

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**  
**KATEDRA MĚŘENÍ**



**Aktivní systém pro detekci kovových předmětů**

**Active metal detector system**

Bakalářská práce

Studijní program: Kybernetika a robotika

Studijní obor: Systémy a řízení

Vedoucí práce: Ing. Michal Janošek, Ph.D.

**Lukáš Pavelka**  
**Praha 2017**



České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická  
katedra řídicí techniky

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Pavelka Lukáš**

Studijní program: Kybernetika a robotika  
Obor: Systémy a řízení

Název tématu: **Aktivní systém pro detekci kovových předmětů**

Pokyny pro vypracování:

1. Navrhněte a realizujte systém pro detekci kovových předmětů s využitím rámové budicí cívky a indukčních senzorů.
2. Návrh budicí cívky optimalizujte dle zadaných parametrů (ztrátový výkon, rozměry ad.).
3. Indukční senzor navrhněte s feromagnetickým jádrem, vypočítejte a ověřte jeho parametry.
4. Navržený senzor integrujte do detekčního systému, soustřeďte se na dosažení vysoké detekční citlivosti.

Seznam odborné literatury:

- [1] Ripka, P. (ed.): Magnetic Sensors and Magnetometers. Artech House Publishers, 2001
- [2] Minohledačka s AMR gradiometry. Jan Vyhnánek, diplomová práce ČVUT FEL, 2011
- [3] Metal detector for visualization of concealed construction structures, Jan Vyhnánek et. al., EMSA conference, 2014

Vedoucí: Ing. Michal Janošek, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2017/2018

L.S.

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.

vedoucí katedry

Děkan

V Praze dne 30. 1. 2017

**Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Říčanech, 22. 5. 2017

Lukáš Pavelka

## **Poděkování**

Mé díky patří vedoucímu práce Ing. Michalu Janoškovi, Ph.D. za odborné vedení, věcné připomínky, a velkou vstřícnost při konzultacích.

Taktéž bych rád poděkoval rodině a přátelům za podporu a trpělivost.

## **Anotace**

Tato práce popisuje návrh a realizaci aktivního systému pro detekci kovových předmětů. Systém se skládá z rámové budicí cívky generující střídavé magnetické pole a indukčních senzorů s feromagnetickým jádrem. Všechny části systému byly v rámci práce navrženy, optimalizovány a následně realizovány.

Vyrobená budicí cívka je dostatečně robustní pro vyšší budicí proudy, než bývá u detektorů obvyklé, a její velké rozměry umožňují snazší mapování rozsáhlejších prostorů. Vytvořené indukční senzory dosahují téměř dvacetinásobné citlivosti oproti senzorům AMR. Dílčí části byly integrovány do detekčního systému s laboratorními přístroji a celý systém byl otestován.

## **Klíčová slova**

budicí cívka, indukční senzor, feromagnetické jádro, vysoká citlivost

## **Annotation**

This thesis describes design and implementation of active metal detector system. The system contains excitation coil creating AC magnetic field and induction sensors with ferromagnetic core. All parts of system were optimized.

Current through excitation coil can be greater than usual, thanks to large dimensions of coil. Greater dimension of coil also allows faster mapping of larger spaces. Sensitivity of induction sensors is twenty times greater than sensitivity of AMR sensors. Excitation coil and sensors were implemented to the detection system and testing measures were run.

## **Keywords**

excitation coil, induction sensor, ferromagnetic core, high sensitivity

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>9</b>
1.1	Princip detekce kovového předmětu . . . . .	9
1.2	Gradiometr s budicí cívkou - existující řešení . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Vlastní řešení</b>	<b>11</b>
2.1	Budicí cívka . . . . .	11
2.1.1	Zadané parametry cívky . . . . .	11
2.1.2	Simulace a optimalizace budicí cívky . . . . .	12
2.1.2.1	Optimalizační kritéria . . . . .	12
2.1.2.2	Optimalizační algoritmus . . . . .	12
2.1.2.3	Výpočet parametrů cívky . . . . .	13
2.1.2.4	Optimalizační aplikace . . . . .	16
2.1.3	Realizace vybrané cívky . . . . .	17
2.1.3.1	Parametry cívky určené optimalizací . . . . .	17
2.1.3.2	Návrh rámu cívky . . . . .	17
2.1.3.3	Konstrukce cívky . . . . .	18
2.1.4	Skutečné parametry budicí cívky . . . . .	19
2.1.5	Porovnání předpokládaných a reálných parametrů . . . . .	21
2.2	Indukční senzory . . . . .	23
2.2.1	Návrh a optimalizace . . . . .	23
2.2.1.1	Požadované parametry . . . . .	23
2.2.1.2	Výpočet indukovaného napětí . . . . .	24
2.2.1.3	Výpočet dalších parametrů senzoru . . . . .	26
2.2.1.4	Zvolené a vypočtené parametry senzoru . . . . .	26
2.2.2	Realizace . . . . .	27
2.2.2.1	Výroba senzoru . . . . .	27
2.2.2.2	Kompenzační vinutí . . . . .	27
2.2.2.3	Fixace senzoru . . . . .	27
2.2.3	Měření parametrů senzoru . . . . .	28
2.2.3.1	Indukčnost . . . . .	28
2.2.3.2	Měření rezonanční frekvence . . . . .	28
2.2.3.3	Vlastní rezonanční frekvence senzoru . . . . .	29
2.2.4	Porovnání předpokládaných a skutečných parametrů . . . . .	30
2.2.4.1	Indukované napětí . . . . .	30
2.2.4.2	Porovnání citlivosti senzoru s AMR KMZ51 . . . . .	31
2.3	Detekční systém . . . . .	32
2.3.1	Popis detekčního systému . . . . .	32
2.3.1.1	Použité vybavení . . . . .	32
2.3.1.2	Zapojení . . . . .	32
2.3.2	Umístění indukčních senzorů . . . . .	33
2.3.2.1	Popis možných umístění senzorů . . . . .	33
2.3.2.2	Analýza umístění senzorů . . . . .	34
2.3.2.3	Měření indukovaného napětí při různých umístěních senzorů . . . . .	35
2.3.2.4	Zvolené umístění senzorů . . . . .	36
2.3.3	Testování detekční citlivosti . . . . .	37
2.3.3.1	Vysvětlení měřeného průběhu . . . . .	38
2.3.3.2	Měřené vzorky . . . . .	39

2.3.3.3	Naměřená data . . . . .	40
2.3.3.4	Stabilita signálu a fixace senzorů . . . . .	41
2.3.4	Analýza detekčního systému s kompenzací . . . . .	42
2.3.4.1	Návrh modelu detekčního systému . . . . .	42
2.3.4.2	Simulace . . . . .	44
2.3.4.3	Výsledky simulace . . . . .	46
2.3.4.4	Zamýšlené zapojení . . . . .	47
<b>3</b>	<b>Závěr</b>	<b>49</b>
<b>4</b>	<b>Zdroje a použitá literatura</b>	<b>50</b>
<b>5</b>	<b>Seznam obrázků a tabulek</b>	<b>51</b>



# 1 Úvod

Detekce kovů v půdě, zejména nevybuchlé munice či jiných nebezpečných předmětů, je velmi důležitým tématem týkajícím se nejenom zemí, ve kterých aktuálně probíhají válečné konflikty. Vyhledávání těchto předmětů je potřebné taktéž v lokalitách, kde ozbrojený konflikt již skončil a dochází k obnově, či při zpřístupňování bývalých vojenských prostor veřejnosti. Detekce kovů je nezbytná také při téměř všech rozsáhlejších zemních pracích.

Cílem této bakalářské práce je vyvinout detekční systém skládající se z rámové budicí cívky generující střídavé magnetické pole a indukčních senzorů s feromagnetickým jádrem. Systém bude optimalizován za účelem dosažení vysoké detekční citlivosti.

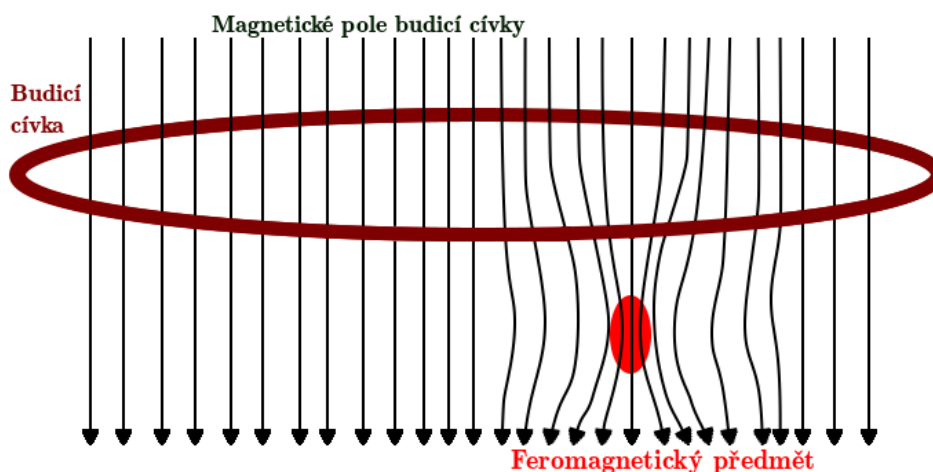
Velký rozměr budicí cívky umožní fungování při větších proudcích tekoucí cívkou, než bývá u detektorů obvyklé, čímž se zvýší intenzita budicího pole a bude možné detekovat vzdálenější kovové předměty.

Další výhodou plynoucí z rozměrů budicí cívky je zvětšení plochy, kterou detekční systém pokrývá, což usnadní mapování rozsáhlejších prostorů.

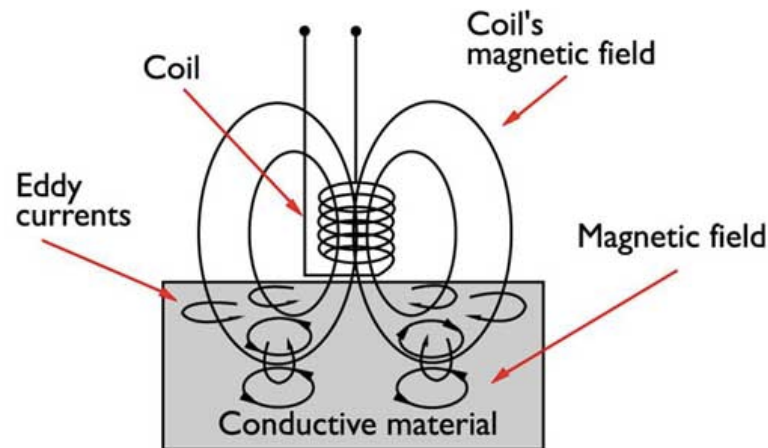
## 1.1 Princip detekce kovového předmětu

Princip detekce je založen na detekci změny magnetického pole způsobené interakcí pole s kovovými předměty do něj vloženými.

Střídavý elektrický proud tekoucí budicí cívkou generuje časově proměnné primární magnetické pole. Pokud do primárního pole umístíme vodivý předmět, dojde k řadě efektů v závislosti na vlastnostech předmětu. Předmět z feromagnetického materiálu způsobí deformaci okolního magnetického pole. Pokud se jedná o elektricky vodivý předmět, působením magnetického pole dojde ke vzniku vířivých proudů uvnitř předmětu. Vířivé proudy vytvářejí vlastní sekundární magnetické pole, které následně ovlivňuje pole primární.



Obrázek 1: Princip detekce kovového předmětu - feromagnetický předmět.

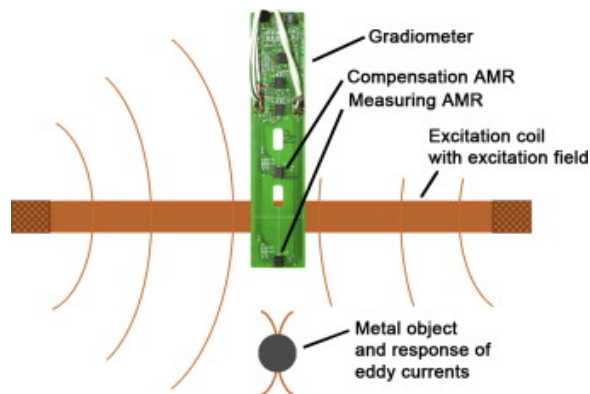


Obrázek 2: Princip detekce kovového předmětu - vznik vířivých proudů; převzato z [8].

Oba efekty působí na primární magnetické pole generované budicí cívkou a deformují ho. Tyto deformace jsou detekovány pomocí indukčního senzoru jako změny indukovaného napětí.

## 1.2 Gradiometr s budicí cívkou - existující řešení

Tato bakalářská práce vychází z diplomové práce Ing. Jana Vyhnánka [2], která řešila použití budicí cívkou a senzorů AMR pro detekci kovových předmětů, především nevybuchlé munice. Cílem je tuto práci rozvinout a navrhnout detekční systém poskytující vyšší detekční citlivost.



Obrázek 3: Princip funkce detektoru s AMR senzorem, převzato z [3].

Za účelem dosažení vyšší detekční citlivosti budou namísto AMR senzorů použity senzory indukční, které jsou ve střídavém poli citlivější.

## 2 Vlastní řešení

V této části práce je popsán návrh a realizace jednotlivých částí detekčního systému, tedy budicí cívky a indukčních senzorů s feromagnetickým jádrem, a jejich následná integrace do systému.

### 2.1 Budicí cívka

Budicí cívka byla zamýšlena jako obdélníková cívka s předem specifikovanými parametry. Cílem bylo optimalizovat tloušťku použitého drátu a počet závitů cívky za účelem dosažení co nejlepších vlastností a současného splnění nastavených kritérií.

#### 2.1.1 Zadané parametry cívky

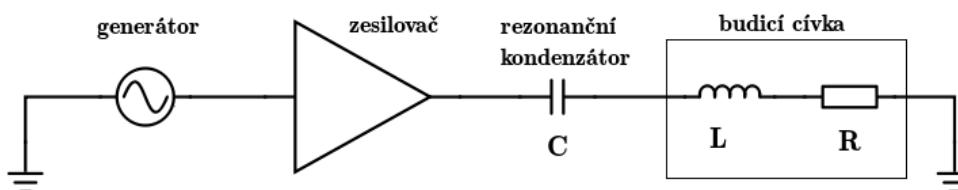
Výchozí požadavky pro konstruovanou budicí cívku byly následující:

- Obdélníková cívka bude mít rozměry přibližně 1000 mm (strana a) a 100 mm (strana b), viz obrázek 5.
- Půjde o sériový rezonanční obvod (z důvodů nižších nároků na napětí na zesilovači).
- Frekvence budicího pole bude 1 kHz.
- Drát vinutí cívky bude buď hliníkový, nebo měděný.

Předem byly taktéž stanoveny požadavky na vlastnosti budicí cívky při napájení ze zdroje napětí o velikosti  $U_{pp} = 35 \text{ V}$ :

- Velikost magnetické indukce  $B_O$  ve středu cívky by měla být nejméně 6 mT (efektivní hodnota).
- Výkon  $P_{max}$  na cívce by neměl přesáhnout 200 W (efektivní hodnota).
- Napětí  $U_C$  na rezonančním kondenzátoru by nemělo přesáhnout 1 kV (efektivní hodnota).

Sledován měl být taktéž odpor cívky  $R_{LDC}$  a indukčnost cívky  $L$ , aby mohla být vhodně nastavena kapacita  $C$  rezonančního kondenzátoru.



Obrázek 4: Náhradní schéma rezonančního obvodu budicí cívky.

### 2.1.2 Simulace a optimalizace budicí cívky

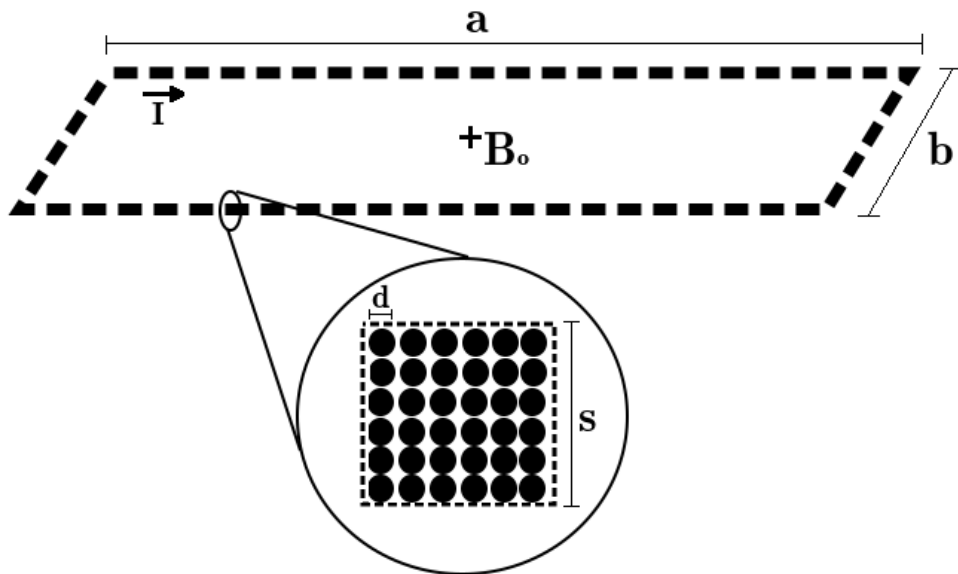
Za účelem zvolení nejlepší kombinace tloušťky drátu a počtu závitů bylo provedeno množství simulací. K vypočtení parametrů cívky pro danou kombinaci vstupů (tloušťka drátu  $d$  a počet závitů  $n$ ) byl použit MATLAB.

Pro zvolení nejlepší kombinace byla v MATLABu vytvořena optimalizační aplikace, která jednotlivé simulace provedla, podle zadaných optimalizačních kritérií vyřadila všechna nevyhovující řešení a následně vybrala nejlepší řešení splňující nastavené požadavky.

#### 2.1.2.1 Optimalizační kritéria

Zvolená prvotní optimalizační kritéria byla následující:

- $B_{min} = 6 \text{ mT}$  ... minimální efektivní hodnota magnetická indukce ve středu cívky
- $P_{max} = 200 \text{ W}$  ... maximální výkon na cívce (efektivní hodnota)
- $U_{Cmax} = 1 \text{ kV}$  ... maximální napětí na rezonančním kondenzátoru (efektiv. hodnota)
- $s_{max} = 20 \text{ mm}$  ... maximální velikost průřezu cívkou



Obrázek 5: Nákres budicí cívky s popisem geometrických parametrů.

#### 2.1.2.2 Optimalizační algoritmus

Optimalizační algoritmus byl navržen tak, aby našel kombinaci tloušťky drátu a počtu závitů, při které budou splněna všechna kritéria a zároveň bude indukce ve středu cívky  $B_0$  největší a velikost průřezu cívkou  $s$  co nejmenší.

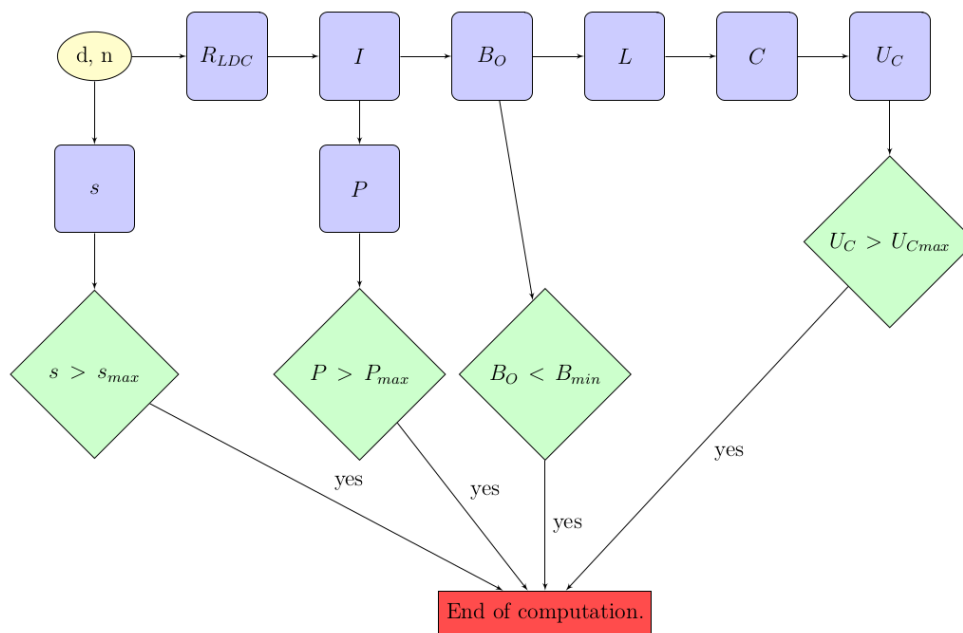
V každém kroku simulace byl proveden výpočet parametrů cívky.

Vstupem tohoto výpočtu je dvojice proměnných (tloušťka drátu  $d$  a počet závitů  $n$ ) a množství konstant - optimalizační kritéria ( $B_{min}$ ,  $P_{max}$ ,  $U_{Cmax}$ ,  $s_{max}$ ), simulační rozsah proměnných ( $d_{min}$ ,  $d_{max}$ ,  $n_{min}$ ,  $n_{max}$ ), materiálové konstanty (elektrická vodivost, relativní permeabilita a hustota) a geometrické parametry cívky (šířka a délka).

Výstupem jsou parametry cívky - magnetická indukce ve středu cívky  $B_O$ , velikost průřezu cívkou  $s$ , výkon na cívce  $P$ , proud tekoucí cívkou  $I$ , indukčnost cívky  $L$ , velikost rezonančního kondenzátoru  $C$  a napětí na rezonančním kondenzátoru  $U_C$ .

### 2.1.2.3 Výpočet parametrů cívky

Průběh výpočtu je znázorněn na obrázku 6. Krok *End of computation* značí ukončení jednoho kroku simulace z důvodu nesplnění optimalizačních kritérií.



Obrázek 6: Průběh výpočtu parametrů cívky.

Ze vstupních argumentů  $d$  a  $n$  (průměru drátu a počtu závitů) je nejprve vypočten průřez cívky:

$$s = k_s \cdot \sqrt{n \cdot d^2} \quad (1)$$

Hodnota  $s$  je násobena koeficientem  $k_s = 1.25$  (koeficient určen na základě měření a odhadu), neboť se jedná o vzorec platící v případě ideálně navinuté cívky s plnicím faktorem  $k = 1$ , čehož při realizaci nebude možné dosáhnout vlivem mezer mezi závitů a tento parametr bude nutně horší.

Následně je spočten elektrický odpor cívky:

$$R_{LDC} = \frac{n \cdot \rho \cdot 2(a+b)}{\pi \cdot (d/2)^2} \quad (2)$$

kde  $\rho$  je elektrická vodivost drátu,  $a$  výška cívky,  $b$  šířka cívky,  $d$  průměr drátu a  $n$  počet závitů.

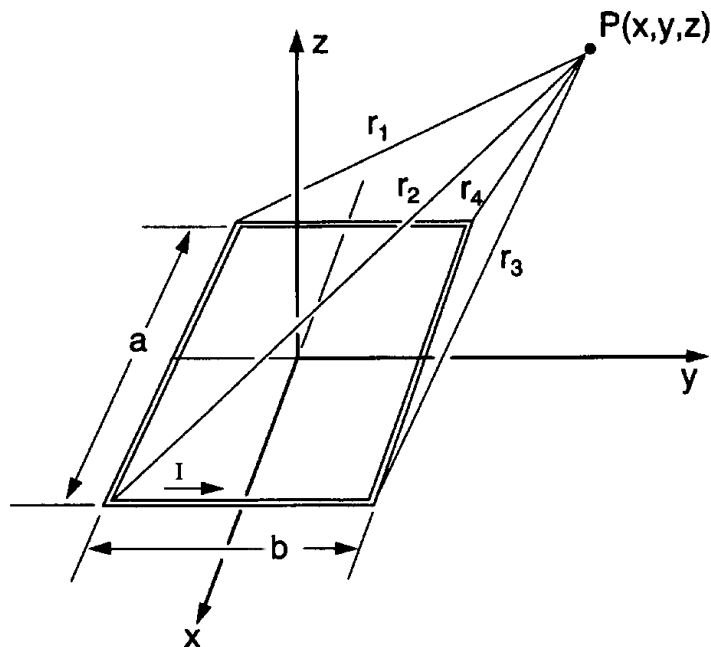
Pomocí hodnoty odporu cívky a zadaného budicího napětí  $U_{pp}$  vypočteme efektivní hodnotu proudu tekoucího cívkou:

$$I = \frac{U_{ef}}{R_{LDC}} = \frac{U_{pp}}{\sqrt{2} \cdot R_{LDC}} \quad (3)$$

a následně pomocí vztahu (3) získáme výkon v závislosti na proudu cívkou. Tento vzorec je platný pouze v případě sériové rezonance LC obvodu:

$$P = U_{ef} \cdot I = R_{LDC} \cdot I^2 \quad (4)$$

K výpočtu magnetické indukce ve středu cívky využijeme postupu uvedeného v [4], který umožňuje zjistit velikost magnetické indukce v libovolném bodě. Střed cívky si pro zjednodušení výpočtu zdefinujeme jako počátek souřadného systému, tedy bod  $[0, 0, 0]$ .



Obrázek 7: Geometrie při výpočtu magnetické indukce cívky v bodě P; převzato z [4].

Složku indukce ve směru osy  $z$   $B_z$  vypočteme podle [4]:

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \sum_{i=1}^4 \left[ \frac{(-1)^i D_i}{r_i [r_i + (-1)^{i+1} C_i]} - \frac{C_i}{r_i [r_i + D_i]} \right] \quad (5)$$

kde

$$C_1 = -C_4 = \frac{a}{2} + x \quad D_1 = D_2 = y + \frac{b}{2}$$

$$C_2 = -C_3 = \frac{a}{2} - x \quad D_3 = D_4 = y - \frac{b}{2}$$

$$r_1 = \sqrt{C_1^2 + D_1^2 + z^2}$$

$$r_2 = \sqrt{C_2^2 + D_1^2 + z^2}$$

$$r_3 = \sqrt{C_2^2 + D_3^2 + z^2}$$

$$r_4 = \sqrt{C_1^2 + D_3^2 + z^2}$$

Zbývající složky vektoru magnetické indukce vypočteme jako:

$$B_y = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \sum_{i=1}^4 \left[ \frac{(-1)^{i+1} z}{r_i [r_i + (-1)^{i+1} C_i]} \right] \quad (6)$$

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \sum_{i=1}^4 \left[ \frac{(-1)^{i+1} z}{r_i [r_i + D_i]} \right] \quad (7)$$

Pomocí vektorových složek (5), (6) a (7) získáme skalární hodnotu magnetické indukce:

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (8)$$

Indukčnost budicí cívky vypočteme podle vzorce z [5]:

$$L = k_L \cdot n^2 \frac{\mu_0 \mu_r}{\pi} \left[ -2(a+b) + 2\sqrt{a^2 + b^2} - b \ln \frac{b + \sqrt{b^2 + a^2}}{a} - a \ln \frac{a + \sqrt{b^2 + a^2}}{b} + b \ln \frac{2b}{d/2} + a \ln \frac{2a}{d/2} \right] \quad (9)$$

Tento vzorec platí pro ideálně navinutou cívku s těsnými vazbami mezi závitů. Proto je do výpočtu přidána konstanta  $k_L = 0.75$  (koeficient  $k_L$  byl určen na základě odhadu).

Pomocí indukčnosti cívky získané z (9) vypočteme požadovanou kapacitu rezonančního kondenzátoru:

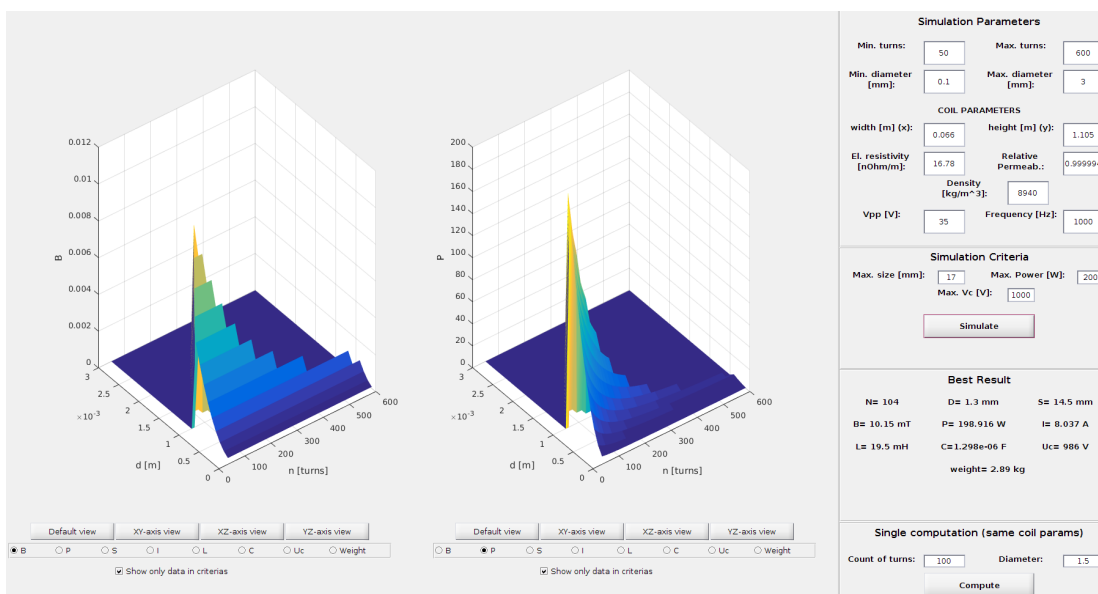
$$C = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot L} \quad (10)$$

a velikost napětí na kondenzátoru:

$$U_c = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (11)$$

## 2.1.2.4 Optimalizační aplikace

Optimalizační aplikace vytvořená v MATLABu využívá výše popsaný algoritmus a matematický aparát pro výpočet parametrů cívky a umožňuje uživateli snadnou změnu vstupních parametrů a optimalizačních kritérií.



Obrázek 8: Grafické rozhraní optimalizační aplikace.



### 2.1.3 Realizace vybrané cívky

Po odladění optimalizačního algoritmu a aplikace, korekci optimalizačních kritérií a přihlednutí k dostupnému materiálu byla zvolena varianta budicí cívky určená k realizaci.

#### 2.1.3.1 Parametry cívky určené optimalizací

Optimalizačním algoritmem byly vypočteny následující parametry zvolené budicí cívky. Jako výrobní materiál byla zvolena měď (elektrická vodivost  $\rho = 16.8 \text{ n}\Omega/\text{m}$ , relativní permeabilita  $\mu_r \approx 1$ ). Hodnoty jsou uvažovány při napájení cívky ze zdroje napětí o hodnotě  $U_{pp} = 35 \text{ V}$ .

Parametr	Hodnota
$a$ ... délka cívky (vnitřní rozměr)	1105 mm
$b$ ... šířka cívky (vnitřní rozměr)	66 mm
$s$ ... velikost průřezu cívkou	17.5 mm
$d$ ... tloušťka drátu	1.4 mm
$n$ ... počet závitů	100
$B_O$ ... magnetická indukce ve středu cívky	8.8 mT
$L$ ... indukčnost cívky	17.1 mH
$R_{LDC}$ ... odpor cívky	2.64 $\Omega$
$P$ ... výkon na cívce	232 W
$U_c$ ... napětí na kondenzátoru	915 V
$k_B$ ... koeficient cívky v jejím středu	0.94 mT/A

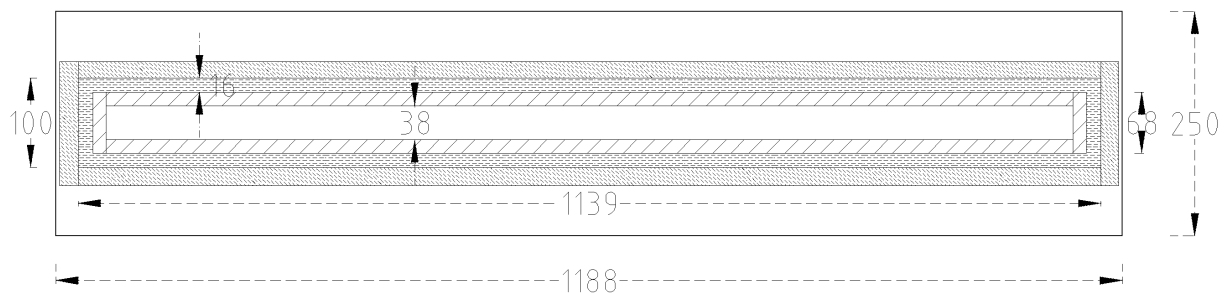
Tabulka 1: Parametry cívky určené optimalizací.

V tabulce je pro větší názornost uveden i koeficient cívky v jejím středu  $k_B = \frac{B_O}{I}$ . Pro rezonanci na frekvenci  $f_0 = 1000 \text{ Hz}$  bude třeba k cívce s výše uvedenými parametry připojit do série rezonanční kondenzátor o kapacitě  $C = 1.48 \text{ }\mu\text{F}$ .

#### 2.1.3.2 Návrh rámu cívky

Před samotným navinutím budicí cívky bylo třeba navrhnout rám, který by cívku držel během navíjení.

Aby bylo dosaženo dostatečné pevnosti a stability rámu, byla zvolena varianta sestávající z dřevěné desky, na kterou měly být přikolíčkovány a přilepeny latě rámu.



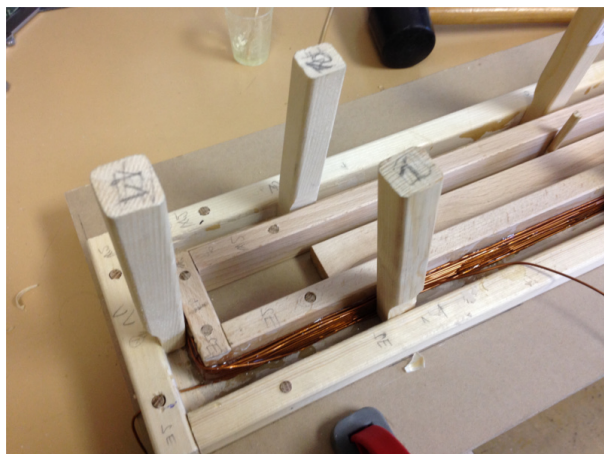
Obrázek 9: Návrh rámu cívky, rozměry jsou v mm.

Jako materiál desky byla zvolena silná dřevotřísková deska, pro samotný rám byly vybrány hoblované latě.

### 2.1.3.3 Konstrukce cívky

Prvním krokem při konstrukci cívky bylo sestavení rámu sloužícího k držení cívky během navíjení a zalévání do epoxidu.

Následovalo postupné navíjení 10 vrstev drátu (v každé 10 závitů). Každá dokončená vrstva byla zalita epoxidem.



Obrázek 10: Navíjení a lepení závitů.



Obrázek 11: Rozšiřování prostoru pro cívku.

Kvůli zvětšení průřezu cívky v důsledku nedokonalého navíjení bylo třeba rozšířit prostor mezi vnitřním a vnějším rámem. Kompletně navinutá budicí cívka byla celá zalita do epoxidu.



Obrázek 12: Hotová budicí cívka před zalitím do epoxidu.



Obrázek 13: Detail budicí cívky před zalitím do epoxidu.

### 2.1.4 Skutečné parametry budicí cívky

Hotová budicí cívka byla podrobena ověřujícím měření za účelem zjištění skutečných hodnot dříve vypočtených parametrů.

Měření byly ověřeny hodnoty odporu cívky, indukčnosti, magnetické indukce i geometrické parametry jako rozměr průřezu cívky.

Parametr	Hodnota
$s$ ... velikost průřezu cívky	20 mm
$R_{LDC}$ ... odpor cívky	2.85 $\Omega$
$L$ ... indukčnost cívky	10.84 mH
$B_o$ ... magnetická indukce ve středu cívky	2.7 mT
$k_B$ ... koeficient cívky v jejím středu	0.9 mT/A

Tabulka 2: Skutečné parametry cívky

Hodnoty odporu  $R_{LDC}$  a indukčnosti  $L$  cívky byly měřeny pomocí LCR metru *Hewlett Packard 4263B* při frekvenci  $f = 1000$  Hz a napětí 1 V.

Následně byla z indukčnosti  $L$  vypočtena velikost potřebného rezonančního kondenzátoru pro rezonanci na frekvenci 1 kHz. Kondenzátor o kapacitě  $C = 2.34 \mu\text{F}$  a odpovídajících výkonových vlastnostech ovšem nebyl dostupný, a proto byl zvolen kondenzátor o kapacitě  $C = 3 \mu\text{F} \pm 8\%$ . Tento kondenzátor byl vytvořen paralelním zapojením dvou kondenzátorů o kapacitách  $C_1 = 1 \mu\text{F} \pm 3\%$  (nejvyšší povolené AC napětí 2.1 kV) a  $C_2 = 2 \mu\text{F} \pm 10\%$  (nejvyšší povolené AC napětí 4 kV).

Rezonanční frekvence cívky se použitím tohoto kondenzátoru posunula na  $f_0 = 910$  Hz

Velikost magnetické indukce ve středu cívky byla měřena pomocí Hallovy sondy připojené ke Gaussmetru *LakeShore 450*. Cívka byla napájena ze zdroje střídavého napětí značeného  $U_{ef} = 12$  V. Frekvence zdroje byla  $f = 50$  Hz. Efektivní hodnota proudu tekoucího cívku byla změřena jako  $I_{ef} = 3$  A.

Pokud provedeme ověřující výpočet, zjistíme, že napětí muselo být ve skutečnosti vyšší, než bylo na zdroji značeno:

$$U = I \cdot |Z| = I \sqrt{X_L^2 + R_{LDC}^2} = I \sqrt{(2\pi f L)^2 + R_{LDC}^2} = 3 \cdot 4.44 \text{ V} = 13.32 \text{ V} \quad (12)$$

### Dosažená homogenita magnetické indukce

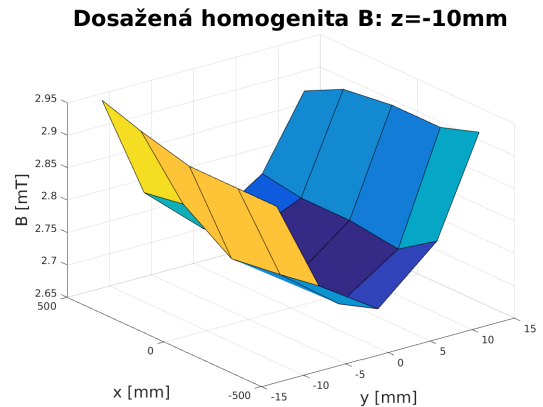
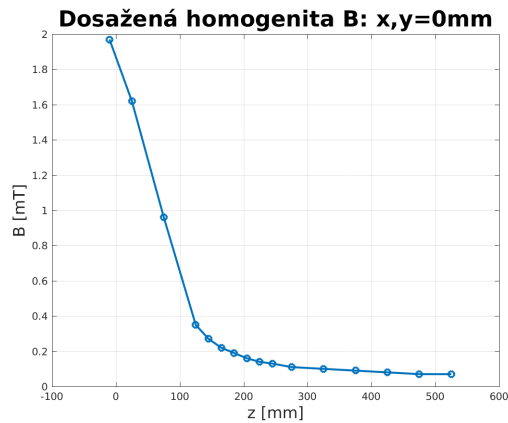
Magnetická indukce byla proměřena v okolí celé cívky. Použitá souřadná soustava je stejná jako na obrázku 7 - počátek ve středu cívky (10 mm nad podkladovou deskou), osa x je souběžná se stranou  $a$  (délka), osa y souběžná se stranou  $b$  (šířka) a osa z je kolmá na cívku.

Při měření velikosti magnetické indukce v závislosti na vzdálenosti od středu cívky (obrázek 14) byly souřadnice  $x$  a  $y$  nulové (střed cívky) a měnila se souřadnice  $z$ . Toto měření bylo provedeno se stejnosměrným napájením.

K měření indukce byla použita Hallova sonda připojená ke Gaussmetru *LakeShore 450*. Stejnosměrné napájecí napětí bylo  $U = 5.7$  V a stejnosměrný proud tekoucí cívkou  $I = 2$  A.

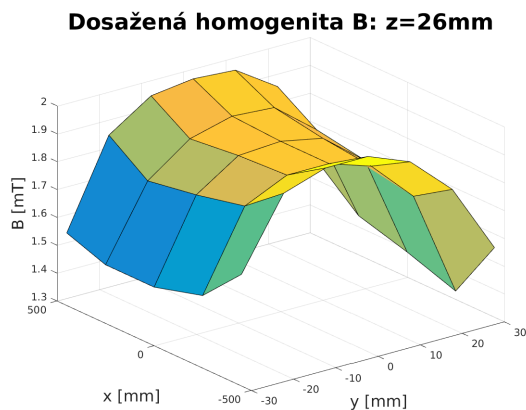
Pro měření magnetické indukce v rovině vzdálené  $-10$  mm a  $26$  mm od středu cívky (obrázky 15 a 16) byla taktéž použita Hallova sonda připojená ke Gaussmetru *LakeShore 450*. Napájecí napětí bylo střídavé o velikosti  $U_{ef} = 13.3$  V, frekvence zdroje  $50$  Hz a efektivní hodnota proudu tekoucího cívkou  $I_{ef} = 3$  A.

Magnetická indukce v rovině vzdálené  $390$  mm od středu cívky (obrázek 17) byla měřena pomocí senzoru *Magnetic Field Sensor FLC 100 - Stefan Mayer Instruments*. Napájecí napětí bylo střídavé o velikosti  $U_{ef} = 25.3$  V, frekvence zdroje  $50$  Hz a efektivní hodnota proudu tekoucího cívkou  $I_{ef} = 5.7$  A.

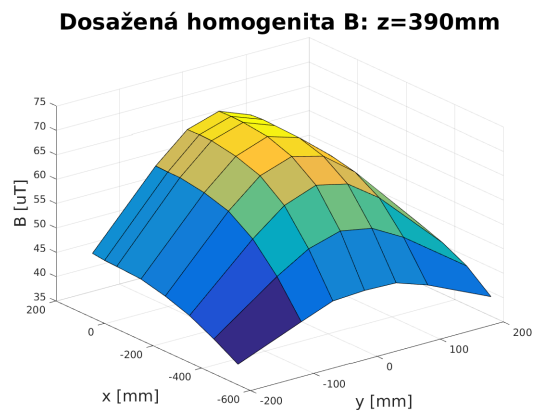


Obrázek 14: Magnet. indukce v závislosti na vzdálenosti od středu cívky.

Obrázek 15: Dosažená homogenita magnetické indukce v rovině  $x, y$  při  $z = -10$  mm.



Obrázek 16: Dosažená homogenita magnetické indukce v rovině  $x, y$  při  $z = 26$  mm.



Obrázek 17: Dosažená homogenita magnetické indukce v rovině  $x, y$  při  $z = 390$  mm.

### 2.1.5 Porovnání předpokládaných a reálných parametrů

Dle očekávání reálné parametry budicí cívky nedosahují hodnot parametrů vypočtených.

Magnetická indukce byla měřena a vypočtena pro střídavý proud tekoucí cívkou o efektivní hodnotě  $I_{ef} = 3$  A.

Parametr	Výpočet	Skutečnost
$s$	17.5 mm	20 mm
$R_{LDC}$	2.64 $\Omega$	2.85 $\Omega$
$L$	17.1 mH	10.84 mH
$B_o$	2.8 mT	2.7 mT
$k_B$	0.94 mT/A	0.9 mT/A

Tabulka 3: Porovnání vypočtených parametrů cívky se skutečnými.

Skutečná velikost průřezu cívkou  $s$  je větší než vypočítaná hodnota z důvodu nedokonalého navinutí.

Odpor cívky se podařilo vypočítat dostatečně přesně.

Nejmarkantnější rozdíl mezi vypočtenou a skutečnou hodnotou můžeme pozorovat u indukčnosti budicí cívky. Nižší hodnota skutečné indukčnosti je způsobena nedokonalým navinutím cívky (a tedy nižším fill-faktorem). Vztah (9) použitý pro výpočet indukčnosti předpokládá těsné navinutí závitů a v případě námi navinuté budicí cívky je tedy zákonitě nepřesný.

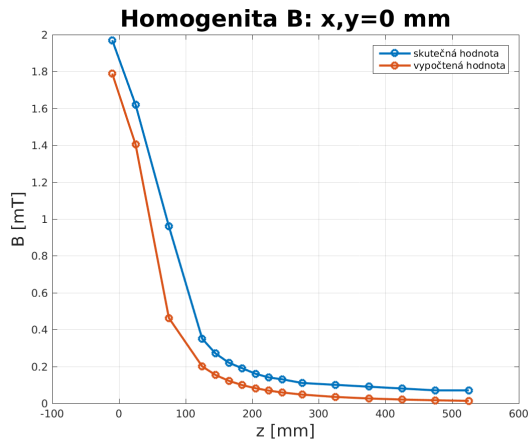
Se změnou hodnoty indukčnosti se změnila i potřebná kapacita rezonančního kondenzátoru sériově připojeného k cívce. Použit byl kondenzátor o kapacitě  $C = 3 \mu\text{F} \pm 8\%$  a rezonanční frekvence se díky tomu posunula na  $f_0 = 910$  Hz.

Vypočtená hodnota magnetické indukce  $B$  je v případě hodnoty  $B_o$  ve středu cívky dostatečně přesná. Nicméně, pro větší vzdálenosti od středu cívky je vypočtená hodnota nižší, než skutečná.

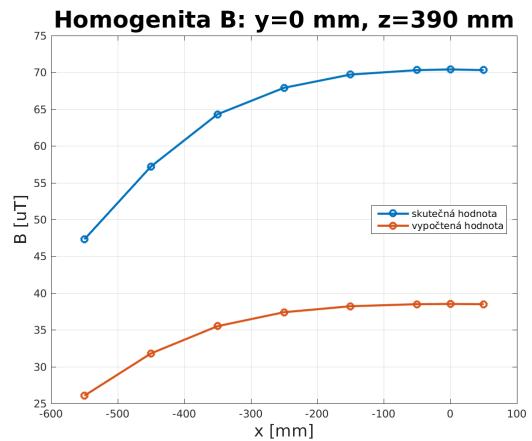
Ze zaznamenaných průběhů je vidět, že tvar křivky je v případě vypočtené i skutečné indukce podobný a že příčinou rozdílu hodnot je aditivní chyba způsobená přítomností rušení.

V případě stejnosměrného měření zachyceného na grafu 18 se může jednat o vliv stejnosměrného zemského pole v kombinaci s aditivní chybou měření.

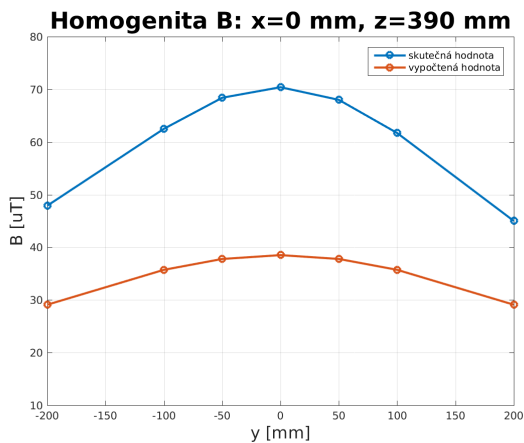
V případě střídavých měření (všechna ostatní) je aditivní chyba způsobena rušením elektrické rozvodné sítě a použitím transformátoru.



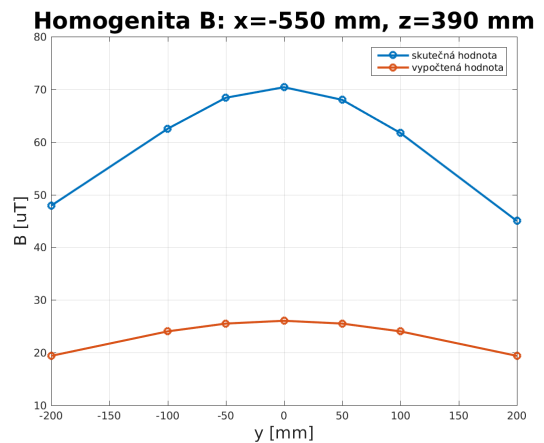
Obrázek 18: Porovnání skutečné a vypočtené homogenity magnetické indukce:  $x,y=0$  mm.



Obrázek 19: Porovnání skutečné a vypočtené homogenity  $B$ :  $y=0$  mm,  $z=390$  mm.



Obrázek 20: Porovnání skutečné a vypočtené homogenity  $B$ :  $x=0$  mm,  $z=390$  mm.



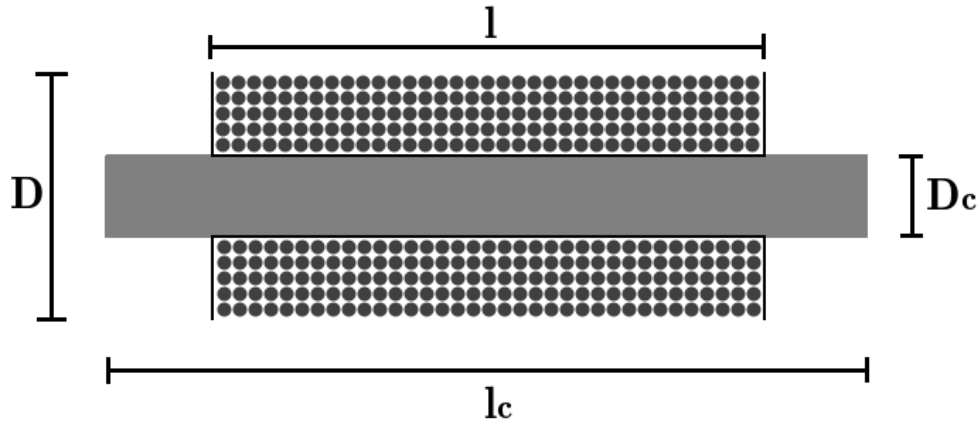
Obrázek 21: Porovnání skutečné a vypočtené homogenity  $B$ :  $x=-550$  mm,  $z=390$  mm.

## 2.2 Indukční senzory

K měření velikosti magnetické indukce byly zvoleny indukční senzory s feromagnetickým jádrem. Hlavním důvodem pro výběr těchto senzorů byla jejich velká citlivost.

### 2.2.1 Návrh a optimalizace

Senzory byly navrhnuty a optimalizovány tak, aby poskytovaly velkou citlivost a zároveň je bylo možné v laboratorních podmínkách zkonstruovat.



Obrázek 22: Geometrie indukčního senzoru s jádrem.

Na obrázku 22 vidíme nákres senzoru při bočním řezu, kde  $D$  je průměr senzoru,  $l$  délka svazku závitů,  $D_c$  průměr jádra a  $l_c$  délka jádra.

#### 2.2.1.1 Požadované parametry

Požadavky na parametry senzoru jsou následující:

- nejvyšší možné indukované napětí při 1 kHz
- největší možný poměr signálu a šumu (SNR)
- počet závitů maximálně 1000 (kvůli snazšímu navíjení)
- vzdálenost závitů od kraje jádra minimálně 5 mm (kvůli upevnění při navíjení)
- celkový průměr indukční cívky  $D$  by neměl přesáhnout trojnásobek průměru jádra

**2.2.1.2 Výpočet indukovaného napětí**

Základní vztah pro indukční sensor s feromagnetickým jádrem vyjadřující velikost indukovaného napětí v závislosti na intenzitě magnetického pole vychází z Faradayova indukčního zákona:

$$U = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot n \cdot A \cdot \frac{dH}{dt} \quad (13)$$

kde  $\mu_0$  je permeabilita vakua,  $\mu_r$  relativní permeabilita materiálu jádra,  $n$  počet závitů,  $A$  plocha cívky a  $H$  intenzita magnetického pole.

Výsledná permeabilita jádra může být ovšem oproti relativní permeabilitě materiálu  $\mu_r$  kvůli demagnetizačnímu efektu tvaru jádra mnohonásobně nižší.

Je proto třeba uvažovat permeabilitu jádra  $\mu_c$  s ohledem na rozměrově závislý demagnetizační faktor  $N$  (převzato z [6]):

$$\mu_c = \frac{\mu_r}{1 + N(\mu_r - 1)} \quad (14)$$

$$N = \frac{D_c^2}{l_c^2} \left( \ln \frac{2l_c}{D_c} - 1 \right) \quad (15)$$

kde  $l_c$  je délka jádra a  $D_c$  průměr jádra.

Přesný vztah pro indukované napětí je tedy:

$$U = \mu_0 \cdot \mu_c \cdot n \cdot A \cdot \frac{dB}{dt} = \mu_c \cdot n \cdot A \cdot \frac{dB}{dt} \quad (16)$$

Vztah (16) budeme dále dle [1] upravovat.

Za předpokladu, že magnetická indukce  $B$  má periodický (v našem případě dokonce harmonický) průběh s periodou  $T = 1/f$ , můžeme integrovat mezi dvěmi protnutími nuly - od  $t_1$  do  $t_2$ , neboť  $B$  dosahuje svého maxima a minima v chvíli, kdy  $U(t)$  protíná nulu.

$$\int_{t_1}^{t_2} U dt = \int_{t_1}^{t_2} \mu_c \cdot n \cdot A \cdot \frac{dB}{dt} dt = \mu_c \cdot n \cdot A \cdot \Delta B = \mu_0 \cdot \mu_c \cdot n \cdot A \cdot (B_{max} - B_{min}) \quad (17)$$

Protože má  $B$  sinový průběh, kde  $B_{max} = -B_{min}$ , můžeme dále vyjádřit vztah pro maximální hodnotu indukovaného napětí:

$$U_p = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot n \cdot \mu_c \cdot A \cdot B_{max} \quad (18)$$

Z tohoto vztahu následně vyjádříme vztah pro efektivní hodnotu indukovaného napětí:

$$U_i = 4,44 \cdot f \cdot n \cdot \mu_c \cdot A \cdot B_{max} \quad (19)$$



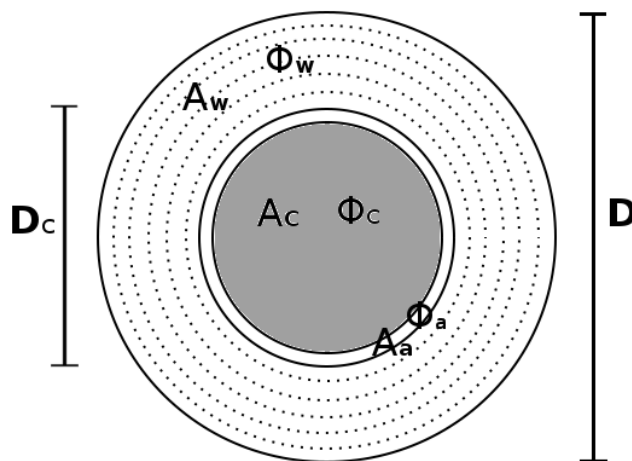
**Plocha cívky**

Pro výpočet indukovaného napětí je třeba znát plochu cívky. Pro náš výpočet použijeme namísto plochy cívky pouze plochu jádra a to:

$$A = \pi \cdot \left(\frac{D_c}{2}\right)^2 \quad (20)$$

Toto zjednodušení můžeme provést za předpokladu, že magnetický tok  $\Phi_w$  skrz samotné vinutí je vůči toku  $\Phi_c$  jádrem zanedbatelný.

Magnetický tok  $\Phi_a$  mezi cívkou a jádrem zanedbáváme úplně a do úvah ho nezahrnujeme.



Obrázek 23: Průřez indukčním senzorem.

K ověření poměru obou toků použijeme napětí  $U_w$  indukované pouze vinutím a napětí  $U_c$  indukované pouze jádrem:

$$U_w = 4.44 \cdot f \cdot n \cdot A_w \cdot B_{max} \quad (21)$$

$$U_c = 4.44 \cdot f \cdot n \cdot \mu_c \cdot A_c \cdot B_{max} \quad (22)$$

Poměr těchto indukovaných napětí odpovídá poměru magnetických toků:

$$\frac{U_w}{U_c} = \frac{A_w}{\mu_c \cdot A_c} = \frac{\pi(D/2)^2 - \pi(D_c/2)^2}{\mu_c \cdot \pi(D_c/2)^2} = \frac{(D/2)^2 - (D_c/2)^2}{\mu_c \cdot (D_c/2)^2} = \frac{D^2 - D_c^2}{\mu_c \cdot D_c^2} \quad (23)$$

Pokud vycházíme ze zadaných parametrů pro indukční senzor, průměr cívky  $D$  může být maximálně trojnásobkem průměru jádra  $D_c$ , tedy  $D = 3D_c$ . Permeabilita jádra  $\mu_c$  by pro zvažované rozměry jádra (přibližně 30 mm délka a 2 mm průměr) a předpokládanou relativní permeabilitu  $\mu_r = 1000$  měla být dle vztahů (14) a (15) přibližně 100.

Po dosazení těchto předpokladů do (23) získáme:

$$\frac{U_w}{U_c} = \frac{9D_c^2 - D_c^2}{\mu_c \cdot D_c^2} = \frac{8}{\mu_c} = \frac{8}{100} = 0.08 \quad (24)$$

Z (24) vyplývá, že magnetický tok samotným vinutím senzoru je oproti toku jádrem pouze 8% a pro námi požadovanou přesnost výpočtu ho můžeme za účelem zjednodušení zanedbat.

Za plochu cívky budeme tedy uvažovat pouze plochu jádra dle vztahu (20).

**2.2.1.3 Výpočet dalších parametrů senzoru**

Senzorovou cívku námi určených rozměrů lze považovat za solenoid, a tudíž indukčnost vypočteme dle vztahu 2.29 v [1] jako:

$$L = n^2 \cdot \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_c \cdot A_c}{l_c} \quad (25)$$

kde  $n$  je počet závitů cívky,  $\mu_c$  permeabilita jádra,  $A_c$  plocha jádra a  $l_c$  délka jádra.

**2.2.1.4 Zvolené a vypočtené parametry senzoru**

Po provedení výpočtů a přihlídnutí k dostupnému materiálu byly zvoleny a vypočteny následující parametry:

Parametr	Hodnota
$l_c$ ... délka jádra	32 mm
$D_c$ ... průměr jádra	2.2 mm
$\mu_r$ ... relativní permeabilita jádra	1000
$\mu_c$ ... výsledná permeabilita jádra	82
$n$ ... počet závitů	600
$d$ ... průměr drátu	0.19 mm
$l$ ... délka cívky	15 mm
$D$ ... průměr cívky	5.4 mm
$A$ ... plocha cívky	3.8 mm <sup>2</sup>
$L$ ... indukčnost cívky	8.8 mH
$S_{900Hz}$ ... citlivost při 900 Hz	1057 V/T
$S_{1kHz}$ ... citlivost při 1 kHz	1175 V/T

Tabulka 4: Vypočtené a zvolené parametry indukčního senzoru.

Jako materiál vinutí byla zvolena měď. Feritové jádro je válcovitého tvaru, vyrobeno z materiálu H11.

### 2.2.2 Realizace

Během realizace bylo vyrobeno celkem šest indukčních senzorů. Na čtyři z nich bylo navinuto kompenzační vinutí.

Plánované umístění indukčních senzorů v detekčním systému je buď jednotlivě, či v antisériově spojených dvojicích.

V případě jednotlivých senzorů musí být senzor natočen ortogonálně k siločárám magnetického pole budicí cívky, aby za klidového stavu (v okolí detekčního systému není žádný předmět) bylo indukované napětí nulové.

V případě antisériového zapojení je třeba, aby senzory byly rovnoběžné, tedy aby v klidovém stavu byl rozdíl indukovaných napětí na senzorech nulový.

Použití kompenzačního vinutí je žádoucí, abychom kompenzovali průnik magnetického pole senzorem způsobený neortogonalitou senzoru či vzájemnou odchylkou sensorové dvojice.

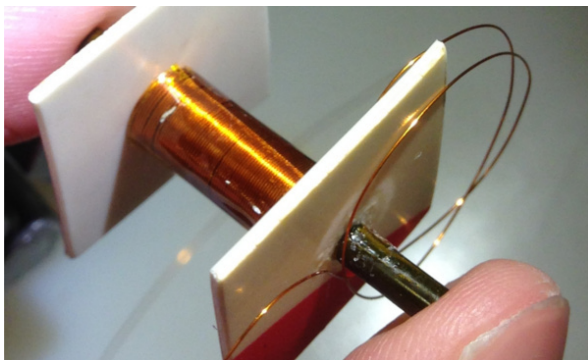
#### 2.2.2.1 Výroba senzoru

V průběhu výroby senzorů bylo na feritové jádro (délka 32 mm, průměr 2.2 mm) navinuto 600 závitů měděného drátu o průměru 0.19 mm. Bylo navinuto 8 vrstev po 75 závitěch.

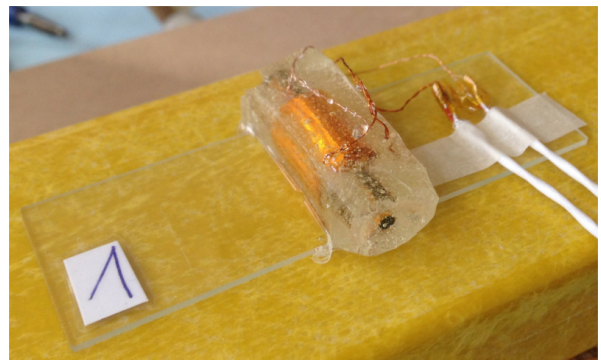
#### 2.2.2.2 Kompenzační vinutí

Kompenzační vinutí bylo vytvořeno ze 110 závitů měděného drátu o průměru 0.15 mm uspořádaných do jedné vrstvy.

Účel kompenzačního vinutí je podrobněji popsán v kapitole 2.3.4.



Obrázek 24: Navinutý indukční senzor.



Obrázek 25: Senzor zalitý do epoxidu.

#### 2.2.2.3 Fixace senzoru

Kompletní senzor byl následně za účelem fixace připevněn na sklíčko a celý zalit do epoxidu. Tato úprava umožní pozdější přilepení senzoru na sklolaminátový držák.

### 2.2.3 Měření parametrů senzoru

Hotové senzory byly podrobeny měření za účelem zjištění jejich skutečných parametrů.

#### 2.2.3.1 Indukčnost

Pro každý senzor byla změřena jeho indukčnost a odpor:

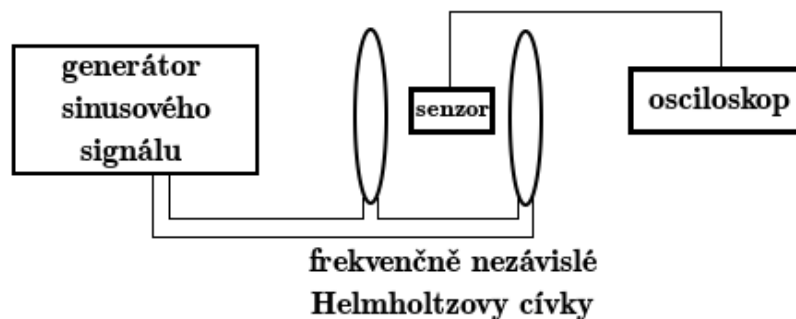
senzor č.	L [mH]	R [ $\Omega$ ]
1	7.205	8.5
2	7.502	8.4
3	7.268	8.6
4	7.138	8.5
6	7.48	8.7

Tabulka 5: Indukčnost a odpor indukčních senzorů.

Hodnoty odporu a indukčnosti cívek byly měřeny pomocí LCR metru *Hewlett Packard 4263B* při frekvenci  $f = 1000 \text{ Hz}$  a napětí 1 V.

#### 2.2.3.2 Měření rezonanční frekvence

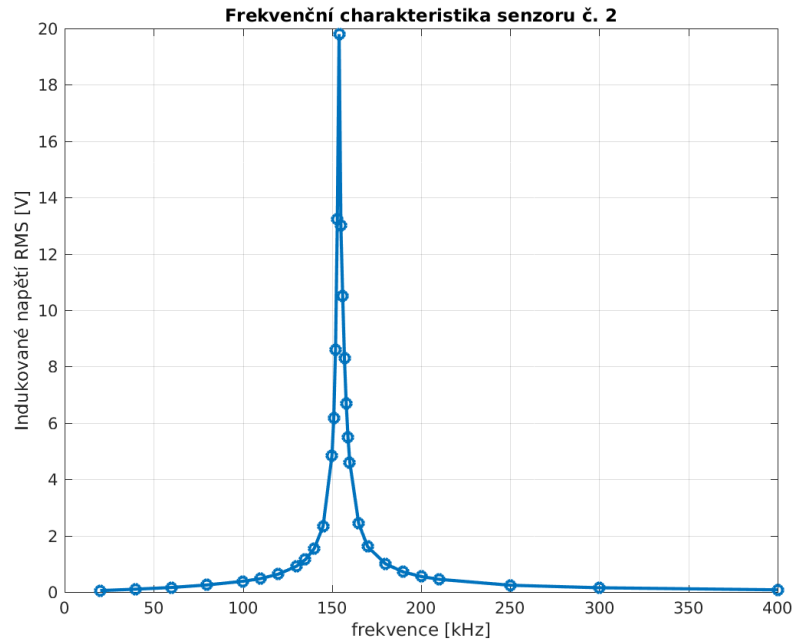
Frekvenční charakteristika senzoru (senzor č. 2) byla měřena v tomto zapojení:



Obrázek 26: Zapojení přístrojů pro měření frekvenční charakteristiky senzoru.

Z frekvenční charakteristiky byla určena rezonanční frekvence připojeného senzoru (tedy senzoru a přívodních kabelů). Frekvence  $f_o = 154 \text{ kHz}$  je dána parazitní kapacitou cívek a kabelu.

Rezonanční frekvence je dostatečně vzdálena od pracovní frekvence senzoru (1 kHz) a senzor se tedy bude chovat lineárně.



Obrázek 27: Frekvenční charakteristika senzoru - rezonanční frekvence připojeného senzoru.

### 2.2.3.3 Vlastní rezonanční frekvence senzoru

Důležitým parametrem senzorů je také jejich parazitní kapacita. K jejímu vypočtení použijeme naměřenou rezonanční frekvenci senzoru a přírodních kabelů  $f_0 = 154$  kHz a indukčnosti z tabulky 5.

Taktéž potřebujeme znát kapacitu vodiče připojeného k senzoru. Tuto kapacitu jsme změřili rovněž pomocí LCR metru *Hewlett Packard 4263B* a její velikost je  $C_w = 127$  pF.

Kapacitu samotného senzoru získáme vyjádřením ze vztahu pro rezonanční frekvenci:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (26)$$

kde  $C$  je celková kapacita vodiče a senzoru. Dílčí parazitní kapacity jsou spojeny paralelně, a proto platí  $C = C_w + C_s$ , kde  $C_s$  je hledaná parazitní kapacita senzoru.

Celkovou kapacitu  $C$  můžeme vyjádřit jako:

$$C = C_c + C_w = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_0^2 \cdot L} \quad (27)$$

a hledaná kapacita senzoru je tedy:

$$C_c = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_0^2 \cdot L} - C_w \quad (28)$$

Z hodnot parazitních kapacit jednotlivých senzorů lze pomocí vztahu (26) vypočíst vlastní rezonanční frekvence samotných senzorů bez parazitní kapacity kabelu.

senzor č.	$C$ [pF]	$f_0$ [kHz]
1	21	407
2	15	469
3	20	418
4	22	396
6	16	463

Tabulka 6: Parazitní kapacity a vlastní rezonanční frekvence senzorů.

### 2.2.4 Porovnání předpokládaných a skutečných parametrů

Naměřené parametry indukčního senzoru se blíží parametrům vypočteným. Z toho lze vyvodit, že se senzor povedlo zrealizovat dostatečně kvalitně.

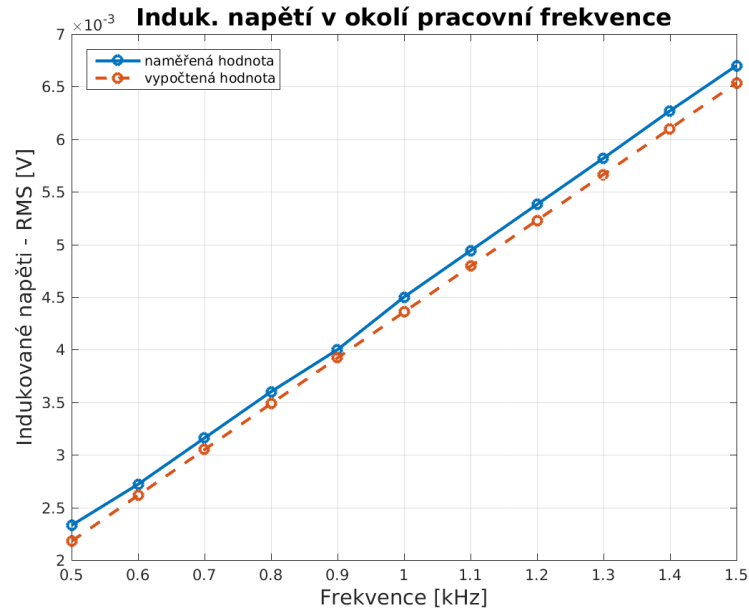
Parametr	Výpočet	Skutečnost
$l$ ... délka cívky	15 mm	15 mm
$D$ ... průměr cívky	5.4 mm	6.3 mm
$L$ ... indukčnost cívky	8.8 mH	7.5 mH
$S_{900Hz}$ ... citlivost při 900 Hz	1057 V/T	1078 V/T
$S_{1kHz}$ ... citlivost při 1 kHz	1175 V/T	1213 V/T

Tabulka 7: Porovnání předpokládaných a skutečných parametrů indukčního senzoru.

Skutečný průměr cívky oproti předpokládanému narostl přibližně o 1 mm. Tento nárůst byl způsoben použitím kaptonové pásky pro oddělení jednotlivých vrstev.

#### 2.2.4.1 Indukované napětí

Naměřené hodnoty indukovaného napětí a s tím související citlivosti senzoru byly mírně vyšší, než vypočtené hodnoty těchto parametrů. Příčinou tohoto rozdílu je aditivní chyba způsobená okolním rušením.



Obrázek 28: Porovnání vypočteného a naměřeného indukovaného napětí na senzoru.

Měření bylo provedeno v Helmholtzových cívkách s konstantou  $k_H = 20.444 \frac{\text{A/m}}{\text{A}}$ . Cívky byly napájeny generátorem harmonického signálu *Keithley 3390*. Velikost magnetické indukce uvnitř cívek byla  $5.25 \mu\text{T}$ .

Velikost proudu tekoucího Helmholtzovými cívkami (nutná pro výpočet velikosti magnetické indukce) byla měřena pomocí proudové sondy *Agilent 1146A* připojené k multimetru *Agilent 34401A*. Velikost indukovaného napětí byla také měřena pomocí multimetru *Agilent*.

Velikost indukovaného napětí způsobeného okolním rušením (měřeno při vypnutých Helmholtzových cívkách) byla přibližně  $0.3 \text{ mV}$ .

#### 2.2.4.2 Porovnání citlivosti senzoru s AMR KMZ51

Jedním s cílů této práce je rozvinout práci Ing. Jana Vyhnánka [2] a vyvinout detekční systém s vyšší citlivostí.

V diplomové práci Ing. Vyhnánka byly použity AMR senzory KMZ51.

Jejich citlivost je podle [2]  $S_{amr} = 0.016 \frac{\text{mV/V}}{\text{A/m}}$ , což při použitém napájení  $5 \text{ V}$  znamená citlivost:

$$S_{amr} = 8 \cdot 10^{-5} \frac{\text{V}}{\text{A/m}} = 64 \text{ V/T}$$

Vidíme tedy, že citivost realizované indukční cívky je mnohonásobně vyšší, než citivost AMR senzoru.

	AMR KMZ51	Indukční senzor
$S_{900\text{Hz}}$	64 V/T	1078 V/T
$S_{1\text{kHz}}$	64 V/T	1213 V/T

Tabulka 8: Porovnání citlivosti indukčního senzoru s AMR KMZ51.

## 2.3 Detekční systém

Zhotovenou budicí cívku a indukční senzory bylo třeba integrovat do požadovaného detekčního systému. V rámci tohoto procesu bylo nutné především zvolit způsob umístění senzorů a ověřit možnost kompenzace průniku magnetického pole.

### 2.3.1 Popis detekčního systému

Ke čtení hodnoty indukovaného napětí na indukčním senzoru byl použit Lock-in zesilovač, který umožňuje měřit slabý signál i za přítomnosti okolního šumu.

#### 2.3.1.1 Použité vybavení

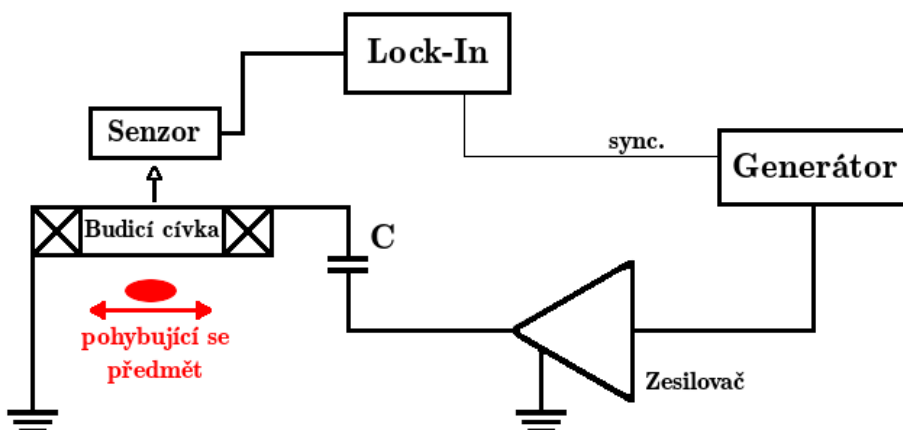
Pro testování detekčního systému a prvotní měření bylo použito následující vybavení:

- budicí cívka s rezonančními kondenzátory
- indukční senzory (senzory 2, 6 a 1)
- Lock-In zesilovač *Stanford Research Systems SR830 DSP*
- bipolární operační zesilovač *Kepeco BOP 50-8M*
- generátor harmonického signálu *Keithley 3390*

#### 2.3.1.2 Zapojení

Testovací zapojení detekčního systému obnášelo senzory připojené k Lock-In zesilovači, který byl synchronizován s generátorem harmonického signálu. Výstup generátoru byl zesílen a připojen na sériový rezonanční LC obvod sestávající z budicí cívky a rezonančního kondenzátoru.

Fáze Lock-Inu byla nastavena pro maximální signál při přiblížení předmětu.



Obrázek 29: Schéma zapojení detekčního systému



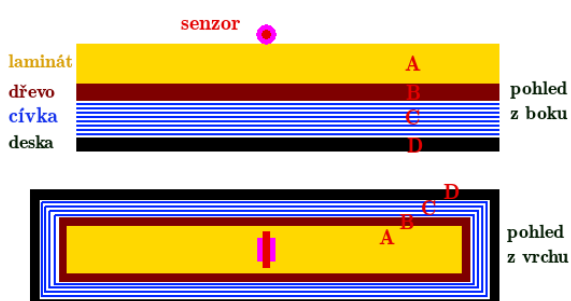
### 2.3.2 Umístění indukčních senzorů

V rámci testování detekčního systému bylo nutné zvolit umístění indukčních senzorů na budicí cívce. Zvažovány byly dvě možnosti, z nichž bylo potřeba na základně analýzy a měření vybrat vhodnější variantu.

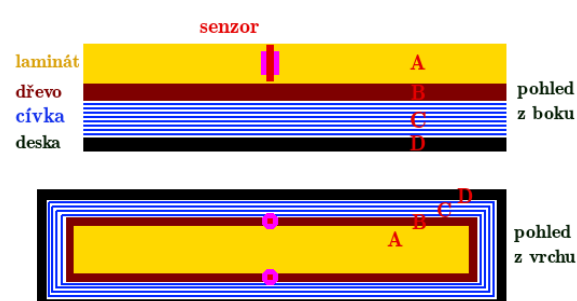
#### 2.3.2.1 Popis možných umístění senzorů

První zvažovanou možností bylo použití samostatného senzoru umístěného rovnoběžně s budicí cívkou - a tedy kolmo na siločáry magnetického pole budicí cívky. Tuto možnost budeme dále označovat jako horizontální umístění senzorů.

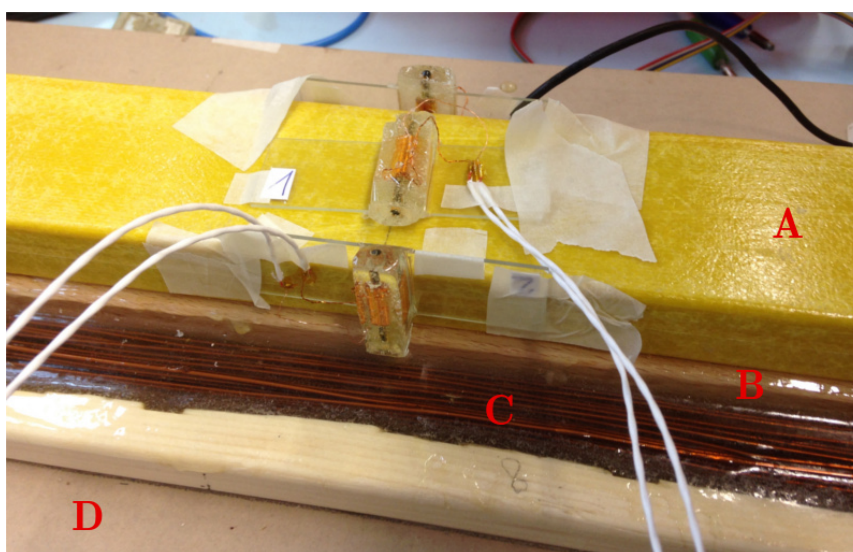
Druhou zvažovanou možností bylo použití dvojice antisériově spojených senzorů, která by byla umístěna kolmo vůči budicí cívce - a tedy rovnoběžně se siločárami magnetického pole budicí cívky. Tuto možnost budeme označovat jako vertikální umístění senzorů (podle natočení jádra senzorů).



Obrázek 30: Schéma horizontálního umístění indukčních senzorů.



Obrázek 31: Schéma vertikálního umístění indukčních senzorů



Obrázek 32: Umístění indukčních senzorů na budicí cívce.

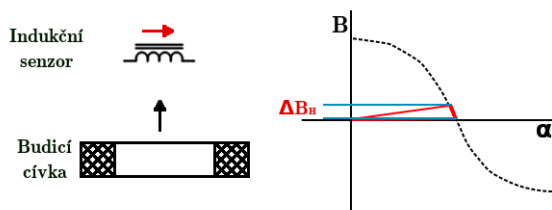
### 2.3.2.2 Analýza umístění senzorů

Jedním z kritérií pro výběr vhodného umístění senzorů je vliv chybného natočení senzoru na změnu signálu. Sensory budou do detekčního systému instalovány ručně a není tedy možné zajistit jejich dokonale přesné natočení. Dalším faktorem, který bude natočení senzorů měnit je různá teplotní roztažnost materiálů senzoru, budicí cívky a jejich propojení.

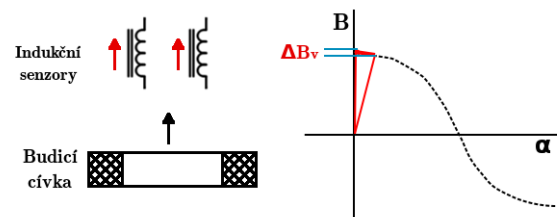
Záměrem je tedy zvolit takové umístění senzoru, aby případná odchylka senzoru (neortogonalita senzoru u horizontálního zapojení či vzájemná odchylka sensorové dvojice u vertikálního umístění) způsobila co nejmenší změnu signálu.

Pokud budeme uvažovat horizontální umístění senzoru tak ideální úhel mezi siločarami magnetického pole budicí cívky a indukčního senzoru je  $90^\circ$ . Pokud bychom dosáhli tohoto natočení, magnetická indukce detekovaná senzorem (a s tím související indukované napětí) bude nulová. Protože se ale pohybujeme na křivce kosinu v okolí průsečíku s nulou, i při malé změně úhlu bude změna  $\Delta B_H$  velká.

Pokud budeme ale uvažovat vertikální umístění senzorů, kdy je požadovaný úhel mezi siločarami magnetického pole budicí cívky a senzorů nulový - budeme se na křivce kosinu pohybovat v okolí její maximální hodnoty. Při stejné změně natočení senzoru jako v předchozím případě bude  $\Delta B_V$  mnohem menší.



Obrázek 33: Vliv chybného natočení horizontálního senzoru na změnu signálu.



Obrázek 34: Vliv chybného natočení vertikálních senzorů na změnu signálu.

Z pohledu vlivu chybného natočení senzorů na změnu signálu je tedy výhodnější zvolit vertikální umístění senzorů.

V případě tohoto umístění je ovšem nutné zajistit vyrušení souhlasné složky magnetického pole procházejícího oběma senzory. Toho lze docílit buď použitím axiálního gradiometru obdobně jako v práci Ing. Jana Vyhnánka [2], nebo použitím gradiometru horizontálního a to v podobě antisériově zapojené dvojice senzorů.

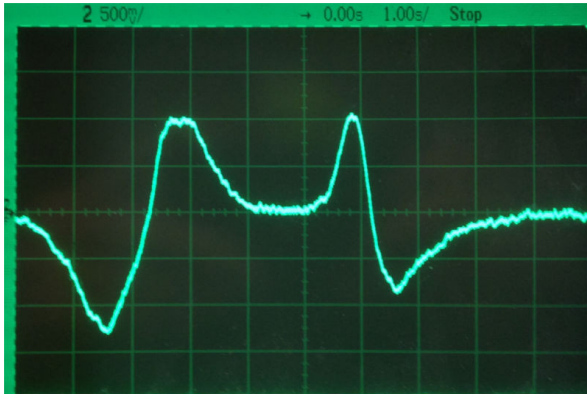
V této práci je použito druhé možnosti, tedy antisériového zapojení dvojice indukčních senzorů.

### 2.3.2.3 Měření indukovaného napětí při různých umístěních senzorů

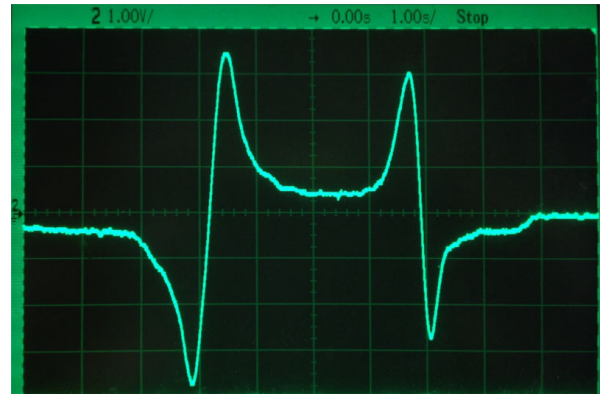
Za účelem určení vhodného umístění senzorů bylo provedeno měření s oběma konfiguracemi - jedním horizontálně umístěným indukčním senzorem a dvojicí antisériově spojených senzorů umístěných vertikálně.

Měření bylo průběh indukovaného napětí na senzorech při pohybu kovové tyče pod deskou budicí cívky (pohyb tam a zpět). Tyč se pohybovala těsně pod deskou, rovina jejího pohybu byla tedy od rovin proložených středem senzorů vzdálena u horizontálního umístění 130 mm a u vertikálního umístění 115 mm.

Průběhy indukovaného napětí jsou zaznamenány na obrázcích 35 a 36. Jeden volt napětí znázorněného na obrázcích odpovídá 0.1 mV ve skutečnosti.



Obrázek 35: Průběh indukovaného napětí při horizontálním umístění senzorů ( $1V \approx 0.1mV$ ).



Obrázek 36: Průběh indukovaného napětí při vertikálním umístění senzorů ( $1V \approx 0.1mV$ ).

Měřené napětí  $U$  je napětí po synchronní detekci. Fáze  $f_i$  byla nastavena pro maximální signál při přiblížení předmětu.

umístění	vzdálenost [mm]	$ \max U $ [ $\mu V$ ]	$\max \Delta U$ [ $\mu V$ ]	SNR [-]
horizontální	130	125	225	25
vertikální	115	350	725	55

Tabulka 9: Porovnávací měření vertikálního a horizontálního umístění senzorů.

Hodnota šumu byla určena z naměřeného průběhu jako peak-peak šířka „čáry“ signálu. Poměr signálu a šumu SNR byl vypočten podle vzorce:

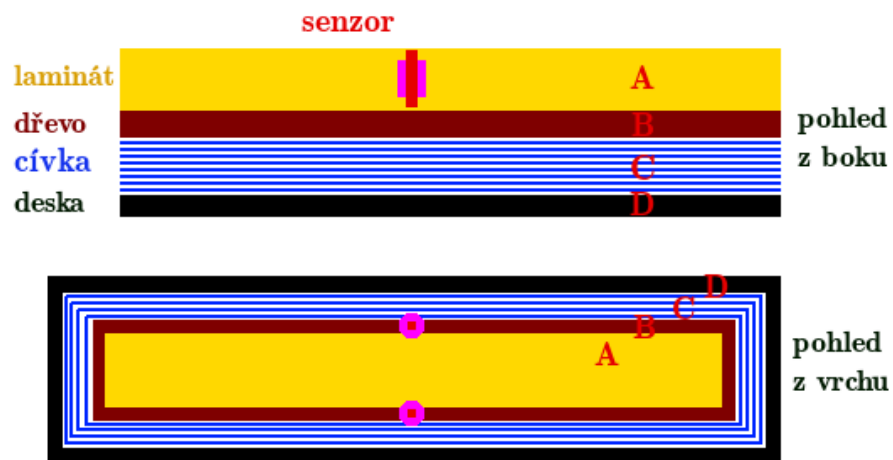
$$\text{SNR} = \frac{\max \Delta U}{U_{\text{noise}}} \quad (29)$$

Lepší vlastnosti vertikálního umístění senzorů vycházejí taktéž z podobnosti budicí cívky s magnetickým dipólem.

Vertikálně umístěné senzory detekují axiální složku magnetického pole  $H_r$  a horizontálně umístěný senzor složku radiální  $H_s$ . Podle vztahu (1.2.3) z [7] víme, že velikost radiální složky  $H_s$  může dosáhnout maximálně poloviční hodnoty složky axiální  $H_r$ , což nepříznivě ovlivní citlivost při horizontální orientaci snímací cívky vůči budicímu poli.

#### 2.3.2.4 Zvolené umístění senzorů

Ze zvažovaných možností bylo zvoleno vertikální umístění senzorů. Toto umístění je více odolné vůči chybnému natočení senzorů a umožňuje dosáhnout vyšší citlivosti.



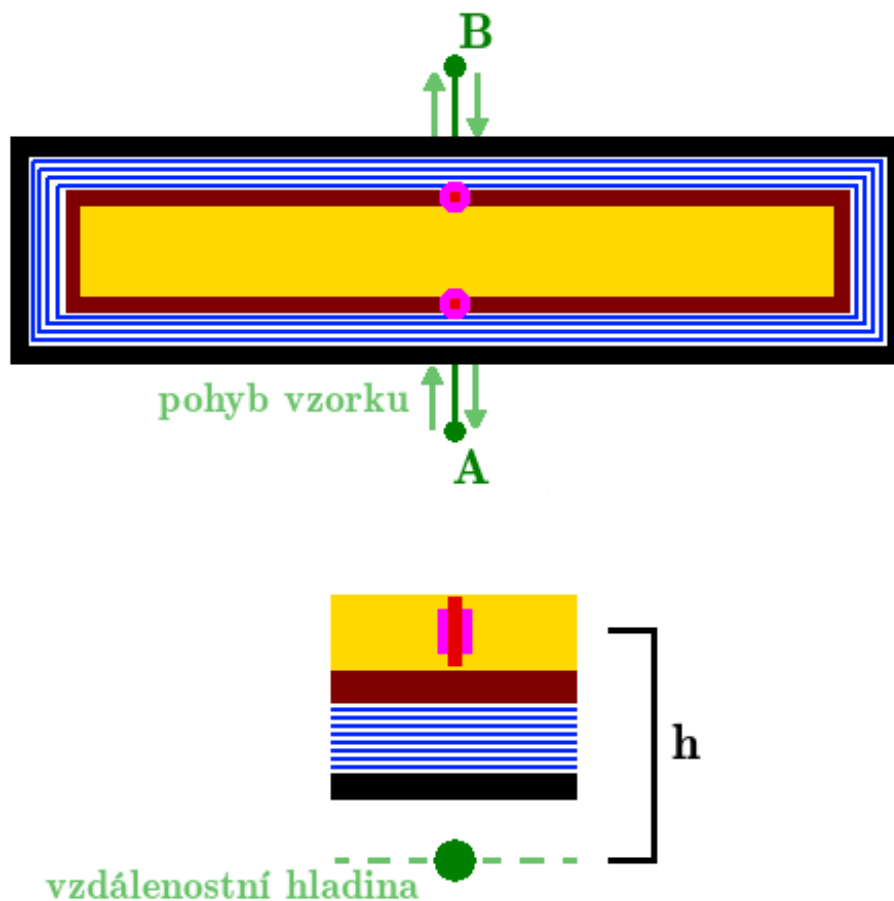
Obrázek 37: Zvolené umístění senzorů - antisériově zapojená dvojice senzorů umístěných vertikálně.

### 2.3.3 Testování detekční citlivosti

Během testování detekční citlivosti systému byla provedena řada měření s různými předměty v různých vzdálenostních hladinách. Kompenzační vinutí na senzorech nebylo při těchto měřeních použito.

Během všech měření byl měřeným vzorkem konán stejný pohyb po úsečce - z bodu A do bodu B a zpět do bodu A. Během měření se měnila pouze vzdálenostní hladina  $h$  (vzdálenost roviny pohybu vzorku od středu senzoru).

Na základě předchozích závěrů byly senzory umístěny vertikálně. Aby bylo dosaženo stejného efektu jako při antisériovém zapojení senzorů, použitá dvojice senzorů byla k Lock-In připojena v režimu  $A - B$ , měřené indukované napětí je tedy rozdílem indukovaných napětí na jednotlivých senzorech.

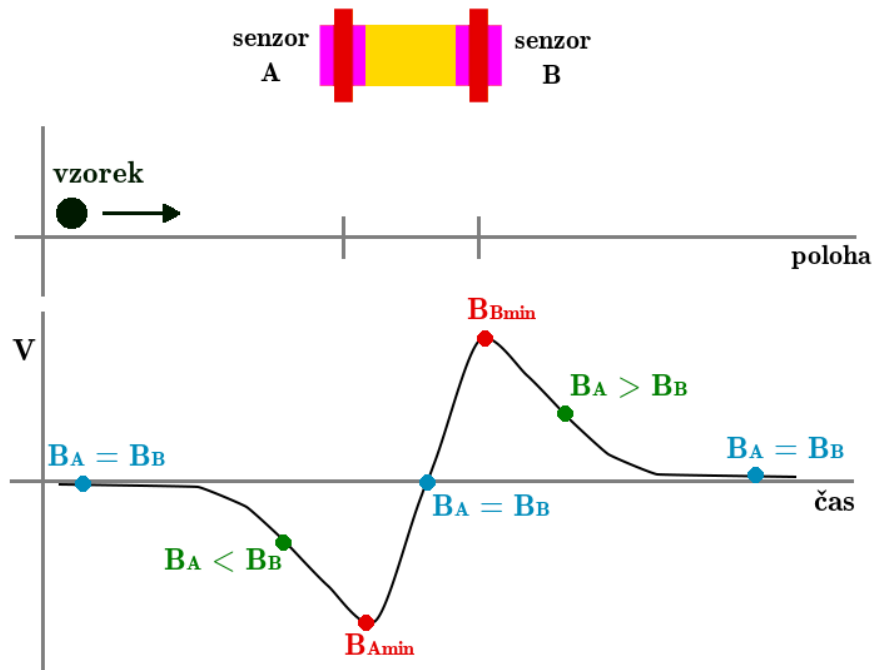


Obrázek 38: Schéma pohybu měřeného vzorku.

### 2.3.3.1 Vysvětlení měřeného průběhu

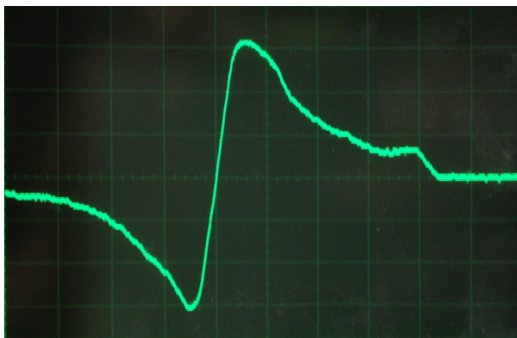
Během měřeného pohybu testovaný vzorek projde pod senzory dvakrát. Na obrázku 39 je vysvětlena první polovina pohybu vzorku (tedy pohyb z bodu A do bodu B). Na obrázku je jako  $V$  značeno výsledné indukované napětí (rozdíl napětí na senzoru A a na senzoru B).

Uvedený průběh platí pro tvarově jednoduchý vzorek - například pro kovovou tyč. Komplexnější vzorky mají průběhy složitější - v závislosti na struktuře vzorku.

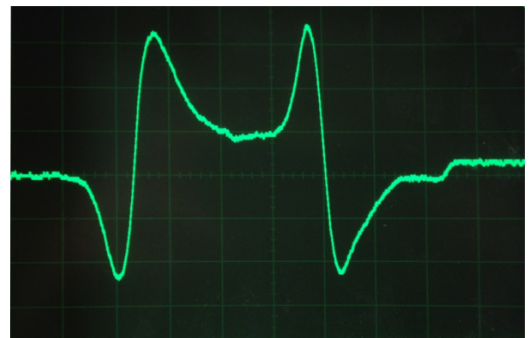


Obrázek 39: Analýza měřeného průběhu.

Jak vidíme, v blízkosti senzoru A je magnetická indukce detekovaná senzorem A slabší, než indukce detekovaná senzorem B a výsledné indukované napětí je záporné. V blízkosti senzoru B je tomu přesně naopak a výsledné napětí je kladné. Pokud je měřený vzorek v dostatečné vzdálenosti od obou senzorů, či je přesně mezi nimi, výsledné napětí je nulové. Při pohybu vzorku zpět, tedy z bodu B do bodu A, nastane stejná situace, pouze v opačném pořadí.



Obrázek 40: Skutečný měřený průběh, vzorek tyč - polovina pohybu (A-B).



Obrázek 41: Skutečný měřený průběh, vzorek tyč - celý pohyb (A-B-A).



### 2.3.3.2 Měřené vzorky

V rámci testovacích měření bylo použito několik vzorků, jejichž průchody byly měřeny.

Použité vzorky:

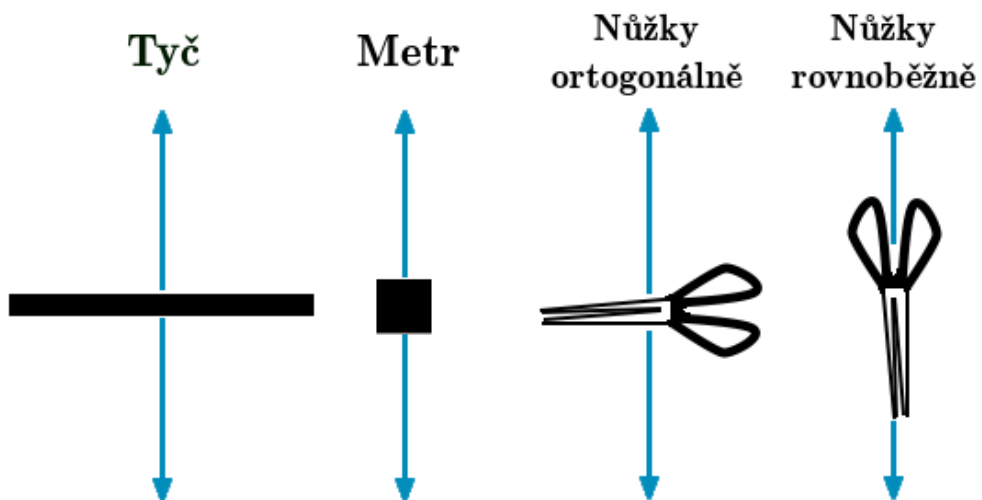
- kovová tyč (délka 468 mm, průměr 20 mm) - pohyb ortogonálně na osu pohybu
- svinovací metr
- kancelářské nůžky - pohyb ortogonálně i rovnoběžně s osou pohybu



Obrázek 42: Měřené vzorky - kovová tyč a svinovací metr.



Obrázek 43: Měřené vzorky - svinovací metr a kancelářské nůžky.



Obrázek 44: Orientace vzorků při měření.

### 2.3.3.3 Naměřená data

Během měření nás zajímala především detekční citlivost, tedy „dosah“ detekčního systému, při různých proudech tekoucích budicí cívku a při použití různých měřených vzorků.

Měřenými hodnotami byla maximální změna indukovaného napětí  $\max \Delta U$  a poměr signálu a šumu vypočteného podle vzorce  $\text{SNR} = \frac{\max \Delta U}{U_{\text{noise}}}$ .

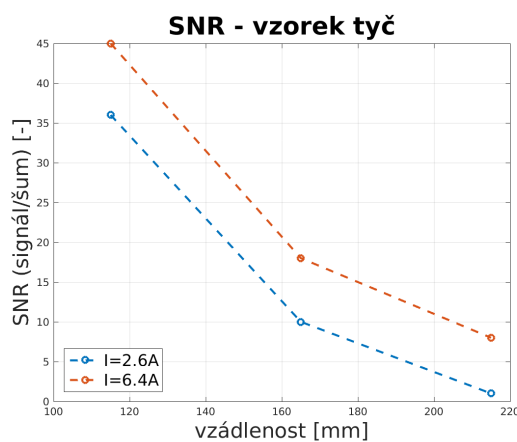
h [mm]	$I_{ef} = 2.6 \text{ A}$		$I_{ef} = 6.4 \text{ A}$	
	$\max \Delta U [\mu V]$	SNR [-]	$\max \Delta U [\mu V]$	SNR [-]
115	700	36	1600	45
165	90	10	450	18
215		1	200	8

Tabulka 10: Měření detekční citlivosti, vzorek 1 - tyč.

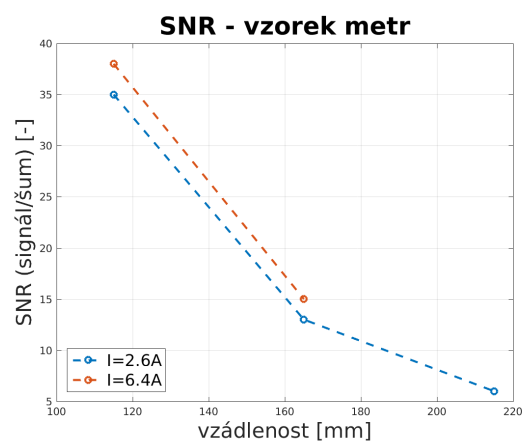
h [mm]	$I_{ef} = 2.6 \text{ A}$		$I_{ef} = 6.4 \text{ A}$	
	$\max \Delta U [\mu V]$	SNR [-]	$\max \Delta U [\mu V]$	SNR [-]
115	950	35	1200	38
165	155	13	275	15
215	30	6		

Tabulka 11: Měření detekční citlivosti, vzorek 2 - metr.

Některá data v tabulkách chybí. Měření s vzorkem tyč při  $I = 2.6 \text{ A}$  a vzdálenosti 215 mm nebylo možné provést pro příliš malý poměr signálu a šumu. Měření s vzorkem metr při  $I = 6.4 \text{ A}$  a vzdálenosti 215 mm taktéž nebylo možné provést, ovšem z důvodu nedostatečné stability signálu. Tato nestabilita byla způsobena nedokonalou fixací senzoru a přírodních kabelů, rozdílnou teplotní roztažností použitých materiálů při samoohřevu budicí cívky a také teplotním driftem proudu cívku a s tím souvisejícím driftem velikosti pole.



Obrázek 45: Detekce při různých vzdálenostech a proudech budicí cívku - vzorek tyč.



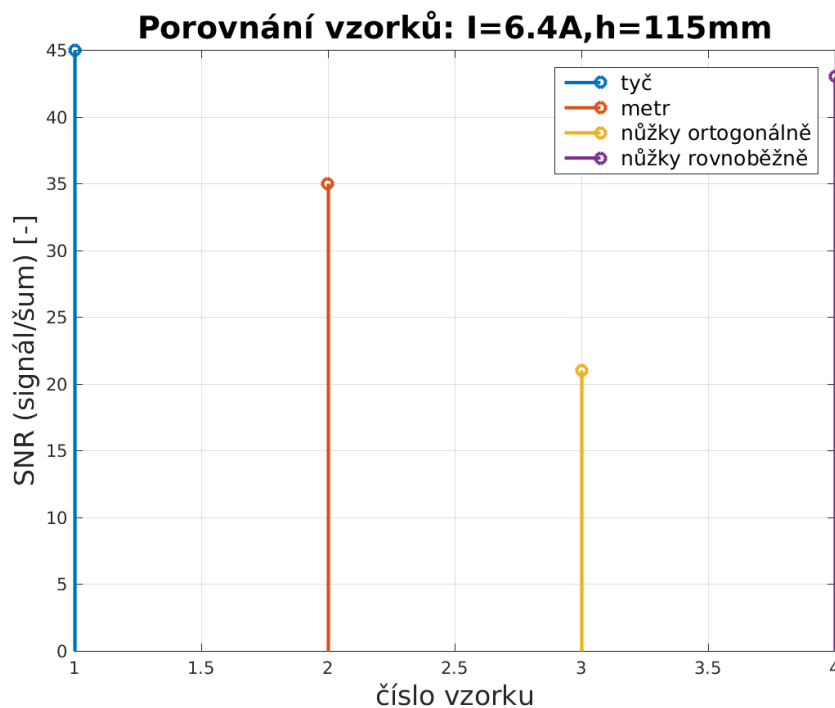
Obrázek 46: Detekce při různých vzdálenostech a proudech budicí cívku - vzorek metr.



Detekční citlovnost systému byla testována za použití různých vzorků. Mimo tvarově jednoduchých vzorků, jako je kovová tyč, byly použity i vzorky komplexnější.

vzorek	$h = 115 \text{ mm}$		$h = 165 \text{ mm}$	
	$\max \Delta U [\mu V]$	SNR [-]	$\max \Delta U [\mu V]$	SNR [-]
tyč	1600	45	450	18
metr	1200	38	275	15
nůžky ortogonálně	525	21	100	7
nůžky rovnoběžně	1500	43	325	17

Tabulka 12: Měření detekční citlivosti, porovnání různých vzorků;  $I_{ef}=6.4 \text{ A}$ .



Obrázek 47: Porovnání SNR různých vzorků;  $I_{ef}=6.4 \text{ A}$ ,  $h=115 \text{ mm}$ .

Z výše uvedených dat pro předmět kancelářské nůžky lze vidět, že indukované napětí na senzoru a poměr signálu a šumu nezávisí pouze na druhu vzorku, ale i na jeho natočení při průchodu budícím polem. Tento jev je způsoben rozdílným demagnetizačním faktorem vzorku při různých orientacích.

#### 2.3.3.4 Stabilita signálu a fixace senzorů

Pro zvýšení detekčního dosahu systému je třeba vyššího proudu budící cívky. Z testovacích měření ovšem víme, že při vyšších proudech a větších vzdálenostech měřeného vzorku se projeví nestabilita dočasného upevnění senzorů na konstrukci budící cívky.

Pro další měření bude tedy třeba senzory a jejich přívodní kabely upevnit trvale, například zalitím do epoxidu.

### 2.3.4 Analýza detekčního systému s kompenzací

Jak bylo zmíněno v kapitole věnující se realizaci indukčních senzorů, na část senzorů bylo navinuto kompenzační vinutí.

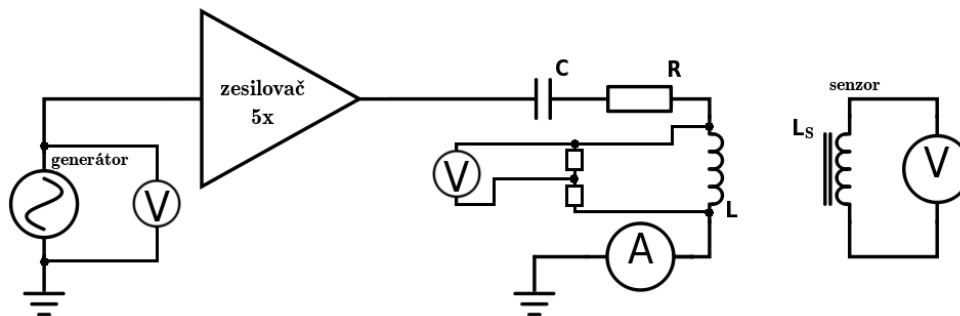
Díky tomuto dodatečnému vinutí bude možné kompenzovat vzájemnou odchylku vertikálně umístěné senzorové dvojice. V ideálním případě dokonale rovnoběžných senzorů v homogenním budicím poli by byl rozdíl indukovaných napětí při klidovém stavu (v okolí budicí cívky není žádný předmět) nulový. Dokonalého nastavení senzorů ovšem není možné při realizaci dosáhnout, a proto se použití kompenzace jeví jako optimální řešení.

V této kapitole je problematika kompenzace analyzována a navržena její konkrétní integrace do detekčního systému. Správně navržená kompenzace může zvýšit detekční dosah a snížit vliv teplotních změn budicího pole.

#### 2.3.4.1 Návrh modelu detekčního systému

Pomocí modelu detekčního systému je možné určit fázový posun mezi indukovaným napětím a napětím či proudem na libovolném prvku systému. To pomůže rozhodnout, podle jaké veličiny budeme synchronizovat kompenzaci. Pokud totiž budeme znát velikost fázového posunu a tento posun bude stabilní, budeme schopni generovat kompenzační pole na indukční cívce přímo pomocí jednoduchého elektrického zapojení.

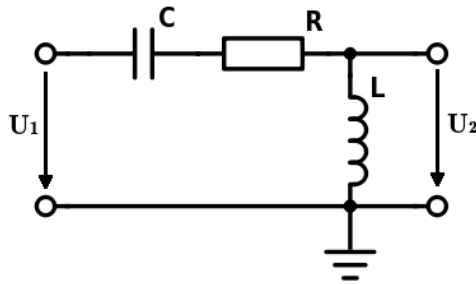
Bylo třeba namodelovat následující zapojení detekčního systému:



Obrázek 48: Modelované zapojení detekčního systému.

Na obrázku 48 jsou pomocí schematických značek voltmetru a ampérmetru znázorněny sledované veličiny.

Abychom mohli model vytvořit, je třeba určit přenosovou funkci sériového rezonančního LRC obvodu s reálnou cívkou mající stejnosměrný odpor  $R$ . Kondenzátor je považován za ideální.



Obrázek 49: Schéma LRC obvodu pro odvození přenosové funkce.

Přenosovou funkci  $H(s)$  sériového LRC obvodu získáme jako poměr výstupního napětí  $U_2$  a vstupního napětí  $U_1$ . Napětí  $U_1$  je v tomto případě napětí na celém LRC obvodu a napětí  $U_2$  napětí pouze na cívce (viz obrázek 49).

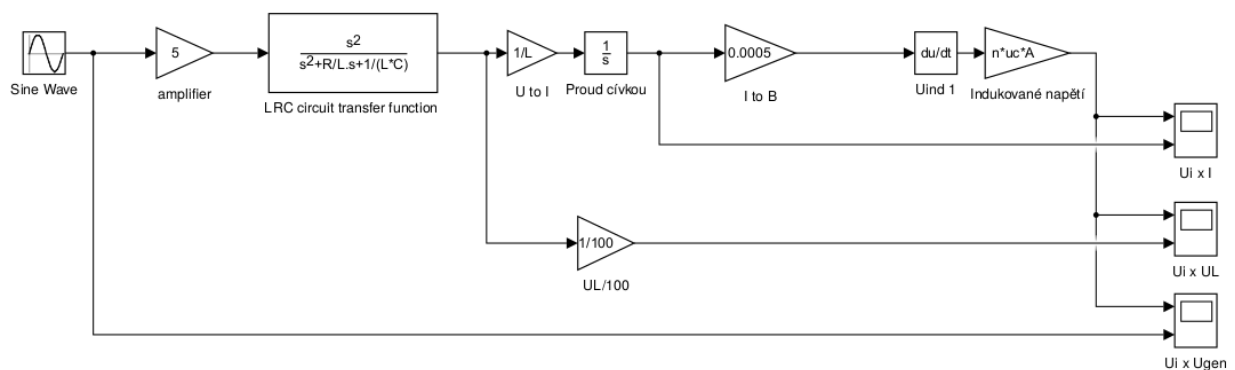
$$H(s) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{Z_L \cdot I}{(Z_C + R + Z_L) \cdot I} = \frac{sL}{\frac{1}{sC} + R + sL} = \frac{s^2}{s^2 + \frac{R}{L} + \frac{1}{LC}} \quad (30)$$

Parametry LRC obvodu jsou následující:

Parametr	Hodnota
$L$ ... indukčnost budicí cívky	10.84 mH
$R$ ... stejnosměrný odpor cívky	2.85 $\Omega$
$C$ ... kapacita rezonančního kondenzátoru	3 $\mu\text{F}$

Tabulka 13: Parametry sériového rezonančního LRC obvodu.

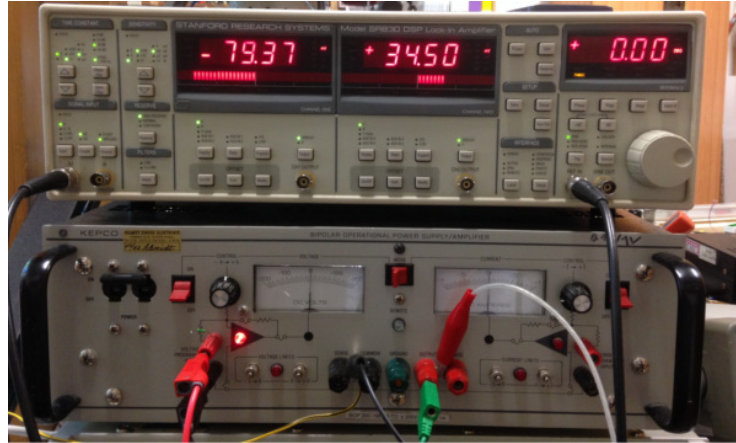
Pomocí přenosové funkce (30), vztahu pro indukované napětí (16) a konstanty budicí cívky v bodě umístění senzorů ( $k_B = 0.5 \text{ mT/A}$  - zjištěno měřením) byl v Simulinku sestaven model detekčního systému.



Obrázek 50: Model detekčního systému.

### 2.3.4.2 Simulace

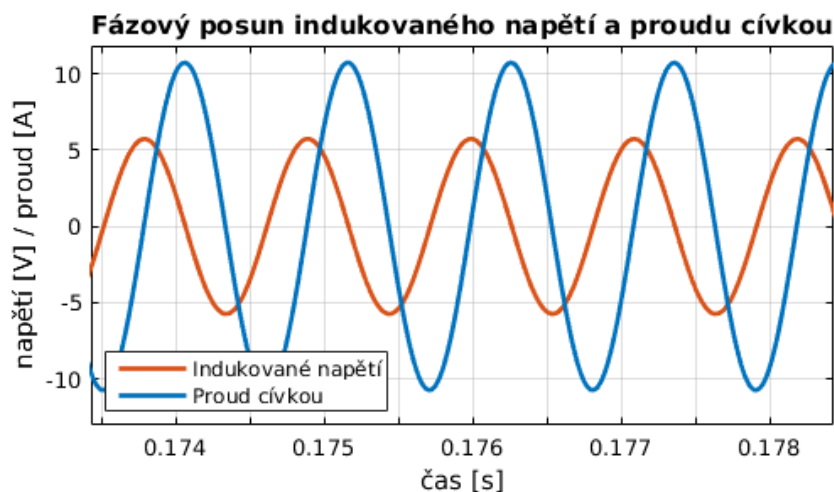
Zkoumaný fázový posun byl pomocí modelu v Simulinku odsimulován a následně potvrzen měřením. Při měření byl použit generátor harmonického průběhu (*Keithley 3390*), zesilovač (*Kepeco BOP 200-1M*) a Lock-In (*Stanford Research System SR830 DSP*), kterým byla měřena fáze signálu.



Obrázek 51: Použitý zesilovač a Lock-In.

### Fázový posun indukovaného napětí a proudu cívkou

Pro vztah mezi magnetickou indukcí, která je přímo závislá na proudu tekoucím cívkou (přes konstantu cívky  $k_B$  v daném bodě), a napětím indukovaným na senzoru platí vzorec  $U_i = \mu_c \cdot n \cdot A \cdot \frac{dB}{dt}$  vycházející z Faradayova zákona. Protože tento vzorec obsahuje derivaci magnetické indukce a průběh proudu - a tím pádem i magnetické indukce - je sinusový, dojde k posunu fáze o  $90^\circ$ .

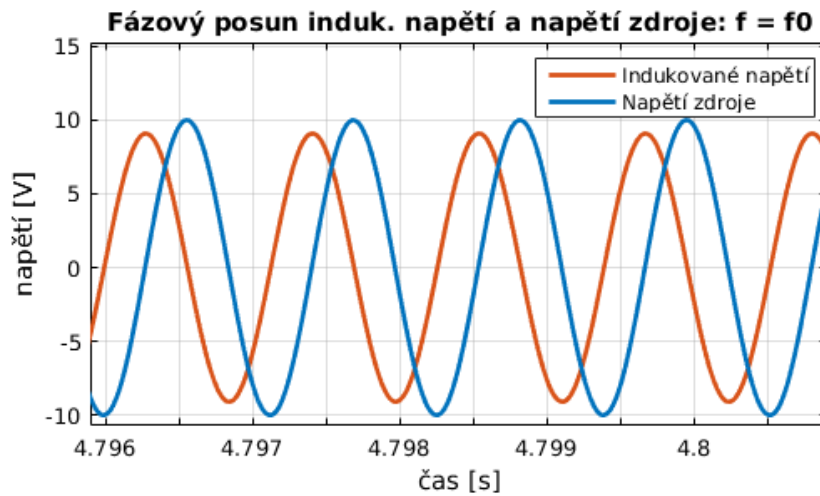


Obrázek 52: Fázový posun indukovaného napětí a proudu budící cívkou.

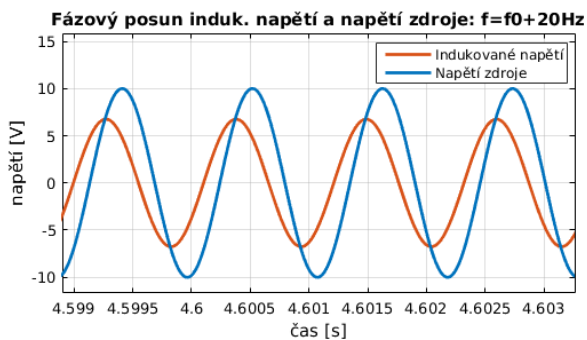
Hodnota fázového posunu získaná simulací je  $\varphi_{sim} = 88.5^\circ$ , hodnota získaná měřením  $\varphi_{meas} = 88.7^\circ$  (indukované napětí předbíhá proud tekoucí cívkou). Drobná odchylka od teoretické velikosti posunu je v případě simulace způsobena nepřesností modelu v počátku simulace. V případě naměřené hodnoty je odchylka způsobena chybou měření. Fázový posun indukovaného napětí a proudu cívkou je ze své podstaty frekvenčně nezávislý.

### Fázový posun indukovaného napětí a napětí zdroje

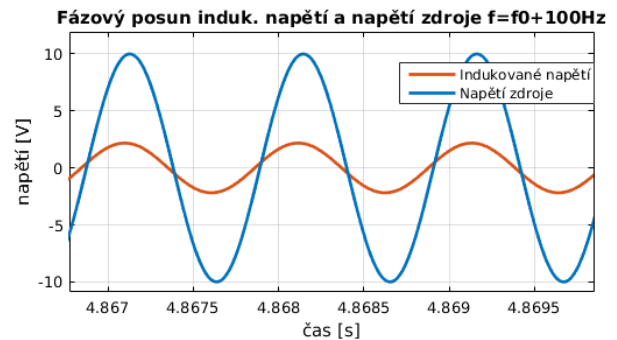
Fázový posun mezi indukovaným napětím na senzoru a napětím zdroje určíme nejjednodušeji simulací. Tento posun bude pravděpodobně frekvenčně závislý.



Obrázek 53: Fázový posun indukovaného napětí a napětí zdroje,  $f = f_0$ .



Obrázek 54: Fázový posun indukovaného napětí a napětí zdroje,  $f = f_0 + 20\text{ Hz}$ .



Obrázek 55: Fázový posun indukovaného napětí a napětí zdroje,  $f = f_0 + 100\text{ Hz}$ .

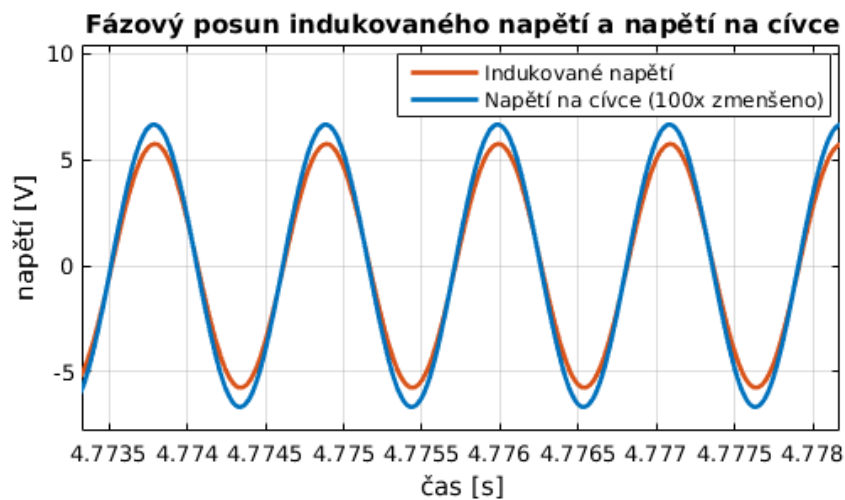
Na základě dat získaných simulací a ověřených měření můžeme potvrdit, že fázový posun mezi indukovaným napětím a napětím zdroje je frekvenčně závislý. Tuto závislost způsobují vlastnosti LRC obvodu.

V mezním případě frekvence shodné s rezonanční frekvencí LCR obvodu dosahuje posun hodnoty  $\varphi_{f_0} = 90^\circ$ . Pokud se od rezonanční frekvence vzdalujeme, fázový posun klesá limitně k hodnotě  $\varphi = 0^\circ$ .

### Fázový posun indukovaného napětí a napětí na budící cívce

Dalším zkoumaným fázovým posunem je posun mezi napětím indukovaným na senzoru a napětím na budící cívce.

Mezi napětím a proudem na cívce je vždy fázový posun  $90^\circ$ . Takto posunutý signál následně generuje indukované napětí na senzoru a zde dochází také k posunu fáze o  $90^\circ$  (viz výše), ovšem opačným směrem. Posuny se tedy odečtou a mezi indukovaným napětím na senzoru a napětím na cívce by měl být fázový posun nulový.



Obrázek 56: Fázový posun indukovaného napětí a napětí na budící cívce.

Hodnota fázového posunu získaná simulací je  $\varphi_{sim} = 1.6^\circ$  (napětí na cívce předbíhá indukované napětí), hodnota získaná měřením  $\varphi_{meas} = 0^\circ \pm 1^\circ$ . Drobná odchylka od teoretické velikosti posunu je v případě simulace způsobena nepřesností modelu v počátku simulace. V případě naměřené hodnoty je odchylka způsobena chybou měření.

Fázový posun indukovaného napětí a napětí na cívce je frekvenčně nezávislý.

#### 2.3.4.3 Výsledky simulace

Na základě dat získaných simulací a potvrzených měření bylo jako nejvhodnější řešení zvoleno použití kompenzace na základě proudu tekoucího cívkou.

Fázový posun hodnot	Posun	Frekvenční závislost	Kompenzuje na $\Delta I_{coil}$
induk. napětí a proud cívkou	$90^\circ$	ne	ano
induk. napětí a napětí zdroje	$90^\circ - 0^\circ$	ano	ne
induk. napětí a napětí na cívce	$0^\circ$	ne	ne

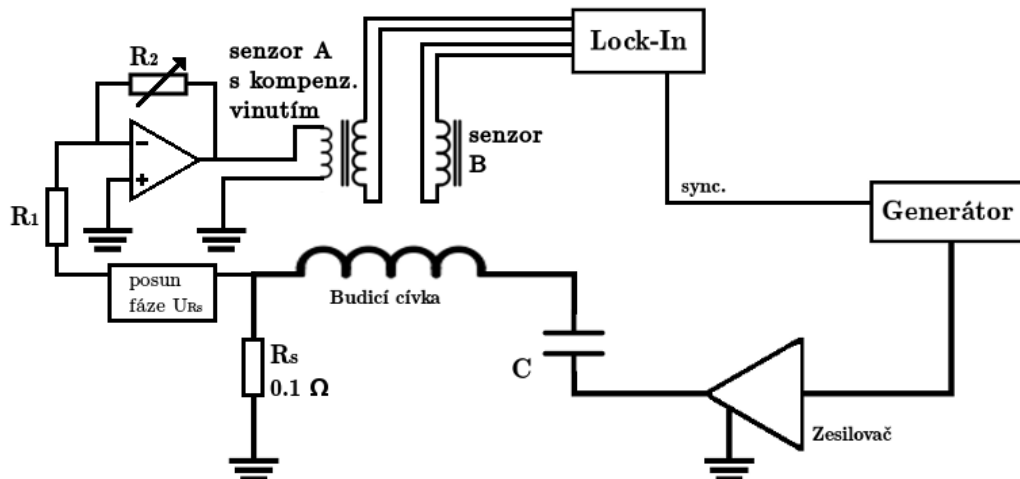
Tabulka 14: Výsledky simulace fázových posunů.

Zvolená možnost je frekvenčně nezávislá a fázový posun je  $90^\circ \pm 2^\circ$  (indukované napětí předbíhá proud na cívce). Hlavní předností této možnosti oproti variantě se sledováním napětí na cívce je přímá závislost generovaného magnetického pole na proudu. Díky tomu je možná kompenzace případných změn pole způsobených vlivem teploty.

Kvůli nenulovému fázovému posunu bude však třeba posunout fázi napětí na snímacím rezistoru (rezistor sloužící k snímání fáze proudu cívkou), aby bylo možné kompenzovat přímo na indukčním senzoru. Toho můžeme dosáhnout například použitím filtru prvního řádu typu dolní propust.

#### 2.3.4.4 Zamýšlené zapojení

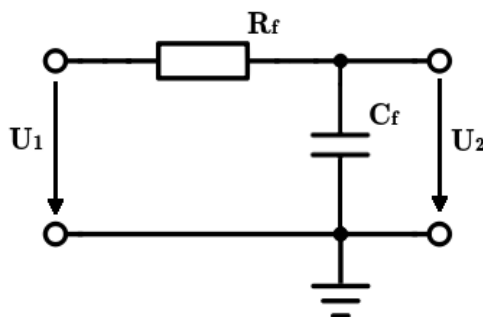
Pro další rozšíření této práce byl připraven návrh realizace kompenzace.



Obrázek 57: Zamýšlené zapojení detekčního systému s kompenzací.

Požadovaného fázového posunu napětí  $U_{RS}$  o přibližně  $-90^\circ$  docílíme použitím filtru typu dolní propust. Filtr navrhne tak, aby v pracovním frekvenčním pásmu senzoru měnil fázi a zároveň příliš nezeslaboval signál.

Filtr můžeme realizovat jako jednoduchý RC článek:



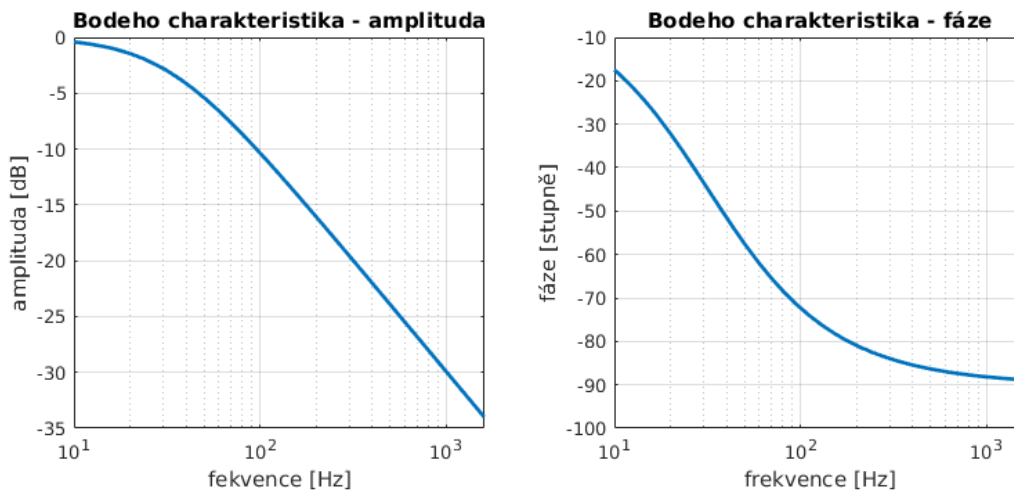
Obrázek 58: Možná realizace low-pass filtru pro posun fáze  $U_{RS}$ .

kde  $U_1$  je vstupní napětí filtru,  $U_2$  napětí výstupní. Prvky  $R_f$  a  $C_f$  jsou rezistor a kondenzátor, jejichž parametry ovlivňují přenosovou funkci filtru.

Pokud zvolíme hodnoty odporu a kondenzátoru například jako  $R_f = 100 \text{ k}\Omega$  a  $C_f = 50 \text{ nF}$ , získáme následující přenosovou funkci filtru.

$$H(s) = \frac{1}{1 + sR_fC_f} = \frac{1}{1 + s \cdot 5 \cdot 10^{-3}} = \frac{1}{1 + \frac{s}{200}} \quad (31)$$

Z Bodeho charakteristik lze vidět, že filtr s touto přenosovou funkcí splňuje naše požadavky.



Obrázek 59: Bodeho amplitudová a frekvenční charakteristika navrhovaného filtru.

V okolí předpokládané frekvence buzení 900-1000 Hz je posun fáze  $-88^\circ$  a útlum  $-30 \text{ dB}$ . Výstupní signál bude tedy přibližně 32 krát slabší, než vstupní. Výstupní signál filtru bude proto potřeba zesílit.



### 3 Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout a realizovat systém pro detekci kovových předmětů s využitím rámové budicí cívky a indukčních senzorů. Tento cíl byl splněn.

Budicí cívka byla optimalizována dle zadaných parametrů. Indukční senzory byly navrženy s feromagnetickým jádrem a jejich parametry byly nejprve vypočteny a následně ověřeny měřením. Díky precizní realizaci senzorů se skutečné parametry téměř shodují s parametry předpokládanými.

Parametr	Hodnota
koeficient budicí cívky v jejím středu	0.9 mT/A
koeficient budicí cívky v bodě umístění senzorů	0.5 mT/A
citlivost senozru při 900 Hz	1078 V/T
citlivost senozru při 1 kHz	1213 V/T

Tabulka 15: Vybrané parametry budicí cívky a indukčního senzoru.

Důvodem pro použití indukčních senzorů byl požadavek na vysokou citlivost. Tento cíl byl splněn - v porovnání se senzory AMR KMZ51 (použitými například v práci Ing. Jana Vyhnánka [2], kterou tato práce rozvíjí) bylo dosaženo 17x vyšší citlivosti na frekvenci 900 Hz a 19x vyšší citlivosti na frekvenci 1 kHz.

Indukční senzory byly integrovány do detekčního systému s laboratorními přístroji a celý systém byl otestován.

Všechny vytyčené cíle byly tedy splněny.

Prostor pro zdokonalení práce tkví především v dosažení vyšší stability detekčního systému pomocí lepší fixace senzorů a přívodních kabelů, čímž se zvýší detekční dosah.

Další věcí hodnou rozvinutí je kompenzace vzájemné odchylky dvojice senzorů způsobené nedokonalým nastavením senzorů a především rozdílnou teplotní roztažností použitých materiálů. Zamýšlená kompenzace byla teoreticky popsána, analyzována a zároveň byla navržena její konkrétní realizace. Senzory kompenzační vinutí již obsahují, ovšem při testování detekčního systému nebyla kompenzace využita.

## 4 Zdroje a použitá literatura

- [1] RIPKA, Pavel. (ed.), *Magnetic Sensors and Magnetometers*, Artech House Publishers, 2001.
- [2] VYHNÁNEK, Jan. *Minohledačka s AMR gradiometry*, Praha, 2011. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická.
- [3] VYHNÁNEK, Jan a kolektiv. *AMR gradiometer for mine detection*, Sensors and Actuators, vol. 186, pp. 100-104. ISSN: 0924-4247
- [4] MISAKIAN, Martin. *Equations for the Magnetic Field Produced by One or More Rectangular Loops of Wire in the Same Plane*, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, vol. 105, no. 4, pp. 557-564. ISSN: 1044-677X.
- [5] *Missouri S&T Rectangular Loop* [online], Missouri University of Science and Technology. Dostupné z <http://emclab.mst.edu/inductance/rectgl/> [viděno 1. 4. 2017]
- [6] TUMANSKI, Slawomir. *Induction Coil Sensors - a Review*, Measurement Science and Technology, 2007, 18.3: R31. Dostupné z <http://www.tumanski.x.pl/coil.pdf> [viděno 1. 4. 2017]
- [7] DRAXLER, Karel, P. Kašpar a P. Ripka. *Magnetické prvky a měření*, Praha, 1999. Vydavatelství ČVUT v Praze.
- [8] *How do metal detectors work?* [online], Tip Top Metal Detectors. Dostupné z <http://tiptopmetaldetectors.com/metal-detector-digest/how-do-metal-detectors-work/> [viděno 1. 5. 2017]

## 5 Seznam obrázků a tabulek

### Seznam obrázků

1	Princip detekce kovového předmětu - feromagnetický předmět. . . . .	9
2	Princip detekce kovového předmětu - vznik vířivých proudů; převzato z [8].	10
3	Princip funkce detektoru s AMR senzorem, převzato z [3]. . . . .	10
4	Náhradní schéma rezonančního obvodu budicí cívky. . . . .	11
5	Nákres budicí cívky s popisem geometrických parametrů. . . . .	12
6	Průběh výpočtu parametrů cívky. . . . .	13
7	Geometrie při výpočtu magnetické indukce cívky v bodě P; převzato z [4].	14
8	Grafické rozhraní optimalizační aplikace. . . . .	16
9	Nákres rámu cívky, rozměry jsou v mm. . . . .	17
10	Navíjení a lepení závitů. . . . .	18
11	Rozšiřování prostoru pro cívku. . . . .	18
12	Hotová budicí cívka před zalitím do epoxidu. . . . .	18
13	Detail budicí cívky před zalitím do epoxidu. . . . .	18
14	Magnet. indukce v závislosti na vzdálenosti od středu cívky. . . . .	20
15	Dosažená homogenita magnetické indukce v rovině $x, y$ při $z = -10$ mm. . .	20
16	Dosažená homogenita magnetické indukce v rovině $x, y$ při $z = 26$ mm. . .	20
17	Dosažená homogenita magnetické indukce v rovině $x, y$ při $z = 390$ mm. . .	20
18	Porovnání skutečné a vypočtené homogenity magnetické indukce: $x, y = 0$ mm.	22
19	Porovnání skutečné a vypočtené homogenity $B$ : $y = 0$ mm, $z = 390$ mm. . . .	22
20	Porovnání skutečné a vypočtené homogenity $B$ : $x = 0$ mm, $z = 390$ mm. . . .	22
21	Porovnání skutečné a vypočtené homogenity $B$ : $x = -550$ mm, $z = 390$ mm. . .	22
22	Geometrie indukčního senzoru s jádrem. . . . .	23
23	Průřez indukčním senzorem. . . . .	25
24	Navinutý indukční senzor. . . . .	27
25	Senzor zalitý do epoxidu. . . . .	27
26	Zapojení přístrojů pro měření frekvenční charakteristiky senzoru. . . . .	28
27	Frekvenční charakteristika senzoru - rezonanční frekvence připojeného senzoru.	29
28	Porovnání vypočteného a naměřeného indukovaného napětí na senzoru. . . .	31
29	Schéma zapojení detekčního systému . . . . .	32
30	Schéma horizontálního umístění indukčních senzorů. . . . .	33
31	Schéma vertikálního umístění indukčních senzorů . . . . .	33
32	Umístění indukčních senzorů na budicí cívce. . . . .	33
33	Vliv chybného natočení horizontálního senzoru na změnu signálu. . . . .	34
34	Vliv chybného natočení vertikálních senzorů na změnu signálu. . . . .	34
35	Průběh indukovaného napětí při horizontálním umístění senzorů ( $1V \approx 0.1mV$ ).	35
36	Průběh indukovaného napětí při vertikálním umístění senzorů ( $1V \approx 0.1mV$ ).	35
37	Zvolené umístění senzorů - antisériově zapojená dvojice senzorů umístěných vertikálně. . . . .	36
38	Schéma pohybu měřeného vzorku. . . . .	37
39	Analýza měřeného průběhu. . . . .	38
40	Skutečný měřený průběh, vzorek tyč - polovina pohybu (A-B). . . . .	38
41	Skutečný měřený průběh, vzorek tyč - celý pohyb (A-B-A). . . . .	38
42	Měřené vzorky - kovová tyč a svinovací metr. . . . .	39
43	Měřené vzorky - svinovací metr a kancelářské nůžky. . . . .	39
44	Orientace vzorků při měření. . . . .	39

45	Detekce při různých vzdálenostech a proudech budicí cívkou - vzorek tyč. . . . .	40
46	Detekce při různých vzdálenostech a proudech budicí cívkou - vzorek metr. . . . .	40
47	Porovnání SNR různých vzorků; $I_{ef}=6.4$ A, $h=115$ mm. . . . .	41
48	Modelované zapojení detekčního systému. . . . .	42
49	Schéma LRC obvodu pro odvození přenosové funkce. . . . .	43
50	Model detekčního systému. . . . .	43
51	Použitý zesilovač a Lock-In. . . . .	44
52	Fázový posun indukovaného napětí a proudu budicí cívkou. . . . .	44
53	Fázový posun indukovaného napětí a napětí zdroje, $f = f_0$ . . . . .	45
54	Fázový posun indukovaného napětí a napětí zdroje, $f = f_0 + 20$ Hz. . . . .	45
55	Fázový posun indukovaného napětí a napětí zdroje, $f = f_0 + 100$ Hz. . . . .	45
56	Fázový posun indukovaného napětí a napětí na budicí cívce. . . . .	46
57	Zamýšlené zapojení detekčního systému s kompenzací. . . . .	47
58	Možná realizace low-pass filtru pro posun fáze $U_{RS}$ . . . . .	47
59	Bodeho amplitudová a frekvenční charakteristika navrhovaného filtru. . . . .	48

## Seznam tabulek

1	Parametry cívky určené optimalizací. . . . .	17
2	Skutečné parametry cívky . . . . .	19
3	Porovnání vypočtených parametrů cívky se skutečnými. . . . .	21
4	Vypočtené a zvolené parametry indukčního senzoru. . . . .	26
5	Indukčnost a odpor indukčních senzorů. . . . .	28
6	Parazitní kapacity a vlastní rezonanční frekvence senzorů. . . . .	30
7	Porovnání předpokládaných a skutečných parametrů indukčního senzoru. . . . .	30
8	Porovnání citlivosti indukčního senzoru s AMR KMZ51. . . . .	31
9	Porovnávací měření vertikálního a horizontálního umístění senzorů. . . . .	35
10	Měření detekční citlivosti, vzorek 1 - tyč. . . . .	40
11	Měření detekční citlivosti, vzorek 2 - metr. . . . .	40
12	Měření detekční citlivosti, porovnání různých vzorků; $I_{ef}=6.4$ A. . . . .	41
13	Parametry sériového rezonančního LRC obvodu. . . . .	43
14	Výsledky simulace fázových posunů. . . . .	46
15	Vybrané parametry budicí cívky a indukčního senzoru. . . . .	49