

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Studie vybraných parametrů magnetických kapalin pro  
využití v senzorové technice**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2015/2016

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

Jméno a příjmení: **Bc. Jan KOUBA**  
Osobní číslo: **E14N0133P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Studie vybraných parametrů magnetických kapalin pro využití v senzorové technice**  
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Uveďte vlastnosti a výčet technických aplikací magnetických kapalin. Zaměřte se na využití kapalin v senzorové technice.
  2. Vyberte typ senzoru s magnetickou kapalinou, který bude následně realizován.
  3. Zvolte vhodné metody a sestavte přípravky pro měření klíčových parametrů magnetických kapalin pro využití ve zvoleném senzoru.
  4. Navrhněte, sestrojte a proměřte senzor s magnetickou kapalinou.
  5. Zhodnoťte navržené metody a přípravek. Stanovte potenciál využití senzoru v praxi a jeho výslednou výrobní cenu.
-

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. ODENBACH, S. Colloidal magnetic fluids. Springer, 2009, 429 s., Lecture Notes in Physics. ISBN: 978-3-540-85386-2.
2. POLCAR, P., JANSÁ, J., KOUDELA, L., ČESKÝ, J. Investigation of Magnetoviscous Effect Under Different External Conditions. In Proceedings of abstracts. Žilina: University of Žilina, 2014. s. 11. ISBN: 978-80-554-0910-8
3. POLCAR, P., KUBÁT, M. On Measurement of Magnetic Permeability of Ferromagnetic Fluids. Computational Problems of Electrical Engineering, 2013, roč. 3, č. 2, s. 97-100. ISSN: 2224-0977
4. MAYER, D., POLCAR, P. A novel approach to measurement of permeability of magnetic fluids. Przegląd Elektrotechniczny, 2012, roč. 88, č. 7B, s. 229-231. ISSN: 0033-2097
5. Další bude předána při konzultaci.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Polcar, Ph.D.**  
Katedra teoretické elektrotechniky


Konzultant diplomové práce: **Ing. Josef Český**  
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**

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



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce se zabývá využitím magnetických kapalin v sensorové technice a návrhem, realizací a verifikací náklonového senzoru využívajícího speciálních vlastností magnetických kapalin. Při návrhu náklonového senzoru je zhotoven 3D model za pomoci softwaru Solidworks. Dále je provedena simulace magnetického pole v programu Agros2D. Po vypracování návrhu je dále technologií 3D tisku zhotovena hlavní konstrukce senzoru a poté navinuty cívky. Experimentálním měřením je zjištěno vhodné naplnění daného senzoru kapalinou a je zvolena vhodná kapalina. V závěru práce je zhodnocení použitých metod a navrženého inklinometru, určení potenciálu v praxi, určení výrobní ceny a ekonomické zamýšlení nad sériovou výrobou.

## **Klíčová slova**

magnetická kapalina, ferrokapalina, náklonový senzor, inklinometr, 3D tisk, indukčnost, permeabilita, simulace magnetického pole

## **Abstract**

The master thesis deals with the use of magnetic fluids in sensor technology. Thesis also deals with design, realization and verification of the inclination sensor. This sensor uses the special properties of magnetic fluids. In design of the inclination sensor is constructed 3D model using of Solidworks software. Also it is made as simulation of the magnetic field in the program Agros2D. The main structure of the sensor is made by 3D printer. The described experimental measurement showed what the appropriate amount of magnetic fluid is. Thanks to this measurement is chosen the suitable liquid for this kind of sensor. The conclusion provides an assessment of the methods and functional sample, determine production prices and economic consideration on serial production.

## **Key words**

magnetic fluid, ferrofluid, tilt sensor, inclinometer, 3D printing, inductance, permeability, simulation of the magnetic field

## **Prohlášení**

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 11.5.2016

Jan Kouba

## **Poděkování**

Touto formou bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Petru Polcarovi, Ph.D. za jeho ochotu, cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení během zpracování. Dále bych rád poděkoval celé své rodině, za podporu během celého studia.

Tato práce vznikla za podpory projektu Západočeské univerzity v Plzni, jmenovitě projektu SGS-2015-035: Vývoj pokročilých fyzikálních modelů a jejich experimentální verifikace.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>7</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>1 MAGNETICKÉ KAPALINY</b> .....	<b>10</b>
1.1 VLASTNOSTI .....	10
1.2 DRUHY .....	11
1.3 VÝROBA MAGNETICKÝCH KAPALIN .....	11
1.4 NABÍDKA MAGNETICKÝCH KAPALIN .....	12
<b>2 POUŽITÍ MAGNETICKÝCH KAPALIN</b> .....	<b>14</b>
2.1 PRŮMYSLOVÉ APLIKACE .....	14
2.1.1 <i>Ferokapalinové tlumiče</i> .....	14
2.1.2 <i>Magnetická spojka (brzda)</i> .....	15
2.1.3 <i>Těsnění hřídele</i> .....	15
2.1.4 <i>Chlazení reproduktorů</i> .....	16
2.2 SENZOROVÁ TECHNIKA .....	16
2.2.1 <i>Měření otáček</i> .....	16
2.2.2 <i>Měření objemu</i> .....	18
2.2.3 <i>Měření tlaku</i> .....	19
2.2.4 <i>Měření magnetického pole</i> .....	20
2.2.5 <i>Měření průtoku plynu</i> .....	21
<b>3 MOŽNOSTI MĚŘENÍ NÁKLONU</b> .....	<b>23</b>
3.1 PŘEHLED PRINCIPŮ NÁKLONOVÝCH ČIDEL.....	23
3.2 PRŮZKUM TRHU .....	25
<b>4 NÁVRH NÁKLONOVÉHO ČIDLA</b> .....	<b>29</b>
4.1 TEORIE.....	29
4.2 TECHNICKÝ POPIS .....	30
4.3 NÁVRH KONSTRUKCE A 3D TISK.....	31
4.4 NUMERICKÝ MODEL .....	33
4.5 NAVINUTÍ CÍVEK.....	40
4.6 MOŽNOSTI MĚŘENÍ NÁKLONU.....	42
4.6.1 <i>Přímé metody</i> .....	42
4.6.2 <i>Transformační metody</i> .....	42
<b>5 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ TEORETICKÝCH PŘEDPOKLADŮ</b> .....	<b>44</b>
5.1 MĚŘENÍ PŘI RŮZNÉM NAPLNĚNÍ.....	44
5.2 MĚŘENÍ RŮZNÝCH MAGNETICKÝCH KAPALIN .....	46
5.3 MĚŘENÍ S BUDICÍ CÍVKOU.....	49
<b>6 ZHODNOCENÍ A VYUŽITÍ</b> .....	<b>52</b>
6.1 ZHODNOCENÍ METOD.....	52
6.2 ZHODNOCENÍ SENZORU A JEHO POTENCIÁL V PRAXI .....	52
6.3 VÝROBNÍ CENA .....	53
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>55</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>57</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>
PŘÍLOHA A – MĚŘENÍ PŘI RŮZNÉM NAPLNĚNÍ .....	1
PŘÍLOHA B – MĚŘENÍ RŮZNÝCH KAPALIN .....	4
PŘÍLOHA C – MĚŘENÍ S BUDICÍ CÍVKOU .....	7
PŘÍLOHA D – SIMULACE.....	9



## Seznam symbolů a zkratek

### Použitý systém značení:

$\mathbf{a}$ .....	Vektor
$a$ .....	Skalár

### Seznam symbolů:

<b>zkratka</b>	<b>Název veličiny [rozměr]</b>
$A$ .....	Magnetický vektorový potenciál [Wb/m]
$B$ .....	Magnetická indukce [T]
$f$ .....	Rezonanční frekvence [Hz]
$f_b$ .....	Frekvence bublin [Hz]
$H$ .....	Intenzita elektrického pole [A/m]
$I$ .....	Elektrický proud [A]
$J_{\text{ext}}$ .....	Proudová hustota [ $\text{A/m}^2$ ]
$L$ .....	Indukčnost [H]
$n$ .....	Výsledný počet elementů sítě [-]
$N$ .....	Počet závitů [-]
$S$ .....	Průřez nádoby [ $\text{m}^2$ ]
$U$ .....	Elektrické napětí [V]
$W_m$ .....	Energie soustavy [J]
$\alpha$ .....	Úhel náklonu [ $^\circ$ ]
$\Delta L$ .....	Citlivost [ $\text{H}/^\circ$ ]
$\varepsilon$ .....	Permitivita [ $\text{F/m}$ ]
$\varepsilon_V$ .....	Permitivita vody [ $\text{F/m}$ ]
$\emptyset$ .....	Průměr [m]
$\mu$ .....	Permeabilita [ $\text{H/m}$ ]
$\mu_r$ .....	Relativní permeabilita [-]
$\mu_{\text{MK}}$ .....	Permeabilita magnetické kapaliny [ $\text{H/m}$ ]
$\rho$ .....	Hustota [ $\text{Kg/m}^3$ ]
$\rho_{\text{MK}}$ .....	Hustota magnetické kapaliny [ $\text{Kg/m}^3$ ]

### Seznam zkratek:

CAD .....	Počítačem podporované projektování
FBG .....	Vlákna Braggovy mřížky
LED .....	Dioda emitující světlo
MEMS .....	Mikro-elektro-mechanické systémy
NASA .....	Americký národní úřad pro letectví a kosmonautiku
PWM .....	Pulzní šířková modulace
.STL .....	Formát pro 3D tisk

## Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na návrh, realizaci a verifikaci náklonového senzoru využívajícího speciálních vlastností magnetických kapalin a využití těchto kapalin v sensorové technice.

Téma diplomové práce je pozoruhodné obzvláště z důvodu použití a možnosti zkoumání magnetických kapalin. Tyto kapaliny se vyznačují neobvyklými vlastnostmi, jako je jejich permeabilita, možnost ovládnutí její polohy magnetickým polem nebo možnost změny skupenství pomocí magnetického pole. Použití magnetických kapalin v sensorové technice není v dnešní době tak běžné, a proto je možnost podílet se na vývoji velmi zajímavá.

Měření náklonu je v praxi nezbytný proces pro správnou funkčnost velkého množství aplikací. S měřením náklonu je možné se setkat například v automobilovém průmyslu, leteckém průmyslu, navigačních systémech, zdravotnických zařízeních, těžebních strojích, mobilních telefonech, kamerách, robotice nebo optických systémech.

V první kapitole jsou popsány základní vlastnosti magnetických kapalin a jejich rozdělení. Dále je zde popsána výroba magnetických kapalin a průzkum trhu těchto kapalin. Druhá kapitola se zabývá použitím magnetických kapalin a to jak v průmyslových aplikacích, tak zejména v sensorové technice. Možnostmi měření náklonu, bez použití magnetické kapaliny s průzkumem trhu, se zabývá kapitola třetí. Ve čtvrté kapitole je důkladně popsán samotný návrh inklinometru s možnostmi měření náklonu. Experimentálním ověřením teoretických předpokladů se zabývá pátá kapitola diplomové práce. V poslední kapitole je zhodnocení metod a inklinometru, určení potenciálu v praxi a určení výrobní ceny.

Cílem předkládané diplomové práce je navržení a sestavení vybraného senzoru využívajícího magnetické kapaliny. Dále je nezbytné zvolit správné metody pro ověření správné funkčnosti dle teoretického předpokladu a tyto metody zhodnotit spolu s využitím senzoru v praxi.

Informace potřebné ke zhotovení diplomové práce byly získány studiem na Západočeské univerzitě v Plzni, z knih a odborných článků. V neposlední řadě byly informace získány samotným měřením a experimentálním ověřováním náklonového senzoru.

# 1 Magnetické kapaliny

Již na začátku šedesátých let bylo vynaloženo velké úsilí na rozvoj kapalin, které by byly silně ovlivněny mírným magnetickým polem. Magnetické kapaliny byly prvně použity ke kontrole průtoku tekutého paliva v beztlížném stavu u kosmických raket NASA.[2,3]

## 1.1 Vlastnosti

Magnetické kapaliny jsou stabilní koloidní nanočástice železa nebo jiné feromagnetické látky v nosné kapalině. K výběru je velké množství nosných kapalin. Výběr nosné kapaliny neboli správného druhu magnetické kapaliny závisí na konkrétní aplikaci. Nosná kapalina ovlivňuje různé vlastnosti magnetických kapalin například viskozitu, povrchové napětí, oxidační stabilitu, použitelnost při různých teplotách či v různých prostředích.[1,2]

Další vlastnosti určují již zmíněné nanočástice, které je možné si představit jako miniaturní permanentní magnety. Velikost těchto nanočástic je většinou okolo 3 až 10 nanometrů. Jelikož každá částice tvoří Weissovu doménu, má také každá svůj magnetický moment ze spontánní magnetizace. Kapalina se bez vnějšího zásahu chová jako nemagnetická, jelikož magnetické momenty částic jsou náhodně orientovány a částice se v nosné kapalině pohybují tepelným Brownovým pohybem. Případné magnetické vlastnosti jsou ovlivněny druhem nanočástic nebo jejich koncentrací. Pokud je magnetické pole přiloženo k magnetické tekutině, částice se budou polarizovat ve směru orientace magnetického pole. Takto natočené částice budou spolu s celou kapalinou vtahovány směrem do magnetického pole kvůli magnetickým silám působícím na kapalinu.[1,2]

Různé vlastnosti magnetických kapalin jsou závislé také na teplotě. Viskozita se stoupající teplotou exponenciálně klesá. Na viskozitu má také vliv magnetické pole. Obecně se viskozita při zvyšující se intenzitě magnetického pole zvyšuje. Tento jev nazýváme magnetoviskózní jev. Ovšem magnetická kapalina se chová jinak ve střídavém a jinak ve stejnosměrném poli. Ve střídavém poli je nutné počítat s odezvou magnetické kapaliny řádově několik milisekund. Ve střídavém magnetickém poli, u některých druhů magnetických kapalin, také dochází k negativní viskozitě neboli k poklesu viskozity s rostoucí intenzitou magnetického pole při určitých frekvencích. Ferokapalinu lze udržet tekutou i v silném magnetickém poli pomocí detergentových řetězců.[1,2]

Mimo nanočástic a nosné kapaliny magnetické kapaliny obsahují také ochranný polymerní obal neboli povrchově aktivní látku (nazýváno detergent nebo surfaktant). Tato látka je velmi důležitá pro koloidní stabilitu. Koloidně stabilní je magnetická kapalina tehdy, když v kapalině nedochází k agregaci, respektive k shlukování magnetických částic. Shlukování je většinou zapříčiněno přitažlivými magnetickými a van der Walsovými silami. Povrchově aktivní látka obalí nanočástice, tím nedojde k vzájemnému dotyku a je tedy zamezeno shlukování nanočástic. Povrchově aktivní látky bývají obsaženy zhruba 10 % z celkové magnetické kapaliny. Tento ochranný polymer je ovšem citlivý na vyšší teploty.[1,2]

## 1.2 Druhy

Magnetické kapaliny se dají rozdělit do dvou skupin [4]:

**Ferokapaliny**, které obsahují nanočástice řádově 10 nm veliké a vyrobené z feromagnetického materiálu. Tento druh magnetické kapaliny se nevyznačuje magnetoviskózním jevem.[4]

**Magnetoreologické kapaliny**, které obsahují mikročástice řádově o velikosti 5  $\mu\text{m}$ , které jsou vyrobené z feromagnetického materiálu. U tohoto druhu kapalin je magnetoviskózní jev běžný. Zde je možné měnit skupenství působícím magnetickým polem.[4]

## 1.3 Výroba magnetických kapalin

Ve většině technologických a biomedicínských aplikací se používají částičky z feritů. Nejčastěji používané ferity jsou magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) a limonit ( $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Vzhledem k technologii výroby těchto feritů se většinou nacházejí v magnetické kapalině oba dva. Další možností je použití částic na bázi kovu, jako je železo nebo kobalt. Magnetické kapaliny obsahující kovové částice mají dvě velké výhody. Zaprvé mají velkou hodnotu saturační magnetizace ve srovnání s ferity a za druhé je jednodušší technologie výroby. Nicméně mají jednu velkou nevýhodu a to, že špatně odolávají oxidaci a následně ztrácejí své magnetické vlastnosti. Proto se jejich použití omezilo pouze na aplikace pracující v inertní atmosféře. Pro většinu komerčního použití tyto kapaliny nejsou vhodné.[3,2]

**Mokrý mletí** je původní způsob výroby magnetických tekutin na bázi feritů. Ferity jsou mlety v kulovém mlýně v přítomnosti povrchově aktivní látky, dokud se nedostanou do koloidního stavu, neboli nedojde k rozptylu nanočástic o velikosti zhruba 10 nm. Jelikož by větší kusy mohly vézt k sedimentaci, musí být odstraněny. K odstranění větších částic se používá metoda centrifugace. Tato metoda ovšem trvá velmi dlouhou dobu.[3]

**Srážková metoda** se obvykle provádí v teplotním rozsahu mezi 0 až 100 stupňů Celsia. Přestože je tato metoda založena na rentgenové difrakci, vzniklé částice jsou krystalické. Tato metoda je velmi univerzálním způsobem výroby feritových částic. Na velikost částic má zde vliv teplota srážek a účinek povrchově aktivního činidla v reakční směsi. Jedná se o relativně jednoduchý proces.[3]

**Substituční metoda** je metodou chemickou, díky které je možné vytvořit koloidní směs i z látek, u kterých srážecí metoda není možná. V této metodě dochází k nahrazení iontů železa ionty jiných kovů jako niklu, kobaltu či zinku.[3]

**Mikroemulzní metoda** využívá mikroemulze vody v oleji neboli stability nesmísitelných kapalin díky surfaktantu (povrchově aktivní látka). V předem daném poměru se smíchá směs obsahující vodný roztok kovových solí a směs obsahující alkalický vodný roztok. Takto je možné připravit ferimagnetické nebo feromagnetické nanočástice.[3]

## 1.4 Nabídka magnetických kapalin

Pokud se bude uvažovat o nákupu magnetické kapaliny, tak v současné době je na trhu několik společností nabízejících více druhů magnetických kapalin. Firma FerroTec nabízí dokonce tři řady magnetických kapalin (APG, EFH, EMG). Řada APG se zaměřuje na magnetické kapaliny využívané pro zlepšení akustického výkonu v reproduktorech. EFH je označení řady magnetických kapalin sloužících jako výukové pomůcky, jsou součástí vizuálních experimentů magnetických mechanismů nebo jsou používány ve vývoji nových technologií. Poslední kategorie nabízená společností FerroTec je řada EMG. Označení EMG nesou speciální magnetické kapaliny na vodní bázi nebo práškové substráty.[5]

Druhou společností nabízející magnetické kapaliny je Liquids research. Tato společnost nabízí magnetické kapaliny rozděleny do skupin dle použití. Je zde možné si objednat magnetické kapaliny pro těsnění rotujících hřídelí, pro zlepšení akustického výkonu reproduktorů nebo pro biomedicínské účely.[6]

Další společností prodávající magnetické kapaliny je Emovendo. Tato společnost se zabývá prodejem různých druhů magnetů od motorových magnetů až po magnetické držáky. Výběr magnetických kapalin je zde omezen pouze na jednu viz *Obr.1.1*.[7]



*Obr. 1.1 Magnetická kapalina Emovendo (převzato z [7])*

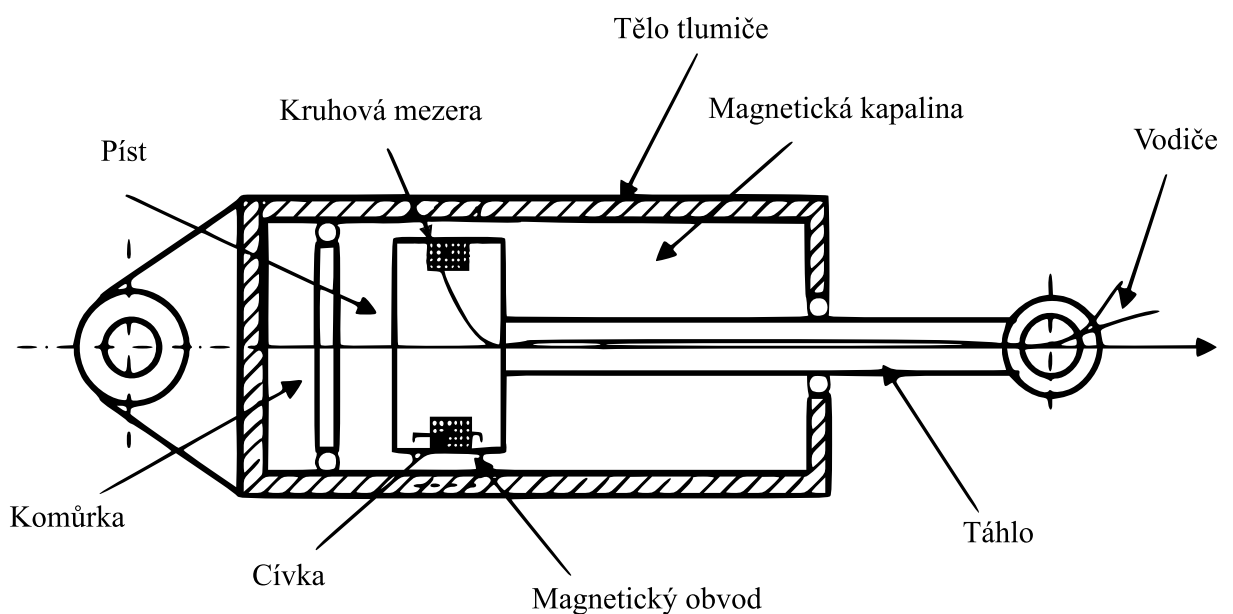
## 2 Použití magnetických kapalin

### 2.1 Průmyslové aplikace

Díky unikátním vlastnostem se magnetické kapaliny stávají součástí spousty elektrotechnický i elektromechanických systémů. I když je většina technologií ještě ve vývoji, magnetické kapaliny mají své využití ve spoustě průmyslových aplikací, senzorech nebo v lékařství.[2]

#### 2.1.1 Ferokapalinové tlumiče

Na Obr.2.1 je znázorněn tlumič využívající vlastností magnetické kapaliny. Senzor se bez vytvoření magnetického pole, respektive bez přivedení elektrického proudu na cívky, chová jako normální tlumič. Výhodou ferokapalinových tlumičů je rychlá odezva změny tuhosti na budicím proudu a relativně jednoduchá konstrukce. Takovýto druh tlumiče nachází využití například u sedadel nákladních aut nebo automatických praček. Velikostí magnetického pole vytvořeného za pomoci dvou cívek se mění viskozita magnetické kapaliny a tím i velikost tlumení tlumiče. Kinetická energie kmitání se zde mění na tepelnou energii.[8,9]



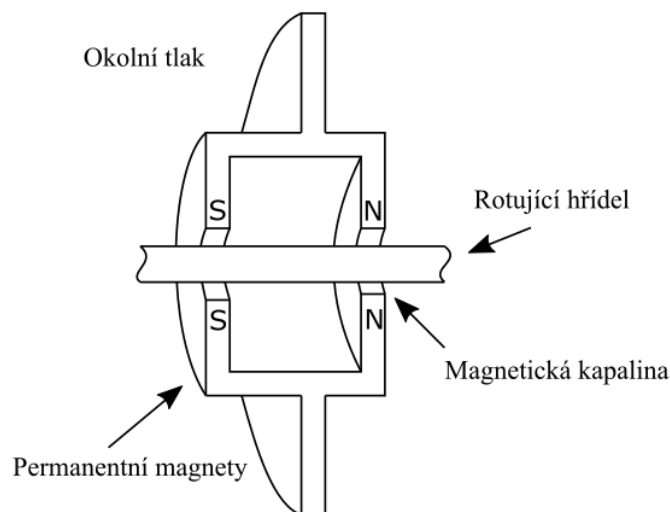
Obr. 2.1 Ferokapalinový tlumič [převzato z9]

### 2.1.2 Magnetická spojka (brzda)

Spojky a brzdy využívající magnetické kapaliny fungují na stejném principu. Vhodné je zde použít kapalinu, která má v magnetickém poli velkou změnu viskozity. Magnetická kapalina vhodná pro použití do magnetické spojky či brzdy je kapalina magnetoreologická, která má silný magnetoviskózní jev. Magnetoreologická kapalina je umístěna mezi disky, které jsou mechanicky připevněny k dvěma hřídelím. Pokud je takovéto ústrojí mimo dosah magnetického pole, tak magnetická kapalina přenáší pouze velice malý kroučící moment. Přenášený kroučící moment je způsoben přirozenou viskozitou kapaliny. Pokud je vytvořeno magnetické pole v okolí magnetické kapaliny, kapalina změní zásadně svou viskozitu a tím se i zásadně změní velikost přenášeného kroučícího momentu. Princip brzdy s magnetickou kapalinou je téměř stejný. Jediným rozdílem je, že jeden z disků není pohyblivý, není připojen k hřídeli.[9,10]

### 2.1.3 Těsnění hřídele

Z Obr.2.2 je vidět, že hřídel s vysokou permeabilitou vede skrz konstrukci s permanentními magnety. Pokud je mezera velká maximálně několik desetin milimetru, je zde magnetické pole s indukcí  $B$  okolo jednoho Tesla. Mimo vzduchovou mezeru je magnetické pole téměř zanedbatelné. Z tohoto důvodu, když je magnetická kapalina umístěna do této mezery, jsou síly působící na ni dost velké, aby se magnetická kapalina udržela v mezeře mezi permanentním magnetem a hřídelí. Kapalina je držena magnetickým polem permanentních magnetů tak silně, že není vytlačena ani rozdílem tlaků mezi vnitřkem konstrukce a jeho okolím.[6,11]

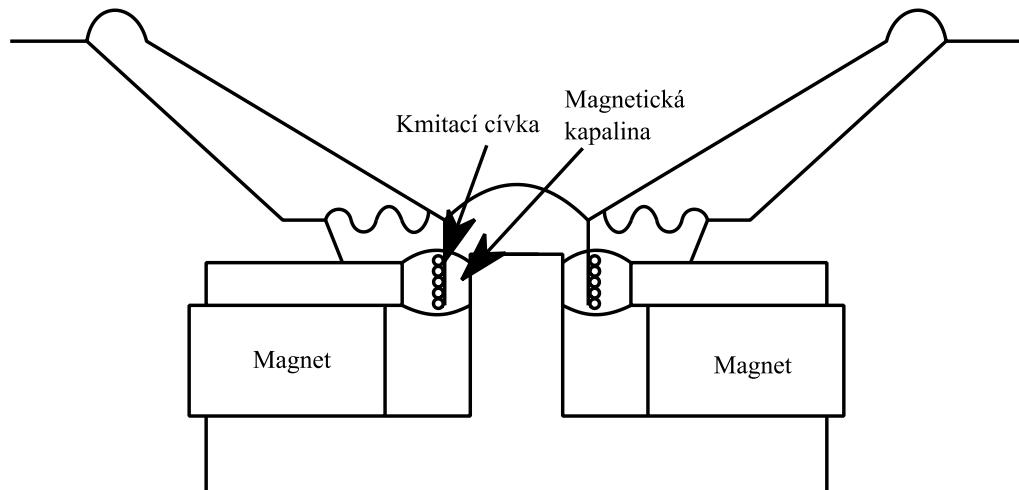


Obr.2.2 Těsnění rotující hřídele [11]



### 2.1.4 Chlazení reproduktorů

Výkonnost reproduktorů úzce souvisí se zahříváním kmitající cívky reproduktoru. Magnetická kapalina zde slouží jako odvod ohmického tepla do kostry reproduktoru. Výhodou magnetické kapaliny je, že se její poloha dá jednoduše ovlivňovat magnetickým polem. Proto řešení odvodu tepla magnetickou kapalinou umožní zvýšení akustického výkonu zařízení, aniž by se prováděla geometrická změna výrobku, viz *Obr.2.3*. [5,10,11]



*Obr. 2.3* Reproduktor s magnetickou kapalinou [5]

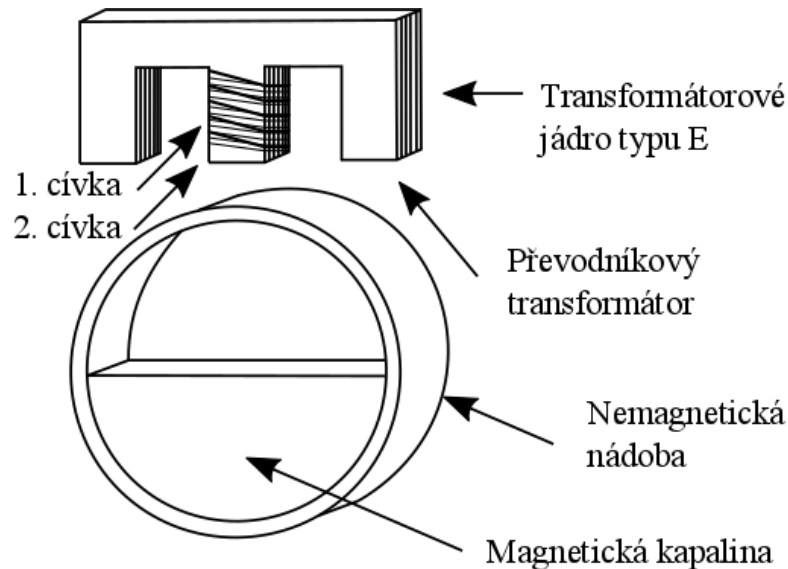
## 2.2 Senzorová technika

V této podkapitole jsou magnetické, elektrické a fyzikální vlastnosti magnetických kapalin využity k různým možnostem realizace některých senzorů. Dále jsou zde analyzovány charakteristické a funkční parametry magnetických kapalin. Použití magnetických kapalin pro kvantitativní a kvalitativní hodnocení různých elektrických i neelektrických parametrů.

### 2.2.1 Měření otáček

Princip využívající magnetické kapaliny pro měření otáček neboli odstředivý senzor využívá převodu síly rotoru na posun magnetické kapaliny. Magnetická kapalina se zde chová jako kapalně magnetické jádro cívky. Magnetická kapalina zde nahrazuje vlastnosti jádra vyrobeného z magneticky měkkého materiálu. [12]

Konstrukce odstředivého snímače je schematicky znázorněná na Obr.2.4. Tento snímač se skládá ze tří hlavních částí: transformátor převodníkového typu, nemagnetické nádoby a magnetické kapaliny. Magnetická kapalina se naplní do nemagnetické nádoby, která je připojena ke hřídeli motoru. Transformátor je umístěn v takové vzdálenosti, aby magnetická kapalina byla stále v blízkosti magnetického obvodu.[12]



Obr. 2.4 Bezdotykový senzor otáček [12]

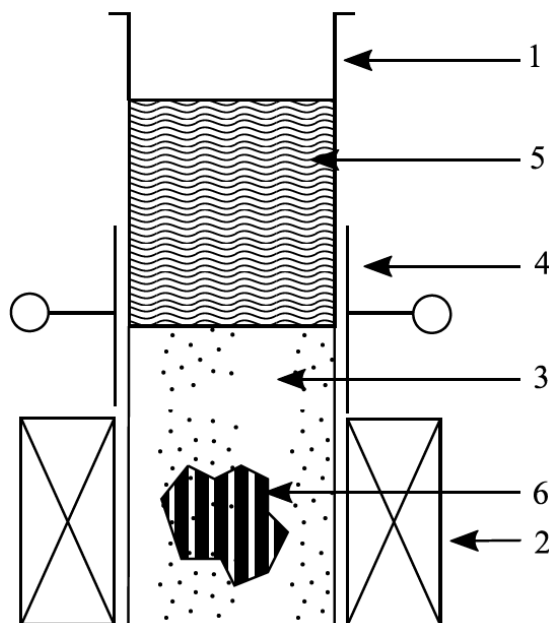
V transformátoru je sekundární (snímací) cívka navinuta symetricky okolo primární (řídící) cívky. Generátor signálu nabudí primární cívku a na sekundární cívce se měří naindukované napětí. Obě tyto cívky jsou navinuty na železném vrstveném jádře typu-E. Z počátku, když je motor v klidu, je hodnota výstupního napětí sekundární cívky minimální. Jakmile se motor začne točit, v nádobě začne působit odstředivá síla a magnetická kapalina proudí u obvodu nádoby. Jelikož se magnetická kapalina dostane do větší blízkosti transformátoru, napomůže mu lépe uzavřít magnetický obvod. V důsledku snazší cesty magnetického toku transformátoru se hodnota výstupního napětí sekundární cívky zvyšuje. Hodnota výstupního napětí je závislá na objemu magnetické kapaliny, která se nachází na obvodu nádoby v důsledku odstředivé síly.[12]

Tento druh snímače se využívá většinou u jednofázových indukčních strojů jako spínač (vypínač) při dosažení určitých otáček. Výhodou je možnost bezkontaktního měření otáček. U magnetických kapalin je značným problémem usazování. Tento jev je zde vyřešen již principem činnosti senzoru.[12]

## 2.2.2 Měření objemu

Magnetickou kapalinu lze využít také pro měření objemu nemagnetického těžkého tělesa o téměř libovolném tvaru a povrchu. Tato metoda je založena na změně indukčnosti cívky a změně kapacity kondenzátoru. Cívka a kondenzátor jsou součástí oscilačního obvodu.[13]

Na *Obr.2.5* je schematicky znázorněno čidlo pro měření objemu. Senzor se skládá z hranolové vertikální nádoby (1), která je ovinuta cívkou (2). Nádoba je z části naplněna magnetickou kapalinou (3). Další část nádoby je naplněna vodou (5). Hladina magnetické kapaliny by měla být mezi deskami kondenzátoru (4). Měřené těleso (6) je vnořeno do magnetické kapaliny.[13]



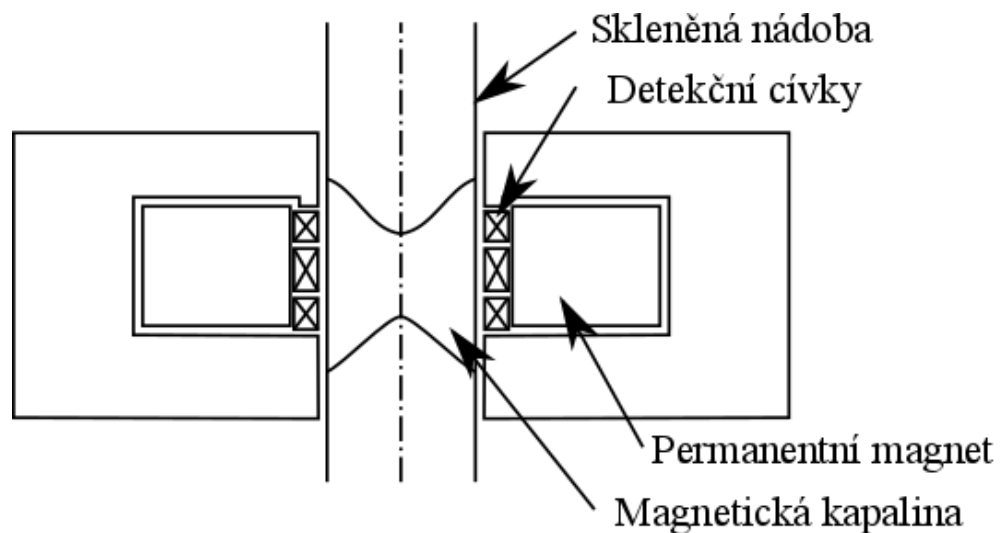
Obr. 2.5 Senzor měření objemu [13]

Magnetická kapalina se vyznačuje permeabilitou  $\mu_{MK}$  a hustotou  $\rho_{MK}$ . Ve střední části nádoby nad magnetickou kapalinou a mezi deskami kondenzátoru je umístěna voda s permitivitou  $\varepsilon_V$  a hustotou  $\rho_V < \rho_{MK}$ . Cívka a elektrický kondenzátor jsou prvky elektrického oscilačního obvodu, který má rezonanční frekvenci  $f = f_0$  pro  $\mu = \mu_{MK}$  uvnitř cívky a  $\varepsilon = \varepsilon_V$  mezi deskami kondenzátoru. Pokud je nemagnetické těleso s hustotou větší než hustota magnetické kapaliny ponořeno v nádobě uvnitř cívky, změní se tím jádro cívky a tím i její indukčnost. Také se zvedne hladina magnetické kapaliny a změní se poměr magnetické kapaliny a vody mezi deskami kondenzátoru, čímž se změní jeho kapacita.[13]

Snížením indukčnosti cívky a zvýšením kapacity kondenzátoru by se dala získat hodnota odpovídající objemu tělesa, ale měření elektrické rezonance umožní získat vyšší přesnost. Jelikož účinky kapacity a indukčnosti u rezonance narůstají, je získána vyšší přesnost měření. Zvýšení impedance je vyšší než u kapacitní nebo induktivní reaktance samostatně.[13]

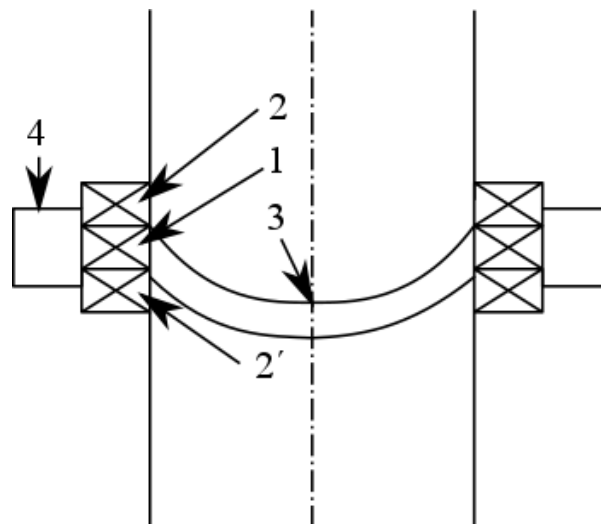
### 2.2.3 Měření tlaku

Běžným způsobem, jak dosáhnout měření tlaku s magnetickou kapalinou, je magneticky detekovat úroveň magnetické kapaliny v nádobce, ale tento způsob není moc přesný. Citlivější metodou je měření zakřivení rozhraní viz *Obr.2.6*. Při této metodě musí dojít minimálně k trojímu kontaktu magnetické kapaliny a stěny nádoby v jedné rovině. Bez ohledu na velikost tlaku musí být membrána z magnetické kapaliny držena magnetickými silami v bodech doteku se stěnou nádoby.[14]



*Obr. 2.6 Tlakový senzor [14]*

Na *Obr.2.7* je znázorněn tlakový senzor složený ze skleněné nádoby, detekční cívky, magnetické kapaliny a permanentních magnetů. Měření tlaku je zde realizováno deformací, respektive průhybem membrány z magnetické kapaliny. Funkčnost je znázorněna na následujícím *Obr.2.7*, kde 1, 2 a 2' jsou měřicí cívky zapojeny antiparalelně. Tyto cívky slouží k detekci průhybu membrány. Číslem 3 je zde označena membrána z magnetické kapaliny a číslo 4 jsou permanentní magnety držící magnetickou kapalinu neboli kraje membrány na stejném místě.[14]



Obr. 2.7 Membrána tlakového senzoru [14]

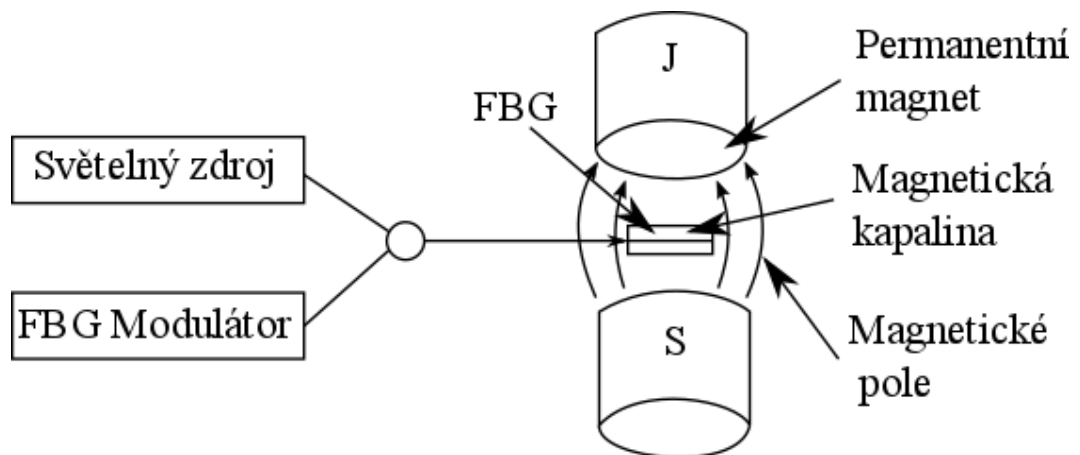
Citlivost takového druhu senzoru je okolo  $10^{-2}$  Pa s velice lineární kalibrační křivkou. Pokud se zajistí minimálně tři pevné body dotyku magnetické kapaliny se stěnou nádoby, nedochází k hysterizi měření při změně tlaku. Při měření nízkých tlaků je měření omezeno povrchovým napětím nosné složky magnetické kapaliny. Měření vysokých tlaků je omezeno stlačitelností magnetické kapaliny.[14]

#### 2.2.4 Měření magnetického pole

Magnetická kapalina se vstříkne do kapilár, které obsahují vlákna Braggovy mřížky (FBG - Fibre Bragg Grating), to slouží jako snímací prvek. FBG je tvořena opakovanými změnami indexu lomu jádra vlákna. Díky speciálním vlastnostem je tento optický prvek často využíván v telekomunikačních systémech. Funkce FBG je velice podobná soustavě dielektrických filtrů. Díky magnetické kapalině se při změně magnetického pole změní vlnová délka odraženého paprsku od FBG. Experimentální výsledky dokazují, že FBG s malým průměrem mají citlivější změnu vlnové délky při posunu v magnetickém poli.[15,16,17]

Na tento druh senzoru se v praxi kladou veliké nároky, zejména na vysokou spolehlivost, miniaturizaci nebo velkou kapacitu. Významným použitím daného typu senzoru je monitorování elektrického proudu. Elektrický proud je měřen na základě detekce magnetického pole v okolí měřeného vodiče. Výhodou takového měření je elektrická izolace mezi senzorem a měřeným vodičem, vysoká citlivost a malý rozměr senzoru.[15,17]

Na Obr.2.8 je vidět schematické znázornění senzoru magnetického pole s FBG. Kde měnící se magnetické pole je zajištěno vzájemným pohybem permanentních magnetů. Dále se používá Teslametr pro kalibraci magnetické indukce. Odražený paprsek s danou vlnovou délkou se shromažďuje v FBG demodulátoru. Tato data jsou odesílána do počítače k dalšímu zpracování.[15,17]



Obr. 2.8 Senzor magnetického pole s FBG [15]

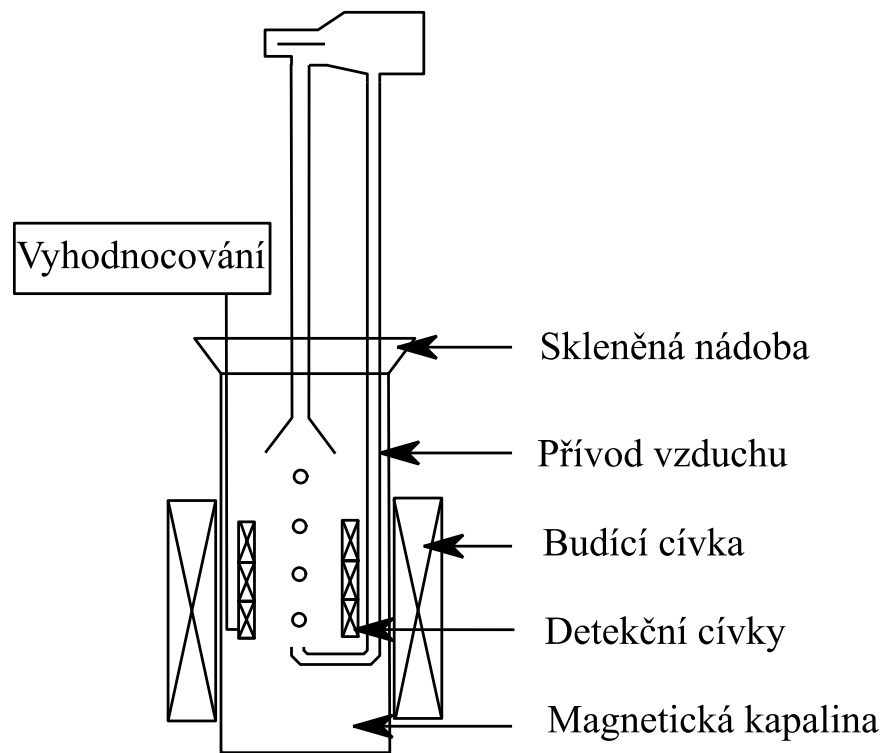
Pro zlepšení provedení senzoru by index lomu magnetické kapaliny měl zapříčinit citlivější změnu indexu lomu jádra vlákna. Jelikož FBG je velmi citlivá na změnu teploty, musí být pracovní teplota magnetické kapaliny stejná. Jinak se změní centrum vlnové délky FBG. Teplotní kompenzace je tedy velmi důležitá. Se zlepšením teplotní kompenzace se zlepší i přesnost měřicího přístroje.[15,16,17]

### 2.2.5 Měření průtoku plynu

Snímač průtoku plynu je založen na změně magnetických vlastností magnetické kapaliny v důsledku bublin proudících magnetickou kapalinou. Základem daného čidla je nádoba naplněná magnetickou kapalinou, na které jsou umístěny detekční cívky a jedna cívka budicí. Napěťový rozdíl mezi cívkami je způsoben bublinami. Napěťový rozdíl je zde měřítkem pro rychlost průtoku. Tento typ zařízení neumožňuje současné seřízení průtoku. Umožňuje ale měření mikro průtoků plynů nebo měření probublávání plynu frekvencí bublin  $f_b$  až 20 Hz.[18]

Při nulovém průtoku plynu jsou indukčnosti obou cívek stejné, ale pokud magnetickou kapalinou v úrovni jedné cívky prochází bublina, indukčnost této cívky se změní a můstek ukáže nenulovou hodnotu rozdílového napětí pro každou bublinu. Elektronický čítač zaznamená frekvenci bublin úměrnou průtoku plynu. Při největší citlivosti tohoto snímače čítač zaznamená bublinu o minimální velikosti 0,3 mm. Průměr plynových bublin vstříkovaných tryskou je větší nebo roven jednomu milimetru, což je větší než citlivostní limit.[18]

Na Obr.2.9 je znázorněna válcová nádoba naplněná magnetickou kapalinou, cívkové póly elektromagnetu, skleněné kapiláry, sensorové cívky a přívod vzduchu.[18]



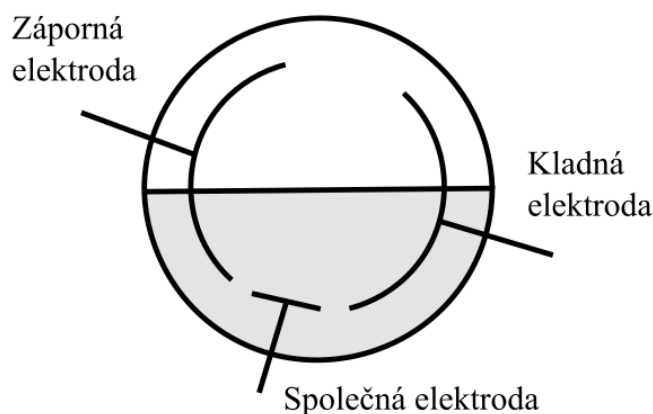
Obr. 2.9 Schematické znázornění senzoru průtoku plynu [18]

### 3 Možnosti měření náklonu

#### 3.1 Přehled principů náklonových čidel

**Kyvadlové snímače náklonu** využívají rozkmitání kyvadla. Kyvadlo je tvořeno magnetem, který vytváří rotující magnetické pole. Dané magnetické pole je dále bezdotykově převáděno na napěťový analogový signál pomocí Hallovy sondy. Senzor využívající magnetorezistivního jevu k určení úhlu natočení je naplněn olejem, čímž je kyvadlo tlumeno. Takto sestrojeným senzorem je možné měřit na jedné či dvou osách s přesností od  $0,1^\circ$  až do  $0,5^\circ$ . Měřicí rozsah senzoru využívajícího rotujícího magnetického pole je šedesát stupňů v obou směrech. Se snímači založenými na tomto principu je možné se setkat například v jeřábech, bagrech, vrtácích nebo těžebních zařízeních.[19,20]

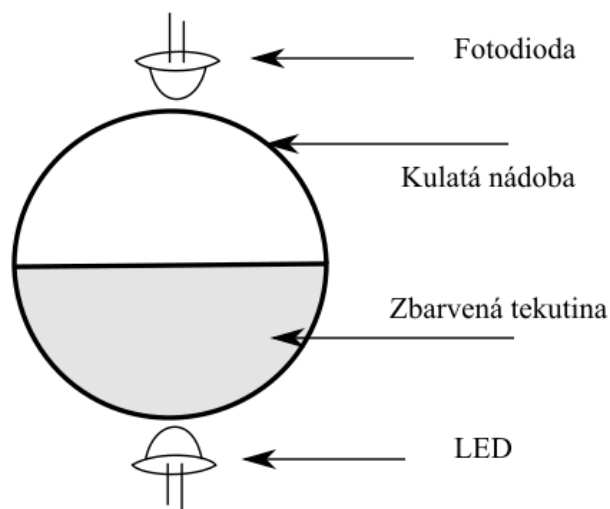
**Elektrolytické snímače náklonu** se vyznačují velikou přesností a používají se v mnoha aplikacích. U těchto senzorů se snadno udržuje vysoká přesnost i při zmenšování rozměrů. Funkce senzoru závisí na elektrolytické kapalině hermeticky uzavřené v keramické nebo skleněné nádobě. V nádobě se dále nachází kladná, záporná a společná elektroda. Pokud je senzor v rovnovážné poloze, elektrody jsou tedy ponořeny stejně a rozdílový výstupní signál je nulový. Pokud je čidlo nakloněno, hladina kapaliny ponoří jednu elektrodu více než druhou a výsledný rozdílový signál se následně také změní. Funkčnost elektrolytického snímače náklonu je znázorněna na *Obr.3.1*. [21]



*Obr.3.1* Náklonové čidlo s elektrolytem.[21]

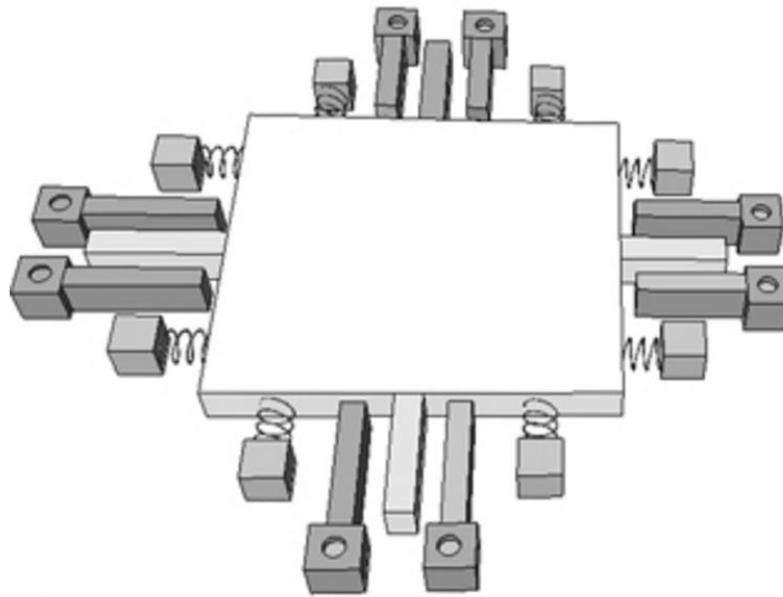


**Optické snímání náklonu** je znázorněno na *Obr.3.2*, pracuje za pomoci průhledné nádoby z poloviny naplněné zbarvenou tekutinou, zdroje světla (LED) a detektoru světla (fotodiody). V rovnovážném stavu je mezi zdrojem světla a světelným senzorem prostor z poloviny vyplněn vzduchem a z poloviny zbarvenou kapalinou. Jakmile se zařízení nakloní, poměr vzduchu a zbarvené kapaliny se také změní. Tato změna má vliv na intenzitu světla dopadající na fotodiodu. Tedy změnou náklonu se mění výstupní signál fotodiody.[22]



*Obr.3.2 Optické náklonové čidlo [22]*

**MEMS kapacitní snímače náklonu** měří naklonění bezkontaktně. Zkratka MEMS znamená mikro-elektro-mechanické systémy. Princip činnosti je založen na změně kapacity integrovaného kondenzátoru. Pokud je senzor v rovnovážné poloze, naměřená kapacita mezi všemi kondenzátory je stejná. Pokud je senzor nakloněn, flexibilní elektrody kondenzátorů změni svojí polohu vůči pevným elektrodám, čímž se změní kapacita daných kondenzátorů, jak je vidět na *Obr.3.3*. MEMS kapacitní snímače náklonu jsou používány například v mobilních telefonech nebo v systémech airbagů.[23]



Obr.3.3 MEMS kapacitní senzor náklonu (převzato z [23])

### 3.2 Průzkum trhu

Firm zabývajících se výrobou a prodejem inklinometrů a akcelerometrů je v dnešní době poměrně hodně. V následující tabulce je možné vidět seznam některých z nich.

Tab. 3.1 Seznam společností nabízejících inklinometry a akcelerometry

Název firmy	Webové stránky
Sitall electronic	<a href="http://www.sitall.cz">www.sitall.cz</a>
Measurement specialties	<a href="http://www.meas-spec.com">www.meas-spec.com</a>
Freescale semiconductor	<a href="http://www.freescale.com">www.freescale.com</a>
STMicroelectronics	<a href="http://www.st.com">www.st.com</a>
Analog Devices	<a href="http://www.analog.com">www.analog.com</a>
Memsic	<a href="http://www.memsic.com">www.memsic.com</a>
Rieker	<a href="http://www.riekerinc.com">www.riekerinc.com</a>
VTI Technologies	<a href="http://www.murata.com">www.murata.com</a>
OKI	<a href="http://www.oki.com">www.oki.com</a>
Bosch	<a href="http://www.bosch-sensortec.com">www.bosch-sensortec.com</a>
Crossbow	<a href="http://www.xbow.com">www.xbow.com</a>

**Sitall electronic** je firma nabízející senzory naklonění vlastní výroby. Firma nabízí okolo deseti senzorů náklonu pro různé použití i se softwarem pro vyhodnocení. Hlavní výhodou je možnost navržení senzoru přímo pro danou problematiku. Se senzory od firmy Sitall je možné se setkat například u stavebních strojů, zemědělských strojů nebo jsou používány při měření úhlů sklonu silnic, dálnic a železnic. V následující tabulce je znázorněno srovnání vybraných parametrů některých čidel od firmy Sitall.[24]

Tab. 3.2 Seznam inklinometrů společnosti Sitall [24]

Sitall electronic								
Označení	Počet os	Rozsah	Nelinearita	Citlivost	Teplotní rozsah	Krytí	Napájecí U	Napájecí I
STS - 001	1	$\pm 5^\circ$ až $\pm 70^\circ$	$< \pm 0,5 \%$	$< \pm 0,05 \%$	-40 až 80 °C	IP66	9 až 24 V	10 až 30 mA
STS - 002	1 nebo 2	$\pm 2^\circ$ až $\pm 10^\circ$	lineární	$< \pm 0,05 \%$	-40 až 80 °C	IP64	15 až 30 V	25 až 60 mA
STS - 110	1	$\pm 10^\circ$ až $\pm 45^\circ$	$< \pm 0,1 \%$	$< \pm 0,01 \%$	-40 až 85 °C	IP66	9 až 36 V	4 až 20 mA
STS-120-2-10-U	1 nebo 2	$\pm 5^\circ$	lineární	$< \pm 0,05 \%$	-40 až 80 °C	IP64	6 až 16 V	10mA
STS-120-2-180-I	1 nebo 2	$\pm 90^\circ$	$< \pm 0,5 \%$	$< \pm 0,08 \%$	-40 až 80 °C	IP66	6 až 16 V	4 až 60 mA
STS-005-1-10-I	1	$\pm 5^\circ$	lineární	$< \pm 0,05 \%$	-10 až 80 °C	IP64	24 V	4 až 20 mA
STS-005-2-20-I	2	$\pm 10^\circ$	lineární	$< \pm 0,08 \%$	-10 až 80 °C	IP64	24 V	4 až 20 mA

**Measurement specialties** nabízí senzory náklonu měřící v jedné, dvou i třech osách. Produkty této firmy využívají jak technologie MEMS, tak kapacitní nebo induktivní technologie. Pro jednoosé snímače firma nabízí druhy měřící od  $\pm 5$  stupňů až do  $\pm 180$  stupňů. Senzory mají vysokou přesnost s širokým spektrem moderních technologií. V následující tabulce je znázorněno srovnání vybraných parametrů některých čidel od firmy Measurement. Vybrané parametry nejsou stejné jako v tabulce předchozí jelikož výrobci neudávají totožné informace o senzorech.[25]

Tab. 3.3 Seznam inklinometrů společnosti Measurement specialties [25]

Measurement specialties								
Označení	Počet os	Rozsah	Rozlišení	Ustálení	Teplotní rozsah	Krytí	Napájecí U	Napájecí I
AngelStar	1	$\pm 60^\circ$	0,001°	0,3 s	-40 až 85 °C	IP66	8 až 20 V	3 až 60 nV
DOG MEMS-Series	1	$\pm 180^\circ$	0,6°	$< 0,1$ s	-40 až 85 °C	IP66	8 až 30 V	10 až 18 mA
E-Series	1	$\pm 5^\circ$ až $\pm 15^\circ$	0,02°	1 s	-25 až 85 °C	IP66	6,5 až 24 V	5 mA
G-Series	1	$\pm 10^\circ$	0,001°	$< 0,1$ s	-25 až 85 °C	IP67	14,4 až 30 V	15 až 20 mA
P-Series	1	$\pm 5^\circ$ až $\pm 45^\circ$	0,005°	$< 0,1$ s	-25 až 85 °C	IP65	6,5 až 24 V	30 až 40 mA
V-series	1	$\pm 5^\circ$ až $\pm 45^\circ$	0,01°	$< 0,1$ s	0 až 70 °C	IP65	12 až 24 V	15 až 20 mA
DPD-Series	2	$\pm 5^\circ$ až $\pm 30^\circ$	0,8°	$< 0,1$ s	-40 až 80 °C	IP68	7 až 30 V	20 mA

**Freescale semiconductor** je firma, která nabízí tříosé snímače s nízkou spotřebou, nízkým provozním napětím a velmi rychlou reakční dobou. Firma Freescale nabízí také produkty s volitelnou citlivostí.[26]

**STMicroelectronics** je specializovaná na citlivé, kompaktní a ekonomické senzory. Produkty této firmy jsou založené na MEMS technologii, kde je využit křemík pro vytvoření pohyblivé struktury. Produkty jsou jednoosé, dvouosé i tříosé lineární akcelerometry.[27]

**Analog Devices** se již patnáct let zabývá výrobou MEMS senzorů pro automobilovou dopravu. Se senzory této firmy je možné se setkat i v mobilních telefonech, ochranách pevných disků nebo systémů zajišťujících stabilitu v automobilech.[28]

**Memsic** z důvodu potřeby odstranění chyb kapacitních nebo piezoelektrických snímačů jako první začala vyrábět teplotně založená MEMS setrvačná čidla. Pro zvýšení výkonu, kvality a snížení výrobní ceny používají křemíkový čip.[29]

**Rieker** vyrábí senzory s integrovanou elektronikou na kapacitním principu. Senzory, které nabízí firma Rieker, nepotřebují externí zesilovače, užívají se pro měření extrémního zrychlení nebo přetížení. Na výběr jsou snímače s PWM (pulzní šířková modulace) nebo s kmitočtově modulovanými výstupy. Snímače mohou být jednoosé, dvouosé i tříosé.[30]

**VTI Technologies** nabízí snímače MEMS technologie využívající kapacitního principu. Z důvodu hlavního využití těchto senzorů v letectví je možné, je použít ve větších teplotních rozsazích a vlhkém prostředí. Čidla nabízená firmou VTI se dají použít v horizontálním i vertikálním směru.[31]

**OKI** nabízí senzory, se kterými je možné se setkat v krokoměrech, elektronických kompasech, u senzorů sloužících k odhalení chvění nebo při sledování pohybu zboží. Senzory jsou založené na technologii MEMS.[32]

**Bosch** je firma, která vyrábí senzory používané například v systémech pro airbag, ABS, ESP nebo pro měření náklonu automobilu. Senzory nabízené touto firmou využívají piezoelektrického principu a principu MEMS.[33]

**Crossbow** nabízí senzory založené na MEMS technologii, které i při malých rozměrech nabízí vysoký výkon. Čidla disponují číslicovým zpracováním signálu. Je možné si vybrat ze senzorů měřících v jedné, dvou i třech osách.[34]

V následující tabulce je vidět srovnání senzorů ostatních prodejců. Z důvodu nedostatku informací nejsou uvedené parametry totožné s předchozími tabulkami. Klade se zde větší důraz na technologii výroby, výstupní rozhraní a napájení.

Tab. 3.4 Seznam inklinometrů ostatních společností [24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34]

Společnost	Označení	Počet os	Napájecí U	Napájecí I	Teplotní rozsah	Výstup	Technol.
<b>Freescale semiconductor</b>	MMA2260D	1	4,75 až 5,25 V	2,2 mA	-40 až 105 °C	analogový	kapacitní
<b>STMicroelectronics</b>	LIS2L02AL	2	2,4 až 5,25 V	0,85 mA	-40 až 85 °C	analogový	kapacitní
<b>Analog Devices</b>	ADXL103	1	3 až 6 V	0,7 mA	-40 až 125 °C	analogový	kapacitní
<b>Memsic</b>	MXD2020E	2	3 až 5,25 V	3,3 mA	-40 až 105 °C	digitální (PWM)	tepelný
<b>Rieker</b>	2010-002	1	4,5 až 5,5 V	2 mA	-55 až 125 °C	digitální	kapacitní
<b>VTI Technologies</b>	SCA830-D05	1	3 až 3,6 V	5 mA	-40 až 125 °C	sériový port	kapacitní
<b>OKI</b>	ML8953	3	2,5 až 3,3 V	2,5 mA	-20 až 70 °C	digitální	Piezo-rezistivní
<b>Bosch</b>	FlyerSMB363	3	2,3 až 3,5 V	0,2 mA	-40 až 85 °C	analogový	kapacitní
<b>Crossbow</b>	CXL02LF1Z	1	4,75 až 5,25 V	4 mA	-40 až 85 °C	analogový	kapacitní

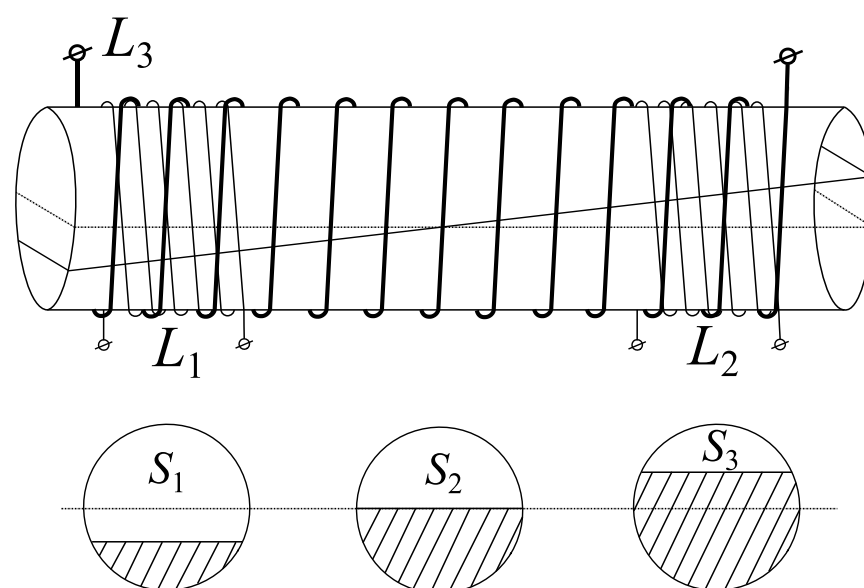
## 4 Návrh náklonového čidla

V této kapitole se nachází popis vlastního náklonového senzoru od základní myšlenky až po výrobu. Na konci kapitoly jsou uvedeny metody možností měření náklonu daným senzorem.

### 4.1 Teorie

Zvolené čidlo naklonění pracuje na principu změny indukčnosti, respektive změny naindukovaného napětí dvou měřících cívek. Cívky jsou navinuty na válcové nádobě, která je částečně naplněna magnetickou kapalinou. Naindukované napětí je získáno pomocí třetí neboli budicí cívky, která je navinuta přes celou nádobu. Měřící cívky musí být stejně velké a jejich vzdálenost od krajů nádoby musí být také stejná.[35]

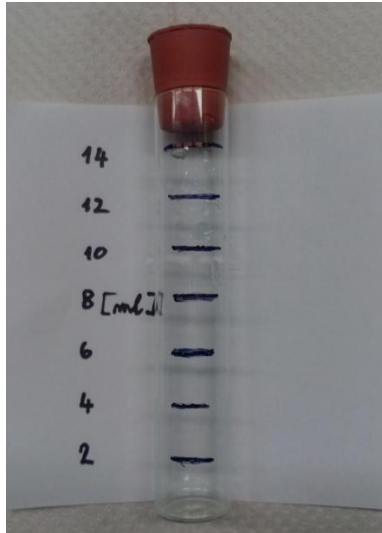
Jak je vidět na *Obr.4.1*, výsledná odchylka úhlu naklonění odpovídá množství magnetické kapaliny přelité do jiné části nádoby. Permeabilita magnetické kapaliny zapříčiní změnu indukčnosti cívek a tím i velikost naindukovaného napětí. Při zapojení měřících cívek antisériově se v rovnovážném stavu naindukované napětí odečtou. Po naklonění senzoru se přelije část magnetické kapaliny, změní se indukčnost cívek a při vzájemném odečtení naindukovaných napětí se získají hodnoty odpovídající úhlu naklonění. Směr naklonění čidla se pozná polaritou výsledného napětí.[35]



Obr. 4.1 Principální znázornění senzoru náklonu [35]

## 4.2 Technický popis

Jako nádobu pro magnetickou tekutinu je použita zkumavka viz *Obr.4.2* a *Obr.4.3* o délce 90 mm, průměru 17 mm a šířkou skla 1 mm. Maximální objem je necelých 16 ml. Pro praktický návrh je nutno z aktivní délky zkumavky odečíst 5 mm, které zabere gumová zátka.

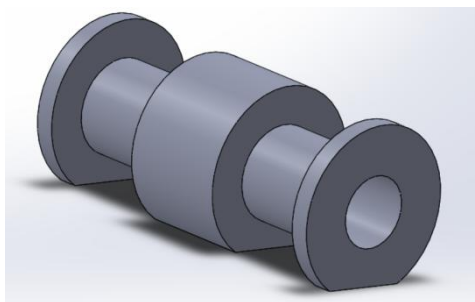


Obr. 4.2 Prázdná zkumavka

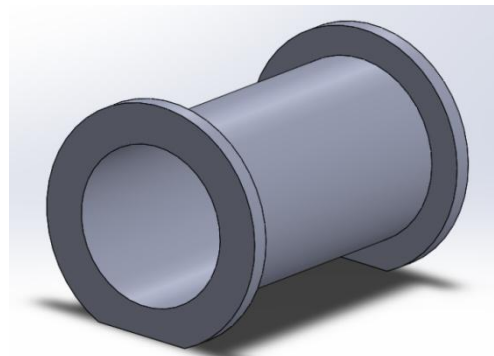


Obr. 4.3 Zkumavka s 6 ml magnetické kapaliny

Jelikož by se cívky těžko navijely pouze na danou zkumavku a z důvodu jednoduché opakovatelnosti pokusů pro jinou magnetickou kapalinu či jinou hodnotu naplnění zkumavky se zhotovila konstrukce, sloužící jako čela pro měřicí cívky s možností jednoduché výměny zkumavek viz *Obr.4.4* a *Obr.4.5*. Na druhé konstrukci je navinuta budicí cívka. Velikost druhé konstrukce je navržena tak, aby první konstrukce mohla být nasunuta do té druhé.



Obr. 4.4 Konstrukce pro měřicí cívky

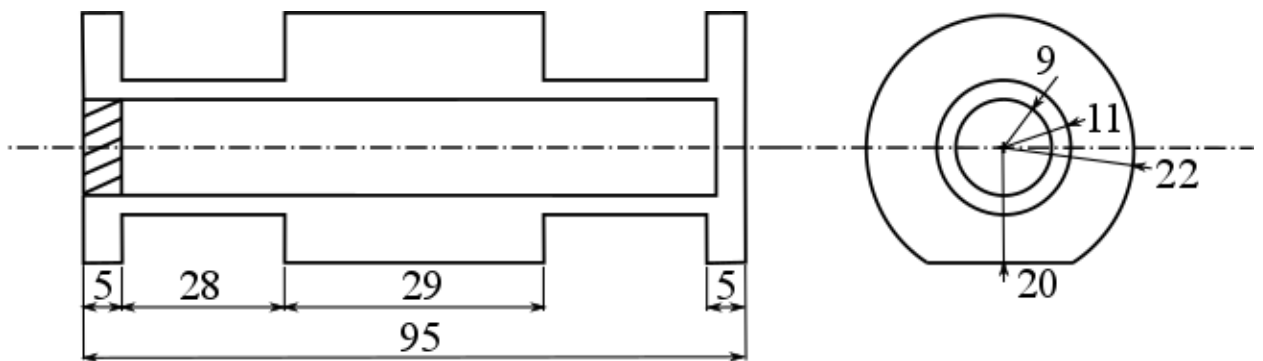


Obr. 4.5 Konstrukce pro budicí cívku

### 4.3 Návrh konstrukce a 3D tisk

První konstrukce byla navržena tak, aby do ní bylo možné zasunout zkumavku s magnetickou kapalinou a tím bylo možné měření opakovat s jinou magnetickou kapalinou či jiným množstvím magnetické kapaliny. Jak je vidět na *Obr.4.6*, čela cívek jsou široká 5 mm a výška čel je 10 mm.

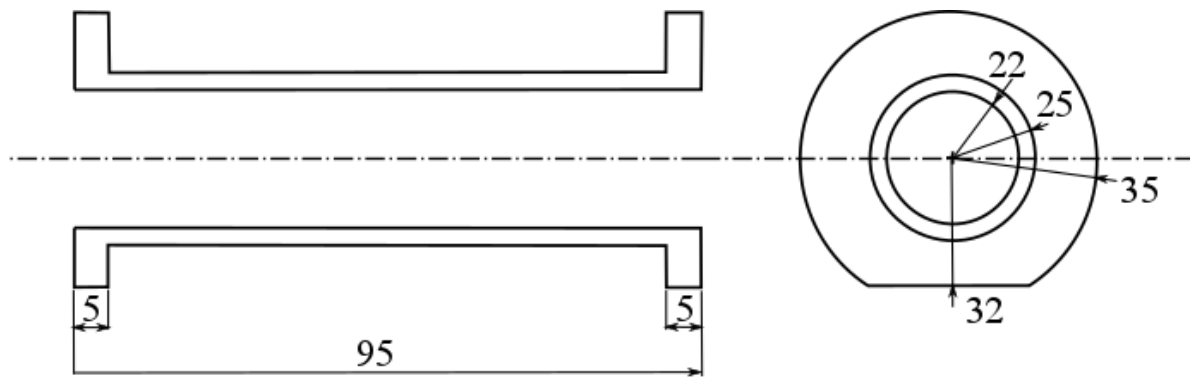
Celková délka konstrukce je 95 mm. Prostor mezi krajními čely cívek je rozdělen na téměř stejně velké tři části, kde krajní části jsou 28 mm dlouhé a jsou v nich uloženy měřicí cívky. Prostřední část je dlouhá 29 mm a slouží zde jako druhé čelo cívek. Celá konstrukce je z jedné strany zkosená, toto zkosení zde slouží jako otvor pro vyvedení začátku a konců cívek po zasunutí do konstrukce s budicí cívkou.



*Obr. 4.6 Naznačení rozměrů konstrukce pro měřicí cívky*

Druhá konstrukce je navrhována tak, aby na ní mohla být navinuta budicí cívka. Dále musí být možnost do ní zasunout konstrukci s měřicími cívkami. Délka této konstrukce, jak je vidět na *Obr.4.7*, je také 95 mm. Vnitřní průměr je 44 mm, kde tloušťka stěny válce je o milimetr větší než u konstrukce s budicími cívkami a to 3 mm. Šířka čel cívek je zde také stejná a to 5 mm, kdežto výška čel cívek je zde 13 mm. Jako u předchozí konstrukce i tato má z jedné strany lehké zkosení, zde zkosení slouží ke stabilnějšímu uložení zařízení ve vodorovné poloze.





Obr. 4.7 Naznačení rozměrů konstrukce pro budící cívku

Takto navržené konstrukce je nutné sestavit do trojrozměrných modelů. Pro převedení do trojrozměrných modelů bylo použito programu Solidworks. Jako způsob výroby 3D modelů byl zvolen 3D tisk. Pro 3D tiskárnu bylo nutné exportování modelů z programu Solidworks ve formátu .STL. Před 3D tiskem bylo ještě nutné rozdělit konstrukci s měřicími cívkami na tři části tak, aby bylo možné na dané tiskárně tento model zhotovit. Konstrukci s budící cívkou pro její tvar bylo nutné rozdělit pouze na dvě části.

Tisk obou trojrozměrných modelů trval řádově několik hodin. V nastavení tisku si je možné nastavit rychlost a kvalitu tisku, což může potřebnou dobu značně ovlivnit. Také je nastavitelný vzor výplně hutnějších částí, což má vliv jak na dobu tisku, tak na robustnost výsledného modelu. Vytisknuté části bylo nutné pro získání požadovaného tvaru ještě slepit dohromady.

Formát .STL napodobuje povrch pevných trojrozměrných předmětů pomocí trojúhelníků. Jednoduchou kostku je schopen napodobit pomocí dvanácti trojúhelníků. Čím složitější předmět, tím více trojúhelníků tento formát potřebuje pro vytvoření odpovídajícího modelu. V dnešní době umí formát .STL generovat téměř každý CAD systém. Generování .STL formátu v softwaru Solidworks je ovšem velice jednoduché, ovšem je téměř vždy lepší exportovat tento formát jako binární soubor, tím se ušetří i čas i velikost souboru.[36]

## 4.4 Numerický model

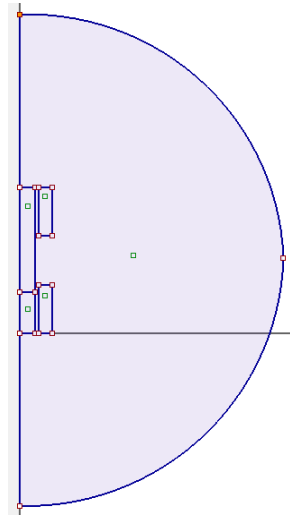
Modelování magnetického pole senzoru naklonění při měření jednou detekční cívkou bylo provedeno v programu Agros2D. Cílem této simulace je ověření funkčnosti měření úhlu náklonovým čidlem s magnetickou kapalinou při měření pouze na jedné cívce. A to pro měření zvlášť na každé cívce, pro předpokládané naplnění čtyřmi, šesti, deseti a dvanácti mililitry magnetické kapaliny. Z důvodu zjednodušení modelu byla simulace namodelována pouze pro naklonění 90°.

Důležitým materiálovým parametrem pro vzduch byla relativní permeabilita zadaná  $\mu_r = 1$  hodnota permeability u magnetické kapaliny byla při různých měřeních zadávána  $\mu_{r1} = 2,3$ ,  $\mu_{r2} = 2,7$ ,  $\mu_{r3} = 3$ . Proudová hustota se měnila na hodnoty  $J_{\text{ext}} = 0 \text{ A/m}^2$  pro nezapojenou cívku a  $J_{\text{ext}} = 14285 \text{ A/m}^2$  pro cívku zapojenou. Výpočet proudové hustoty zapojené cívky je [37]:

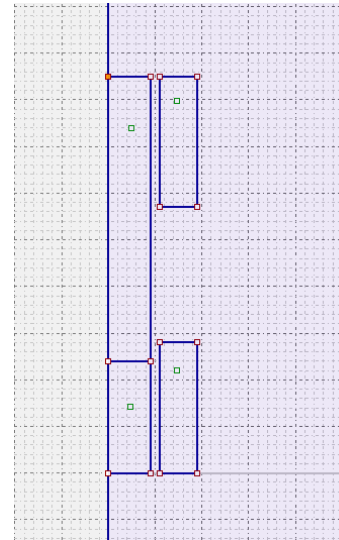
$$J_{\text{ext}} = \frac{I * N}{S} = \frac{(0,001 * 3200)}{0,000224} = 14285,71 \text{ A/m}^2 \quad (4.1)$$

Kde  $I$  je elektrický proud protékající danou cívkou, pro tuto simulaci byl zvolen  $I = 1 \text{ A}$ .  $N$  je počet závitů cívky a  $S$  je průřez cívkou. Okrajovou podmínkou byla zvolena Dirichletova okrajová podmínka, respektive  $A = 0$ . [37]

Na následujících obrázcích (*Obr.4.8* a *Obr.4.9*) je vidět geometrie navržená v programu Agros2D při simulaci naplnění čtyř mililitrů magnetické kapaliny. Prvotní účel ověření funkčnosti měření úhlu jednou detekční cívkou byl po reálném naměření hodnot dále rozšířen o potřebu zjištění permeability kapaliny EFH1 FerroTec. Proto se každá simulace opakovala dvakrát při změně permeability magnetické kapaliny.



Obr.4.8 Geometrie senzoru s okolím



Obr.4.9 Geometrie senzoru

Při numerické simulaci rozložení magnetického pole na řešené geometrie je řešena první Maxwellova rovnice v diferenciálním tvaru pro dosazení magnetický vektorový potenciál. Danou rovnicí je možné vidět v následujícím vztahu [38]:

$$\text{rot} \left( \frac{1}{\mu} \text{rot} \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_{\text{ext}} \quad (4.2)$$

Jejím řešením (při znalosti permeability a proudové hustoty jednotlivých oblastí) získáme rozložení magnetického vektorového potenciálu  $\mathbf{A}$ , z něhož je možné dle vztahů známých z teorie elektromagnetického pole dopočítat další veličiny, konkrétně magnetickou indukci v libovolném bodě soustavy z rovnice [38]:

$$\mathbf{B} = \text{rot} \mathbf{A} \quad (4.3)$$

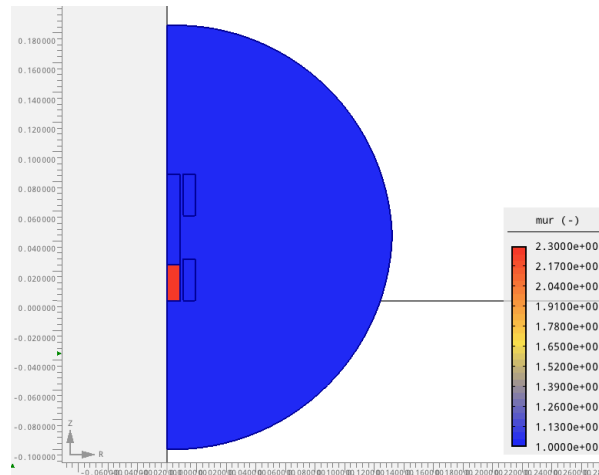
Po dosazení je možné získat výslednou hodnotu energie  $W_m$  dle vztahu [38]:

$$W_m = \int_0^{\mathbf{B}} \mathbf{H} \, d\mathbf{B} \quad (4.4)$$

Z energie soustavy se dále vypočítá indukčnost dané cívky z její energetické definice, kde  $I$  je proud protékající danou cívkou [38]:

$$L_1 = \frac{2 * W_m}{I^2} \tag{4.5}$$

Na Obr.4.10 je znázorněna permeabilita při naplnění čtyřmi mililitry magnetické kapaliny spodní části nádoby.



Obr. 4.10 Naplnění 4 ml permeabilita

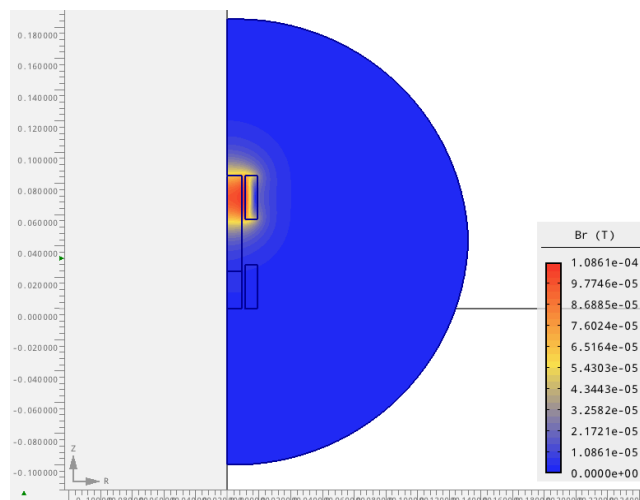
Pro simulaci buzení horní cívky při naplnění 4 ml viz Obr.4.11:

Pro  $\mu_r = 2,3$ :  $W_m = 8,595 * 10^{-8} \Rightarrow L = \frac{2 * W_m}{I^2} = 171,9 \text{ mH}$

Pro  $\mu_r = 2,7$ :  $W_m = 8,596 * 10^{-8} \Rightarrow L = \frac{2 * W_m}{I^2} = 171,9 \text{ mH}$

Pro  $\mu_r = 3$ :  $W_m = 8,598 * 10^{-8} \Rightarrow L = \frac{2 * W_m}{I^2} = 171,9 \text{ mH}$

Pro EFH1: Naměřená hodnota indukčnosti je 171,4 mH



Obr. 4.11 Naplnění 4 ml magnetická indukce

Při simulaci buzení na spodní cívce:

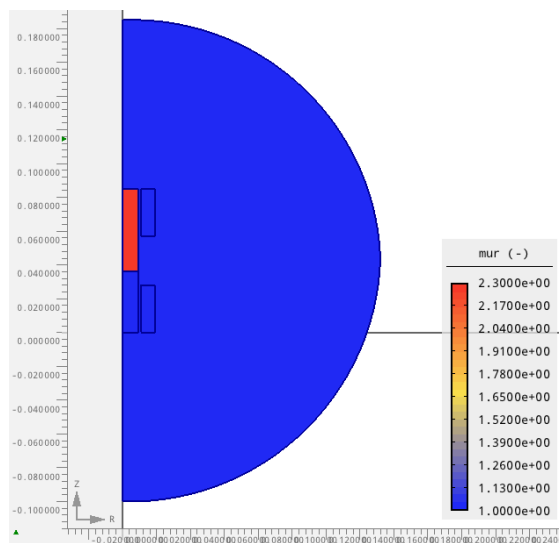
Pro  $\mu_r = 2,3$ :  $W_m = 1,075 * 10^{-7} \Rightarrow L = \frac{2 * W_m}{I^2} = 215 \text{ mH}$

Pro  $\mu_r = 2,7$ :  $W_m = 1,125 * 10^{-7} \Rightarrow L = \frac{2 * W_m}{I^2} = 225 \text{ mH}$

Pro  $\mu_r = 3$ :  $W_m = 1,186 * 10^{-7} \Rightarrow L = \frac{2 * W_m}{I^2} = 231,6 \text{ mH}$

Pro EFH1: Naměřená hodnota indukčnosti je 236 mH

Na Obr.4.12 je znázorněná permeabilita při naplnění šesti mililitry magnetické kapaliny horní části nádoby.



Obr. 4.12 Naplnění 6 ml permeabilita

Je-li simulováno buzení horní cívky při naplnění 6 ml:

Pro  $\mu_r = 2,3$ :  $W_m = 1,147 * 10^{-7} \Rightarrow L = \frac{2 * W_m}{I^2} = 229,4 \text{ mH}$

Pro  $\mu_r = 2,7$ :  $W_m = 1,209 * 10^{-7} \Rightarrow L = \frac{2 * W_m}{I^2} = 2241,2 \text{ mH}$

Pro  $\mu_r = 3$ :  $W_m = 1,254 * 10^{-7} \Rightarrow L = \frac{2 * W_m}{I^2} = 250 \text{ mH}$

Pro EFH1: Naměřená hodnota indukčnosti je 248 mH

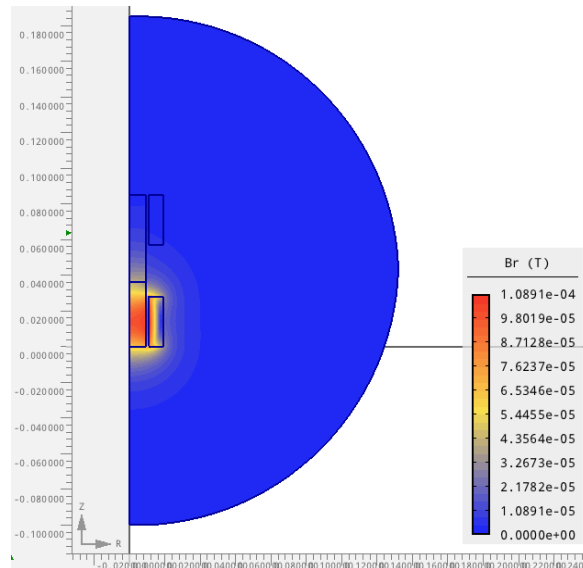
Pro simulaci buzení spodní cívky při naplnění 6 ml viz Obr.4.13:

Pro  $\mu_r = 2,3$ :  $W_m = 8,642 \cdot 10^{-8} \Rightarrow L = \frac{2 \cdot W_m}{I^2} = 172,8 \text{ mH}$

Pro  $\mu_r = 2,7$ :  $W_m = 8,602 \cdot 10^{-8} \Rightarrow L = \frac{2 \cdot W_m}{I^2} = 172 \text{ mH}$

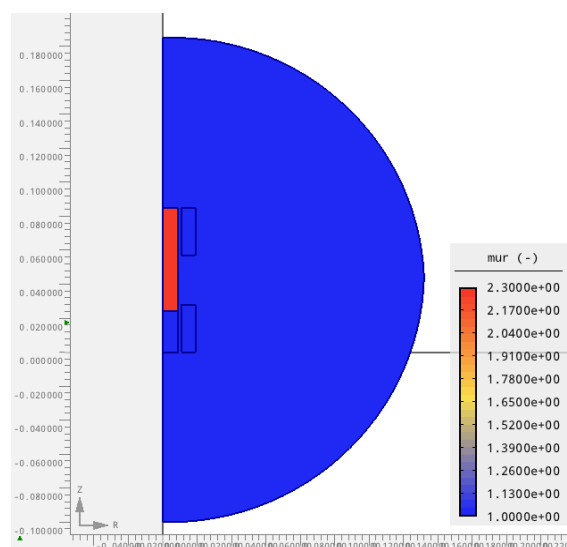
Pro  $\mu_r = 3$ :  $W_m = 8,602 \cdot 10^{-8} \Rightarrow L = \frac{2 \cdot W_m}{I^2} = 172 \text{ mH}$

Pro EFH1: Naměřená hodnota indukčnosti je 171 mH



Obr. 4.13 Naplnění 6 ml magnetická indukce

Na Obr.4.14 je znázorněná permeabilita při naplnění deseti mililitry magnetické kapaliny horní části nádoby.



Obr. 4.14 Naplnění 10 ml permeabilita

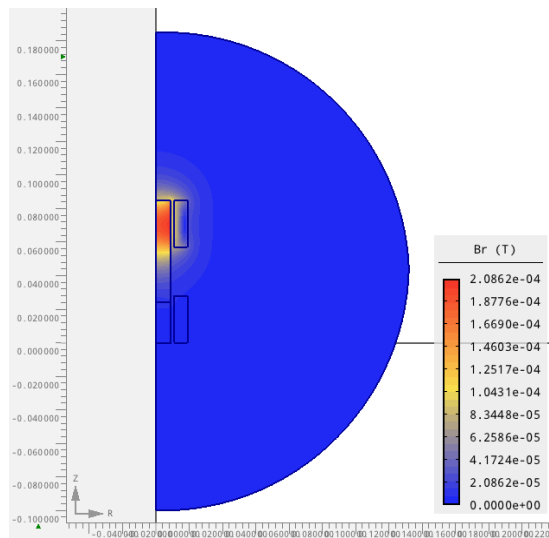
Je-li simulováno měření horní cívkou při naplnění 10 ml viz Obr.4.15:

Pro  $\mu_r=2,3$ :  $W_m = 1,148 * 10^{-7} \Rightarrow L = \frac{2 * W_m}{I^2} = 229,6 \text{ mH}$

Pro  $\mu_r=2,7$ :  $W_m = 1,223 * 10^{-7} \Rightarrow L = \frac{2 * W_m}{I^2} = 244 \text{ mH}$

Pro  $\mu_r=3$ :  $W_m = 1,275 * 10^{-7} \Rightarrow L = \frac{2 * W_m}{I^2} = 255 \text{ mH}$

Pro EFH1: Naměřená hodnota indukčnosti je 254,6 mH



Obr. 4.15 Naplnění 10 ml magnetická indukce horní cívka

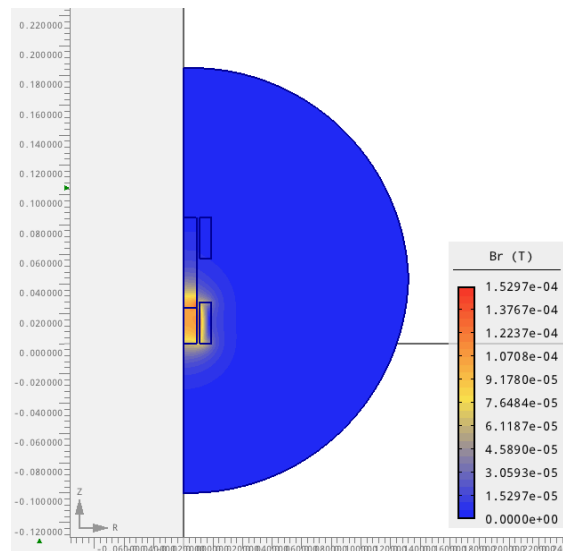
Při simulaci buzení spodní cívky a naplnění 10 ml viz Obr.4.16:

Pro  $\mu_r=2,3$ :  $W_m = 9,024 * 10^{-8} \Rightarrow L = \frac{2 * W_m}{I^2} = 180,4 \text{ mH}$

Pro  $\mu_r=2,7$ :  $W_m = 9,115 * 10^{-8} \Rightarrow L = \frac{2 * W_m}{I^2} = 182,3 \text{ mH}$

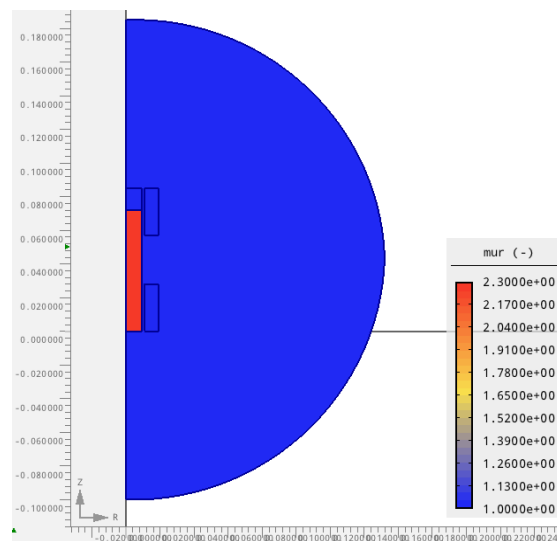
Pro  $\mu_r=3$ :  $W_m = 9,176 * 10^{-8} \Rightarrow L = \frac{2 * W_m}{I^2} = 185,5 \text{ mH}$

Pro EFH1: Naměřená hodnota indukčnosti je 174,9 mH



Obr. 4.16 Naplnění 10 ml magnetická indukce dolní cívka

Na Obr.4.17 je znázorněná permeabilita při naplnění dvanácti mililitry magnetické kapaliny dolní části nádoby.



Obr. 4.17 Naplnění 12 ml permeabilita

Je-li simulováno měření horní cívkou při naplnění 12 ml:

$$\text{Pro } \mu_r = 2,3: \quad W_m = 1,014 \cdot 10^{-7} \Rightarrow L = \frac{2 \cdot W_m}{I^2} = 202,8 \text{ mH}$$

$$\text{Pro } \mu_r = 2,7: \quad W_m = 1,03 \cdot 10^{-7} \Rightarrow L = \frac{2 \cdot W_m}{I^2} = 210 \text{ mH}$$

$$\text{Pro } \mu_r = 3: \quad W_m = 1,075 \cdot 10^{-7} \Rightarrow L = \frac{2 \cdot W_m}{I^2} = 215 \text{ mH}$$

Pro EFH1: Naměřená hodnota indukčnosti je 190,9 mH



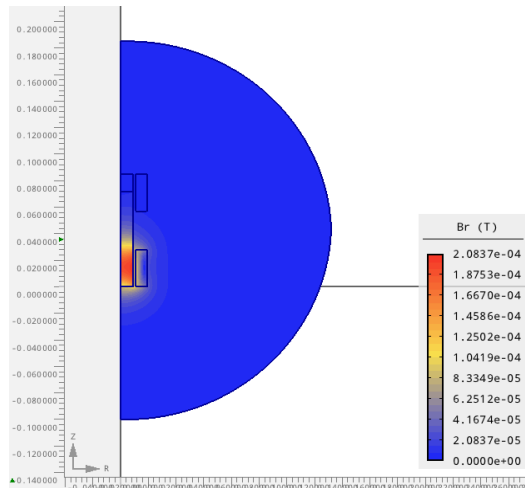
Pro simulaci buzení spodní cívky při naplnění 12 ml viz Obr.4.18:

$$\text{Pro } \mu_r = 2,3: \quad W_m = 1,149 * 10^{-7} \Rightarrow L = \frac{2 * W_m}{I^2} = 229,8 \text{ mH}$$

$$\text{Pro } \mu_r = 2,7: \quad W_m = 1,224 * 10^{-7} \Rightarrow L = \frac{2 * W_m}{I^2} = 244,8 \text{ mH}$$

$$\text{Pro } \mu_r = 3: \quad W_m = 1,276 * 10^{-8} \Rightarrow L = \frac{2 * W_m}{I^2} = 255,2 \text{ mH}$$

Pro EFH1: Naměřená hodnota indukčnosti je 255,1 mH

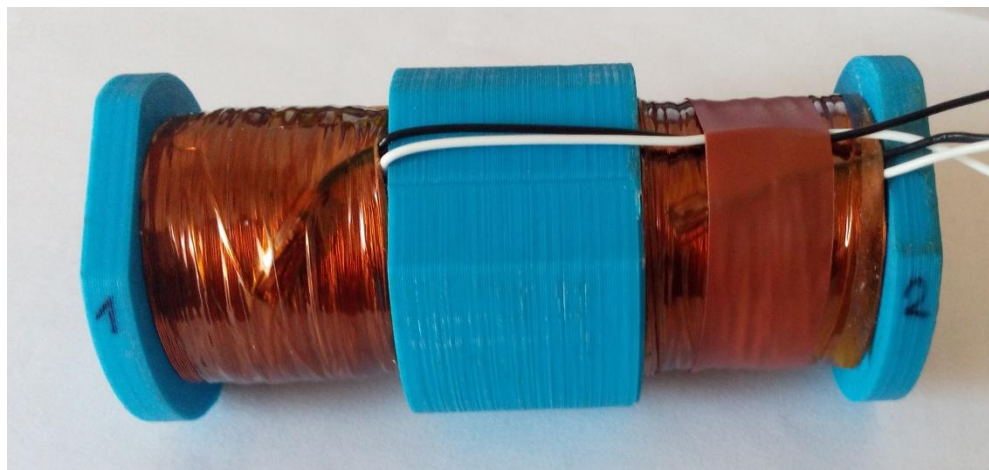


Obr. 4.18 Naplnění 12 ml magnetická indukce

Při simulacích byla sledována konvergence řešení pro celkovou energii a to s ohledem na jemnost použité sítě, stupeň polynomu a velikost řešené oblasti. U těchto hodnot byla simulace limitována výkonností počítače, na kterém simulace proběhla. Výsledný počet elementů sítě  $n = 39552$  při použití polynomu třetího řádu je pro danou simulaci dostačující. Danou simulací bylo zjištěno, že magnetická kapalina EFH1 FerroTec má permeabilitu  $\mu_r = 3$ . V příloze D je uvedena tabulka porovnávající hodnoty ze simulace a z daného měření.

#### 4.5 Navinutí cívek

Při návrhu měřících cívek byla snaha o navinutí co nejtenčím drátem, jelikož se zde neočekávají žádné velké proudy a jelikož slabší drát má větší impedanci a tím i napětí na takovéto cívce bude větší. Zásadní pro tento druh senzoru je, aby měřící cívky byly navinuty se stejným počtem závitů, aby jejich indukčnost byla téměř totožná. Vývody měřících cívek je vhodné umístit ke sražené části čel a to z důvodu, že po vložení do konstrukce s budicí cívkou jsou tyto otvory jediným možným přístupem k vývodům měřících cívek.



Obr. 4.19 Navinuté měřicí cívky

Návrh budicí cívky nevyžaduje tak tenký drát jako u cívek měřících. Očekávané proudy zde budou řádově desetkrát větší než u cívek měřících. Velikost proudů tekoucích budicí cívkou lze očekávat přibližně okolo několika miliampérů. Vývody budicí cívky budou umístěny na stejném místě jako u měřících cívek.



Obr. 4.20 Navinutá budicí cívka

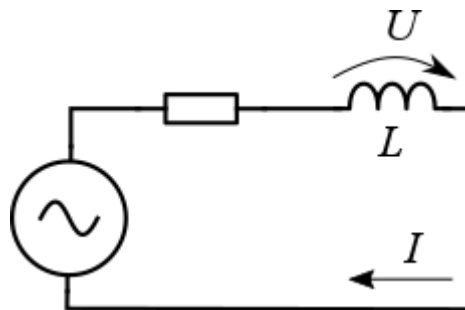
Reálné cívky byly navinuty ve společnosti INVEL PLUS s.r.o., tyto cívky jsou vidět na Obr.4.19 a Obr.4.20. Měřicí cívky byly navinuty drátem o průměru  $\varnothing = 0,1$  mm a s počtem závitů  $N = 3200$ . Budicí cívka byla navinuta drátem o průměru  $\varnothing = 0,3$  mm a počtem závitů  $N = 2400$ . U cívek je použit jako vývod bílý drát pro začátek vinutí a černý pro konec vinutí.

## 4.6 Možnosti měření náklonu

Celé čidlo bylo navrženo tak, aby šlo náklon měřit, respektive vyhodnotit více způsoby. Jednoduše by tyto způsoby šly shrnout do dvou skupin a to do přímých metod, které indikují změnu náklonu změnou indukčnosti cívek, z této změny indukčnosti je poté možné zjistit napětí či proud na cívkách. Druhá skupina by se dala nazvat jako transformační metody, kde je používána k měřícím cívkám i cívka budicí. U těchto metod je měřeno přímo transformované indukované napětí na detekčních cívkách.

### 4.6.1 Přímé metody

U přímých metod měření náklonu je nejjednodušším způsobem zjištění úhlu naklonění měřením indukčnosti na jedné měřící cívce, jak je vidět na *Obr.4.21*. Jelikož napětí na cívce  $U$  závisí na její indukčnosti a frekvenci procházejícího proudu, lze při střídavém buzení senzoru vyhodnocovat náklon i z tohoto napětí. Výhodou řešení pouze s jednou měřící cívkou jsou doajista menší výrobní náklady a jednodušší vyhodnocování úhlu naklonění. Při měření úhlu naklonění za pomoci dvou cívek lze dostat přesnější hodnotu měřeného naklonění. Metoda používající dvě cívky by měla zmenšovat riziko chyby z hlediska okolních vlivů. Také vyhodnocení úhlu naklonění je zde složitější než u metody měření jedné cívky.



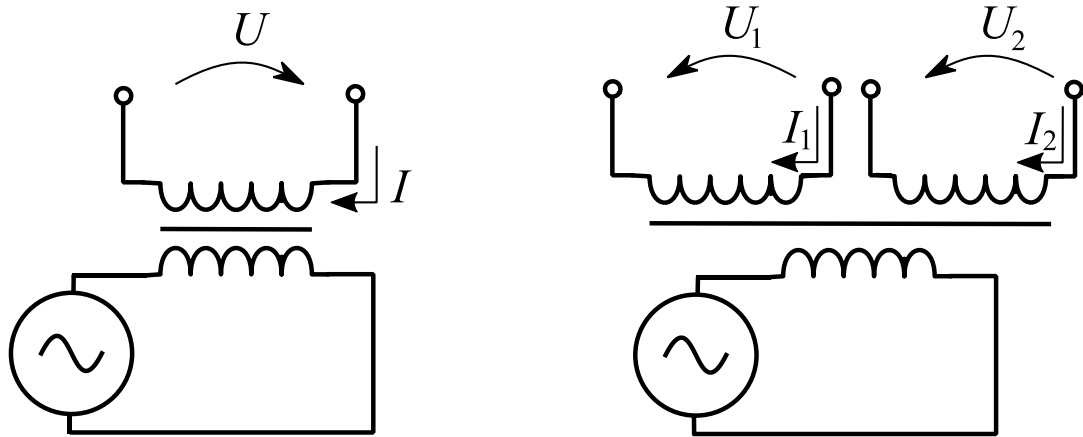
*Obr. 4.21 Přímá metoda s jednou cívkou*

### 4.6.2 Transformační metody

K funkci transformačních metod je nezbytná budicí cívka, která je fyzicky umístěná okolo cívek měřících. Díky budicí cívce jsou transformační metody finančně náročnější na výrobu. Na *Obr.4.22* je znázorněna nejjednodušší transformační metoda k měření úhlu. Tato metoda používá s cívkou budicí pouze jednu cívku měřící. Naindukované napětí na měřící cívce je úměrné úhlu naklonění. Vyhodnocování naměřeného úhlu je mnohem jednodušší

z hodnot naměřených napětí než z naměřených indukčností, díky čemuž je tato metoda z pohledu složitosti vyhodnocování náklonu nejideálnější.

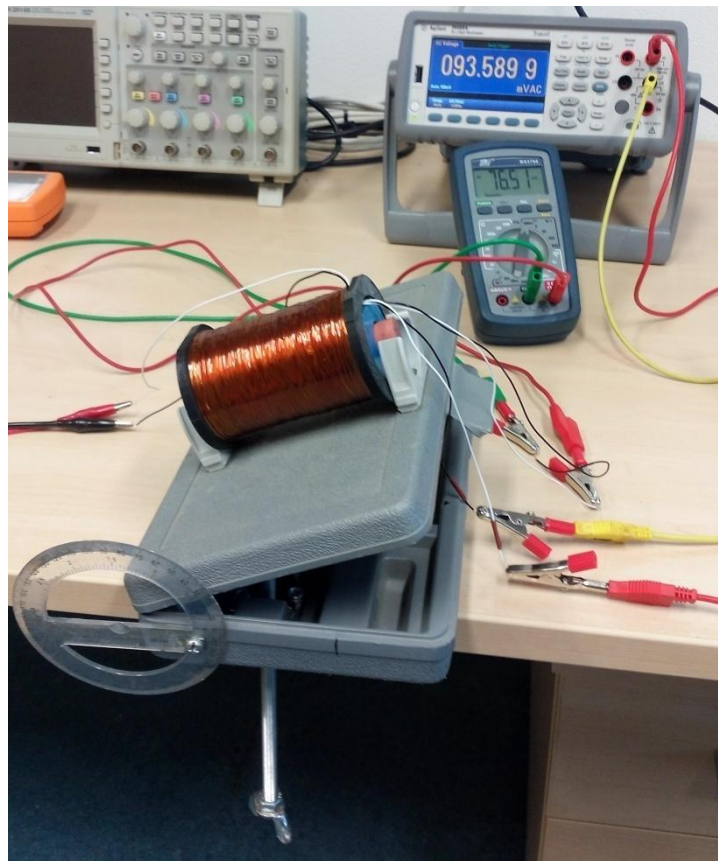
Na Obr.4.23 je další způsob měření náklonu za pomoci budicí cívky. Zapojením obou měřicích cívek je možné získat lepší odolnost měření vůči okolním vlivům. Za použití obou měřicích cívek lze náklon vyhodnotit měřením napětí na každé cívce zvlášť, kde je nutné najednou zpracovávat data z obou cívek. To je z hlediska vyhodnocování poměrně složité. Nebo lze měřicí cívky zapojit antiparalelně. Tím se výsledné napětí obou cívek odečte a jejich rozdílem je získána hodnota odpovídající aktuálnímu náklonu. Směr natočení se zjistí polaritou výsledného napětí.



Obr. 4.22 Transformační metoda s jednou cívkou Obr. 4.23 Transformační metoda s dvěma cívkami

## 5 Experimentální ověření teoretických předpokladů

Konstrukce, která je použita pro měření úhlů, se skládá ze základny, do které je připevněna matka se šroubem. Šroub zde plní úlohu jemného zvedání a aretace víka konstrukce při potřebném naklonění. Víko konstrukce je z jedné strany připevněno přes pant, díky kterému je zajištěna správná funkčnost konstrukce. Na víku jsou připevněny úchyty na senzor. Úhel je zde nastavován, respektive měřen, díky úhломěru připevněnému na základnu konstrukce, jak je vidět na *Obr.5.1*.



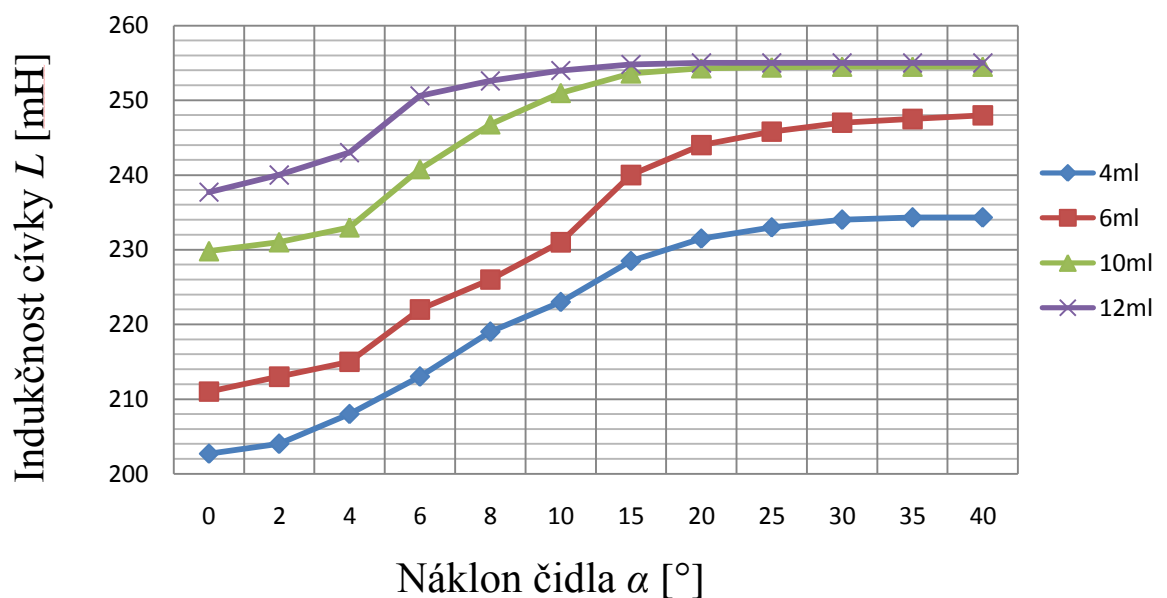
*Obr. 5.1 Konstrukce pro měření naklonění*

### 5.1 Měření při různém naplnění

Měření bylo provedeno z důvodu zjištění ideálního množství magnetické kapaliny v nádobě. Pro toto měření byla zvolena kapalina EFH1 FerroTec. Měření bylo provedeno osmkrát a to při čtyřech různých naplněních. Při známém úhlu naklonění byla vždy měřena indukčnost detekční cívky, RLC metrem. Každé naplnění bylo měřeno dvakrát a to z důvodu potřeby měřit každou detekční cívku. Měřit na obou detekčních cívkách najednou nebylo možné z důvodu vzájemného rušení přístrojů.

Pro první dvě měření byla nádoba naplněna čtyřmi mililitry magnetické kapaliny, poté šesti mililitry, deseti mililitry a dvanácti mililitry. Úhel naklonění byl měněn ze začátku po dvou stupních až do deseti stupňů, poté byl měněn po pěti stupních až do konečných devadesáti stupňů. A to z důvodu předpokládané větší citlivosti senzoru pro menší úhel náklonu.

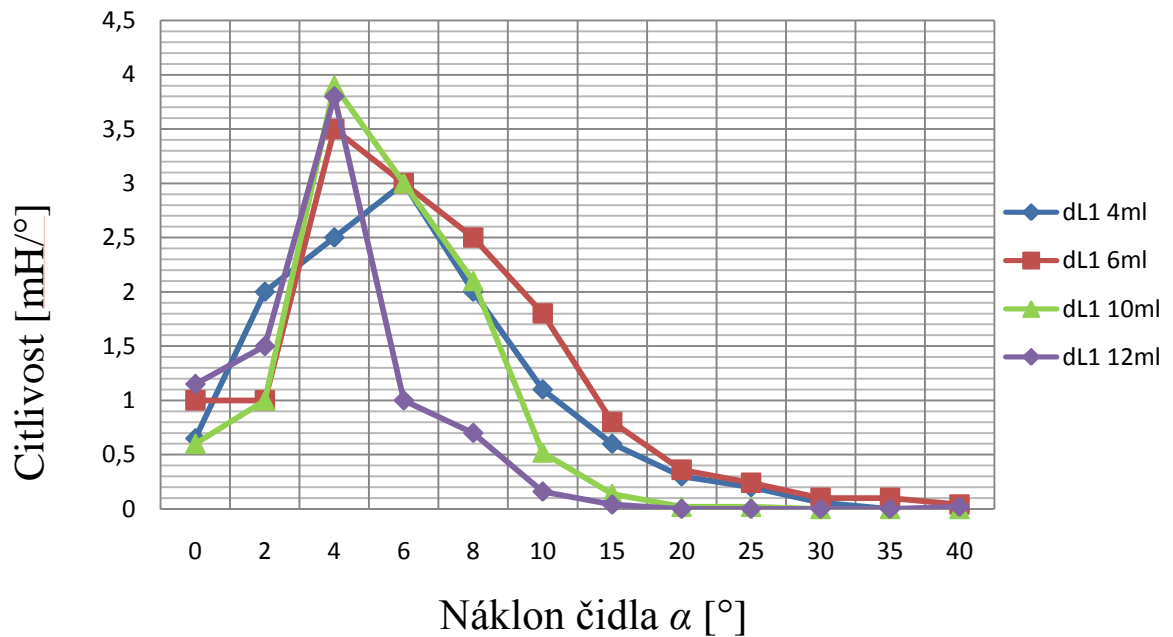
Měřením se potvrdil teoretický předpoklad větší citlivosti v oblasti menších úhlů. Použitelný měřicí rozsah se měnil naplněním nádoby. Nejlepších hodnot neboli největší měřitelný rozsah úhlů se docílil při naplnění nádoby šesti mililitry magnetické kapaliny. V následujícím *Obr.5.2* je graficky znázorněna změna indukčnosti při změně náklonu čidla u různého naplnění nádoby. V rozsahu od čtyřiceti stupňů do devadesáti stupňů je změna téměř nulová, celý graf je obsažen v příloze A.



*Obr. 5.2 Závislost indukčnosti cívky na náklonu senzoru*

Z grafu vyplývá, že nejlepší změny indukčnosti  $L$  na měřeném rozsahu bylo dosaženo při použití naplnění 6 ml. Pro lepší ilustraci byla následně znázorněna závislost změny  $\Delta L$ , jelikož také citlivost změny indukčnosti na úhlu naklonění senzoru je důležitým hlediskem měření. Na *Obr.5.3* je znázorněna citlivost pro každé měřené naplnění nádoby. Hodnoty potřebné pro *Obr.5.3* byly získány rozdílem naměřených hodnot indukčností dané cívky pro

dvě po sobě jdoucí měření a dělením této hodnoty rozdílem úhlu naklonění odpovídající daným indukčnostem. Tento obrázek tedy dává informaci o změně indukčnosti při změně naklonění o jeden stupeň. Také zde je zobrazen graf pouze do čtyřiceti stupňů, jelikož od čtyřiceti do devadesáti stupňů je citlivost téměř nulová. Celý graf je obsažen v příloze A. Naplnění šesti mililitrů magnetické kapaliny dosáhlo nejlepšího výsledku.



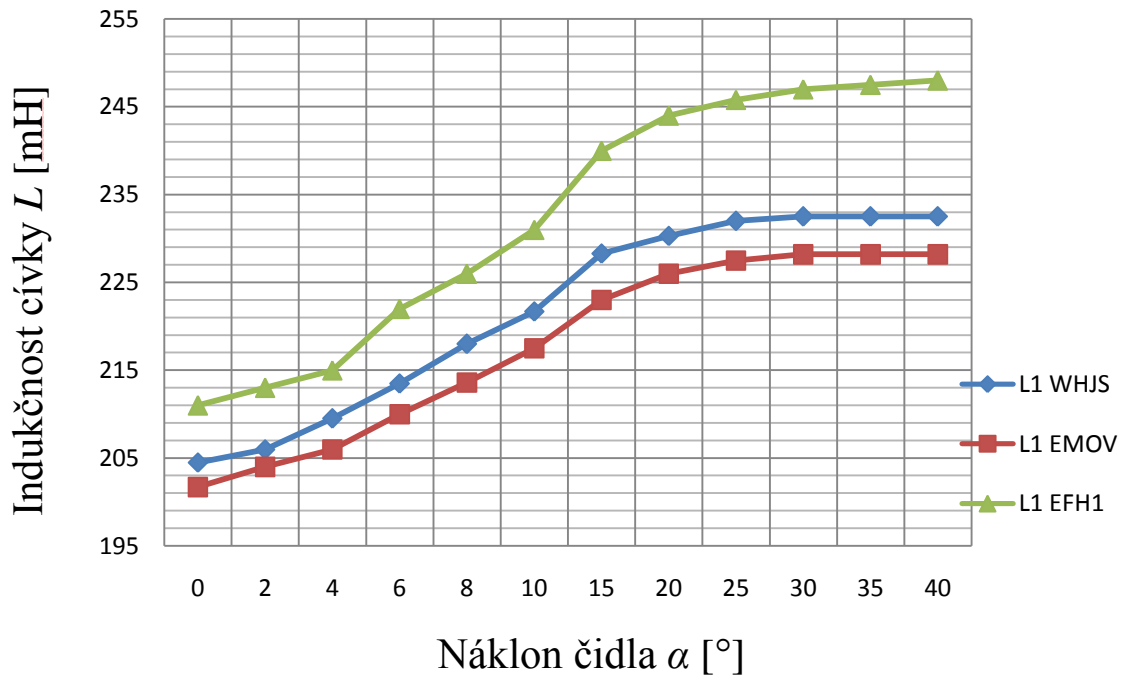
Obr. 5.3 Změna indukčnosti při změně náklonu

## 5.2 Měření různých magnetických kapalin

Pro výběr správné magnetické kapaliny se provedlo měření třech dostupných vzorků magnetických kapalin - EFH1 FerroTec, WHJS1-B Liquids research a EMOVENDO Ferrofluid. Nejdůležitější vlastností pro daný senzor je permeabilita kapaliny. Magnetická kapalina s větší permeabilitou by měla zapříčinit větší rozdíl v indukčnosti cívky prázdné a cívky naplněné magnetickou kapalinou, což by mělo zapříčinit větší citlivost navrhovaného inklinometru. Všechny vzorky byly naplněny šesti mililitry dané magnetické kapaliny. Jelikož, jak vyplývá z předešlého měření, tato hodnota je pro tento typ měření ideální.



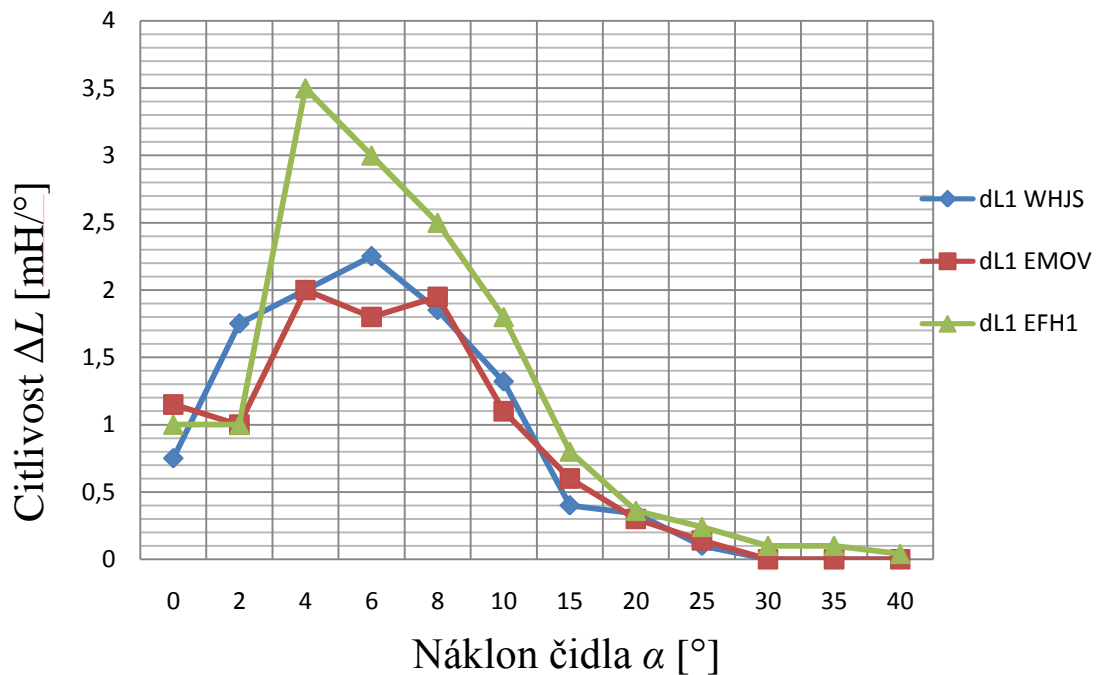
Z Obr.5.4 vyplývá, že první měřená kapalina - EFH1 FerroTec byla vyhodnocena jako nejlepší a z teoretického předpokladu má z měřených magnetických kapalin největší permeabilitu. Rozsah měření je zde zobrazen pouze do čtyřiceti stupňů, jelikož od čtyřiceti stupňů do devadesáti stupňů se hodnoty téměř nemění. Celý graf je zobrazen v příloze B.



Obr. 5.4 Závislost indukčnosti cívky na náklonu senzoru

I zde je nutné zjistit, jak se liší citlivost naměřených hodnot inklinometru při stejném naplnění nádoby a při různých použitých magnetických kapalinách. Citlivost se vypočte stejně jako u předchozího měření. Citlivost tedy znázorňuje změnu indukčnosti při změně náklonu senzoru o jeden stupeň. Na Obr.5.5 je vidět, že nejlepšími výsledky, respektive největší citlivosti, zde dosahuje magnetická kapalina EFH1 FerroTec. V rozsahu od čtyřiceti stupňů do devadesáti stupňů je změna téměř nulová, celý graf je obsažen v příloze B.

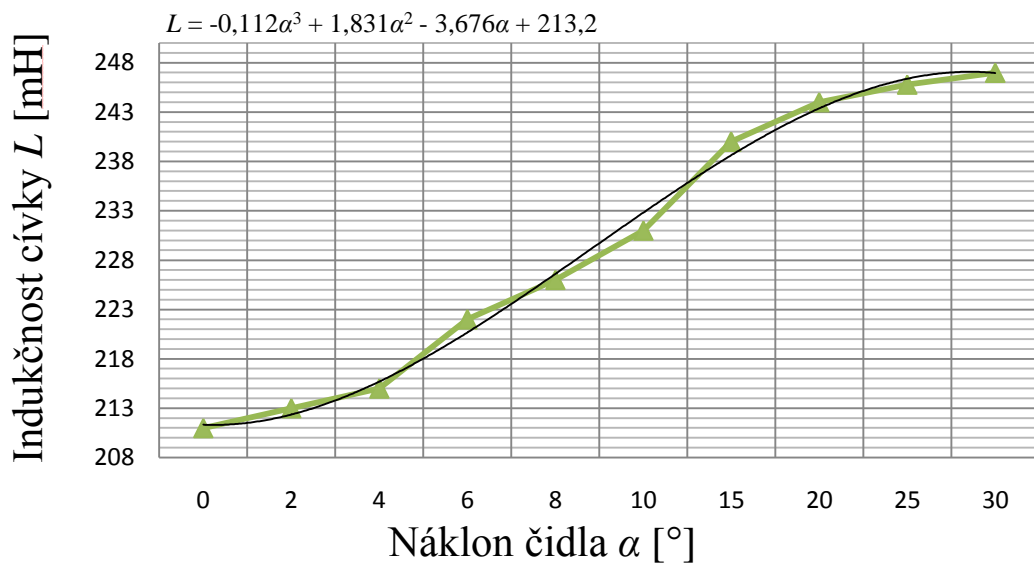




Obr. 5.5 Změna indukčnosti při změně náklonu

Na posledním obrázku této podkapitoly *Obr.5.6* je znázorněna křivka naměřená při naplnění kapalinou EFH1 FerroTec, kterou je proložena pomocná křivka. Pomocná křivka neboli spojnice trendu je zjednodušením křivky naměřených hodnot polynomickou funkcí třetího řádu.

Pomocná funkce zobrazená na *Obr.5.6* je důležitá při možném vyhodnocování měření bez budicí cívky a měření náklonu pouze jednou cívkou detekční. Díky této funkci je možné převádět změřenou indukčnost rovnou na odpovídající hodnotu úhlu náklonu inklinometru.



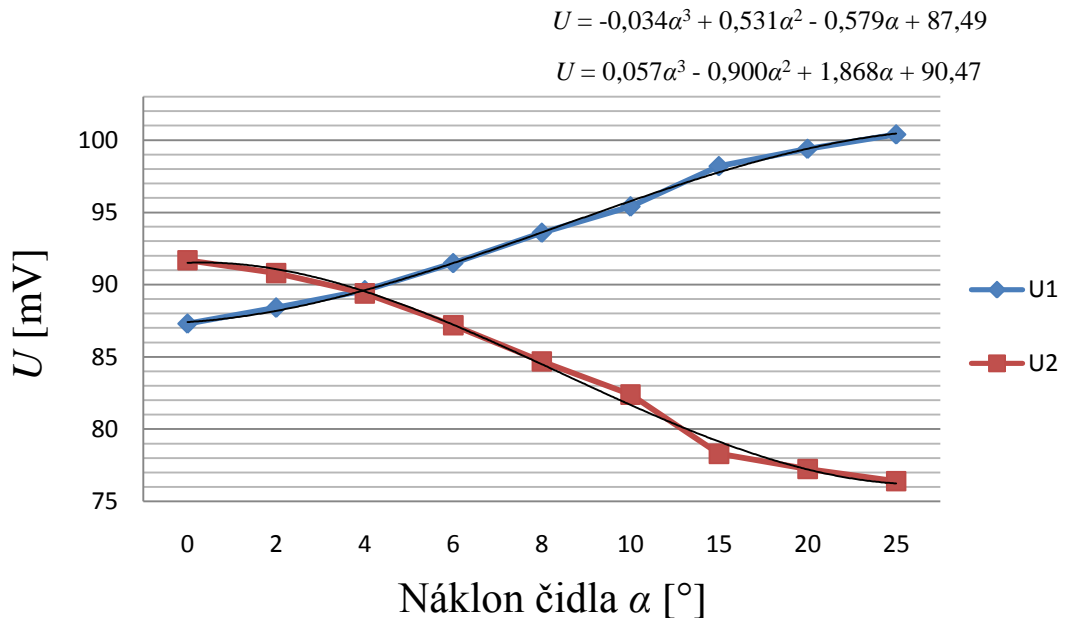
Obr. 5.6 Spojnice trendu naměřených hodnot EFH1

### 5.3 Měření s budicí cívkou

Při měření s budicí cívkou byla realizována transformační metoda, kdy byla harmonicky buzena vnější cívka, a bylo měřeno napětí indukované na cívkách detekčních. Použití budicí cívky k zjištění úhlu náklonu inklinometru se zdá být výhodné především z důvodu převádění hodnot napětí rovnou na hodnotu úhlu naklonění. Odpadá tedy nutnost zpracování informací o indukčnosti na jinou elektrickou veličinu, tj. napětí či proud. Značnou nevýhodou je potřeba třetí cívky a zdroje harmonického buzení.

V daném měření se budila vnější cívka proudem o efektivní hodnotě  $I = 4,5$  mA a frekvencí  $f = 50$  Hz. Efektivní hodnota napětí získaného na detekčních cívkách bez použití magnetické kapaliny byla  $U_1 = 73,5$  mV a  $U_2 = 75,2$  mV. Předpokládá se, že napětí na detekčních cívkách by mělo být přibližně stejné, rozdíl je způsoben nepřesnou výrobou cívek, nejsou zcela totožné. Nakloněním senzoru s následným přelitím magnetické kapaliny by se napětí na cívce s přibývajícím množstvím magnetické kapaliny v jádře mělo zvyšovat. Naopak napětí na cívce s úbytkem magnetické kapaliny v jádře by mělo klesat.

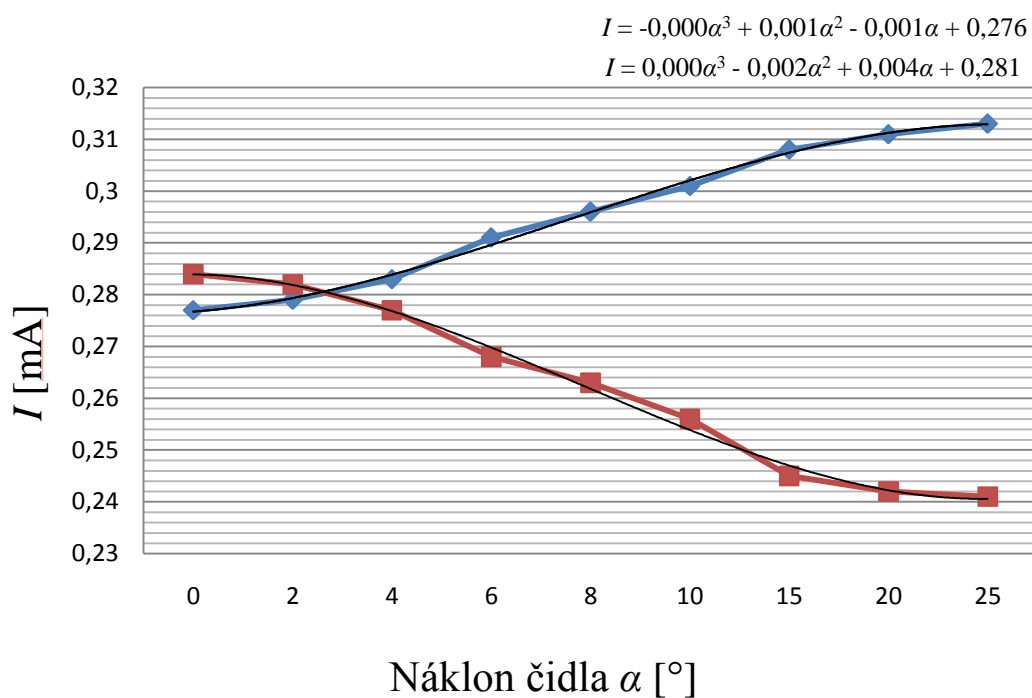
Na *Obr.5.7* jsou vidět naměřené hodnoty pro měření s magnetickou kapalinou EFH1 FerroTec. Při naplnění šesti mililitry magnetické kapaliny výsledky měření odpovídají teoretickému předpokladu. Hodnoty naměřené pro ostatní magnetické kapaliny jsou uvedeny i s tabulkami naměřených hodnot v příloze C.



*Obr. 5.7* Napětí na detekčních cívkách

Křivky naměřené pro magnetickou kapalinu EFH1 FerroTec na *Obr.5.7* jsou proloženy spojnicemi trendu naměřených hodnot. Odpovídají jim polynomické rovnice třetího řádu, které mohou sloužit při vyhodnocování převodu naměřených hodnot napětí na úhel náklonu inklinometru. Hodnoty znázorněné na *Obr.5.7* jsou pouze v rozmezí náklonu do 25 stupňů, poté jsou hodnoty téměř ustálené.

Na *Obr.5.7* je vidět, že hodnoty pro napětí se navzájem rovnají až při naklonění zhruba čtyřech stupňů. Což velice znevýhodňuje měření antisériovým způsobem. Nesrovnalost rozdílného napětí pro rovnovážnou polohu je dána rozdílnými hodnotami indukčnosti cívek. Pro antisériové zapojení a vyhodnocení je velice zásadní totožnost obou měřících cívek, které se těžko dosahuje i při odborném navíjení externí firmou. Stejněho výsledku je možné si všimnout i na *Obr.5.8*, kde se měřily proudy při stejném zapojení.



Obr. 5.8 Proud na detekčních cívkách

V následující tabulce je zobrazen seznam použitých přístrojů.

Tab.5.1 Seznam použitých přístrojů

Přístroj	Výrobce	Typ	Inventární číslo
R, L, C metr	KEYSIGHT	U1733C	226872
Digitální multimetr	AGLIENT	34460A	215126
Osciloskop	TEKTRONIX	TDS2014B	500531
Generátor	TEKTRONIX	AFG3021	neuvedeno
Tesla metr	ELIDIS	Elimag MP-1	500665

## 6 Zhodnocení a využití

### 6.1 Zhodnocení metod

U použitých metod měření vzniká teoreticky několik možných rizik. Například možnost působení vlivu hystereze, vzájemného ovlivňování měřících přístrojů nebo zabránění pohybu magnetické kapaliny magnetickým polem.

Pro všechna měření byly odečítány hodnoty napětí, proudů i indukčností jak při zvyšování úhlu, tak při jeho snižování. Tímto postupem bylo zjištěno, že při žádném měření nedochází k magnetické hysterezi. Zároveň nebyl zjištěn vliv paměťového efektu senzoru, který je zapříčiněn pomalým stékáním kapaliny ze stěn nádoby a jejím vlivem na měřenou indukčnost.

Ke vzájemnému ovlivňování měřících přístrojů dochází nejzřetelněji při snaze měřit indukčnosti obou detekčních cívek najednou, každou jiným přístrojem. Jelikož přístroje budí danou cívku při snaze změřit indukčnost, vzniká zde magnetické pole, které přenáší energii na druhou detekční cívku. Tento jev znehodnocuje naměřené hodnoty indukčnosti druhé cívky a naopak.

Jelikož při přiložení magnetického pole do okolí magnetických kapalin mají kapaliny tendenci držet se uprostřed magnetického pole, bylo provedeno měření velikosti magnetického pole uvnitř a v okolí cívek. Měření bylo provedeno Teslametrem s halovou sondou. Měřené hodnoty byly menší než rozhodovací schopnost daného přístroje. Tedy magnetická indukce pole je zde menší než desetina militesla. Nehrozí proto držení magnetické kapaliny uprostřed cívek.

### 6.2 Zhodnocení senzoru a jeho potenciál v praxi

Složitost a velikost senzoru byla navržena a zkonstruována z důvodu odzkoušení více možností zapojení. Pro praktické použití, po výběru vyhodnocovací metody, se dá velikost senzoru podstatně zmenšit a složitost výroby podstatně zjednodušit. Výhodou senzoru náklonu s magnetickou kapalinou je možnost modifikace kontejneru, pomocí níž jsou znatelně změněny vlastnosti senzoru. Mezi tyto vlastnosti je možné zařadit jeho citlivost, rozsah měřených úhlů nebo počet měřených os.

Použití principů senzoru náklonu s magnetickou kapalinou je možné v aplikacích zajišťujících přesné měření úhlů do zhruba třiceti stupňů. Příkladem mohou být bezpečnostní systémy do automobilů (naklonění při nežádoucí manipulaci), měření úhlů vrtacích souprav, měření sklonu a natočení antén, monitorování ramen jeřábů a materiálových manipulátorů. V současné době není možné konkurovat sensorům, které jsou dostupné na trhu, hlavně z důvodu citlivosti, která je velice omezená použitou vyhodnocovací technikou. Pro použití v praxi je nezbytné daný senzor modifikovat pro danou aplikaci. Také dalším vývojem měřených principů by se měla zlepšovat konkurenční schopnost senzoru.

Naopak nevhodné je použití daného senzoru v okolí silného magnetického pole jako například u elektromagnetických pecí nebo ve svařovací technice.

### 6.3 Výrobní Cena

Při zanedbání lidských zdrojů jsou celkové náklady tvořeny pouze výrobními náklady. Výrobní náklady zhotoveného senzoru se skládají z materiálových vstupů. Materiálové vstupy tvoří zkumavky, magnetická kapalina, navinutí cívek a materiály pro 3D tisk. V následující tabulce je vidět finanční plán vyrobeného senzoru. V prvním sloupci jsou zobrazeny materiálové vstupy. V druhém sloupci jejich cena za kus, litr nebo hodinu práce zařazení. Ve třetím sloupci je znázorněno množství a v posledním sloupci celková cena daného vstupu. 3D tisk je počítán jako součet ceny za spotřebu a ceny za materiál.

Tab. 6.1 Finanční plán

Finanční plán	cena	množství	celkem
Zkumavka s pryžovou zátkou	5 Kč	4x	20 Kč
magnetická kapalina	5000 Kč/litr	6 ml	30 Kč
3D tisk	0,7 Kč/hod.	15 hod.	11 Kč
Navinutí cívek	490 Kč	1x	490 Kč

Cena vyrobeného senzoru bez práce je tedy 551 Kč. Připočtením ceny práce, kterou tvoří nákras konstrukce (3 hodiny), 3D tisknutí (4 hodiny), složení (1 hodinu) a oživení (12 hodin) při ceně 150 Kč za hodinu získáme finální cenu funkčního vzorku 3551 Kč. Cena materiálu má minoritní podíl na výsledné ceně funkčního vzorku. Majoritní podíl nákladů je způsoben prací konstruktéra a zakázkovou výrobou. Tato cena ovšem neodpovídá ceně senzoru vyráběného sériovou výrobou. Sériově vyráběný senzor by měl být vyráběný v menších rozměrech a s menším počtem detekčních cívek, což zapříčiní snížení výrobních nákladů.

Pro určení ceny sériově vyráběného senzoru je nutné nejprve provést analýzu trhu, respektive analýzu možných bariér vstupu na trh, analýzu konkurence, analýzu možných substitutů a analýzu zákaznických požadavků. Cena je v první řadě tvořena materiálovými náklady. Do celkové ceny je nutno dále započíst prvotní investice ve formě přizpůsobení výrobní linky pro výrobu daného senzoru. V neposlední řadě se musí počítat s lidskými zdroji, energiemi vynaloženými na výrobu a prodejními náklady. K takto získané položce je nutné připočíst marži.

Předpokládaná prodejní cena senzoru by měla být konkurenceschopná. Vzhledem k tomu, že materiálové náklady jsou tvořeny z cen plastového výlisku, magnetické kapaliny a cívkového drátu, předpokládám, že při sériové výrobě by bylo dosaženo ceny schopné konkurovat ostatním výrobkům. Z důvodu vysokých pořizovacích nákladů na výrobní linku se ovšem ekonomický úspěch technologie odvíjí od vyráběného množství senzorů a je úzce vázán na případnou poptávku.

Jelikož pro dané aplikace měření náklonu je možné senzor vyrábět v různých modifikacích a za použití různých materiálů, není v tuto chvíli možné stanovit přesnou prodejní cenu konkrétního řešení.

## Závěr

Předkládaná diplomová práce pojednala o využití magnetických kapalin v senzorové technice. Uvedla vlastnosti magnetických kapalin, jejich druhy i možnosti výroby. Využití těchto kapalin je možné nalézt například ve feroKapalinových tlumičích, magnetické spojce, těsnění hřídele či chlazení reproduktorů. Použití v senzorové technice je zatím spíše experimentální, ale existují senzory s magnetickou kapalinou měřící tlak, otáčky, objem nebo průtok plynu.

Měření náklonu v současné době lze realizovat pomocí například kyvadlových snímačů, elektrolytických snímačů, kapacitních snímačů nebo optickým snímáním polohy. Poměrně populární jsou snímače využívající MEMS technologie a to zejména kvůli své velikosti a přesnosti. S měřením náklonu je možné se setkat například v automobilovém průmyslu, leteckém průmyslu, navigačních systémech, zdravotnických zařízeních, těžebních strojích, mobilních telefonech, kamerách, robotice nebo optických systémech. Magnetické kapaliny se v současnosti v komerčních inklinometrech nevyužívají.

Jedním z cílů diplomové práce byl návrh náklonového senzoru využívajícího právě magnetických kapalin. Senzor byl navržen a následně byl zkonstruován jeho funkční vzorek. Experimentálně byla potvrzena funkčnost zkoumané technologie. Při návrhu zařízení byl kladen důraz na to, aby bylo možné ověřit více variant vyhodnocování naměřeného úhlu. Přímá metoda měření úhlu vyžaduje převedení naměřené indukčnosti na veličinu vhodnou pro vyhodnocovací člen. Výstupem měření transformační metody je již napětí, což značně zjednoduší vyhodnocovací proces, ale při této metodě je nutné zapojení harmonického zdroje do obvodu s budící cívkou.

Funkční vzorek byl modifikován a experimentálně byl sledován vliv naplnění kontejneru a vliv typu použité magnetické kapaliny na jeho výstupy. Jako vhodné naplnění senzoru se ukázalo 6 ml magnetické kapaliny. Z dostupných magnetických kapalin dosáhla kapalina EFH1 FerroTec největšího měřícího rozsahu, respektive citlivosti. Důvodem rozdílných naměřených hodnot je permeabilita kapalin. Kapalina EFH1 FerroTec má z dostupných magnetických kapalin permeabilitu největší. Experimentální výsledky byly porovnány s výsledky získanými numerickou simulací v Agros2D.

Dále byly na funkčním vzorku úspěšně provedeny navržené metody měření náklonu. Při měření s budící cívkou nastal problém v možnosti vyhodnocování úhlu naklonění antisériovým zapojením. Z důvodu rozdílné indukčnosti měřících cívek, způsobeného externí firmou jejich nedokonalou výrobou, by se hodnota odpovídající nulovému naklonění získala až při náklonu okolo čtyř stupňů.



V rámci této práce byla navržena metoda měření náklonu využívající magnetickou kapalinu. Na vyrobeném funkčním vzorku inklinometru byla metoda úspěšně ověřena. Vyrobený senzor lze použít k měření náklonu, ovšem v současné podobě nemůže být využit v reálném průmyslovém provozu. K tomuto účelu je potřeba vyvinout vyhodnocovací člen a stanovit přesné hodnoty citlivosti měření. Před případným sestavením prototypu je navíc nutné senzor modifikovat pro konkrétní použití.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ODENBACH, Stefan, ed. *Colloidal magnetic fluids: basics, development and application of ferrofluids*. Berlin: Springer, ©2009. x, 430 s. Lecture notes in physics, 763. ISBN 978-3-540-85386-2.
- [2] MAYER, Daniel. Magnetické kapaliny a jejich použití: (1. část). *Elektro*, 2007, **17**(3), s. 78-79. ISSN 1210-0889.
- [3] CHARLES, Stuart W. Liquids Research Limited: The Preparation of Magnetic Fluids [online]. Berlin: Springer-Verlag Heidelberg, 2002, 1-16 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: [http://pages.csam.montclair.edu/~yecko/ferro/papers/LNP594\\_Odenbach\\_Ferrofluids/Charles\\_Prep.pdf](http://pages.csam.montclair.edu/~yecko/ferro/papers/LNP594_Odenbach_Ferrofluids/Charles_Prep.pdf)
- [4] ODENBACH, Stefan. *Ferrofluids: magnetically controllable fluids and their applications*. New York: Springer, c2002, xi, 251 p. ISBN 35-404-3978-1.
- [5] *FerroTec: Ferrofluid for Specific Applications* [online]. [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: [www.ferrotec.com](http://www.ferrotec.com).
- [6] *Liquids Research Limited* [online]. 2011 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: [www.liquidsresearch.com](http://www.liquidsresearch.com)
- [7] *Apexmagnets: A Division of Emovendo LLC* [online]. Apex Magnets, 2015 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <https://www.apexmagnets.com>
- [8] *Carbibles: HYDROLASTIC SUSPENSION* [online]. Chris Longhurst, 1994. [cit. 2016-05-03] Dostupné z: [http://www.carbibles.com/suspension\\_bible\\_pg3.html](http://www.carbibles.com/suspension_bible_pg3.html)
- [9] HUANG J., HE J., LU G., Analysis and Design of Magnetorheological Damper, *Advanced Materials Research Vols. 148-149* (2011) pp 882-8861, [Cit. 2015-02-03] Dostupné z WWW: <http://www.scientific.net/AMR.148-149.882>
- [10] MAYER, Daniel. Future of electrotechnics: ferrofluids. *Advanced in Electrical and Electronic Engineering*, 2008, **7**(1-2), s. 9-14. ISSN 1336-1376.
- [11] ODENBACH, Stefan. *Magnetoviscous effects in ferrofluids*. Berlin: Springer, c2002, x, 151 p. Lecture notes in physics, m71. ISBN 35-404-3068-7.
- [12] BHATT, R.B. Magnetic-fluid-based smart centrifugal switch. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* [online]. 2002, 347–349 [cit. 2016-05-03]. DOI: 10.1016/S0304-8853(02)00613-3. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885302006133>
- [13] Magnetofluidic sensor for volume measurement. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. 2000, 246–249 [cit. 2016-05-03]. DOI: 10.1016/S0924-4247(00)00314-9. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424700003149>
- [14] Magnetic fluid pressure sensor. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* [online]. 2002, 399-402 [cit. 2016-05-03]. DOI: 10.1016/0304-8853(93)91118-Q. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/030488539391118Q>
- [15] Magnetic field sensor based on magnetic fluid clad etched fiber Bragg grating. *Optical Fiber Technology* [online]. 2011, 210–213 [cit. 2016-05-03]. DOI:

- 10.1016/j.yofte.2011.02.004. Dostupné z:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520011000228>
- [16] *Difrakce rentgenového záření* [online]. [cit. 2016-05-03]. Dostupné z:  
[http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbc/rtg\\_difrakce/4.html](http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbc/rtg_difrakce/4.html)
- [17] Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors. *Optics and Lasers in Engineering*[online]. 1999, 297–324 [cit. 2016-05-03]. DOI: 10.1016/S0143-8166(99)00025-1. Dostupné z:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816699000251>
- [18] Magnetic liquid sensor for very low gas flow rate with magnetic flow adjusting possibility. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. 1997, 307–310 [cit. 2016-05-03]. DOI: 10.1016/S0924-4247(97)80195-1. Dostupné z:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424797801951?np=y>
- [19] *Automatizace HW: Kyvadlové elektronické snímače náklonu* [online]. HW server s.r.o., 1997 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/kyvadlove-elektronicke-snimace-naklonu>
- [20] *Nové přístroje pro měření úhlu natočení a náklonu: snímače, převodníky, měřicí technika* [online]. AUTOMATA, 2009 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z:  
<http://automa.cz/res/pdf/39592.pdf>
- [21] *Elprocus: Understanding about Tilt Sensor, Types and Working with Applications* [online]. 0013n. 1. [cit. 2016-05-03]. Dostupné z:  
<https://www.elprocus.com/tilt-sensor-types-working-principle-and-its-applications>
- [22] *International Journal of Electronics and Electrical Engineering: A Simple, Low Cost Optical Tilt Sensor*[online]. 2014 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z:  
<http://www.ijeee.net/uploadfile/2014/0304/20140304055757673.pdf>
- [23] *POSITAL FABRA: MEMS INCLINOMETER* [online]. FRABA B.V [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <https://www.posital.com/en/products/inclinometers/mems/MEMS-Technology.php>
- [24] *Sital electronic: Čidla sklonu - sklonoměry* [online]. [cit. 2016-05-03]. Dostupné z:  
<http://www.sitall.cz/produkty.php?kategorie=1042&sekce=1038>
- [25] *Measurement specialies: Single Axis Tilt Sensors (Inclinometers)* [online]. 2015 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://www.meas-spec.com/position-sensors/tilt-sensors-inclinometers/single-axis-tilt-sensors-inclinometers.aspx>
- [26] *Freescale semiconductor: NPX* [online]. 2006 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z:  
<http://www.nxp.com/products/products:PCPRODCAT?tid=FSH>
- [27] *STMicroelectronics: MEMS and sensors* [online]. 2016 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z:  
[http://www2.st.com/content/st\\_com/en.html](http://www2.st.com/content/st_com/en.html)
- [28] *Analog Devices* [online]. 1995 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z:  
<http://www.analog.com/en/products/sensors.html>
- [29] *Memsic: Tilt Sensors* [online]. 2016 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z:  
<http://www.memsic.com/tilt-sensors/>
- [30] *Rieker: Tilt Switches: Open Collector & Relay* [online]. 2002 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://www.riekerinc.com/TiltIndicators.htm>
- [31] *VTI Technologies: MuRata* [online]. [cit. 2016-05-03]. Dostupné z:  
<http://www.murata.com/en-eu/products/sensor/inclinometer>

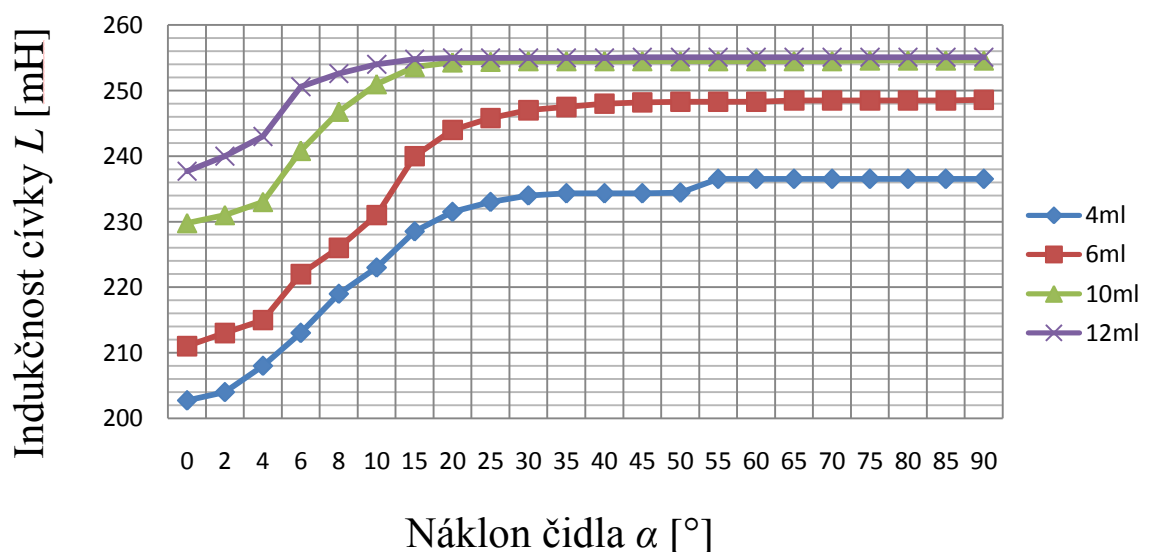
- [32] *OKI: open your dreams* [online]. 1995 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://www.oki.com/en/products>
- [33] *Bosch Sensortec* [online]. [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: [https://www.bosch-sensortec.com/bst/products/motion/accelerometers/overview\\_accelerometers](https://www.bosch-sensortec.com/bst/products/motion/accelerometers/overview_accelerometers)
- [34] *Crossbow: Technologies* [online]. [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://www.moog-crossbow.com/products/inertial-products/>
- [35] *Sensors and Actuators A: Physical: Tilt measurement sensor* [online]. 2000, , <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1016515800001053> [cit. 2016-05-03]. DOI: 10.1016/S0924-4247(99)00105-3.
- [36] *3D Systems: STL File* [online]. 2015 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://www.3dsystems.com/quickparts/learning-center/what-is-stl-file>
- [37] *DIMENZOVÁNÍ VODIČŮ A KABELŮ* [online]. [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: [http://home.zcu.cz/~nohac/EE1/CV-EE1-4-Dimenzovani\\_vodicu\\_1.pdf](http://home.zcu.cz/~nohac/EE1/CV-EE1-4-Dimenzovani_vodicu_1.pdf)
- [38] Aplikace teoretické elektrotechniky: přednáška číslo 5 a 6. In: *Portál ZČU: Courseware* [online]. [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/portal/studium/courseware/kte/ate/studijni-materialy.htm>

## Přílohy

### Příloha A – Měření při různém naplnění

Tab. 7.1 Naměřených hodnot při měření různého naplnění 4ml a 6 ml

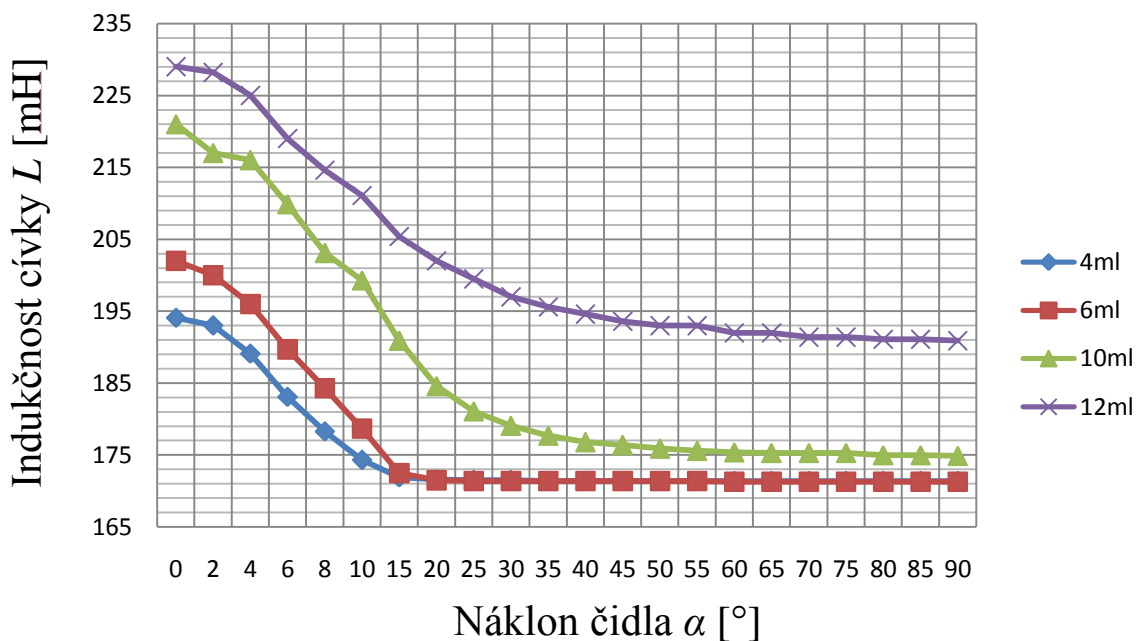
EFH1	4 [ml]				EFH1	6 [ml]			
úhel [°]	$L_1$ [mH]	$L_2$ [mH]	$\Delta L_1$ [mH/°]	$\Delta L_2$ [mH/°]	úhel [°]	$L_1$ [mH]	$L_2$ [mH]	$\Delta L_1$ [mH/°]	$\Delta L_2$ [mH/°]
0	202,7	194,1	0,65	0,55	0	211	202	1	1
2	204	193	2	1,95	2	213	200	1	2
4	208	189,1	2,5	3	4	215	196	3,5	3,15
6	213	183,1	3	2,4	6	222	189,7	3	2,7
8	219	178,3	2	2	8	226	184,3	2,5	2,8
10	223	174,3	1,1	0,48	10	231	178,7	1,8	1,24
15	228,5	171,9	0,6	0,06	15	240	172,5	0,8	0,2
20	231,5	171,6	0,3	0,02	20	244	171,5	0,36	0,02
25	233	171,5	0,2	0	25	245,8	171,4	0,24	0
30	234	171,5	0,06	0,02	30	247	171,4	0,1	0
35	234,3	171,4	0	0	35	247,5	171,4	0,1	0
40	234,3	171,4	0	0	40	248	171,4	0,04	0
45	234,3	171,4	0,02	0	45	248,2	171,4	0,02	0
50	234,4	171,4	0,42	0	50	248,3	171,4	0	0
55	236,5	171,4	0	0	55	248,3	171,4	0	0,02
60	236,5	171,4	0	0	60	248,3	171,3	0,04	0
65	236,5	171,4	0	0	65	248,5	171,3	0	0
70	236,5	171,4	0	0	70	248,5	171,3	0	0
75	236,5	171,4	0	0	75	248,5	171,3	0	0
80	236,5	171,4	0	0	80	248,5	171,3	0	0
85	236,5	171,4	0	0	85	248,5	171,3	0,02	0
90	236,5	171,4			90	248,6	171,3		



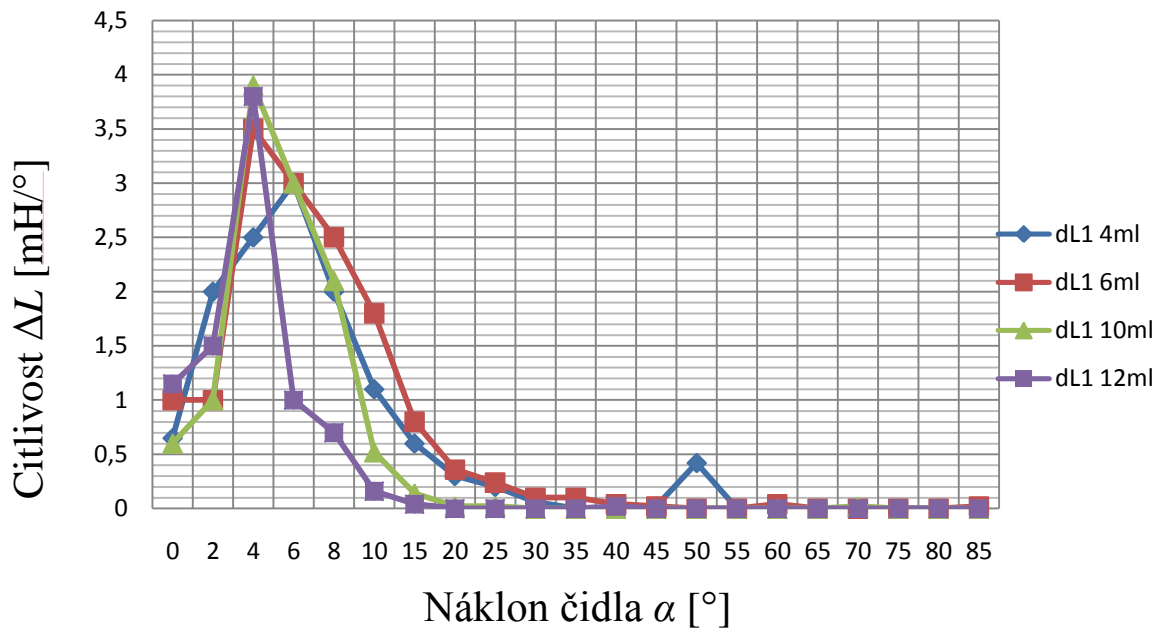
Obr. 7.1 Závislost indukčnosti první cívky na náklonu senzoru při různém naplnění

Tab. 7.2 Naměřených hodnot při měření různého naplnění 10ml a 12 ml

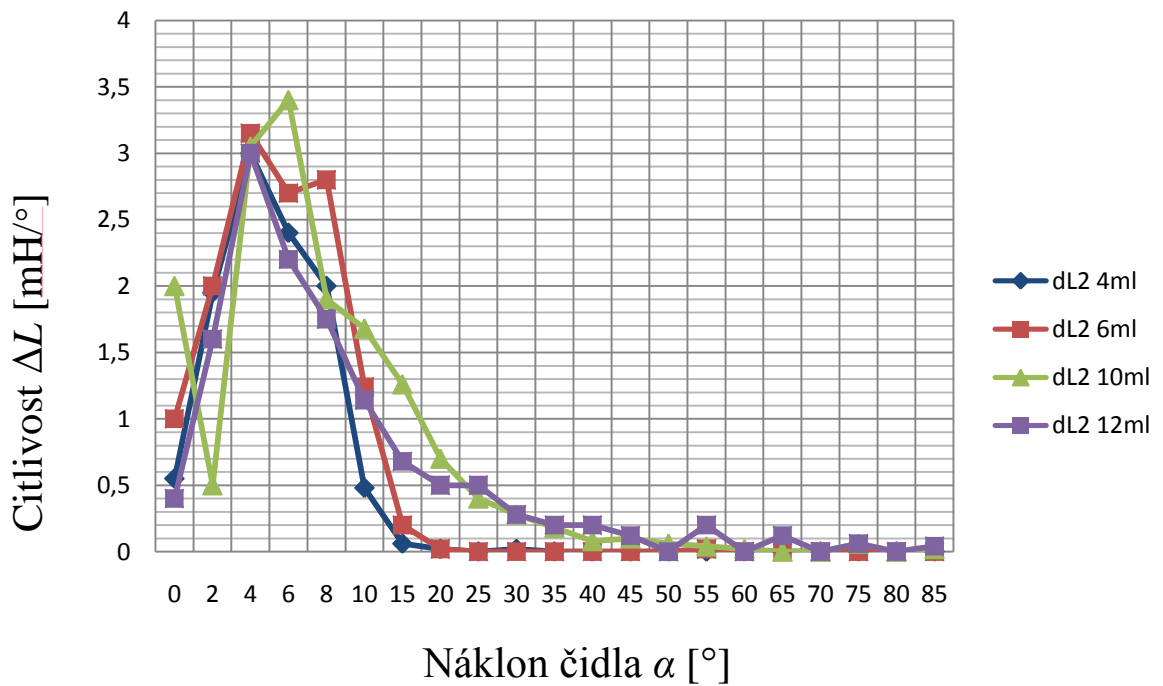
EFH1	10 [ml]				EFH1	12 [ml]			
úhel [°]	$L_1$ [mH]	$L_2$ [mH]	$\Delta L_1$ [mH/°]	$\Delta L_2$ [mH/°]	úhel [°]	$L_1$ [mH]	$L_2$ [mH]	$\Delta L_1$ [mH/°]	$\Delta L_2$ [mH/°]
0	229,8	221	0,6	2	0	237,7	229	1,15	0,4
2	231	217	1	0,5	2	240	228,2	1,5	1,6
4	233	216	3,9	3,05	4	243	225	3,8	3
6	240,8	209,9	3	3,4	6	250,6	219	1	2,2
8	246,8	203,1	2,1	1,9	8	252,6	214,6	0,7	1,75
10	251	199,3	0,52	1,68	10	254	211,1	0,16	1,14
15	253,6	190,9	0,14	1,26	15	254,8	205,4	0,04	0,68
20	254,3	184,6	0,02	0,7	20	255	202	0	0,5
25	254,4	181,1	0,02	0,4	25	255	199,5	0	0,5
30	254,5	179,1	0	0,28	30	255	197	0	0,28
35	254,5	177,7	0	0,18	35	255	195,6	0	0,2
40	254,5	176,8	0	0,08	40	255	194,6	0,02	0,2
45	254,5	176,4	0	0,1	45	255,1	193,6	0	0,12
50	254,5	175,9	0	0,06	50	255,1	193	0	0
55	254,5	175,6	0	0,04	55	255,1	193	0	0,2
60	254,5	175,4	0	0,02	60	255,1	192	0	0
65	254,5	175,3	0	0	65	255,1	192	0	0,12
70	254,5	175,3	0,02	0	70	255,1	191,4	0	0
75	254,6	175,3	0	0,06	75	255,1	191,4	0	0,06
80	254,6	175	0	0	80	255,1	191,1	0	0
85	254,6	175	0	0,02	85	255,1	191,1	0	0,04
90	254,6	174,9			90	255,1	190,9		



Obr. 7.2 Závislost indukčnosti druhé cívky na náklonu senzoru při různém naplnění



Obr. 7.3 Závislost změny indukčnosti první cívky na náklonu senzoru při různém naplnění

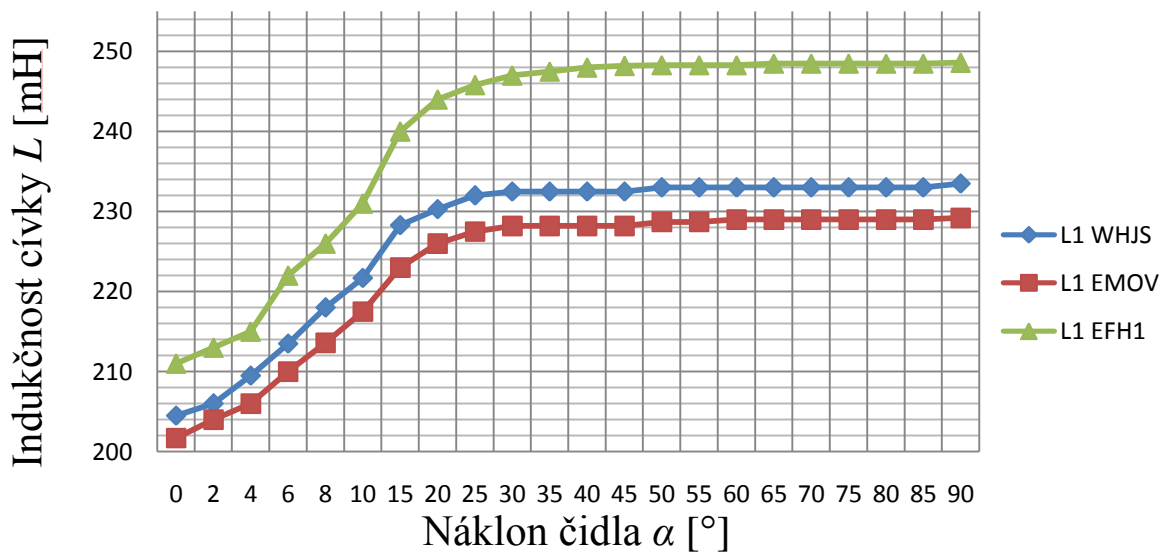


Obr. 7.4 Závislost změny indukčnosti druhé cívky na náklonu senzoru při různém naplnění

**Příloha B – Měření různých kapalin**

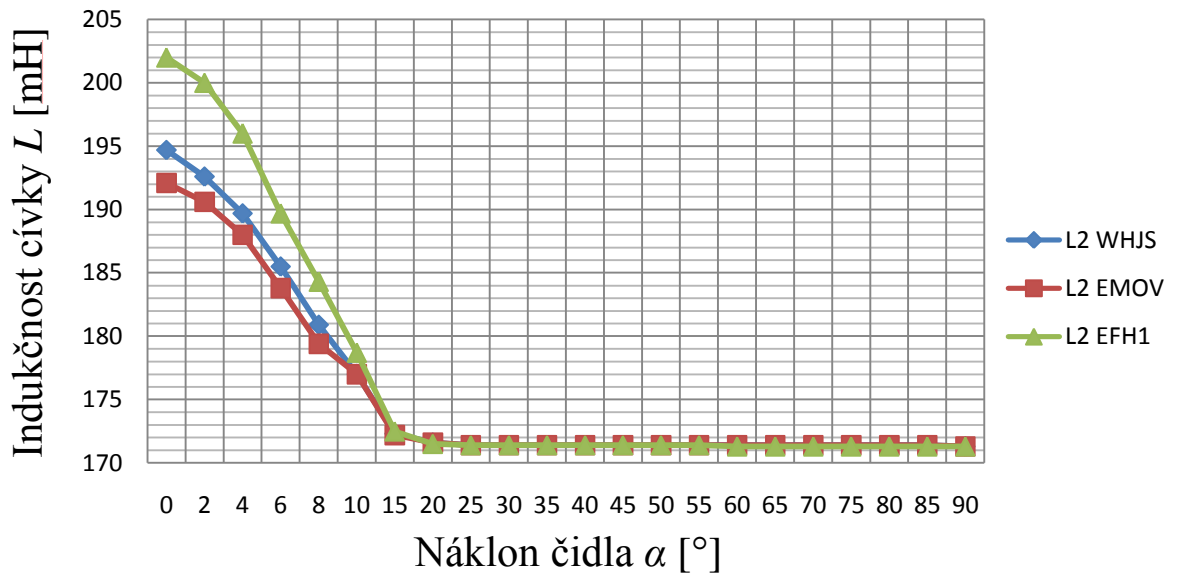
Tab. 7.3 Naměřených hodnot při měření různých kapalin WHJS1-B a EMOVENDO

Fero-fluid	WHJS1-B	6 [ml]			Fero-fluid	EMO-VENDO	6 [ml]		
úhel [°]	$L_1$ [mH]	$L_2$ [mH]	$\Delta L_1$ [mH/°]	$\Delta L_2$ [mH/°]	úhel [°]	$L_1$ [mH]	$L_2$ [mH]	$\Delta L_1$ [mH/°]	$\Delta L_2$ [mH/°]
0	204,5	194,7	0,75	1,05	0	201,7	192,1	1,15	0,75
2	206	192,6	1,75	1,45	2	204	190,6	1	1,3
4	209,5	189,7	2	2,1	4	206	188	2	2,1
6	213,5	185,5	2,25	2,3	6	210	183,8	1,8	2,2
8	218	180,9	1,85	1,95	8	213,6	179,4	1,95	1,2
10	221,7	177	1,32	0,94	10	217,5	177	1,1	0,96
15	228,3	172,3	0,4	0,14	15	223	172,2	0,6	0,12
20	230,3	171,6	0,34	0,04	20	226	171,6	0,3	0,04
25	232	171,4	0,1	0	25	227,5	171,4	0,14	0
30	232,5	171,4	0	0	30	228,2	171,4	0	0
35	232,5	171,4	0	0	35	228,2	171,4	0	0
40	232,5	171,4	0	0	40	228,2	171,4	0	0
45	232,5	171,4	0,1	0	45	228,2	171,4	0,1	0
50	233	171,4	0	0	50	228,7	171,4	0	0
55	233	171,4	0	0	55	228,7	171,4	0,06	0
60	233	171,4	0	0	60	229	171,4	0	0
65	233	171,4	0	0	65	229	171,4	0	0
70	233	171,4	0	0	70	229	171,4	0	0
75	233	171,4	0	0	75	229	171,4	0	0
80	233	171,4	0	0	80	229	171,4	0	0
85	233	171,4	0,1	0,02	85	229	171,4	0,04	0,02
90	233,5	171,3			90	229,2	171,3		

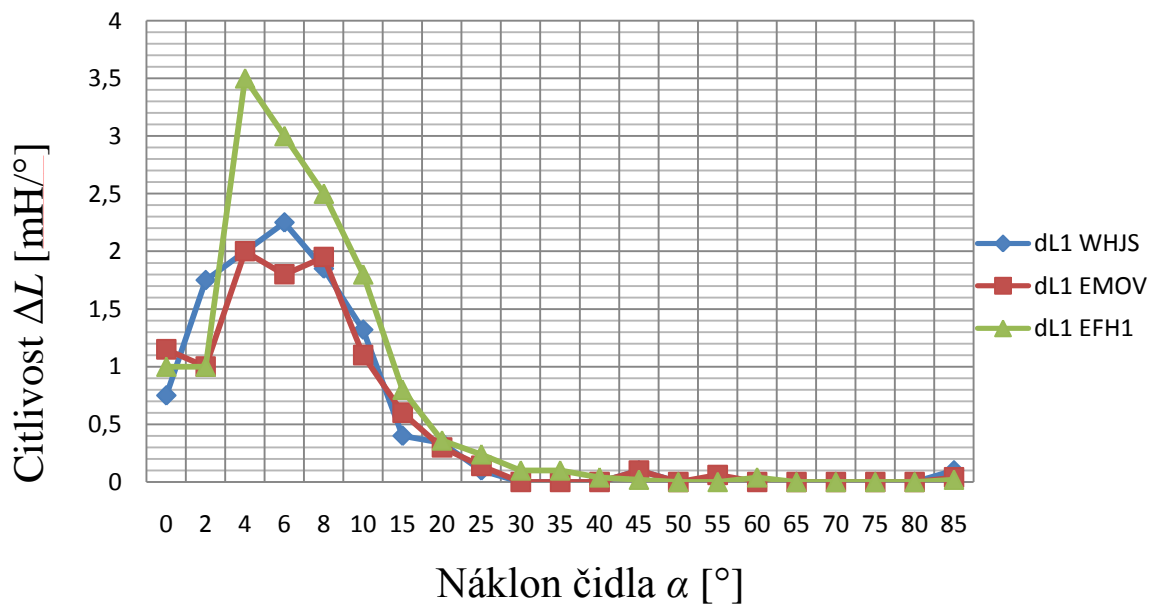


Obr. 7.5 Závislost indukčnosti první cívky na náklonu senzoru při různých kapalinách

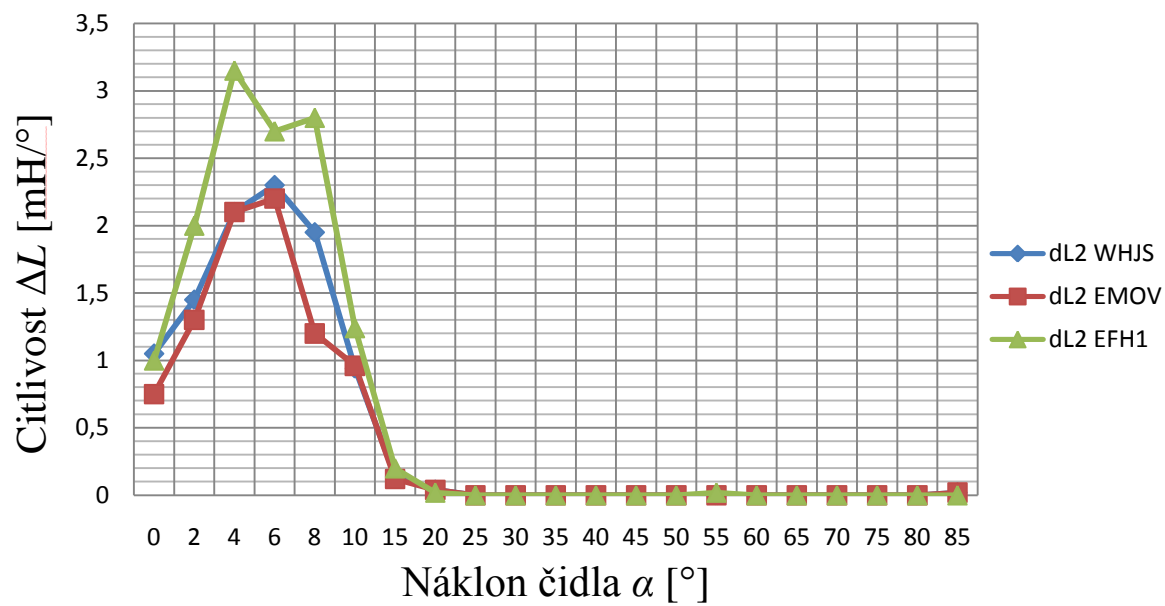




Obr. 7.6 Závislost indukčnosti druhé cívky na náklonu senzoru při různých kapalinách



Obr. 7.7 Závislost změny indukčnosti první cívky na náklonu senzoru při různých kapalinách

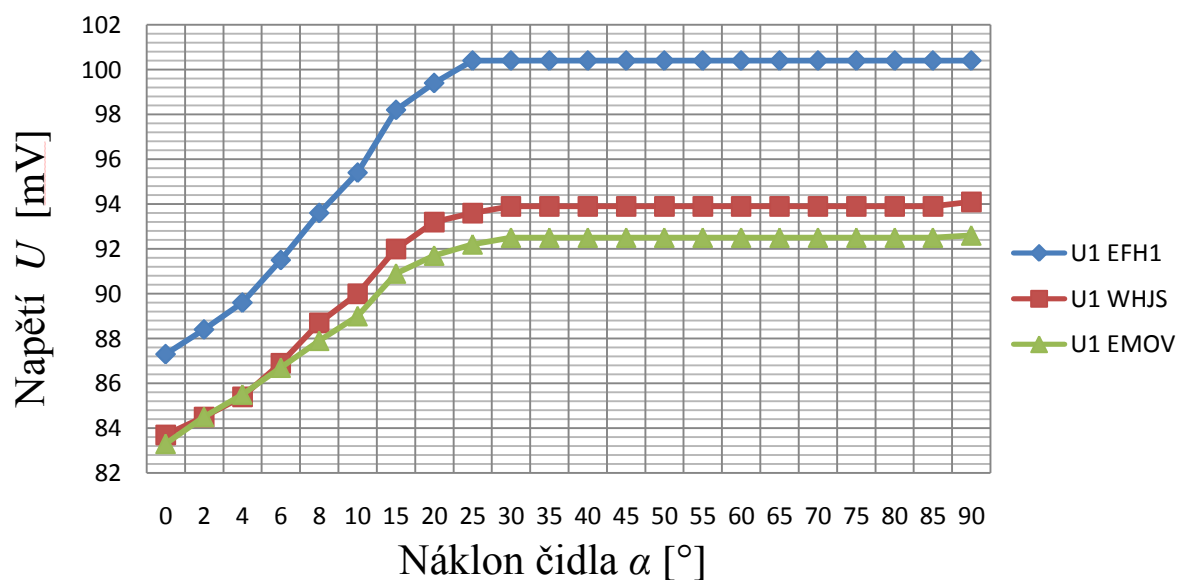


Obr. 7.8 Závislost změny indukčnosti druhé cívky na náklonu senzoru při různých kapalinách

**Příloha C – Měření s budicí cívkou**

Tab. 7.4 Naměřených hodnot při měření s budicí cívkou EFH1 a WHJS1-B

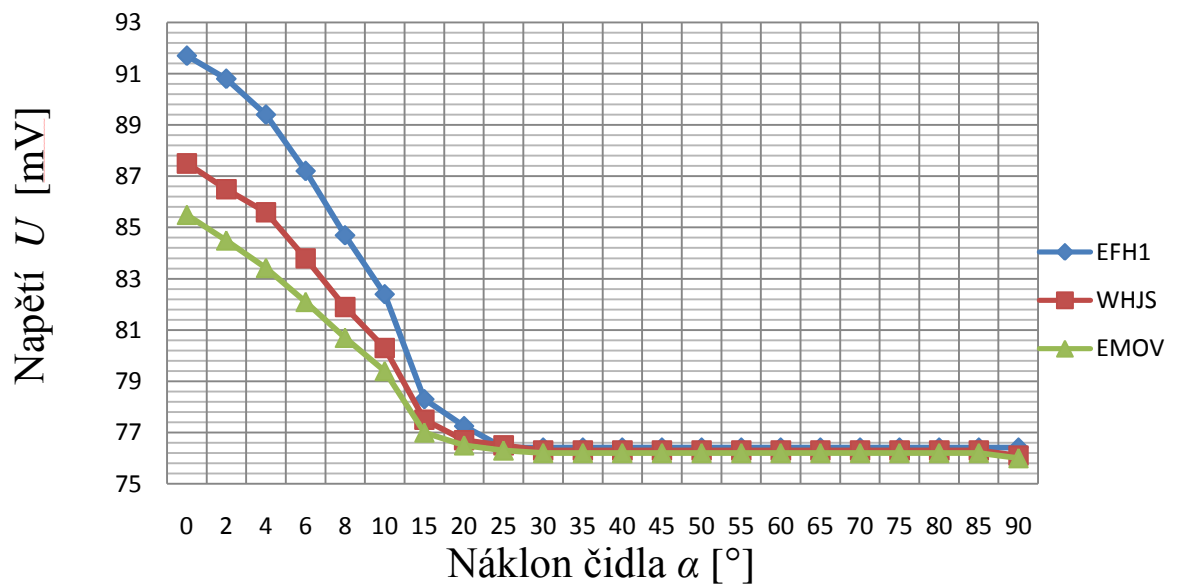
EFH1					WHJS1-B				
úhel [°]	$U_1$ [mV]	$U_2$ [mV]	$\Delta U_1$ [mV/°]	$\Delta U_2$ [mV/°]	úhel [°]	$U_1$ [mV]	$U_2$ [mV]	$\Delta U_1$ [mV/°]	$\Delta U_2$ [mV/°]
0	87,3	91,7	0,55	0,45	0	83,7	87,5	0,4	0,5
2	88,4	90,8	0,6	0,7	2	84,5	86,5	0,45	0,45
4	89,6	89,4	0,95	1,1	4	85,4	85,6	0,75	0,9
6	91,5	87,2	1,05	1,25	6	86,9	83,8	0,9	0,95
8	93,6	84,7	0,9	1,15	8	88,7	81,9	0,65	0,8
10	95,4	82,4	0,56	0,82	10	90	80,3	0,4	0,56
15	98,2	78,3	0,24	0,21	15	92	77,5	0,24	0,16
20	99,4	77,25	0,2	0,168	20	93,2	76,7	0,08	0,04
25	100,4	76,41	0	0	25	93,6	76,5	0,06	0,04
30	100,4	76,41	0	0	30	93,9	76,3	0	0
35	100,4	76,41	0	0	35	93,9	76,3	0	0
40	100,4	76,41	0	0	40	93,9	76,3	0	0
45	100,4	76,41	0	0	45	93,9	76,3	0	0
50	100,4	76,41	0	0	50	93,9	76,3	0	0
55	100,4	76,41	0	0	55	93,9	76,3	0	0
60	100,4	76,41	0	0	60	93,9	76,3	0	0
65	100,4	76,41	0	0	65	93,9	76,3	0	0
70	100,4	76,41	0	0	70	93,9	76,3	0	0
75	100,4	76,41	0	0	75	93,9	76,3	0	0
80	100,4	76,41	0	0	80	93,9	76,3	0	0
85	100,4	76,41	0	0	85	93,9	76,3	0,04	0,04
90	100,4	76,41			90	94,1	76,1		



Obr. 7.9 Závislost napětí první cívky na náklonu senzoru

Tab. 7.5 Naměřených hodnot při měření s budicí cívkou EMOVENDO

úhel [°]	$U_1$ [mV]	$U_2$ [mV]	$\Delta U_1$ [mV/°]	$\Delta U_2$ [mV/°]
0	83,3	85,5	0,6	0,5
2	84,5	84,5	0,5	0,54
4	85,5	83,42	0,6	0,66
6	86,7	82,1	0,6	0,7
8	87,9	80,7	0,55	0,65
10	89	79,4	0,38	0,48
15	90,9	77	0,16	0,1
20	91,7	76,5	0,1	0,04
25	92,2	76,3	0,06	0,02
30	92,5	76,2	0	0
35	92,5	76,2	0	0
40	92,5	76,2	0	0
45	92,5	76,2	0	0
50	92,5	76,2	0	0
55	92,5	76,2	0	0
60	92,5	76,2	0	0
65	92,5	76,2	0	0
70	92,5	76,2	0	0
75	92,5	76,2	0	0
80	92,5	76,2	0	0
85	92,5	76,2	0,02	0,04
90	92,6	76		



Obr. 7.10 Závislost napětí druhé cívky na náklonu senzoru

**Příloha D – simulace***Tab. 7.6 Srovnání výsledků simulace s naměřenými hodnotami*

naplnění/buzená cívka	Indukčnosti při permeabilitě $\mu_r$ [mH]			naměř. hod.
	$\mu_r = 2,3$	$\mu_r = 2,7$	$\mu_r = 3$	
4 ml / u mag. kap	215	225	231,6	236
4 ml / mimo mag. kap	171,9	171,9	171,9	171,4
6 ml / u mag. kap	229,4	241,2	250,8	248
6 ml / mimo mag. kap	172,8	172	172	171
10 ml / u mag. kap	229,6	244,6	255	254,6
10 ml / mimo mag. kap	180,4	182,3	183,5	174,9
12 ml / u mag. kap	229,8	255,2	244,8	255,1
12 ml / mimo mag. kap	202,8	215	210	190,9