otáčky a odběr motoru:

elektrické veličiny						mechanické veličiny				
měnič		motor			buzení brzdy	otáčky				
f[Hz]	ω [1/s]	P(W)	Q(VAR)	S(VA)	I[A]	motor [rpm]	brzda[rpm]	ω motor[1/s]	ω brzda[1/s]	převod ω_m/ω_b [-]
5,00	5,00	18,00	192,00	625,00	0,00	215,40	121,00	3,59	2,02	1,78
9,00	9,00	22,80	235,00	765,00	0,00	497,80	270,30	8,30	4,51	1,84
13,00	13,00	32,20	956,00	958,00	0,00	750,80	412,00	12,51	6,87	1,82
15,00	15,00	33,30	994,00	996,00	0,00	874,70	479,10	14,58	7,99	1,83
20,00	20,00	37,00	1121,00	120,00	0,00	1178,00	648,30	19,63	10,81	1,82
25,00	25,00	39,00	1151,00	1151,00	0,00	1480,00	812,00	24,67	13,53	1,82
5,00	5,00	18,00	211,00	622,00	1,00	159,00	78,00	2,65	1,30	2,04
9,00	9,00	23,80		764,00	1,00	470,00	253,00	7,83	4,22	1,86
13,00	13,00	31,20		944,00	1,00	733,00	391,00	12,22	6,52	1,87
15,00	15,00	32,90	986,00	988,00	1,00	855,00	453,00	14,25	7,55	1,89
20,00	20,00	38,00	1114,00	1115,00	1,00	1162,00	617,10	19,37	10,29	1,88
25,00	25,00	40,00	1150,00	1150,00	1,00	1460,00	769,00	24,33	12,82	1,90
5,00	5,00	18,50	194,00	630,00	1,50	148,00	80,00	2,47	1,33	1,85
9,00	9,00	22,90	256,00	763,00	1,50	450,00	235,00	7,50	3,92	1,91
13,00	13,00	32,00	944,00	944,00	1,50	718,00	373,00	11,97	6,22	1,92
15,00	15,00	34,00	984,00	986,00	1,50	836,00	430,00	13,93	7,17	1,94
20,00	20,00	40,00	1120,00	1120,00	1,50	1142,00	579,00	19,03	9,65	1,97
25,00	25,00	50,00			1,50	1415,00	658,00	23,58	10,97	2,15

Tabulka 8.2: Vliv MR jevu na otáčky a odběr motoru:

elektrické veličiny						mechanické veličiny				
měnič		motor			buzení brzdy	otáčky				
f[Hz]	ω [1/s]	P(W)	Q(VAR)	S(VA)	I[A]	motor [rpm]	brzda[rpm]	ω motor[1/s]	ω brzda[1/s]	převod ω_m/ω_b [-]
5,00	5,00	24,70	642,00	641,00	0,00	239,00	128,80	3,98	2,15	1,86
5,00	5,00	29,50	260,00	711,00	0,20	78,80	20,00	1,31	0,33	3,94
5,00	5,00	27,40			0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	#DIV/0!
5,00	5,00	29,50	262,00	713,00	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	#DIV/0!
7,00	7,00	26,40	700,00	736,00	0,00	371,10	201,30	6,19	3,36	1,84
7,00	7,00	30,40	223,00	741,00	0,20	285,20	144,60	4,75	2,41	1,97
7,00	7,00	35,60	271,00	817,00	0,40	214,00	79,61	3,57	1,33	2,69
7,00	7,00	38,00	894,00	881,00	0,60	115,10	58,90	1,92	0,98	1,95
7,00	7,00	40,70	300,00	994,00	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	#DIV/0!
9,00	9,00	31,20	778,00	778,00	0,00	491,70	266,80	8,20	4,45	1,84
9,00	9,00	32,60	777,00	777,00	0,20	449,10	230,70	7,49	3,85	1,95
9,00	9,00	36,10	241,00	810,00	0,40	402,10	203,70	6,70	3,40	1,97
9,00	9,00	40,90	900,00	930,00	0,60	315,50	148,00	5,26	2,47	2,13
9,00	9,00	47,00	367,00	1133,00	0,80	120,00	28,46	2,00	0,47	4,22
9,00	9,00	52,00	1304,00	1304,00		10,00	5,00	0,17	0,08	2,00
13,00	13,00	39,80	951,00	952,00	0,00	743,80	402,50	12,40	6,71	1,85
13,00	13,00	40,70	950,00	950,00	0,20	721,60	373,60	12,03	6,23	1,93
13,00	13,00	42,50	965,00	966,00	0,40	685,50	332,30	11,43	5,54	2,06
13,00	13,00	44,00	1000,00	1000,00	0,60	645,80	304,30	10,76	5,07	2,12
13,00	13,00	52,00	1147,00	1147,00	0,80	557,50	233,50	9,29	3,89	2,39
13,00	13,00	58,00	1283,00	1283,00	1,00	493,00	191,30	8,22	3,19	2,58

15,00	15,00	41,00	1000,00	10001,00	0,00	865,90	466,70	14,43	7,78	1,86
15,00	15,00	42,40	994,30	995,00	0,20	844,70	438,10	14,08	7,30	1,93
15,00	15,00	45,00	1007,00	1007,00	0,40	805,40	386,30	13,42	6,44	2,08
15,00	15,00	47,00	1032,00	1033,00	0,60	748,20	342,90	12,47	5,72	2,18
15,00	15,00	57,00	1207,00	1207,00	0,80	637,00	258,50	10,62	4,31	2,46
15,00	15,00	64,00	1365,00	1360,00	1,00	608,90	200,00	10,15	3,33	3,04
20,00	20,00	45,00	1116,00	1117,00	0,00	1168,00	628,70	19,47	10,48	1,86
20,00	20,00	46,00	1114,00	1114,00	0,20	1156,00	604,00	19,27	10,07	1,91
20,00	20,00	48,00	1118,00	1119,00	0,40	1135,00	568,80	18,92	9,48	2,00
20,00	20,00	57,00	1194,00	1194,00	0,60	1068,00	458,40	17,80	7,64	2,33
20,00	20,00	62,00	1234,00	1234,00	0,80	1013,00	409,60	16,88	6,83	2,47
25,00	25,00	46,00	1153,00	1155,00	0,00	1469,00	790,00	24,48	13,17	1,86
25,00	25,00	48,00	1155,00	1154,00	0,20	1460,00	769,80	24,33	12,83	1,90
25,00	25,00	51,00	1158,00	1159,00	0,40	1436,00	713,80	23,93	11,90	2,01
25,00	25,00	64,00	1257,00	1255,00	0,60	1371,00	574,50	22,85	9,58	2,39
25,00	25,00	65,00	1268,00	1274,00	0,80	1355,00	559,50	22,58	9,33	2,42