

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TEORETICKÉ ELEKTROTECHNIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Magneto-viskózní a teplotně-viskózní vlastnosti
magnetických kapalin**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2013/2014

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

Jméno a příjmení: **Jakub LAŠTOVIČKA**
Osobní číslo: **E11B0134P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Magneto-viskozni a teplotně-viskozni vlastnosti magnetických kapalin**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Popište složení, vlastnosti a možné aplikace magnetických kapalin. Akcentujte magnetoreologické kapaliny.
2. Definujte statickou a dynamickou viskozitu, vysvětlete magnetoviskozní efekt.
3. Experimentálně ověřte magneto-viskozni a teplotně-viskozni vlastnosti magnetických kapalin využívaných na KTE.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

1. **MAYER, D.** Magnetické kapaliny a jejich použití. (Elektro. 2007, roč. 17)
2. **ODENBACH, S.** Magnetoviscous effects in ferrofluids. Berlin: Springer, 2002, 151 s. Lecture notes in physics. Monographs. ISBN 3-540-43068-7; ISSN 0940-7677.
3. **TIMKO, M., ZENTKO, A., ZENTKOVÁ, M., KONERACKÁ, V.**
a **KELLNEROVÁ, M.** Magnetoreological Properties of some Ferrofluids. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 1994, roč. 30, č. 2, s. 1117-1119.
4. Další bude předána při konzultaci

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

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2013**
Termín odevzdání bakalářské práce: **9. června 2014**


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




Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na závislost viskozity magnetických kapalin na teplotu a na magnetickém poli. Práce obsahuje popsání vlastností, využití a viskozity a na závěr je experimentálně ověřen magnetoviskózní jev.

Klíčová slova

Magnetická kapalina, ferokapalina, magnetoreologická kapalina, statická viskozita, dynamická viskozita.

Abstract

Following work is focused on viscosity of magnetic fluids and its dependence on temperature and magnetic field. Work contains properties of magnetic fluids, usage, viscosity explanation, and magnetoviscous effect is experimentally verified.

Key words

Magnetic fluid, ferrofluid, magnetorheological fluid, static viscosity, dynamic viscosity.

Prohlášení

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

Dále prohlašuji, že veškerý software použitý při řešení této disertační práce je legální.
V Plzni dne 4. 5. 2014

.....

Podpis

V Plzni dne 9.6.2014

Jakub Laštovička

Poděkování

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

Obsah

ÚVOD.....	10
1. SLOŽENÍ, VLASTNOSTI A APLIKACE MAGNETICKÝCH KAPALIN	11
1.1. SLOŽENÍ MAGNETICKÝCH KAPALIN	11
1.2. VÝROBA	12
1.2.1. Mokrý mletí.....	12
1.2.2. Srážecí metoda.....	13
1.2.3. Chemická substituce	13
1.2.4. Mikroemulzní techniky.....	13
1.3. MAGNETICKÉ VLASTNOSTI	13
1.4. POUŽITÍ	13
1.4.1. Dynamické těsnění	14
1.4.2. Chlazení	14
1.4.3. Tlumiče.....	15
2. VISKOZITA TEKUTIN, MAGNETOVISKOZNÍ EFEKT	16
2.1. STATICKÁ A DYNAMICKÁ VISKOZITA	16
2.2. VISKOZITA NEWTONOVSKÝCH KAPALIN.....	17
2.3. ZÁVISLOST VISKOZITY NA TEPLOTĚ.....	18
2.4. MAGNETOVISKOZNÍ JEV	19
3. EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ MAGNETO-VISKOZNÍCH A TEPLOTNĚ- VISKOZNÍCH VLASTNOSTÍ MAGNETICKÝCH KAPALIN.....	21
3.1. NÁVRH MAGNETICKÉHO OBVODU PRO MĚŘENÍ.....	21
3.2. OVĚŘENÍ NÁVRHU SIMULACÍ V AGROS2D.....	23
3.3. OVĚŘENÍ SPRÁVNOSTI TEORETICKÝCH NÁVRHŮ	27
3.4. MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ MAGNETOREOLOGICKÝCH KAPALIN.....	27
3.5. MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ FEROMAGNETICKÝCH KAPALIN.....	30
3.6. ODCHYLKY MĚŘENÍ.....	31
3.7. POUŽITÉ POMŮCKY	32
POUŽITÁ LITERATURA.....	34
PŘÍLOHY.....	36
PŘÍLOHA A - GRAF ZÁVISLOSTI VISKOZITY KOLOIDNĚ NESTABILNÍ MR KAPALINY	36
PŘÍLOHA B - GRAF ZÁVISLOSTI VISKOZITY KOLOIDNĚ STABILNÍ MR KAPALINY	37
PŘÍLOHA C - OVĚŘENÍ SPRÁVNOSTI TEORETICKÝCH NÁVRHŮ	38

Seznam symbolů a zkratk

Použitý systém značení:

\mathbf{a}	vektor
a	skalár

Seznam symbolů:

μ	permeabilita	$[\text{H}\cdot\text{m}^{-1}]$
μ_0	permeabilita vakua ($\mu_0 = 4\pi\cdot 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$)	$[\text{H}\cdot\text{m}^{-1}]$
μ_r	relativní permeabilita	[-]
B	magnetická indukce	[T]
I	proud	[A]
J_r	povrchový proud	$[\text{A}\cdot\text{m}^{-1}]$
J_{ext}	povrchová hustota	$[\text{A}\cdot\text{m}^{-2}]$
k	činitel plnění	[-]
l	délka	[m]
N	počet závitů	[-]
T	teplota	[°C, K]
R_m	magnetická reluktance	$[\text{H}^{-1}]$
S	povrch	$[\text{m}^2]$
ν	kinematická viskozita	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$
ρ	hustota	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
η	dynamická viskozita	[Pa·s]
Φ	magnetický tok	[Wb]

Seznam zkratk:

NASA	National Aeronautics and Space Administration
KTE	Katedra teoretické elektrotechniky
ZČU	Západočeská univerzita
MR	Magnetoreologická/ý

Úvod

Magnetické kapaliny se v dnešní době používají v mnohých průmyslových odvětvích, ač je využití celého jejich potenciálu zatím nereálnou formou. Důvodem je nejspíše relativně nedávné objevení vhodných praktických aplikací těchto kapalin. Podle [1] se mělo využívat vlastností magnetických kapalin k ovládní tekutin ve stavu beztláče pro kosmické raketoplány NASA. Bylo zamýšleno, že díky svým vlastnostem bude možné aplikací magnetického pole různých sil ovládat proudění paliva. Magnetickými kapalinami rozumíme kapaliny, jejichž tok a případně některé vlastnosti lze ovlivňovat pomocí působícího magnetického pole. Představme si tedy kapalinu, která je vždy a za všech okolností přitahována k permanentnímu magnetu. Lze tedy předpokládat, že v tomto případě máme co dočinění s feromagnetickou látkou. Pokud se zaměříme na vnitřní strukturu, zjistíme, že se jedná o jakousi koloidní suspenzi magnetických částic, kterou lze vázat v určitém tekutém nosiči. Nanočástice bývají většinou z magnetitu, hematitu nebo případně jiné sloučeniny, jež obsahuje železo. Máme tedy kapalinu se stejnými vlastnostmi jako feromagnetický materiál, a její jevy umožňují, aby byla užívána například jako maziva či těsnění a podobně [2].

V této práci si tedy blíže popíšeme složení, vlastnosti a využití magnetických kapalin, zaměříme se na viskozitu kapalin a s tím související magnetoviskózní efekt, jehož závislost bude experimentálně změřena na kapalinách poskytnutými katedrou teoretické elektrotechniky.

1. SLOŽENÍ, VLASTNOSTI A APLIKACE MAGNETICKÝCH KAPALIN

1.1. Složení magnetických kapalin

Magnetické kapaliny jsou koloidní směsi, které podle velikosti částic rozdělujeme na ferokapaliny, u kterých se velikost částic pohybuje v rozmezí 3 - 15 nm a na magnetoreologické kapaliny, které mají částice o tři řády větší, a to kolem 1-20 μm [3].

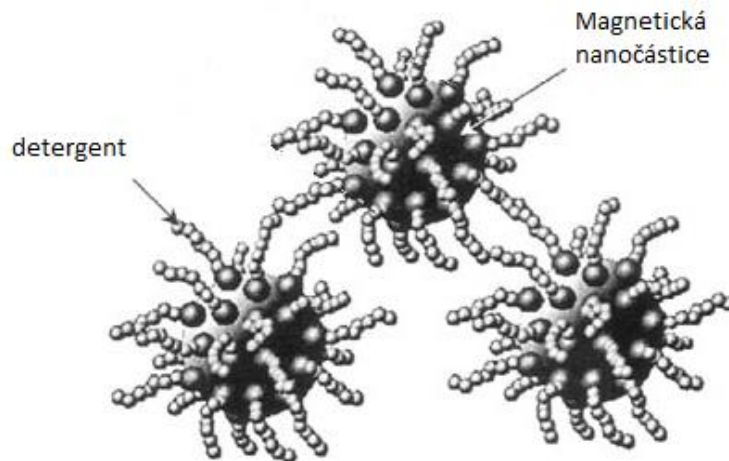
Právě tento rozdíl ve velikosti částic je důležitý pro jejich využití, neboť výrazně ovlivňují jejich vlastnosti. Výrazně menší částice ferokapaliny mají pouze jednu magnetickou doménu a jedná se tedy o miniaturní permanentní magnety. Magnetické vlastnosti, které jsou pro tyto kapaliny stěžejní, ovlivňuje poměr částic, z jakého jsou materiálu a jaká je nosná kapalina. U ferokapalin se používají lehké oleje s co největší viskozitou, protože jejich využití se nezakládá na magnetoviskózním jevu.

Magnetoreologické kapaliny mají větší multidoménné částice a jsou také mnohem více koncentrované (výrobci většinou uvádí 70-80%). Když jsou pak vystaveny magnetickému poli, nemají vlastní magnetický moment a co je nejdůležitější, kapalina při aplikaci magnetického pole výrazně mění svoji viskozitu.

Hlavní problém kapalin tvořených z malých částic je shlukování vlivem van der Waalových a magnetických sil. Tomuto problému lze předcházet aplikací surfaktantu (též detergent). Surfaktant z aktivního polymeru vytvoří na každé částici řetězce polárních molekul dlouhé 1-2 nm (Obr. 1.1), kde záporný pól řetězce je vázaný k částici a kladný je volně v nosné kapalině. Kladné póly jednotlivých obalů částic se odpuzují a zamezují částicím přiblížit se na kritickou vzdálenost. Další možností ochrany je využití elektrostatické odpudivosti, kdy se na povrchu částice speciálními chemickými roztoky vytvoří nejdříve záporný obal a poté kladný. [1]

Jako nosné kapaliny bývají používány jak minerální, tak syntetické oleje, pak také glykol, parafín a voda [3]. Směs by měla odolávat oxidačním a sedimentačním účinkům, které částečně omezíme výše zmíněnými detergenty. Oxidací rozumíme reakci při kontaktu s kyslíkem a sedimentace je vliv gravitačního pole na rozložení nanočástic, v tomto případě

jejich usazování se na dno nádoby a vytěsňování lehčího oleje na povrch. V magnetických kapalinách je kvůli těmto jevům velmi výrazná časová degradace, která negativně ovlivňuje jejich magnetické vlastnosti.



Obr. 1.1 Struktura nanočástic Ferokapaliny [převzato z 4].

1.2. Výroba

Ve většině případech, se v technických i lékařských oborech používá jako základní materiál pro výrobu magnetických kapalin magnetit (Fe_3O_4) a limonit (Fe_2O_3), často ale obsahují oba tyto prvky, protože se získávají stejným způsobem. V praxi se používá několik způsobů jak koloidní směs získat:

1.2.1. Mokrý mletí

Mechanický způsob získávání nanočástic feritu v kulovém mlýně. Do komory uzavřeny koule z tvrdšího materiálu než je ferit a přípravek, který je potřeba namlít, v procesu se pak otáčí s celou komorou a tvrdší koule přípravek rozemelou. Tato metoda je však velmi časově náročná (1000 h), proto se dnes používají především chemické výrobní postupy, které rychleji a snadněji nanočástice vyrobí. [5]

1.2.2. Srážecí metoda

Univerzální metoda pro přípravu částic o velikostech 3-20 nm. Při procesu srážení se jejich magnetické vlastnosti dají lehce ovládat okolními podmínkami. Bylo objeveno, že velikost a vlastnosti částic může ovládat molární poměr $\text{Fe}^{3+}:\text{Fe}^{2+}$ a jejich koncentrace, společně s vlastnostmi a koncentrací alkalického média při teplotách od 0 do 100°C.[5]

1.2.3. Chemická substituce

Tato metoda umožňuje vytvořit koloidní směs i z látek, které se nedají jednoduše připravit srážecí metodou. V procesu je ion z Fe^{2+} nahrazen či dočasně nahrazen dvoumocnými ionty jiných kovů (např. kobaltu, manganu, niklu, zinku nebo lithia). [5]

1.2.4. Mikroemulzní techniky

Technika využívající reverzní micely – mikroemulze vody a oleje která nelze sloučit a tento roztok je stabilizován surfaktantem. Tento tří složkový systém dokáže vyrobit širokou škálu struktur a to ne jen mikroemulzí. Samotná výroba částic probíhá mícháním dvou mikroemulzí v určitém poměru. Jedna obsahuje vodný roztok s kovovou solí a druhá obsahuje vodný roztok s alkalickým médiem.[5]

1.3. Magnetické vlastnosti

Není-li kapalina vystavena elektromagnetickému poli, je orientace magnetických momentů jednotlivých částic zcela náhodná, kapalina se jeví jako nemagnetická a její mechanické a chemické vlastnosti jsou určeny především vlastnostmi nosné kapaliny, pak materiálu, ze kterého jsou nanočástice vyrobeny a na jejich koncentraci [6].

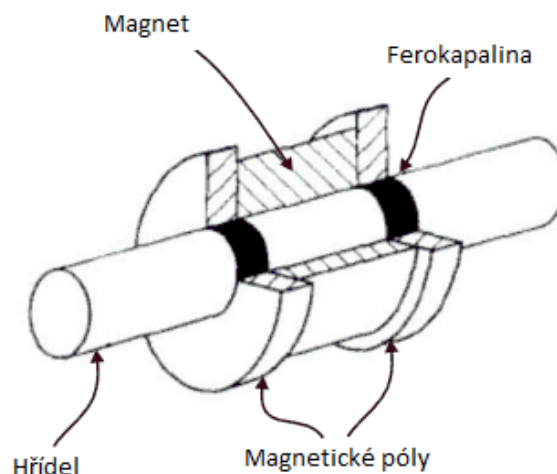
1.4. Použití

Díky svým unikátním vlastnostem se stále objevují nové možnosti použití v široké škále odvětví. Počet patentů týkajících se feroKapalin meZiročně stoupá o desítky až stovky. Vyskytují se projekty například na využití feroKapalin do robotických kloubů imitujících pohyb kloubu živého [7], kapaliny které by mohly pomocí magnetického pole přenést lék přímo do zranění [1], jejich použití pro řízení přenášení tepla tepelnými trubicemi [8] nebo

magnetická kapalina jako kontrastní látka při magnetické rezonanci [9]. Ferokapaliny také dokážou zlepšit chlazení transformátorů, snížit hlučnost dialýzy při onemocnění ledvin, detekovat magnetické domény na nosičích jako diskety nebo harddisky a také na kamenech, granátech a ocelích [10]. Nenovější studie se zabývá vývojem umělého srdce, jehož membrána funguje právě na bázi ferokapalin [11]. Momentálně nejvíce v praxi využívané aplikace jsou v následujících třech podkapitolách.

1.4.1. Dynamické těsnění

V mnohých zařízeních je potřeba hermeticky oddělit dva prostory a mezi nimi přenášet rotační pohyb. Například motor, který je chlazený vzduchem má hřídel vyvedenou do naprosto čistého prostředí ve kterém s něčím otáčí (Obr. 1.2). Nebo v harddisku, kde zrníčko prachu může narušit proces čtení/zapisování. V těchto případech je hermeticky utěsněná hřídel nezbytností. Pro maximální účinnost dáme hřídel vyrobenou z feromagnetického materiálu do magnetu s dírou a do mezery umístíme ferokapalinu. Žádná nečistota se dovnitř nedostane a hřídel se může díky vlastnostem téměř newtonovské kapaliny volně točit. [12]

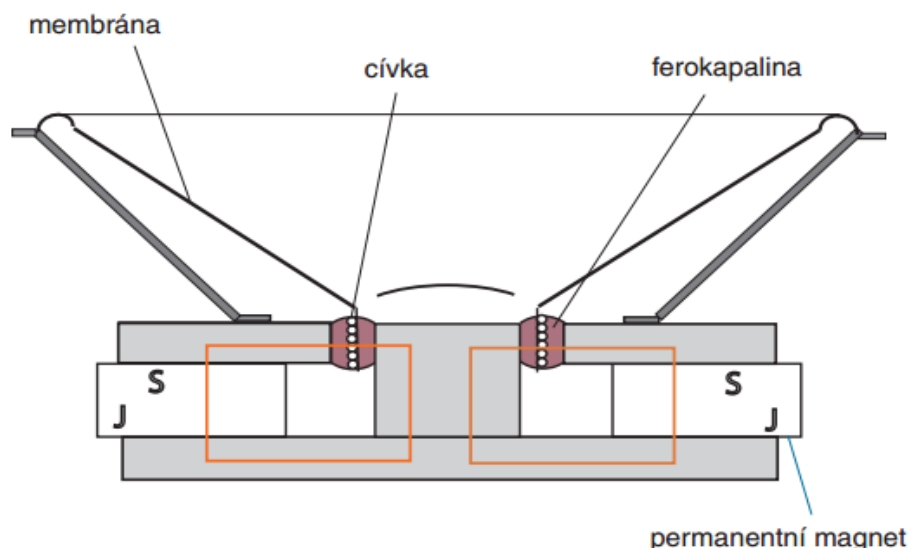


Obr. 1.2 Hřídel s uložením ve ferokapalině [převzato z 12].

1.4.2. Chlazení

V reproduktoru obecně bývá magnetický obvod, kde kmitající cívka vydává akustický signál. Právě mezi magnetem a cívkou je obvykle vzduch. Pokud ale vyplníme tuto mezeru

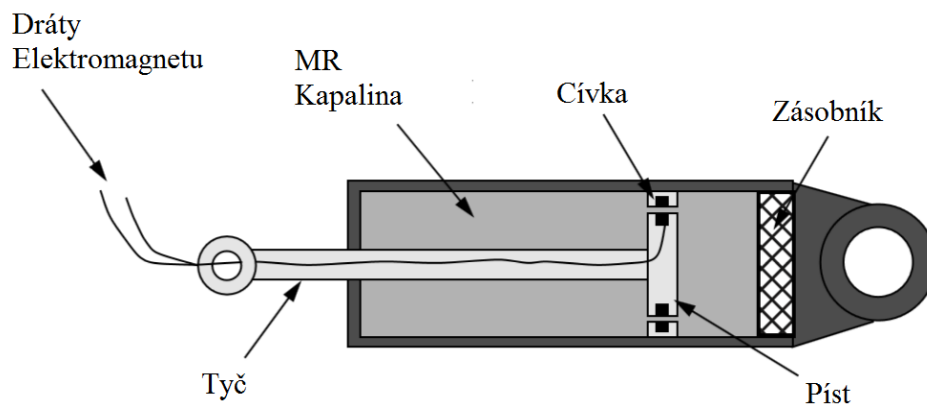
feromagnetickou kapalinou, získáme hned několik výhod. Magnetická kapalina má asi osmkrát větší tepelnou vodivost než vzduch, magnetická cívka tedy tímto získá několika násobně lepší chlazení a získá větší účinnost [13]. Kapalina také více tlumí a tím zmírní kmitání, sama také vystředuje cívku a zvuk díky tomu získá na kvalitě [14].



Obr. 1.3 Schéma reproduktoru s ferokapalinou [převzato z 6].

1.4.3. Tlumiče

Tlumiče s magnetickou kapalinou, neboli tlumiče ferohydrodynamické, využívají magnetoviskózní efekt, kdy při vystavení kapaliny magnetickému poli kapalina změní svoji viskozitu a zvýší tím tlumení. Tyto tlumiče je tedy možno řídit a jsou kvalitní náhradou za ty dosavadní, neřízené. Používají se v pračkách, sedadlech a největší výhodou jsou v autech na tlumení kol [13]. Velká nevýhoda těchto tlumičů je však vysoká cena.



Obr. 1.4 Tlumič s MR kapalinou [překresleno na základě 15].

2. VISKOZITA TEKUTIN, MAGNETOVISKOZNÍ EFEKT

2.1. Statická a Dynamická viskozita

Kapaliny a plyny, označované též jako tekutiny, se vyznačují hlavně velkou pohyblivostí vlastních částic, které kvůli tomu mají velice malou soudržnost. Díky této vlastnosti jsou tekutiny velmi pohyblivé, postrádají vlastní tvar a jsou velice snadno dělitelné. Plyny mají molekulovou soudržnost téměř nulovou, protože na rozdíl od kapalin jsou vzdálenosti molekul mnohem větší, molekuly mají velmi malou přitažlivou sílu a převládá volný pohyb. Zmenší-li se prostor, jsou plyny lehce stlačeny a poměrově od kapalin jsou tečná napětí mnohem menší. Kapaliny na rozdíl od plynů nemění samovolně svůj objem, jsou velmi málo stlačitelné a jsou viskózní, tedy že kladou odpor proti pohybu. Kvůli viskozitě vzniká tečné napětí mezi tekutinou a stěnou.[16-17]

Podle Newtona je viskozita určena formulí:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} \quad (2.1)$$

Kde η je dynamická viskozita a $\frac{dv}{dy}$ představuje rychlost smykové deformace.

Ve výpočtech se také často uvádí kinematická (statická) viskozita vyjádřená výrazem

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2.2)$$

kde ν - kinematická viskozita, η - dynamická viskozita a ρ – hustota.

Tyto vzorce jsou ale platné pouze pro newtonovské kapaliny, které nejsou závislé na rychlosti deformace. Magnetoreologický jev kterým se tato práce zabývá je ale vytvořen neneutronovskou kapalinou.

Tyto kapaliny nelze jednoduše popsat, každý typ má svojí závislosti, dále popsané v kapitole níže. Několik příkladů známých látek a jejich hodnot dynamických viskozit jsem pro jednodušší představu uvedl v tabulce 2.1.

Tab. 2.1 Příkladné hodnoty viskozit [18,19].

Látka	Viskozita [mPa·s]
Benzín	0,53
Voda	1
Krev	10
Kukuřičný olej	50 až 100
Olej olivový [1]	84
Javorový sirup	150 až 200
Olej ricínový	987
Glycerol	1480
Med	2,000 až 3,000
Heinz kečup nebo francouzská hořčice	50 000 až 70 000
Burákové máslo	150 000 až 250 000

2.2. Viskozita Newtonovských kapalin

Kapaliny můžeme dle jejich viskozity rozdělit na newtonovské a neneutronovské. Newtonovské kapaliny jsou kapaliny s podobnými vlastnostmi jako voda, těmito kapalinami se zabýval Issac Newton a platí na ně zákony viskozity, jejich viskozita závisí pouze na složení tekutiny, tlaku a teplotě.

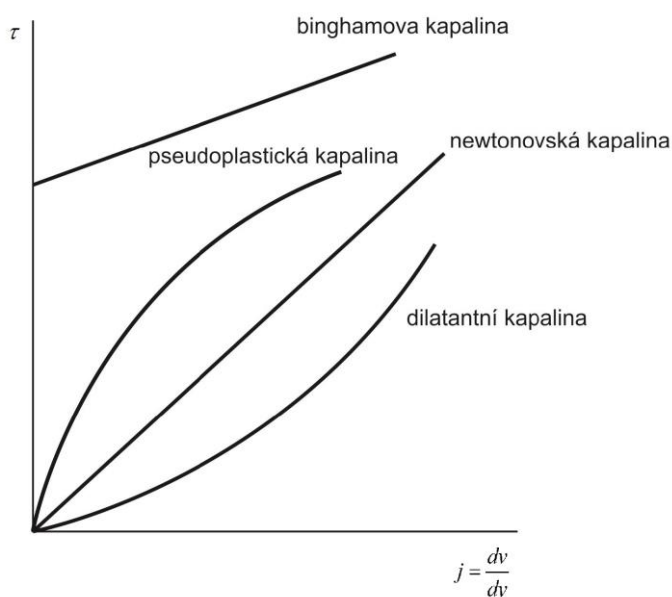
Neneutronovské kapaliny také vykazují vlastnosti kapalin, ale jenom za určitých podmínek. Hlavní rozdíl je v tom, že vykazují pouze zdánlivou viskozitu, která je závislá na gradientu rychlosti. Podle toho, jak se viskozita mění s rychlostí, lze určit typ neneutronovské kapaliny. Typ závisí na tom, zdali se viskozita od určitého momentu s rychlostí snižuje nebo zvyšuje. Pokud se snižuje, může se jednat o dilatantní kapalinu, ta při zvyšování gradientu rychlosti stále více zvyšuje svojí viskozitu, nebo binghamovu – ideálně plastickou kapalinu. Binghamova kapalina se od určité rychlostní deformace začne chovat jako newtonovská. Pokud se viskozita s deformací zvyšuje, jedná se o pseudoplastickou kapalinu.

Dilatantní kapaliny jsou různé koloidní směsi, mezi pseudoplastické kapaliny se řadí různé roztoky a taveniny polymerů a do binghamových kapalin zařadíme třeba zubní pastu, nebo suspenze vápna, křídly a řadí se sem za určitých podmínek i MR kapaliny. [20]

Pro neneutronovské kapaliny platí vztah:

$$\tau = \eta \cdot D \quad (2.3)$$

Kde η není dynamická viskozita, ale viskozita zdánlivá, a závisí na rychlosti deformace nebo na tečném napětí, D označuje funkci, jejíž průběh určí typ kapaliny (Obr. 2.1).



Obr 2.1 Tokové křivky kapalin.

2.3. Závislost viskozity na teplotě

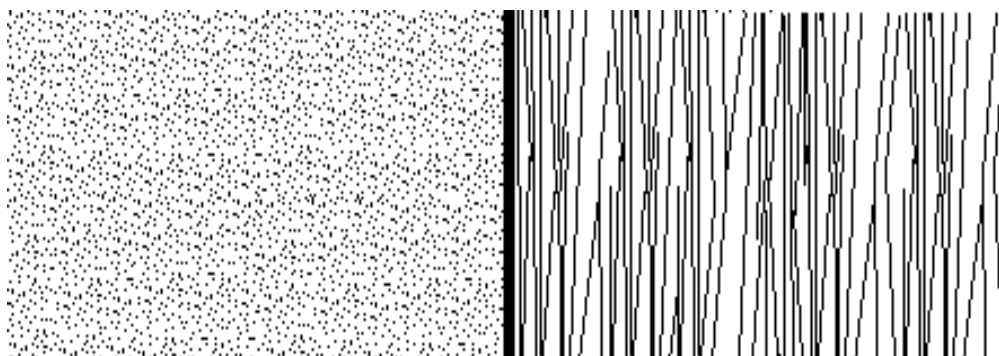
Kmitavý pohyb molekul, který nejvíce ovlivňuje viskozitu kapalin a plynů, je omezen teplotou a mezimolekulárními silami. Kapaliny se liší od plynů právě vyššími mezimolekulárními silami, neboť v plynech jsou téměř zanedbatelné. Pokud u kapaliny zvýšíme teplotu, zvýší se kmitavý pohyb, avšak zmenší se mezimolekulární síly. Viskozita u kapalin tedy s teplotou klesá. U plynů je tomu právě naopak. Plyny nemají výrazné mezimolekulární síly a jejich viskozita je tedy ovlivňována pouze kmitavým pohybem molekul, s teplotou pak viskozita plynů stoupá. [17]

U MR kapalin tomu tedy bude obdobně, jen díky tomu, že nosná kapalina je olej, bude směs v nižších teplotách mnohem hutnější než u obyčejných newtonovských kapalin.

2.4. Magnetoviskózní jev

Magnetoviskózní jev je výsadou magnetoreologických kapalin. Ferokapaliny tento jev mají také, hlavně díky částicím od průměru 10 nm, kterých je v těchto kapalinách velmi málo[21]. U feromagnetických kapalin je tento jev ale tak slabý, že pro aplikace pro které se kapalina používá, je nepodstatný. Magnetoviskózní jev je nejdůležitější vlastnost MR kapalin a je i okem viditelný. Pokud je magnetoreologická kapalina, která disponuje velkou koncentrací mikročástic, vystavena magnetickému poli, mění svoji viskozitu. Tento jev vzniká pomocí pevných částic, které jsou jindy neuspořádané v prostoru, a při aplikaci magnetického pole se seskupují ve směru siločar (Obr. 2.2) a poté nejvíce působí proti síle kolmé na tyto siločáry. Pokud je magnetické pole dostatečně intenzivní, mění kapalina svoje skupenství na pevné.

Na trhu existuje několik společností zabývajících se výrobou MR kapalin. Každý výrobce uvádí několik druhů kapalin, které se většinou od sebe mění poměrem pevných částic, což má za následek rozdílnou viskozitu, ta se podle údajů výrobce pohybuje od 20 do 3000 mPas. Čím větší poměr částic, tím větší viskozity je možné dosáhnout, zvětšením tohoto poměru se ale zvětšuje i viskozita kapaliny, když na ní nepůsobí žádné externí magnetické pole, což je pro některé využití nežádoucí, protože kapalina tlumí i bez buzení.

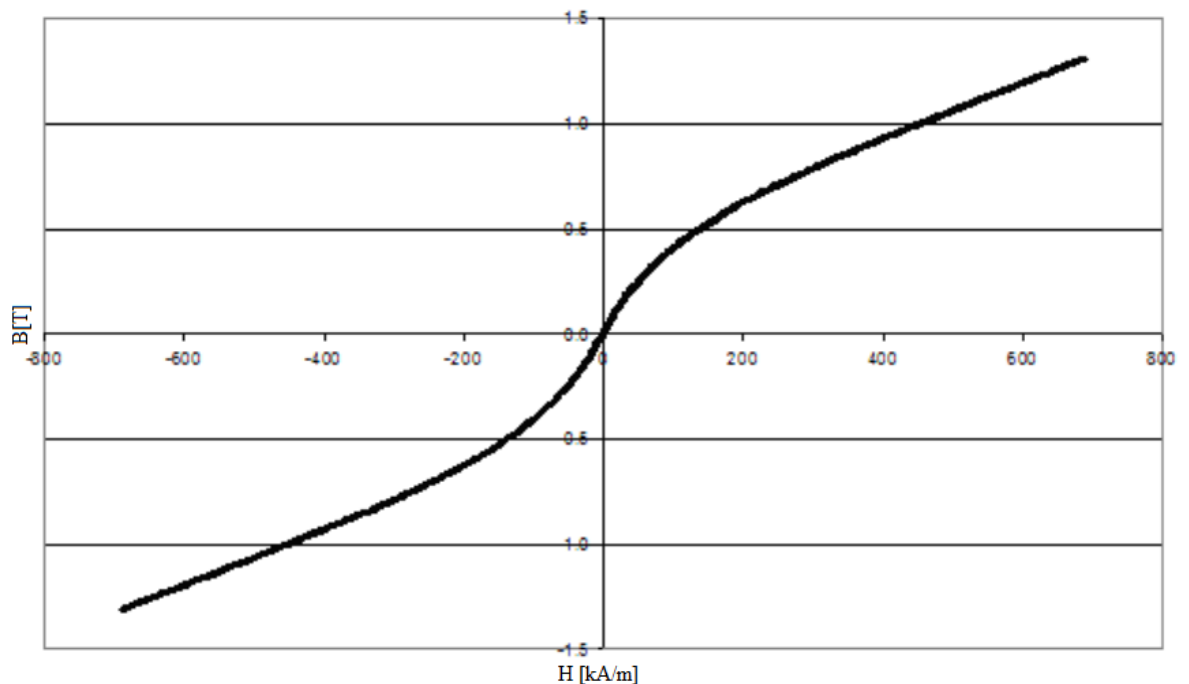


Obr. 2.2 Seskupení částic bez působení a při působení magnetického pole.

Všichni výrobci se shodují v tom, že MR kapaliny mají velmi rychlou dobu odezvy a uvádí ji menší než 1 ms. Příklad výčtu vlastností MR kapaliny MRF-122EG od jednoho z největších výrobců[22]:

Vzhled:	Tmavě šedá kapalina
Viskozita, Pa·s @ 40°C (104°F)	0,042 ± 0,020
hustota	
g/cm ³	2,28-2,48
Poměr pevných částic dle váhy	% 72
Teplota vzplanutí	°C (°F) >150 (>302)
Provozní teplota	°C (°F) -40 to +130 (-40 to +266)

Závislost B na H (Obr. 2.3), neboli magnetizační křivku mají MR podobnou jako většina feromagnetických materiálů, nasycení použité MR kapaliny se pohybuje okolo 1,3 T, tato hodnota se ale může různit dle použité kapaliny. Pro všechny MR kapaliny také platí, že po dosažení určité magnetické indukce již svoji viskozitu nemění, tento stav nasycení se může dle druhů kapalin pohybovat od desítek mT do jednotek T [23].



Obr. 2.3 Magnetizační křivka MR kapaliny [převzato z 22].

3. EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ MAGNETO-VISKÓZNÍCH A TEPLTNĚ-VISKÓZNÍCH VLASTNOSTÍ MAGNETICKÝCH KAPALIN

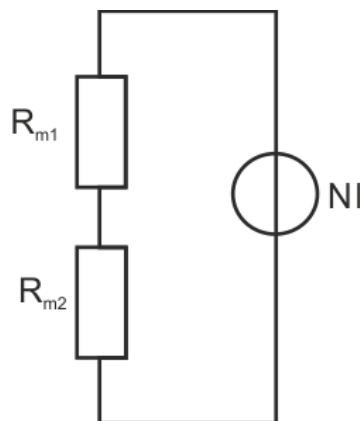
3.1. Návrh magnetického obvodu pro měření

Pro změření závislosti viskozity na magnetickém toku bylo nutné sestavit magnetický obvod. Stejnoseměrné buzení cívky umožňuje jednodušší stavbu magnetického jádra. Oproti střídavému buzení jej není potřeba stavět z jednotlivých elektricky oddělených plechů kvůli ztrátám vířivými proudy.

Pro stav, kdy dostupná kapalina již nebude se zvyšujícím polem měnit svoji viskozitu, je dle [24] potřeba dosáhnout alespoň hodnoty 50 mT. Návrh magnetického obvodu bude vycházet z následující rovnice:

$$\Phi_c R_m = N_c I \quad (3.1)$$

Magnetický obvod obsahuje cívku buzenou stejnosměrným napětím, feritové jádro a vzduchovou mezeru.

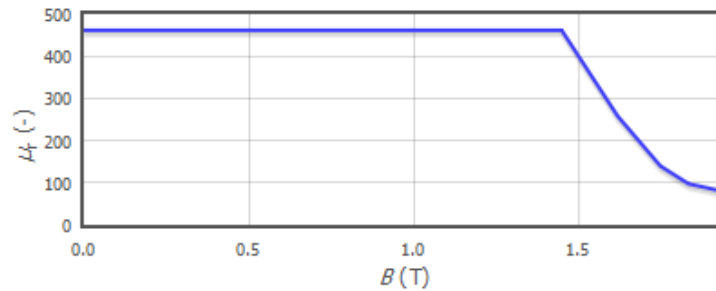


Obr. 3.1 Náhradní magnetický obvod.

Návrh feritového jádra zohledňuje potřebu velké vzduchové mezery, která vzhledem k nádobě ve které se kapaliny měří, musí být alespoň 65 mm. Na vytvoření magnetické

indukce 50 mT v takové mezeře bude potřeba cívka, a magnetický obvod. Návrh tohoto systému popisují následující rovnice a obrázek 3.1.

Magnetický obvod je vytvořen z elektricky oddělených plátů konstrukční oceli 11373. Pro pracovní bod $B = 50 \text{ mT}$ je podle tabulkových hodnot Agrosu2D relativní permeabilita tohoto materiálu $\mu_r = 461$ (Obr. 3.2).



Obr. 3.2 Závislost permeability na indukci u oceli CSN 11373 [převzato z 25].

Magnetická reluktance vzduchové mezery je snížena o relativní permeabilitu magnetické kapaliny, jedna z použitých ferokapalin je EFH1 a ta má podle [26] relativní permeabilitu $\mu_r = 2,7$, kapalina však nezalévá celou mezeru, pro výpočty je tedy tato hodnota poměrově snížena na $\mu_r = 2$. Pomocí následujícího postupu bylo spočítáno, kolik bylo potřeba závitů při navržené geometrii. R_{m1} označuje magnetickou reluktanci vzduchové mezery, R_{m2} magnetickou reluktanci feromagnetického materiálu, S je průřez ocelovým jádrem, l_1 je délka střední indukční čáry bez vzduchové mezery a l_2 je délka vzduchové mezery.

$$R_{m1} = \frac{l_1}{\mu_0 \mu_{RM} S} \quad (3.2)$$

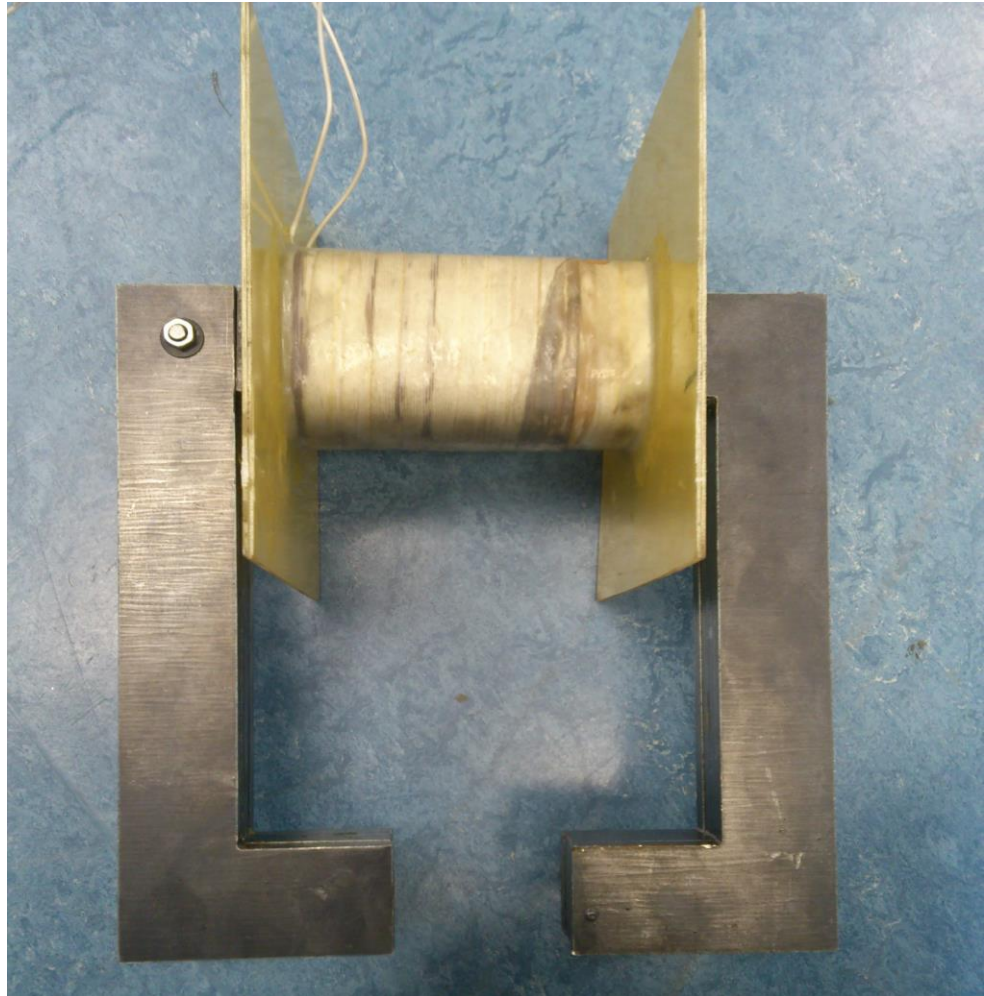
$$R_{m2} = \frac{l_2}{\mu_0 \mu_r S} \quad (3.3)$$

$$R_m = R_{m1} + R_{m2} = \frac{0.065}{4 \times \pi \times 10^{-7} \times 2 \times 0.0016} + \frac{0.775}{4\pi 10^{-7} \times 461 \times 0.0016} = 16247786 \text{ H}^{-1} \quad (3.4)$$

$$BSR_m = N_c I = 0.05 \times 0.0016 \times 16247786 = 1300 \text{ Az} \quad (3.5)$$

Po dosažení hodnot vychází potřeba ampér závitů na 1300, cívka byla tedy navržena

na 1000 závitů s průměrem 1 mm, tento průměr vydrží dlouhodobě $I = 2 \text{ A}$ a chvilkové zatížení $I = 4 \text{ A}$. Chvilkově je tedy možné získat až 4000 ampérvávitů. Na obrázku 3.3 je zobrazený vyrobený magnetický obvod s cívkou.

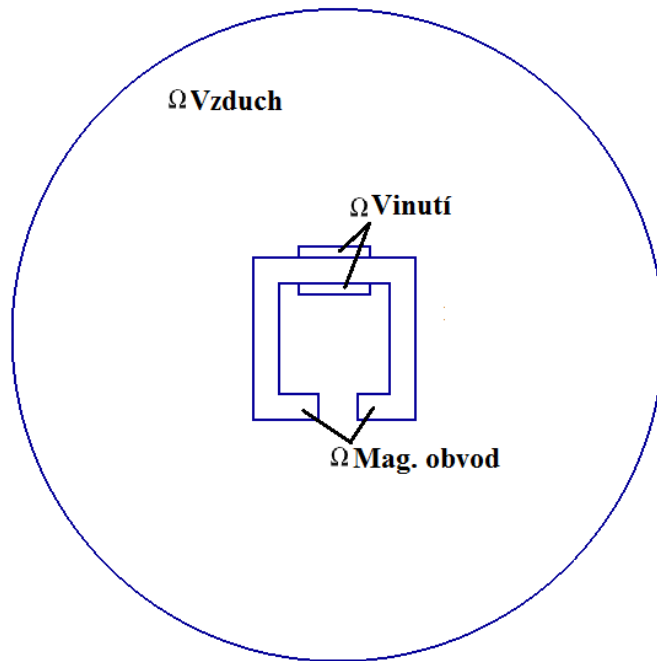


Obr. 3.3. Navržený a vyrobený magnetický obvod.

3.2. Ověření návrhu simulací v Agros2D

Pro ověření správnosti výpočtu poslouží simulace v Agros2D. Pro simulaci je použito magnetické pole ve 2D v kartézském souřadnicovém systému. Definiční oblast má kruhový tvar a je ohraničena Dirichletovou okrajovou podmínkou $A_r = 0 \text{ Wb} \cdot \text{m}^{-1}$ vyjadřující, že je na okraji známá hodnota magnetického potenciálu (tato kružnice představuje siločáru magnetického pole v dostatečné vzdálenosti od magnetického obvodu). Jak je vidět na obrázku 3.4, obsah definiční oblasti je vyplněn vzduchem s magnetickou reluktancí μ_0 , ocelové jádro má magnetická reluktance určenou tabulkou přímo ze softwaru, která pro daný

pracovní bod $P = 50$ mT uvádí hodnotu 461 a pro měděné vinutí je relativní permitivita $\mu_r = 1$.



Obr. 3.4 Navržená definiční oblast pro preprocesor.

Software simuluje pomocí metody konečných prvků, místo závitů je tedy v simulaci použitý průřez cívky a proudová hustota. Pro podoblasti vinutí platí první Maxwellova rovnice, která po dosazení vektorového magnetického potenciálu vypadá v diferenciálním tvaru po úpravě následovně:

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu}\operatorname{rot}\mathbf{A}\right)=\mathbf{J}_{\text{ext}} \quad (3.6)$$

V ostatních podoblastech je proudová hustota rovna nule, tedy:

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu}\operatorname{rot}\mathbf{A}\right)=0 \quad (3.7)$$

Proudová hustota označuje hodnotu ampérů na m^2 . Cívka je zkonstruovaná z drátu s průměrem $d = 1$ mm, a pro tento průřez je maximální proud $I = 2$ A. Vypočtením získáme hodnotu $J_{\text{ext}} = 200\,000 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$, je zde však nutné brát v úvahu kvůli kulatému průřezu drátu v cívce činitel plnění, který se získá následovně:

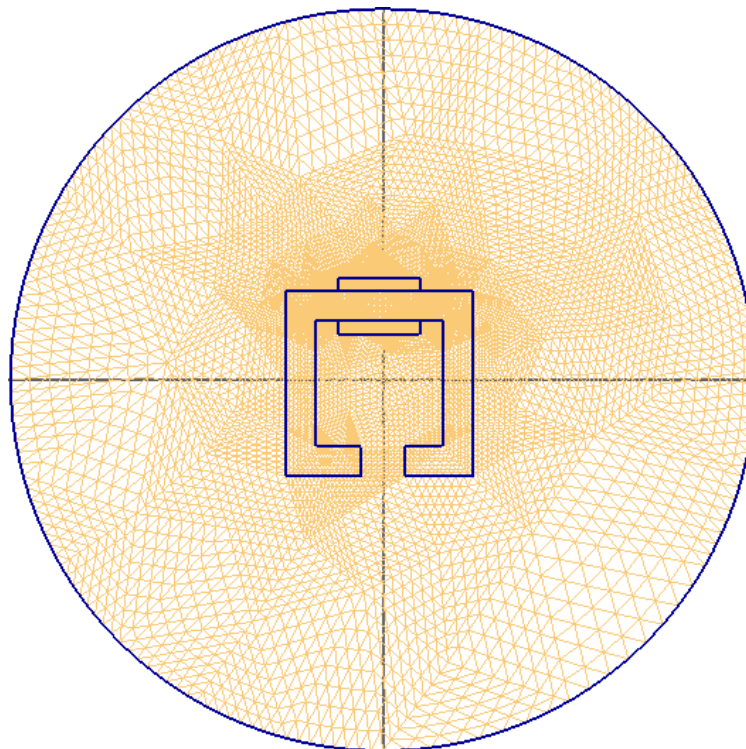
$$S_c = d^2 \quad (3.8)$$

$$S_d = d^2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{4} \quad (3.9)$$

$$\frac{S_c}{S_d} = \frac{\pi}{4} = 0.79 \quad (3.10)$$

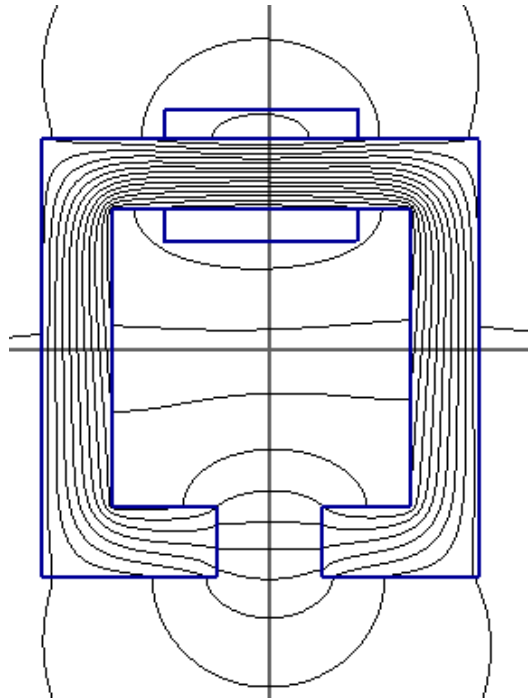
Kde S_c je celkový obsah kolem jednoho vodiče, S_d je obsah vodiče, d je průřez drátu a $\frac{S_c}{S_d}$ je poměr drátu a prázdného místa.

V cívce jsou použité měděné lakované dráty, činitel plnění tedy je reálně o něco nižší kvůli malé vrstvě laku. Pokud by cívka byla namotaná ručně a ne specializovanou firmou, mohla by se tato hodnota pohybovat kolem $k = 0.5$, v ruce není možné vyvinout takovou sílu jako strojem, ten naopak díky své síle a tvárnosti mědi může způsobit nepatrnou změnu tvaru kulatiny. Pro simulaci byla tedy zvolena hodnota $k = 0.7$, výsledná proudová hustota cívky pro simulaci je tedy $J_{\text{ext}} = 140\,000 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$. Tato hodnota byla nastavena pro jednu stranu budícího vinutí a pro druhou stranu vinutí byla nastavena záporná hodnota o stejné velikosti počítající s opačným směrem buzení. Výstup simulace zobrazuje síť (Obr. 3.5) o 9413 uzlech a 17792 elementech. Jako dostačující a rychlý byl zvolen stupeň polynomu 2.

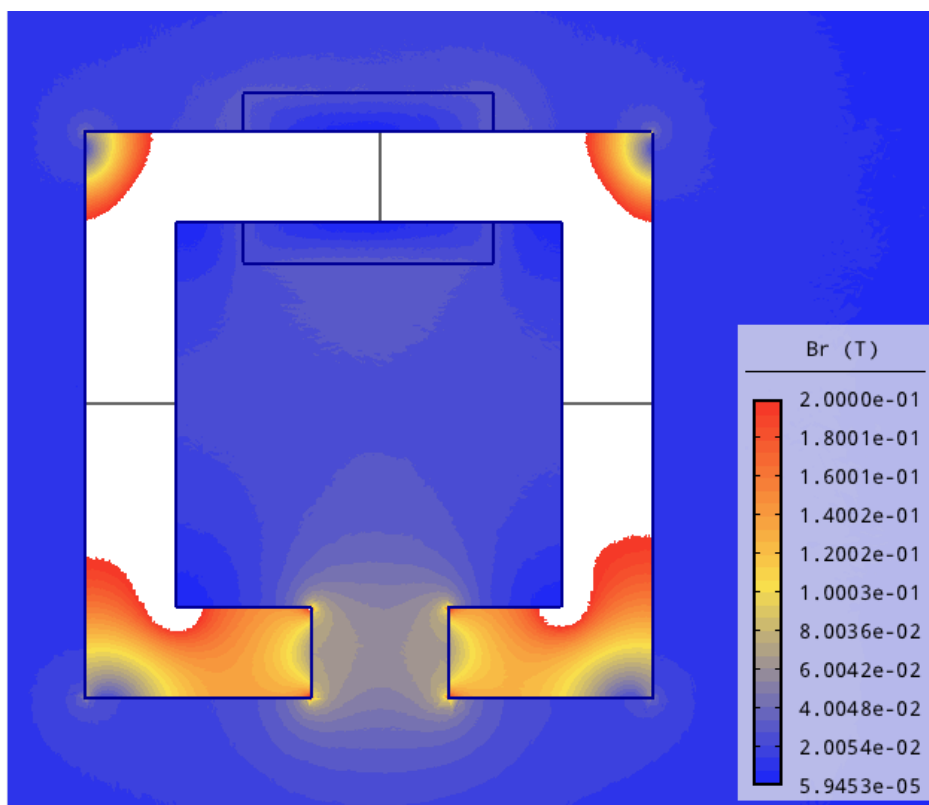


Obr. 3.5 Definiční oblast a síť.

V důsledku velké vzduchové mezery se celý magnetický tok dle předpokladů neuzavírá přímo přes vzduchovou mezeru, ale jak je na obr. 3.6 patrné, tak zde hrají velkou roli rozptylové toky.



Obr 3.6 Simulace magnetických siločar.



Obr. 3.7 Rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře pomocí Agros2D.

Problém byl simulován ve 2D a třetí rozměr je v softwaru uvažován $z = 1$ m, pro vizualizaci potřebného rozložení magnetické indukce (Obr 3.7) však bude tato chyba zanedbatelná, neboť magnetická indukce není na obsahu magnetického obvodu závislá. Z obrázku je zřejmé, že v kapalině nebude viskozita všude stejná kvůli nerovnoměrnému rozložení magnetické indukce.

Pro porovnání simulace a reálných hodnot jsou v příloze C uvedeny grafy ze simulace a reálně naměřené hodnoty. Po srovnání vychází některé hodnoty přesné a některé s odchylkou 20%, na vině může být špatná pozice sondy teslametru nebo odchylka mezi reálnými hodnotami magnetického obvodu či buzení od vypočítaných.

3.3. Ověření správnosti teoretických návrhů

Pro ověření hodnot byla ve vzduchové mezeře zkonstruovaného magnetického obvodu změřena hodnota magnetické indukce na 15 pozicích. Změřené hodnoty jsou uvedené v příloze C (tab. 4.1). Pro co nejlepší vyhlazení grafů byl stupeň polynomu v Agros2D zvýšen na 3. Tabulka je brána jako pohled shora na vzduchovou mezeru a zvýrazněné okraje tabulky symbolizují konce magnetického obvodu. Po porovnání je vidět, že se hodnoty uprostřed shodují a hodnoty na okrajích mají zhruba 20% odchylku, což může být způsobeno chybou měřící sondy, nebo nepřesně určenými reálnými hodnotami buzení či magnetického odporu.

Změřena byla i magnetická indukce v kapalině při buzení cívky $I = 2$ A, při této hodnotě se uprostřed kapaliny vyskytovalo $B = 100$ mT.

3.4. Měření vlastností magnetoreologických kapalin

Měřicí soustava se skládá z magnetického obvodu (obr. 3.3), proudového zdroje do $I = 5$ A, viskozimetru, odporového ohříváče, zmrazovacího spreje a skleněné nádoby na měřený přípravek. Samotné měření probíhalo od nulových hodnot na proudovém zdroji vzestupně a pro tepelnou závislost byl měřený přípravek nejdříve zmražen a poté postupně ohříván na odporovém ohříváči. Aby nedošlo ke zkratování magnetického obvodu, nebylo možné odporový ohříváč umístit pod měřenou oblast, ale každá teplota byla navozena mimo tuto zónu. V průběhu měření bylo také vyzkoušeno, zdali je viskozita při nulovém buzení stejná, jako když je přípravek mimo vzduchovou mezeru, pro zjištění magnetické remanence, žádnou změnu ale viskozimetr nezaznamenal. Po vložení přípravku a nastavení viskozimetru byla postupně zvětšována velikost budícího proudu a vždy po změně bylo potřeba počkat několik

desítek sekund, než se hodnota na viskozimetru ustálila. Pro měření byly k dispozici 4 magnetické kapaliny. Dvě feromagnetické a dvě magnetoreologické, jedna z MR kapalin byla na první pohled dlouho nevyužitá a její částičky se usadily ve spodní části nádoby, pro experiment byla rozmíchána, její koloidní stabilita je ale sporná.

První měřená magnetoreologická kapalina je starší a nese označení MRHCCS4-B. 5z důvodů výrobního tajemství není uvedeno, o jaký olej se jedná a uvádí pouze uhlovodík. Jednotlivá měření jsou provedena na rozsazích od -5 do 75 °C a na hodnotách $I = 0$ až 2 A na buzení cívky. Vyskytujeme se v převážně lineární části magnetizační křivky kapaliny, $I = 2$ A na proudovém zdroji odpovídají $0,1$ mT ve vzduchové mezeře a můžeme tedy považovat přepočtení $0,1$ A = 5 mT. Požadovaná viskozita je měřena rotačním viskozimetrem s přesností $4,5$ %. V zájmu přesnosti bylo měření provedeno do hodnot 45 Pa·s, při vyšších hodnotách kapalina tvořila při sebemenším záchvěvu sondy vzduchové bubliny a nebyla by tedy k měření využita celá plocha. Zároveň měření neproběhlo pro hodnoty proudu vyšších než 2 A, kvůli přílišnému ohřívání cívky.

Následující tabulka (3.1) zobrazuje závislost viskozity magnetoreologické kapaliny na teplotě a magnetickém toku.

Tab. 3.1 závislost viskozity na magnetickém toku a teplotě u starší kapaliny, ν [mPa·s].

		Teplota [°C]							
		-5	15	25	35	45	55	65	75
B [mT]	0	3000	2800	2600	2500	2400	2200	2200	2080
	10	7800	6270	4300	3830	3700	5300	5260	4300
	20	13600	11000	9700	8140	7220	8000	7630	6500
	30	23400	15600	14600	13900	12800	11400	10500	9000
	40	27000	23400	21600	19600	16900	14800	13900	12800
	50	36500	32300	27400	25900	22000	21000	17000	14800
	60	43300	40200	35000	30000	28000	26000	23400	19800
	70		45900	36700	34400	30000	27300	25200	22000
	80			43400	41200	33100	32900	31000	24000
	90			44800	45300	37400	35600	32300	27000
	100					39900	38700	35400	31200

Z barevného formátování tabulek je dobře vidět, že nosnou kapalinou je olej, neboť i při nulových hodnotách magnetické indukce se s teplotou viskozita mění velice zdatně.

Tabulka (3.2) uvádí hodnoty z měření stejného druhu magnetoreologické kapaliny, ale novější. Kapalina byla na první pohled více homogenní a hustší. Kvůli rychlejšímu MR jevu bylo potřeba zjemnit kroky proudové řady. Z porovnání hodnot magnetické indukce obou

tabulek je patrné, že magnetické kapaliny časem výrazně degradují, neboť při podobných teplotách je pro stejnou viskozitu potřeba u starší kapaliny zhruba dvakrát větší magnetický tok.

Tab. 3.2 závislost viskozity na magnetickém toku a teplotě u koloidní směsi, ν [mPa·s].

		Teplota [°C]							
		-20	-10	0	10	20	30	40	50
B [mT]	0	13570	8800	6500	4400	3800	3500	3300	3100
	5	16800	13000	9900	6800	6700	6300	6000	5700
	10	22900	17800	15500	10000	8600	7600	7300	7100
	15	27200	22600	17700	13400	10300	9800	9500	9000
	20	35600	26800	20200	15600	12000	11700	11600	11500
	25	42000	34900	24300	19600	14700	14800	14800	14600
	30		39600	28600	24500	19700	19200	18800	18600
	35		43400	32400	28500	24000	22600	22400	22300
	40			37800	33800	28200	27700	27500	27400
	45			44600	38900	34400	31400	31100	32700
	50				43600	38700	37600	36500	35100
	55					44300	43800	43400	42200
	60						48600	46100	43400



Obr. 3.8 Měření hodnot pod nulou.

3.5. Měření vlastností feromagnetických kapalin

Feromagnetické kapaliny mají velmi malou viskozitu a také velmi slabý magnetoviskózní jev. Pro další dvě měření byly použity Ferokapaliny nesoucí označení fero EFH1 3-200002 a WHJS1-B. Podle výrobce se viskozita těchto kapalin pohybuje pod $6 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, její saturace nastává při 44 mT a použitá nosná kapalina této koloidní směsi je lehký olej.

Olej obecně a dle předchozích experimentů s klesající teplotou tuhne, tedy pro navození co největších hodnot viskozity bylo potřeba kapalinu co nejvíce ochladit. Pro $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ a magnetickou indukci 200 mT byla i přesto kapalina příliš tekutá na to, aby se dostala do citlivosti viskozimetru (Obr. 3.9), který uvádí minimální hodnotu dynamické viskozity měřeného přípravku $66 \text{ mPa}\cdot\text{s}$. Magnetoviskózní jev nebylo možné sledovat okem, ani přístroji, jeho hodnota je nižší než $66 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, což odpovídá hodnotě uvedené výrobcem ($<6 \text{ mPa}\cdot\text{s}$).



Obr. 3.9 Viskozimetr.

3.6. Odchytky měření

Na měření a jeho přesnost má v tomto případě vliv několik faktorů:

Rychlé změny teplot a její nepravidelné rozložení: Při velmi nízkých (obr. 3.8) a vysokých teplotách docházelo kvůli dlouhému časovému intervalu jednotlivých měření k velkému rozpětí teplot pro jednotlivá měření, několikrát bylo nutné kapalinu znovu chladit nebo znovu ohřívat, když dosáhla hodnoty rozdílné o 3 °C, než byla hodnota požadovaná. Kapalina byla ohřívána i ochlazována z jedné strany nádoby, v tomto případě bylo také důležité, v jaké vzdálenosti od této strany se nacházel viskozimetr a jak dobře byla kapalina vzápětí rozmíchána.

Nerovnoměrné rozložení magnetické indukce: Na simulaci rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře (obr. 3.7) ověřené teslametrem je zřejmé, že to bude stejné i u kapaliny. Měření bylo tedy provedeno vždy se sondou uprostřed nádoby a nádoba byla uprostřed vzduchové mezery, aby byl vliv této chyby co nejmenší (Obr. 3.10).

Anizotropní vliv siločar: Částičky kapaliny se seskupují dle směru siločar a brání v pohybu kolmém na tyto siločáry a jakékoliv natočení sondy mohlo mít vliv na přesnost výsledku. Pro minimalizaci této chyby byl použit stojan.



Obr. 3.10. Magnetický obvod s kapalinou a viskozimetrem.

3.7. Použité pomůcky

Stejnoseměrný zdroj: STATRON 2225.9, inventární číslo 500532.002

Teslametr: ELIMAG MP-1, inventární číslo 500665

Viskozimetr: Hispania S.L. VP1020, inventární číslo 203159

Stojan na viskozimetr, inventární číslo 203202.

Odporový ohříváč: SENCOR SCP 1501

Zmrazovací sprej: Metaflux 79-08

Digitální teploměr: Exatherm 637001054040

ZÁVĚR

V současné době je na trhu dostupná celá škála různých typů magnetických kapalin pro různá využití, od techniky po lékařství. Magnetoreologické kapaliny vynikající magnetoviskózním jevem představují přímý elektromechanický převodník, což je činí ideální pro použití v říditelných brzdách, tlumičích a ucpávkách. Viskozita současných MR kapalin se bez pole pohybuje od 20 mP·as a její nasycení lze dosáhnout pomocí hodnot kolem 0,2 T.

S využitím teorie magnetických obvodů a Agros2D byl navržen přípravek pro proměření magnetoviskózních vlastností. Pak byl na základě návrhu zkonstruován a proveden experiment.

Výsledkem experimentu jsou komplexní teplotně-viskózně-magnetické vlastnosti kapalin v rozsahu od 0 do 0.1 T a od -20 do 70 °C, uvedené v příloze práce.

Získané teplotně-viskózně-magnetické hodnoty lze využít při simulacích jevů v MR kapalinách a pro návrh zařízení využívajících kapalinu.

Během měření dvou stejných typů kapalin ale jinak starých a udržovaných se ukázalo jak u MR projevuje časová degradace a sedimentace

U ferokapalin se viskozita i přes velmi nízké teploty (-20 °C) a vysoký magnetický tok (0.2 T) pohybovala pod citlivostí měřicího přístroje (60 mP·as), čemu odpovídá hodnota uvedená výrobcem (<6 mP·as) a potvrzuje to tvrzení, že u ferokapalin je tento jev při jejich použití zanedbatelný.

POUŽITÁ LITERATURA

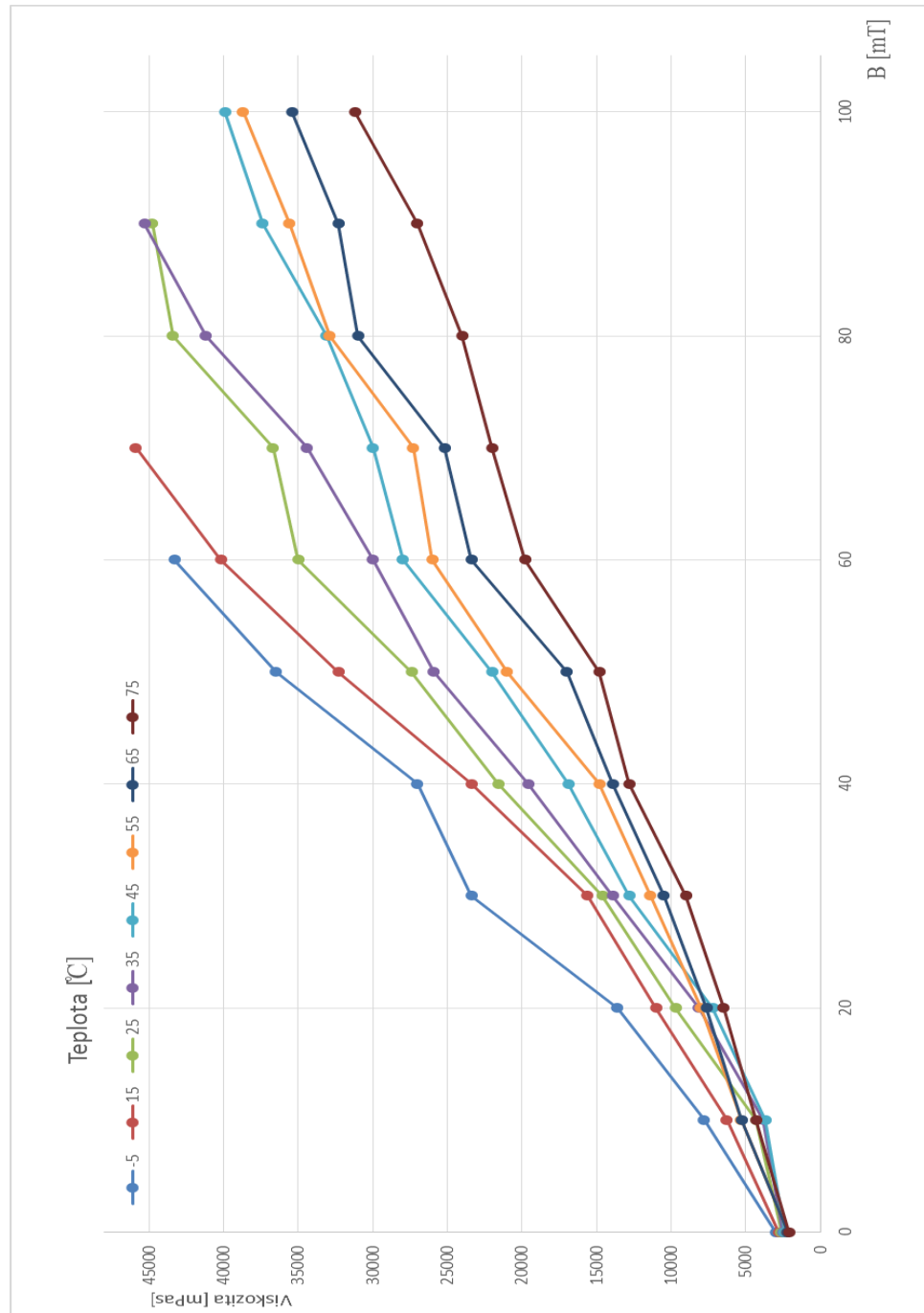
- [1] Ferrofluid [online]. [cit. 2014-04-03]. Dostupné z:
<http://education.mrsec.wisc.edu/background/ferrofluid/index.html>
- [2] TIMCO, M., ZENTKO, A., ZENTKOV, M., KONRACKÁ, M., KELLNEROVÁ, V. *Magnetorheological Properties of some Ferrofluids*, March 1994 str. 1117-1119. ISSN 0018-9464.
- [3] VEKÁS, L. *Ferrofluids and Magnetoreological Fluids*. Advances in Science and Technology. 2008, č. 54, s. 127-136. Dostupné z: www.scientific.net
- [4] MAYER, D. Magnetické kapaliny a jejich použití (1. Část). *Elektro*. 2007, roč. 17, č. 3, s. 78-79.
- [5] CHARLES, S., V. *The Preparation of Magnetic Fluids* [online]. [cit. 2014-04-20] Dostupné z: http://pages.csam.montclair.edu/~yecko/ferro/oldpapers/DIRECTORY_LNP594/Charles_Prep.pdf
- [6] POLCAR, P., Elektromechanický systém s magnetickou kapalinou. Plzeň, 2012. Dizertační práce. ZČU. Vedoucí práce Prof. Ing. Daniel Mayer, DrSc.
- [7] Amazing Magnetic Fluids [online]. [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/23aug_mrfluids/
- [8] Magnetické kapaliny a jejich uplatnění v tepelných systémech [online]. [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://3pol.cz/1140/print>
- [9] The Hypnotic Magnetism of Ferrofluids [online]. [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://twistedifter.com/2012/05/hypnotic-magnetism-of-ferrofluids/>
- [10] Ferrofluid Applications. [online]. [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://ferrofluid.ferrotec.com/applications/ferrofluid>
- [11] Artificial heart uses ferrofluid to pump blood [online]. [cit. 2014-05-04]. Dostupné z: <http://newscientist.com/blogs/nstv/2012/06/artificial-heart-uses-ferrofluid-to-pump-blood.html>
- [12] SCHREDER, C., FIGUIREDO, A. M., Ferrofluids: Properties and applications. *Brazilian Journal of Physics*, č 35, Zář 2005, s. 718-727.
- [13] MAYER, D. Magnetické kapaliny a jejich použití (2. Část - dokončení). *Elektro*. 2007, roč. 17, č. 4, s. 4-8.
- [14] RAJ, K., MOSKOWITZ, R., A Review of Damping Applications of Ferrofluids. *IEEE Transactions on Magnetics*, č. 16, Květen 1980, s. 358-363.

- [15] SPENCER, B., F., SYKE, S., J., SAIN, M., K., CARLSON, J., D.: Phenomenological Model of a Magnetorheological Damper. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 123(3), (1997), str. 230–238.
- [16] ROBERTSON, J., ELGER, D., WILLIAMS, B., CROWE, C., *Engineering Fluid Mechanics*. roč. 2014, s. 35-45. ISBN 978-1-118-31875-1.
- [17] NOSKIEVIČ, J. A KOL.: *Mechanika tekutin*. SNTL/ALFA Praha 1990
- [18] Viscosity Chart [online]. [cit. 2014-06-04]. Dostupné z: <http://www.research-equipment.com/viscosity%20chart.html>
- [19] Dynamická viskozita [online]. [cit. 2014-06-04]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/dynamicka-viskozita.htm>
- [20] CENGEL, Y., CIMBALA, J.: *Fluid Mechanics*. ISBN 978-1-259-01122-1.
- [21] ODENBACH, S.: *Magnetoviscous Effects in Ferrofluids*. ISBN 3-540-43068-7.
- [22] MRF-122EG Magneto-Rheological Fluid [online]. [cit. 2014-06-03]. Dostupné z: [http://www.lord.com/products-and-solutions/magneto-rheological-\(mr\)/product.xml/1644/2](http://www.lord.com/products-and-solutions/magneto-rheological-(mr)/product.xml/1644/2)
- [23] Design and fabricate a high torque magneto-reological fluid clutch [online]. [cit. 2014-06-04]. Dostupné z: http://library.utm.edu.my/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=5430&Itemid=208
- [24] Rheological characterization of complex fluids in electro-magnetic fields [online]. [cit. 2014-06-04]. Dostupné z: <http://researchgate.net>
- [25] KARBAN, P., MACH, F., KŮS, P., PÁNEK, D., DOLEŽEL, I.: *Numerical solution of coupled problems using code Agros2D*, Computing, 2013, Volume 95, Issue 1 Supplement, pp 381-408, DOI 10.1007/s00607-013-0294-4.
- [26] Realizace adaptivní optiky pro ferokapalinová deformovatelná zrcadla [online]. [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.observatory.cz/news/pump.php?pda=1&article=realizace-adaptivni-optiky-pro-ferokapalinova-deformovatelna-zrcadla>

Přílohy

Příloha A - Graf závislosti viskozity koloidně nestabilní MR kapaliny

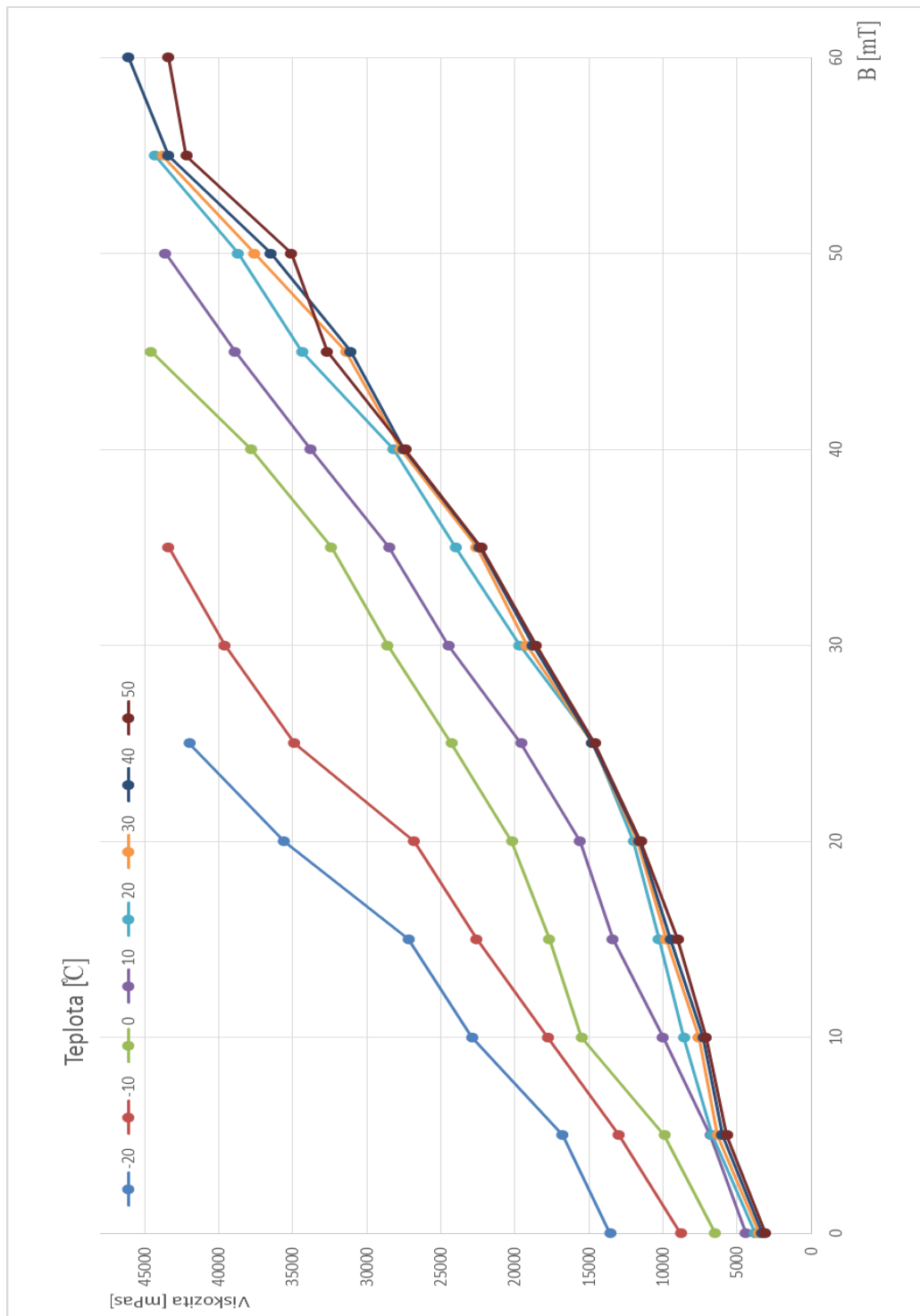
Graf odpovídá hodnotám z tabulky 3.2. Oproti nové kapalině je u této potřeba pro stejnou viskozitu značně větší hodnota magnetické indukce (Např. při 40 stupních a 20 mT je viskozita 7500 a u nové kapaliny je při stejných podmínkách viskozita 13 000).



Obr. 4.1 Teplotně-viskozni a magneto-viskozni závislost starší MR kapaliny.

Příloha B - Graf závislosti viskozity koloidně stabilní MR kapaliny

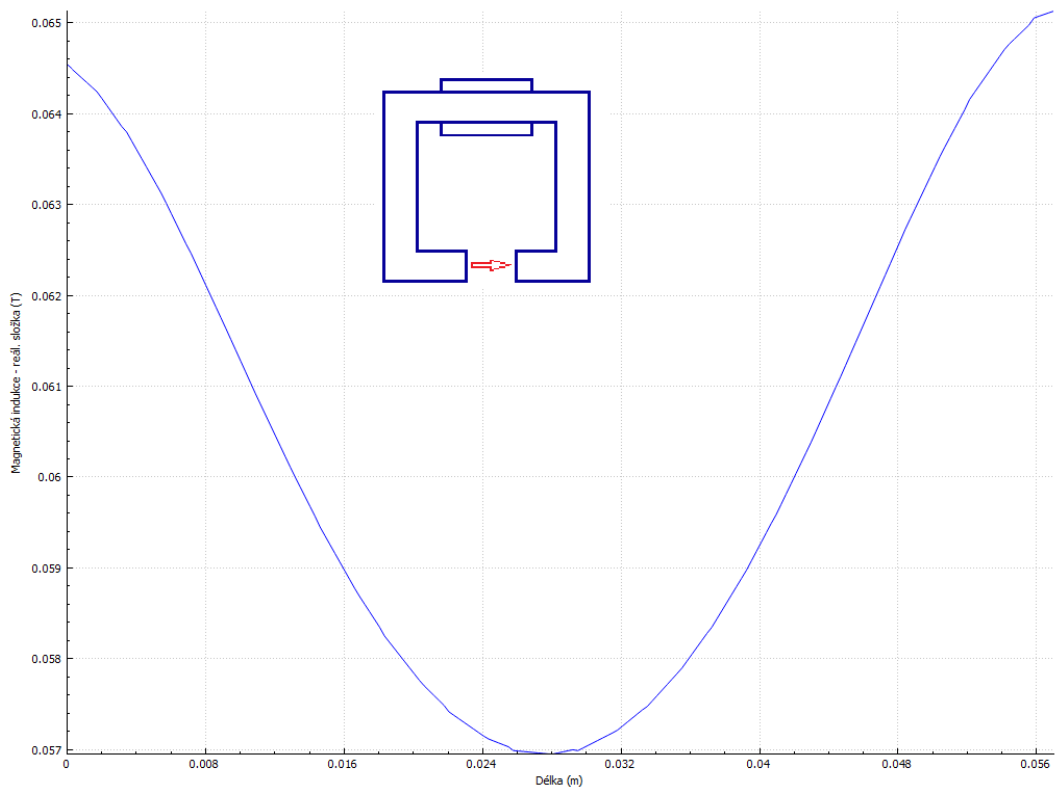
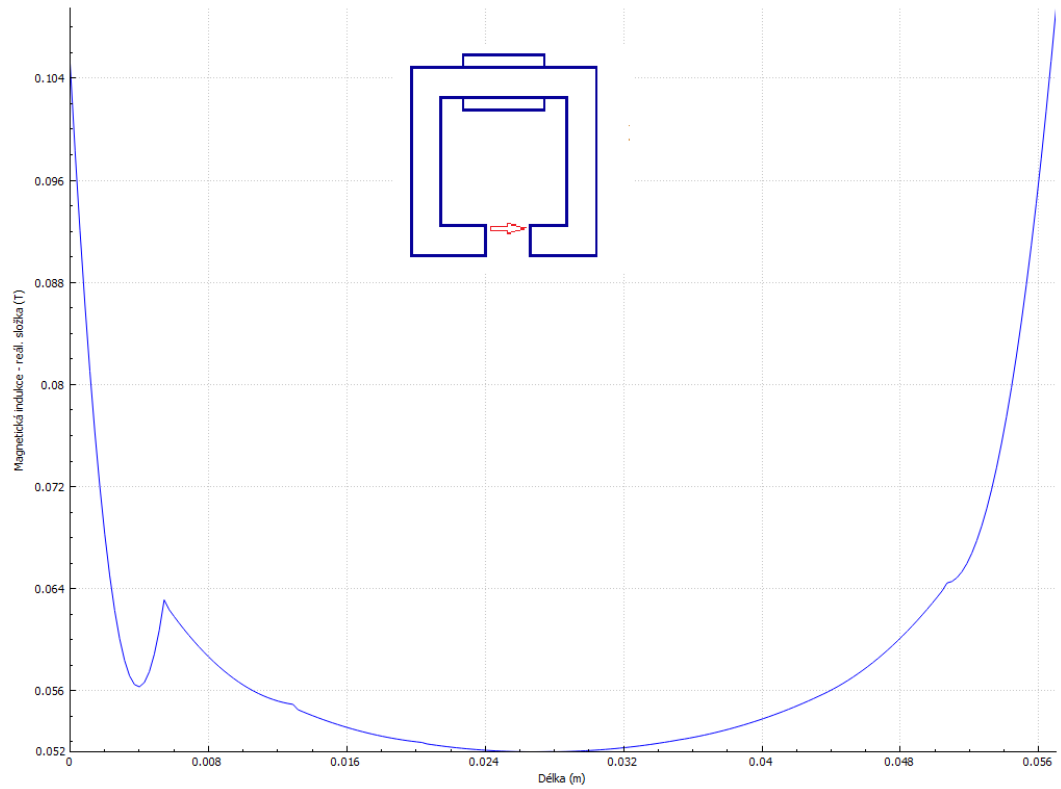
Graf v příloze B odpovídá tabulce 3.3, tedy stabilní MR kapalině. Oproti staré kapalině si při větších teplotách drží svoji závislost na magnetické indukci.



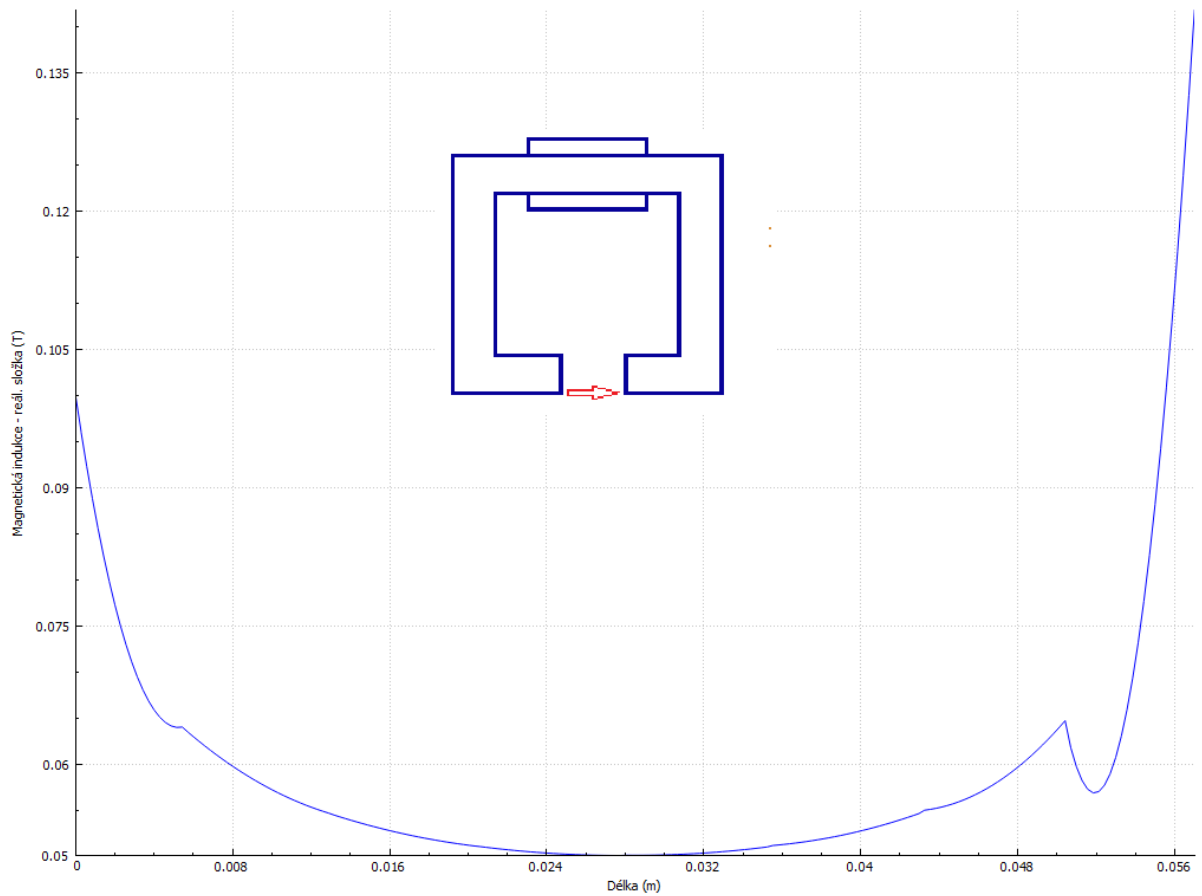
Obr. 4.2 Teplotně-viskozni a magneto-viskozni závislost MR kapaliny.

Příloha C - Ověření správnosti teoretických návrhů

V následujících grafech jsou průběhy magnetické indukce ve vzduchové mezeře, obrázky u nich zobrazují, ze kterého intervalu jsou zobrazeny.



Obr. 4.3 Průběhy magnetické indukce ve vybraných částech vzduchové mezery, výsledky simulace v Agros2D.



Obr. 4.4 Průběhy magnetické indukce ve vybrané části vzduchové mezery, výsledky simulace v Agros2D.

Tab 4.1 Hodnoty magnetické indukce ve vzduchové mezeře, v [mT]

52	44	49
94	50	96
70	47	68
86	45	89
53	41	45