

**Západočeská univerzita v Plzni**

**Fakulta elektrotechnická**

**Katedra technologií a měření**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Vyšetření permeability magnetických kapalin**

Plzeň 2013

Bc. Miroslav Kubát

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

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Miroslav KUBÁT**  
Osobní číslo: **E11N0021P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Vyšetření permeability magnetických kapalin**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Stručně popište fyzikální vlastnosti, složení, členění, způsoby výroby a průmyslové aplikace magnetických kapalin.
2. Popište obecné magnetické vlastnosti těchto látek, jejich matematické modely, definujte permeabilitu.
3. Navrhněte nebo zvolte již existující metodu vyšetření magnetických vlastností tekutých materiálů a aplikujte ji na vzorky magnetických kapalin používaných na KTE. Diskutujte výsledky.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Odenbach, S.: Ferrofluids - Magnetically Controlled Suspensions, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2003, pp. 171-178.
2. Mayer, D., Polcar, P.: A Novel Approach to Magnetic Fluids Permeability Measurement, Proc. AMTEE 2011, Pilsen, 2011.
3. Další bude upřesněna při konzultaci.

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Petr Polcar**

Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

## Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou měření permeability magnetických kapalin. V první části se zabývá charakteristikou magnetických kapalin, jejich členěním, složením, fyzikálními vlastnostmi, výrobou a jejich aplikacemi. Nejdůležitější vlastnosti magnetických kapalin jsou matematicky popsány. Jako důležitá vlastnost magnetických materiálů je zde popsána permeabilita.

V druhé části je popsán návrh vlastní metody vyšetření permeability magnetických kapalin. Tato metoda je následně realizována pro vyšetření magnetizační křivky komerční magnetické kapaliny. Na základě výsledků je metoda zhodnocena.

## Klíčová slova

Magnetická kapalina, fero kapalina, permeabilita, magnetické měření, rozptylové toky, numerická simulace

80 stran    42 obrázků    7 tabulek    14 grafů    1 příloha

ZČU,            FEL,            Plzeň,            květen            2013

## **Abstract**

This thesis deals with magnetic fluids problematics. This thesis describes magnetic fluid characteristic, composition, separation, physical properties, it's production and application. The most important properties are mathematically described. Permeability is there described as one important property of magnetic materials.

The second part of this thesis contains a magnetic measurement method proposal and it's realization. The results were used to get a magnetization characteristic and discussed.

## **Key words:**

Magnetic fluid, ferrofluid, permeability, magnetic properties measurement, leakage flux, numeric simulation

80 Pages 42 figures 7 tables 14 graphs 1 attachment

WBU, FEE, Pilsen, May 2013

## 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.

V Plzni dne .....

podpis .....

## **Poděkování**

Chtěl bych tímto poděkovat Ing. Petru Polcarovi za vedení práce, za ochotu a vstřícnost při konzultacích a experimentech, které během tvorby této práce proběhly.

# 1 Obsah

1	Obsah .....	8
2	Seznam symbolů .....	10
3	Úvod.....	13
4	Teoretická část .....	14
4.1	Magnetické kapaliny .....	14
4.2	Magnetorheologické kapaliny.....	15
4.3	Magnetické vlastnosti magnetických kapalin .....	15
4.4	Chování kapalin ve stejnosměrném magnetickém poli .....	16
4.5	Chování ve střídavém magnetickém poli.....	17
4.6	Magnetizace ferokapalin.....	18
4.7	Závislost velikosti částic na chování magnetických kapalin .....	19
4.8	Matematický model .....	21
4.9	Magnetoviskózní efekt v ideální magnetické kapalině.....	22
4.10	Ideální model magnetické kapaliny bez interakcí.....	24
4.11	Permeabilita .....	26
4.11.1	Vysvětlení pojmu permeabilita.....	26
4.11.2	Komplexní permeabilita .....	27
4.11.3	Počáteční permeabilita.....	28
4.11.4	Efektivní permeabilita.....	28
4.11.5	Odvození permeability vakua .....	28
4.11.6	Chování materiálů v závislosti na velikosti relativní permeability.....	29
4.12	Permeabilita magnetických kapalin .....	30
4.13	Výroba magnetických kapalin .....	31
4.13.1	Mokrý mletí.....	32
4.13.2	Srážková metoda.....	32
4.13.3	Substituční metoda.....	32
4.13.4	Mikroemulzní technika .....	32
4.13.5	Dekompozice organo-metalických sloučenin.....	33
4.13.6	Další možnosti výroby magnetických kapalin.....	33
4.14	Technické aplikace magnetických kapalin .....	33
4.14.1	Užití v reproduktorech .....	33
4.14.2	Chlazení transformátorů .....	34
4.14.3	Vliv na průrazné napětí transformátorového oleje .....	34
4.14.4	Magnetické těsnění .....	35
4.14.5	Separátor nemagnetických částic o rozdílných hustotách .....	36
4.14.6	Rheomagnetické tlumiče.....	37
4.15	Použití v nanotechnologiích.....	38
4.15.1	Nanomotor, nanogenerátor .....	39
4.16	Aplikace magnetických kapalin v medicíně .....	40
4.16.1	Magnetické cílení léčiv .....	40
4.16.2	Magnetická hypertermie .....	43
4.16.3	Další možnosti použití ferokapalin v medicíně .....	43
5	Praktická část .....	44
5.1	Modelování navrhovaného přípravku .....	44
5.1.1	Model 1 .....	45
5.1.2	Model 2 .....	48



5.1.3	Model 3 .....	51
5.1.4	Model 4 .....	54
5.1.5	Model 5 .....	57
5.1.6	Model 6 a 7 .....	60
5.1.7	Shrnutí výsledků modelování .....	63
5.1.8	Charakteristika přípravku .....	63
5.2	Návrh měřicí metody .....	64
5.2.1	Návrh 1 .....	64
5.2.2	Návrh 2 .....	65
5.2.3	Návrh 3 .....	67
5.2.4	Vyhodnocení měřicích metod .....	68
5.3	Realizace měření .....	68
5.4	Záznam z měření .....	69
5.5	Vyhodnocení měření .....	72
5.6	Hodnocení měřicí metody .....	73
6	Závěr .....	74
7	Použitá literatura .....	75
8	Přílohy .....	79

## 2 Seznam symbolů

Symbol	význam
$A$	magnetický vektorový potenciál [Wb/m]
$B$	magnetická indukce [T]
$B_0$	amplituda magnetické indukce [T]
$d$	poloměr [m]
$d_h$	hydrodynamický průměr částic [m]
$d_m$	průměr magnetického jádra [m]
$d_{mag}$	průměrný průměr magnetických částic [m]
$F$	síla [N]
$g$	gravitační zrychlení [m/s <sup>2</sup> ]
$H$	magnetická intenzita [A/m]
$H_0$	amplituda magnetické intenzity [A/m]
$I$	elektrický proud [A]
$i_{1,2}$	proud v primárním, sekundárním vinutí [A]
$k$	Boltzmannova konstanta
$L_{1,2}$	indukčnost primárního, sekundárního vinutí [H]
$l$	délka [m]
$m$	magnetický moment [A/m <sup>2</sup> ]
$M$	magnetizace [A/m]
$M_0$	spontánní magnetizace [A/m]
$M_s$	saturační magnetizace [A/m]
$M_{eq}$	rovnovážná hodnota magnetizace [A/m]
$M_{\perp}$	nerovnovážná složka magnetizace kolmá ke směru magnetického pole [A/m]
$M_v$	vzájemná indukčnost [H]
$N$	počet závitů vinutí [-]
$n$	transformační poměr [-]
$S$	plocha [m <sup>2</sup> ]
$S'$	relativní viskozita [-]

$S_{\parallel}'$	relativní viskozita [-] magnetické pole působí rovnoběžně s tokem kapaliny
$S_{\perp}'$	relativní viskozita [-] magnetické pole působí kolmo na tok kapaliny
$T$	Brownova relaxační doba rotační difúze částic [s]
$T_k$	kroučící moment [Nm]
$t$	čas [s]
$u_i$	indukované napětí [V]
$V_h$	hydrodynamický objem [m <sup>3</sup> ]
$V_m$	objem magnetického jádra [m <sup>3</sup> ]
$v$	rychlost [m/s]
<b>řecké symboly</b>	<b>význam</b>
$\alpha$	langevinův parametr [-]
$\eta$	viskozita [Ns/m <sup>2</sup> ]
$\eta_r$	rotační viskozita [Ns/m <sup>2</sup> ]
$\mu$	permeabilita [H/m]
$\mu_0$	permeabilita vakua [H/m]
$\mu_r$	relativní permeabilita [-]
$\pi$	Ludolfovo číslo
$\rho_k$	hustota ferokapaliny [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_s$	hustota materiálu [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	měrná elektrická vodivost [S/m]
$\tau_B$	časová konstanta [s]
$\Phi$	magnetický indukční tok [Wb]
$\Phi_v$	magnetický objemový zlomek [-]
$\Phi_h$	hydrodynamický objemový zlomek [-]
$\chi_i$	počáteční susceptibilita [-]
$\Omega$	lokální vířivost [1/s]

<b>System značení</b>	
$X$	Skalár
$\underline{X}$	Vektor
$\overline{X}$	Fázor

### 3 Úvod

Potřeba nových řešení stávajících i nově vznikajících problémů s sebou nutně nese potřebu vyvíjet nové materiály. Jedním takovým materiálem jsou magnetické kapaliny. Princip magnetických kapalin je známý již poměrně dlouho, avšak vzhledem k technickým nedokonalostem nenacházely magnetické kapaliny až donedávna své praktické uplatnění. V současnosti lze tento vysoce perspektivní materiál najít v mnoha technických prakticky využívaných aplikacích a v mnoha dalších aplikacích ve fázi výzkumu či vývoje. Magnetické kapaliny mají vysoký aplikační potenciál také v medicíně. V této oblasti již vývoj pokročil do stádia experimentální léčby, jejíž výsledky slibují budoucí uplatnění tohoto materiálu. Vzhledem k širokému úhlu současného i potenciálního uplatnění má oblast magnetických kapalin multidisciplinární charakter.

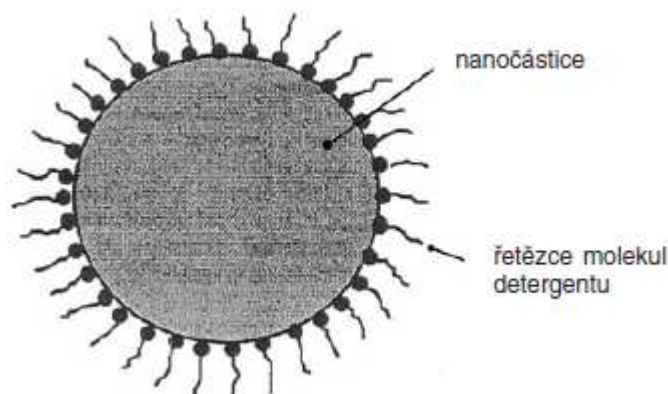
Magnetické kapaliny jsou jednou z oblastí zájmu Katedry teoretické elektrotechniky. Pracovníci katedry v současnosti vyvíjejí či inovují řadu zařízení využívající unikátních vlastností tohoto materiálu, jedná se např. o magnetorheologickou brzdu, magnetorheologické tlumiče, feroKapalinové ucpávky či feroKapalinové aktuátory.

Pro kvalifikovanou predikci chování zařízení hraje zásadní roli znalost vlastností použitých materiálů, v případě určování magnetického chování látek je nejdůležitějším parametrem jejich permeabilita. V porovnání s pevnými feromagnetiky, permeabilita magnetických kapalin je veličina dosahující relativně nízkých, obtížně měřitelných hodnot. Oblast měření této veličiny dosud není zcela probádaná. Předkládaná práce si klade za cíl přispět k probádání této oblasti návrhem nové měřicí metody určování permeability magnetických kapalin.

## 4 Teoretická část

### 4.1 Magnetické kapaliny

Magnetické kapaliny (nazývány též koloidní ferokapaliny, ferrofluida, nanokompozitní magnetika) jsou suspenze tvořené feromagnetickými nebo ferimagnetickými nanočásticemi a nosnou kapalinou. Tyto částice jsou přibližně kulovitěho tvaru s průměrem v řádu nanometrů, nejčastěji v rozmezí 3 až 15 nanometrů. Nanočástice mohou být vyrobeny z práškového železa nebo látky obsahující  $\text{Fe}^{2+}$  nebo  $\text{Fe}^{3+}$  (jedná se například o oxid železa –  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  magnetit nebo maghemit), niklu, feritu atp. Každá nanočástice obsahuje Weissovu doménu se spontánní magnetizací, představuje tedy miniaturní permanentní magnet. Nepůsobí-li na kapalinu vnější magnetické pole, jsou magnetické momenty nanočástic náhodně orientovány a kapalina se tak navenek jeví jako nemagnetická. Vzhledem k miniaturním rozměrům magnetických částic není jejich pohyb ovlivňován gravitační silou a částice se tedy v nosné kapalině pohybují náhodným tepelným (Brownovým) pohybem. Mechanické a chemické vlastnosti magnetické kapaliny určuje nosná kapalina, magnetické vlastnosti určují vlastnosti nanočástic a jejich koncentrace.



Obr. 1 magnetická nanočástice obalená vrstvou detergentu [1]

Základním problémem magnetických kapalin je jejich koloidní stabilita. Koloidně stabilní je magnetická kapalina v případě, kdy nedochází ke shlukování nanočástic vlivem magnetických a van der Walsových sil. Shlukování nanočástic se zamezuje pokrytím jejich povrchů ochranným polymerním obalem, tzv. detergentem (surfaktantem), který vytváří

odpudivé síly mezi částicemi a zabraňuje tím přímému kontaktu mezi nanočásticemi. Detergentem může být např. kyselina mastná. Detergent vytváří na povrchu nanočástic dlouhé (1 až 3 nm) řetězce polárních molekul tvořené hydrofilní hlavou, pevně vázanou s magnetickou nanočásticí, a hydrofobním ocasem, přitahovaným molekulami nosné kapaliny. Typická magnetická kapalina je tvořena z 85 % nosnou kapalinou, z 10 % detergentem a z 5 % pevnými magnetickými látkami. [1]

## **4.2 Magnetorheologické kapaliny**

Magnetorheologické kapaliny se skládají stejně jako fero kapaliny ze třech částí. Pevnou složku tvoří magnetický prášek složený z částic o průměru v řádu mikrometrů, obvykle 3-5  $\mu\text{m}$ , kapalnou složku tvoří např. uhlovodíkový olej a surfaktant, který udržuje částice rozptýlené v kapalině a zpomaluje působení gravitační síly.

Oproti fero kapalinám vyniká silnějším magnetoviskózním jevem, nevýhodou však je větší sklon k usazování (tj. menší koloidní stabilita) způsobený velikostí částic.[2]

## **4.3 Magnetické vlastnosti magnetických kapalin**

Bez působení vnějšího magnetického pole jsou nanočástice volně rozptýleny v objemu kapaliny a kapalina se navenek chová jako nemagnetická. Pokud na kapalinu působí magnetické pole, dojde k uspořádání částic dle siločar přiloženého pole, přičemž nejvíce částic se bude vyskytovat v místech nejvyššího magnetického toku. U magnetických kapalin má závislost magnetické indukce na intenzitě magnetického pole podobný průběh jako u feromagnetik, tedy s rostoucím  $H$  se  $B$  asymptoticky blíží hodnotě stavu nasycení (saturace). Saturační magnetizace některých kapalin může dosáhnout hodnoty až 1,3 T. Jejich chování v magnetickém poli připomíná chování paramagnetik, můžeme se setkat s označením superparamagnetika.

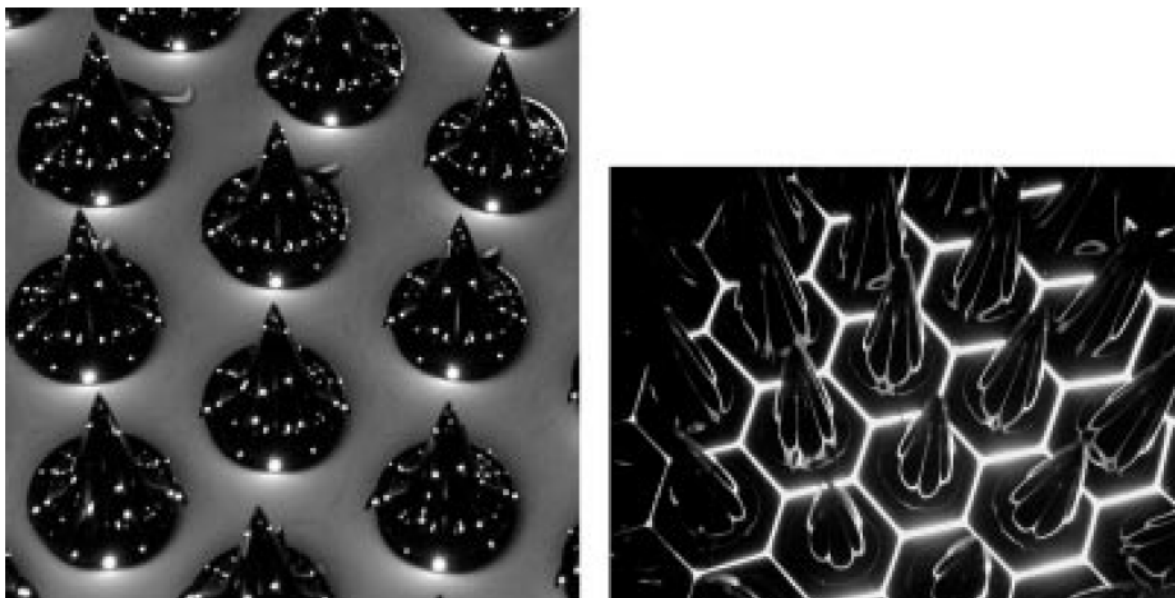
Pracovní teplota magnetických kapalin se pohybuje v rozmezí -125 až 200  $^{\circ}\text{C}$ . S rostoucí teplotou magnetické kapaliny klesá hodnota její magnetické susceptibility až do dosažení Currieovy teploty, kdy své magnetické vlastnosti ztrácí úplně, tedy dosahuje relativní permeability  $\mu_r=1$ .

Magnetické pole výrazně mění některé fyzikální vlastnosti magnetických kapalin. Důležitou a v mnoha aplikacích využívanou vlastností magnetických kapalin je magnetoviskózní jev, tedy změna viskozity vlivem magnetického pole. Kapalina však zůstává tekutá i v silném magnetickém poli vlivem detergentových řetězců. Viskozita se změní v řádu milisekund od změny magnetického pole. Chování magnetické kapaliny se liší v závislosti na druhu magnetického pole. Jinak se bude chovat při působení stejnosměrného, střídavého nebo pulzního pole. Chování záleží také na frekvenci. Při působení střídavého pole dochází k neustálému přemagnetování magnetické kapaliny, dochází ke ztrátám hysterézním a ztrátám vířivými proudy, které způsobují ohřev. Některé magnetické kapaliny vykazují ve střídavém poli tzv. negativní viskozitu, tedy pokles viskozity s rostoucí intenzitou magnetického pole.

Magnetické pole ovlivňuje i další vlastností magnetických kapalin, např. optické vlastnosti. [1]

#### **4.4 Chování kapalin ve stejnosměrném magnetickém poli**

Ferokapalina vytváří ve stejnosměrném magnetickém poli velice zajímavé křivky, tvary a struktury vlivem ferohydrodynamické nestability. Po přiložení magnetického pole se částice ferokapaliny orientují ve směru magnetického pole a vytváření struktury podobné strukturám na následujících obrázcích.

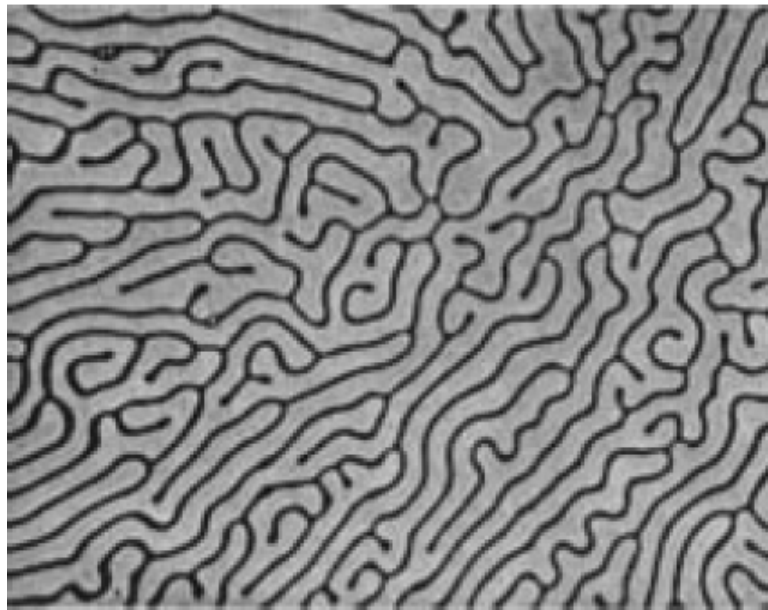


*Obr.2,3: Tvary v závislosti na intenzitě přiloženého pole [3]*



Na obr. 2 a 3 je zachyceno chování kapaliny se saturační magnetizací 0,04 T. Kapalina se začne tvarovat dle přiloženého magnetického pole, pokud magnetická síla překoná stabilizační efekt hmotnosti kapaliny a povrchového tření. Vlevo jsou zachyceny tvary kapaliny při působení kolmo přiloženého magnetického pole o indukci 0,02 T, vpravo působí na kapalinu pole o indukci 0,033 T.

V případě, že bude ferokapalina vložena mezi dvě skleněné desky, vzniknou struktury podobné té na obr. 4.



*Obr.4: Struktury tvořící ferokapalina vložena mezi dvě skleněné desky v magnetickém poli [3]*

Magnetické vlastnosti ferokapalin mají široké možnosti použití. Některé aplikace jsou zatím součástí výzkumu, některé se již dlouhou dobu používají. Aplikacemi využívající chování ve stejnosměrném magnetickém poli jsou např. chladicí systém reproduktorů, těsnění u rotující hřídele, tlumiče krokových motorů, tlumiče nárazu. Vzhledem k velikostem částic ferokapaliny se lze zabývat myšlenkou užití ferokapalin v nanotechnologiích. Takovými aplikacemi by mohly být nanomotory, nanogenerátory, nanopumpy, nanoaktuátory a další podobné nanoaplikace. [3]

#### **4.5 Chování ve střídavém magnetickém poli**

Ve střídavém magnetickém poli se ferokapalina chová jiným způsobem než v poli stejnosměrném. Ferokapalina se vlivem měnícího se pole pohybuje v závislosti na aktuálním

směru pole. Pro určení směru pohybu hraje důležitou roli tzv. kritická síla magnetického pole. Pokud na kapalinu působí síla menší než kritická, kapalina se pohybuje proti směru působící síly, pokud bude síla větší než kritická, kapalina se bude pohybovat ve stejném směru spolu s polem. Hodnota kritické magnetické síly závisí na frekvenci, koncentraci rozptýlených částic a dynamické viskozitě kapaliny.

Viskozita kapaliny způsobuje zpoždění mezi změnou magnetizace částic a změny orientace pole. V případě, kdy magnetizace  $\mathbf{M}$  nebude kolineární vzhledem k intenzitě pole  $\mathbf{H}$ , vzniká kroutící moment

$$\mathbf{T}_k = \mu_0 \cdot \mathbf{M} \times \mathbf{H} \quad (1)$$

Tento moment způsobuje rotaci částic. Takto vyvolané pohyby částic způsobují pokles efektivní viskozity, jev se nazývá negativní viskozita. [3]

#### 4.6 Magnetizace feroKapalin

Ferokapaliny lze plně charakterizovat až po zjištění jejich magnetizačních vlastností, tj. je nutné znát závislost magnetizace  $\mathbf{M}$  na vnitřní magnetické intenzitě  $\mathbf{H}_i$ . Saturační magnetizace  $M_s$  je udána hodnotou  $H \rightarrow \infty$ . Magnetický objemový zlomek  $\Phi_v$  pak lze určit pomocí  $M_s$  a spontánní magnetizace  $M_0 = 4,5 \cdot 10^5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$  dle vztahu

$$\Phi_v = \frac{M_s}{M_0} \quad (2)$$

Obecně lze magnetizace monodisperzní koloidní feroKapaliny zapsat Langevinovou formulí

$$M = M_0 \cdot \Phi_v \cdot \left( \coth \alpha - \frac{1}{\alpha} \right) \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{\mu_0 \cdot m \cdot H_i}{k \cdot T} \quad (4)$$

Kde  $m$  určuje magnetický moment částic,  $k$  je Boltzmannova konstanta a  $T$  je teplota. Pro velmi nízké hodnoty parametru  $\alpha$ , tedy pro velmi nízké vnitřní magnetické pole  $H_i$  lze použít lineární aproximaci vztahu

$$M = M_0 \cdot \Phi_v \cdot \frac{\mu_0 \cdot m \cdot H_i}{3 \cdot k \cdot T} = \chi_i \cdot H_i \quad (5)$$

Kde  $\chi_i$  je počáteční susceptibilita, která určuje počátek magnetizační křivky v oblasti  $H_i \rightarrow 0$  a může být využita při výpočtu průměrného průměru rozptýlených částic  $d_{mag}$

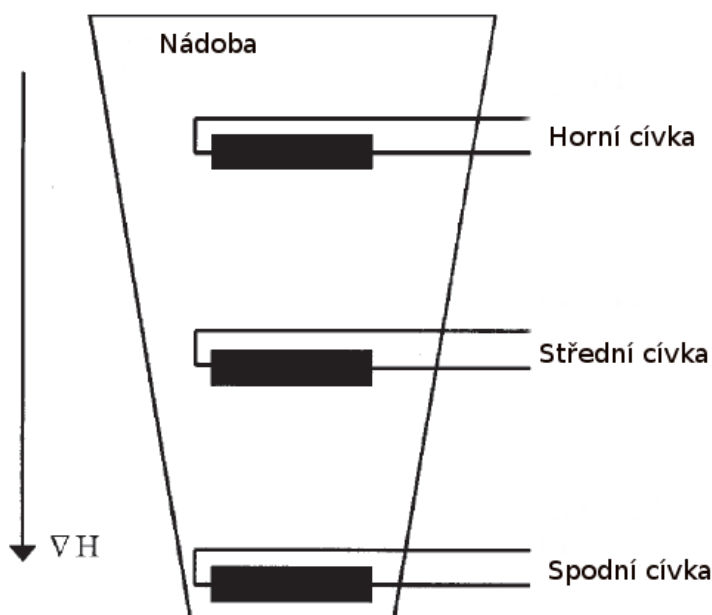
$$\chi_i = \frac{\pi}{18} \cdot \Phi_v \cdot \mu_0 \cdot \frac{M_0^2 \cdot d_{mag}^3}{k \cdot T} \quad (6)$$

Tyto vztahy byly použity při vyhodnocování níže popsaného experimentu. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 1. [4]

#### **4.7 Závislost velikosti částic na chování magnetických kapalin**

Chování v magnetickém poli silně ovlivňuje velikost částic rozptýlených v jejím objemu. Po přiložení magnetického pole ke kapalině se částice budou orientovat ve směru přiloženého pole. Způsob, jakým budou měnit svoji orientaci, je dán typem relaxačního procesu, který u dané částice bude převládat. U menších částic převládá tzv. Néelův relaxační proces, tj. částice relaxuje volnou rotací magnetických momentů uvnitř částice. Takto se chovající částice jsou označovány jako magneticky měkké. U větších částic převládá Brownův relaxační proces, tj. částice rotují celé v závislosti na prostorově fixovaném vnitřním magnetickém momentu. Takto se chovající částice jsou označovány jako magneticky tvrdé [4].

Velikost částic silně ovlivňuje velikost mezičásticových interakcí. Mezi malými částicemi jsou hodnoty mezičásticových interakcí zanedbatelné, mezitím co mezičásticové interakce velkých částic silně ovlivňují chování kapaliny v magnetickém poli. Velké částice mají schopnost seskupovat se do řetězců při působení vnějšího magnetického pole vlivem mezičásticových interakcí. Po přiložení gradientního pole se částice přesouvají do míst s největším gradientem. Velké částice dosahují vlivem působícího gradientního pole vyšších rychlostí, která se po seskupení částic do řetězců ještě zvýší. Důsledkem tedy je, že v místech s vyšším gradientem se přednostně dostanou větší částice a jejich seskupení. Rozmístění velkých a malých částic v kapalině vlivem gradientního pole silně ovlivňuje viskozitu kapaliny. Tento jev experimentálně prověřili Thurm a Odenbach. Na zařízení dle obr.5 sestavili gradientní magnetické pole s maximální intenzitou o hodnotě  $H = 10^7$  A/m. Po skončení separačního procesu došlo k navýšení objemového podílu velkých částic v okolí spodní cívky a ke snížení objemového podílu v okolí horní cívky. [4]



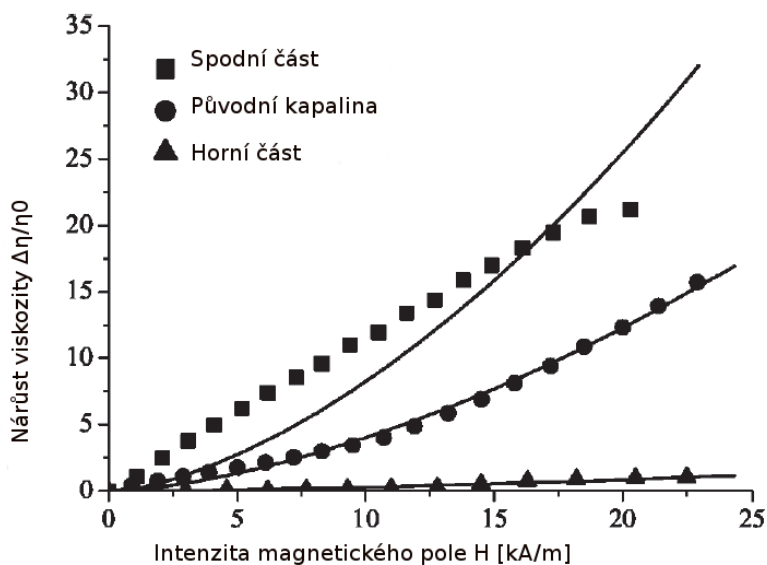
Obr.5: Zařízení pro experimentální ověření vlivu velikosti částic na jejich distribuci [4]

Části byly odděleny a podrobeny dalšímu měření. Vlastnosti původní kapaliny a jejích částí po provedení separace jsou uvedeny v tabulce 1.

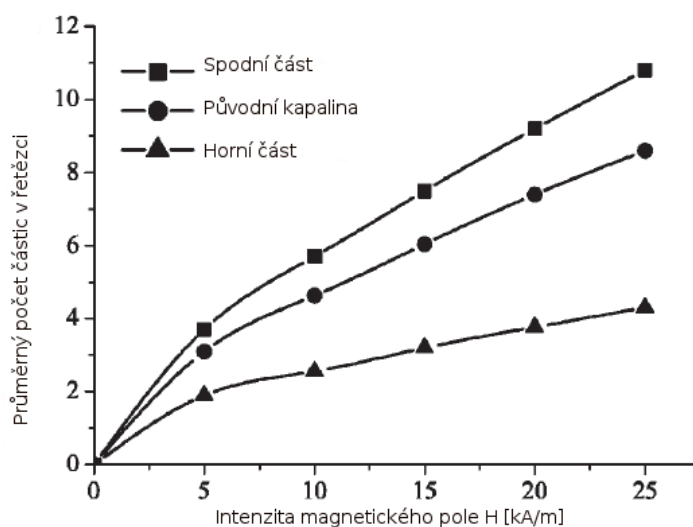
Název kapaliny:	$M_s$ [kA·m <sup>-1</sup> ]	$\chi_i$ [-]	$\Phi_v$ [%]	$d_{mag}$ [nm]	$\Delta\eta_{H20}/\eta_0$ [-]
APG513					
Původní kapalina	32,6	1,34	7,24	12,0	12
Horní část	30,0	1,18	6,63	11,6	1
Spodní část	33,1	1,42	7,35	12,1	18

Tabulka 1: Výsledky měření magnetizace kapaliny [4]

Provedením experimentu vznikly tři různé kapaliny, lišící se obsahem velkých částic. Bylo tedy možné experimentálně prověřit vliv intenzity magnetického pole na viskozitu (graf 1) a délku vznikajících řetězců částic (graf 2).



Graf 1: Vliv intenzity magnetického pole na viskozitu kapalin s různým obsahem velkých částic [4]



Graf 2: Vliv intenzity magnetického pole na počet částic v řetězci v kapalinách s různým obsahem velkých částic [4]

#### 4.8 Matematický model

V poslední době stále vzrůstá hodnota experimentálně získaných dat či teoretických studií zaměřených na problematiku fero kapalin. Zájem o tyto kapaliny není způsoben jen

technickými a lékařskými aplikacemi, ale také předpokladem, že za pomoci těchto kapalin budeme moci odpovědět na některé fyzikální otázky týkající se vlivu dipolárních interakcí a magnetického pole na strukturu a dynamiku kapaliny a fáze změn v takovýchto systémech. Možnost ovládat fyzikální vlastnosti za pomoci vnějšího magnetického pole otevřela několik možností, jak využít ferrokapaliny v technice a lékařství. Významnými vlastnostmi některých magnetických kapalin je magnetoviskózní efekt, tedy schopnost měnit viskozitu v závislosti na přiloženém magnetickém poli, a schopnost měnit svojí polohu podle řídicího magnetického pole.

Pro lepší porozumění chování ferrokapalin je nutné zkoumat vliv magnetického a proudového pole na jejich dynamiku. V ideálním modelu ferrokapaliny nedochází k interakcím mezi částicemi. Chování reálného modelu se od toho ideálního zřetelně liší právě mezičásticovými interakcemi. A právě souhra dynamických a strukturálních vlastností ferrokapalin je považována za klíč k porozumění pohybovým jevům kapalin. [5]

#### 4.9 Magnetoviskózní efekt v ideální magnetické kapalině

Rozenweig a McTague experimentálně demonstrovali magnetoviskózní jev v roce 1969 [5]. Od té doby vzniklo mnoho studií zabývajících se vysvětlením principu magnetoviskózního jevu. Práce objasňující princip magnetoviskózního jevu lze zhruba rozdělit na makroskopické, termodynamické, mesoskopické a kinetické teorie. Velmi přínosné jsou v tomto směru počítačové simulace.

Matematický popis magnetoviskózního jevu dle makroskopické teorie shrnul Shliomis [5] v rovnici 7.

$$\frac{d}{dt} \mathbf{M} - \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{M} = -\frac{\mu_0}{6 \cdot \eta \cdot \Phi_h} \cdot \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}) - \frac{1}{\tau_B} (\mathbf{M} - \mathbf{M}_{eq}) \quad (7)$$

Dle Shliomise je magnetizace  $\mathbf{M}$  ferrokapaliny ovlivněna lokální vířivostí  $\boldsymbol{\Omega}$ , zatímco intenzita magnetického pole  $\mathbf{H}$  určuje orientaci magnetizace dle směru magnetického pole. Průběh relaxace nerovnovážné magnetizace zpět k rovnovážné hodnotě  $\mathbf{M}_{eq}$  je určen relaxačním časem  $\tau_B$ . Dalšími parametry rovnice jsou hydrodynamický objemový zlomek  $\Phi_h$  a viskozita tekutiny  $\eta$ . Časová konstanta  $\tau_B$  lze určit ze vztahu

$$\tau B = \frac{3 \cdot \eta \cdot V_h}{k \cdot T} \quad (8)$$

kde  $k$  je Boltzmanova konstanta,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $T$  je Brownova relaxační doba rotační difúze částic [s] a  $V_h$  je hydrodynamický objem,

$$V_h = \frac{\pi \cdot d_h^3}{6} \quad (9)$$

kde  $d_h$  je hydrodynamický průměr částic. Viskozita tekutiny  $\eta$  vyjadřuje viskozitu včetně pevných částic a lze určit vztahem

$$\eta = \eta_0 \cdot (1 + 2,5 \cdot \phi_h) \quad (10)$$

kde  $\eta_0$  označuje viskozitu čisté kapaliny. Tento vztah však nebere v potaz vliv tření vznikajícího při rotaci kapaliny. Vlivem dalších ztrát vznikajících odchylkou magnetizace od magnetického pole při rotaci je nutné definovat rotační viskozitu  $\eta_r$ . Pro Poiseuillův nebo Couettův tok

$$v = v(y) \cdot e^{-x} \quad (11)$$

v magnetickém poli zadaném rovnicí

$$H = H \cdot e^{-y} \quad (12)$$

je rotační viskozita udána vztahem

$$\eta_r = \frac{M_{\perp} \cdot H}{4 \cdot \Omega} \quad (13)$$

kde  $M_{\perp}$  určuje nerovnovážnou složku magnetizace kolmou ke směru magnetického pole. Pro slabé toky s hodnotou  $\tau \cdot B \cdot \Omega \ll 1$  lze pro lineárně aproximované hodnoty počítat dle rovnice 7. Vložení výsledku do rovnice 13 vznikne výraz pro určení rotační viskozity daný rovnicí 14

$$\eta_r = \frac{3}{2} \cdot \eta \cdot \phi_h \cdot \frac{\alpha \cdot L_1(\alpha)}{2 + \alpha \cdot L_1(\alpha)} \quad , \text{ kde} \quad (14)$$

$$L_1(X) = \coth(X) - X^{-1} \quad \text{je Langevinova funkce} \quad (15)$$

a  $\alpha$  je Langevinův parametr (4).

[5]

#### 4.10 Ideální model magnetické kapaliny bez interakcí.

Takto předkládaný model představuje pohled na magnetické kapaliny z hlediska kinetické teorie. Kapalina je v tomto modelu vymodelována jako ideální suspenze neinteragujících magnetických dipólů, ve které působí magnetické pole, Brownův pohyb a vířivost toku. Vzájemně neinteragující částice jsou v modelu použity pro zjednodušení. Částice jsou považovány za monodisperzní, magneticky tvrdé částice s průměrem  $d_m$  a magnetických momentem

$$m = M_0 \cdot V_m \quad (16)$$

kde  $M_0$  je spontánní magnetizace materiálu a

$$V_m = \frac{\pi \cdot d_m^3}{6} \quad (17)$$

je objem magnetického jádra. Pro nízké hodnoty proudění je rotační viskozita předpokládaná ideálním modelem je přibližně rovna

$$\eta_r(\alpha) = \frac{3}{2} \cdot \eta \cdot \phi_h \cdot \frac{\alpha \cdot L_1^2(\alpha)}{\alpha - L_1(\alpha)} \quad (18)$$

V případě absence magnetického pole rotují magnetické částičky volně vzhledem k místní vířivosti toku a  $\eta_r(0) = 0$ . V případě, že na částice působí magnetické pole o dostatečné intenzitě, jsou částice orientovány ve směru pole. Takto držené částice nejsou schopny pohybu vzhledem k toku, rotační viskozita dosahuje své maximální hodnoty

$$\eta_r(\infty) = \frac{3}{2} \cdot \eta \cdot \phi_h \quad (19)$$

Zatímco se kinetický a makroskopický model liší v některých detailech, saturační hodnota  $\eta_r(\infty)$  dosahuje dle obou přístupů stejných hodnot. Poznamenejme, že model předpokládá  $\eta_r \leq 1,1 \cdot \eta$ . Maximální hodnoty viskozity může být dosaženo při  $\phi_{h,\max} \approx 0,74$ .

Praktické ověření teoreticky předpokládaných hodnot provedl McTague měřením změn viskozity kapaliny proudící v trubce v závislosti na přiloženém magnetickém poli [5]. V grafu 3 jsou jako body zaznamenány změny relativní viskozity vypočtené ze vztahu

$$S(H) = \frac{\eta(H) - \eta(0)}{\eta(0)} \quad (20)$$

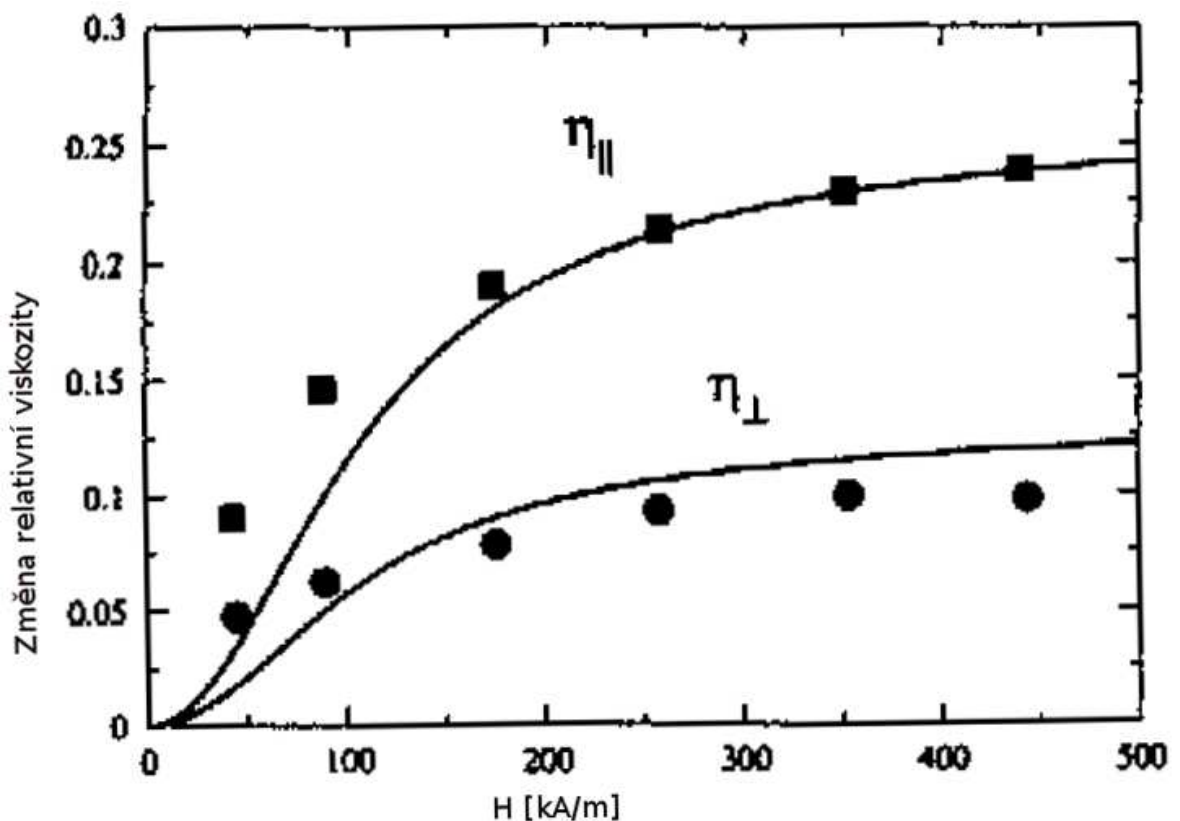


Čtverečky jsou zaznamenány hodnoty z měření, kdy magnetické pole působilo ve směru toku kapaliny, kolečka označují hodnoty z měření, kdy magnetické pole působilo kolmo na směr toku. Plnou čarou je znázorněn teoreticky předpokládaný průběh.

Poznamenejme, že hodnoty z grafu lze získat také ze vztahů

$$S_{\parallel}' = \frac{\eta_r}{\eta} \tag{21}$$

$$S_{\perp}' = \frac{\eta_r}{2 \cdot \eta} \tag{22}$$



Graf 3: Průběh naměřených a vypočtených hodnot relativní viskozity vzhledem k teoretickým předpokladům.[5]

Výsledky experimentů jsou tedy v dobré shodě s teoreticky předpokládanými průběhy. Experimenty dokázaly, že tento model platí dobře v řídké ferokapalině. Tímto modelem lze popsat chování kapaliny i v oscilujících magnetických polích. Kapalína v těchto polích vykazuje negativní viskózní efekt. [5]

## 4.11 Permeabilita

### 4.11.1 Vysvětlení pojmu permeabilita

Permeabilita je vlastnost materiálů vyjadřující jejich chování v magnetickém poli. Vyjadřuje jak vliv na vnější magnetické pole, tak schopnost vlastní magnetizace. Ovlivňuje i další vlastnosti materiálů, jako je např. magnetická reluktance. Je označována řeckým písmenem  $\mu$  a její jednotkou je Henry na metr (H/m) nebo Newton na Ampér čtvereční (N/A<sup>2</sup>). Permeabilita  $\mu$  je složena z konstanty vyjadřující hodnotu permeability vakua  $\mu_0$  násobenou koeficientem, který vyjadřuje, kolikrát je permeabilita materiálu větší oproti vakuu. Koeficient se nazývá relativní permeabilita  $\mu_r$ . Vztah vyjadřuje rovnice:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r [H / m] \quad (23)$$

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} [H / m] \quad (24)$$

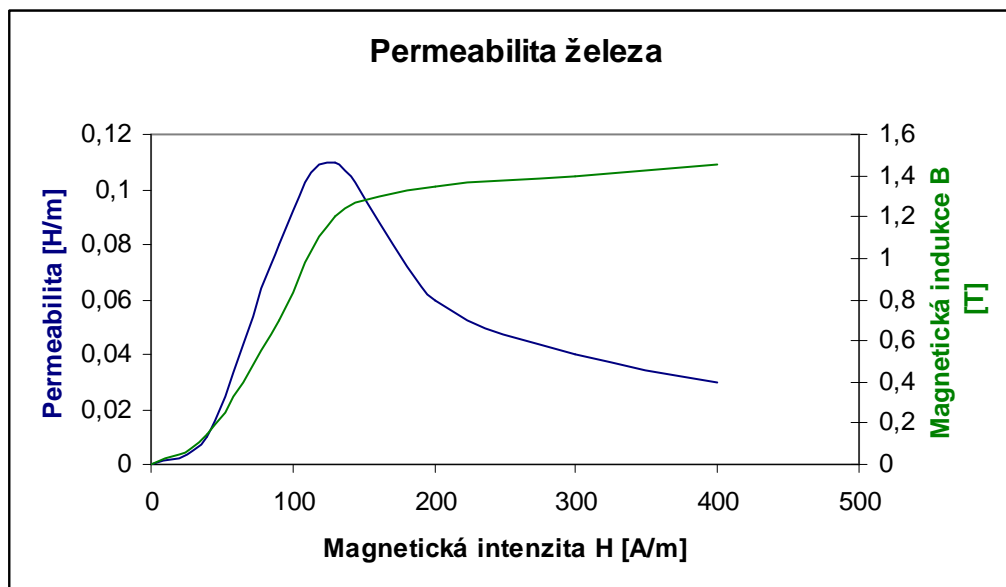
Hodnotu permeability lze v magnetickém poli vypočítat ze vztahu

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} \quad (25)$$

Kde vyjadřuje vliv magnetického pole na magnetické dipóly daného materiálu. Obecně permeabilita není konstantou. Je závislá např. na frekvenci přiloženého magnetického pole, teplotě, magnetické intenzitě a dalších parametrech. V nelineárním prostředí je permeabilita závislá na intenzitě přiloženého magnetického pole. Působí-li na materiál proměnné pole s frekvenční závislostí, bude mít permeabilita jak reálnou, tak i komplexní složku. V případě opakovaného přemagnetování feromagnetik nebude indukce  $\mathbf{B}$  dosahovat stejných hodnot při stejné intenzitě  $\mathbf{H}$ , neboť je závislá také na průběhu předchozích magnetizací. Proto je vhodné zpřesnit výše napsaný vztah takto:

$$\Delta \mathbf{B} = \Delta \mu \cdot \Delta \mathbf{H} \quad (26)$$

Tento vztah je vhodný pro lokální linearizaci jinak nelineárního průběhu veličin a nazývá se diferenciální permeabilita. Hodnoty pro tento vztah lze snadno získat z magnetizační křivky. Závislost permeability (černý průběh) a magnetické indukce (barevný průběh) na magnetické intenzitě zachycuje graf 4. Takovýto průběh lze očekávat u feromagnetik.



Graf 4: Magnetizační křivka feromagnetik [7]

Hodnoty permeability se při magnetizaci feromagnetik liší v závislosti na průběhu magnetické intenzity. V případě růstu magnetické intenzity dosahuje permeabilita nižších hodnot než při poklesu při stejné hodnotě magnetické intenzity. Tento úkaz se nazývá hysterézní jev.[6,7]

#### 4.11.2 Komplexní permeabilita

Pojem komplexní permeability se používá v souvislosti s chováním materiálů ve vysokofrekvenčním magnetickém poli. V nízkofrekvenčním magnetickém poli se hodnoty  $\mathbf{B}$  a  $\mathbf{H}$  mění současně. Při vysokých frekvencích však dochází ke zpoždění mezi změnou  $\Delta\mathbf{H}$  a  $\Delta\mathbf{B}$ . Veličiny ve vysokofrekvenčním magnetickém poli lze zapisovat jako fázory.

Bude-li se magnetická intenzita měnit dle vztahu

$$\overline{\mathbf{H}} = H_0 \cdot e^{j\omega t} \quad (27)$$

bude magnetická indukce reagovat na změny se zpožděním  $\delta$ , průběh bude mít tedy podobu

$$\overline{\mathbf{B}} = B_0 \cdot e^{j(\omega t - \delta)} \quad (28)$$

Vypočteme-li průběh intenzity z výše uvedeného vztahu, dostaneme

$$\mu = \frac{\overline{\mathbf{B}}}{\overline{\mathbf{H}}} = \frac{B_0 \cdot e^{j(\omega t - \delta)}}{H_0 \cdot e^{j\omega t}} = \frac{B_0}{H_0} \cdot e^{-j\delta} \quad (29)$$

Tento vztah lze dále rozepsat na reálnou a imaginární část takto

$$\mu = \mu' - j\mu'' = \frac{B_0}{H_0} \cdot \cos \delta - j \frac{B_0}{H_0} \sin \delta \quad (30)$$

A takto rozepsaný tvar lze použít pro výpočet ztrátového úhlu  $\tan \delta$ , který určuje poměr mezi ztracenou a uloženou energií v materiálu. Popsaný vztah vyjadřuje rovnice:

$$\tan \delta = \frac{\mu''}{\mu'} \quad (31)$$

[6]

### 4.11.3 Počáteční permeabilita

Počáteční permeabilita popisuje relativní permeabilitu při nízkých hodnotách magnetické indukce (méně než 0,1 T). Dosahuje obvykle 1/2 až 1/5 maximální hodnoty permeability pro daný materiál. Měření počáteční permeability je vhodné pro porovnávání materiálů bez rizika dosažení saturace během měření.[7]

### 4.11.4 Efektivní permeabilita

Efektivní permeabilita se vyskytuje obvykle u materiálů se vzduchovými mezerami. Jedná se o údaj, který vystihuje permeabilitu celku. Při výpočtech se tedy nemusíme zabývat faktem, že v materiálu jsou místa s rozdílnou permeabilitou.[7]

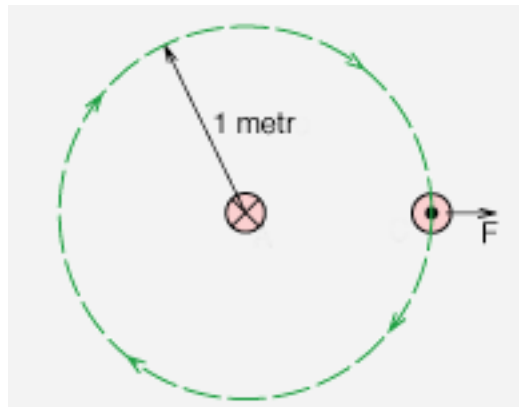
### 4.11.5 Odvození permeability vakua

Permeabilita vakua  $\mu_0$  tvoří konstantní složku permeability. Oproti relativní permeabilitě si  $\mu_0$  zachovává svoji hodnotu za všech okolností. Při odvozování  $\mu_0$  vycházíme z Ampérova zákona. Ampérův zákon říká, že na dva nekonečně dlouhé a nekonečně tenké vodiče ve vzdálenosti  $d=1$  m od sebe při průchodu proudem  $I$  o velikosti 1 A v každém vodiči v opačném směru působí síla  $F=2 \cdot 10^{-7}$  N. Odvození tedy vypadá takto

$$H = \frac{I}{d} = \frac{1}{2 \cdot \pi} A / m \quad (32)$$

$$B = \frac{F}{I} = 2 \cdot 10^{-7} T \quad (33)$$

$$\mu_0 = \frac{B}{H} = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{\frac{1}{2 \cdot \pi}} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} H / m \quad (34)$$



Obr.6: Ilustrace k výpočtům.[7]

#### 4.11.6 Chování materiálů v závislosti na velikosti relativní permeability

Z hlediska velikosti relativní permeability se materiály dělí na tři základní skupiny.

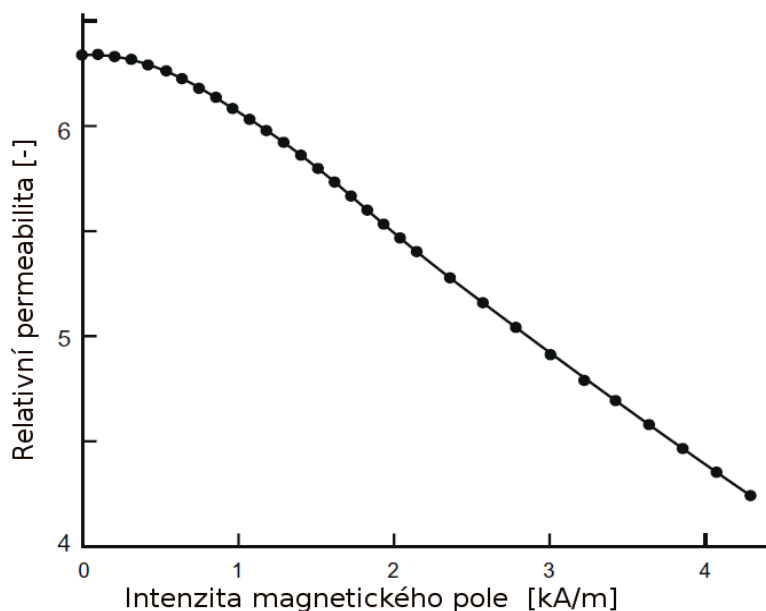
První skupinou jsou diamagnetika, která po přiložení vnějšího magnetického pole vytváří vlastní pole působící proti poli vnějšímu. Pokud nepůsobí vnější pole, nemají magnetika vlastní magnetické pole. Hodnota relativní permeability je menší než 1.

Druhou skupinou jsou paramagnetika, která po přiložení vnějšího magnetického pole vytváří vlastní pole, které je souhlasně orientováno s vnějším. Přiložené pole je tedy zesilováno. Vlastní pole opět neexistuje bez přiloženého vnějšího pole. Relativní permeabilita je větší než 1.

Poslední skupinou jsou feromagnetika. Feromagnetika se po přiložení vnějšího magnetického pole zmagnetují. Směr magnetizace zachovávají i po odeznění vnějšího pole. Feromagnetika se používají jako permanentní magnety. Permeabilita feromagnetik je výrazně větší než 1.[6]

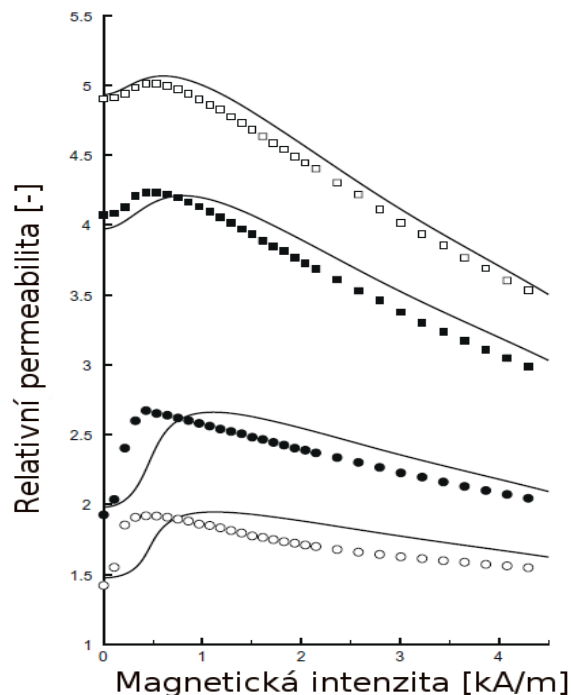
#### 4.12 Permeabilita magnetických kapalin

Permeabilita typické magnetické kapaliny bez příměsí dosahuje své maximální hodnoty při absenci vnějšího magnetického pole a při zvyšujícím se působení vnějšího magnetického pole klesá až do dosažení saturační hodnoty. Charakteristický průběh relativní permeability magnetické kapaliny zobrazuje graf 5. Přítomnost příměsí způsobuje anomálii typickou pro magnetické kapaliny projevující se odlišným tvarem křivky popisující průběh relativní permeability. Přítomnost příměsí ovlivňuje proces magnetizace a způsobuje, že relativní permeabilita po přiložení vnějšího magnetického pole začne růst až do dosažení určitého maxima a teprve poté začne klesat. Průběhy zředěných magnetických kapalin, kde je existence maxima znát nejlépe, zobrazuje graf 6. [29]



Graf. 5: Závislost relativní permeability čisté magnetické kapaliny na intenzitě magnetického pole [29]

V grafu 6 je zachycen průběh relativní permeability emulze složené z magnetické kapaliny a oleje o různých koncentracích. Prázdné čtverečky zachycují průběh, kdy olej tvoří 20 % objemu emulze, plné čtverečky 35 %, plná kolečka 65 % a prázdná kolečka 80 %. Obsah nemagnetické příměsí snižuje hodnotu dosažitelné relativní permeability a způsobuje vznik maxim. Počáteční náběh k maximu je strmější s rostoucím obsahem oleje. Body zachycují experimentálně získaná data, čáry pak teoreticky vypočítané hodnoty. [29]



Graf. 6: Závislost relativní permeability emulze obsahující magnetickou kapalinu a olej na intenzitě magnetického pole [29]

#### 4.13 Výroba magnetických kapalin

Pro většinu technických a biomedicínských aplikací magnetických kapalin jsou vhodné materiály ze skupiny feritů. Nejčastěji používanými zástupci z této skupiny jsou magnetit  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  a maghemit  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ . Vzhledem k velké ochotě magnetitu oxidovat na maghemit jsou v komerčně vyráběných magnetických kapalinách obvykle zastoupeny oba tyto ferity v nedefinovaném poměru. Vhodnými způsoby výroby magnetických kapalin z feritů jsou mokré mletí, srážková metoda, substituční metoda a mikroemulzní metoda.

Dalšími materiály, které přicházejí do úvahy, jsou kovy, jako například kobalt nebo železo. Tyto materiály vynikají svojí vysokou saturační magnetizací a snadnou výrobou částic s malým rozptylem velikostí ve srovnání s ferity. Zásadní nevýhodou omezující jejich použití v komerčních aplikacích je jejich náchylnost k oxidaci a následné ztrátě magnetických vlastností. Tomuto procesu lze zabránit pouze uchováváním v inertní atmosféře a prodloužit tak životnost kapaliny. Magnetické kapaliny na bázi kovových částic lze vyrábět dekompozicí organo-metalických sloučenin, inverzní mikroemulzní technikou a redukcí metalických solí ve vodném roztoku.[8]

#### 4.13.1 Mokrý mletí

Mokrý mletí je první metodou používanou k výrobě feroKapalin. Metoda spočívala v mokřém mletí feritů v kruhových mlýnech spolu s vhodným surfaktantem až do dosažení koloidního stavu. Během mletí vznikají částice s rozdílnými rozměry. K oddělení větších částic byla používána centrifuga. Oddělením větších částic se zamezovalo seskupování a usazování částic. Celý proces přípravy trval okolo 1000 hodin a to byl hlavní důvod, proč byla tato metoda záhy nahrazena jednoduššími.[8]

#### 4.13.2 Srážková metoda

Jedná se o chemickou metodu umožňující získávat částice o různých velikostech pomocí řízení podmínek reakce. Výslednou velikost částic lze získat volbou vhodného alkalického prostředí, řízením molárního poměru  $\text{Fe}^{3+}:\text{Fe}^{2+}$  a teploty. Proces srážení může probíhat v KOH, NaOH a  $\text{NH}_4\text{OH}$  při teplotách mezi 0 a 100 °C. Výsledkem jsou částice o rozměru 3-20 nm. Metoda je vhodná pro zpracování feritů.[8]

#### 4.13.3 Substituční metoda

Tato metoda je podobná srážkové metodě. Touto metodou lze vyrobit částice vhodné pro použití ve feroKapalinách nahrazením iontu  $\text{Fe}^{2+}$  kovovým iontem nebo jejich kombinací. Používají se ionty  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  nebo i např.  $\text{Li}^+$ . V některých případech je nutno použít hydrotermálního stárnutí k získání feritu z vysráženého hydroxidu. Tato metoda je zajímavá hlavně vzhledem k možnostem získat kapaliny v širokém rozpětí magnetických vlastností, takže lze přesně nastavit vlastnosti kapaliny vzhledem ke konkrétní aplikaci.[8]

#### 4.13.4 Mikroemulzní technika

Základem mikroemulzní techniky je existence mikroemulze vody v oleji, tj. dvou nemísitelných kapalin stabilizovaných surfaktantem. Výroba částic je realizována smícháním dvou směsí v určitém poměru. Jedna směs obsahuje vodný roztok kovových solí a druhá alkalický vodný roztok. V některých případech se vyskytuje nekompatibilita surfaktantu



použitého při výrobě a nosné kapaliny potřebné pro danou aplikaci. Problém lze řešit buď nahrazením nekompatibilního surfaktantu vhodnějším nebo použitím dvousurfaktantového systému, tj. částice obalené nekompatibilním surfaktantem jsou obaleny ještě jedním, který už je kompatibilní s použitým nosičem.[8]

#### **4.13.5 Dekompozice organo-metalických sloučenin**

Nejběžněji používaná metoda na výrobu kovových částic pocházející z šedesátých let minulého století, kdy se podařilo termolýzou vyrobit ferokapalinu na bázi kobaltu. Metoda je velice jednoduchá. Směs kovů a uhlovodíků je vystavena reakci s toluenem. Výzkum ukázal, že polymerní uhlovodíky plní funkci katalyzátoru a ovlivňují velikost částic. Celá reakce může probíhat za přítomnosti surfaktantu.[8]

#### **4.13.6 Další možnosti výroby magnetických kapalin**

Způsoby výroby jsou předmětem mnoha výzkumných prací. Publikované postupy výroby se zabývají vylepšením výrobního postupu či výrobou magnetických kapalin s novými unikátními vlastnostmi. Pro ilustraci je zde uvedeno několik příkladů.

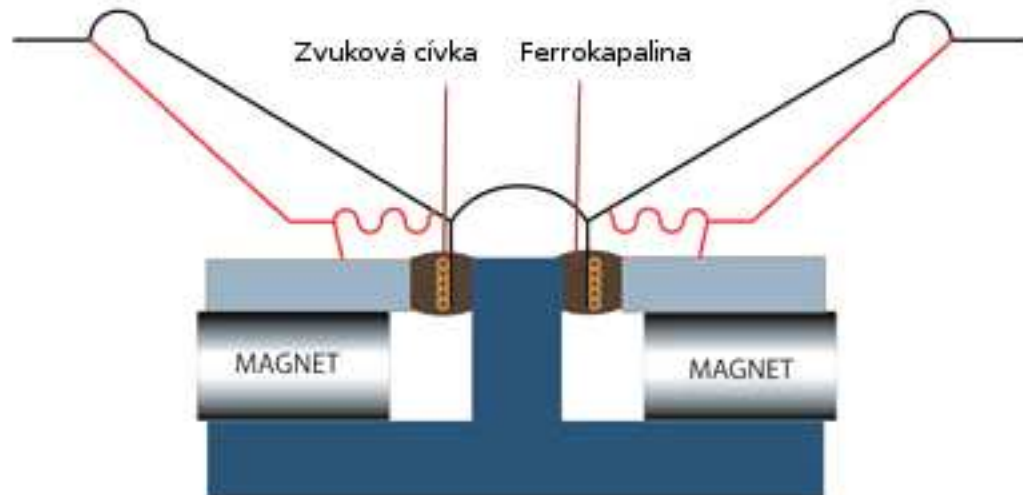
Výroba hematitových nanočástic hydrolyzou chloridu železitého je uvedena v [23]. Příprava hematitových částic s odolností proti usazování je uvedena v [24]. Přípravou magnetických kapalin z cyklodextrinu a magnetitu se zabývá [25]. Pro medicínské aplikace byla vyrobena kapalina, ze které lze pak snadno vyrobit magnetický biokompatibilní povlak [26]. Vznikají i práce popisující postup, jak vyrobit magnetickou kapalinu z běžně dostupných materiálů bez nutnosti vlastnit špičkově vybavenou laboratoř [27].

### ***4.14 Technické aplikace magnetických kapalin***

#### **4.14.1 Užití v reproduktorech**

Ferokapalina je v reproduktorech používána jako chladicí médium již od sedmdesátých let minulého století. Reproduktoř s ferokapalinou je řešen stejným způsobem jako reproduktor chlazený vzduchem. Jediný rozdíl je v tom, že ve vzduchové mezeři u zvukové cívky není vzduch, ale ferokapalina, která je zde držena permanentními magnety. Zvuk v reproduktoru vzniká na základě úderů zvukové cívky na membránu.

Při práci zvukové cívky vzniká velké množství tepla, které musí být odváděno, jinak by mohlo dojít k poškození zařízení. Ferrokapalina má větší tepelnou kapacitu než vzduch, odvádí tedy teplo lépe a tím zvyšuje výkon, který může reproduktor dosáhnout při stejných rozměrech. Kapalina ve vzduchové mezeře plní funkci tlumiče nárazů zvukové cívky na membránu a drží zvukovou cívku soustředně s magnetem. Zlepšuje tak celkovou funkci reproduktoru.[9,10]



Obr.7: Schéma reproduktoru s ferrokapalinou [9]

#### 4.14.2 Chlazení transformátorů

Ferrokapaliny lze vhodně navázat na transformátorový olej a tím zlepšit jeho vlastnosti. Teplotní závislost saturační magnetizace ferrokapalin spolu s nehomogenním polem v okolí vinutí vytváří magneticky závislé proudění. Při vyšší teplotě v okolí vinutí jsou částičky ferrokapaliny slabě magnetovány a jsou tedy vypuzovány silně magnetovanými částicemi z oblastí s nižší teplotou. Proudění transformátorového oleje s ferrokapalinou se řídí jak podle teplotního gradientu, tak podle gradientu magnetického pole. [11]

#### 4.14.3 Vliv na průrazné napětí transformátorového oleje

Pozitivní vliv příměsi magnetické kapaliny v transformátorovém oleji na hodnotu průrazného napětí byl prokázán experimenty dle [16]. Byl proveden experiment, kde byla zkoumána závislost průrazného napětí při různých hodnotách vlhkosti samotného oleje a oleje

s příměsí magnetické kapaliny. Byly připraveny vzorky s obsahem vlhkosti od 2 ppm po více než 30 ppm vody. Tabulka 2 ukazuje narůstající význam příměsí se vzrůstající vlhkostí.

	Průrazné napětí [kV] při obsahu vlhkosti [ppm]			
	< 5 ppm	10 – 20 ppm	20 – 30 ppm	> 30 ppm
Olej	50 kV	43 kV	37 kV	28 kV
Olej s příměsí	50 kV	47 kV	44 kV	40 kV

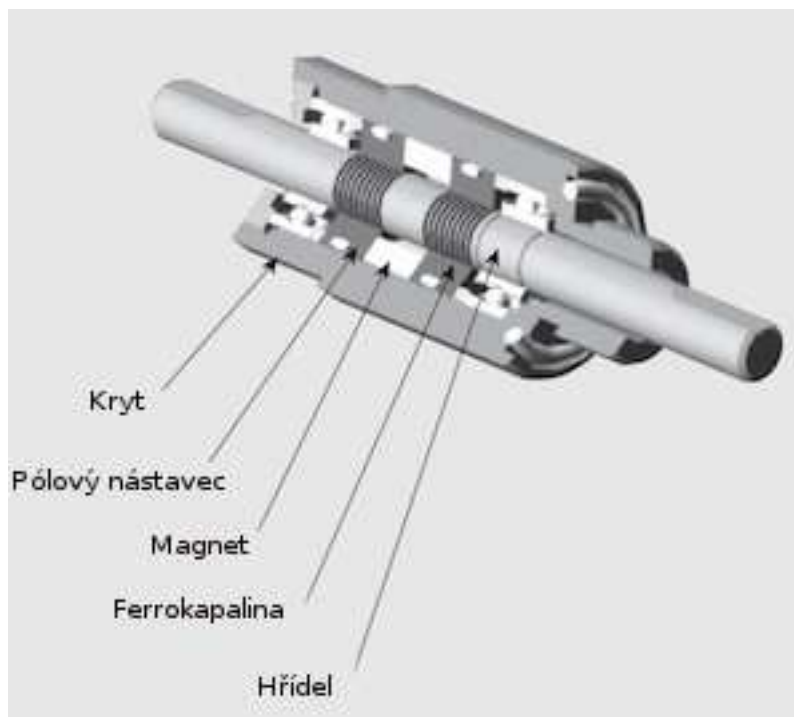
Tab. 2: Průrazné střídavé napětí (60 Hz) pro [16]

Jak vzorky samotného oleje, tak vzorky s příměsí, ukazují pokles průrazného napětí se zvyšujícím se obsahem vlhkosti. Průrazné napětí oleje s příměsí však klesá pomaleji. Bylo prokázáno, že transformátorový olej s příměsí magnetické kapaliny je na sebe schopný vázat vlhkost a tím snížit riziko elektrického průrazu. [16]

#### 4.14.4 Magnetické těsnění

Využití ferokapalin k oddělení dvou prostor s rozdílným tlakem či jako ochrana před vniknutím prachu patří mezi průmyslově využívané aplikace. Jednou z takových aplikací je těsnění u rotující hřídele. Systém je složen z magneticky vodivé hřídele, permanentního magnetu s nástavci a z těsnící kapaliny, která je na svém místě držena magnetickým polem. Viz. obr.8

Aplikace je vhodná i pro velké rozdíly tlaků. Těsnění je schopno udržet tlak blízký vakuu v odděleném prostoru. Jednoúrovňové těsnění je schopno udržet rozdíl tlaků až 20 kPa, při použití víceúrovňového těsnění se těsnící schopnosti jednotlivých částí sčítají. Během životnosti je systém spolehlivý, protože se jedná o kapalinu, která vyplní celý prostor, při pohybech dochází k minimálnímu tření a tedy i k minimálnímu opotřebení. Kapalina ze svého místa neuniká díky magnetickému poli. Při vysokých teplotách však může dojít k odpaření tekuté složky ferokapaliny, bude tedy nutná její výměna. Aplikace je vhodná pro vysokorychlostní operace. Těsnění umožňuje udržet hermeticky oddělené prostory při rychlosti 15 000 – 20 000 otáček za minutu při použití 1 palcové hřídele (2,54 cm). V porovnání s pevnými těsníci kroužky má těsnění ferokapalinou tyto výhody: delší životnost, vyšší spolehlivost, nižší nároky na údržbu a umožňuje vyšší výkony. [12,13]



Obr. 8: Schéma magnetického těsnění rotující hřídele [13]

#### 4.14.5 Separátor nemagnetických částic o rozdílných hustotách

Zařízení je založeno na chování těles v kapalině v závislosti na poměru hustoty tělesa a kapaliny, kdy tělesa s vyšší hustotou jdou ke dnu, tělesa s nižší hustotou jdou na hladinu a tělesa o podobné či stejné hustotě levitují v kapalině. Prakticky jde o porovnávání vztlakové a gravitační síly, které na těleso působí. O výsledné poloze tělesa tak rozhoduje převažující síla.

Na stejném principu je založen i separátor nemagnetických částic s ferokapalinou. Na tělesa ponořená do ferokapaliny působí síla  $F$  určená rovnicí (35).

$$F = v \left[ (\rho_s - \rho_k) \cdot g - \left( \frac{M}{4 \cdot \pi} \right) \cdot v \cdot H \right] \quad (35)$$

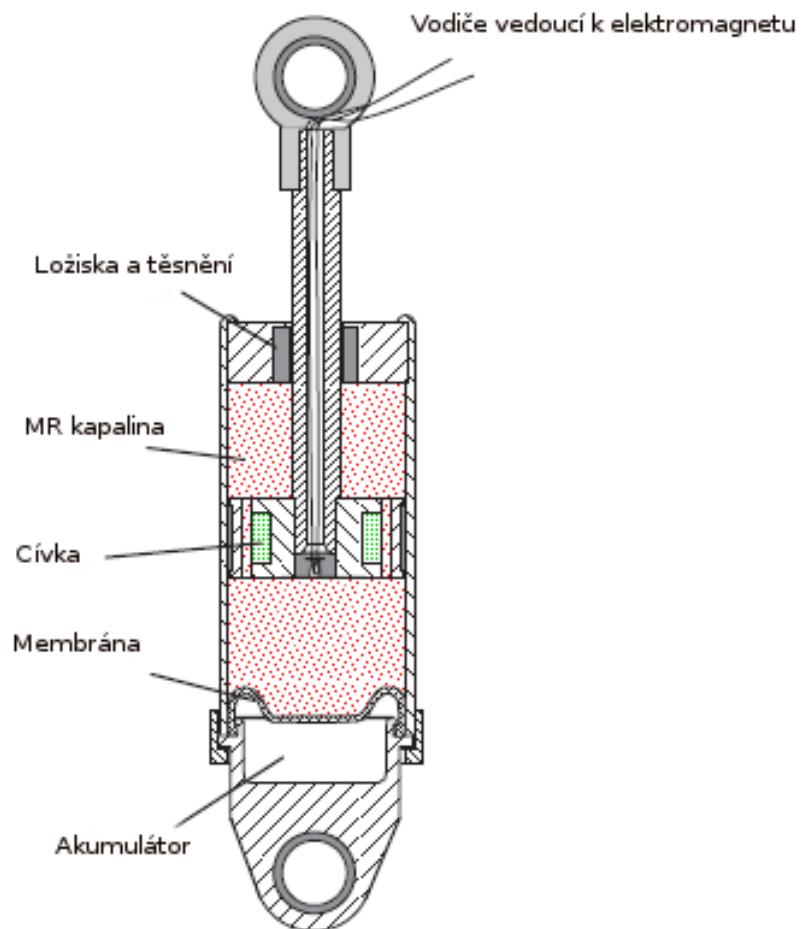
Kde  $F$  znamená sílu působící na nemagnetické těleso,  $M$  značí magnetizaci ferokapaliny,  $H$  značí intenzitu magnetického pole,  $g$  značí gravitační zrychlení,  $\rho_s$  značí hustotu nemagnetického materiálu,  $\rho_k$  značí hustotu ferokapaliny a  $v$  značí objem nemagnetického tělesa.

Těleso ve ferokapalině mění svoji polohu v závislosti na změně hustoty ferokapaliny ovládané magnetickým polem. Pokud se hustota ferokapaliny zvýší nad hustotu

nemagnetického tělesa, vypluje těleso na hladinu. Postupným zvyšováním hustoty kapaliny a průběžným odstraňováním těles z hladiny lze tělesa roztřídit.[14]

#### 4.14.6 Rheomagnetické tlumiče

Jsou zařízení využívající magnetorheologickou kapalinu jako kapalinu tlumící. Vlastnost magnetorheologických kapalin měnit viskozitu lze využít k aktivnímu tlumení kmitů tlumiče. Magnetorheologické tlumiče lze použít v automobilech a dalších aplikacích. V následujícím textu bude zmíněn rheologický tlumič používaný na budovách ke zmírnění seismických kmitů v oblastech s častými zemětřeseními.



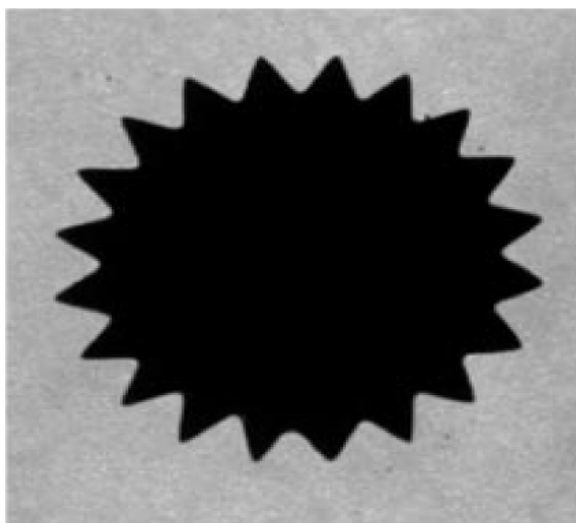
Obr. 9: Schéma MR tlumiče [15]

Aplikace rheologických tlumičů v budovách nabývá v mnoha oblastech na významu vzhledem k lidským a ekonomickým ztrátám. Vzhledem ke snaze zmírnit následky silných zemětřesení se do nově stavěných strategických budov a mostů aplikují magnetorheologické tlumiče představující poloaktivní ochranu před seismickými otřesy. Systémy poloaktivní ochrany představují dobrý kompromis mezi pasivní a aktivní ochranou, neboť spojují spolehlivost pasivních prvků a adaptabilitu aktivních prvků. Oproti aktivním prvkům není tato aplikace energeticky náročná, může být napájena pouze baterií uvnitř tlumiče. Není tedy závislá na vnějším zdroji energie, který by mohl v době zemětřesení chybět. Magnetorheologický tlumič lze používat i v případě selhání řídicí elektroniky jako pasivní tlumič kmitů. Nemalelou výhodou je snížení nákladů na údržbu.

MR tlumič zobrazený na obr.9 je maximálně 21,5 cm dlouhý, hlavní válec má v průměru 3,8 cm, píst se ze své střední polohy může vychýlit o  $\pm 2,5$  cm. Soustava obsahuje 50 ml MR kapaliny.[15]

#### **4.15 Použití v nanotechnologiích**

Níže uvedené aplikace v oblasti nanotechnologie lze vyrobit ze speciálně upravené ferokapliny. Ferokapaliny na bázi parafínu jsou za běžné pokojové teploty v pevném skupenství. Zahřátím dojde k přechodu na kapalné skupenství. Kapalina lze tvarovat podle přiloženého magnetického pole a následným zchlazením lze získat pevnou strukturu. Tímto způsobem lze získat např. ozubené kolečko jako na obr. 10.

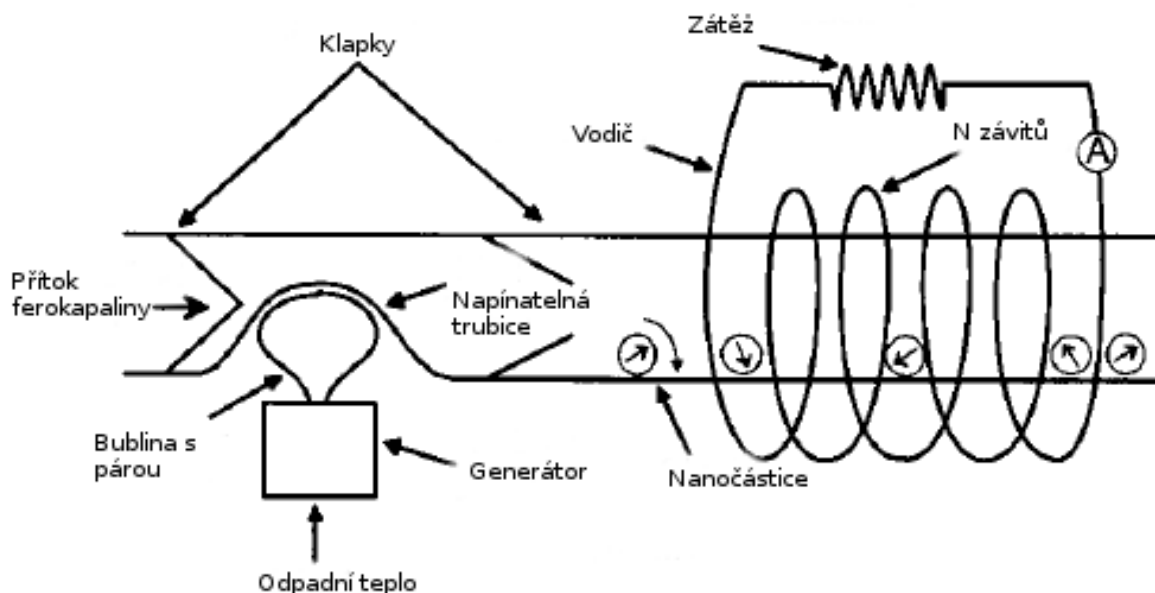


*Obr.10: Ozubené kolo vyrobené z ferokapliny [3]*

#### 4.15.1 Nanomotor, nanogenerátor

Základní podmínkou pro vytvoření nanomotoru je existence magnetické mřížky, ve které budou částice uchyceny. Takto uvězněné částice lze uvést do rotace pomocí magnetického pole. Sestava se chová jako synchronní motor. Pohyb částic lze převádět pomocí nanopřevodů jako je např. na obr. 10.

Na obr. 11 je zobrazen návrh nanozdroje napětí využívající odpadní teplo. Teplo dopravené ke generátoru je využito na nafukování bubliny, která tlačí na trubici s ferokapalinou v místech mezi dvěma ventily. Kapalina je pulzováním bubliny uváděna do pohybu. Rotující kapalina vyvolává změnu indukčního toku a tím dochází k indukci napětí na cívce.



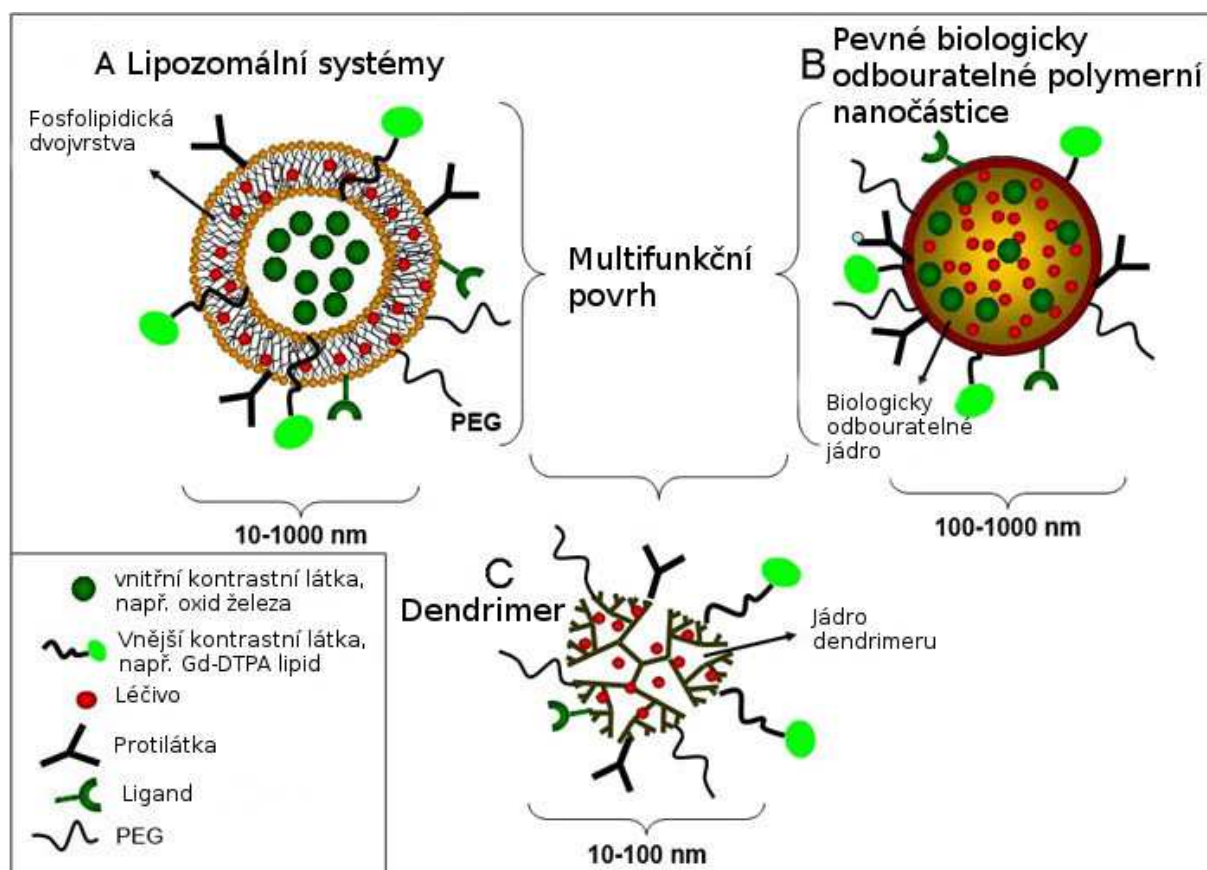
Obr. 11: nanogenerátor [3]

Dle [3] by částice o průměru 10 nm magnetizovaná na 0,6 T byla schopná vyvolat indukční tok o velikosti  $5 \cdot 10^{-17}$  Wb. Při úhlové rychlosti 1000 otáček za sekundu by byla částice schopná naindukovat v cívce napětí  $3 \cdot 10^{-13}$  V. V případě spojení obvodu do krátkého by v cívce o odporu  $0,25 \Omega$  procházel proud o velikosti  $1 \cdot 10^{-12}$  A. Výkon dodaný touto jednotkou bude  $3 \cdot 10^{-25}$  W. [3]

## 4.16 Aplikace magnetických kapalin v medicíně

### 4.16.1 Magnetické cílení léčiv

Magnetické cílení léčiv je biomedicínská metoda, zavedená v polovině sedmdesátých let dvacátého století, založená na navázání léčiva na biokompatibilní magnetickou kapalinu. Experimenty z let osmdesátých dokazují, že systém složený z léčiva navázaného na magnetický nosič může být soustředěn na požadované místo, kde může být držen, pokud je použito dostatečně silné magnetické pole. Schéma takového systému je zachyceno na obr. 12.



Obr.12: Schéma nanosystému schopného plnit funkci magneticky ovladatelného nosiče léčiva

[20]



Tyto systémy musí splňovat následující charakteristiky:

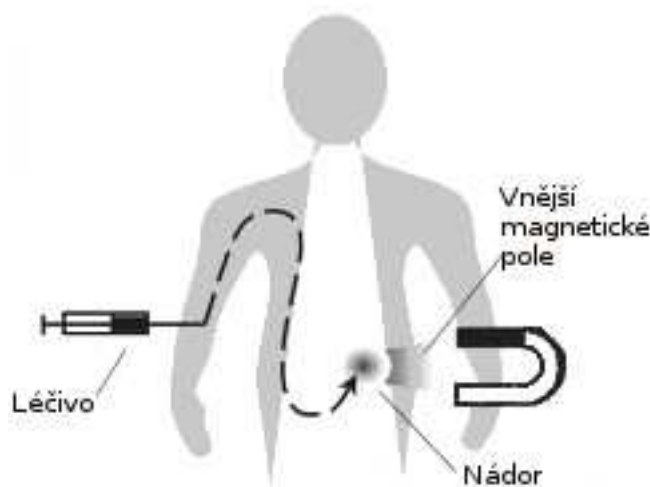
- Částice navázané na magnetickou kapalinu musí mít vhodný tvar a rozměry, aby mohly projít kapilárním systémem tkání a orgánů, aniž by hrozila embolie,
- Směsi obsahující magnetickou kapalinu s chemoterapeutickými látkami musí mít dostatečně vysokou magnetizaci,
- Magneticky řízený nosič musí být schopen nést dostatečné množství farmakologicky aktivní látky, kterou musí být schopen uvolnit na požadovaném místě,
- Všechny komponenty systému musí být netoxické, biologicky odbouratelné a vyjímatelné z retikuloendoteliálního systému.

Metoda je vyvíjena pro léčbu v oblasti onkologie, v léčbě onemocnění srdce, oběhového systému a dutých orgánů. [17]

V oblasti léčení onkologických onemocnění lze metodu použít pro proces magneticky řízené chemoterapie. V ideálním případě lze pomocí magneticky řízené chemoterapie dosáhnout toho, aby maximální podíl léčiva reagoval výhradně s nádorovými buňkami bez zasažení zdravých buněk, případně bude přednostně reagovat s nádorovými buňkami.

Magnetické cílení léčiv lze dělit podle různých hledisek. Lze dělit podle :

- Místa určení ( zda se jedná o orgán, buňku či buněčnou strukturu),
- podle způsobu vedení (pasivní – léčivo se usazuje v závislosti na velikosti částic v orgánech, buňkách, buněčných strukturách atd; aktivní – léčivo je cíleně vedeno ke konkrétním buňkám),
- podle závislosti či nezávislosti na nosiči apod.
- kombinace výše napsaného. [18]



Obr.13: Schématické znázornění magnetického cílení léčiv [21]

Léčba byla mnohokrát experimentálně provedena na zvířatech. První klinický test na lidských pacientech provedl Lübbe v devadesátých letech minulého století. Lübbe provedl experimentální léčbu na 14 pacientech, u kterých selhala léčba klasickou chemoterapií. Chemicky navázal epirubicin (antibiotikum používané k léčbě nádorů) na ferokapalinu. Použitá kapalina měla složení uvedené v tabulce 3.

Velikost částic	100 nm
Obsah magnetitu	1,5 % celkové hmotnosti ferokapaliny
Obsah železa	60 % (15 mg železa/25mg magnetitu)
Stabilizátor (anhydroglukózový polymer)	0,5 % hmotnosti
pH	7.4
Barva	černá
zápach	neutrální
Obsah železa	~ 6 mg/ml
Obsah uhlohydrátů	~ 5 mg/ml
Počet částic	10 <sup>8</sup> /ml
Poměr hmotnost/objem	10 mg/ml

*Tabulka 3: Vlastnosti použité ferokapaliny [19]*

K léčbě bylo použito magnetického cílení léčiva s malým množstvím ferokapaliny použité jako nosiče. K navádění léčiva bylo použito permanentních magnetů s indukcí 0,8 T. Vzhledem k magnetickému cílení mohl být použit epirubicin v menších koncentracích než při klasické léčbě. Těla pacientů tak byla vystavena menšímu toxickému účinku léčiva při současném zvýšení efektivity léčby. Lübbe zkoumal reakci na podávanou směs, její množství, koncentraci i na její jednotlivé složky.

Během léčby došlo ke zlepšení zdravotního stavu u většiny pacientů. Došlo ke dvěma úmrtím a jedné amputaci, u kterých se neprokázala souvislost s reakcí na léčbu. Nepodařilo se prokázat žádné nežádoucí účinky léčebného postupu, z čehož lze usuzovat, že léčba samotná bude bezpečná. Nevyřešeným problémem zůstávají částičky železa zůstávající v těle po skončení léčby, které se budou s největší pravděpodobností usazovat v tělesných orgánech. Testy ukázaly zvýšenou koncentraci železných částiček v játrech a slezině pacientů.[18,19]

#### 4.16.2 Magnetická hypertermie

Účinným způsobem ničení nádorových buněk je v neposlední řadě jejich zahřívání. V současnosti používané metody hypertermie však poškozují i okolní zdravou tkáň. Myšlenka magnetické hypertermie spočívá v přivedení ferokapaliny na místo nádoru, kde bude vystavena střídavému magnetickému poli. Hysterézními ztrátami vzniklé teplo pak nádor zničí. Takto lze zahřívát nádor na teplotu blízkou lidskému tělu. Teploty se pohybují převážně mezi 42 – 45 °C, krátkodobě (několik minut) lze zvýšit teplotu až k 50 °C. Vhodnými materiály pro tuto aplikaci jsou magnetit  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  a maghemit  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , které lidské tělo dobře snáší. Mnoho ostatních materiálů nemůže být pro tuto aplikaci použito z důvodu biologické nekompatibility. Dále nejsou vhodné částice menší než 10 nm v průměru pro jejich malou efektivitu zahřívání.[22]

#### 4.16.3 Další možnosti použití ferokapalin v medicíně

Experimenty na myších a potkanech ukázaly na možnost řídit cytokyny pomocí ferokapalin a řídit tak imunitní procesy v těle. Fakt, že antibiotika, trombolytika či jiná léčiva mohou být reverzibilně navázána na ferokapalinu, otevírá nové možnosti léčit dosud neléčitelné choroby. Další zajímavou možností je použití ferokapalin ke genetické modifikaci buněk a bakterií. Všechny tyto možnosti jsou v současnosti ve fázi výzkumu. [18]

## 5 Praktická část

Magnetické kapaliny jsou materiálem s širokým aplikačním potenciálem. Velká část těchto aplikací je však stále předmětem výzkumu a vývoje. Na Katedře teoretické elektrotechniky jsou v současnosti vyvíjeny tyto aplikace: magnetoreologická brzda, tlumič, ferokapalinové ucpávky či ferokapalinový aktuátor. Pro exaktní určení chování zařízení je podstatné znát magnetické vlastnosti použitého materiálu. Nejdůležitějším parametrem magnetického materiálu je jeho permeabilita. Tento údaj má však v oblasti magnetických kapalin svá specifika. Vzhledem k tekutosti materiálu a nízkým hodnotám permeability nelze použít metody pro vyšetření permeability pevných materiálů.[28] Tento fakt spolu s tím, že magnetizační charakteristiky mnohdy nejsou výrobcem dodávány, vedly k vývoji vlastní měřicí metody.

### 5.1 Modelování navrhovaného přípravku

Stěžejním bodem metody bylo sestavit přípravek, na kterém bude měření probíhat. Byl zvolen přípravek skládající se ze dvou vinutí, z nichž jedno bude napájeno a na druhém bude měřen přenesený signál. Vzhledem k předpokládaným rozptylovým tokům jsem navrhl a numericky nasimuloval několik možných konfigurací vinutí v programu Agros2D, jelikož vzájemná poloha cívek má při předpokládaném rozložení magnetického pole zásadní vliv na množství přeneseného signálu. Nemalý vliv na hodnocení modelů měla i předpokládaná konstrukční náročnost.

Pro modelování v programu Agros2D jsem zvolil modelování magnetických polí řešených rovnicí 36:

$$\operatorname{curl}\left(\frac{1}{\mu} \cdot (\operatorname{curl}\mathbf{A} - \mathbf{B}_r)\right) - \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{v} \times \operatorname{curl}\mathbf{A} = \mathbf{J}_{ext}, \quad (36)$$

Kde  $\operatorname{curl}$  je vektorový operátor popisující nekonečně malou rotaci v 3D vektorovém poli,  $\mathbf{A}$  značí magnetický vektorový potenciál [Wb/m],  $\mathbf{B}$  magnetickou indukci [T],  $\boldsymbol{\sigma}$  značí měrnou vodivost materiálu [S/m],  $\mathbf{v}$  rychlost pohybu těles v poli [m/s] a  $\mathbf{J}_{ext}$  povrchovou proudovou hustotu [A/m<sup>2</sup>].

Modely možných konfigurací jsou tvořeny ohraničenými suboblastmi s definovanými vlastnostmi tvořícími jednu plochu. V modelech byly použity prostředí: magnetická kapalina, vzduch, vinutí primární cívky a vinutí sekundární cívky. K úplnému definování úlohy bylo nutné použít Dirichletovu podmínku jako ohraničení celé oblasti.

Ve všech modelech byla použita magnetická kapalina s hodnotou relativní permeability  $\mu_r=2$ , vzduch s relativní permeabilitou  $\mu_r=1$ , vinutí primární cívky s povrchovou proudovou hustotou  $J_{\text{ext}}=5 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ , vinutí sekundární cívky s měrnou vodivostí  $\sigma=58 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ . Dirichletova okrajová podmínka je určena rovnicí  $A=0 \text{ Wb/m}$ .

Modely 1 - 4 jsou zobrazeny v  $R$ - $Z$  souřadnicích. Modely na obrázcích jsou tedy poloviny řezů rotačních těles. Druhá polovina by ležela za osou symetrie. Modely 5 - 7 jsou zobrazeny v  $X$ - $Y$  souřadnicích. Modely na obrázcích zachycují průřez tělesa.

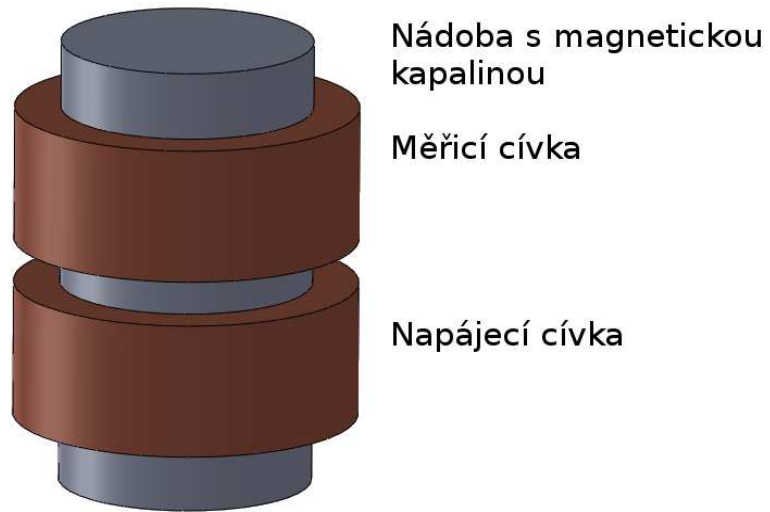
Hodnocení modelů sestávalo z naintegrovaných hodnot magnetické indukce přes plochu jádra napájecí a měřicí cívky. Hodnoty magnetické indukce jsem získal z jednotlivých modelů a poté vyhodnotil v programu MATLAB. Z vypočtených hodnot magnetických indukčních toků byl vytvořen poměr vyjádřený v procentech, kde číselník zlomku tvořil tok naintegrovaný v měřicí cívkce a jmenovatel tok naintegrovaný v napájecí cívkce. Dalším kritériem pro vyhodnocení modelů byla předpokládaná konstrukční náročnost navrhovaných přípravků.

### 5.1.1 Model 1

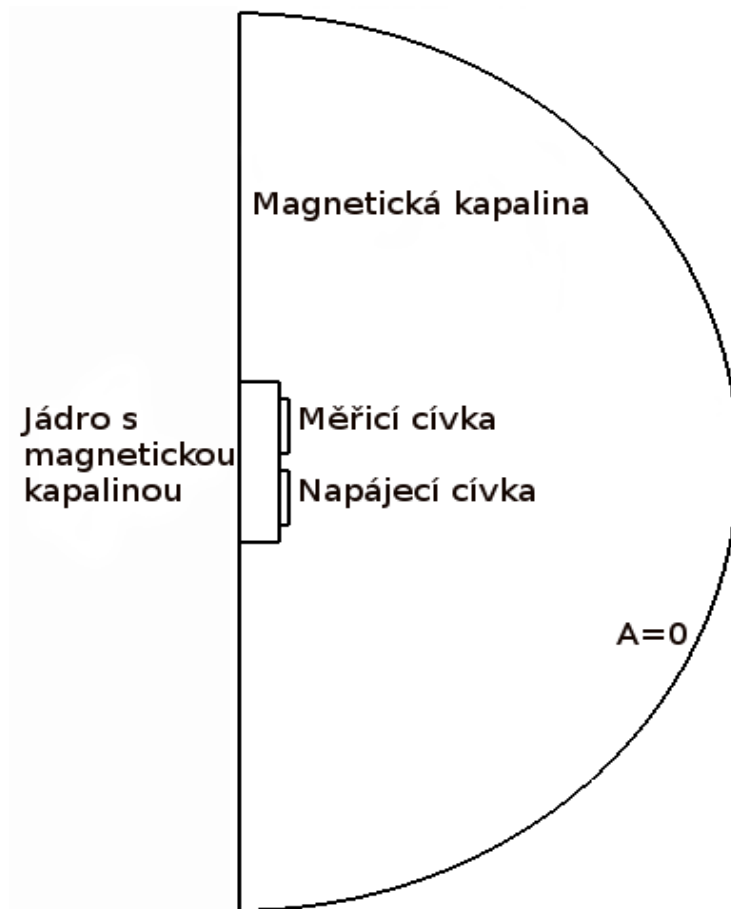
Prvním návrhem měřicí sestavy je sestava tvořená dvěma cívkami nad sebou spojené jádrem z magnetické kapaliny (obr. 14). Obrázky 15, 16 a 17 zobrazují 2D model návrhu. Pro sestavení modelu byla použita síť s 2458 uzly, 1004 elementy. Model počítá s 1951 stupni volnosti.

Okolní prostředí přípravku je tvořeno magnetickou kapalinou. Takto sestavený model má jak v jádře, tak ve svém okolí stejnou magnetickou reluktanci. Vzhledem k neměním se vlastnostem prostředí se bude vektor magnetické indukce šířit rovnoměrně. Siločáry se budou uzavírat bez deformací. Ve svém důsledku se k měřicí cívkce dostane jen malé množství magnetického toku. V oblasti napájecí cívky byl vybuzen indukční tok  $\Phi=1,105 \cdot 10^{-4} \text{ Wb}$ , v oblasti měřicí cívky byl naintegrovan tok  $\Phi=1,2039 \cdot 10^{-5}$ , tj. 11% vybuzeného toku. Při pohledu na obrázek 17 zobrazující rozložení magnetické indukce je zřejmé, že siločáry se

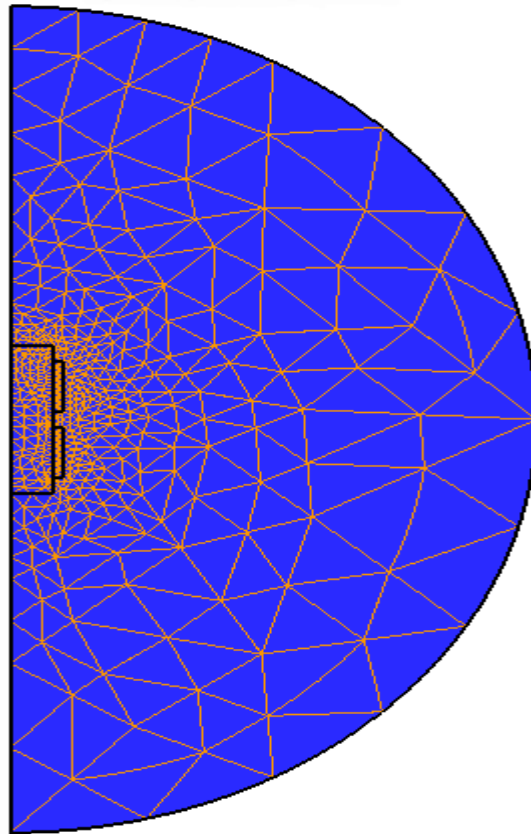
nešíří jádrem měřicí cívky, tedy i indukované napětí bude malé. Pro nízkou hodnotu jádrem přeneseného magnetického toku nebyl model vybrán pro měření.



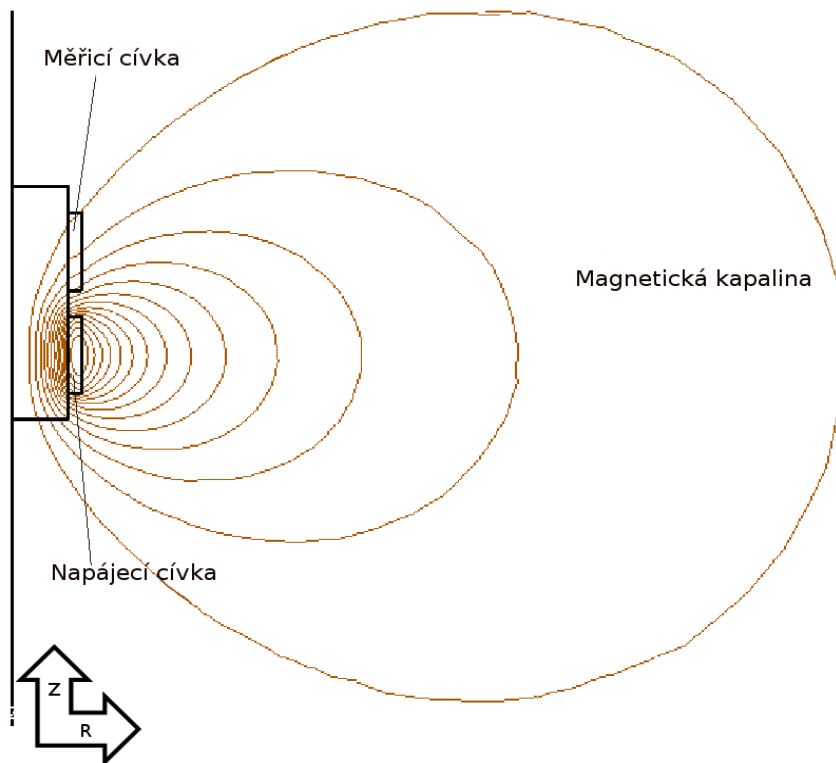
Obr. 14: 3D model přípravku



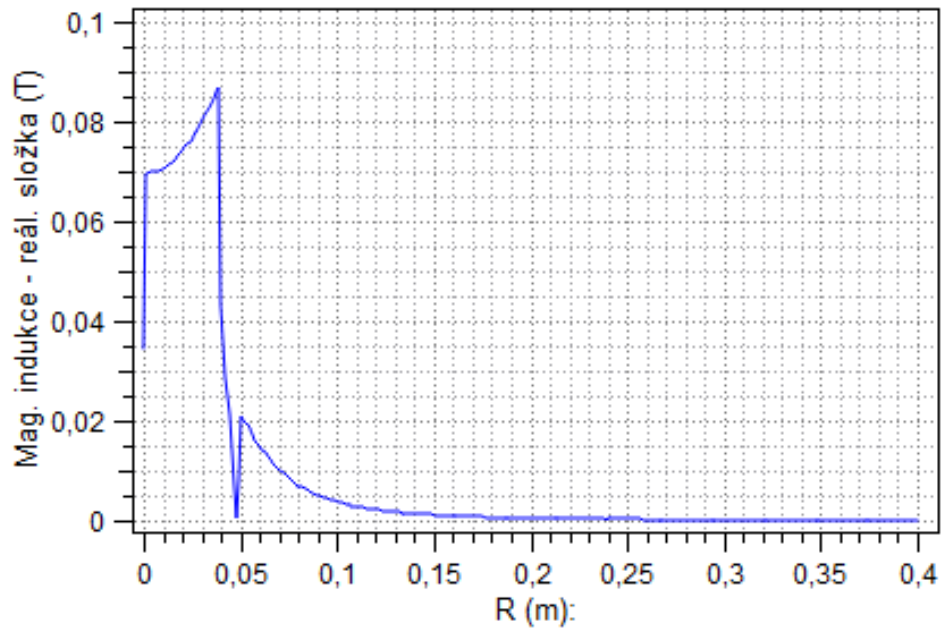
Obr. 15: Popis 2D modelu přípravku v programu Agros 2D



Obr.16: Matematický model návrhu 1: definiční oblast a síť



Obr. 17: Návrh měřicího přípravku 1 v programu agros 2D – znázornění rozložení magnetického pole.

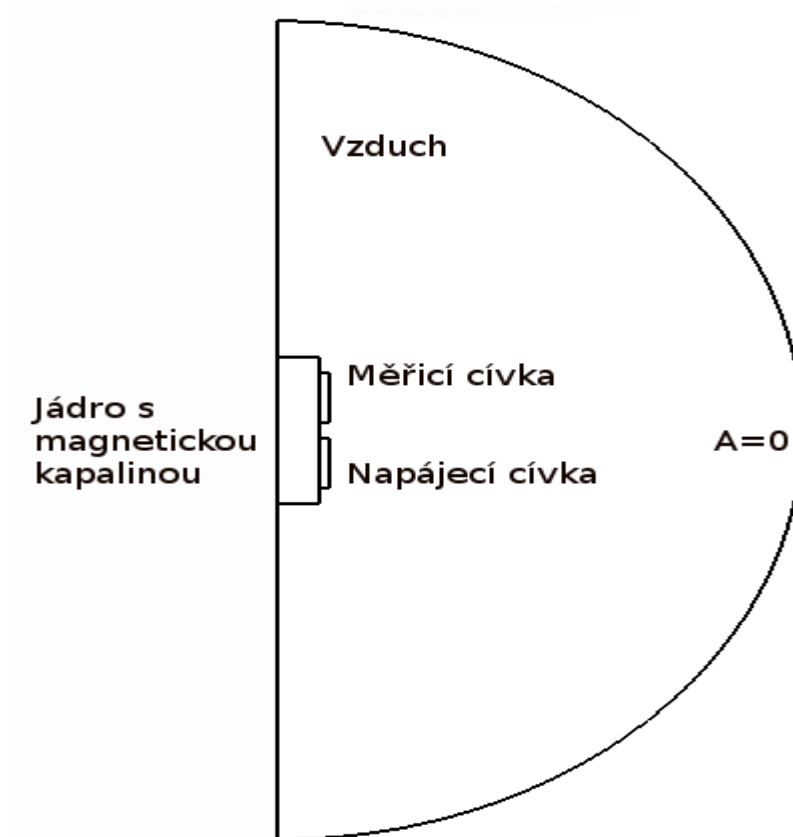


Graf 7: Zobrazení průběhu magnetické indukce v modelu 1

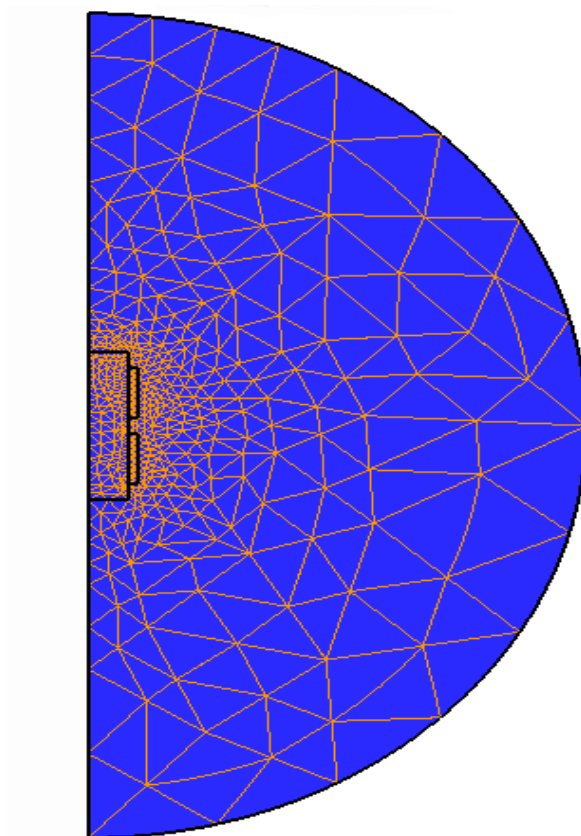
### 5.1.2 Model 2

Model 2 je obměnou předchozího modelu. Sestavu tvoří opět dvě cívky nad sebou, spojené magnetickým jádrem tvořeným magnetickou kapalinou. Okolní prostředí je tvořeno vzduchem. V tomto modelu se již vyskytují dvě prostředí s rozdílnými magnetickými reluktancemi. Siločáry se ve srovnání s předchozím modelem uzavírají více přes magnetickou kapalinu, ale vzhledem k malému rozdílu permeabilit obou prostředí není velký rozdíl mezi hodnotou magnetického toku v jádře tohoto a předchozího modelu. K měřicí cívce se dostane  $\Phi = 1,3853 \cdot 10^{-5}$  Wb z celkově vybuzeného  $\Phi = 9,4350 \cdot 10^{-5}$  Wb, tj. 15 %. Pro nízkou hodnotu jádrem přeneseného magnetického toku však nebude vybrán pro měření.

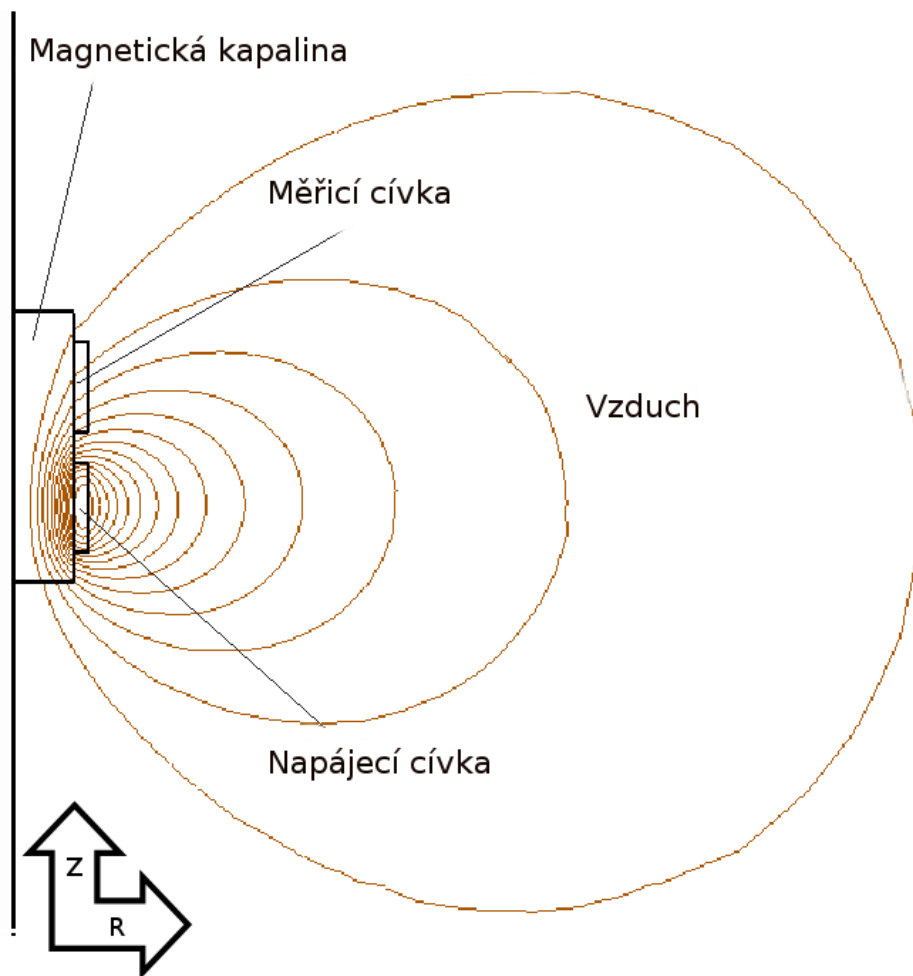




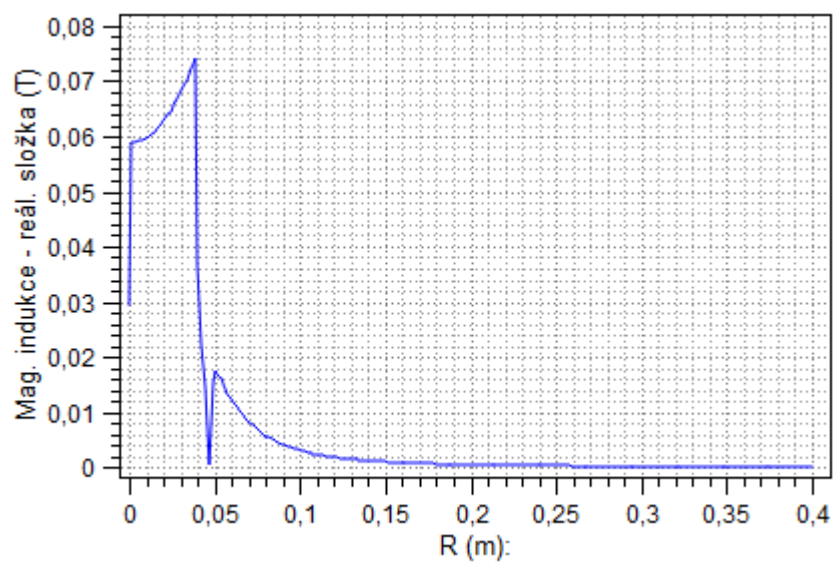
Obr. 18: Popis 2D modelu přípravku v programu Agros 2D



Obr.19: Matematický model návrhu 2: definiční oblast a síť



Obr. 20: Návrh měřicího přípravku 2 v programu Agros 2D – znázornění rozložení magnetického pole.

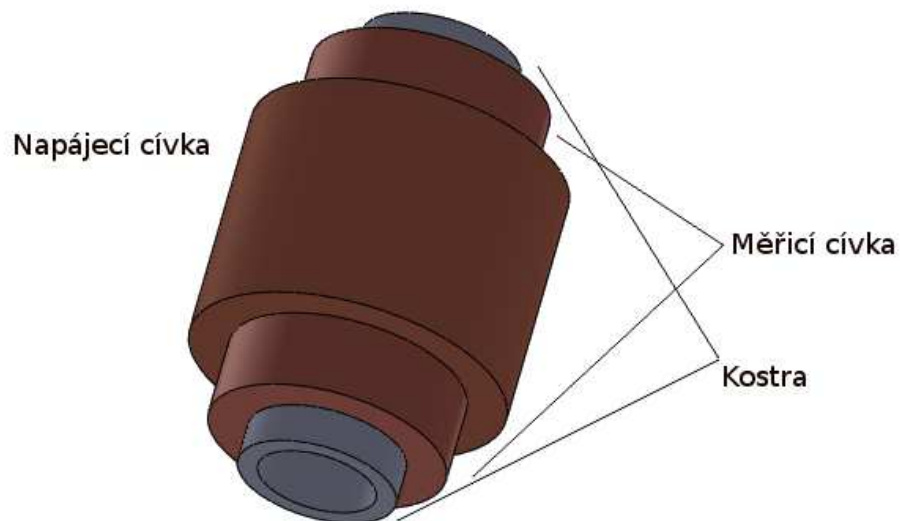


Graf 8: Zobrazení průběhu magnetické indukce v modelu 2

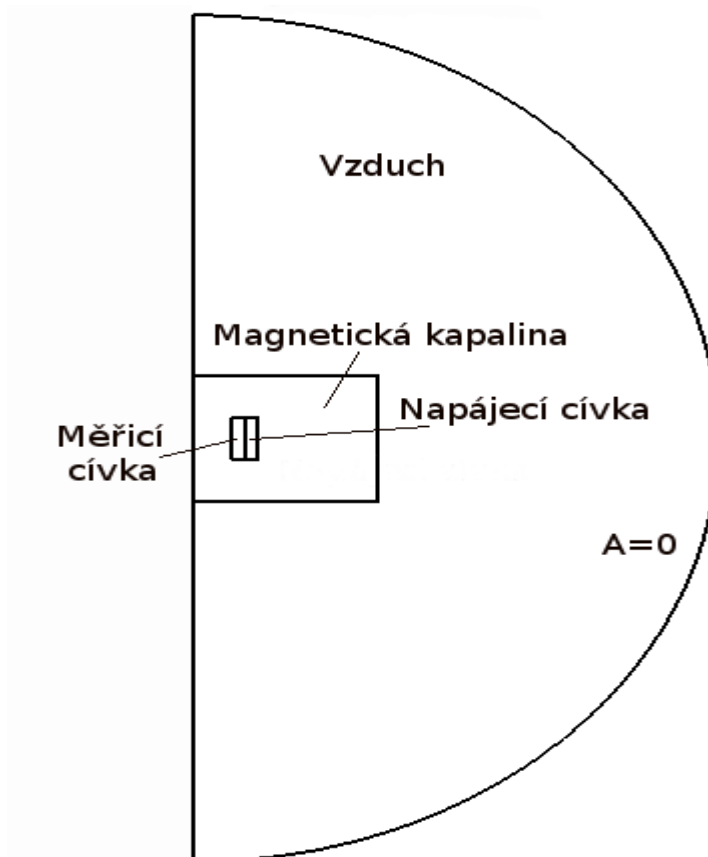
### 5.1.3 Model 3

Model 3 je sestaven ze dvou cívek navinutých na společném jádře. 3D model je zobrazen na obr. 21. Obr. 22, 23 a 24 zobrazují 2D model v Agrosu2D. Pro sestavení modelu byla použita síť s 2160 uzly, 868 uzly a 1659 stupni volnosti.

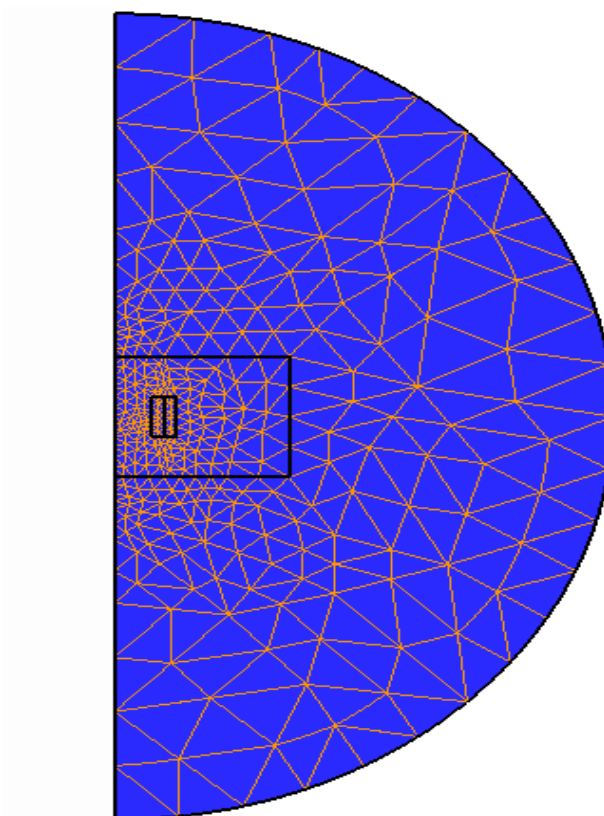
Celá sestava je umístěna v nádobě s magnetickou kapalinou. Okolí nádoby tvoří vzduch, ale to v tomto případě není tak podstatné. Jádro i blízké okolí měřicí sestavy je tvořeno jedním prostředím, magnetická reluktance je všude stejná. Díky konfiguraci cívek se k měřicí cívce dostane značná část magnetického toku. Dle naintegrovaných hodnot se indukce napětí v měřicí cívce bude účastnit  $\Phi=5,947 \cdot 10^{-6}$  Wb z  $\Phi= 6,7078 \cdot 10^{-6}$  Wb, tj. 89%. Model je konstrukčně jednodušší oproti modelu 4, bude proto vybrán pro naše měření.



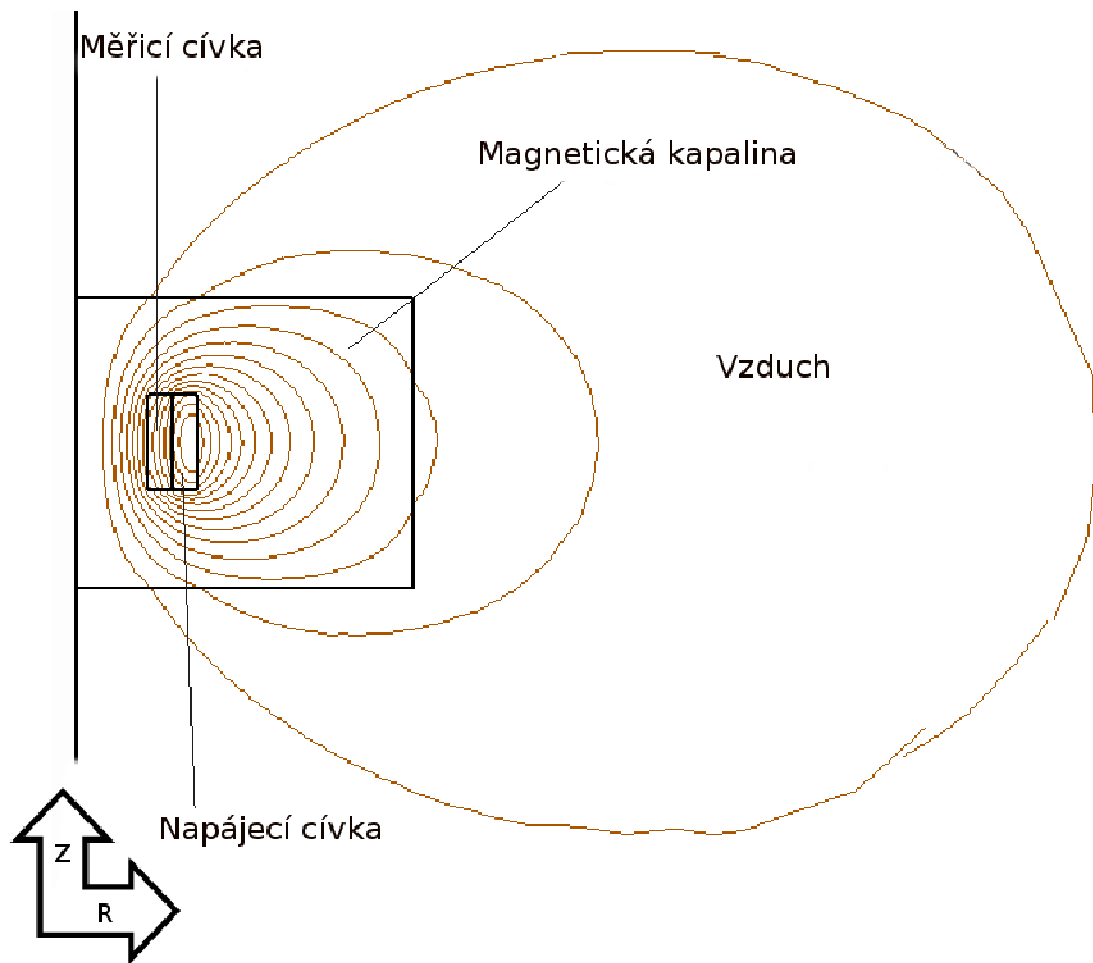
Obr. 21: 3D model přípravku



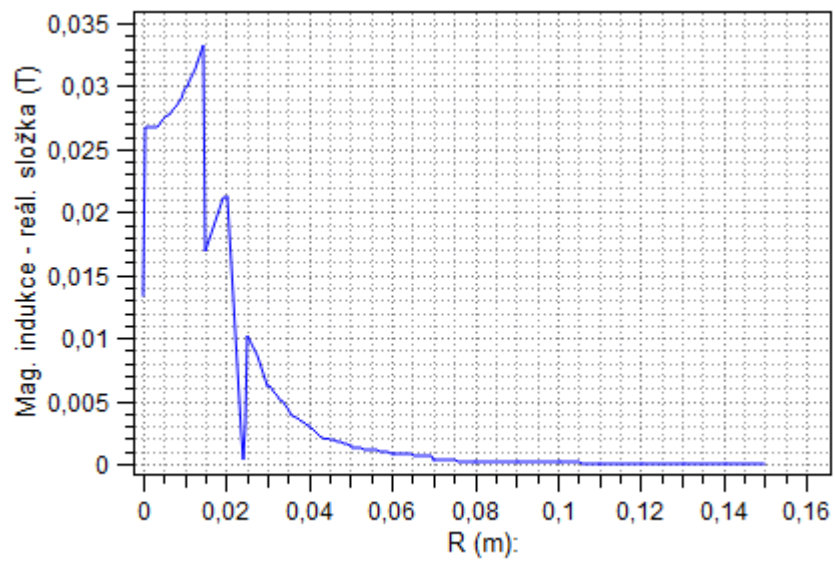
Obr. 22: Popis 2D modelu přípravku v programu Agros 2D



Obr.23: Matematický model návrhu 3: definiční oblast a síť



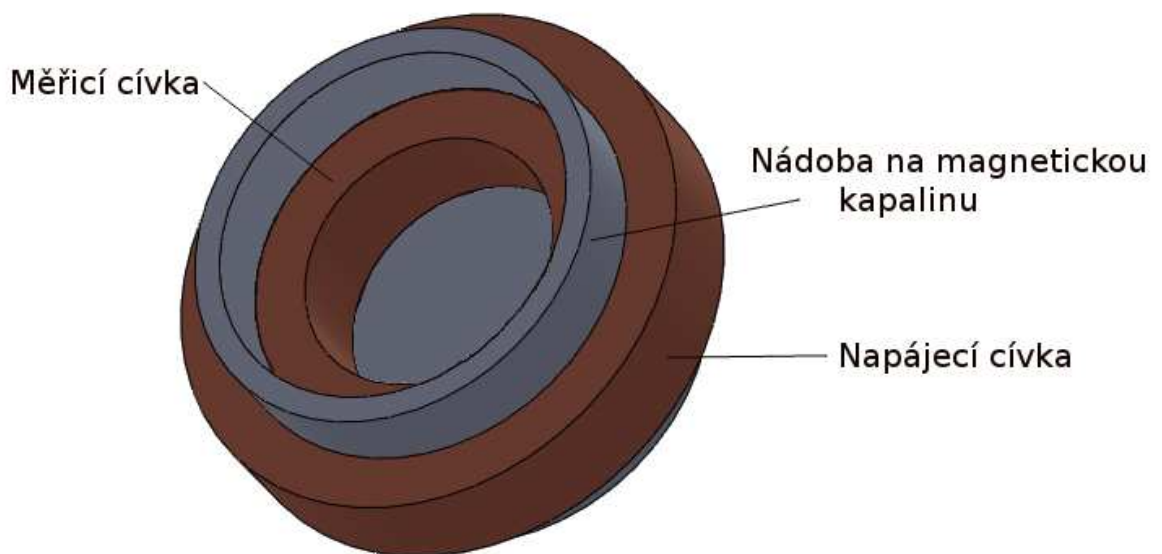
Obr. 24: Návrh měřicího přípravku 3 v programu Agros 2D – znázornění rozložení magnetického pole.



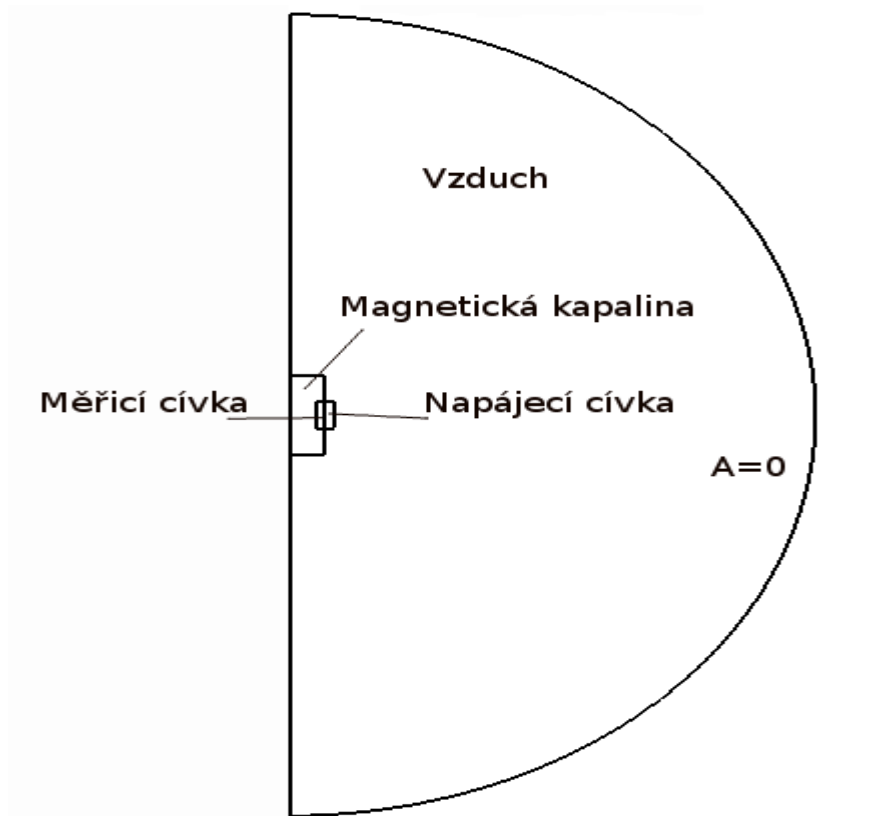
Graf 9: Zobrazení průběhu magnetické indukce v modelu 3

#### 5.1.4 Model 4

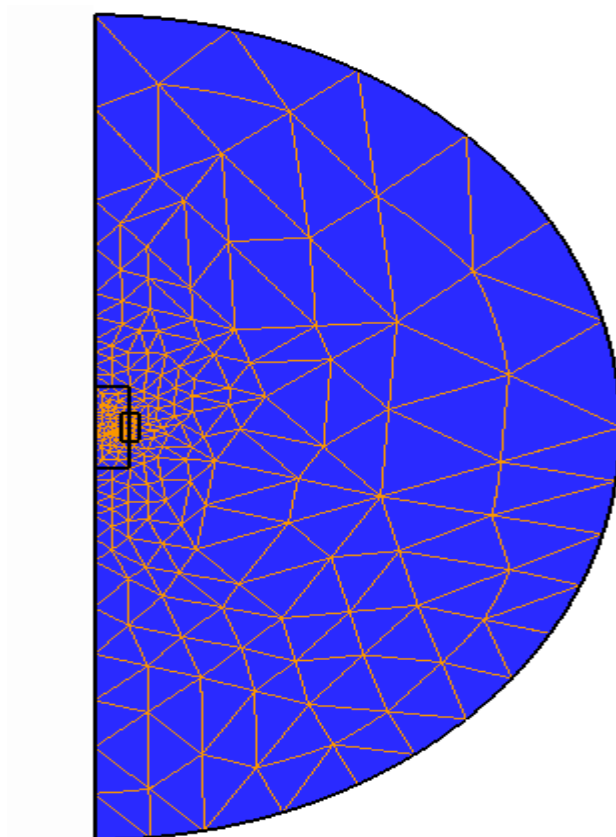
Model 4 je obdobný předchozímu modelu 3. Rozdíl mezi těmito modely je v umístění cívek (obr. 25). Měřicí cívka je umístěna v nádobě s magnetickou kapalinou, napájecí cívka je pak umístěna vně nádoby. V této konfiguraci je hranice prostředí nastavena tak, aby ve srovnání s modelem 3 procházela větší část magnetického toku jádrem měřicí cívky. Jádrem měřicí cívky bude procházet tok  $\Phi = 4,81 \cdot 10^{-6}$  Wb z celkového  $\Phi = 5,1396 \cdot 10^{-6}$  Wb, tj. 93%. Model je však konstrukčně složitější. Pro sestavení 2D modelu byla použita síť s 1215 uzly, 488 elementy a 933 stupni volnosti (Obr. 26, 27 a 28).



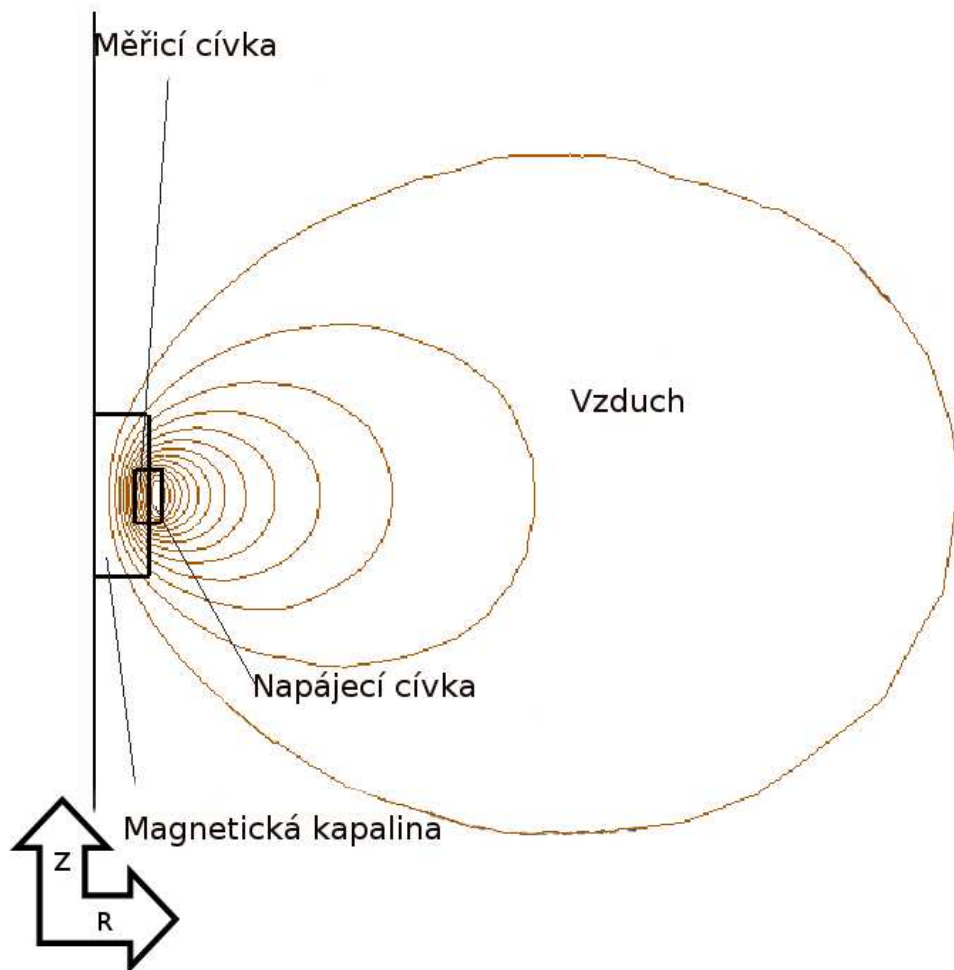
Obr. 25: 3D model přípravku



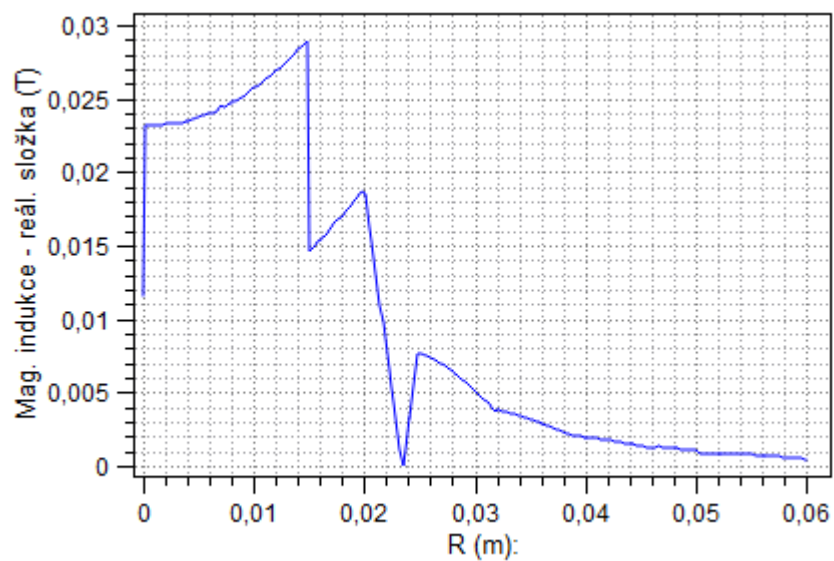
Obr. 26: Popis 2D modelu přípravku v programu Agros 2D



Obr.27: Matematický model návrhu 4: definiční oblast a síť



Obr. 28: Návrh měřicího přípravku 4 v programu agros 2D – znázornění rozložení magnetického pole.



Graf 10: Zobrazení průběhu magnetické indukce v modelu 4

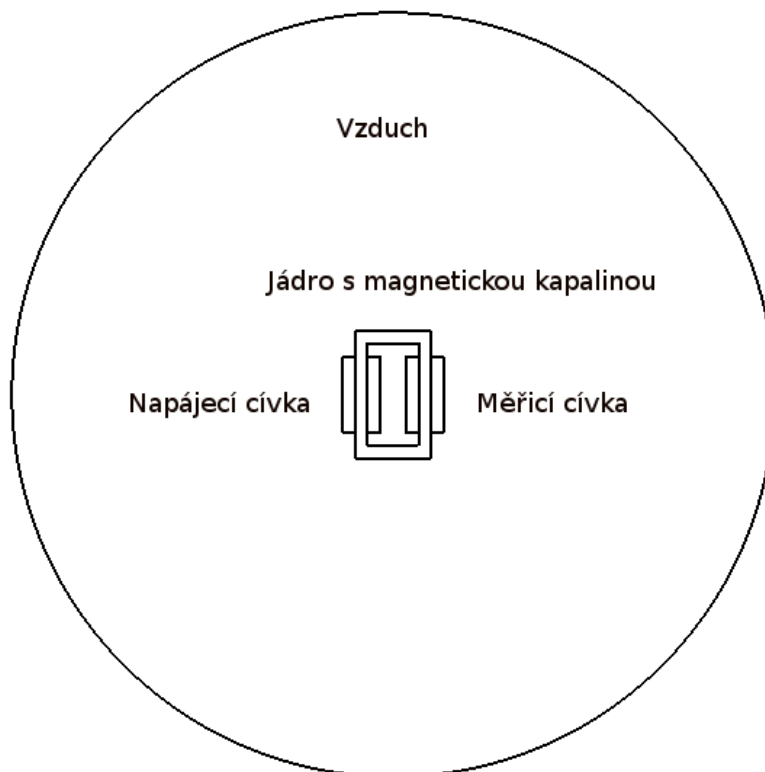


### 5.1.5 Model 5

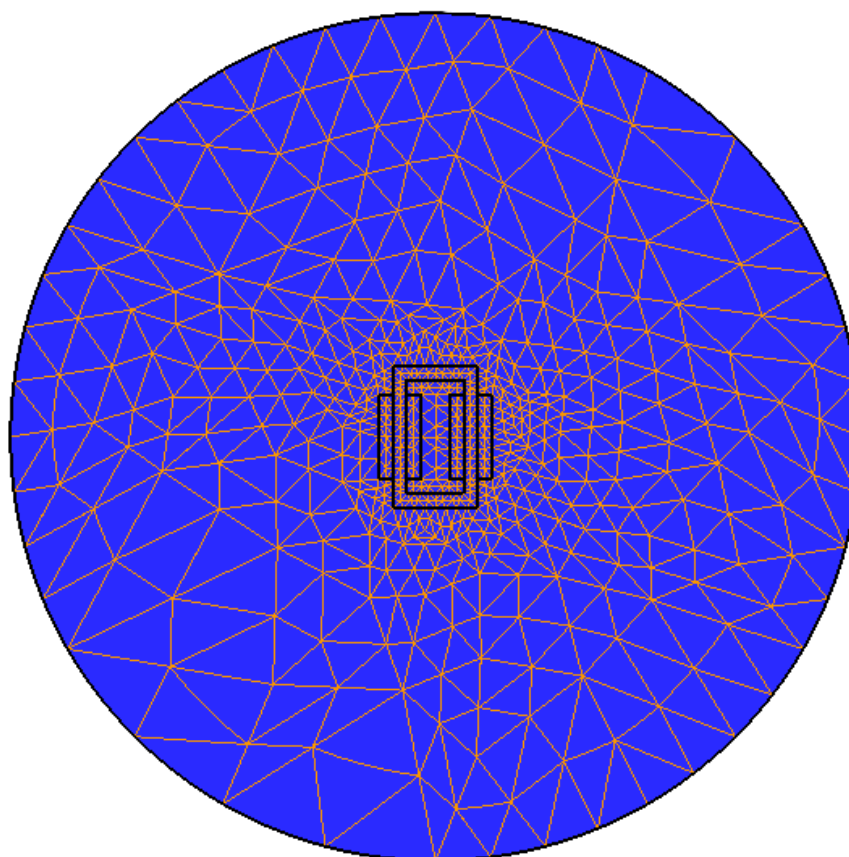
Konfigurace modelu 5 připomíná jednoduchý transformátor (obr. 29). Magnetická kapalina tvoří magnetický obvod. Model vychází z principu, kde se vzniklý magnetický tok přenesl magnetickým jádrem od napájecí cívky k měřicí. Vzhledem k malým rozdílům magnetických reluktancí mezi vzduchem a kapalinou se magnetický tok uzavírá přes jádro minimálně (obr.31). Sestavený 2D model byl vytvořen ze sítě s 3197 uzly, 1332 elementy a 2639 stupni volnosti. V oblasti měřicí cívky se vyskytuje  $\Phi = 7,6743 \cdot 10^{-6}$  Wb, tj. 9 % hodnoty vybuzeného magnetického indukčního toku  $\Phi = 8,5380 \cdot 10^{-5}$  Wb . Vzhledem k nízkým hodnotám přeneseného toku je model nepoužitelný.



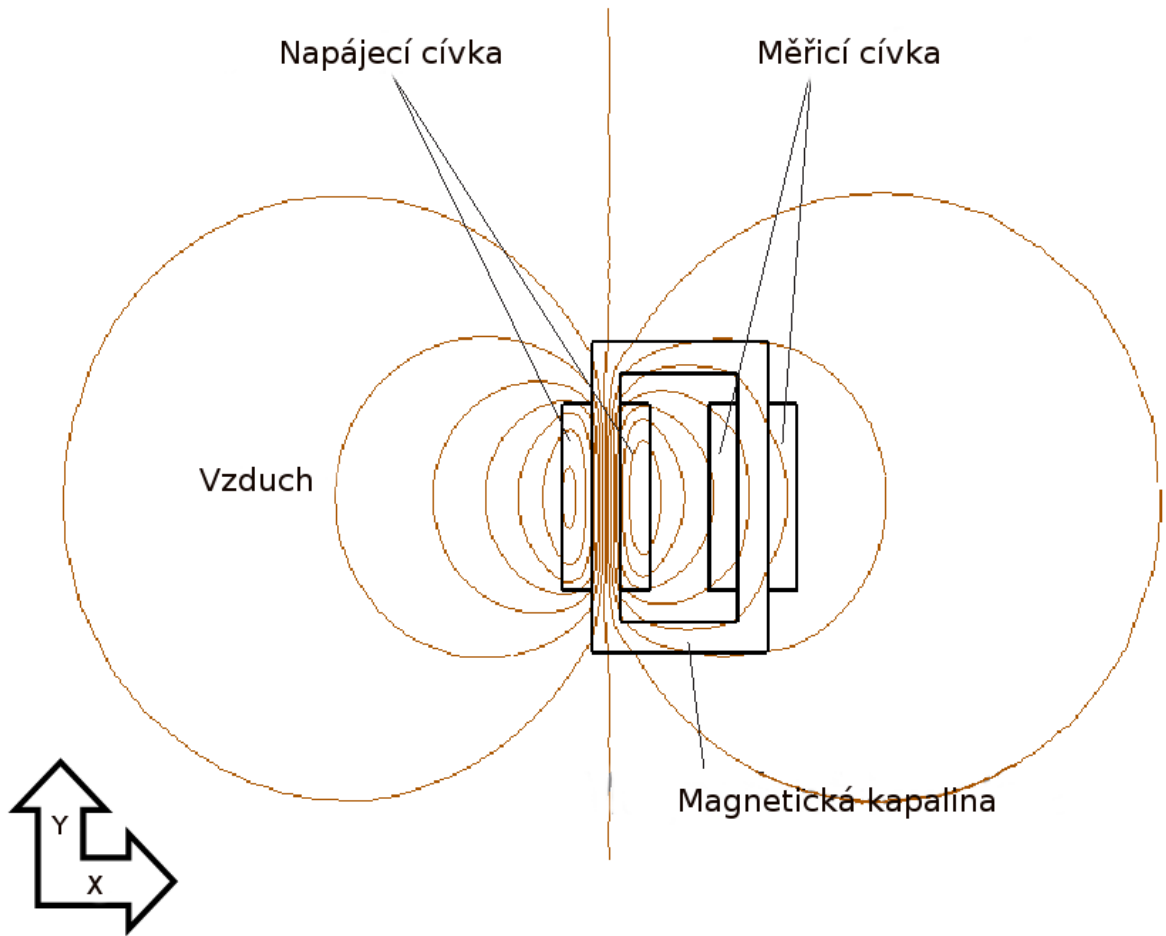
*Obr. 29: 3D model přípravku*



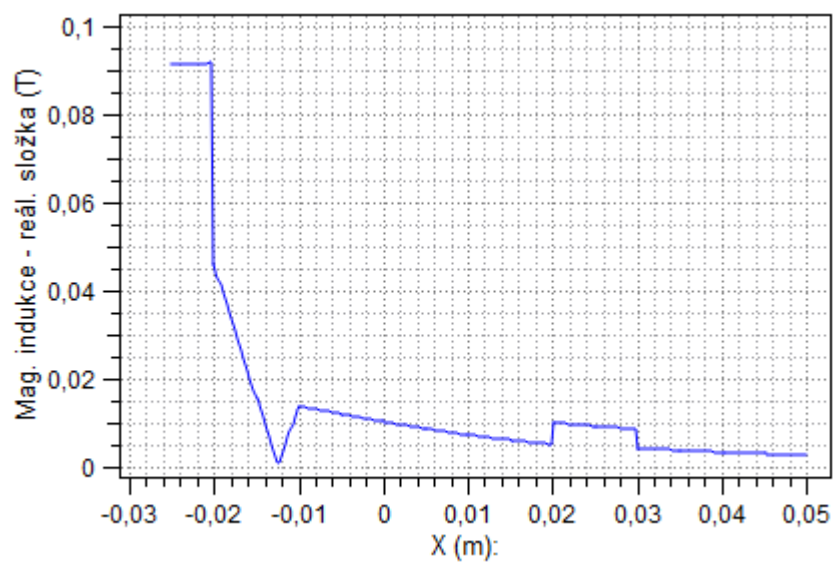
Obr. 30: Popis 2D modelu přípravku v programu Agros 2D



Obr.31: Matematický model návrhu 5: definiční oblast a síť



Obr. 32: Návrh měřicího přípravku 5 v programu agros 2D – znázornění rozložení magnetického pole.



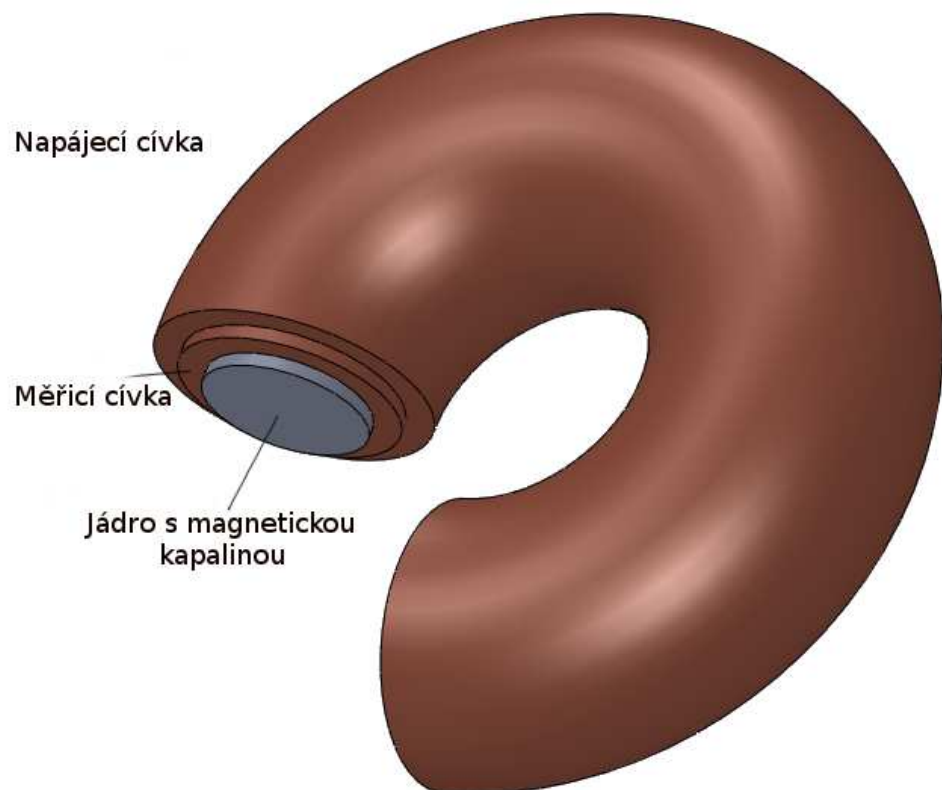
Graf 11: Zobrazení průběhu magnetické indukce v modelu 5

### 5.1.6 Model 6 a 7

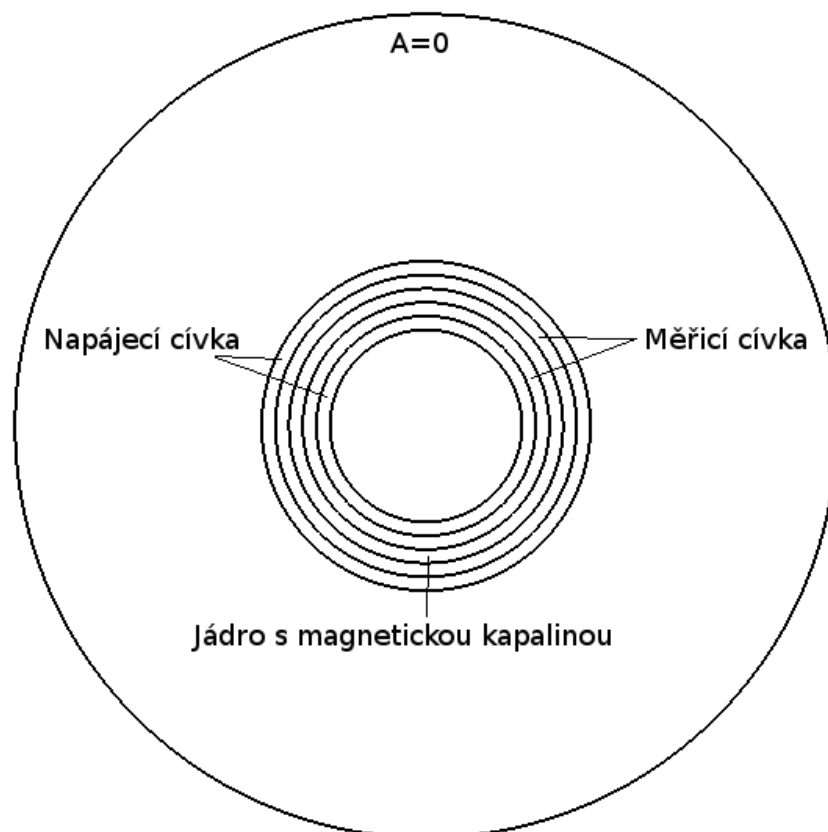
Modely 6 a 7 představují sestavu složenou ze dvou vinutí navinutých na magnetický obvod kruhovitěho tvaru (obr. 33). Modely se liší pouze pozicí cívek. V modelu 6 je vnější cívka napájecí, u modelu 7 je vnější cívka použita jako měřicí. 2D model byl sestaven za použití sítě s 9313 uzly, 3904 elementy a 7777 stupňů volnosti.

Model ukazuje vysokou hodnotu koncentrace magnetického toku v jádře, bohužel tento tok tvoří jen desetinu celkového toku. Zbylý tok se uzavírá vzduchem. V modelu 6 bude jádrem procházet  $\Phi = 7,7710 \cdot 10^{-4}$  Wb z  $\Phi = 0,0083$  Wb, tj. 9%. V modelu 7 bude jádrem procházet  $\Phi = 8,8011 \cdot 10^{-4}$  Wb z celkového  $\Phi = 0,0083$  Wb, tj. 10 %.

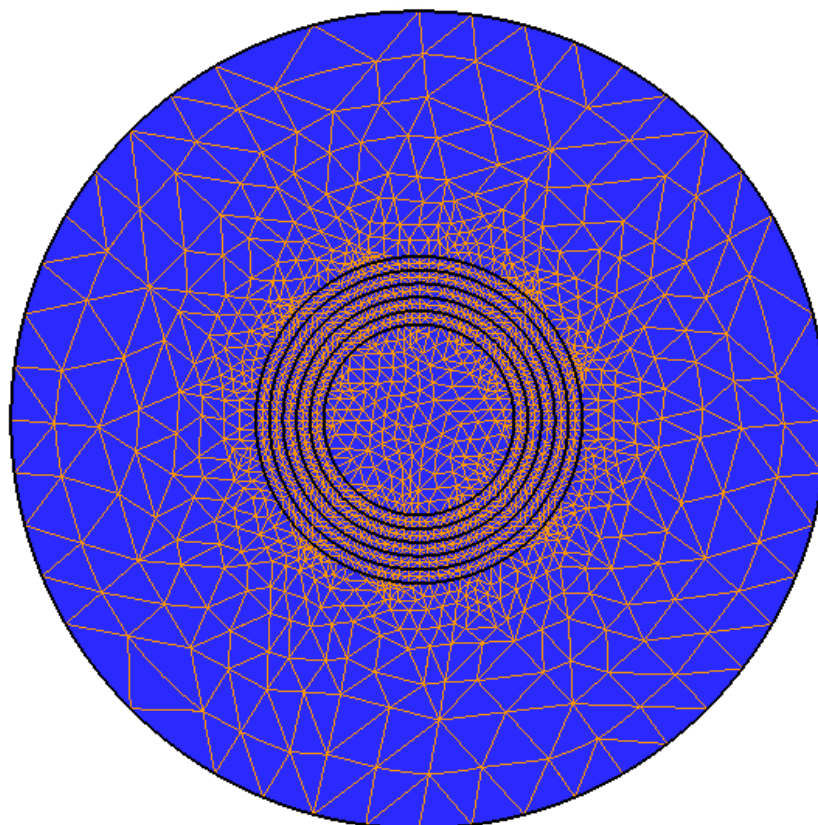
Nízká hodnota magnetického toku v jádře spolu s konstrukční náročností realizace modelu jsou důvodem, proč tento model nemůže být použit pro měření.



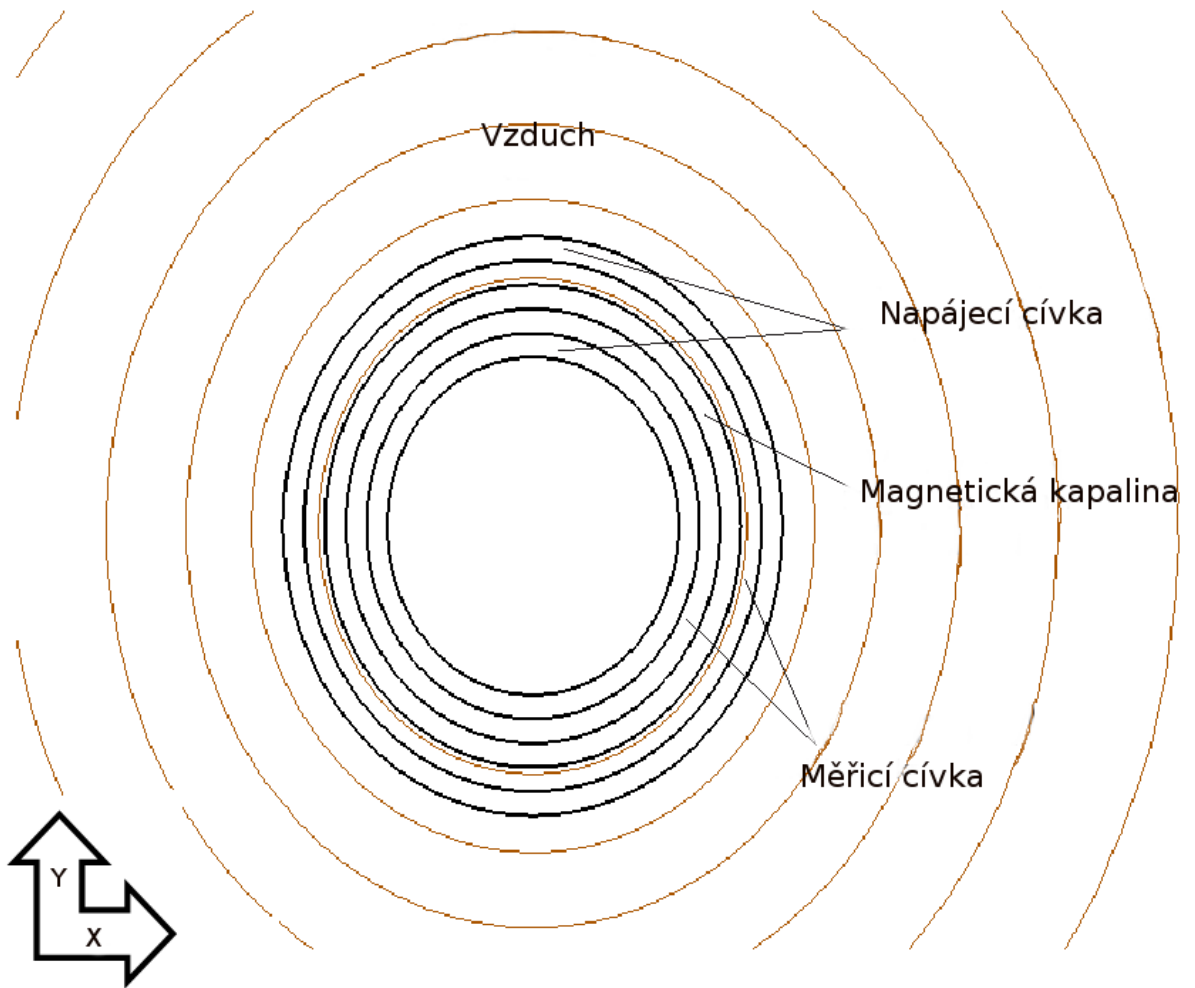
Obr. 33: 3D model přípravku (v části proveden řez, jelikož je přípravek tvořen několika vrstvami)



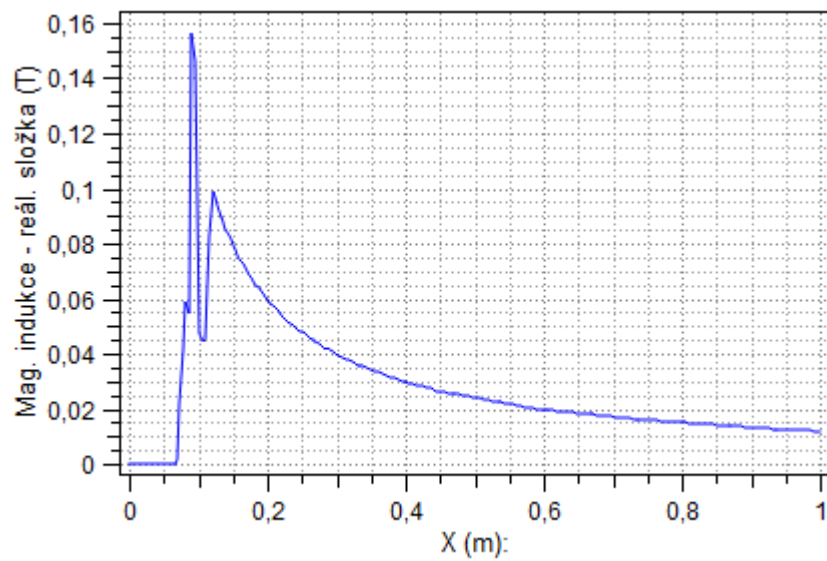
Obr. 34: Popis 2D modelu přípravku v programu Agros 2D



Obr.35: Matematický model návrhu 6: definiční oblast a síť



Obr. 36: Návrh měřicího přípravku 6 v programu agros 2D – znázornění rozložení magnetického pole.



Graf 12: Zobrazení průběhu magnetické indukce v modelu 5

### 5.1.7 Shrnutí výsledků modelování

Model č.	$\Phi_{\text{jádro napájecí cívky [Wb]}$	$\Phi_{\text{jádro měřicí cívky [Wb]}$	Poměr [%]
1	$1,105 \cdot 10^{-4}$	$1,2039 \cdot 10^{-5}$	11
2	$9,4350 \cdot 10^{-5}$	$1,3853 \cdot 10^{-5}$	15
3	$6,7078 \cdot 10^{-6}$	$5,947 \cdot 10^{-6}$	89
4	$5,1396 \cdot 10^{-6}$	$4,81 \cdot 10^{-6}$	93
5	$8,5380 \cdot 10^{-5}$	$7,6743 \cdot 10^{-6}$	9
6	0,0083	$7,7710 \cdot 10^{-4}$	9
7	0,0083	$8,8011 \cdot 10^{-4}$	10

Tabulka 4 : Vyhodnocení modelů.

Provedené simulace ukázaly, že nejvhodnější konfigurací bude model 3 nebo 4. Vzhledem k umístění obou cívek se dostane velká část indukčního toku k vinutí měřicí cívky i přes velký rozptyl magnetické indukce. Nejvhodnějším modelem se ukázal být model 3, který je vzhledem k modelu 4 konstrukčně jednodušší.

### 5.1.8 Charakteristika přípravku

Na základě vybraného modelu byl zrealizován měřicí přípravek složený ze dvou samostatných vinutí vinutých za sebou. Obě vinutí mají shodnou indukčnost o hodnotách  $L = 1$  mH. Pro vinutí byl použit vodič VF licna 100x0,071 o odporu vinutí 0,6  $\Omega$ . Pro přípravek byla použita kostra PM74/59 B65687-A1018-T1 (EPCOS). Protokol o kusové zkoušce je vložen jako příloha 1.



*Obr.37: Měřicí přípravek*

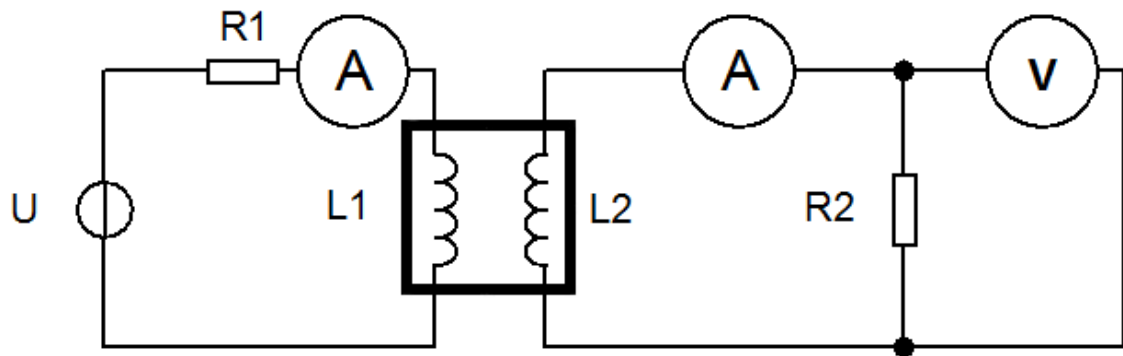
## **5.2 Návrh měřicí metody**

Po dokončení modelování a vyhodnocení modelů jsem přistoupil k návrhu vhodné měřicí metody. Do užšího výběru se nakonec dostaly 3 návrhy. Každý z návrhů přistupuje k získání konečné hodnoty trochu jinak, nakonec jsem vybral ten nejvhodnější na základě zhodnocení aspektů, které se k danému návrhu vztahovaly.

### **5.2.1 Návrh 1**

První návrh vznikl na základě Ohmovy metody pro měření impedancí. Z naměřených hodnot lze vypočítat indukčnosti pomocí jejichž poměru lze snadno získat hodnotu relativní permeability.





Obr.38: Schéma zapojení pro 1. návrh

Navrhovaná metoda obsahuje 3 části: měření ve vzduchu, měření v kapalině a výpočetní část. Pro vlastní měření je zásadní znalost vzájemné indukčnosti cívek  $M_v$ . Ze změřených napětí a proudů lze získat hodnotu vlastní indukčnosti úpravou rovnice

$$u_2 = L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} + M_v \cdot \frac{di_1}{dt} \quad (37)$$

Po provedení měření v obou prostředích pak vyjde hodnota relativní permeability z poměru vlastních indukčností sekundární cívky dle vztahu

$$\mu_r = \frac{L_{kapalina}}{L_{vzduch}} \quad (38)$$

Navrhovaná metoda je bohužel příliš komplikovaná vzhledem k existenci vzájemné indukčnosti. Tento jev lze eliminovat užitím jiné metody, při které nebude sekundárním vinutím procházet proud. Další uvažované metody již se vzájemnou indukčností nepočítají.

### 5.2.2 Návrh 2

Navrhovaná metoda je založena na analýze indukovaného magnetického pole. Základní rovnicí je rovnice Faradayův zákon elektromagnetické indukce

$$u_i = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (39)$$

Ze zákona o celkovém proudu

$$\oint_l H dl = N \cdot I \quad (40)$$

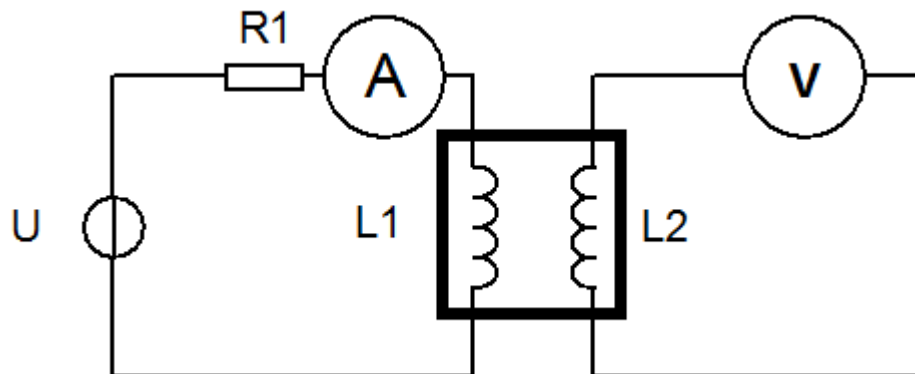
a vztahu (25) dosadíme do rovnice pro výpočet magnetického indukčního toku

$$\int_S B dS = \phi \quad (41)$$

,kterou pak dosadíme do rovnice zákona elektromagnetické indukce. Získaný vztah bude mít podobu dle rovnice 42

$$u_i = - \frac{d\left(\frac{\mu \cdot N \cdot I \cdot S}{l}\right)}{dt} \quad (42)$$

Indukované napětí na sekundárním vinutí i proud na primárním vinutí lze snadno změřit dle schématu na obr.39. Indukované napětí je nutno před výpočtem přepočíst podle transformačního poměru přípravku. Počet závitů i plocha jádra jsou známá čísla. K dopočtení permeability však zbývá určit délku indukční čáry, která se vzhledem k nízkých hodnotám měřené permeability bude neskadno určovat.



Obr.39: Schéma zapojení pro 2. návrh

### 5.2.3 Návrh 3

Třetí navrhovaná metoda je rovněž založena na Faradayově zákoně elektromagnetické indukce. Z rovnice (39) vyjádříme vztah pro magnetický indukční tok

$$\phi = -\frac{1}{N} \int u_i dt \quad (43)$$

Dále ze vztahu (41) vyjádříme magnetickou indukci, tedy

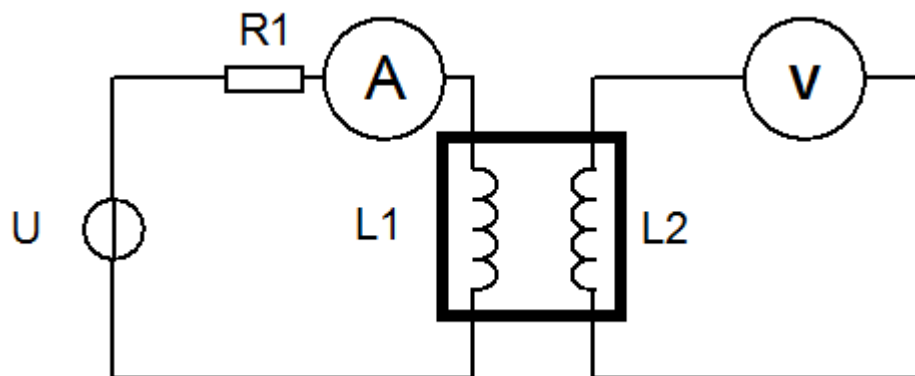
$$B = \frac{d\phi}{dS} \quad (44)$$

Vypočtenou indukci pak můžeme použít ve vztahu (25). Výše uvedené výpočty provedeme pro naměřené hodnoty ve vzduchu i v kapalině dle schématu na obr.40. Výsledná rovnice pro výpočet magnetické indukce bude mít tvar

$$B = \frac{U_0}{\pi \cdot f \cdot S \cdot N} \quad (45)$$

Před vypočtením indukce bude nutno ještě zkorigovat hodnotu napětí o transformační poměr, se kterým je nutno vzhledem k povaze měřicího prvku počítat. Hodnotu relativní permeability získáme poměrem obou vypočtených indukčností, tedy

$$\mu_r = \frac{B_{kapalina}}{B_{vzduch}} \quad (46)$$



Obr.40: Schéma zapojení pro návrh 3

Poslední navrhovaná metoda již neobsahuje nedostatky předchozích metod. Z výstupního napětí lze po provedení měření ve vzduchu a kapalině snadno výpočtem získat hodnoty relativní permeability. Tato metoda bude použita pro vlastní měření.

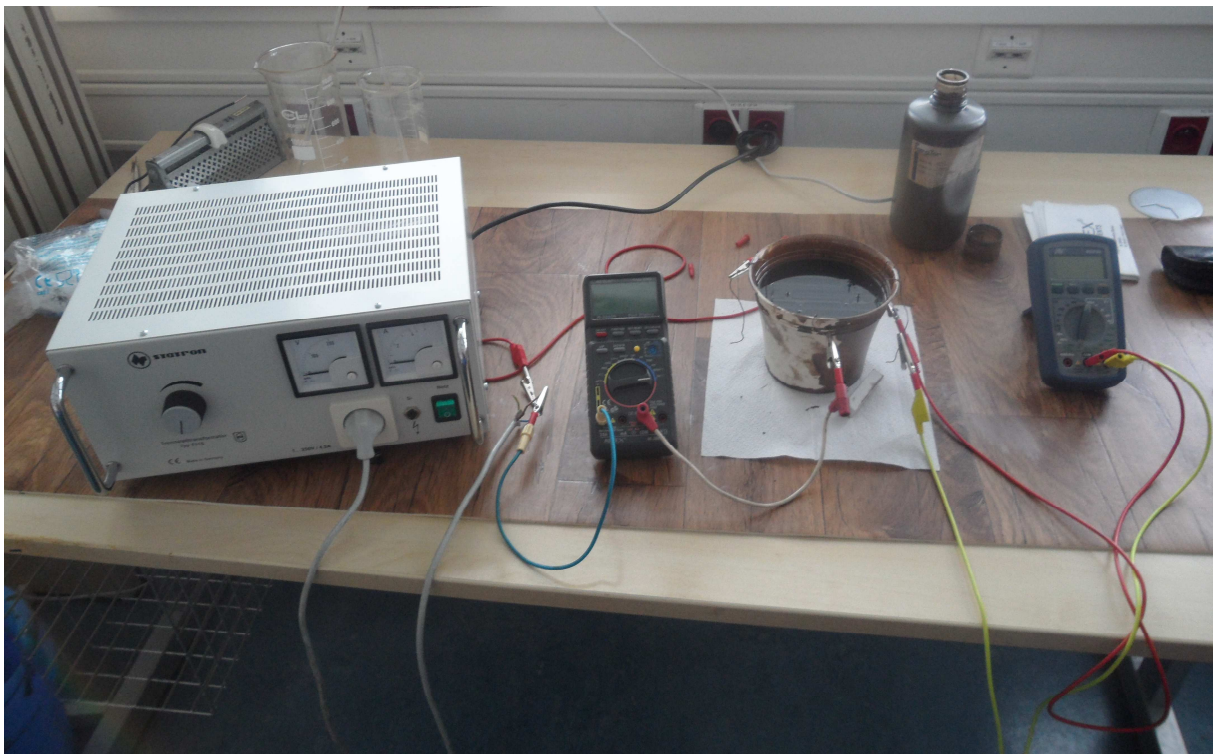
### 5.2.4 Vyhodnocení měřicích metod

Z navrhovaných měřicích metod jsem vybral metodu 3 vzhledem k její jednoduchosti a způsobu získání výsledků. Oproti dalším dvěma metodám vyniká absencí rušivého elementu (vzájemná indukčnost v modelu 1) či konkrétností získaných hodnot (problém s délkou indukční čáry v modelu 2). V průběhu měření se tak nemůže vyskytnout jev, který by měření negativně ovlivnil.

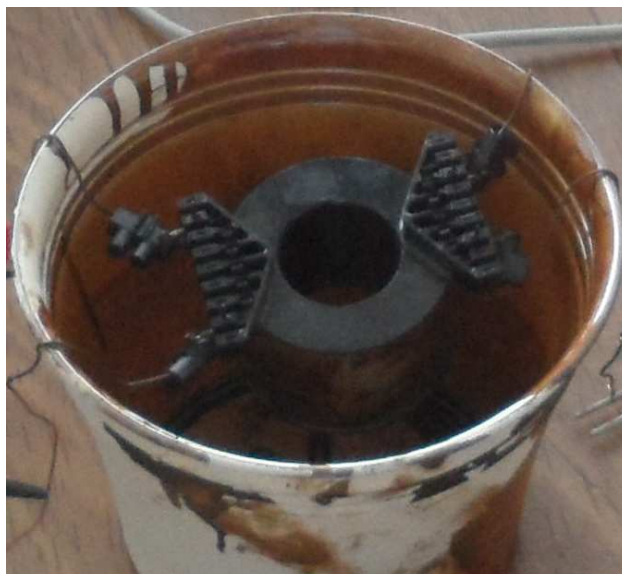
### 5.3 Realizace měření

Pro vlastní měření jsem nakonec vybral třetí návrh. Ve srovnání s dalšími dvěma návrhy je tento návrh jednoduchý a není třeba provádět doplňující měření k získání dalších hodnot potřebných k vyhodnocení, viz. měření vzájemné indukčnosti. Pro měření byly použity přístroje: autotransformátor RT.2,5J, multimetr METEX M-3850, multimetr BST BS 3703, měřicí přípravek.

Přístroje jsem zapojil dle obr. 41. Zapojenou úlohu zachycují fotografie.



Obr.41: Zapojení úlohy. Měření s kapalinou



Obr.42: Pohled na měřicí přípravek před nalitím kapaliny

#### 5.4 Záznam z měření

Záznam měření v kapalině							
Vstupní proud [A]	0,4	0,8	1,2	1,6	2	2,4	2,8
Výstupní napětí [mV] (měření 1)	51,9	97,2	150,1	194,9	251,6	290,6	339,9
Výstupní napětí [mV] (měření 2)	44,5	97,4	145,8	199,3	242,3	290,7	340,7
Výstupní napětí [mV] (měření 3)	53,1	99,6	145,5	196	249,4	291,7	333,2
Výstupní napětí [mV] (měření 4)	45,3	97	146,1	188,2	251,6	291,9	336,9
Výstupní napětí [mV] (měření 5)	51,6	91,2	151	198	247,6	289,2	229,9
Výstupní napětí [mV] (měření 6)	52,5	98,8	150	190,4	242,1	291,2	339,6
Výstupní napětí [mV] (měření 7)	44,9	98,4	151,6	199,1	247,4	291	334,4
Výstupní napětí [mV] (měření 8)	45,9	96,8	152,7	196,1	242,9	290,2	340,2
Výstupní napětí [mV] (měření 9)	52,6	99,8	145,7	194,9	242,8	290,6	340,6
Výstupní napětí [mV] (měření 10)	51,1	96,8	144,7	196,1	237,8	290,8	339,2
Průměrná hodnota [mV]	49,34	97,3	148,32	195,3	245,55	290,79	327,46

Tab.5: Záznam měření v kapalině

Záznam měření na vzduchu							
Vstupní proud [A]	0,4	0,8	1,2	1,6	2	2,4	2,8
Výstupní napětí [mV] (měření 1)	22,7	44,2	65,5	89	112,8	133,5	154,7
Výstupní napětí [mV] (měření 2)	23,9	44,9	66,3	88,8	112,8	133,2	154,4
Výstupní napětí [mV] (měření 3)	22,9	45,3	65,4	88	111	132	156,7
Výstupní napětí [mV] (měření 4)	23,1	44,1	64,8	87,6	112,8	132,2	153,6
Výstupní napětí [mV] (měření 5)	22,5	44,9	66,8	88,6	110,2	132,5	155,8
Výstupní napětí [mV] (měření 6)	22,7	43,9	68,7	88,4	108	132,7	154,7
Výstupní napětí [mV] (měření 7)	23,3	44,3	65,7	89	110,6	133,1	156,1
Výstupní napětí [mV] (měření 8)	23,5	45,1	65,8	89	111,4	133,4	157,3
Výstupní napětí [mV] (měření 9)	23,3	44,6	66	88,4	109,4	133,2	156,9
Výstupní napětí [mV] (měření 10)	22,9	43,9	67,8	88,8	108,8	133,8	156,6
Průměrná hodnota [mV]	23,08	44,52	66,28	88,56	110,78	132,96	155,68

Tab.6: Záznam měření na vzduchu

Měření mělo dvě části. Při prvním měření byl měřicí přípravek na vzduchu, při druhém byl ponořen do magnetické kapaliny. Provedl jsem celkem 10 měření pro obě části. Průměrné naměřené hodnoty jsem použil k dalším výpočtům.

Tabulka vypočtených hodnot						
$U_{\text{vzduch}}$ [mV]	$U_{\text{kapalina}}$ [mV]	$B_{\text{vzduch}}$ [mT]	$B_{\text{kapalina}}$ [mT]	$\mu_r$ [-]	vstupní proud [A]	$H$ [kA/m]
23,08	49,34	0,407090099	0,870269734	2,13778163	0,4	0,323952007
44,52	97,3	0,785253518	1,716198726	2,18553459	0,8	0,624884895
66,28	148,32	1,169061167	2,616100668	2,23777912	1,2	0,930309318
88,56	195,3	1,56204069	3,444744205	2,20528455	1,6	1,243032486
110,78	245,55	1,95396192	4,331064719	2,21655533	2	1,554913491
132,96	290,79	2,345177622	5,129017754	2,18704874	2,4	1,866233055
155,68	327,46	2,745917961	5,775811251	2,10341727	2,8	2,185132084

Tab.7: Vyhodnocení měření

V tabulce došlo k výpočtům:

$$B = \frac{U_0}{\pi \cdot f \cdot S \cdot N \cdot n} \quad (47)$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

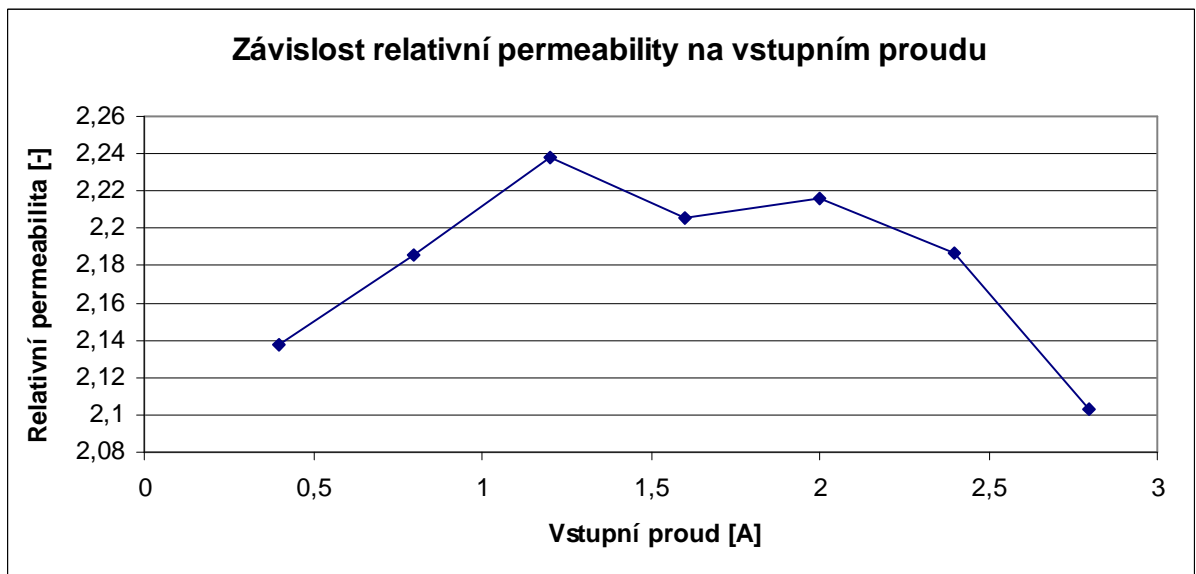
$$S = 0,0026 \text{ m}^2$$

$$N = 110$$

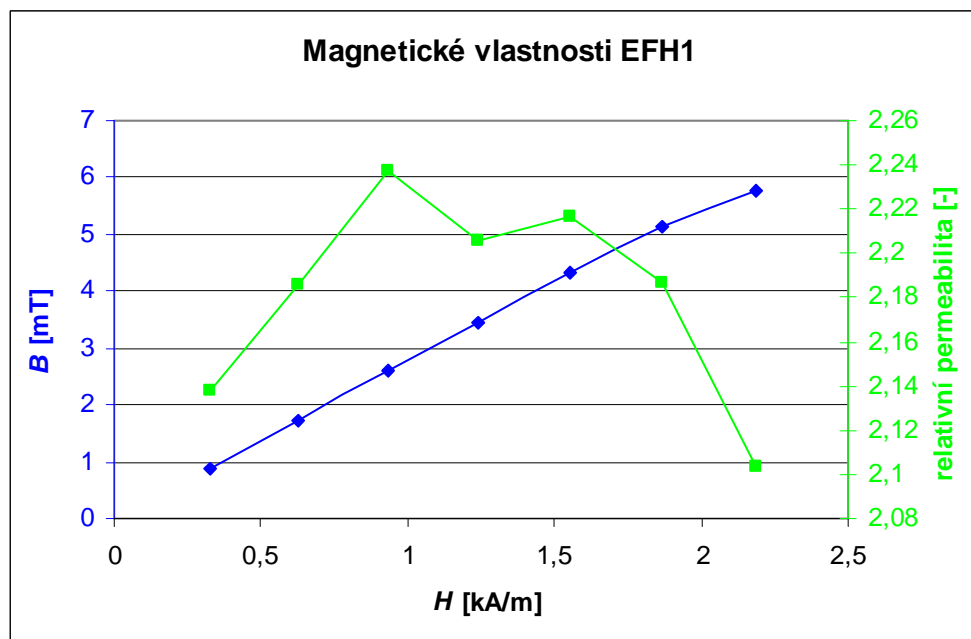
$$n = 1,262$$

$$\mu_r = \frac{B_{\text{kapalina}}}{B_{\text{vzduch}}} \quad (46)$$

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (48)$$



Graf 13: Znárodnění závislosti permeability na proudu procházejícím primární cívku



Graf 14: Magnetická charakteristika měřené kapaliny EFH1

## 5.5 Vyhodnocení měření

Výstupem mého měření je průběh z grafu 13. Graf 13 popisuje závislost hodnoty relativní permeability na proudu procházejícím vstupním vinutím. Vstupním proudem byla řízena intenzita magnetického pole v jádře přípravku, tj. důležitý parametr mého měření. Ze získaných hodnot lze pak snadno získat magnetizační charakteristiku měřené magnetické kapaliny, viz. graf 14. Výsledný průběh svým tvarem odpovídá průběhům naměřeným v [29], výsledky měření tedy lze považovat za správné. Vzhledem k možnostem laboratoře jsem proměřil pouze lineární část magnetizační charakteristiky. Saturační hodnoty jsem tedy nedosáhl. Dokazuje to fakt, že hodnota magnetické indukce v celém mnou naměřeném průběhu roste. Přítomnost stoupající části v první části charakteristiky naznačuje, že kapalina již nebude čistá vlivem experimentů, které na ní byly provedeny v minulosti. Pro proměření celé magnetizační charakteristiky by bylo potřeba vyrobit přípravek s více závity, aby bylo možné vytvořit silnější magnetické pole při stejném zatížení zdroje.



## **5.6 Hodnocení měřicí metody**

Navrhovanou metodou jsem získal průběh odpovídající očekávání. Vzhledem k jednoduchosti měření a získaným hodnotám lze metodu hodnotit jako vhodnou pro vyšetřování magnetických charakteristik. Metodu by šlo pro další použití zpřesnit použitím přípravku s více závitů. Tímto by se také snížily nároky na výkonnost zdroje a rozšířil by se tak rozsah měření.

## 6 Závěr

Předkládaná práce se zabývá problematikou magnetických kapalin. Práce je členěna na část teoretickou a praktickou.

Teoretická část si kládla za cíl uvést čtenáře do problematiky magnetických kapalin. Magnetické kapaliny jsou materiálem s širokým aplikačním potenciálem a tomu odpovídají i způsoby výroby popsané v práci. Kromě v práci popsaných základních postupů existuje řada dalších postupů k výrobě sledujících dosažení vlastností potřebných pro danou specifickou aplikaci. Některé aplikace jsou již prakticky využívány, mnohé zatím podléhají výzkumu. Představují buďto lepší alternativu řešení stávajících problémů či přelomovou inovaci v technickém řešení dané aplikace. V současnosti nedoceněné možnosti použití tohoto perspektivního materiálu ukáže až další výzkum.

Praktická část popisuje vývoj měřicí metody pro vyšetřování permeability jako důležitého parametru magnetických materiálů. Znalost hodnoty permeability je zásadní pro kvalifikovanou predikci chování zařízení. Permeabilita o takto nízkých hodnotách je parametr špatně měřitelný a vzhledem k vlastnostem kapalin je to i parametr měnící svojí hodnotu vlivem degradačních procesů. Nejspíše proto nejsou výrobci poskytovány magnetizační charakteristiky kapalin. Tyto aspekty byly motivací pro vývoj vlastní měřicí metody.

Dosažené výsledky provedených měření odpovídají předpokládaných hodnotám. Navrhovanou metodou lze získat jak hodnotu permeability, tak kompletní magnetizační charakteristiku. Vyvinutá metoda je proto vhodná pro praktické využívání.

## 7 Použitá literatura

- [1] Magnetické kapaliny a jejich použití. *www.aldebaran.cz* [online]. 2007 [cit. 2012-10-31]. Dostupné z: [http://www.aldebaran.cz/bulletin/2008\\_40/e1030778.pdf](http://www.aldebaran.cz/bulletin/2008_40/e1030778.pdf)
- [2] Magnetorheological Fluid. *Www.tech-faq.com* [online]. 2012 [cit. 2012-10-31]. Dostupné z: <http://www.tech-faq.com/magnetorheological-fluid.html>
- [3] Magnetic fluid and nanoparticle applications to nanotechnology. *Www.rle.mit.edu* [online]. 2001 [cit. 2013-02-05]. Dostupné z: <http://www.rle.mit.edu/cehv/documents/75-JournalofNanoparticleResearch.pdf>
- [4] Particle size distribution as key parameter for the flow behavior of ferrofluids. *Web.ebscohost.com/* [online]. 2003 [cit. 2013-02-06]. Dostupné z: <http://web.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?sid=a909c6a9-ca8a-4109-8e5d-4dc3e2a40129%40sessionmgr13&vid=2&hid=28>
- [5] ODENBACH, Stefan. *Colloidal magnetic fluids:Basics, development and application of ferrofluids*. Berlin Heidelberg: Springer, 2009. ISBN 978-3-540-85386-2.
- [6] Permeability (electromagnetism). *En.wikipedia.org* [online]. 2012 [cit. 2012-11-04]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Permeability\\_%28electromagnetism%29](http://en.wikipedia.org/wiki/Permeability_%28electromagnetism%29)
- [7] Magnetic properties of materials. *Info.ee.surrey.ac.uk* [online]. 2008 [cit. 2012-11-5]. Dostupné z: <http://info.ee.surrey.ac.uk/Workshop/advice/coils/mu/#mu>
- [8] The Preparation of Magnetic Fluids. *Pages.csam.montclair.edu* [online]. [cit. 2013-02-13]. Dostupné z: [http://pages.csam.montclair.edu/~yecko/ferro/oldpapers/DIRECTORY\\_LNP594/Charles\\_Prep.pdf](http://pages.csam.montclair.edu/~yecko/ferro/oldpapers/DIRECTORY_LNP594/Charles_Prep.pdf)

- [9] Audio Ferrofluids. *Www.ferrotec.com* [online]. © 2001–2013 [cit. 2013-01-24]. Dostupné z: <http://www.ferrotec.com/products/ferrofluid/audio/>
- [10] Role of a Ferrofluid in a Loudspeaker System. *Www.liquidsresearch.co.uk* [online]. 2011 [cit. 2013-01-24]. Dostupné z: [http://www.liquidsresearch.co.uk/en-GB/for\\_loudspeaker\\_applications-53.aspx](http://www.liquidsresearch.co.uk/en-GB/for_loudspeaker_applications-53.aspx)
- [11] Rheology of transformer oil based ferrofluids. *Www.researchgate.net* [online]. 2004 [cit. 2013-01-24]. Dostupné z: [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)
- [12] Ferrofluid Seals. *Www.sdmaterials.com* [online]. © 2008 [cit. 2013-01-24]. Dostupné z: [http://www.sdmaterials.com/ferrofluid\\_seals.html](http://www.sdmaterials.com/ferrofluid_seals.html)
- [13] Ferrofluidic Seal Technology. *Seals.ferrotec.com* [online]. © 2001–2013 [cit. 2013-01-24]. Dostupné z: <http://seals.ferrotec.com/technology/seals/>
- [14] *Ferrofluid sink/float separators for separating nonmagnetic materials of different densities* [patent]. United States patent, US5762204. Uděleno 9.červen 1998. Dostupné z: <http://www.google.com/patents/US5762204>
- [15] Dyke, Spencer, Sain & Carlson August 1, 1996 1 Modeling and Control of Magnetorheological Dampers for Seismic Response Reduction. *Home.dei.polimi.it* [online]. 1996 [cit. 2013-01-25]. Dostupné z: <ftp://home.dei.polimi.it/users/Luigi.Piroddi/MRD/DykeSpencer96c.pdf>
- [16] AC (60 Hz) and impulse breakdown strength of a colloidal fluid based on transformer oil and magnetite nanoparticles. *Ieeexplore.ieee.org* [online]. 1998 [cit. 2013-02-06]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=694869>
- [17] Advances in ferrofluid technology. *Www.sciencedirect.com* [online]. 1995 [cit. 2013-01-07]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0304885395003657>

[18] Clinical Applications of Magnetic Drug Targeting. *Www.sciencedirect.com* [online]. 2001 [cit. 2013-01-17]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002248040096030X#>

[19] Cancer research. *Cancerres.aacrjournals.org* [online]. 1996 [cit. 2013-01-22]. Dostupné z: <http://cancerres.aacrjournals.org/content/56/20/4686.full.pdf>

[20] *Aapsj.org/* [online]. [cit. 2013-01-23]. Dostupné z: <http://aapsj.org/>

[21] *Openi.nlm.nih.gov* [online]. [cit. 2013-01-23]. Dostupné z: [openi.nlm.nih.gov](http://openi.nlm.nih.gov)

[22] Magnetic particle hypertemia: nanoparticle magnetism and materials development for cancer therapy. *Http://www.ruf.rice.edu/~rau/phys600/JPCM2006s2919.pdf* [online]. 2006 [cit. 2013-01-23]. Dostupné z: <http://www.ruf.rice.edu/~rau/phys600/JPCM2006s2919.pdf>

[23] The Synthesis and Magnetic Properties of Nanosized Hematite ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Particles. *Igitur-archive.library.uu.nl* [online]. 2001 [cit. 2013-02-14]. Dostupné z: <http://igitur-archive.library.uu.nl/phys/2006-1201-222206/1393.pdf>

[24] Preparation of agglomeration-free hematite particles coated with silica and their reduction behavior in hydrogen. *Www.sciencedirect.com* [online]. 2005 [cit. 2013-02-14]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021979705001797>

[25] Preparation of ferrofluid from cyclodextrin and magnetite. *Www.sciencedirect.com* [online]. 2004 [cit. 2013-02-14]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885303019140>


[26] Preparation of a biocompatible magnetic film from an aqueous ferrofluid. *Www.sciencedirect.com* [online]. 2006 [cit. 2013-02-14]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885305011406>

[27] Ferrofluid, magnetická kapalina. *Fyzsem.fjfi.cvut.cz* [online]. [cit. 2013-02-14]. Dostupné z: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2011-2012/Zima11/proc/ferrofluid.pdf>

[28] A novel approach to measurement of permeability of magnetic fluids. *Pe.org.pl* [online]. 2012 [cit. 2013-04-12]. Dostupné z: <http://pe.org.pl/articles/2012/7b/63.pdf>

[29] Drops deformation and magnetic permeability of a ferrofluid emulsion. *Www.sciencedirect.com* [online]. 2011 [cit. 2013-02-14]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927775711001762#>

## 8 Přílohy

Dokument:	T07A-Zkušební protokol výstupní kontroly	
Správce dokumentu:	Miroslav Janča	
Revize: / Datum platnosti revize:	1.01 / 01.10.2008	
Archivace:	Archivace: Oddělení kontroly	

<b>PROTOKOL O KUSOVÉ ZKOUŠCE</b> <b>OUTPUT CONTROL TEST RECORD</b> (podle ČSN EN 61558, according EN 61558)		
Typ ST: (Code in ST)	KUB. PM 74. 059. 2 x 1 mH	
Zákazník: (Customer)	p. Kubát	Zakázka: (Order) CZ 12 217
Typ zákazníka: (Code of customer)	-	Počet kusů: (Amount) 2
L. 1 - Zkouška spojitosti ochranného spojení : (Protective connection test) Vyhovuje (Approved) 100% : <input type="checkbox"/>		
Jmenovité vstupní napětí (Rated supply voltage) $U_i$ : 20,7V (10kHz, 1V - s jádrem N27)		
L. 2 Výstupní napětí naprázdno $U_o$ (No-load output voltage)		
Obvod (Circuit)	Rozmezí (Range) [V]	Typická hodnota (Typical value) [V]
$w_2$	16,4	
transf. poměr $w_1/w_2$	1,262	
L. 3 - Zkouška elektrické pevnosti: (High voltage test)		
Obvod (Circuit)	Zkušební napětí (Test voltage) [kV]	Vyhovuje (Approved) 100% :
$w_1 - w_2$	1kV	<input checked="" type="checkbox"/>
		<input type="checkbox"/>
		<input type="checkbox"/>
		<input type="checkbox"/>
		<input type="checkbox"/>
L. 4 - Kontrola montáže jisticích prvků: (Mounting test of protective elements) Vyhovuje (Approved) 100% : <input type="checkbox"/>		
<b>Další měření podle požadavků zákazníka</b> (Other measurings - customer request):		
	Rozmezí (Range)	Typická hodnota (Typical value)
Proud naprázdno $I_o$ [mA]: (No-load input current)	-	
Indukčnost L: $w_1$ : (3-7) (Inductance L)	1,01 mH	
Indukčnost L: $w_2$ : (11-17) (Inductance L)	1,01 mH	
Indukčnost L: (Inductance L)		
Měřil, kontroloval : M. Janča (Measured, checked by) Datum (Date): 12. 12. 2012	Schválil (Approved by): M. Janča Datum (Date): 12. 12. 2012	

## Evidenční list

Souhlasím s tím, aby moje diplomová práce byla půjčována k prezenčnímu studiu v Univerzitní knihovně ZČU v Plzni.

Datum:

Podpis:

Uživatel stvrzuje svým podpisem, že tuto diplomovou práci použil ke studijním účelům a prohlašuje, že ji uvede mezi použité prameny.

Jméno	Fakulta/katedra	Datum	Podpis