

Bakalářská práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra měření

**Fluxgate senzor s tištěným jádrem**

**Fluxgate sensor with printed core**

**Vojtěch Lejsek**

Vedoucí práce: Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.

Studijní obor: Kybernetika a robotika

Leden 2024

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Lejsek** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **492357**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra měření**  
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Fluxgate senzor s tištěným jádrem**

Název bakalářské práce anglicky:

**Fluxgate sensor with printed core**

Pokyny pro vypracování:

Zhotovte fluxgate senzor s jádrem tištěným inkjet technologií a porovnejte jeho linearitu, šumové vlastnosti a teplotní stabilitu s jádrem z amorfni pásky. Ověřte možnost použití keramických substrátů a různých typů magnetických inkoustů, včetně inkoustů dostupných na trhu. Diskutujte i možnosti jiných tiskových technologií.

Seznam doporučené literatury:

P. Ripka (ed.): Magnetic Sensors and Magnetometers, Artech, Boston, ISBN 1-58053-057-5, 2001, 2nd edition 2021.  
D. Hrakova, P. Ripka, A. Laposá, D. Novotný, J. Kroutil, V. Povolný, O. Kaman, P. Veverka: Inkjet-printed Mn-Zn ferrite nanoparticle core for fluxgate, JMMM Vol. 563, 1 December 2022, 170003  
B. Derby: Inkjet printing of functional and structural materials: Fluid property requirements, feature stability, and resolution, Annu. Rev. Mater. Res., 40 (1) (Jun. 2010), pp. 395-414

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**prof. Ing. Pavel Ripka, CSc. katedra měření FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **16.02.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **09.01.2024**

Platnost zadání bakalářské práce:  
**do konce zimního semestru 2024/2025**

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Prof. Ing. Pavlu Ripkovi, CSc. a Mgr. Dianě Hrákové za pomoc a rady při tvorbě bakalářské práce.

## 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 Praze dne .....

.....  
Vojtěch Lejsek

## Abstrakt

S velkým pokrokem výroby materiálů se hledají i nové způsoby jejich využití. Fluxgate senzory se těší popularitě díky své citlivosti a odolnosti, jejich nevýhodou je však náročná a nákladná výroba. Tato práce si klade za cíl popsat metodu výroby a vlastnosti fluxgate senzoru s jádrem vytištěným pomocí technologie inkjet na tiskárně Fujifilm Dimatix. Dalším úkolem, je změřit a porovnat vlastnosti takových senzorů s různým složením inkoustu. Materiál použitý pro výrobu obsahuje feromagnetické nanočástice. Senzory jsou zapojeny v otevřené smyčce. Pro generování měřeného pole jsou použity Helmholtzovy cívky. Výstupní napětí je měřeno lock-in zesilovačem na druhé harmonické. Pro některá měření byl využit program v LabVIEW. Citlivost, linearita a šum jsou na závěr porovnány se senzorem s jádrem z amorfni pásy.

**Klíčová slova:** fluxgate, inkjet tisk, LabVIEW, nanočástice

## Abstract

With significant advancement in material manufacturing new ways of utilising them are explored. Fluxgate sensors have gained popularity due to their sensitivity and ruggedness, their disadvantage lays in demanding and costly production.

This work aims to describe manufacturing method and properties of fluxgate sensor core, printed using inkjet technology with Fujifilm Dimatix printer.

Next task is to measure and compare properties of these sensors with various ink composition. Materials used for manufacturing contains ferromagnetic nanoparticles. Sensors are operated in open loop. For measured magnetic field generation are used Helmholtz coils. Output voltage is measured on second harmonics with lock-in amplifier. For some measurements LabVIEW program was used. Sensitivity, linearity and noise are in conclusion compared to sensor with amorphous core.

**Keywords:** fluxgate, inkjet printing, LabVIEW, nanoparticles

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Teoretický základ</b>	<b>3</b>
1.1 Magnetismus .....	3
1.2 Paralelní fluxgate senzory .....	5
1.2.1 Úvod .....	5
1.2.2 Princip .....	5
1.2.3 Výstupní napětí .....	6
1.2.4 Vlastnosti .....	7
1.2.5 Tvary fluxgate senzorů .....	7
1.2.6 Jádru .....	7
1.2.7 Vývoj .....	8
1.3 SQUID magnetometry .....	8
1.4 LabVIEW .....	9
1.5 Inkjet tisk .....	10
<b>2 Části měřicího obvodu a program</b>	<b>13</b>
2.1 TOE 8870 .....	13
2.2 Lock-in SR865 .....	13
2.3 Spektrální analyzátor Agilent 35670A .....	13
2.4 Program .....	13
<b>3 Senzory</b>	<b>15</b>
3.1 Vlastnosti inkoustu .....	15
3.2 Vytisknutá jádra .....	16
<b>4 Měření</b>	<b>19</b>
4.1 Úvod .....	19
4.2 Měření parametrů fluxgate senzoru .....	19
4.3 I1 .....	20
4.4 I2 .....	23
4.5 Amorfni páska .....	28
<b>5 Závěr</b>	<b>31</b>
<b>Literatura</b>	<b>33</b>
<b>A Naměřená data</b>	<b>35</b>
A.1 Excel tabulky s naměřenými hodnotami .....	35
A.2 Data z diskety spektrálního analyzátoru .....	35
<b>B Programy</b>	<b>37</b>
B.1 LabVIEW programy .....	37

## Obrázky

1.1 Křivka magnetického pole vytvořeného proudem v kruhovém vodiči [3]. . . . .	3
1.2 Hysterezní křivka [5], kde $M_s$ je stav nasycení, kdy je magnetizace maximální, $M_r$ je remanentní magnetizace, na kterou zůstává látka zmagnetizovaná po vynulování intenzity magnetického pole, a $\pm H_c$ je koercivita, což je intenzita magnetického pole při které se hodnota magnetizace vrátí na nulu [4]. . . . .	4
1.3 Princip fluxgate senzoru [6]. . . . .	5
1.4 Zjednodušené průběhy veličin fluxgate senzoru, a) pro nulové vnější pole, b) pro měřené vnější pole $H_0$ [6].	6
1.5 Konstrukce fluxgate senzorů, a) dvoujádrový typ, b) toroidní typ [6].	8
1.6 a) Schéma SQUID-MS, b) kalibrovaný výstup SQUIDu [14]. . .	9
1.7 Grafické znázornění kontinuálního tisku, kdy jsou kapky inkoustu buď zachytávány do odpadní nádržky, nebo dopadají na tiskovou plochu v závislosti na náboji. Pozice dopadu může být během letu ovlivněna [16].	11
1.8 Grafické znázornění tisku na vyžádání, kdy jsou kapky inkoustu vypouštěny z hlavice na základě řídicího signálu a dopadají přímo pod hlavici, a) termální, b) piezoelektrický [16]. . . . .	11
1.9 Znázornění průběhu letu kapek mezi tryskou a tiskovou plochou, b) příklad kapky s ocasem, který se s kapkou před dopadem spojí, c) příklad vytvoření vedlejší kapky [18]. . . . .	12
3.1 M-H křivka měřená pro první typ inkoustu při teplotě 5 K a 300 K měřená Ing. Mgr. Ondřejem Kamanem, Ph.D. . . . .	15
3.2 M-H křivka měřená pro druhý typ inkoustu při teplotě 300 K měřená Ing. Mgr. Ondřejem Kamanem, Ph.D. . . . .	16
3.3 Vytištěné jádro senzoru z inkoustu I1 v dielektrické ochranné vrstvě na plastovém substrátu. . . . .	17
3.4 Vytištěný senzor z inkoustu I2 s navinutou budicí cívkou. . . . .	17
3.5 Hotový senzor z inkoustu I1 zapojený k budicímu obvodu se snímacím obvodem. . . . .	18
4.1 Schéma zapojení měřicího obvodu.	19
4.2 Přenosová charakteristika pro senzor I1 pro frekvenci 42,2 kHz, kdy je senzor v rezonanci. . . . .	21
4.3 Přenosová charakteristika pro senzor I1 pro frekvenci 37 kHz, kdy je senzor mimo rezonanci. . . . .	21
4.4 Záznam spektrálního analyzátoru Agilent 35670A při měření výkonové spektrální hustoty (PSD) pro I1. . .	22
4.5 Záznam z osciloskopu při měření senzoru I2 v magnetickém poli 50 $\mu$ T, první kanál (žlutý) je referenční signál z generátoru, druhý kanál (červený) je signál na měřicí cívce a třetí kanál (modrý) je signál na budicí cívce. Měřená druhá harmonická je proti první harmonické na měřicí cívce nevýrazná. . . . .	23
4.6 Záznam z osciloskopu při měření senzoru I2 při hodnotě magnetického pole 50 $\mu$ T, první kanál (žlutý) je referenční signál z generátoru, druhý kanál (červený) je signál na měřicí cívce, třetí kanál (modrý) je půl periody napětí na budicí cívce a čtvrtý kanál (zelený) je budicí proud. . . . .	24
4.7 Nákres zapojení měřicího obvodu s napětovým děličem. . . . .	24
4.8 Přenosová charakteristika pro senzor I2 pro frekvenci 50 kHz při budícím napětí 5 V. . . . .	25

4.9 Přenosová charakteristika pro senzor I2 pro frekvenci 25 kHz při budícím napětí 5 V. ....	25
4.10 Přenosová charakteristika pro senzor I2 pro frekvenci 100 kHz při budícím napětí 5 V. ....	25
4.11 Přenosová charakteristika pro senzor I2 pro frekvenci 50 kHz při budícím napětí 8 V. ....	26
4.12 Závislost citlivosti na frekvenci pro 25 kHz, 50 kHz a 100 kHz. ...	26
4.13 Závislost citlivosti na střídě pro 15 kHz, 20 kHz a 30 kHz. ....	26
4.14 Vytištěný senzor z inkoustu I2 v ochranném pouzdře. ....	27
4.15 Přenosová charakteristika pro senzor I2 v ochranném pouzdře pro budící frekvenci 6,25 kHz. ....	27
4.16 Záznam z osciloskopu při měření senzoru z amorfní pásky při hodnotě magnetického pole 194 $\mu$ T, první kanál (žlutý) je referenční signál z generátoru, druhý kanál (červený) je signál na měřicí cívce, třetí kanál (modrý) napětí na budicí cívce a čtvrtý kanál (zelený) je budící proud. ....	28
4.17 Přenosová charakteristika pro senzor s amorfním jádrem pro 12,8 kHz. ....	29
4.18 Přenosová charakteristika pro senzor s amorfním jádrem pro 8,3 kHz. ....	29
4.19 Závislost citlivosti na frekvenci pro senzor s amorfním jádrem pro 1, 5, 7, 10, 12,8 a 14 kHz. ....	29
4.20 Záznam hodnot ze spektrálního analyzátoru při měření PSD pro senzor s amorfním jádrem. ....	30

## Tabulky

5.1 Tabulka citlivosti senzoru I1 ...	31
5.2 Tabulka citlivosti senzoru I2 ...	31
5.3 Tabulka citlivosti pro senzor s jádrem z amorfní pásky. ....	31
5.4 Tabulka citlivosti, linearity a šumu senzorů. ....	32







## Úvod

Cílem této práce je sestavit fluxgate senzor pomocí tiskové technologie inkjet pro tisk jádra a ručního navinutí budící cívky a následné zjištění jeho vlastností. Použité inkousty obsahují feromagnetické nanočástice různého složení a jejich vlastnosti jsou pozorovány před samotným tiskem. Hlavní motivací je částečné zjednodušení a zautomatizování výroby tohoto typu senzorů. Jejich výsledné vlastnosti jsou měřeny v laboratoři pomocí magnetického pole generovaného Helmholtzovými cívkami, výstupní napětí je měřeno lock-in zesilovačem na druhé harmonické. Při měření šumu je použit spektrální analyzátor v režimu FFT. Pro porovnání jsou stejné vlastnosti přeměřeny pro senzor s jádrem z amorfní pásy.

V první části jsou rozebrány základy magnetismu, fungování fluxgate senzorů a jejich vlastnosti, SQUID magnetometry a jejich využití pro měření vlastností materiálů, programovací prostředí LabVIEW a princip inkjet tisku. V další části jsou popsány součásti měřícího obvodu a program v LabVIEW použitý při měření. Pro senzory jsou nejprve popsány vlastnosti samotného inkoustu a jader a následně změřeny vlastnosti jako citlivost, linearita a šum. V závěru jsou pak výsledky porovnány a diskutovány.

Práce navazuje na vědecký článek [1], který se také zabývá fluxgate senzorem s tištěným jádrem. Senzory měřené v této práci se liší složením inkoustu, metodou tisku a tvarem jádra.

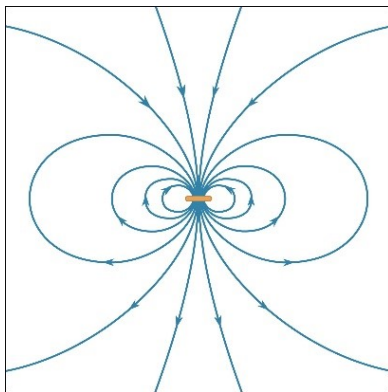


# Kapitola 1

## Teoretický základ

### 1.1 Magnetismus

Magnetické jevy jsou spjaté s jevy elektrickými, protože kolem pohybujících se nábojů vzniká magnetické pole. Ampérův zákon celkového proudu, daný vztahem  $\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I$ , popisuje, že křivkový integrál intenzity magnetického pole přes uzavřenou křivku je roven celkové hodnotě proudu procházejícím plochou křivky. Dané pole odpovídá poli magnetického momentu uvnitř proudové křivky. Hodnota magnetického momentu je v takovém případě dána vztahem  $[\mathbf{m}] = I \cdot A$ , kde  $I$  je hodnota proudu ve smyčce a  $A$  je plocha smyčky. Na obrázku (Obr. 1.1) jsou křivky magnetického pole kolem vodivé smyčky [2].



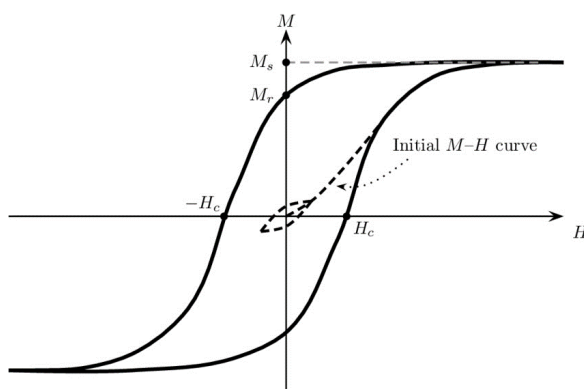
**Obrázek 1.1:** Křivka magnetického pole vytvořeného proudem v kruhovém vodiči [3].

V látkách jsou zdrojem magnetického momentu elektrony. Výsledný magnetický moment materiálu je pak vektorovým součtem všech dílčích momentů. Vlastnost látek, která odpovídá součtu jednotlivých magnetických momentů obsáhlých v elementárním objemu materiálu a charakterizuje jeho chování ve vnějším magnetickém poli je magnetizace, značená  $\mathbf{M}$  a měřená v  $A \cdot m^{-1}$ . Magnetizaci a intenzitu magnetického pole můžeme použít pro popis magnetické indukce působící na materiál v magnetickém poli rovnicí  $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$ . Jednotkou magnetické indukce je  $T$  (tesla) [2] [4].

Magnetická indukce se také dá popsat jako hustota magnetického toku,  $\mathbf{B} = \frac{\phi}{A}$ , kde  $\phi$  je magnetický tok a jeho jednotkou je  $Wb$  (weber). Pro materiály je důležitá úměra magnetizace vzhledem k vnějšímu poli, to popisuje magnetická susceptibilita, která je dána rovnicí  $\chi = \frac{M}{H}$ . Stejný vztah mezi magnetickou indukcí a magnetickým polem je magnetická permeabilita  $\mu = \frac{B}{H}$ . Látky můžeme rozdělit podle závislosti magnetizace a magnetického pole uvnitř látky na silně a slabě magnetické [2] [4].

Pro slabě magnetické látky je charakteristická lineární závislost magnetizace a intenzity magnetického pole, kde úměrnou konstantou je susceptibilita. Znaménko susceptibility látky rozhoduje o tom, jestli je materiál paramagnetický, pro kladnou hodnotu susceptibility, nebo diamagnetický, pro zápornou hodnotu susceptibility [2].

Pro silně magnetické látky platí výrazně vyšší hodnoty susceptibility než pro slabě magnetické a neplatí pro ně lineární závislost mezi magnetizací a intenzitou magnetického pole. Podle způsobu uspořádání vnitřních magnetických momentů rozlišujeme feromagnetické a ferrimagnetické látky. Feromagnetické látky mají nejjednodušší orientaci magnetických momentů, kdy všechny směřují stejným směrem a dochází v nich k spontánní magnetizaci, což znamená, že části látky dojdou do stavu magnetického nasycení, tedy jsou všechny magnetické momenty dané oblasti orientovány stejným směrem bez působení vnějšího magnetického pole. Pro feromagnetické látky platí, že se jejich závislost magnetizace na intenzitě magnetického pole pohybuje po hysterezní křivce (Obr. 1.2) [2] [4].

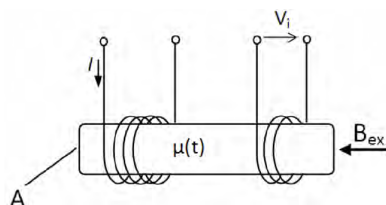


**Obrázek 1.2:** Hysterezní křivka [5], kde  $M_s$  je stav nasycení, kdy je magnetizace maximální,  $M_r$  je remanentní magnetizace, na kterou zůstává látka zmagnetizovaná po vynulování intenzity magnetického pole, a  $\pm H_c$  je koercivita, což je intenzita magnetického pole při které se hodnota magnetizace vrátí na nulu [4].

## 1.2 Paralelní fluxgate senzory

### 1.2.1 Úvod

Fluxgate senzory jsou běžně používané vektorové senzory magnetického pole a paralelní fluxgate senzory jsou nejběžnějším typem fluxgate senzoru, které měří pole paralelní s polem generovaným excitačním proudem v budící cívkce. Tyto senzory mají vysokou citlivost a přesnost, měří stejnosměrné i střídavé magnetické pole o amplitudě 10 pT až 1 mT. Nevyžadují kryogenní teploty a mají zpravidla nízkou spotřebu energie [6]. Skládají se z feromagnetického jádra, kolem něj ovinuté budící cívky a galvanicky oddělené snímací cívky, na které je měřeno indukované napětí (Obr. 1.3). Fluxgate senzory mají širokou škálu využití například navigační systémy, geologické aplikace, vesmírné mise, bezpečnostní a vojenská technika a lékařství [7].



Obrázek 1.3: Princip fluxgate senzoru [6].

### 1.2.2 Princip

V této práci se zabývám výhradně senzory paralelního typu. Pro budící cívku se obvykle používá proud sinusového nebo obdélníkového tvaru, preferovaný je obdélníkový tvar, který se snadno generuje. Střídavým budícím proudem  $I_{exc}$  frekvence  $f_{exc}$  procházejícím přes budící cívku dochází periodicky ke změnám permeability magnetického jádra a změně magnetického toku. Pro správnou funkci senzoru je potřeba, aby v každé periodě docházelo k saturaci jádra v obou polaritách. Výsledkem změny magnetického toku je indukce napětí na snímací cívce, které je výstupem senzoru. V případě nulového vnějšího magnetického pole je průběh magnetického toku i indukovaného napětí antisymetrický a neobsahuje žádné sudé harmonické (Obr. 1.4a). V přítomnosti vnějšího magnetického pole je průběh magnetického toku i indukovaného napětí nesymetrický a obsahuje sudé harmonické budící frekvence  $f_{exc}$ , kde nejdůležitější zpravidla je druhá harmonická. Amplituda měřeného napětí na druhé harmonické je úměrná stejnosměrnému měřenému magnetickému poli. Důvod výskytu tohoto napětí na druhé harmonické je periodicky se měnící permeabilita jádra, která je dána absolutní hodnotou proudu [8]. Výstupní signál je obvykle dále zpracováván, například pomocí lock-in zesilovače.

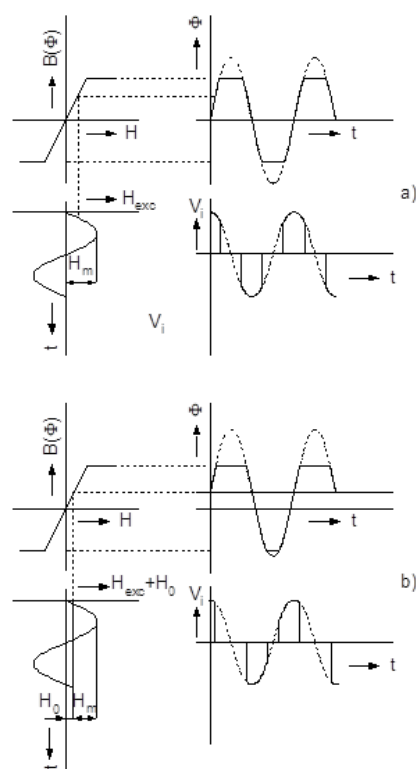


Fig. 3.2.

**Obrázek 1.4:** Zjednodušené průběhy veličin fluxgate senzoru, a) pro nulové vnější pole, b) pro měřené vnější pole  $H_0$  [6].

### 1.2.3 Výstupní napětí

Výpočet indukovaného výstupního napětí vychází z Faradayova indukčního zákona

$$V_i = -\frac{d\Phi_i}{dt} \quad (1.1)$$

Kde  $V_i$  je indukované elektrické napětí a  $\Phi_i$  je celkový magnetický tok protékající obvodem. Obecná rovnice pro napětí indukované v cívce s jádrem má tvar [8]

$$V_i = -\left(NA\mu_0\mu_r\frac{d\mathbf{H}(t)}{dt} + N\mu_0\mu_r\mathbf{H}\frac{dA(t)}{dt} + NA\mathbf{H}\mu_0\frac{d\mu_r(t)}{dt}\right) \quad (1.2)$$

Kde  $V_i$  je indukované napětí na cívce s  $N$  závity,  $A$  je plocha cívky,  $\mu_0$  je permeabilita vakua,  $\mu_r$  je hodnota relativní permeability jádra senzoru a  $\mathbf{H}$  je intenzita magnetického pole v jádře cívky. To se dá upravit kvůli konstantní ploše cívky a konstantní velikosti měřeného pole v cívce. Výsledná rovnice má tvar [8]

$$V_i = -NA\mathbf{H}\mu_0\frac{d\mu_r(t)}{dt} \quad (1.3)$$

Pro reálný senzor je potřeba započítat demagnetizační efekt (hlavně pro toroidní jádra), který vede k tomu, že intenzita magnetického pole v jádře senzoru  $H$  je menší než intenzita měřeného pole  $H_0$ . Vzorec pro magnetickou indukci v jádře můžeme zapsat jako [9]

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \mu_r \mathbf{H}_0}{1 + D(\mu_r - 1)} \quad (1.4)$$

kde  $\mathbf{B}$  je magnetická indukce v jádře a  $D$  je demagnetizační činitel. Rovnice (1.3) se změnilo do podoby [10]

$$V_i = -NAH_0\mu_0 \frac{(1 - D)}{[1 + D(\mu_r - 1)]^2} \frac{d\mu_r(t)}{dt} \quad (1.5)$$

### 1.2.4 Vlastnosti

Citlivost senzoru je podíl změny měřeného indukovaného napětí a změny měřeného pole v lineární oblasti senzoru. Jednotka je V/T. Mezi faktory ovlivňující citlivost patří tvar, velikost a materiál jádra, počet vinutí snímací cívky, tvar a frekvence budícího napětí. Pro zlepšení citlivosti může být do obvodu připojen ladící kondenzátor [6].

Šum senzoru je nežádoucí, časově proměnná, náhodná změna indukovaného napětí. Šum má obvykle  $1/f$  charakter, popisuje ho tedy rovnice  $P(f) = \frac{P(1)}{f}$  kde  $P(1)$  je výkonová spektrální hustota na frekvenci 1 Hz. Jednotka je  $\frac{T}{\sqrt{\text{Hz}}}$ . Na hodnotu šumu bude mít vliv tvar, velikost a materiál jádra, velikost budícího proudu, pro některé materiály pracovní teplota [6].

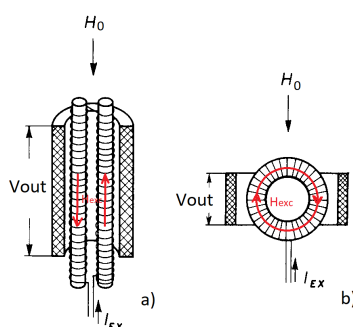
### 1.2.5 Tvary fluxgate senzorů

Fluxgate senzory můžeme rozdělit podle typu jádra na senzory s jádrem s otevřeným (válcový tvar (Obr. 1.5a)) a uzavřeným (toroid (Obr. 1.5b)) magnetickým tokem. Pro tuto práci se soustředím na toroidní a oválný (racetrack) tvar. Jejich výhodou je, že jádro můžeme rozdělit na dvě symetrické části, které budeme budit signálem s opačnou polaritou. Tím odstraníme z výsledného signálu složku na lichých harmonických budícího napětí. Jádro tvaru racetrack má nižší demagnetizační faktor než kruhové jádro a díky tomu lepší citlivost. Kruhové jádro má oproti racetrack tvaru výhodu snazšího vyrovnání nesymetrie otáčením jádra [7].

### 1.2.6 Jádro

Při výrobě fluxgate senzoru je potřeba vhodně zvolit materiál, ze kterého bude vytvořeno jádro. I přes to, že senzory mají rozdílné požadavky na vlastnosti materiálu jádra v závislosti na tvaru jádra, pracovních podmínkách, způsobu zapojení, frekvenci a způsobu buzení, zapojení a metodě zpracování





**Obrázek 1.5:** Konstrukce fluxgate senzorů, a) dvoujádrový typ, b) toroidní typ [6].

výstupního signálu, obecné požadavky pro vhodný materiál budou vysoká permeabilita, nízká koercivita, nízká magnetostrikce, nízký Barkhausenův šum, nízké vnitřní mechanické napětí, minimum strukturálních nedokonalostí, hladký povrch a jednotný průřez [9].

Obvykle používané materiály pro výrobu fluxgate jader jsou permalloy s vysokou permeabilitou a nízkou magnetostrikcí a amorfní magnetické slitiny. Dalším testovaným materiálem jsou nanokrystalické slitiny, jejichž hlavní problém je vysoký šum, ale které pracují při vyšších teplotách [6].

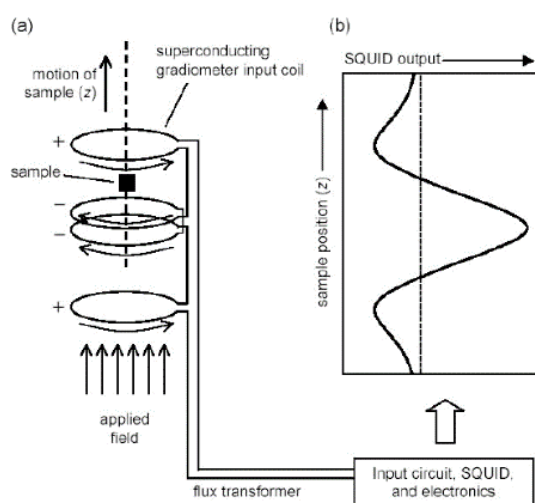
### 1.2.7 Vývoj

Díky nízkým požadavkům na pracovní podmínky, malé rozměry a dobré měřicí vlastnosti se fluxgate senzory teší stále větší popularitě, ale kvůli vysokým nákladům a náročným požadavkům na výrobu je jejich použití v běžných denních aplikacích omezené. Proto je velký vývoj v oblasti nových způsobů výroby [11].

## 1.3 SQUID magnetometry

SQUID, neboli supravodivá kvantová interferenční zařízení, se řadí mezi nejcitlivější přístroje na měření magnetického pole. Citlivost dosahuje řádu  $fT/\sqrt{Hz}$ . Díky tomu mají široké využití jako senzory veličin, které se na magnetický tok dají převést, nebo gradiometry. Dokáží však měřit jen změnu magnetického pole a ne jeho absolutní hodnotu. Absolutní hodnotu lze získat opakovanou kalibrací a porovnáním se známým magnetickým polem. Způsob měření SQUIDu je založen na principu Josephsonova jevu pro supravodiče oddělené tenkou izolační vrstvou. Jejich hlavní nevýhodou je požadavek na nízké teploty kvůli zachování citlivosti, kolem 4K [12]. To přibližně odpovídá teplotě kapalného hélia, které se používá pro udržení dané teploty. Vysokoteplotní SQUID pracují při teplotě kapalného dusíku, přibližně 77 K, ale na rozdíl od nízkoteplotních mají vysoký šum [13].

Jedním z možných využití SQUIDu je mimo jiné i jako součást SQUID-MS (SQUID magnetometer-susceptometer), který slouží k určení jistých magnetických vlastností měřených materiálů. Hlavní výhodou SQUID-MS oproti jiným běžným způsobům jak tyto vlastnosti měřit, jako například VSM (vibrating-sample magnetometer), je vysoká citlivost, přesnost a velké teplotní rozpětí. Vzorek je možné testovat v poli až 7 T při teplotách v rozmezí přibližně od 2 K až po 300 K. Při měření je vzorek materiálu upevněn do trubice a skenován středem supravodivého magnetometru (Obr. 1.6a). Výsledný signál, který je funkcí výstupu SQUIDu vzhledem k pozici vzorku, je následně počítačově zpracován pro získání magnetického momentu (Obr. 1.6b). Kvůli principu měření jsou vlivy běžně problematických jevů, jako mikrofonie a vířivé proudy, zanedbatelné [14].

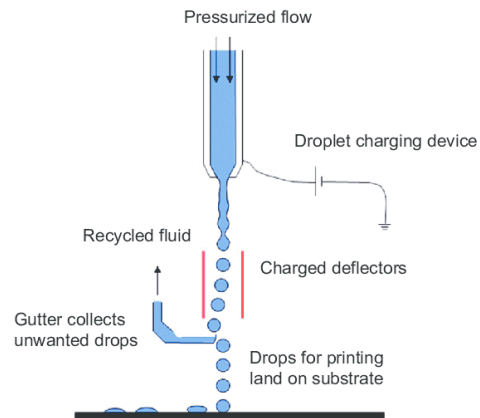


**Obrázek 1.6:** a) Schéma SQUID-MS, b) kalibrovaný výstup SQUIDu [14].

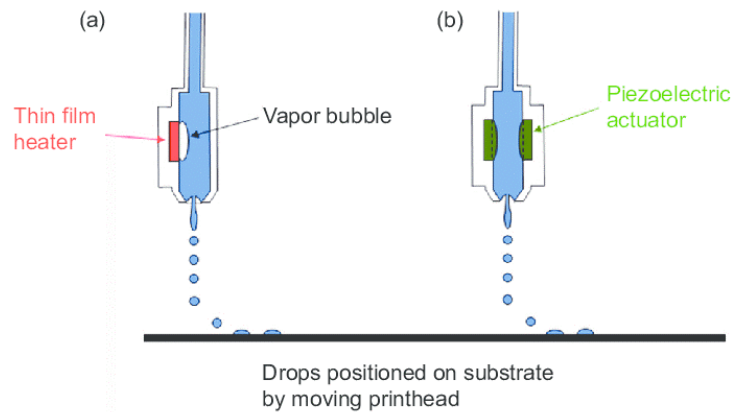
## 1.4 LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench) je grafické programovací prostředí od firmy National Instruments. Toto prostředí je určené mimo jiné pro komunikaci s laboratorními přístroji, jejich ovládání, získávání a zpracovávání dat a automatizaci měření. Každý program má dvě hlavní části. První z nich je přední panel, který se používá například k nastavení parametrů, ovládání průběhu měření a čtení získávaných dat v reálném čase. Druhá část, zdrojový kód, je blokový diagram, který je vytvořen pomocí grafického programovacího jazyku G. Nachází se zde jednotlivé funkční bloky a propojení pro tok dat, jejichž směr je předem určen. Jednotlivé programy je možné použít jako funkční bloky v jiném programu. Aby bylo možné použít program jako funkční blok, je potřeba nejdříve vytvořit jeho ikonu, kde jsou vyznačeny všechny vstupy a výstupy programu. Velká výhoda LabVIEW je rozsáhlé množství knihoven a funkcí s primárním zaměřením na komunikaci s měřicími přístroji. Umožňuje také práci s různými datovými typy a řídicími



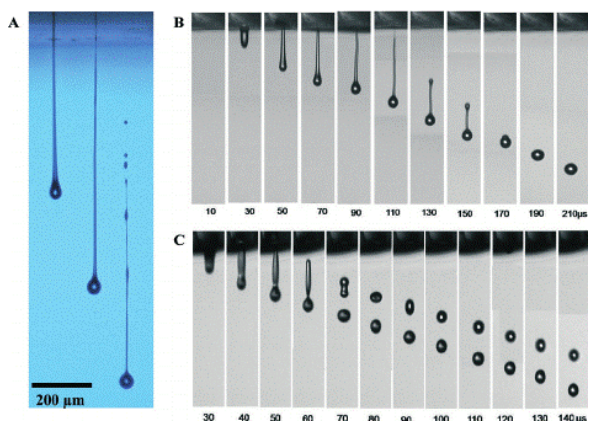


**Obrázek 1.7:** Grafické znázornění kontinuálního tisku, kdy jsou kapky inkoustu buď zachytávány do odpadní nádržky, nebo dopadají na tiskovou plochu v závislosti na náboji. Pozice dopadu může být během letu ovlivněna [16].



**Obrázek 1.8:** Grafické znázornění tisku na vyžádání, kdy jsou kapky inkoustu vypouštěny z hlavice na základě řídicího signálu a dopadají přímo pod hlavici, a) termální, b) piezoelektrický [16].

Problém 3D modelů je, že po vyschnutí má vrstva inkoustu minimální výšku [16][17].



**Obrázek 1.9:** Znázornění průběhu letu kapek mezi tryskou a tiskovou plochou, b) příklad kapky s ocasem, který se s kapkou před dopadem spojí, c) příklad vytvoření vedlejší kapky [18].

## Kapitola 2

### Části měřicího obvodu a program

#### 2.1 TOE 8870

Elektrický zdroj TOE 8870 byl použitý pro stejnosměrné napájení Helmholtzových cívek. Jedná se o stejnosměrný zdroj s maximálními hodnotami napětí a proudu 40 V a 50 A s rozlišením 10 mV a 10 mA. S přístrojem je možná dálková komunikace pomocí rozhraní GPIB nebo RS 232 a sadou příkazů SCPI [19].

#### 2.2 Lock-in SR865

Lock-in zesilovač dokáže měřit velmi malá střídavá napětí. Generuje vlastní referenční signál číslicovým fázovým závěsem z referenčního vstupu, je možno použít i interní generátor. Fázový závěs se stará o to, aby oba signály měly stejnou frekvenci a byl mezi nimi konstantní fázový posun. Přijímaný signál je zesílen a převeden na číslo v 16-bitovém převodníku. V číslicové formě je pak přenásoben se sinusovou referencí. Výsledek je pak filtrován číslicovou dolní propustí. Analogový výstup je pak získán pomocí DAC. Lock-in zesilovač je schopen měřit velmi slabé signály za přítomnosti silného rušení. Měřicí rozsah SR865 je od 1 nV do 1 V. Referenční frekvence je od 1 mHz do 4 MHz [20].

#### 2.3 Spektrální analyzátor Agilent 35670A

Spektrální analyzátor zpracovává a zobrazuje průběh signálu ve frekvenční oblasti. Agilent 35670A je dvoukanálový, s frekvenčním rozsahem 122  $\mu$ Hz až 102,4 Hz. Pro transformaci signálu z časové do frekvenční oblasti využívá rychlé Fourierovy transformace (FFT). Jde pomocí něj měřit například spektrální výkonovou hustotu [21].

#### 2.4 Program

Z důvodu zrychlení jednotlivých měření frekvenčních charakteristik byl napsán program v programovacím prostředí LabVIEW. Pomocí něj byly při

měření ovládaný stejnosměrný zdroj TOE8870 a lock-in zesilovač SR865. Pro komunikaci s TOE8870 bylo použito rozhraní GPIB 488.2, pro komunikaci s SR865 GPIB 488.2 a RS-232, podle dostupných prostředků.

Nejprve byla zprovozněna komunikace mezi přístroji a počítačem. Následně byly vytvořeny dílčí programy použité například pro nastavení přístroje, vyslání příkazu, čtení hodnot, nebo začátek a ukončení spojení. Finální program pak dává tyto jednotlivé programy dohromady, nastaví parametry přístrojů podle zvoleného nastavení, nastaví hodnotu proudu stejnosměrného zdroje, přečte změřenou hodnotu na lock-inu, hodnotu zapíše a měření opakuje, dokud se hodnota nastaveného napětí nedostane na zvolenou hranici nebo není měření manuálně zastaveno tlačítkem stop. Měřená hodnota je průběžně zapisována na přední panel a při ukončení je na předním panelu vykreslen graf průběhu. Hodnoty měřeného pole, spočítané v programu podle nastaveného proudu i hodnoty přečtené z lock-inu jsou zapisovány do zvoleného souboru v případě nastavení na předním panelu. Pro zápis je potřeba vybrat už existující soubory a hodnoty v podobě textu přepisují jejich předchozí obsah.

Na předním panelu se dá dále nastavit například maximální hodnota proudu zdroje, velikost inkrementu, počet desetinných míst při zápisu. Nastavení SR865 může být upraveno v `LockIn_open.vi` změnou hodnot konstant patřících k příslušným parametrům. Debugování bylo prováděno pomocí krokování a zobrazení průchodu dat.

## Kapitola 3

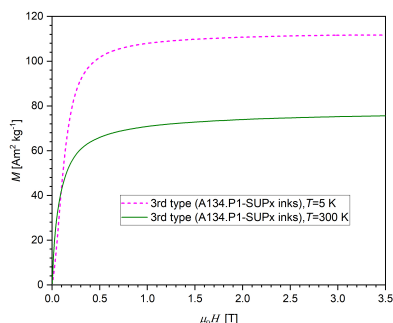
### Senzory

#### 3.1 Vlastnosti inkoustu

Pro výrobu senzorů bylo použito vytištěné jádro ze speciálních inkoustů na bázi magnetických nanočástic stabilizovaných ve směsi vody a ethylenglykolu (1:1). Byly testovány dva různé inkousty, které připravil Ing. P. Veverka, Ph.D. z Fyzikálního ústavu AV ČR. Oba inkousty obsahovaly magnetické nanočástice  $Zn_xFe_{3-x}O_4$  se spinelovou strukturou. V prvním případě, inkoust I1, se jednalo o částice  $Zn_{0.35}Fe_{2.65}O_4$  se střední velikostí krystalitů 11 nm a inkoust měl koncentraci 6.0 mg/ml, zatímco druhý vzorek, inkoust I2, byl založen na částicích o složení  $Zn_{0.10}Fe_{2.90}O_4$  se střední velikostí krystalitů  $\approx 20$  nm, avšak s nežádoucí příměsí hematitu a měl koncentraci 6.7 mg/ml.

Pro oba inkousty I1 i I2, bylo provedeno měření susceptibility a M-H křivky pomocí SQUID magnetometru a hydrodynamická velikost ve Fyzikálním ústavu AV ČR. Měření bylo provedeno na částicích získaných vysušením finálního inkoustu při teplotách 5 K a 300 K.

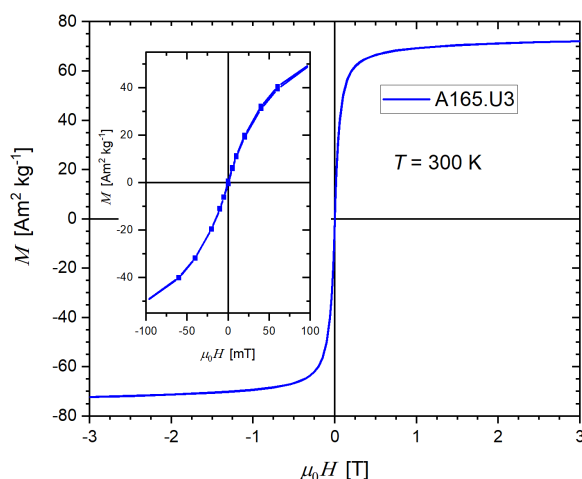
Při měření inkoustu I2, obsahující feritové částice o složení  $Zn_{0.35}Fe_{2.65}O_4$ , byly změřeny panenské křivky bez hystereze (Obr. 3.1), ale kvůli superparamagnetickému stavu částic v měřené teplotě 300 K by hysterezi nebylo možné naměřit.



**Obrázek 3.1:** M-H křivka měřená pro první typ inkoustu při teplotě 5 K a 300 K měřená Ing. Mgr. Ondřejem Kamanem, Ph.D.



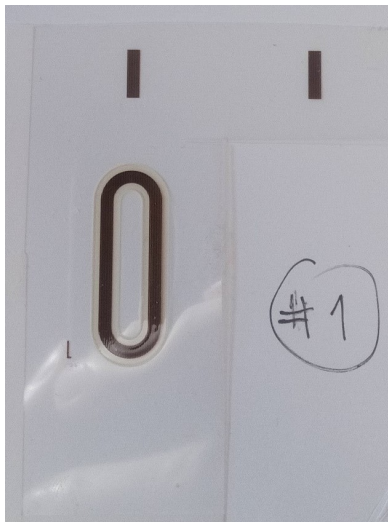
Při měření inkoustu I2, obsahující feritové částice o složení  $\text{Zn}_{0.10}\text{Fe}_{2.90}\text{O}_4$ , měl měřený vzorek hmotnost 4.9mg. Naměřená koercivita byla přibližně 13 Oe, což po převedení do soustavy SI odpovídá přibližně  $1034.5 \frac{\text{A}}{\text{m}}$ , tato hodnota je však zkreslena zbytkovým polem v supravodivém magnetu. U inkoustu I2 byla rovněž studována hydrodynamická velikost částic ve směsi voda-ethylenglykol (1:1), a to pomocí metody dynamického rozptylu světla s využitím přístroje Malvern Zetasizer Nano-ZS. Analýza dat naznačila širokou distribuci hydrodynamické velikosti se střední hodnotou (typu z average)  $\Delta Z \approx 110\text{-}120 \text{ nm}$  a  $\text{pdi} \approx 0.28\text{-}0.38$ , která je zřejmě způsobena i částečnou agregací částic a příspěvkem větších částic hematitu (statické ukazatele současně naznačily omezenou přesnost vypočtených parametrů, a to patrně v důsledku omezené koloidní stability). Pro dané složení prášku byla změřena indukce v saturaci  $B_s = 400 \text{ mT}$ , což odpovídá podle změřené magnetizační křivky (Obr. 3.2)  $M = 70 \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ . Maximální permeabilitu odhadujeme jako strmost magnetizační charakteristiky v počátku. V insertu můžeme tuto strmost odhadnout na  $35 \frac{\text{A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}}{25 \text{ mT}}$ , tedy  $\frac{200 \text{ mT}}{25 \text{ mT}}$ , z čehož vychází  $\mu_r = \frac{200 \text{ mT}}{25 \text{ mT}} = 8$ .



**Obrázek 3.2:** M-H křivka měřená pro druhý typ inkoustu při teplotě 300 K měřená Ing. Mgr. Ondřejem Kamanem, Ph.D.

### 3.2 Vytisknutá jádra

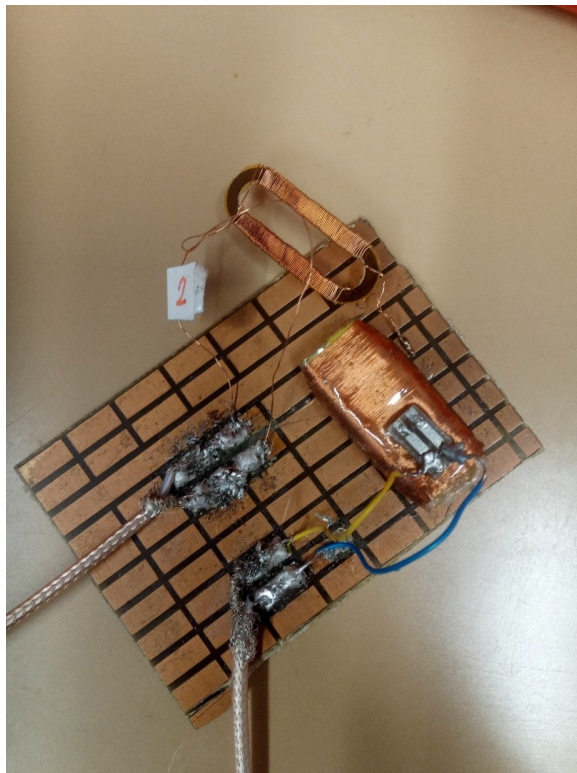
Jádra byla vytištěna pomocí inkjet technologie na tiskárně Fujifilm Dimatix DMP-2831 pomocí piezoelektrické DOD tiskové hlavy s šestnácti tryskami. Tisk na plastový substrát prováděl tým Ing. Laposy z Katedry mikroelektroniky. Každé jádro je složeno ze sto vrstev inkoustu natištěných na sobě a jednotlivé proužky inkoustu by na sebe měly navazovat bez překrytí a mezer. Nakonec byla jádra pokryta vytištěnou ochrannou dielektrickou vrstvou. Jádra jsou tvaru racetrack a rozměry jsou přibližně 3 cm x 0.8 cm. Na jádra je navinuta budicí cívka, která má 97 závitů pro I1 a 98 závitů pro I2 o průměru 0.2 mm. Měřicí cívka má 1000 závitů.



**Obrázek 3.3:** Vytištěné jádro senzoru z inkoustu I1 v dielektrické ochranné vrstvě na plastovém substrátu.



**Obrázek 3.4:** Vytištěný senzor z inkoustu I2 s navinutou budící cívkou.



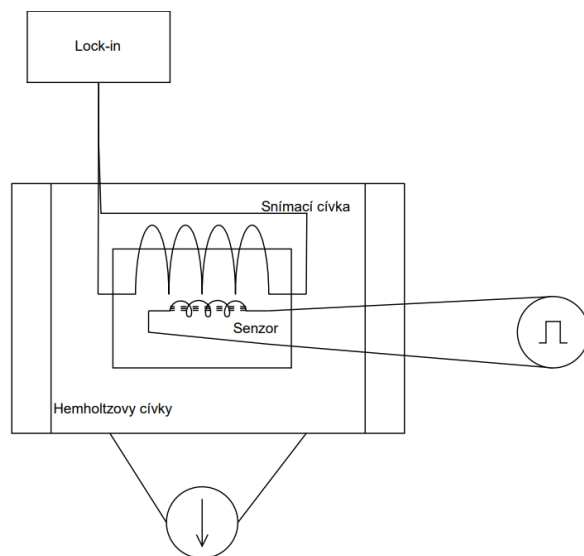
**Obrázek 3.5:** Hotový senzor z inkoustu II zapojený k budicímu obvodu se snímacím obvodem.

## Kapitola 4

### Měření

#### 4.1 Úvod

Pro senzory s tištěným jádrem popsanými v předchozí kapitole bylo provedeno několik měření, aby byly zjištěny jejich vlastnosti. Zároveň byl přeměřen i další senzor pro porovnání vlastností tištěného jádra a jádra s amorfni páskou. Měření byly citlivost, lineární rozsah a šum. Měřené pole bylo generováno v Helmholtzových cívkách a výstupní signál senzorů byl snímán a zpracován lock-in zesilovačem. Senzory byly během měření zapojeny bez zpětné vazby (Obr. 4.1). Šum byl měřen pomocí spektrálního analyzátoru.



Obrázek 4.1: Schéma zapojení měřicího obvodu.

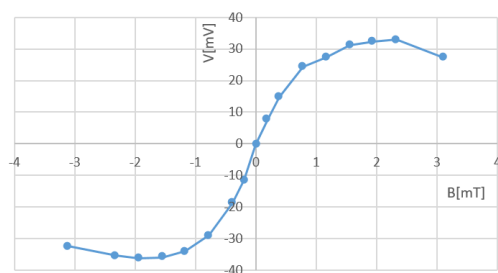
#### 4.2 Měření parametrů fluxgate senzoru

Nejprve byly vlastnosti senzorů měřeny v téměř homogenním magnetickém poli generovaném Helmholtzovými cívkami. Hodnota měřeného pole byla nastavena pomocí proudu zdroje TOE 8870. Přepočet z proudu na intenzitu

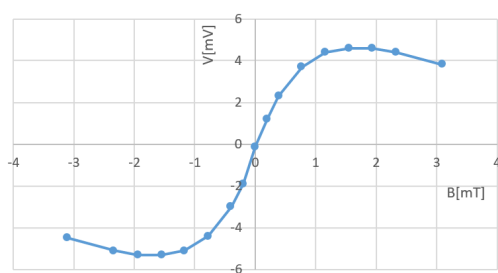
magnetického pole je  $H = I \cdot 388,4$ . Pomocí lock-in zesilovače SR865 byla měřena druhá harmonická napětí ze snímací cívky. Jako reference pro lock-in byl použit zdroj budicího napětí. Zdroj TOE 8870 i lock-in zesilovač SR865 byly ovládány počítačem pomocí programu v LabVIEW, díky kterému bylo zautomatizováno měření převodní charakteristiky. Hlavní motivací pro vznik programu bylo zrychlení měření, mimo jiné proto, že při vyšších hodnotách měřeného pole docházelo k přílišnému zahřátí Helmholtzových cívek. V průběhu měření charakteristik se ukázalo jako problém i zahřívání budicí cívky, protože ochranná vrstva kolem inkoustu se začala tavit a během měření docházelo k různě závažným poškozením senzorů. Další měřenou vlastností byl šum, k tomu se použil spektrální analyzátor Agilent 35670A. Pro výpočet šumu je použita rovnice  $N = \frac{H \cdot \text{Amp} \cdot P(1)}{S \cdot 10}$  kde N je výsledná hodnota šumu, H je měřené pole, S je citlivost senzoru, Amp je zesílení lock-in zesilovače a P(1) je hodnota spektrální výkonové hustoty ve V/Hz změřené spektrálním analyzátozem na frekvenci 1 Hz.

### 4.3 I1

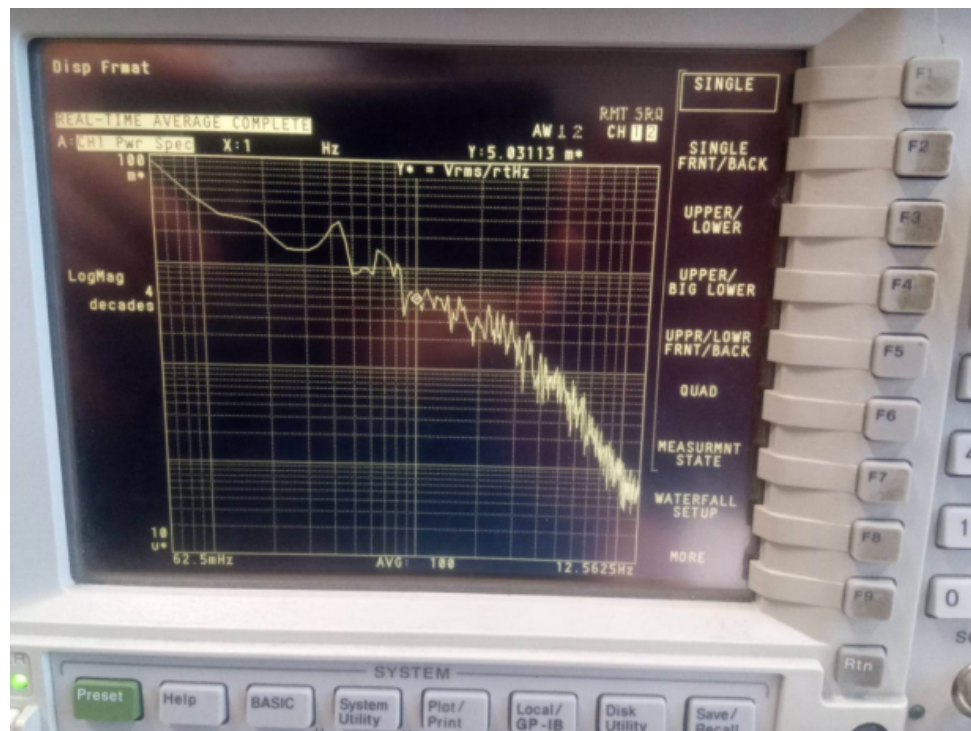
Pro senzor I1 byl při měření pro budicí napětí použit funkční generátor 33120A. Napětí mělo tvar sinusovka s amplitudou  $20 V_{pp}$ . Nastavení lock-in zesilovače byly citlivost 10 mV/10 V, časová konstanta 30 ms, filtr 24 dB. Změřené přenosové charakteristiky pro dvě různé frekvence 42,2 kHz a 37 kHz jsou graficky znázorněny (Obr. 4.2, Obr. 4.3). Frekvence 42,2 kHz byla experimentálně zjištěna jako rezonanční frekvence, kdy je výstupní napětí nejvyšší. Jedná se o parametrickou rezonanci indukčnosti snímací cívky a její parazitní kapacity. Druhá frekvence byla vybrána mimo rezonanci pro porovnání. Z naměřených dat byla zjištěna lineární oblast senzoru jako  $\pm 0,8 \text{ mT}$ . Citlivost senzoru byla změřena jako 2 mV/100  $\mu\text{T}$ . Pro měření šumu pomocí spektrálního analyzátoru bylo nastaveno měření spektrální výkonové hustoty pomocí FFT z výstupu lock-inu. Měření šumu proběhlo s parametry lock-inu sensitivita 10 mV na 10 V, časová konstanta 30 ms, filtr 24 dB. Pro spektrální analyzátor bylo nastaveno průměrování přes sto vzorků rychlým průměrováním s překrytím 90%, frekvence od 62,5 mHz až po 12,56 Hz, váhovací okno Hannovo (Obr. 4.4). Hodnota šumu byla na základě naměřené hodnoty ze spektrálního analyzátoru dopočítána jako  $\frac{250 \text{ nT}}{\sqrt{\text{Hz}}}$  na frekvenci 1 Hz.



**Obrázek 4.2:** Přenosová charakteristika pro senzor I1 pro frekvenci 42,2 kHz, kdy je senzor v rezonanci.



**Obrázek 4.3:** Přenosová charakteristika pro senzor I1 pro frekvenci 37 kHz, kdy je senzor mimo rezonanci.

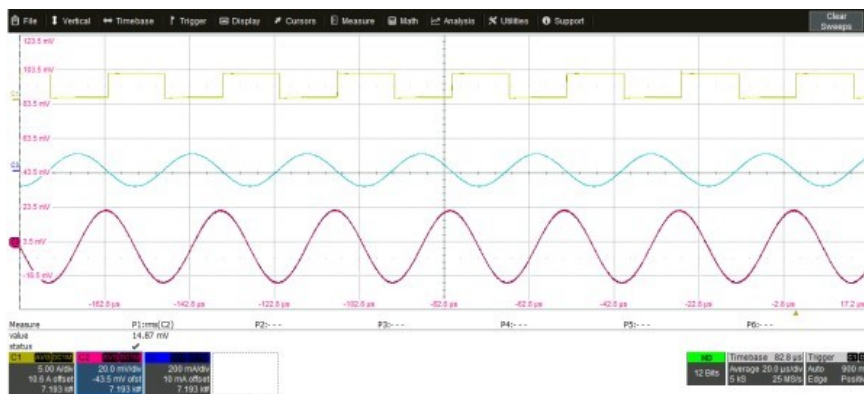


**Obrázek 4.4:** Záznam spektrálního analyzátoru Agilent 35670A při měření výkonové spektrální hustoty (PSD) pro I1.

## 4.4 12

Při měření vlastností senzoru I2 při buzení sinusovým napětím s amplitudou  $20\text{ V}_{pp}$  byla naměřena extrémně nízká citlivost,  $25\ \mu\text{V}/1\text{ mT}$ , protože nedocházelo k dostatečnému nasycení jádra. Průběh měření byl sledován osciloskopem (Obr. 4.5) a je vidět nevýrazná druhá harmonická. Z toho důvodu byl sinusový generátor nahrazen pulsním.

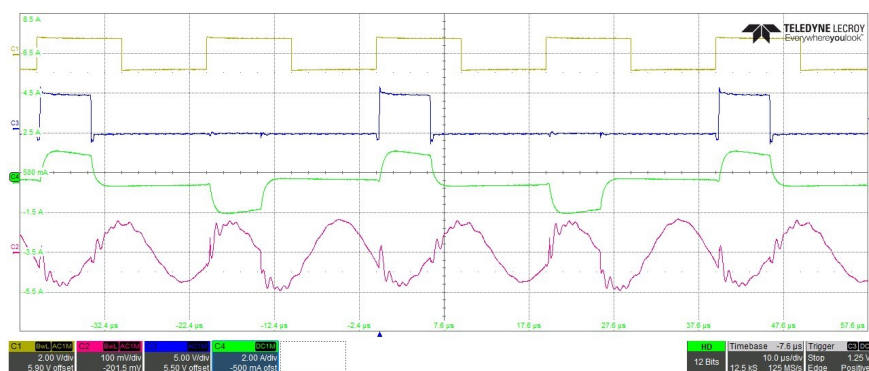
Pro senzor I2 byl jako budící napětí použit pulsní generátor s amplitudou  $5\text{ V}$  pro frekvenci  $25, 50$  a  $100\text{ kHz}$  a  $8\text{ V}$  pro frekvenci  $50\text{ kHz}$ . Duty cycle pro měření byl nastaven na hodnotu  $25\%$ , aby se snížila efektivní hodnota budicího proudu a senzor se méně zahříval. Průběh byl opět sledován osciloskopem (Obr. 4.6) a je patrné zlepšení. Hodnota paralelního ladícího kapacitoru při měření byla  $2,25\text{ nF}$  pro frekvenci  $25\text{ kHz}$ ,  $40\text{ pF}$  pro frekvenci  $50\text{ kHz}$  a  $120\text{ pF}$  pro frekvenci  $100\text{ kHz}$ . Tyto hodnoty pro maximální citlivost byly zjištěny experimentálně. Kvůli příliš výrazné první harmonické musel být připojen dělič napětí (Obr. 4.7), pro snížení napětí na desetinu, aby nebyl vstup lock-inu přetížen. Nastavení lock-in zesilovače bylo  $500\ \mu\text{V}$ ,  $30\text{ ms}$ , filtr  $24\text{ dB}$ . Změřené přenosové charakteristiky jsou graficky znázorněny (Obr. 4.8, Obr. 4.9, Obr. 4.10, Obr. 4.11). Zjištěná lineární oblast pro senzor I2 odpovídá hodnotě  $2\text{ mT}$ . Citlivost senzoru byla změřena jako  $299\ \mu\text{V}/100\ \mu\text{T}$ . Pomocí spektrálního analyzátoru byl následně změřen šum s parametry lock-inu sensitivity  $1\text{ mV}$  na  $10\text{ V}$ , časová konstanta  $30\text{ ms}$ , filtr  $24\text{ dB}$ . Pro spektrální analyzátor bylo nastaveno průměrování přes sto vzorků rychlým průměrováním s překrytím  $90\%$ , frekvence od  $62,5\text{ mHz}$  až po  $12,56\text{ Hz}$ , Hannovo okno. Hodnota šumu byla na základě naměřené hodnoty ze spektrálního analyzátoru dopočítána jako  $131,7\text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$  na frekvenci  $1\text{ Hz}$ . Pro senzor byly změřeny závislosti citlivosti na frekvenci a střídě (Obr. 4.12, Obr. 4.13). Před měřením se změnou střídý došlo vlivem používání k zahřátí senzoru nad hraniční teplotu, to vedlo k poškození senzoru a zhoršení vlastností.



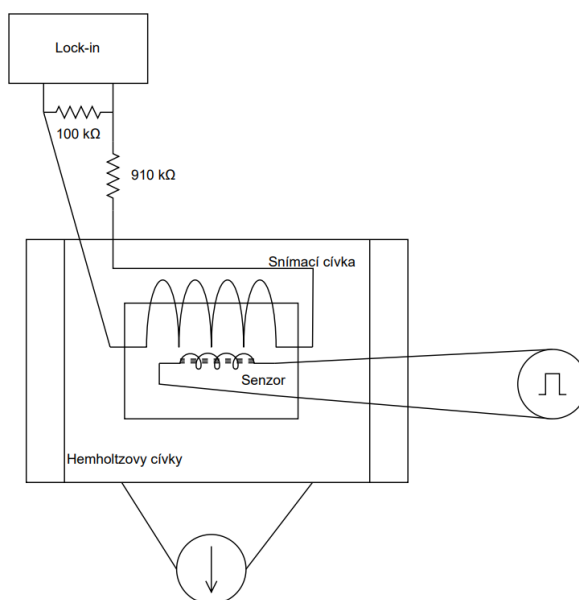
**Obrázek 4.5:** Záznam z osciloskopu při měření senzoru I2 v magnetickém poli  $50\ \mu\text{T}$ , první kanál (žlutý) je referenční signál z generátoru, druhý kanál (červený) je signál na měřicí cívce a třetí kanál (modrý) je signál na budící cívce. Měřená druhá harmonická je proti první harmonické na měřicí cívce nevýrazná.



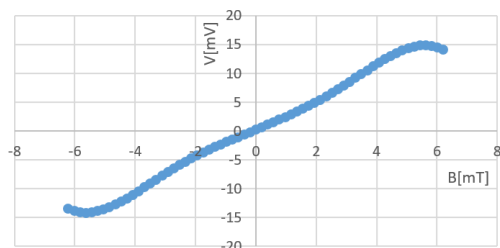
#### 4. Měření



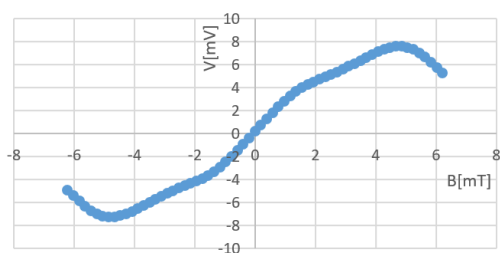
**Obrázek 4.6:** Záznam z osciloskopu při měření senzoru I2 při hodnotě magnetického pole  $50 \mu\text{T}$ , první kanál (žlutý) je referenční signál z generátoru, druhý kanál (červený) je signál na měřicí cívce, třetí kanál (modrý) je půl periody napětí na budicí cívce a čtvrtý kanál (zelený) je budicí proud.



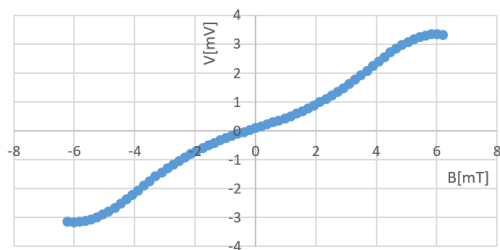
**Obrázek 4.7:** Návrh zapojení měřícího obvodu s napětovým děličem.



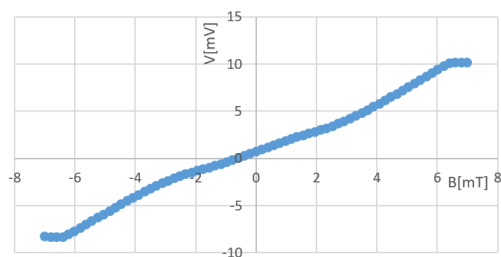
**Obrázek 4.8:** Přenosová charakteristika pro senzor I2 pro frekvenci 50 kHz při budícím napětí 5 V.



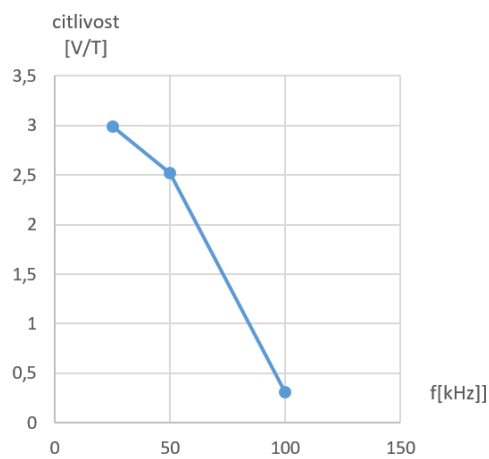
**Obrázek 4.9:** Přenosová charakteristika pro senzor I2 pro frekvenci 25 kHz při budícím napětí 5 V.



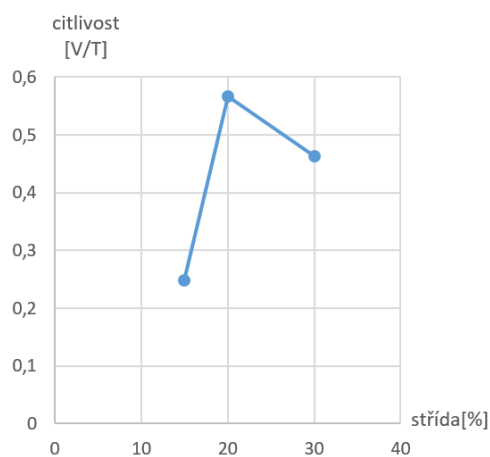
**Obrázek 4.10:** Přenosová charakteristika pro senzor I2 pro frekvenci 100 kHz při budícím napětí 5 V.



**Obrázek 4.11:** Přenosová charakteristika pro senzor I2 pro frekvenci 50 kHz při budícím napětí 8 V.

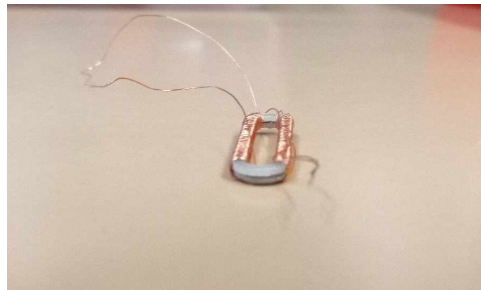


**Obrázek 4.12:** Závislost citlivosti na frekvenci pro 25 kHz, 50 kHz a 100 kHz.

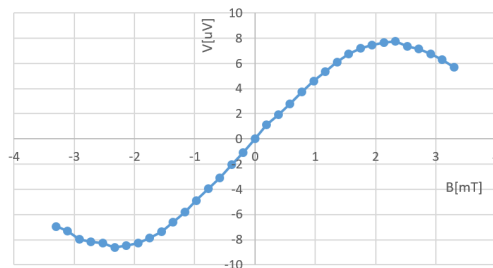


**Obrázek 4.13:** Závislost citlivosti na střídě pro 15 kHz, 20 kHz a 30 kHz.

Vlivem budícího proudu se zahřívala ochranná vrstva dielektrika kolem jádra a docházelo k jeho tavení. To mělo za následky trvalé změny vlastností senzoru. Proto musel být senzor buzen vždy co nejkratší dobu a nebylo možné použít vyššího proudu. I přes to byla většina měřených senzorů více či méně poškozena. Tomu mělo pomoci uložení jádra do pouzdra. Pro senzor I2 bylo provedeno měření v ochraném plastovém pouzdře (Obr. 4.14), které mělo zamezit poškození funkční ochranné vrstvy zahřátím, pro buzení byl použit pulsní generátor s amplitudou 5 V pro frekvenci 6,25 kHz se střídou 50% (Obr. 4. 15). Senzor měl takto mnohem nižší citlivost,  $5.51 \mu\text{V}/\text{mT}$ . Na vině bylo pravděpodobně poškození jádra. Šum pro tento senzor nebyl měřen z důvodu nízké citlivosti.



**Obrázek 4.14:** Vytisknutý senzor z inkoustu I2 v ochranném pouzdře.

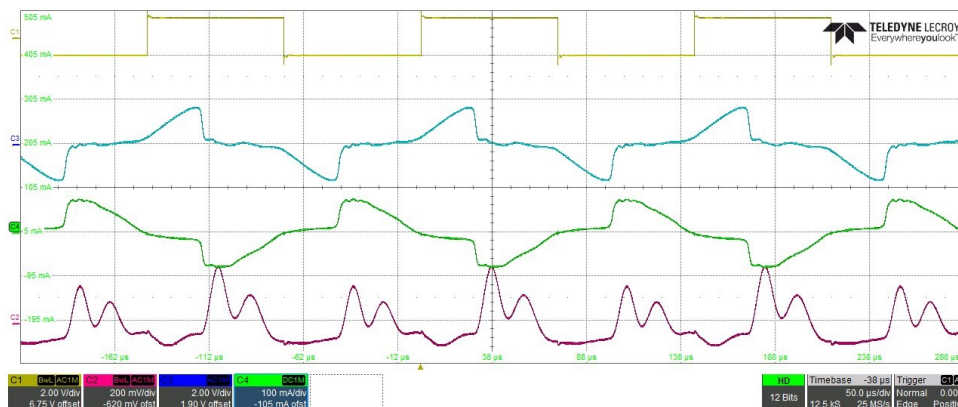


**Obrázek 4.15:** Přenosová charakteristika pro senzor I2 v ochranném pouzdře pro budící frekvenci 6,25 kHz.

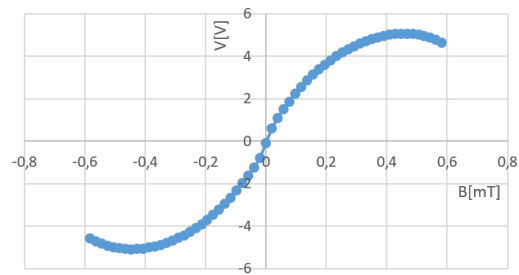
Možným řešením tavení plastového substrátu by bylo například použití jiného materiálu, například keramického substrátu. Ukázalo se však že zahřátím dochází i k poškození samotného inkoustu. Jelikož keramický substrát by sebou nesl komplikace s obráběním, složitější tisk kvůli interakci inkoustu se substrátem a problém poškození inkoustu by se nevyřešil, nebyl keramický substrát použit.

## 4.5 Amorfni páska

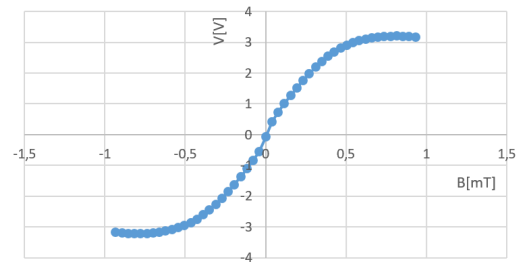
Pro tento senzor byl při měření pro budící napětí použit funkční generátor 33120A. Napětí mělo tvar sinusovky s amplitudou  $2 V_{pp}$ , průběh sledován osciloskopem (Obr. 4.16). Při měření byl opět použit napěťový dělič. Nastavení lock-in zesilovače byly citlivost  $500 \text{ mV}/10 \text{ V}$ , časová konstanta  $30 \text{ ms}$ , filtr  $24 \text{ dB}$ . Změřené přenosové charakteristiky pro dvě různé frekvence  $12,8 \text{ kHz}$ ,  $8,3 \text{ kHz}$  jsou graficky znázorněny (Obr. 4.17, Obr. 4.18). Citlivost senzoru byla změřena jako  $28,3 \text{ V}/1 \text{ mT}$  pro frekvenci  $12,8 \text{ kHz}$ . Následně byla změřena citlivost pro různé frekvence (Obr. 4.19). Pomocí spektrálního analyzátoru byl změřen šum s parametry lock-inu sensitivita  $1 \text{ mV}$  na  $10 \text{ V}$ , časová konstanta  $30 \text{ ms}$ , filtr  $24 \text{ dB}$ . Pro spektrální analyzátor bylo nastaveno průměrování přes sto vzorků rychlým průměrováním s překrytím  $90\%$ , frekvence od  $62,5 \text{ mHz}$  až po  $12,56 \text{ Hz}$ , Hannovo okno (Obr. 4.20). Hodnota šumu byla na základě naměřené hodnoty ze spektrálního analyzátoru dopočítána jako  $21,3 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$  na frekvenci  $1 \text{ Hz}$ .



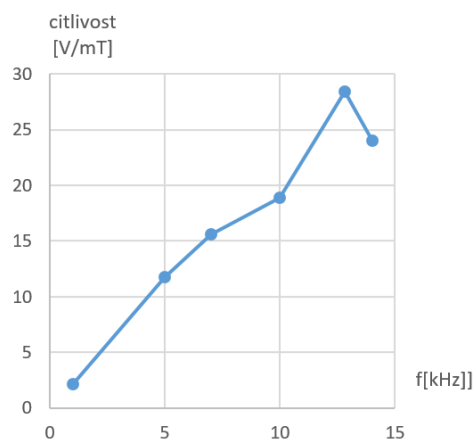
**Obrázek 4.16:** Záznam z osciloskopu při měření senzoru z amorfni páska při hodnotě magnetického pole  $194 \mu\text{T}$ , první kanál (žlutý) je referenční signál z generátoru, druhý kanál (červený) je signál na měřicí cívce, třetí kanál (modrý) napětí na budící cívce a čtvrtý kanál (zelený) je budící proud.



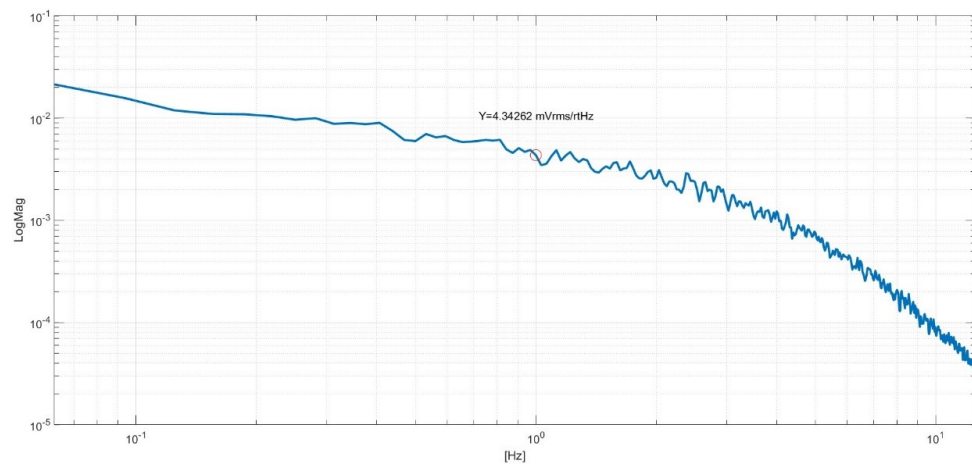
**Obrázek 4.17:** Přenosová charakteristika pro senzor s amorfním jádrem pro 12,8 kHz.



**Obrázek 4.18:** Přenosová charakteristika pro senzor s amorfním jádrem pro 8,3 kHz.



**Obrázek 4.19:** Závislost citlivosti na frekvenci pro senzor s amorfním jádrem pro 1, 5, 7, 10, 12,8 a 14 kHz.



**Obrázek 4.20:** Záznam hodnot ze spektrálního analyzátoru při měření PSD pro senzor s amorfním jádrem.

## Kapitola 5

### Závěr

Pro shrnutí naměřených vlastností senzorů byly vytvořeny tabulky pro jednotlivé senzory a jedna pro porovnání všech. Pro senzory s vytištěným jádrem je vidět velká lineární oblast, ale řádově horší citlivost a hodnoty šumu než u senzoru s jádrem z amorfního materiálu.

Senzor	Frekvence	Citlivost
I1	42,2 kHz	20 V/T
	37 kHz	3,6 V/T

**Tabulka 5.1:** Tabulka citlivosti senzoru I1

Senzor	Buzení	f	Citlivost
I2	5 V	25 kHz	2.99 V/T
	5 V	50 kHz	2.52 V/T
	5 V	100 kHz	0.31 V/T
	8 V	50 kHz	1.13 V/T

**Tabulka 5.2:** Tabulka citlivosti senzoru I2

Sensor	f	Citlivost
Amorf.	1 kHz	2.15 V/T
	5 kHz	11.76 V/T
	7 kHz	15.58 V/T
	10 kHz	18.86 V/T
	12.8 kHz	28.44 V/T
	14 kHz	24.04 V/T

**Tabulka 5.3:** Tabulka citlivosti pro sensor s jádrem z amorfni pásky

Pravděpodobně hlavním důvodem pro tak malou citlivost senzorů I1 a I2 je nízká permeabilita jádra, takže magnetické jádro není plně nasyceno používaným buzením. Senzory I1, ale hlavně I2 měly také velmi výrazné



Senzor	Tvar buzení	Citlivost	Lineární rozsah	Šum
I1	sinus	20 V/T	0,8 mT	250 $\text{textnT}/\sqrt{\text{Hz}}$
I2	obdelník	2,99 V/T	2 mT	131,7 $\text{textnT}/\sqrt{\text{Hz}}$
	sinus	25 mV/T		
Amorf.	sinus	28,3 V/mT	0,2 mT	21,3 $\text{textpT}/\sqrt{\text{Hz}}$

**Tabulka 5.4:** Tabulka citlivosti, linearity a šumu senzorů

rušivé napětí na první harmonické. Problém s výrazným rušivým napětím může být zapříčiněna nesymetričností jádra. Případná nesymetričnost může být způsobena nerovnoměrným rozložením feromagnetických nanočástic ve výsledném jádře. U I2 je také problém výskytu hematitových částic, které jsou několikanásobně větší než feromagnetické částice a mohou tak dále zhoršovat vlastnosti materiálu. Ke zlepšení nesymetričnosti jádra by mohlo pomoci snížení velikosti nanočástic, v případě senzoru I2 také odstranění nežádoucích příměsí. Dalším problémem bylo zahřívání plastové ochranné vrstvy, která sloužila jako ochrana před mechanickým poškozením vytištěných jader.



## Literatura

- [1] D. Hrakova et al. “Inkjet-printed Mn-Zn Ferrite Nanoparticle Core for Fluxgate”. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 563 (2022), s. 170003. DOI: 10.1016/j.jmmm.2022.170003.
- [2] J. Yamauchi. *Nitroxides: Applications in Chemistry, Biomedicine, and Materials Science*. Fundamentals of Magnetism, p. 1–45. John Wiley & Sons, Ltd, 2008. Kap. 1.
- [3] The Editors of Encyclopædia Britannica. *Magnetic field*. Encyclopædia Britannica. 2023. URL: <https://www.britannica.com/science/general-relativity#/media/1/357048/1348>.
- [4] J. Sládková a N. Uhdeová. *Elektrina a magnetismus*. 2. vyd. Brno: Vutium, 1999. ISBN: 80-214-1290-9.
- [5] P. J. Cregg, M. Kieran a A. Mardinoglu. “Inclusion of interactions in mathematical modelling of implant assisted magnetic drug targeting”. In: *Applied Mathematical Modelling* 36.1 (2012), s. 1–34. ISSN: 0307-904X. DOI: 10.1016/j.apm.2011.05.036. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X11003477>.
- [6] P. Ripka et al. *Magnetic Sensors and Magnetometers*. 2. vyd. Boston: Artech House, 2021. ISBN: 1-58053-057-5.
- [7] M. Janošek. “Parallel fluxgate magnetometers”. In: *High Sensitivity Magnetometers*. Ed. A. Grosz, M. J. Haji-Sheikh a S. C. Mukhopadhyay. Springer International Publishing, 2017, s. 41–61. DOI: 10.1007/978-3-319-34070-8\_2.
- [8] *Magnetické senzory*. Výukové materiály pro předmět SME. 2023.
- [9] Pavel Ripka. “Review of fluxgate sensors”. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 33.3 (1992), s. 129–141. ISSN: 0924-4247. DOI: 10.1016/0924-4247(92)80159-Z.
- [10] Maria Teresa Todaro, Leonardo Sileo a Massimo De Vittorio. “Magnetic Field Sensors Based on Microelectromechanical Systems (MEMS) Technology”. In: *Magnetic Sensors - Principles and Applications*. Ed. Kevin Kuang. InTech, 2012. ISBN: 978-953-51-0232-8.

- [11] Songrui Wei et al. “Recent Progress of Fluxgate Magnetic Sensors: Basic Research and Application”. In: *Sensors* 21.4 (2021), s. 1500. DOI: 10.3390/s21041500.
- [12] M. Schmelz a R. Stolz. “Superconducting quantum interference device (SQUID) magnetometers”. In: *High Sensitivity Magnetometers*. Ed. A. Grosz, M.J. Haji-Sheikh a S.C. Mukhopadhyay. Switzerland: Springer Nature, 2017, s. 279–311.
- [13] Pavel Ripka a Antonín Platil. *Přesné magnetické snímače a jejich aplikace*. 1. vyd. Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií. Brno, Czech Republic, čvn. 2010.
- [14] Randall Black a F. Wellstood. “Measurements of Magnetism and Magnetic Properties of Matter”. In: *Measurements of Magnetism and Magnetic Properties of Matter*. 2006. DOI: 10.1002/9783527609956.ch12.
- [15] *National Instruments LabVIEW User Manual*. Leden 1998. URL: [https://engineering.purdue.edu/~aae520/Labview\\_manuals/LVUser.pdf](https://engineering.purdue.edu/~aae520/Labview_manuals/LVUser.pdf).
- [16] B. Derby. “Inkjet printing of functional and structural materials: Fluid property requirements, feature stability, and resolution”. In: *Annu. Rev. Mater. Res.* 40.1 (čvn. 2010), s. 395–414.
- [17] Atasheh Soleimani-Gorgani. “Inkjet Printing”. In: *Printing on Polymers*. Ed. Joanna Izdebska a Sabu Thomas. William Andrew Publishing, 2016, s. 231–246. ISBN: 9780323374682. DOI: 10.1016/B978-0-323-37468-2.00014-2.
- [18] Jia Li, Fabrice Rossignol a Joanne Macdonald. “Inkjet printing for biosensor fabrication: Combining chemistry and technology for advanced manufacturing”. In: *Lab on a Chip* (2015). DOI: 10.1039/C5LC00235D.
- [19] *Instruction Manual TOE 8871 / TOE 8872*. Toellner Electronic Instrumente GMBH. 1998.
- [20] *SR865A Operation Manual*. Stanford Research Systems. 2015–2022. URL: <https://www.thinksrs.com/downloads/pdfs/manuals/SR865Am.pdf>.
- [21] *35670A Dynamic Signal Analyzer*. Keysight. Zář. 2020. URL: <https://www.keysight.com/zz/en/assets/7018-06687/data-sheets/5966-3064.pdf>.

# Příloha A

## Naměřená data

### A.1 Excel tabulky s naměřenými hodnotami

- I1.xlsx
- I2.xlsx
- I2vPouzdre.xlsx
- AmorfniPaska.xlsx

### A.2 Data z diskety spektrálního analyzátoru

- Agilent35670.txt





# Příloha B

## Programy



### B.1 LabVIEW programy

- LockIn\_close.vi
- LockIn\_open.vi
- LockIn\_read.vi
- TOE\_close\_error.vi
- TOE\_open\_reset.vi
- TOE\_control\_C.vi
- TOE\_set\_C.vi
- TOE\_set\_V.vi
- TOE\_read\_V\_or\_C.vi