

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Měření vybraných parametrů magnetických kapalin
v různých externích podmínkách**

Oldřich Řezníček

2014

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Oldřich ŘEZNÍČEK**
Osobní číslo: **E12N0123P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Měření vybraných parametrů magnetických kapalin v různých externích podmínkách**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Navrhněte způsob měření permeability, elektrické vodivosti a viskozity magnetických kapalin.
2. Tyto veličiny proměřte v zadaném teplotním pásmu a dále v externím magnetickém poli při různých hodnotách magnetické indukce.
3. Získané výsledky využijte pro modelování průtoku magnetické kapaliny trubičkou kruhového průřezu za daných vnějších podmínek.
4. Získané výsledky ověřte experimentálně.

Anotace

Předložená práce je zaměřena na magnetické kapaliny, zejména na měření jejich parametrů při proměnných teplotách. Magnetické kapaliny jsou přitom vystaveny magnetickému poli o různých hodnotách. Měřené parametry jsou relativní permeabilita, dynamická viskozita a elektrická vodivost.

Diplomová práce obsahuje čtyři části. První tři jsou zaměřeny na teoretický rozbor a praktická měření výše zmíněných parametrů magnetických kapalin. Čtvrtá část je zaměřena na simulaci průtoku magnetických kapalin trubičkou a její experimentální ověření.

Klíčová slova

Magnetická kapalina, ferokapalina, ferrofluid, magnetoreologická kapalina, relativní permeabilita, dynamická viskozita, elektrická vodivost.

Abstract

The presented work is focused on magnetic fluid, especially on the measurement of their parameters at variable temperatures. During the measurement, the magnetic fluid is exposed to a magnetic field of different values. The measured parameters are relative permeability, dynamic viscosity and electrical conductivity.

The thesis consists of four parts. The first three parts are focused on the theoretical analysis and practical measurement of the above mentioned parameters of magnetic fluids. The fourth part deals with the simulation of the flow of magnetic fluid in a tube and its experimental verification.

Key words

Magnetic liquid, ferrofluid, magnetorheological fluid, relative permeability, dynamic viscosity, electrical conductivity.

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou 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 diplomové práce je legální.

V Plzni dne 12.5.2014

Oldřich Řezníček

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Ivo Doleželovi CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

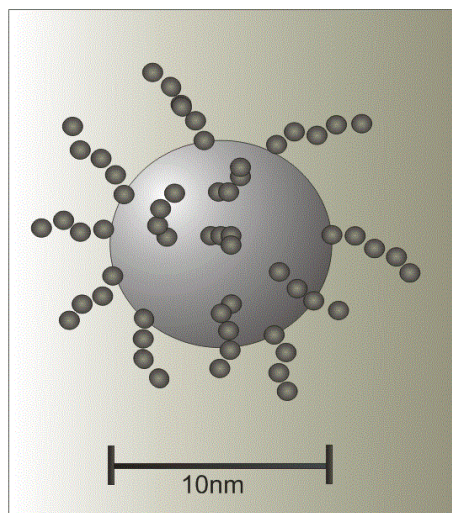
OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ	9
ÚVOD	10
1 VLASTNOSTI MAGNETICKÝCH KAPALIN	12
1.1 ROZDĚLENÍ MAGNETICKÝCH KAPALIN PODLE SLOŽENÍ	12
1.2 FEROKAPALINA EFH1 FERROTEC	13
1.3 MAGNETOREOLOGICKÁ KAPALINA MRHCCS4-B LIQUIDS RESEARCH	13
2 MĚŘENÍ PERMEABILITY KAPALIN	13
2.1 DEFINICE PERMEABILITY	14
2.2 ZPŮSOB MĚŘENÍ PERMEABILITY MAGNETICKÝCH KAPALIN	14
2.3 VLASTNÍ MĚŘENÍ PERMEABILITY MAGNETICKÝCH KAPALIN	16
2.3.1 <i>Ferokapalina EFH1</i>	16
2.3.2 <i>Magnetoreologická kapalina MRHCCS4-B</i>	19
3 MĚŘENÍ VIZKOZITY KAPALIN	23
3.1 DEFINICE VIZKOZITY	23
3.2 ROZDĚLENÍ KAPALIN Z HLEDISKA REOLOGIE	23
3.2.1 <i>Newtonské kapaliny</i>	24
3.2.2 <i>Nenewtonské kapaliny</i>	24
3.3 METODY MĚŘENÍ PARAMETRŮ NENEWTONSKÝCH KAPALIN	25
3.3.1 <i>Kapilární viskozimetry</i>	25
3.3.2 <i>Rotační viskozimetry</i>	27
3.4 VLASTNÍ MĚŘENÍ VIZKOZITY MAGNETICKÝCH KAPALIN	28
4 MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ VODIVOSTI KAPALIN	32
4.1 DEFINICE ELEKTRICKÉ VODIVOSTI	32
4.1.1 <i>Vedení elektrického proudu roztokem je umožněno:</i>	32
4.2 ZPŮSOBY MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ VODIVOSTI KAPALIN	33
4.2.1 <i>Kontaktní konduktometrie</i>	33
4.2.2 <i>Bezkontaktní konduktometrie</i>	34
4.3 VLASTNÍ MĚŘENÍ KONDUKTIVITY MAGNETICKÝCH KAPALIN	35
5 VÝPOČET PRŮTOKU TRUBIČKOU	36
5.1 ROVNICE POTŘEBNÉ K VÝPOČTU	36
5.2 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ PRŮTOKU MAGNETICKÉ KAPALINY TRUBIČKOU	37
5.3 VÝSLEDKY EXPERIMENTU	38
ZÁVĚR	41
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	43
PŘÍLOHY	45
PŘÍLOHA 1	45
PŘÍLOHA 2	46
PŘÍLOHA 3	47
PŘÍLOHA 4	48
PŘÍLOHA 5	49

Seznam symbolů

symbol	název veličiny	rozměr
B	magnetická indukce	[T]
E	intenzita elektrického pole	[V·m ⁻¹]
G	elektrická vodivost	[S]
H	intenzita magnetického pole	[A·m ⁻¹]
I	elektrický proud	[A]
J	proudová hustota	[A·m ⁻²]
K	konstanta konduktometru	[cm ⁻¹]
l	délka	[m]
L	indukčnost	[H]
N	počet závitů	[-]
r	poloměr	[m]
R	elektrický odpor	[Ω]
p	tlak	[Pa]
Δp	tlakový spád	[Pa]
Q	objemový průtok	[m ³ ·s ⁻¹]
S	povrch	[m ²]
T	teplota	[°C]
t	čas	[s]
U	napětí	[V]
v	rychlost	[m·s ⁻¹]
η	dynamická viskozita	[Pa·s]
τ	smykové napětí	[Pa]
μ	permeabilita	[H·m ⁻¹]
μ_0	permeabilita vakua ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$)	[H·m ⁻¹]
μ_r	relativní permeabilita	[-]
γ	měrná elektrická vodivost	[S·m ⁻¹]
ρ	měrný elektrický odpor	[Ω·m]

Úvod

Magnetické kapaliny patří v současné době mezi velmi perspektivní materiály. Uplatňují se v mnoha vědních oborech, kde s nimi lze realizovat zcela nové technologie, nebo lze najít výhodné alternativy k technologiím dosavadním. Výjimečné vlastnosti těchto kapalin jsou známy již od čtyřicátých let 20. století, ale až dnešní rozvoj v oblasti nanotechnologií umožnil vývoj a výrobu nových typů stabilních magnetických kapalin, které umožňují jejich praktické využití. Vývoj a aplikace magnetických kapalin jsou vlastně teprve na počátku. Lze však předpokládat, že v budoucnu s jejich využitím dojde k originálním objevům a budou realizována dosud nevídaná zařízení.



Obr. 1. Magnetická nanočástice

Magnetická kapalina (ferokapalina, ferrofluid) je suspenze velmi jemných feromagnetických nanočástic, jejich povrch je pokryt detergentem. Tyto nanočástice jsou umístěny v nosné kapalině. Velikost feromagnetických částic je v řádu nanometrů, nejčastěji 3–15 nm. Nanočástice jsou z práškového železa nebo jiné látky, která obsahuje ionty Fe^{2+} nebo Fe^{3+} . V typické magnetické kapalině představují 5% celkového objemu kapaliny. Množství a velikost magnetických částic mají zásadní vliv na elektromagnetické a mechanické vlastnosti těchto kapalin.

Dalším druhem magnetické kapaliny je magnetoreologická kapalina (zkráceně MR kapalina), která obsahuje částice značně větší než ferokapalina a to v řádu mikrometrů, nejčastěji 5 μm . MR kapaliny, na rozdíl od ferokapalin, obsahují větší množství pevných látek, až 70

váhových procent. Jsou charakteristické především tím, že externí magnetické pole výrazně zvyšuje jejich viskozitu až do té míry, že nakonec zcela ztuhnou. V mnoha aplikacích tato vlastnost, zvaná magnetoviskózní jev, může být velice vítaná.

Použitelnost současných MR kapalin v praxi zásadně limituje to, že nejsou doposud příliš stabilní. K tomu, aby byla magnetická kapalina stálá a nedocházelo v ní k shlukování magnetických částic, slouží detergent (surfaktant). Detergent je řetězec povrchově aktivního polymeru, který je jedním koncem chemicky navázán na povrch magnetických částic a druhým koncem volně přitahován molekulami nosné kapaliny. Tento řetězec má délku 1–2 nm a zabraňuje kontaktu mezi jednotlivými magnetickými částicemi. Má zásadní vliv na koloidní stabilitu, která je nutná k zachování příznivých fyzikálních parametrů magnetické kapaliny.

Nosná kapalina tvoří většinu objemu magnetické kapaliny a může jí být voda, minerální nebo rostlinný olej, petrolej, parafín a další, podle požadovaných fyzikálních vlastností. Magnetické kapaliny se získávají synteticky, v přírodě se nevyskytují.

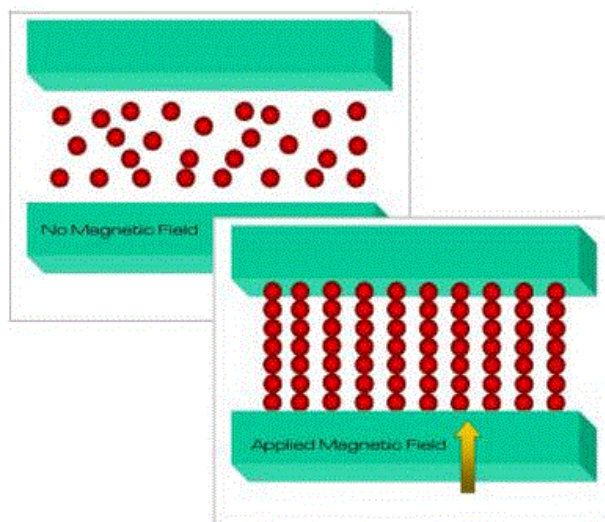
S rostoucí teplotou u magnetických kapalin postupně klesá jejich susceptibilita χ_m , při Curieově teplotě pak vymizí její magnetické vlastnosti vůbec a její relativní permeabilita klesne na hodnotu $\mu_r = 1$. Běžná magnetická kapalina dosahuje saturační magnetizace při hodnotě magnetické indukce $B = 1,3 \text{ T}$. Její pracovní teplota se pohybuje v rozmezí -125 až $+200 \text{ }^\circ\text{C}$. Působením vnějšího magnetického pole dochází ke zvýšení viskozity. Je-li magnetická kapalina vystavena časově proměnnému magnetickému poli, dochází vlivem hysterezních ztrát k jejímu ohřevu. Zvýšení teploty má za následek snížení viskozity magnetické kapaliny. Vysoké teploty nebo jejich časté změny negativně ovlivňují její životnost, především detergentních řetězců. Běžná životnost magnetických kapalin je v řádu let [1], [2], [3].

Tato práce je zaměřena na získání poznatků o změně fyzikálních parametrů magnetických kapalin při proměnných teplotách a různých hodnotách externího magnetického pole. Jedná se přitom o tyto parametry: elektrická vodivost, permeabilita a dynamická viskozita.

1 Vlastnosti magnetických kapalin

1.1 Rozdělení magnetických kapalin podle složení

Jak již bylo výše zmíněno, magnetické kapaliny je možné rozdělit na dvě skupiny, a to podle velikosti použitých magnetických částic, jež zásadně ovlivňují jejich magnetické vlastnosti. Magnetické kapaliny s částicemi o velikosti řádově nanometrů (3–15 nm) označujeme jako ferokapaliny. Při velikosti magnetických částic v řádu mikrometrů (1–20 μm) hovoříme o magnetoreologické kapalině, zkráceně též o MR kapalině. U MR kapalin vzniká takzvaný magnetoreologický (magnetoviskozní) jev, spočívající ve výrazném zvýšení viskozity v případě, že na MR kapalinu působí externí magnetické pole. Tento jev se u ferokapalin neprojevuje, nebo se projevuje jen v zanedbatelné míře. Magnetické částice ferokapalin jsou příliš malé pro vznik tohoto jevu. Naopak u ferokapalin se magnetické částice neustále termicky pohybují vlivem Brownova pohybu. U MR kapalin k Brownově pohybu nedochází díky větší hmotnosti magnetických částic [3].



Obr. 1.1. Rozmístění magnetických částic při magnetoviskózním jevu [4]

Příčina změny viskozity MR kapaliny je patrná z Obr. 1.1. V případě, že na MR kapalinu nepůsobí magnetické pole, jsou magnetické částice rozmístěné chaoticky. Při aplikaci magnetického pole dojde k přeskupení těchto částic v směru magnetického pole. V případě jejich vysoké koncentrace dochází k přechodu z kapalného na pevné skupenství.

Magnetoviskózní jev může být při různých aplikacích magnetoreologických kapalin žádoucí i nežádoucí, podle konkrétní aplikace této kapaliny [3].

1.2 Fero kapalina EFH1 Ferrotec

Jedná se o fero kapalinu ze série EFH, jež je podle výrobce určena především pro vzdělávací a experimentální využití. Magnetické částice této kapaliny jsou tvořeny magnetitem. Nosná kapalina je tvořena lehkými uhlovodíky. Následují výrobcem udávané parametry [5]:

Složení:

Magnetické částice	3–15%
Detergent	6–30%
Nosná kapalina	55–91%

Tab. 1.1 Složení EFH1

Saturační magnetizace	44 mT
Viskozita	6 mPa·s
Hustota	$1,21 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
Bod vzplanutí	160°C

Tab. 1.2 Parametry EFH1

1.3 Magnetoreologická kapalina MRHCCS4-B Liquids Research

Tato kapalina se podle výrobce [4] vyznačuje výrazným zvýšením viskozity i ve slabém magnetickém poli. Výrobce ji doporučuje k použití v adaptabilních tlumičích vozidel. Nosnou kapalinou jsou v tomto případě uhlovodíky. Obsah magnetických částic je 80% váhy kapaliny. Z hlediska viskozity je řazena mezi tixotropní kapaliny. Podrobnější údaje výrobce neposkytuje.

2 Měření permeability kapalin

Důležitým parametrem pro návrh jakéhokoliv zařízení, které využívá magnetické kapaliny, je magnetická permeabilita použité kapaliny. Výrobce magnetických kapalin obvykle tento parametr neuvádí vůbec, nebo pouze hodnotu při konstantní teplotě, a neuvažuje přitom vliv externího magnetického pole [5].

2.1 Definice permeability

Permeabilita, jako jedna ze základních charakteristik materiálu, je parametrem úměrnosti mezi magnetickou indukcí B a intenzitou magnetického pole H . Velikost hodnoty permeability určuje velikost magnetické indukce, která je vybuzena v materiálu magnetickým polem dané intenzity [6].

$$B = \mu H. \quad (2.1)$$

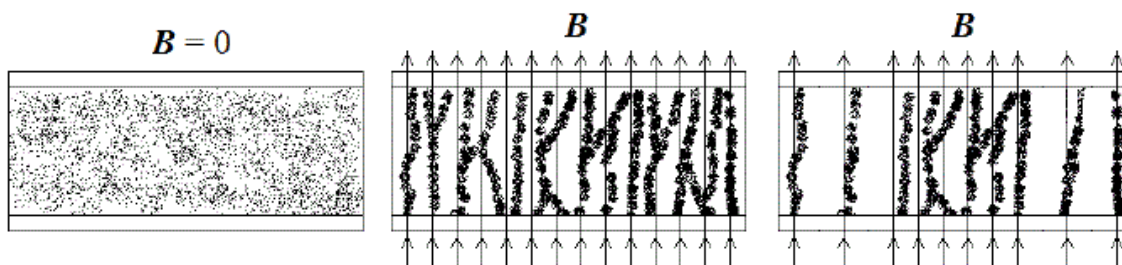
Permeabilita je součin permeability vakua a relativní permeability prostředí.

$$\mu = \mu_0 \mu_r. \quad (2.2)$$

2.2 Způsob měření permeability magnetických kapalin

Způsobů měření permeability feromagnetických materiálu je celá řada, viz např. [7]. Avšak magnetické kapaliny jsou specifické především velmi nízkou relativní permeabilitou, proto většina těchto metod není pro magnetické kapaliny vyhovující. Další zvláštností magnetických kapalin je zanedbatelná hystereze. A také vzhledem k tomu, že jejich magnetická nelinearita se projevuje až při vysokých hodnotách magnetizace, můžeme různé formy permeabilit (počáteční, efektivní, komplexní, amplitudovou) v izotropním prostředí nahradit jedinou permeabilitou definovanou jako poměr B/H [3].

V případě, že na magnetickou kapalinu působí intenzita magnetického pole $H=0$, je magnetická kapalina homogenní. V případě, že $H>0$, vytvářejí se v magnetické kapalině řetězce feromagnetických částic, které způsobují nehomogenitu. Koncentrace řetězců magnetických částic je závislá na intenzitě magnetického pole, v oblastech s vyšší H je koncentrace těchto řetězců vyšší (Obr.2.1). V případě, že na magnetickou kapalinu působí homogenní magnetické pole s malou intenzitou, magnetická kapalina je homogenní.



Obr. 2.1. Závislost tvorby řetězců magnetických částic na externím magnetickém poli

K určení relativní permeability je výhodné využít vztah pro indukčnost cívky, která je přímo úměrná magnetické permeabilitě. Pro změření indukčnosti cívky je známo mnoho přesných

metod, pro které postačují běžné měřicí přístroje.

Jestliže magnetické pole působící na vzorek magnetické kapaliny je homogenní, můžeme použít následující vztah [6]:

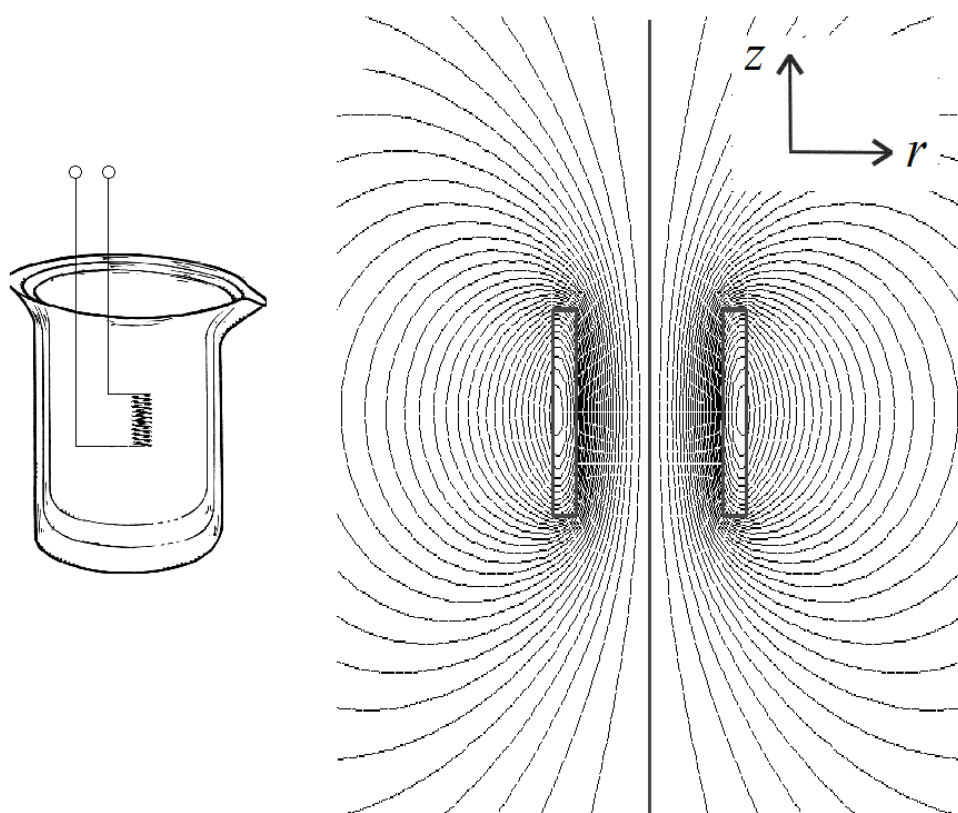
$$L = \mu N^2 \frac{S}{l} \quad (2.3)$$

kde N je počet závitů cívky, S je průřez cívky a l je její délka. Pro měření permeability je možné využít cívku, která má duté (vzduchové) jádro. Jestliže indukčnost cívky se vzduchovým jádrem je L_0 a indukčnost cívky, která má jádro vyplněné magnetickou kapalinou je L_{MK} , můžeme pro výpočet relativní permeability zapsat jednoduchý vztah:

$$\mu_r = \frac{L_{MK}}{L_0} \quad (2.4)$$

Pro zjištění permeability je tedy nutné změřit indukčnost cívky jednak ve vzduchu a jednak s jádrem vyplněným magnetickou kapalinou.

K měření je možné využít několik možných geometrických uspořádání, viz [3]. Pro tuto práci jsem vybral měřicí uspořádání se sondou vloženou do vzorku magnetické kapaliny. Tato metoda je praktická vzhledem k tomu, že není potřeba složitých měřicích přípravků.

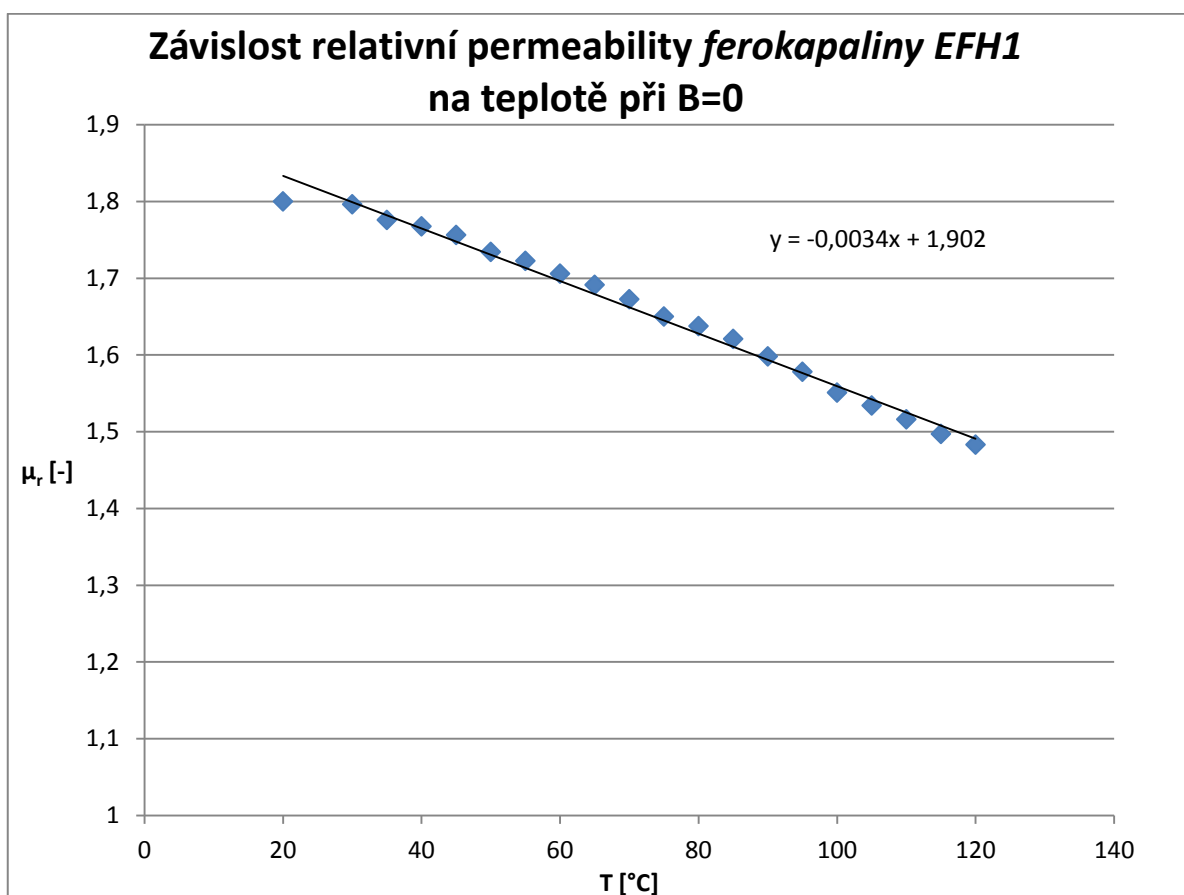


Obr. 2.2. Měřicí konfigurace s cívkou ponořenou do měřené kapaliny a výsledek její numerické simulace v osově symetrickém souřadnicovém systému znázorňující magnetické siločáry. Převzato z [3]

2.3 Vlastní měření permeability magnetických kapalin

2.3.1 Fero kapalina EFH1

Pro změřením závislosti poměrné permeability na teplotě, bez přítomnosti vnějšího magnetického pole, jsem využil vzduchovou cívku s 200 závitů, navinutou na dutém jádře o průměru 1cm. Indukčnost ve vzduchu $L_0=200\mu\text{H}$. K odečítání hodnot indukčnosti byl použit LRC můstek AGILENT 4263N. Měření bylo provedeno třikrát, a to při vzrůstající i klesající teplotě. Výsledné hodnoty jsem získal zprůměrováním jednotlivých měření. Z výsledného grafu (Obr.2.3) je patrné, že poměrná permeabilita se zvyšující se teplotou lineárně klesá.



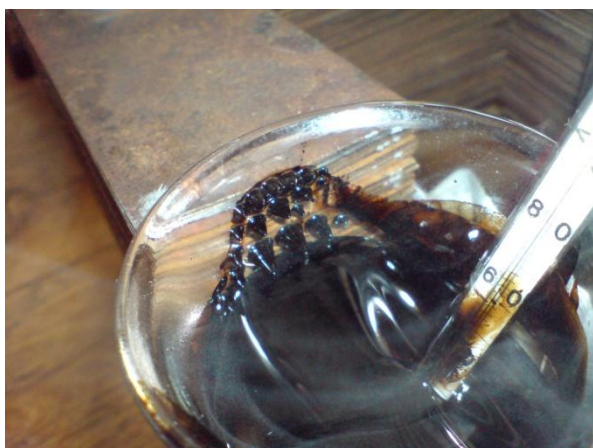
Obr. 2.3. Závislost relativní permeability fero kapaliny EFH1 na teplotě při magnetické indukci $B=0$

Dalším krokem bylo zjištění závislosti poměrné permeability na magnetické indukci při různých teplotách. K tomuto měření jsem využil magnetického obvodu, který je blíže popsán v kapitole 3.4. K měření jsem opět využil vzduchovou cívku s indukčností $L_0=190\mu\text{H}$. Byla použita menší cívka navinutá na dutém jádře, protože jsem byl nucen použít menší kádinku

s vnitřním průměrem 5cm, na kterou jsem dimenzoval vzduchovou mezeru magnetického obvodu, viz Obr. 2.5.

Tab. 1.3. Závíslost relativní permeability ferokapaliny EFH1 na teplotě při magnetické indukci $B=0$

$T [^{\circ}\text{C}]$	20	30	35	40	45	50	55	60	65	70
$\mu_r [-]$	1,8	1,79	1,77	1,76	1,75	1,73	1,72	1,70	1,69	1,67
$T [^{\circ}\text{C}]$	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
$\mu_r [-]$	1,65	1,63	1,62	1,59	1,57	1,55	1,53	1,52	1,50	1,48



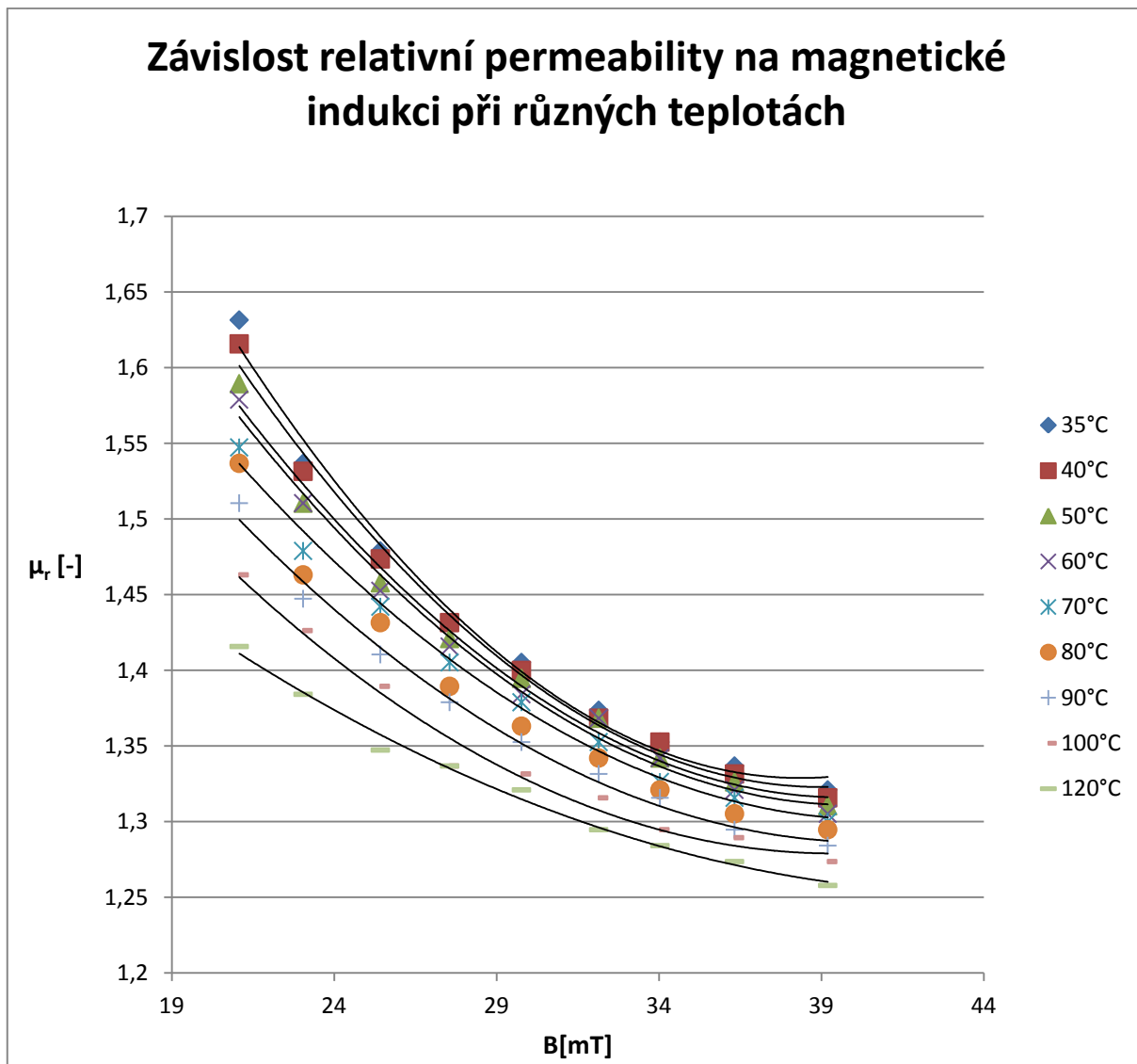
Obr. 2.4 Ferokapalina EFH1 v magnetickém poli



Obr. 2.5 Pracoviště pro měření poměrné permeability při různých hodnotách magnetické indukce

Protože jsem k ohřevu využíval elektrického odporového vařiče s magnetickou ohřívací plochou, nemohl jsem měřit závislost relativní permeability na teplotě při zahřívání magnetické kapaliny. Důvod byl ten, že by se magnetický tok uzavíral přes tuto plochu s výrazně vyšší relativní permeabilitou, než má měřený vzorek. Proto jsem magnetickou kapalinu ohřál mimo magnetický obvod a po dosažení 120°C jsem kádinku se vzorkem vložil do magnetického obvodu a měřil jsem při pozvolném ochlazování vzorku ferokapaliny EFH1. Magnetický obvod jsem budil stejnosměrným proudem, ze zdroje Manson SPS 9600. Předem jsem si změřil hodnoty magnetické indukce ve vzorku ferokapaliny pro proudy od 2 do 10A a při poklesu teploty vždy o 10°C jsem postupně proměřil relativní permeabilitu pro hodnoty magnetické indukce odpovídající budícímu proudu od 2 do 10A s krokem 1A. Tento postup

se ukázal jako vhodný vzhledem ke své rychlosti, protože ferokapalina EFH1 poměrně rychle chladla.



Obr. 2.6 Závislost poměrné permeability ferokapaliny EFH1 na magnetické indukci při různých teplotách

Napětí pozitivního zdroje bylo možno regulovat až od hodnoty 0,5V (což odpovídalo proudu 1,7A), proto jsem se rozhodl měřit až od 2A. Při teplotách od 120 do 80°C měla ferokapalina tendenci vytvářet typické bodlinky ve směru působení magnetického pole viz Obr. 2.4. Tento jev by při vyšších hodnotách magnetické indukce vedl k přelití magnetické kapaliny na pólové nástavce magnetického obvodu.

Výsledná závislost relativní permeability na magnetické indukci je patrná z grafu (Obr.2.6). Relativní permeabilita klesá se vzrůstající magnetickou indukcí a se zvyšující se teplotou. Naměřené body velice dobře aproximuje polynom druhého řádu.

Změřené hodnoty jsou obsahem přílohy 3.

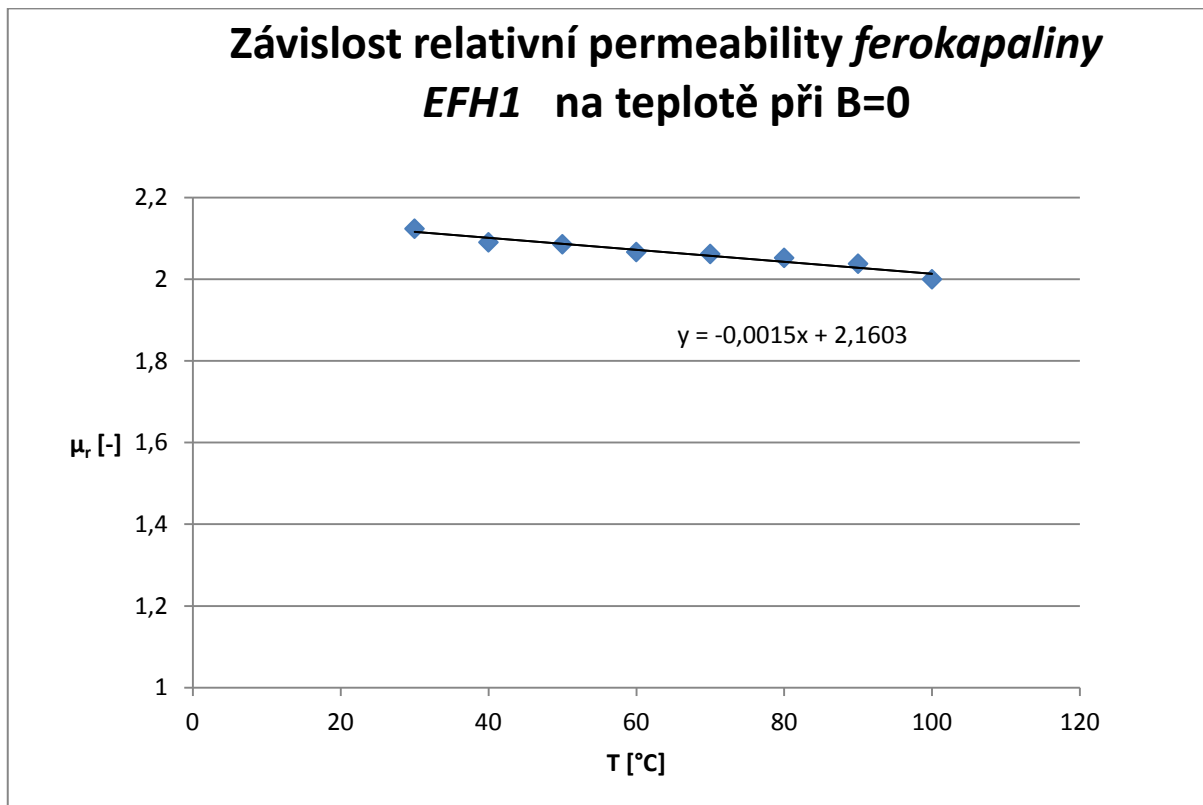
Také jsem proměřil hodnoty magnetické indukce při různých polohách sondy teslametru v kádince s magnetickou kapalinou viz Obr.2.9. Hodnoty mezi středem a okrajem se neliší o více než 10%. Cívky použité k měření nebyly delší než 1,5cm s průměrem do 1,5cm, a proto v oblasti měření lze považovat vzorek měřené magnetické kapaliny za homogenní. Pak je splněn předpoklad pro použití vzorce (2.4) k výpočtu relativní permeability.

2.3.2 Magnetoreologická kapalina MRHCCS4-B

Měření relativní permeability magnetoreologické kapaliny jsem provedl stejným způsobem jako měření ferokapaliny EFH1, rozdílem bylo použití cívky s průměrem jádra 1,5cm. Tato modifikace byla nutná vzhledem k tomu, že MR kapalina má podstatně vyšší zdánlivou viskozitu než ferokapalina EFH1. Díky vyšší zdánlivé viskozitě, MR kapalina špatně vyplňovala jádro menší cívky, cívkou většího průměru byl tento problém odstraněn. Indukčnost použité cívky ve vzduchu byla $L_0=210\mu\text{H}$.

Tab. 4. Závislost relativní permeability MR kapaliny MRHCCS4-B na teplotě při magnetické indukci $B=0$

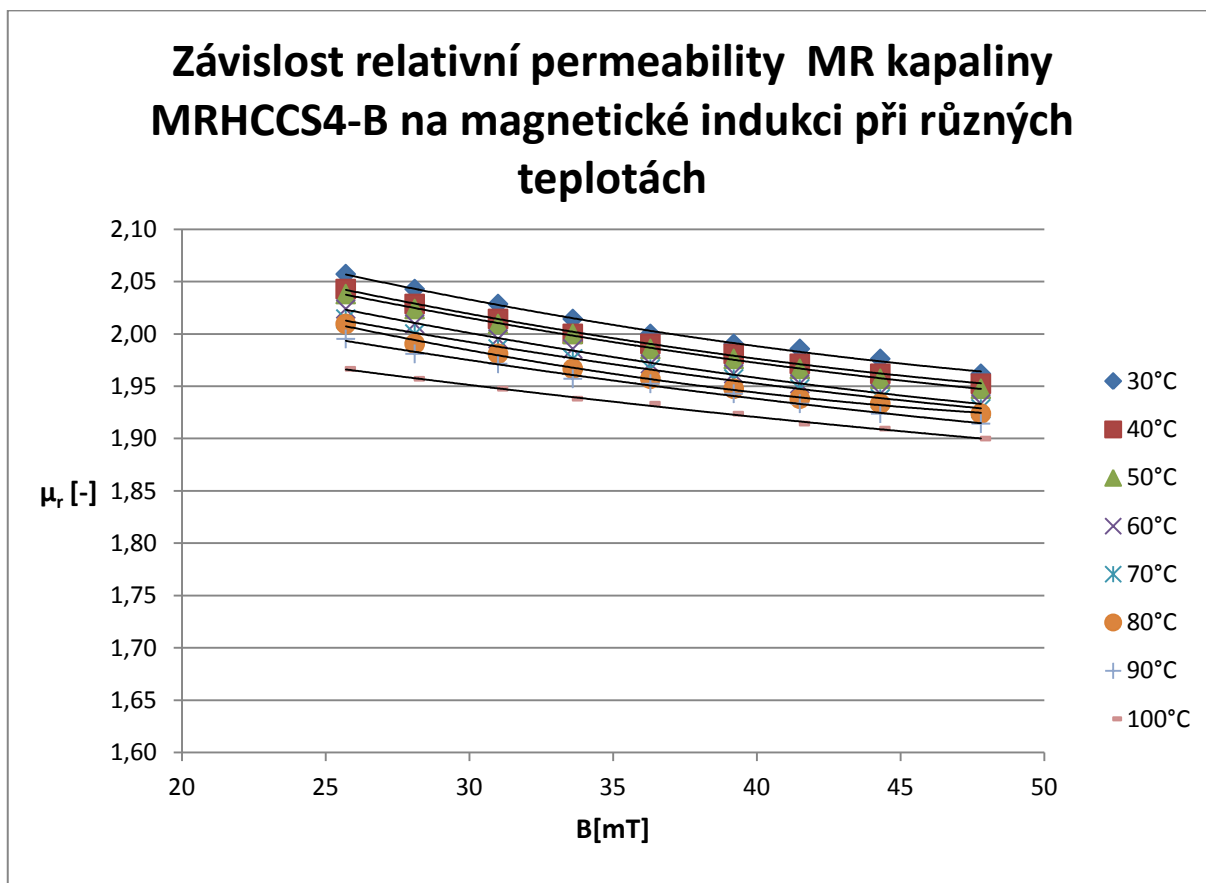
$T [^{\circ}\text{C}]$	30	40	50	60	70	80	90	100
$L [\mu\text{H}]$	446	439	438	434	433	431	428	420
$\mu_r [-]$	2,12	2,09	2,09	2,07	2,06	2,05	2,04	2,00



Obr. 2.7. Závislost relativní permeability MR kapaliny MRHCCS4-B na teplotě při magnetické indukci B=0

Vzhledem k nízké tepelné vodivosti MR kapaliny nebylo možné měřit relativní permeabilitu při vzrůstající teplotě. Přestože byl ohřev prováděn velice pomalu a za intenzivního míchání, na dně kádinky byla teplota o 10–15°C vyšší než ve zbylém objemu měřeného vzorku. Proto jsem i při měření relativní permeability bez působení vnějšího magnetického pole měřil pouze při pozvolném chladnutí MR kapaliny. Kapalínu jsem nejprve ohřál na cca 110°C, poté jsem vzorek velice intenzivně promíchal a počkal jsem, až se vyrovnají tepelné rozdíly. Při poklesu teploty na 100°C jsem začal měřit relativní permeabilitu.

Snížení relativní permeability se u MR kapaliny neprojevilo natolik výrazně jako u ferokapaliny, jak je vidět z grafu na Obr. 2.7. Závislost poklesu relativní permeability s rostoucí teplotou je opět lineární.

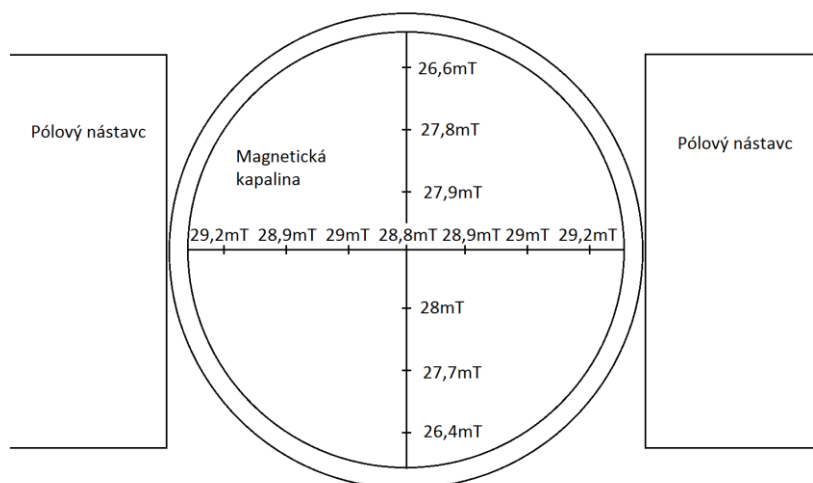


Obr. 2.8 Závislost poměrné permeability MR kapaliny MRHCCS4-B na magnetické indukci při různých teplotách

Závislost relativní permeability MR kapaliny na magnetické indukci při různých teplotách jsem měřil stejnou metodou jako u ferokapaliny. MR kapalina chladla výrazně delší čas než ferokapalina, proto bylo její měření podstatně méně náročné na rychlost měření.

Z grafu na Obr. 2.8 je vidět závislost relativní permeability MR kapaliny na magnetické indukci při různých hodnotách teploty. I v tomto případě je pokles relativní permeability vlivem magnetického pole méně výrazný, než u ferokapaliny EFH1. Změřené hodnoty jsou aproximovány polynomem druhého řádu, ačkoliv je závislost na magnetickém poli téměř lineární. Na Obr.2.10 je znázorněn zajímavý jev, kdy MR kapalina, jež při míchání ulpěla na povrchu kádinky vytvořila zajímavé geometrické tvary ve směru působení magnetického pole.

Změřené hodnoty jsou obsahem přílohy 4.



Obr. 2.9 Závislost magnetické indukce na poloze sondy ve vzorku MR kapaliny



Obr. 2.10 MR kapalina MRHCCS4-B v magnetickém poli

3 Měření viskozity kapalin

Při použití magnetické kapaliny ve většině aplikací bude docházet k jejímu ohřevu. Proto je pro konstruktéra důležité znát, jak se bude měnit viskozita při různých teplotách. Tato znalost je zásadní především u zařízení využívajících magnetoreologického efektu MR kapalin, jako jsou například adaptabilní tlumiče, brzdy využívající MR kapalinu a podobná zařízení, kde může dojít zvýšením teploty k poklesu viskozity MR kapaliny, a v důsledku toho k výraznému snížení jejich účinnosti nebo dokonce k selhání [3] [8].

3.1 Definice viskozity

Viskozita je materiálová vlastnost všech reálných kapalin. Jedná se o odpor proti změně jejich vnitřních struktur. Dochází-li k pohybu dvou sousedních vrstev skutečné kapaliny rozdílnými rychlostmi, vzniká v místě kontaktu těchto vrstev vlivem viskozity smykové tření. Tato vlastnost se projevuje pouze v případě, že na kapalinu působí vnější síly, čímž vzniká silová nerovnováha při přizpůsobování se silám, které na kapalinu působí. Platí-li rovnováha sil, pak se viskozita neprojevuje [8][9].

V případě kapalin je viskozita závislá na teplotě. S rostoucí teplotou se viskozita reálných kapalin snižuje a to přibližně exponenciálně. Naopak s klesající teplotou se viskozita zvyšuje [9].

3.2 Rozdělení kapalin z hlediska reologie

Reologie se zabývá studiem a popisem látek (pevných i tekutých) z hlediska deformačních a tokových vlastností. Vztahy mezi mikrostrukturou a reologickými vlastnostmi se zabývá mikreologie.

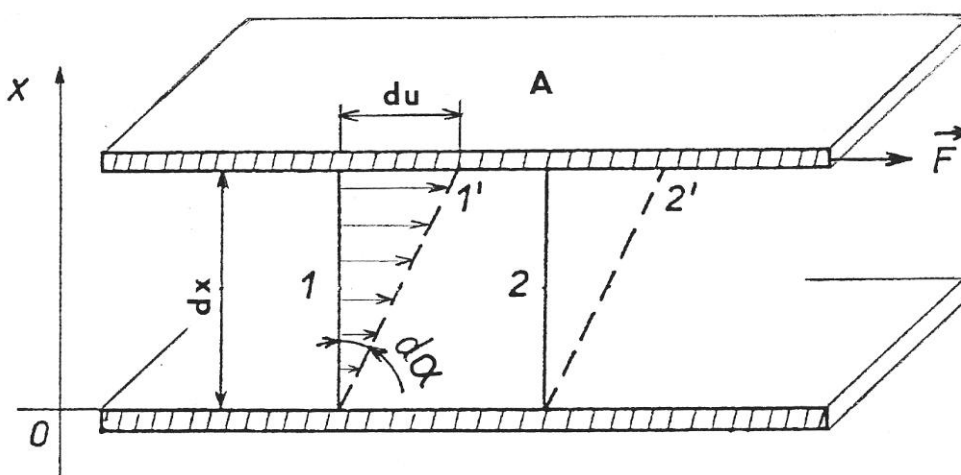
Reálné kapaliny lze rozdělit na dvě základní kategorie: na kapaliny, k jejichž popisu s dostatečnou přesností vyhovuje lineární Newtonův zákon viskozity, a na kapaliny, k jejichž popisu je potřeba složitějšího matematického aparátu [9][12].

3.2.1 Newtonské kapaliny

V případě že je materiál ideálně viskózní platí pro tečné napětí Newtonův zákon

$$\tau = \eta \cdot \frac{du}{dx} = \eta \cdot D \quad (3.1)$$

kde součinitel η je dynamická viskozita, vyjadřující vnitřní tření newtonské kapaliny, du označuje vzájemnou rychlost pohybu smykových rovin vzdálených o dx a D je příslušná složka gradientu rychlosti (Obr. 3.1) [9].



Obr. 3.1. Rychlostní profil toku v kapalině mezi nepohyblivou a pohybující se deskou převzato z [9]

Dynamická viskozita je veličina, jež závisí na teplotě a tlaku. U kapalin s teplotou klesá a naopak u plynů roste. Jednotkou je pascalsekunda (nehezské) [$\text{Pa} \cdot \text{s} = \text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$] [9].

3.2.2 Nenewtonské kapaliny

Kromě kapalin, jež se řídí Newtonovým zákonem, existuje i řada kapalin, které se tímto zákonem neřídí. Ty se souhrnně označují jako kapaliny nenewtonské. Jedná se např. o suspenze, různé pasty, taveniny polymerů, barvy, také jsou sem však řazeny i magnetické kapaliny. Analogicky, jako pro newtonské kapaliny, pro ně platí rovnice (3.2):

$$\tau = \eta \cdot D, \quad (3.2)$$

kde η na rozdíl od newtonských kapalin představuje zdánlivou viskozitu, která není látkovou konstantou, ale je závislá na rychlosti deformace, případně na tečném napětí [9].

Nenewtonské kapaliny se dále dělí podle časové závislosti mezi smykovým napětím a rychlostí smyku do tří základních skupin:

- 1) Časově nezávislé - rychlost smyku závisí pouze na smykovém napětí. Řadíme sem kapaliny pseudoplastické – zdánlivá viskozita s tlakem roste, dilatantní – zdánlivá viskozita s tlakem klesá a binghamské – dochází k tečení až po překonání prahového smykového napětí.
- 2) Časově závislé – Funkce smykového napětí a rychlosti smyku je závislá na době zatěžování kapaliny daným smykovým zatížením. Tyto kapaliny dále rozdělujeme na tixotropní (smykové napětí s časem klesá) a reopektické (smykové napětí s časem roste).
- 3) Viskoelastické kapaliny – kombinují elasticko-mechanické vlastnosti těles a viskózní vlastnosti typické pro kapaliny [8], [9],[12].

Viskozita magnetických kapalin je závislá na magnetoreologickém jevu, který se u fero kapalin neprojevuje vůbec, nebo jen v omezené míře. U MR kapalin se magnetoreologický jev projevuje velice výrazně, proto viskozita magnetoreologických kapalin je závislá především na intenzitě magnetického pole, jež na MR kapalinu působí, a také na její teplotě [3].

Kapalinu MRHCCS4-B výrobce Liquids Research řadí mezi kapaliny tixotropní, jedná se tedy o kapalinu, u které klesá zdánlivá viskozita s dobou působení smykového napětí a tedy i s dobou měření [4].

3.3 Metody měření parametrů nenewtonských kapalin

K měření viskozity se používají průtokové (kapilární), vibrační, pádové a rotační viskozimetry. Všechny uvedené viskozimetry jsou vhodné pro měření newtonských kapalin. Ovšem pro měření nenewtonských kapalin jsou použitelné pouze rotační viskozimetry a speciální kapilární viskozimetry k tomuto účelu navržené [9],[12].

3.3.1 Kapilární viskozimetry

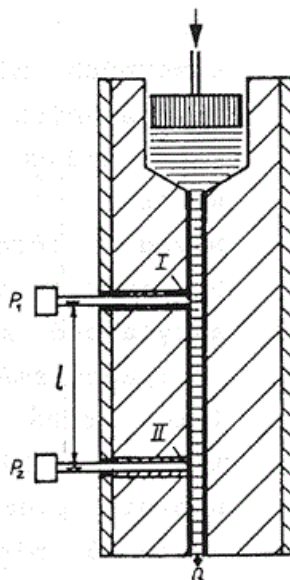
Pro měření zdánlivé viskozity nenewtonských kapalin je nutné použít kapilární viskozimetr vybavený zařízením pro nastavení tlakového spádu. Takový viskozimetr (Obr. 5) pak přímo měří objemový průtok Q a tlakový spád Δp na měrné kapiláře s poloměrem r a délkou l . Ze

získaných hodnot je pak možné vypočítat smykové napětí τ (7), gradient rychlosti D (8) a zdánlivou viskozitu η (9). Tlakový spád potřebný pro měření se vytváří pomocí různé výšky měřené kapaliny zatěžovacím pístem nebo tlakem inertního plynu. Pro přesnost měření je důležitý výběr správné kapiláry s vhodně definovanými parametry a na přesnosti měření tlakového rozdílu [9].

$$\tau = \Delta p \cdot \frac{r}{2l} \quad (3.3)$$

$$D = \frac{4V}{\pi \cdot r^3} \quad (3.4)$$

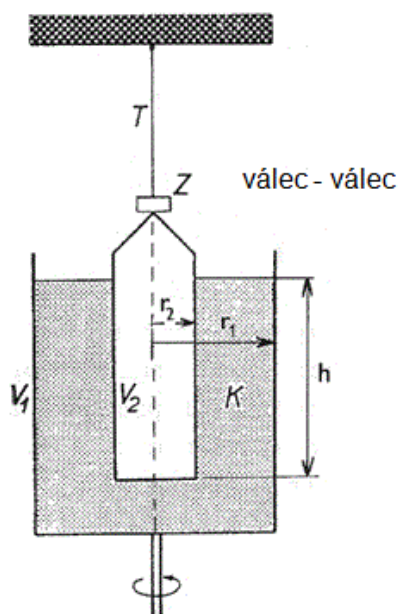
$$\eta = \frac{\tau}{D} = \frac{2\Delta p V}{\pi l r^2} \quad (3.5)$$



Obr. 3.2 Průtokový viskozimetr s nastavitelným tlakovým spádem pomocí pístu, převzato z [9]

3.3.2 Rotační viskozimetry

V rotačním viskozimetru je vzorek měřené kapaliny podroben smykovému tření mezi dvěma definovanými plochami, přičemž jedna vykonává otáčivý pohyb, který je přenášen pomocí měřené kapaliny na druhou plochu, kde je měřen její účinek. Nejběžnější typ rotačního viskozimetru je tvořen dvěma sousými válci V1 a V2. Prostor mezi válci je vyplněn měřenou kapalinou K, viz Obr. 3.3. Vnější válec je uveden do rotačního pohybu se stálou úhlovou rychlostí ω a registruje se moment síly M , který působí na vnitřní válec. V popisovaném uspořádání se měří stočení torzního vlákna T, na kterém je zavěšen válec V1, a to metodou světelného paprsku odráženého zrcátkem Z na stupnici [9][12].



Obr. 3.3 Schéma základního typu viskozimetru v uspořádání válec-válec, převzato z [9]

U dnešních viskozimetrů je měření otáčivého momentu prováděno elektronicky, což umožňuje jeho další snadné zpracování, případně elektronický zápis výsledků. Pro rotační viskozimetr lze psát vzorec (3.6)

$$\eta = A \frac{M}{\omega}, \quad (3.6)$$

kde A představuje přístrojovou konstantu. Uspořádání válec-válec přináší jisté problémy s koncovými a hranovými efekty. Dalším problémem tohoto uspořádání je ohřev měřeného vzorku [9].

Z výše uvedených důvodů se používá uspořádání kužel-deska, které potlačuje koncové a

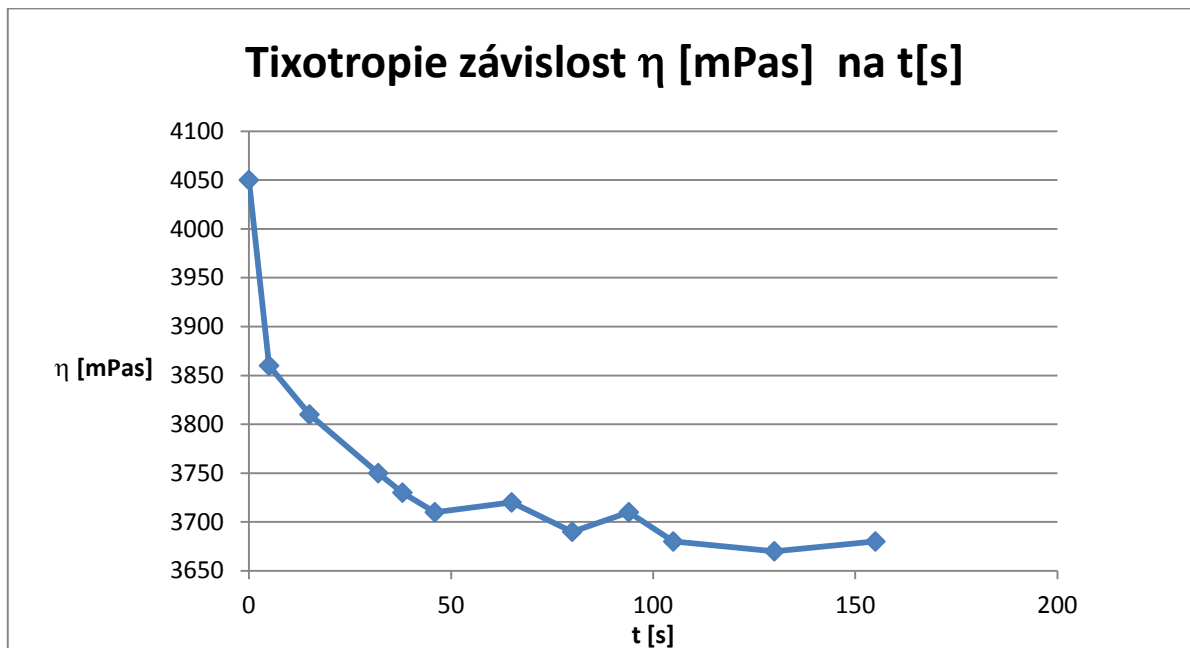
okrajové jevy, protože celý vzorek je podroben konstantní rychlosti smykového tření. Vzhledem k tomu že vzorek je v tenké vrstvě a jeho okolí je velká chladicí plocha, je zahřívání vzorku výrazně potlačeno. Tohoto měřicího uspořádání se využívá především pro viskóznější kapaliny. Nevýhodou je omezená použitelnost pro kaly a suspenze. Větší částice narušují tokové poměry v klínové mezeře [9],[12].

Dalším typem je viskozimetr využívající Brookfieldovu metodu. Zde se v měřeném vzorku otáčí konstantními otáčkami pouze vřeteno diskového tvaru. Otáčky vřetene jsou úměrné rychlosti smykové deformaci (gradientu rychlosti) D . Kapalina klade otáčejícímu se vřetenu odpor, proto moment na hřídeli viskozimetru je úměrný smykovému napětí τ kapaliny. Běžné viskozimetry tohoto typu jsou vybaveny výměnnými vřeteny o různých průměrech, což umožňuje použít tento viskozimetr pro velký rozsah hodnot dynamické viskozity. Další výhodou je možnost takového zařízení zakoupit jako přenosné či ruční [10].

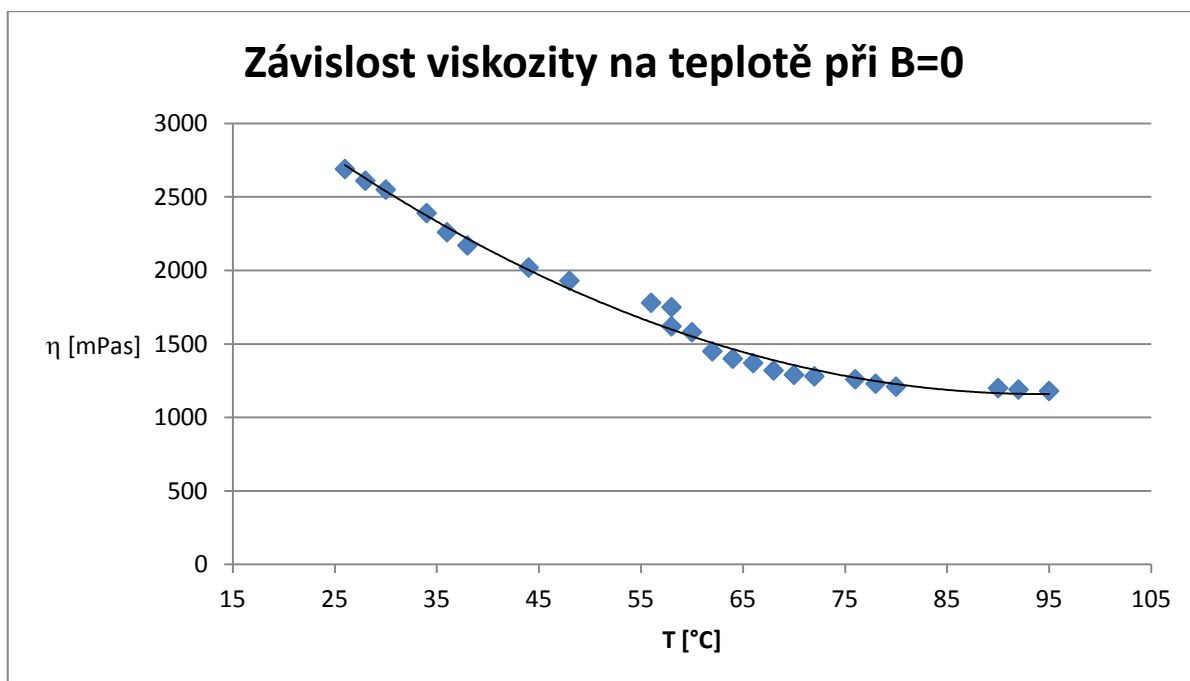
3.4 Vlastní měření viskozity magnetických kapalin

K měření zdánlivé viskozity magnetoreologické kapaliny MRHCCS4-B byl použit viskozimetr MYR VP1020 od firmy Viscotech. Jedná se o rotační viskozimetr využívající Brookfieldovu metodu. S rozsahem měření dynamické viskozity 200–200 000 mPa·s. Přístroj využívá konstantní otáčky 20 ot/min. Vzhledem k rozsahu dostupného přístroje se nepodařilo změřit viskozitu ferokapaliny EFH1 od firmy Ferrotec, u které výrobce udává viskozitu $\eta = 6$ mPa·s.

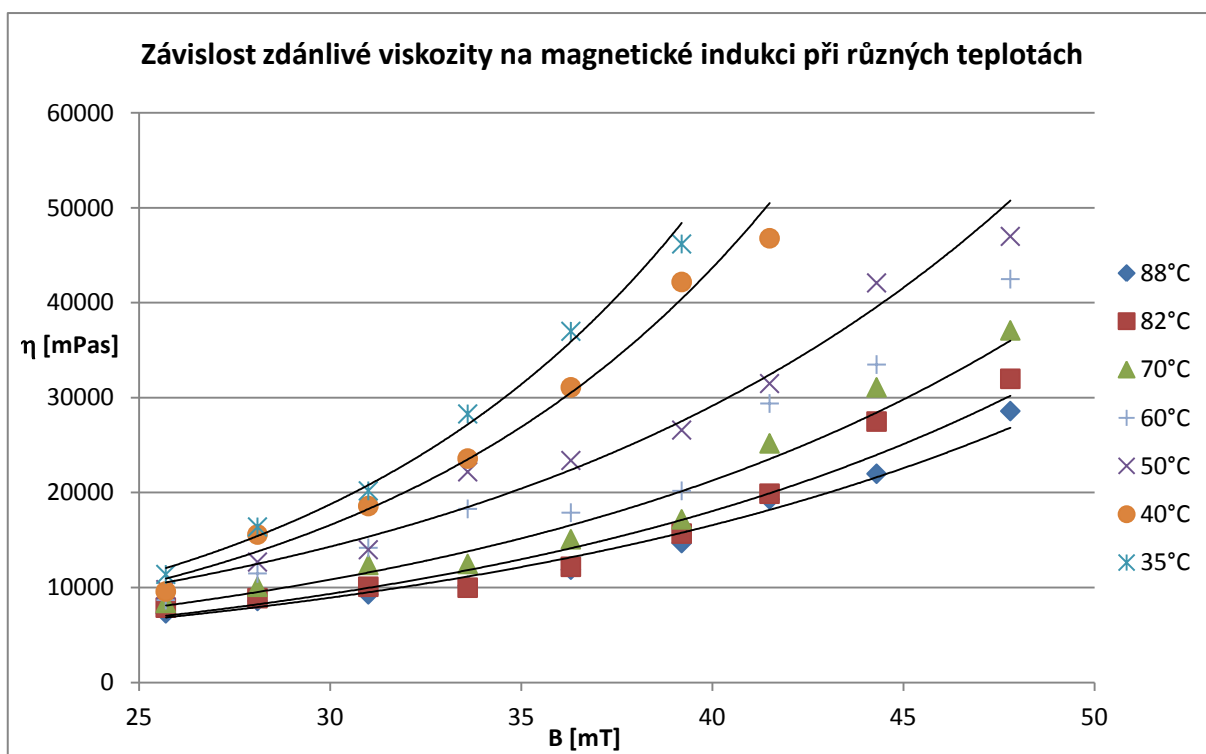
Po několika úvodních měřeních s viskozimetrem jsem zjistil odchylky výsledků měření (cca 5%) při stejné teplotě MR kapaliny a dalších okolních podmínkách. Viskozimetr potřebuje určitý čas, po který rotuje spindl (měřící těleso viskozimetru) ve vzorku měřené kapaliny. Vzhledem k tomu, že zdánlivá viskozita MR kapaliny klesá s dobou působení smykového napětí τ a tedy i s dobou měření (jedná se o tixotropní kapalinu), viskozimetr zřejmě nebyl schopen měřit opakovatelný výsledek, pravděpodobně pro příliš rychlou změnu viskozity. Proto jsem se rozhodl vyhodnotit vliv tixotropie. Vložil jsem viskozimetr do kádinky se vzorkem MR kapaliny a odečítal hodnoty viskozity po dobu 155s. Z grafu (Obr3.4) je patrný pokles zdánlivé viskozity η s časem měření rotačním viskozimetrem. Vzhledem k tomu, že prvotní hodnota je cca o 10% vyšší než hodnoty, které se ustálí po 60s měření, rozhodl jsem se měřit ustálené hodnoty po 60s měření a nikoliv hodnoty prvotní.

Obr 3.4 Tixotropie magnetoreologické kapaliny MRHCCS4-B při $B=0$, $T=23^\circ\text{C}$

Dalším krokem bylo změření závislosti zdánlivé viskozity MR kapaliny na teplotě bez vlivu vnějšího magnetického pole. Vzhledem k tomu že se u magnetoreologické kapaliny projevila velmi nízká tepelná vodivost, bylo nutné její ohřev provádět velice pomalu a za stálého míchání, aby nedošlo k jejímu přehřátí v okolí ohřivané plochy. Přehřátím by došlo k poškození detergentu a tím ke znehodnocení MR kapaliny.

Obr 3.5 Závislost zdánlivé viskozity na teplotě, při $B=0$, MR kapalina MRHCCS4

Z grafu (Obr. 3.5) je patrný polynomický (2 řádu) pokles zdánlivé viskozity se vzrůstající teplotou.



Obr 3.6 Závislost zdánlivé viskozity na teplotě, při různých hodnotách magnetické indukce, MR kapalina MRHCCS4-B

Měření závislosti zdánlivé viskozity na teplotě (při různých hodnotách magnetické indukce) MR kapaliny MRHCCS4-B bylo prováděno s pomocí přípravku s magnetickým obvodem ve tvaru C, do jehož vzduchové mezery byla vložena kádinka s magnetickou kapalinou. Vzhledem k tomu, že k ohřevu vzorku kapaliny jsem používal elektrický odporový vaříč s ohřívací plochou vyrobenou z magnetického materiálu, byl jsem nucen MR kapalinu ohřát mimo měřící přípravek. Měření jsem prováděl při pozvolném chladnutí magnetické kapaliny. Po ochlazení vzorku na požadovanou teplotu jsem budil magnetický obvod stejnosměrným proudem. Vzhledem k tomu, že 125ml vzorku chladlo 150 minut, měl jsem na měření dostatek času. Pouze pro dvě řady hodnot s nejvyšší teplotou bylo nutné vzorek několikrát přehřívát.

Vzhledem k velikosti spindlu byla nutná kádinka s vnějším průměrem 5,5cm, a tomuto průměru odpovídající velikost vzduchové mezery. K dosažení potřebné magnetické indukce ve vzorku MR kapaliny jsem zhotovil magnetický obvod ve tvaru C z dobře dostupných

transformátorových plechů o šířce 5cm a výšce 7cm. Transformátorové plechy jsem volil, protože jsem předpokládal, že k buzení magnetického obvodu bude použit regulační transformátor. Na tento magnetický obvod jsem umístil cívku se 150 závitů z měděného lakovaného drátu o průměru 2mm. Nakonec jsem měřil pomocí stejnosměrného proudu, jelikož se mi podařilo dosáhnout vyšší hodnoty magnetické indukce (k dosažení magnetické indukce $B=47,8\text{mT}$ bylo zapotřebí budícího proudu o velikosti $I=10\text{A}$). Vzhledem k omezenému prostoru v kádince se vzorkem měřené kapaliny jsem nejprve změřil hodnoty magnetické indukce odpovídající proudu ve vinutí magnetického obvodu v intervalu od 2 do 10A s krokem 1A. Následně jsem pro každou zvolenou teplotu změřil řadu hodnot zdánlivé viskozity. Před měřením každé hodnoty zdánlivé viskozity jsem vypínal zdroj stejnosměrného napětí, abych eliminoval vliv předchozího měření, kdy docházelo ke zvrásnění povrchu MR kapaliny především při vyšších hodnotách magnetické indukce, kdy MR kapalina prakticky ztuhla.

Z grafu (Obr. 3.6) je patrné, že zdánlivá viskozita magnetoreologické kapaliny se vzrůstající magnetickou indukcí exponenciálně roste, ale sklon klesá se stoupající teplotou.



Obr 3.7 Pracoviště pro měření zdánlivé viskozity

4 Měření elektrické vodivosti kapalin

Elektrická vodivost je jedním z nejdůležitějších parametrů, který potřebujeme znát u materiálů používaných v elektrotechnice. Rozhoduje o tom, jestli se daný materiál bude chovat jako izolant, nebo jako vodič (případně polovodič). Z toho plyne jeho další využití.

4.1 Definice elektrické vodivosti

Elektrická vodivost je materiálová vlastnost udávající schopnost materiálu vést elektrický proud. Vzhledem k tomu, že je přímo úměrná ploše S a nepřímo úměrná délce l , je definována měrná elektrická vodivost γ jako převrácená hodnota měrného odporu ρ . Měrný odpor je definován jako podíl intenzity elektrického pole E a proudové hustoty J .

$$\gamma = \frac{J}{E} = \frac{\frac{I}{S}}{\frac{U}{l}} = \frac{I \cdot l}{U \cdot S} \quad (4.1)$$

Konduktivita magnetických kapalin je závislá na teplotě, se vzrůstající teplotou vzrůstá. Na elektrické vodivosti se podílejí všechny látky v analyzovaném roztoku, přičemž podíl jednotlivých látek nelze rozlišit [13].

4.1.1 Vedení elektrického proudu roztokem je umožněno:

Pohybem (migrací) iontů – částic, jež nesou trvalý elektrický náboj a pohybují se směrem ke kladné elektrodě (anionty) a k záporné (kationty)

Polarizací molekul nebo orientací dipólů. Je-li elektroneutrální molekula vystavena elektrickému poli, dochází uvnitř molekuly k přesunu záporného náboje směrem ke kladné elektrodě a kladný náboj se přesunuje k záporné elektrodě. Takto molekula vytvoří indukovaný elektrický dipól orientovaný ve směru elektrického pole. Tento jev se nazývá polarizace. K pohybu náboje dochází pouze při vzniku nebo zániku polarizačního jevu.

Při nízkých frekvencích se polarizace projevuje v omezené míře. Proto impedance kapaliny je dána především koncentrací nosičů trvalého náboje, iontů. A tudíž je určována především ohmickým odporem R a je málo závislá na frekvenci.

Při vysoké frekvenci střídavého proudu se projevují obě složky (odpor i reaktance) ve srovnatelné míře. Vysokofrekvenční vodivost kapaliny má komplexní charakter a závisí na frekvenci střídavého proudu [13].

4.2 Způsoby měření elektrické vodivosti kapalin

Způsoby měření elektrické vodivosti kapalin lze rozdělit do dvou skupin:

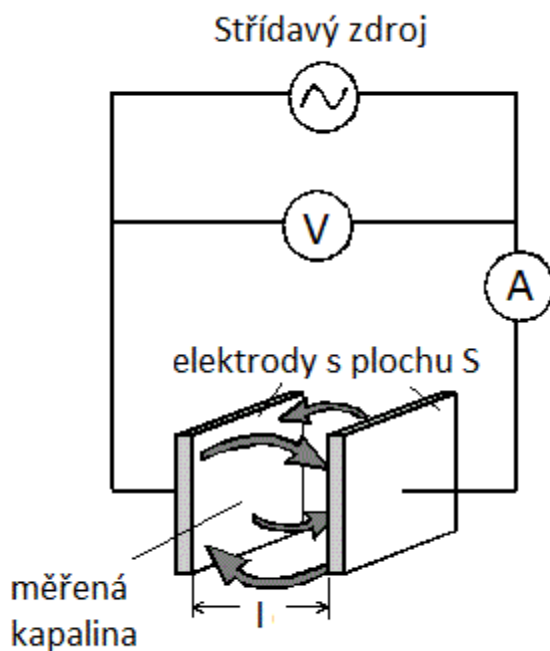
kontaktní

bezkontaktní

Výše uvedené metody využívají střídavého proudu, stejnosměrný proud nelze použít, poněvadž při jeho použití by docházelo k polarizaci měřeného vzorku a výsledek by byl zatížen touto chybou [13].

4.2.1 Kontaktní konduktometrie

Tato metoda využívá k měření nízkofrekvenční proud s frekvencí řádově od desetin až po jednotky kHz. Proto se také nazývá nízkofrekvenční konduktometrie. Princip metody je patrný z Obr.4.1.



Obr 4.1 Zjednodušené schéma kontaktní konduktometrie, převzato z [13]

$$\gamma = K \frac{I \cdot l}{U \cdot S} \quad (4.2)$$

Ve vztahu (4.2) je zahrnuta konstanta konduktometrické sondy K , která představuje korekci pro okrajové jevy elektrod, jelikož elektrické pole mezi nimi není přesně ohraničeno jejich

rozměry. Konstanta K se určuje ze vztahu (4.3), a to za pomoci standardního (kalibračního) roztoku o známé měrné elektrické vodivosti. Optimální frekvenci a amplitudu střídavého proudu je potřeba vhodně nastavit pro každé měření.

$$\gamma = G \frac{l}{S} = K \cdot G \quad (4.3)$$

Moderní konduktometry provádí tuto optimalizaci automaticky, rovněž ale provádějí korekci pro teplotu daného vzorku, neboť jsou vybaveny snímačem teploty [13].

Výhody kontaktní konduktometrie

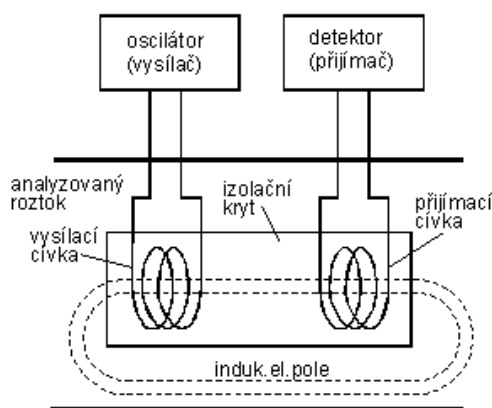
- velice citlivé
- široký rozsah měření
- nízká cena (oproti bezkontaktním konduktometrům)

Nevýhody

- znečištění elektrod (nutnost pro nový vzorek čistit)
- nutnost přizpůsobení snímače pro daný roztok
- možnost vzniku polarizačního jevu

4.2.2 Bezkontaktní konduktometrie

Nevýhody kontaktních konduktometrů odstraňuje metoda bezkontaktní. V principu se jedná o transformátor, viz Obr.4.2. V něm je primárním vinutím vysílací cívka navinutá na izolační trubce, ve kterém je umístěn měřený vzorek, který tvoří jádro. Sekundární vinutí tvoří další cívka, do které se indukuje napětí úměrné konduktivitě měřeného vzorku.



Obr. 4.2 Zjednodušené schéma bezkontaktní konduktometrie, převzato z [13]

4.3 Vlastní měření konduktivity magnetických kapalin

K měření konduktivity ferokapaliny EFH1 i magnetoreologické kapaliny MRHCCS4-B byl použit konduktometr inoLab Cond 730 s měřicím rozsahem 0,1 μ S/cm – 500mS/cm [14]. Měření bylo prováděno až do teploty 50°C (vyšší teplotu neumožňovala plastová konstrukce sondy konduktometru) při hodnotách magnetické indukce až do 90mT. Nepodařilo se však spolehlivě naměřit žádnou hodnotu, protože konduktivita magnetických kapalin byla nižší, než konduktometr dokázal zaznamenat. Z tohoto měření plyne, že měrná elektrická vodivost měřených magnetických kapalin je nižší než 0,1 μ S/cm, a to až do teploty 50°C.

Protože hodnota konduktivity magnetických kapalin byla pro dostupný konduktometr příliš nízká, rozhodl jsem se vytvořit vlastní vodivostní sondu. Sondu jsem zhotovil z Cuprexitu, na kterém jsem vyleptal čtvercové plochy o rozměru 3x3cm, a elektrody jsem umístil do vzdálenosti 3,5mm od sebe. Pro měření jsem použil autotransformátor, na kterém jsem nastavil nejvyšší možné napětí 250V a proud jsem měřil pomocí multimetru s rozsahem 0 – 200 μ A s rozlišením 100nA [15].

Ferokapalinu EFH1 jsem měřil od teploty 120°C směrem dolů a při magnetické indukci až 82mT. Podobně magnetoreologickou kapalinu jsem měřil od 100°C dolů při magnetické indukci až 94mT. Ani při tomto měření jsem však hodnotu elektrické vodivosti nedokázal změřit.

Hodnoty z měření pomocí vlastní sondy byly dosazeny do vzorce (4.1), jejich dosazení je patrné z (4.3). Byly zanedbány okrajové jevy.

$$\gamma < \frac{I \cdot l}{U \cdot S} < \frac{0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 3,5 \cdot 10^{-3}}{250 \cdot 9 \cdot 10^{-4}} < 1,55 \cdot 10^{-9} \text{ S/m} \quad (4.3)$$

Z výpočtu (4.3) je patrné že měřené magnetické kapaliny se chovají jako elektrický izolant, a to v širokém rozmezí teplot i hodnot magnetické indukce.

5 Výpočet průtoku trubičkou

Na průtok magnetické kapaliny trubičkou má z měřených parametrů vliv pouze zdánlivá viskozita. Protože se mi nepodařilo změřit zdánlivou viskozitu u ferokapaliny, budu se v této kapitole věnovat pouze magnetoreologické kapalině MRHCCS4-B.

5.1 Rovnice potřebné k výpočtu

Z rovnováhy sil působících na vetknutý objemový element proudící kapaliny:

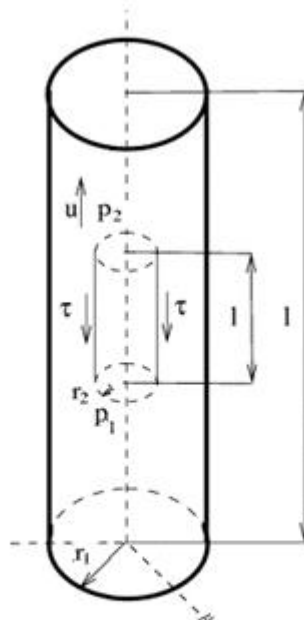
$$\tau \cdot 2\pi \cdot r_2 \cdot l - p_2 \cdot \pi \cdot r_2^2 + p_1 \cdot \pi \cdot r_2^2 = 0 \quad (5.1)$$

Z toho plyne:

$$\tau \cdot 2\pi \cdot r_2 = \frac{dp}{dx} \cdot \pi \cdot r_2^2 \quad (5.2)$$

Po úpravě dostaneme:

$$\tau = \frac{r_2}{2} \cdot \frac{dp}{dx} \quad (5.3)$$



$$p_1 > p_2 \quad \frac{dp}{dx} = -\frac{p_1 - p_2}{l} < 0$$

Obr. 5.1 Průtok kapaliny trubičkou, převzato z [16]

Smykové napětí τ je podle (5.3) přímo úměrné poloměru r_2 pro $dp/dx = \text{konst.}$

Dosadíme-li do vztahu (5.3) Newtonův vztah (3.1) dostaneme:

$$\frac{dv}{dr} = \frac{r_2}{2\eta} \frac{dp}{dx}, \text{ a okrajové podmínky } v(r_1)=0 \quad (5.4)$$

Potom je řešením:

$$v(r_2) = -\frac{1}{4\eta} (r_1 - r_2) \frac{dp}{dx} \quad (5.5)$$

Tento vztah lze přepsat do podoby:

$$v(r_2) = -\frac{1}{4\eta} (r_1 - r_2) \frac{p_1 - p_2}{l} \quad (5.6)$$

Pro maximální rychlost v trubce platí:

$$v_{\max} = -\frac{r_1}{4\eta} \frac{p_1 - p_2}{l} \quad (5.7)$$

Průtočný objem (Hagenova-Poiseuilleova formule):

$$Q = -\frac{\pi r_1^4}{8\eta} \frac{dp}{dx} \quad (5.8)$$

Pro střední rychlost tedy platí:

$$v_{\text{stř}} = -\frac{Q}{\pi r_1^2} = -\frac{r_1^2}{8\eta} \frac{dp}{dx} = \frac{1}{2} v_{\max} \quad (5.9)$$

Pro výpočet objemového průtoku platí:

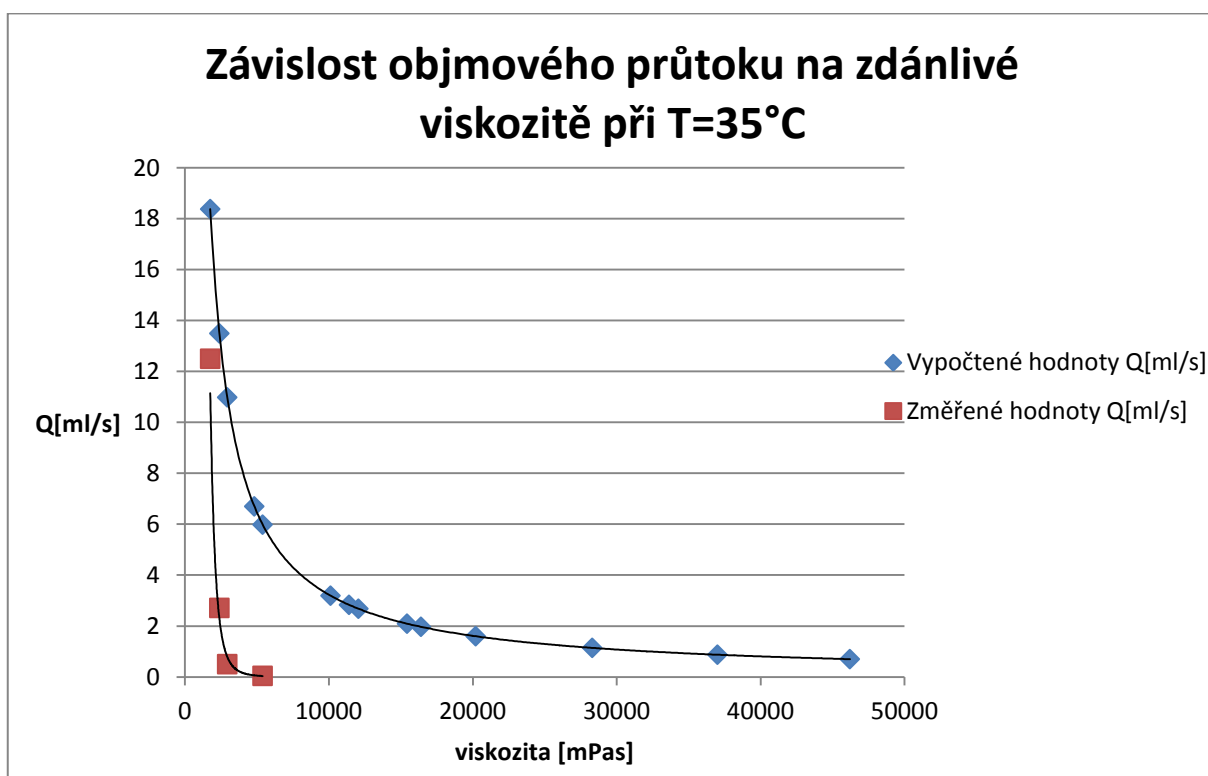
$$Q = S \cdot v_{\text{stř}} \quad (5.10)$$

5.2 Experimentální ověření průtoku magnetické kapaliny trubičkou

Experiment byl proveden za pomoci skleněné trubičky připevněné k pólovému nástavci magnetického obvodu. Na vrchní stranu trubičky jsem připevnil nálevku, v níž jsem udržoval konstantní hladinu magnetoreologické kapaliny. Opět jsem si nejprve změřil hodnoty magnetické indukce pro různé budící proudy magnetického obvodu opět pro hodnoty 2 – 10A. Hodnoty magnetické indukce se pohybovaly v rozmezí 1,6 – 24mT. Měřil jsem čas, za který proteče určité množství magnetoreologické kapaliny. Měřil jsem pro hodnoty 35 – 60°C. Pro vyšší teploty by bylo zapotřebí lepšího přípravku, kde by se doplňování magnetické kapaliny do nálevky neprovádělo ručně. Měření bylo prováděno až do takových hodnot magnetické indukce, kdy MR kapalina přestala protékat a ztuhla v trubičce.

5.3 Výsledky experimentu

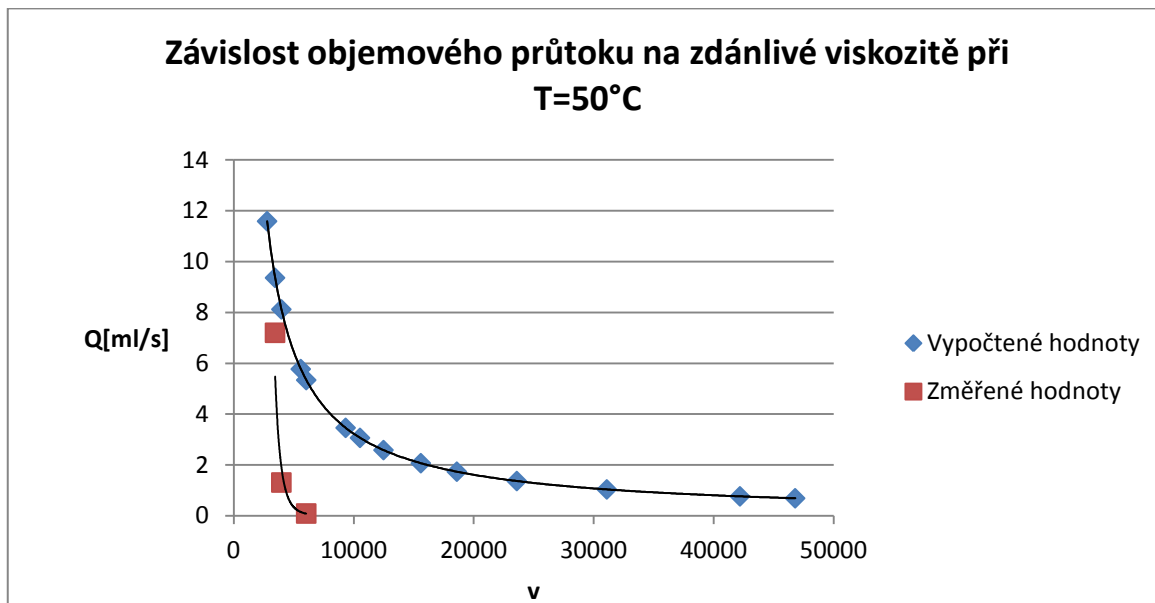
K porovnání výsledků experimentu a výpočtu bylo nutné extrapolovat výsledky z měření zdánlivé viskozity pro nižší hodnoty magnetické indukce než té, při které byla zdánlivá viskozita měřena. Takto získané hodnoty zdánlivé viskozity byly použity ve vztahu (5.7) k získání rychlosti průtoku, která byla aplikována do vztahu (5.10). Z hodnot objemového průtoku byl sestaven graf na (Obr. 5.2, Obr. 5.3, Obr. 5.4).



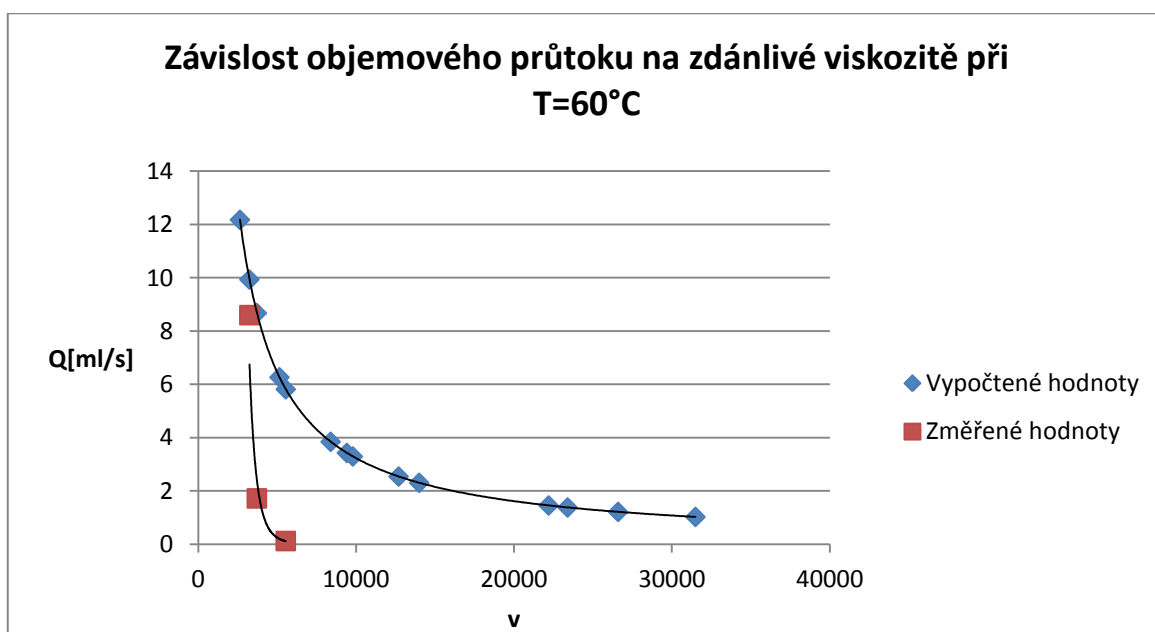
Obr. 5.2 Průtok kapaliny trubičkou při $T=35^{\circ}\text{C}$

Tab. 5.1 Změřené a vypočtené hodnoty objemového průtoku pro $T=35^{\circ}\text{C}$

$B[\text{mT}]$	4,7	7	10	12
$t[\text{s}]$	6	9	90	575
$V[\text{ml}]$	75	25	25	25
$Q_{\text{změ}}[\text{ml/s}]$	12,5	2,71	0,5	0,04
$Q_{\text{vyp}}[\text{ml/s}]$	18,38	13,49	10,98	5,98



Obr. 5.3 Průtok kapaliny trubičkou při T=35°C



Obr. 5.4 Průtok kapaliny trubičkou při T=35°C

Tab. 5.2 Změřené a vypočtené hodnoty objemového průtoku pro T=50°C a T=60°C

T=50°C			T=60°C				
B[mT]	4,7	7	12	B[mT]	4,7	7	12
t[s]	6	38	417	t[s]	7	29	556
V[ml]	50	50	50	V[ml]	50	50	50
Q _{změ} [ml/s]	8,33	1,31	0,12	Q _{změ} [ml/s]	7,2	1,72	0,09
Q _{vyp} [ml/s]	11,58	9,36	8,12	Q _{vyp} [ml/s]	12,1	9,93	8,67

Z grafů (Obr. 5.2, Obr. 5.3, Obr. 5.4) je patrné, že vypočtené a změřené hodnoty se k sobě blíží pouze při malých hodnotách magnetické indukce. Tento rozdíl lze vysvětlit tím, že ve vztahu použitém k výpočtu objemového průtoku není zahrnuté silové působení magnetického obvodu na měřenou MR kapalinu. Při výpočtu průtoku MR kapaliny za působení externího magnetického pole je tedy nutno počítat i se silovým působením magnetického pole. Další rozdíl mezi vypočtenými a změřenými hodnotami může způsobovat tixotropie blíže popsána v kapitole 3.

Vypočtené hodnoty objemového průtoku v závislosti na magnetické indukci při různých teplotách jsou v příloze 5.

Závěr

Relativní permeabilita fero kapaliny EFH1 je velice závislá na teplotě, kdy se vzrůstající teplotou se výrazně lineárně snižuje. Tento jev je dále ještě zvýšen přítomností externího magnetického pole. Relativní permeabilita magnetoreologické kapaliny MRHCCS4-B také klesá se vzrůstající teplotou, ale podstatně pomaleji než u fero kapaliny. Přítomnost externího magnetického pole také způsobuje další snížení relativní permeability, ale v případě MR kapaliny v podstatně menší míře. Pro konstrukci zařízení je tedy nutné znát rozsah teplot a intenzitu magnetického pole, ve které bude magnetická kapalina pracovat a pro tyto parametry změřit hodnotu relativní permeability. S takto získanou hodnotou relativní permeability je již možné provést přesný výpočet magnetického obvodu konkrétního zařízení.

Pro praktické využití magnetoreologické kapaliny, kde využíváme magnetoviskózního jevu, je velmi výhodná skutečnost, že se tento jev projevuje velice výrazně již při poměrně malých hodnotách magnetické indukce. Na druhou stranu je nutné počítat se zmenšením tohoto jevu při ohřívání magnetoreologické kapaliny. Proto je pro prakticky využitelné zařízení, které pracuje na principu magnetoviskózního jevu velice důležité zajistit chlazení magnetoreologické kapaliny. Jedná se o poměrně zajímavou problematiku, vzhledem k vysoké zdánlivé viskozitě a nízké tepelné vodivosti. MR kapalina MRHCCS4-B vykazovala tendenci k lokálnímu přehřátí v místě styku s ohřívací plochou, při překročení kritické teploty došlo k poškození detergentu a rozdužení nosné kapaliny a magnetických částic, a následně k jejímu znehodnocení. Přesnou hodnotu kritické teploty jsem neověřoval vzhledem k ceně MR kapaliny. Pro zařízení, jako je například brzda s magnetoreologickou kapalinou, je nutné kompenzovat snížení zdánlivé viskozity vlivem zvýšení teploty tak, aby byl zachován požadovaný brzdový moment. Toho lze dosáhnout zvýšením intenzity magnetického pole, jež na kapalinu působí.

Přesnou hodnotu měrné elektrické vodivosti se mi změřit nepodařilo, ale z měření plyne, že je natolik nízká, že fero kapalinu EFH1 i magnetoreologickou kapalinu MRHCCS4-B můžeme řadit mezi izolanty.

Průtok magnetoreologické kapaliny trubičkou není závislý pouze na hodnotě dynamické viskozity, ale také na silovém působení externího magnetického pole. Dynamická viskozita přechází ve zdánlivou viskozitu, jelikož magnetoreologická kapalina se neřídí lineárním Newtonovým zákonem. Zdánlivá viskozita je závislá na teplotě a na intenzitě magnetického pole, které na MR kapalinu působí. Dalším parametrem, jež ovlivňuje zdánlivou viskozitu MR kapaliny, je doba silového působení na MR kapalinu. K výpočtu objemového průtoku jsem použil změřené hodnoty zdánlivé viskozity pro danou teplotu i intenzitu magnetického pole. Přesto se změřené a vypočtené hodnoty značně rozcházejí. Předpokládám že, je to způsobeno především silovým působením magnetického pole na magnetoreologickou kapalinu.

Seznam použité literatury

- [1] MAYER D. *Magnetické kapaliny a jejich použití (1. část)* Časopis ELEKTRO 3/2007 str 78 -79.
- [2] MAYER D. *Magnetické kapaliny a jejich použití (2. část)* Časopis ELEKTRO 4/2007 str 5 -8.
- [3] POLCAR P. *Elektromechanický systém s magnetickou kapalinou*, Plzeň 2013, Disertační práce FEL ZČU Plzeň
- [4] http://liquidsresearch.co.uk/en-GB/magnetorheological_fluids-51.aspx
[cit. 12.4.2014]
- [5] https://www.ferrotec.com/index.php?id=audioFluid&vfp_id=125 [cit. 12.4.2014]
- [6] MAYER D. *Teorie elektromagnetického pole*, ZČU Plzeň
- [7] HAASZ V., SEDLÁČEK M. *Elektrická měření Přístroje a metody*, ČVUT Praha 1998
- [8] STEJSKAL J.: *Proudění magnetické kapaliny s aplikací Binghamova modelu*. Brno 2013, Diplomová práce VÚT FSI
- [9] PIRKL S.: *Metody měření reologických vlastností kapalin*. Ústav aplikované fyziky a matematiky. Univerzita Pardubice, 31. 5. 2005 [cit. 20.4.2014] Dostupné z <http://kf.upce.cz/Reologie%20a%20reometrie%20kapalin.doc>.
- [10] HRUŽÍK L. *Experimentální úlohy v tekutinových mechanizmech*, skripta Fakulta strojní Vysoká škola báňská, Ostrava 2008
- [11] http://www.viscotech.es/viscometer_vp1000.php?l [cit. 20.4.2014]

- [12] JEŽEK J.: *Mechanika tekutin*, skripta ČVUT Praha 2000
- [13] F. Opekar.: *Konduktometrie a dk metrie* Učební texty na Rř.f. UK
[cit. 7.5.2014] Dostupné z
[http://www.eurochem.cz/polavolt/obecne/elchem_metody/konduktometrie/oekar/konduktometrie.htm]
- [14] *Návod k obsluze inoLab Cond 730* [cit. 20.4.2014] dostupný z:
http://www.fagerberg.dk/cgi-files/mdmgfx/16050-ba75445e02_Cond_730.pdf
- [15] *Návod k obsluze altimetru DT830* [cit. 20.4.2014] dostupný z:
<https://www.jameco.com/Jameco/Products/ProdDS/1928476.pdf>
- [16] VIMMR J. *Podklady k přednášce Úvod do modelování v mechanice, Modelování proudění tekutin* FAV ZČU
[cit. 20.4.2014] dostupný z:
http://www.kme.zcu.cz/mhajzman/download/UMM09/UMM_9.pdf

PŘÍLOHY

Příloha 1

Tabulka hodnot měření relativní permeability ferokapaliny EFH1 Ferrotec

EPH1 Ferrotec $B=0$, $L_0=200\mu\text{H}$																				
$T[^\circ\text{C}]$	20	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
$L_{\text{vzestupně}}[\mu\text{H}]$	X	358	356	353	351	347	345	341	338	334	330	326	324	320	316	310	308	304	300	297
$L_{\text{vzestupně}}[\mu\text{H}]$	X	358	356	352	350	348	343	340	338	333	330	327	325	320	317	312	309	305	302	300
$L_{\text{vzestupně}}[\mu\text{H}]$	360	350	X	X	340	X	336	X	330	326	323	320	312	308	306	300	297	292	290	X
$L_{\text{vzestupně}}[\mu\text{H}]$	360	356	X	X	350	X	347	X	340	330	333	325	X	X	308	X	X	X	X	X
$L_{\text{vzestupně}}[\mu\text{H}]$	X	359	357	354	351	346	344	340	337	334	330	326	323	320	317	312	306	304	301	298
$L_{\text{vzestupně}}[\mu\text{H}]$	X	358	356	355	353	350	346	343	340	336	334	330	328	326	320	313	311	306	302	298
$T_{\text{průměrná}}[^\circ\text{C}]$	26,7	35,0	43,3	50,0	56,7	61,7	66,7	71,7	76,7	81,7	86,7	91,7	96,7	101,7	106,7	105,0	110,0	115,0	120,0	125,0
$L_{\text{průměrná}}[\mu\text{H}]$	359,5	355,2	350,7	348,0	343,5	339,0	336,7	333,0	329,8	326,4	320,5	320,0	316,6	312,4	307,4	308,5	304,8	301,3	298,3	293,5
μ_r průměrná [-]	1,80	1,80	1,78	1,77	1,76	1,73	1,72	1,71	1,69	1,67	1,65	1,64	1,62	1,60	1,58	1,55	1,53	1,52	1,50	1,48

Příloha 2

Tabulka hodnot závislosti zdánlivé viskozity na magnetické indukci při proměnných teplotách.

Magnetoreologická kapalina MRHCCS4-B

Závislost magnetické indukce B na budicím proudu I									
I [A]	2	3	4	5	6	7	8	9	10
B [mT]	25,7	28,1	31	33,6	36,3	39,2	41,5	44,3	47,8
Závislost zdánlivé viskozity η na magnetické indukci B při různých teplotách T									
$T=35^{\circ}\text{C}$									
B [mT]	25,7	28,1	31	33,6	36,3	39,2	41,5	44,3	47,8
η [mPas]	11400	16400	20200	28300	37000	46200	X	X	X
$T=40^{\circ}\text{C}$									
B [mT]	25,7	28,1	31	33,6	36,3	39,2	41,5	44,3	47,8
η [mPas]	9600	15600	18600	23600	31100	42200	46800	X	X
$T=50^{\circ}\text{C}$									
B [mT]	25,7	28,1	31	33,6	36,3	39,2	41,5	44,3	47,8
η [mPas]	9800	12700	14000	22200	23400	26600	31500	42100	47000
$T=60^{\circ}\text{C}$									
B [mT]	25,7	28,1	31	33,6	36,3	39,2	41,5	44,3	47,8
η [mPas]	8700	11500	14200	18300	17900	20200	29400	33500	42500
$T=70^{\circ}\text{C}$									
B [mT]	25,7	28,1	31	33,6	36,3	39,2	41,5	44,3	47,8
η [mPas]	8400	10100	12400	12500	15100	17200	25200	31100	37100
$T=82^{\circ}\text{C}$									
B [mT]	25,7	28,1	31	33,6	36,3	39,2	41,5	44,3	47,8
η [mPas]	7900	8900	10100	10000	12200	15700	19900	27500	32000
$T=88^{\circ}\text{C}$									
B [mT]	25,7	28,1	31	33,6	36,3	39,2	41,5	44,3	47,8
η [mPas]	7300	8600	9300	10200	11900	14700	19300	22000	28600

Příloha 3

Tabulka hodnot závislosti relativní permeability na magnetické indukci při proměnných teplotách.

Ferokapalina EFH1

EFH1 Ferrotec, $L_0=190\mu\text{H}$									
Závislost magnetické indukce B na budícím proudu I									
I [A]	2	3	4	5	6	7	8	9	10
B [mT]	21	23	25,4	27,5	29,7	32,1	34	36,3	39,2
Závislost relativní permeability μ_r na magnetické indukci B při různých teplotách T									
B [mT]	21	23	25,4	27,5	29,7	32,1	34	36,3	39,2
$T=35^\circ\text{C}$									
L_{MK} [μH]	310	292	281	272	267	261	257	254	251
μ_r [-]	1,63	1,54	1,48	1,43	1,41	1,37	1,35	1,34	1,32
$T=40^\circ\text{C}$									
L_{MK} [μH]	307	291	280	272	266	260	257	253	250
μ_r [-]	1,62	1,53	1,47	1,43	1,40	1,37	1,35	1,33	1,32
$T=50^\circ\text{C}$									
L_{MK} [μH]	302	287	277	270	265	260	255	252	249
μ_r [-]	1,59	1,51	1,46	1,42	1,39	1,37	1,34	1,33	1,31
$T=60^\circ\text{C}$									
L_{MK} [μH]	300	287	276	269	263	260	255	251	248
μ_r [-]	1,58	1,51	1,45	1,42	1,38	1,37	1,34	1,32	1,31
$T=70^\circ\text{C}$									
L_{MK} [μH]	294	281	274	267	262	257	252	250	247
μ_r [-]	1,55	1,48	1,44	1,41	1,38	1,35	1,33	1,32	1,30
$T=80^\circ\text{C}$									
L_{MK} [μH]	292	278	272	264	259	255	251	248	246
μ_r [-]	1,54	1,46	1,43	1,39	1,36	1,34	1,32	1,31	1,29
$T=90^\circ\text{C}$									
L_{MK} [μH]	287	275	268	262	257	253	250	246	244
μ_r [-]	1,51	1,45	1,41	1,38	1,35	1,33	1,32	1,29	1,28
$T=100^\circ\text{C}$									
L_{MK} [μH]	278	271	264	254	253	250	246	245	242
μ_r [-]	1,46	1,43	1,39	1,34	1,33	1,32	1,29	1,29	1,27
$T=120^\circ\text{C}$									
L_{MK} [μH]	269	263	256	254	251	246	244	242	239
μ_r [-]	1,42	1,38	1,35	1,34	1,32	1,29	1,28	1,27	1,26

Příloha 4

Tabulka hodnot závislosti relativní permeability na magnetické indukci při proměnných teplotách.

Magnetoreologická kapalina MRHCCS4-B

MRHCCS4-B Liquids Research, $L_0=210\mu\text{H}$									
Závislost magnetické indukce B na budícím proudu I									
I [A]	2	3	4	5	6	7	8	9	10
B [mT]	25,7	28,1	31	33,6	36,3	39,2	41,5	44,3	47,8
Závislost relativní permeability μ_r na magnetické indukci B při různých teplotách T									
B [mT]	25,7	28,1	31	33,6	36,3	39,2	41,5	44,3	47,8
$T=30\text{ }^\circ\text{C}$									
$L_{\text{MK}}[\mu\text{H}]$	432	429	426	423	420	418	417	415	412
μ_r [-]	2,06	2,04	2,03	2,01	2,00	1,99	1,99	1,98	1,96
$T=40\text{ }^\circ\text{C}$									
$L_{\text{MK}}[\mu\text{H}]$	429	426	423	420	418	416	414	412	410
μ_r [-]	2,04	2,03	2,01	2,00	1,99	1,98	1,97	1,96	1,95
$T=50\text{ }^\circ\text{C}$									
$L_{\text{MK}}[\mu\text{H}]$	428	425	422	420	417	415	413	411	409
μ_r [-]	2,04	2,02	2,01	2,00	1,99	1,98	1,97	1,96	1,95
$T=60\text{ }^\circ\text{C}$									
$L_{\text{MK}}[\mu\text{H}]$	425	422	419	417	414	412	410	408	406
μ_r [-]	2,02	2,01	2,00	1,99	1,97	1,96	1,95	1,94	1,93
$T=70\text{ }^\circ\text{C}$									
$L_{\text{MK}}[\mu\text{H}]$	423	420	417	415	413	411	409	407	405
μ_r [-]	2,01	2,00	1,99	1,98	1,97	1,96	1,95	1,94	1,93
$T=80\text{ }^\circ\text{C}$									
$L_{\text{MK}}[\mu\text{H}]$	422	418	416	413	411	409	407	406	404
μ_r [-]	2,01	1,99	1,98	1,97	1,96	1,95	1,94	1,93	1,92
$T=90\text{ }^\circ\text{C}$									
$L_{\text{MK}}[\mu\text{H}]$	419	416	414	411	410	408	406	404	402
μ_r [-]	2,00	1,98	1,97	1,96	1,95	1,94	1,93	1,92	1,91
$T=100\text{ }^\circ\text{C}$									
$L_{\text{MK}}[\mu\text{H}]$	413	411	409	407	406	404	402	401	399
μ_r [-]	1,97	1,96	1,95	1,94	1,93	1,92	1,91	1,91	1,90

Příloha 5

Vypočtené hodnoty objemového průtoku trubičkou pro různé hodnoty viskozity.

T=35°C													
B[mT]	4,7	7	10	12	16,8	17,9	24	25,7	28,1	31	33,6	39,2	41,5
η mPas]	2392	2939	4819	5397	10116	12052	15432	11400	16400	20200	28300	37000	46200
Q[ml/s]	13,49	10,98	6,69	5,98	3,19	2,67	2,09	2,83	1,96	1,59	1,14	0,87	0,69
T=35°C													
B[mT]	4,7	7	10	12	16,8	17,9	24	25,7	28,1	31	33,6	39,2	41,5
η mPas]	2785	3448	3975	5591	6046	9330	10528	12487	15600	18600	23600	31100	42200
Q[ml/s]	11,58	9,36	8,12	5,77	5,33	3,45	3,06	2,58	2,06	1,73	1,36	1,03	0,76
T=35°C													
B[mT]													
η mPas]	2651	3249	3721	5152	5551	8394	9420	9800	12700	14000	22200	23400	26600
Q[ml/s]	12,17	9,93	8,67	6,26	5,81	3,84	3,42	3,29	2,54	2,30	1,45	1,37	1,21