

České Vysoké Učení Technické  
Fakulta Elektrotechnická



## **Magnetická sonda s Hall senzorem**

Bakalářská práce

*Radomír Macíček*

Bakalářský program: Kybernetika a robotika  
Vedoucí práce: Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D.

Praha, Květen 2022

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Macíček** Jméno: **Radomír** Osobní číslo: **474418**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra měření**  
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Kompaktní magnetometr s Hallovou sondou**

Název bakalářské práce anglicky:

**Compact Hall probe magnetometer**

Pokyny pro vypracování:

- proveďte osazení a oživení konstrukce kompaktního magnetometru s Hallovou sondou se „spinning current“ buzením
- navrhnete a realizujete firmware pro obslužný mikrokontrolér STM32F373, umožňující zobrazení hodnoty magnetické indukce na displeji a disponující režimem automatické a manuální změny rozsahu, včetně kalibrace nuly
- proveďte kalibraci magnetometru a ověřte základní parametry (linearita, šum, teplotní stabilita)
- volitelně realizujte aplikaci na PC (LabView nebo Qt) pro vizualizaci dat

Seznam doporučené literatury:

- [1] R. B. Northrop, Introduction to Instrumentation and Measurements, CRC 2018
- [2] Ripka (ed.): Magnetic Sensors and Magnetometers, Artech, Boston, 2nd edition 2021
- [3] Ahmet Bindal, Electronics for Embedded Systems, Springer International Publishing, Switzerland 2017
- [4] Paul Horowitz, Winfield Hill, The Art of Electronics, 3rd edition, Cambridge University Press 2015
- [5] Rob Toulson, Tim Wilmshurst: Fast and Effective Embedded Systems Design, Newnes 2017
- [6] John G. Proakis, Dimitris G. Manolakis: Digital Signal Processing, Pearson Education Limited

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D. 13138**

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

Datum zadání bakalářské práce: **14.02.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce:

**do konce letního semestru 2022/2023**

Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D.  
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

# Deklarace

Prohlašuji, že tato práce je mým vlastním dílem a v seznamu literatury jsem uvedl všechny zdroje, které jsem použil. Tato práce také nebyla předložena pro žádný titul v minulosti.

---

Radomír Macíček  
Květen 2022

# Abstrakt

Tato práce se zabývá výrobou příručního magnetometru s Hallovou sondou. Hlavním úkolem je zapájet, zprovoznit a vytvořit firmware pro magnetometr. Nejdříve popíšeme vlastnosti magnetického pole. Následně popíšeme použité nástroje pro tvorbu firmwaru. Uděláme shrnutí vlastnosti firmwaru a aplikace pro počítač. Nakonec provedeme měření teplotní závislosti, šumu a odchylek linearit vytvořeného magnetometru.

**Klíčové slova:** Magnetická indukce, Hallova sonda, sigma-delta převodník, analogový multiplexer, operační zesilovač, analogový zesilovač s programovatelným zesílením, firmware, virtuálně sériový port USB

## Abstract

This work is about the creation of the magnetometer with the Hall sensor. The main task is to solder, make it work and create firmware for the magnetometer. At first, we describe the attributes of the magnetical field. Then we describe the tools, which we used. We summarise the firmware features and the desktop application. We end with the measurement of the temperature dependency, the noise measurement, and the linearity measurement.

**Keywords** Magnetic induction, Hall probe, sigma-delta converter, analog multiplexer, operational amplifier, analog amplifier with programmable gain, firmware, virtual serial USB port

# Poděkování

Rád bych poděkoval za přístup a pomoc v práci svému vedoucímu doktoru Vojtěchu Petruchovi. Zejména při zprovoznění a pomoc s konstrukcí obvodu. Dále děkuji bakaláři Vojtěchu Nýdrlemu za návrh obvodu a vysvětlení funkčnosti metody spinning current. Dále děkuji rodině za podporu a trpělivost.

# Obsah

<b>Abstrakt</b>	<b>iv</b>
<b>Poděkování</b>	<b>v</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>viii</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
1.1 Zadání práce . . . . .	1
1.2 Motivace . . . . .	2
1.3 Komerční měřiče magnetického pole . . . . .	2
1.4 Magnetická indukce . . . . .	3
1.5 Magnetický tok . . . . .	4
1.6 Intenzita magnetického pole . . . . .	4
1.7 Magnetomotrická síla, magnetické napětí a potenciál . . . . .	5
1.8 Magnetizace a magnetická polarizace . . . . .	5
1.9 Magnetický moment . . . . .	6
1.10 Magnetostatické pole . . . . .	6
1.11 Magnetický materiál . . . . .	6
1.12 Měření magnetického pole . . . . .	7
1.13 Hallův jev . . . . .	7
1.14 Hallova sonda . . . . .	8
1.15 Spinning current . . . . .	8
<b>2 Metody</b>	<b>11</b>
2.1 Popis bloků schématu . . . . .	11
2.2 Osazení a zprovoznění obvodu . . . . .	12
2.3 Firmware . . . . .	16
2.4 STM32 CubeID . . . . .	17
2.5 Oživení mikrokontroléru . . . . .	17
2.6 Průběh měření . . . . .	18
2.7 Nastavení rozsahu měření . . . . .	19
2.8 Aplikace programu . . . . .	20
2.9 Desktopová Aplikace . . . . .	20
2.10 Přechodová charakteristika měření . . . . .	21
2.11 Magnetické Jho . . . . .	22
2.12 Kalibrace v Magnetickém Jhu . . . . .	23
2.13 Lakeshore model 475 . . . . .	25

<i>OBSAH</i>	vii
<b>3 Měření</b>	<b>27</b>
3.1 Měření teplotní závislosti . . . . .	27
3.2 Měření šumu a chyby rozptylu . . . . .	29
<b>4 Závěr</b>	<b>32</b>
<b>Reference</b>	<b>33</b>

# Seznam obrázků

1.1	Měření s Hallovou sondou . . . . .	9
1.2	Spin Hallový sondy . . . . .	9
2.1	Blokové schéma zapojení . . . . .	12
2.2	Zapojení napájecího bloku a mikrokontroléru . . . . .	13
2.3	Zapojení analogového zesilovače s programovatelným zesílením . . . . .	13
2.4	Zapojení bateriového vstupu napájení a USB . . . . .	14
2.5	Zapojení U-I převodníku . . . . .	14
2.6	Zapojení analogového multiplexoru, Hallový sondy a napěťové reference . . . . .	15
2.7	Zapojení debugu a uživatelského rozhraní . . . . .	15
2.8	Plošný spoj sondy . . . . .	16
2.9	Osazená sonda připravená pro firmware . . . . .	16
2.10	Tvar hallový sondy uvnitř pouzdra a její osazení na desce . . . . .	18
2.11	Měření ve vytvořené aplikaci . . . . .	21
2.12	Změna po otočení na Hallově sondě . . . . .	21
2.13	Změna po otočení zpět na Hallově sondě . . . . .	22
2.14	Měření s Hallovou sondou . . . . .	22
2.15	Proložení naměřených hodnot přímkou a výpočet odchylky od refernce . . . . .	23
2.16	Vypočtené aproximace po rozdělení na kladnou a zápornou část . . . . .	24
2.17	Vypočtené aproximace pro kladné rozdělení na rozsahu 20 mT . . . . .	24
2.18	Vypočtené aproximace pro kladné rozdělení na rozsahu 80 mT . . . . .	25
2.19	Vypočtené aproximace pro kladné rozdělení na rozsahu 600 mT . . . . .	26
2.20	Vypočtené aproximace pro kladné rozdělení na rozsah 2,6 T . . . . .	26
3.1	Aparatura měření teploty . . . . .	27
3.2	Zapojení 4 svorkového měření teploty . . . . .	28
3.3	Graf tepelné závislosti na rozdílu měření . . . . .	28
3.4	Měření tepelné závislosti . . . . .	29
3.5	Graf nejmenšího rozlišení . . . . .	29
3.6	Graf spektrální hustoty šumu . . . . .	30



# Kapitola 1

## Úvod

Člověk se snaží poznat svět už od pravěku. Jednou z variant, jak pochopit jevy, které se každodenně dějí kolem nás, je možnost popsat je. Popis ale většinou není dostatečný. Jak popíšeme, že peří padá pomaleji než cihla, nebo že pštros je rychlejší než želva? A proto s popisem přichází i potřeba měřit. Některé veličiny jsme schopni změřit velmi jednoduše, například délku, a jsou viditelné i pouhým okem. My se ovšem budeme zabývat měřením veličiny, kterou nelze vidět a i přesto na nás každý den působí. Budeme zkoumat měření magnetického pole.

V bakalářské práci se tedy zaměříme na výrobu příručního měřicího přístroje s Hallovou sondou, kterou bychom chtěli měřit a zkoumat magnetické pole. Nejdříve shrneme návrh zapojení. Odůvodníme použití jednotlivých součástí. Popíšeme chování programu, včetně všech funkcí, které naše zařízení umožňuje. Provedeme měření a porovnáme jeho vlastnosti s komerčně dostupnými přístroji. Návrh plošného spoje byl vytvořen v rámci rozšíření jiného projektu. Autorem zapojení je Bc. Vojtěch Nydrle.

### 1.1 Zadání práce





V popisu se budeme zabývat tvorbou kompaktního magnetometru s Hallovou sondou, kterým bychom chtěli měřit magnetické pole a zkoumat magnetické jevy. Provedeme osazení a oživení plošného spoje. Následně aplikujeme na Hallovu sondu spinning current buzení. Hlavním úkolem je realizovat firmware pro obslužný mikrokontrolér STM32F373C8. Tento firmware by měl být schopný zobrazovat na displeji hodnoty magnetické indukce. Zároveň by měl disponovat manuální a automatickou změnu rozsahu, včetně kalibrace nuly. Dále provedeme kalibraci magnetometru a ověříme základní parametry, jako jsou linearita, šum a teplotní stabilita. Nad rámec práce realizujeme aplikaci na PC pro vizualizaci dat.

## 1.2 Motivace

Hlavní motivací je dokončení projektu příruční sondy pro měření vyšších úrovní magnetické indukce (až  $\pm 2,6$  T), který navazuje na podobnou sondu realizovanou v rámci týmového projektu, osazenou AMR magnetometry (měřicí rozsah  $\pm 800$   $\mu$ T). Cílem je získat kompaktní a levnou alternativu k laboratornímu přístroji, např. Lakeshore 475 který je využíván v laboratoři MAGLAB. Jde nám tedy o vytvoření příručního přístroje, který bude měřit a zároveň je konkurenceschopný daleko sofistikovanějším a dražším komerčním zařízením. U vytvořeného modelu prototypu budeme mít možnost do budoucna rozvíjet jeho funkcionalitu pomocí rozšíření aplikace v počítači.

## 1.3 Komerční měřiče magnetického pole

Komerční zařízení ve stejné cenové kategorii jsou obvykle tvořeny formou multimetru s měřicí sondou. Ty ovšem nedisponují stejnou velikostí rozsahu jako naše zařízení. Přístroje, které jsou schopny měřit tento rozsah, sice měří přesněji, ale chybí jim přenos pomocí USB (Lakeshore 475), nebo mají malý rozsah měření (PHYWE Cobra SMARTsense). Jejich další nevýhodou je vysoká pořizovací cena. Nejbližší podobný měřič vyrábí firma Senis pod názvem 3MTS USB handheld Teslameter. Tento přístroj se připojí do počítače a následně s ním lze měřit magnetické pole ve třech osách. Jeho cena se pohybuje okolo 90 000 Kč. Nejlevnější nalezený měřič PHYWE Cobra SMARTsense se prodává za cenu 5 000 Kč. Neobsahuje ovšem displej a rozsahy měření jsou 150 mT nebo 5 T. Náš přístroj měří s menší přesností a pouze v 1 ose, ale náklady na jeho výrobu byly výrazně nižší. Vstupní náklady na součástky a PCB vycházejí na 1 500 Kč. Tato cena je nižší než u komerčních řešení. Náš výrobek následně budeme porovnávat s Halloovou sondou od firmy Lakeshore 475, která vychází cenově okolo 50 000 Kč.

	Lakeshore 475  [1]	Senis 3MTS  [2]	PHYWE COBRA  [3]	Naš přístroj 
Rozsahy měření	3.5 mT - 35T	100mT - 20T	130 mT, 5 mT	20mT - 2,6T
PC rozhraní	IEEE-488	Bluetooth	USB	USB
Vzorkovací frekvence	1 kHz	1 kHz	1 kHz	50 kHz
Cena[Kč]	50 000	90 000	5000	1500
Citlivost	2 nT	50 $\mu$ T	0.1 mT, 0.001 mT	4 $\mu$ T

## 1.4 Magnetická indukce

Magnetická indukce je vektorová veličina, již značíme  $\vec{B}$  a má jednotku 1 T (Tesla). Je definovaná silou působící na vodič, kterým prochází elektrický proud. Vypočítáme ji následovně.

$$\vec{F} = I[\vec{l} \times \vec{B}] \quad (1.1)$$

$$F = BIl; (N; T; A; m)$$

Nejčastěji měříme modul B, nebo některou z jeho složek. Jednotka 1 Tesla nám udává indukci homogenního pole, v němž na přímý vodič s délkou  $l = 1$  m působí síla  $F = 1$  N, je-li kolmý vodič ke směru  $\vec{B}$  a prochází jím proud  $I = 1$  A. Magnetickou indukci lze také popsat pomocí magnetického toku. Magnetickou indukci můžeme také najít značenou pomocí starší jednotkové soustavy CGSM, jako 1 G (Gauss) =  $10^{-4}$ T. [4] Měření indukce je naší hlavní náplní. Uvedeme si tedy, alespoň příklady indukcí různých těles. Magnetické pole země má indukci  $B = 25 - 65 \mu T$ , záleží na zeměpisné šířce. Permanentní feritové magnety mají typickou indukci maximálně kolem 0,35 T. Permanentní magnety NdFeB dosahují hodnoty magnetické indukce v okolí hodnoty  $B = 1,3$  T. Magnetická rezonance používaná v nemocnici mají obvykle indukci okolo  $B = 1,5$  T, ale novější přístroje jsou schopny dosáhnout hodnot až  $B = 7$  T. Pole neutronové hvězdy-magnetaru je magneticky zcela nejsilnější volně se vyskytující magnetické pole a dosahuje hodnot až  $B = 10^{11}$  T. Poslední přístroj o kterém bych se zmínil, je měření pomocí Magneto-Cardio-Grafu (MCG) s indukci  $B = 6 - 28$  pT.

## 1.5 Magnetický tok

Magnetický tok  $\Phi$  je skalární veličina a má jednotku Wb (Weber). Je definovaná indukovaným napětím  $u_I$  v závitě při změně toku  $\Phi$  následovně.

$$u_i = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1.2)$$

Vzorec tedy vyjadřuje, že hodnotě magnetické  $\Phi = 1$  Wb odpovídá indukované napětí 1 V, které vznikne uvnitř smyčky obepínající tok při rovnoměrném poklesu za 1 s. Magnetický tok, lze rovněž definovat skrz magnetickou indukci následujícím vztahem:

$$\Phi = \iint_S \vec{B} dS \quad (1.3)$$

Kde složka  $\vec{B}$  je kolmá na plochu  $S$  tvořenou smyčkou (závitěm). Tedy zároveň  $\Phi = 1$  Wb udává, že skrz plochu o velikosti  $S = 1 \text{ m}^2$  prochází kolmo magnetická indukce  $B = 1$  T. Magnetické pole má vždy vírový charakter, bez zřídlel. Tok vycházející skrz uzavřenou plochu je tedy roven nule. Popisuje ho čtvrtá Maxwellova rovnice (zákon spojitosti indukčního toku). [4]

$$\oiint_S B dS = 0 \quad (1.4)$$

## 1.6 Intenzita magnetického pole

Magnetická intenzita je vektorová veličina  $H$  s jednotkou  $\text{Am}^{-1}$ . Veličina je definovaná první Maxwellovou rovnicí, kde  $r$  je vzdálenost od vodiče s proudem  $I$ .

$$\begin{aligned} H &= \frac{I}{2\pi r} \\ \vec{H} &= \frac{\vec{B}}{\mu\mu_0} \end{aligned} \quad (1.5)$$

Druhá rovnice nám vyjadřuje vztah mezi magnetickou indukcí a intenzitou magnetického pole. Kde  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$  je magnetická konstanta (permeabilita vakua) a  $\mu$  je relativní permeabilita (pro vzduch je rovna 1).[4]

## 1.7 Magnetomotrická síla, magnetické napětí a potenciál

Magnetomotrická síla je skalární veličina, která je vyvolaná proudem působící na uzavřené dráze. Je definována dle první Maxwellovy rovnice.

$$F_m = \oint \vec{H} d\vec{l} = \sum I \quad (1.6)$$

Kde  $\sum I$  je celkový proud obepínající uzavřenou drahou  $l$ , daný součtem proudu všech vodičů včetně uvažování jejich směrů. Magnetické napětí  $U_m$  je skalární veličina. Vyskytuje se mezi dvěma body s dráhou  $l$  mezi nimi. Tedy když si body označíme jako  $b_1$  a  $b_2$ .

$$U_m = \int_{b_1}^{b_2} H_l dl \quad (1.7)$$

Magnetické napětí má jednotku A, nebo-li Ampér. Pokud polem v dané oblasti neprochází elektrický proud, pak nezávisí hodnota na integrálu na tvaru dráhy  $l$ . Vypočteme tedy magnetické napětí ze skalárních magnetických potenciálů  $V_{m1}$  a  $V_{m2}$ . [4]

$$V_{m1} - V_{m2} = \int_{b_1}^{b_2} H_l dl \quad (1.8)$$

## 1.8 Magnetizace a magnetická polarizace

Magnetizace je vektor  $\vec{M}$  s jednotkou  $Am^{-1}$  definovaný následovně:

$$\vec{M} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{H} \quad (1.9)$$

Magnetickou polarizace je vektorová veličina  $\vec{J}$  s jednotkou  $T$ . Spočteme ji:

$$\vec{J} = \vec{B} - \mu_0 \vec{H} \quad (1.10)$$

Z těchto vztahů lze vypočítat, že vztah mezi indukcí a polarizací je:

$$\vec{J} = \mu_0 \vec{H} \quad (1.11)$$

Veličiny popisují změnu pole způsobenou magnetickými vlastnostmi látek. Pro vakuum a vzduch jsou obě rovny 0. Magnetizace  $M$  vyjadřuje intenzitu pole uvnitř tělesa vytvořenou jeho magnetickými vlastnostmi. Magnetická polarizace  $J$  představuje změnu indukce opět vyvolanou magnetickými vlastnostmi tělesa. [4]

## 1.9 Magnetický moment

Magnetický moment  $m_m$  s jednotkou  $Am^2$  je dán mechanickým momentem. Na závit s protékajícím proudem nebo zmagnetizované těleso v homogenním magnetickém poli s jednotkovou indukcí působí tento moment. Závit má plochu  $S$  prochází skrz něj proud  $I$  a normála roviny závitu je kolmá ke směru magnetické indukce  $B$ . Pak spočteme mechanický moment.

$$\begin{aligned} M_{mech} &= SIB = m_m \\ m_m &= SI \end{aligned} \quad (1.12)$$

Ve chvíli, kdy se jedná o těleso s homogenní magnetizací  $M$  a objemem  $V$ . Těleso je umístěné v homogenním poli tak, že vektory  $\vec{B}$  a  $\vec{M}$  jsou kolmé a účinkují na mechanický moment. [4]

$$M_{mech} = M.V.B = m_m.B \quad (1.13)$$

## 1.10 Magnetostatické pole

Magnetické pole popisuje vektor intenzity magnetického pole  $\vec{H}$  nebo magnetickou indukcí  $\vec{B}$ . V okolí magnetu zobrazujeme jeho  $\vec{H}$  pomocí siločár magnetického pole. Tyto místa mají konstantní hodnotu  $\vec{H}$ . Siločáry lze pozorovat pomocí malých feromagnetických prvků, jako jsou například železné piliny. Mezi jedněmi z prvních magnetických pozorování byly síly působící na zmagnetizované těleso. Mechanická moment působí na otočné těleso o velikosti  $V$ , které je zmagnetizováno magnetizací  $J$  a nachází se v magnetickém poli. [4]

$$M_{mech}^{\vec{}} = V \cdot [\vec{J} \times \vec{H}] \quad (1.14)$$

Na tomto principu funguje třeba kompas.

## 1.11 Magnetický materiál

Velikost síly permanentního magnetu také závisí na jeho složení a struktuře. Některé magnetické vlastnosti jsou vázány přímo k danému materiálu. Dělí se na magneticky tvrdé materiály a magneticky měkké materiály. Magneticky měkké materiály se snadno zmagnetizují a odmagnetizují. Dále mají vysokou relativní permeabilitu. Naproti tomu magnetické tvrdé materiály se nedají, tak snadno zmagnetizovat. Při zmagnetizování je používáme k výrobě permanentních magnetů. Velký vliv na strukturu materiálu má také teplota a mechanická úprava. Při zahřívání dochází nejdříve k částečné ztrátě magnetických vlastností při překročení Curieova teploty, pak dochází k odmagnetování magnetu. Pro zlepšení magnetických vlastností je využíváno tzv. žíhání magnetického materiálu.

Touto metodou se u magneticky měkkých materiálů odstraňuje uhlík, který zvyšuje permeabilitu a koercivitu materiálu, a tudíž se zlepšují magnetické vlastnosti.

## 1.12 Měření magnetického pole

K měření magnetického pole lze využít širokou škálu přístrojů a senzorů. Nejznámějším zařízením pro měření magnetického pole je kompas. Nevýhodou kompasu je, že určí pouze směr magnetického pole a nikoliv jeho intenzitu. Nás ovšem zajímají sofistikovanější měřidla, pomocí níz jsme schopni měřit i intenzitu tohoto pole. Toto pole lze měřit pomocí několika druhů senzorů. Mezi ně patří Hallova sonda, AMR senzory, GMR a TMR senzory. Vzhledem k naší aplikaci a požadovanému měřicímu rozsahu se zaměříme na přístroje s Hallovou sondou.[5]

## 1.13 Hallův jev

Vzniká ve vodiči nebo polovodiči. Prvkem protéká elektrický proud za přítomnosti magnetického pole. Pokud se v magnetickém poli nachází složka kolmá na rychlost elektrického nosiče náboje, tak magnetické pole působí na náboje Lorentzovou silou a na bočních stěnách začne vznikat tzv. Hallovo napětí. Hallovo napětí vypočítáme pomocí následujícího vzorce:

$$U_H = R_H \frac{I}{d} B \quad (1.15)$$

Jednotlivé složky vzorce:

$U_H$	Hallovo napětí
$R_H$	Hallova konstanta
$I$	Pomocný proud I
$d$	Tloušťka vzorku
$B$	Indukce měřeného pole

Za velmi nízkých teplot existuje kvantový Hallův jev, který se využívá v metrologii elektrického odporu, ale jeho popis překračuje rámec této práce. Bez magnetického pole se náboje pohybují přibližně po rovných trajektoriích. V magnetickém poli ovšem na náboj začne působit Lorentzova síla a dochází k zakřivení jeho trajektorie. Zároveň je trajektorie ovlivňována polaritou pole a náboje. Při opačné polaritě náboje a pole, dochází k přitahování náboje směrem k magnetickému poli. Pokud má pole i náboj stejnou polaritou, bude naopak náboj odpuzován a vytlačován co nejdále od magnetického pole.

Lorentzovu sílu spočteme následovně.[4]

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (1.16)$$

Síla se skládá ze dvou částí z magnetické  $F_{mag}$  a elektrické části  $F_{el}$ .

$$F_{mag}^{\vec{}} = q(\vec{v} \times \vec{B}); F_{el}^{\vec{}} = q\vec{E} \quad (1.17)$$

$\vec{F}$	Lorentzova síla
$F_{mag}^{\vec{}}$	magnetická složka Lorentzovy síly
$F_{el}^{\vec{}}$	elektrická složka Lorentzovy síly
$q$	elektrický náboj
$\vec{E}$	intenzita elektrického pole
$\vec{v}$	rychlost náboje
$\vec{B}$	magnetická indukce

## 1.14 Hallova sonda

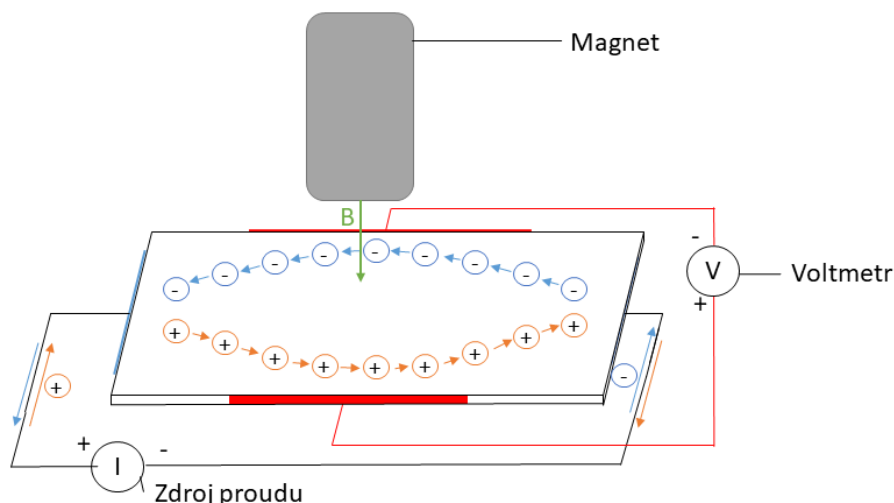
Hallova sonda je senzor pro měření magnetického pole. Pracuje na principu Lorentzovy síly. Uvnitř dochází k rovnosti  $F_{el}$  a  $F_{mag}$ . Jedná se o elektronickou součástku, jejíž funkce je založena na Hallově jevu. Výhodou měření pomocí této součástky je její dostupnost. Tento typ senzoru se totiž běžně používá v průmyslu. Nejčastěji se s jejich aplikací setkáme při měření pozice, přiblížení, snímání rychlosti a snímání proudu. V aplikacích se často používá pouze binární rozlišení. Primární využití má tedy v automotive průmyslu jako součást systému ABS, měření objemu nádrže nebo časování elektrického zapalování.

V Hallově sondě používáme tenkou vrstvu polovodiče s malou koncentrací nosičů náboje. Tloušťka polovodiče má vliv na velikost tohoto jevu. Čím je polovodič tenčí, tím silnější tento jev je. Na chování sondy má vliv i její složení. Pokud je Hallova sonda postavena na křemíkovém základu, je vhodná pro použití v poli rozsahu 1 mT do 1 T. Pro měření slabších polí od 100 nT využijeme základ z Antimonu a India.[6]

## 1.15 Spinning current

Spinning current je metoda měření s pomocí Hallové sondy, kdy měníme směr proudu a postupně měříme napětí na jednotlivých vývodech. Při této metodě se snažíme držet úhel mezi směrem proudu a směrem měření stejný po celou dobu měření. Aplikace prokazatelně dokáže zmenšit offset u Hallové sondy z militesla na mikrottesla. Zároveň tato metoda tlumí nízkofrekvenční šum vznikající na Hallově senzoru a pomáhá k teplotní stabilitě



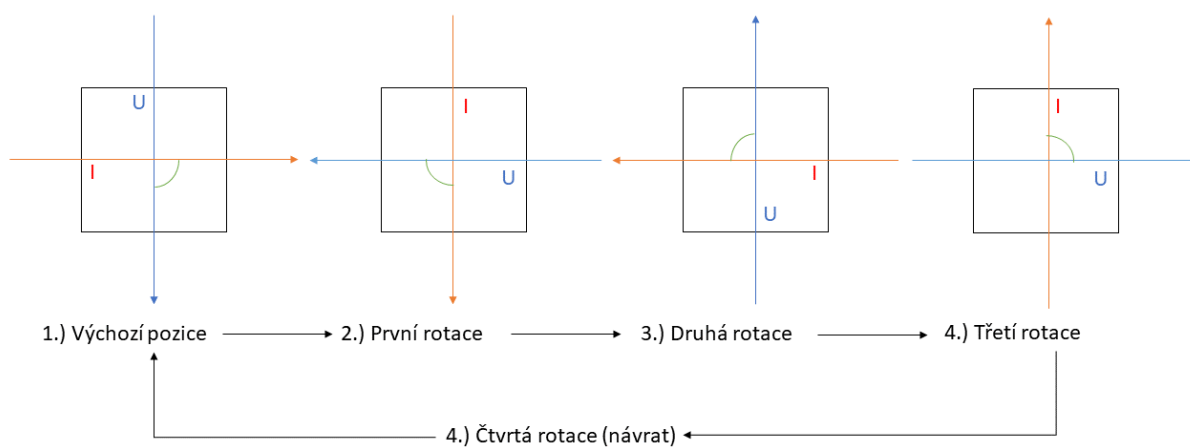


Obr. 1.1: Měření s Hallovou sondou

měření. Význam otočení je, že se nám odečte offset měření, protože měříme dokola po, nebo proti směru hodinových ručiček.

$$V_1 = K_H B I_{in} + R_{offset} I_{in}, V_2 = K_H B I_{in} - R_{offset} I_{in} \quad (1.18)$$

Rovnice popisují napětí na Hallově sondě.  $V_1$  je první měření, které se skládá ze složky měření a offsetu nepřesnosti sondy.  $V_2$  je k  $V_1$  otočené o  $90^\circ$  po směru hodinových ručiček za podmínky stejného úhlu mezi proudem a měřením. Tyto dva vektory pouze rotují a nemění vůči sobě směr ani velikost. Zároveň tato aplikace umožňuje potlačení



Obr. 1.2: Spin Hallový sondy

nízkofrekvenčního šumu. Jsme tedy schopni potlačit všechny šum pod hladinou  $1/f$ , kde  $f$  je frekvence otáčení. Zároveň nás trápí parazitní změny napětí při přepnutí na další pár.

V poslední řadě má tato metoda schopnost kompenzovat změny teploty. [7] [8]

# Kapitola 2

## Metody

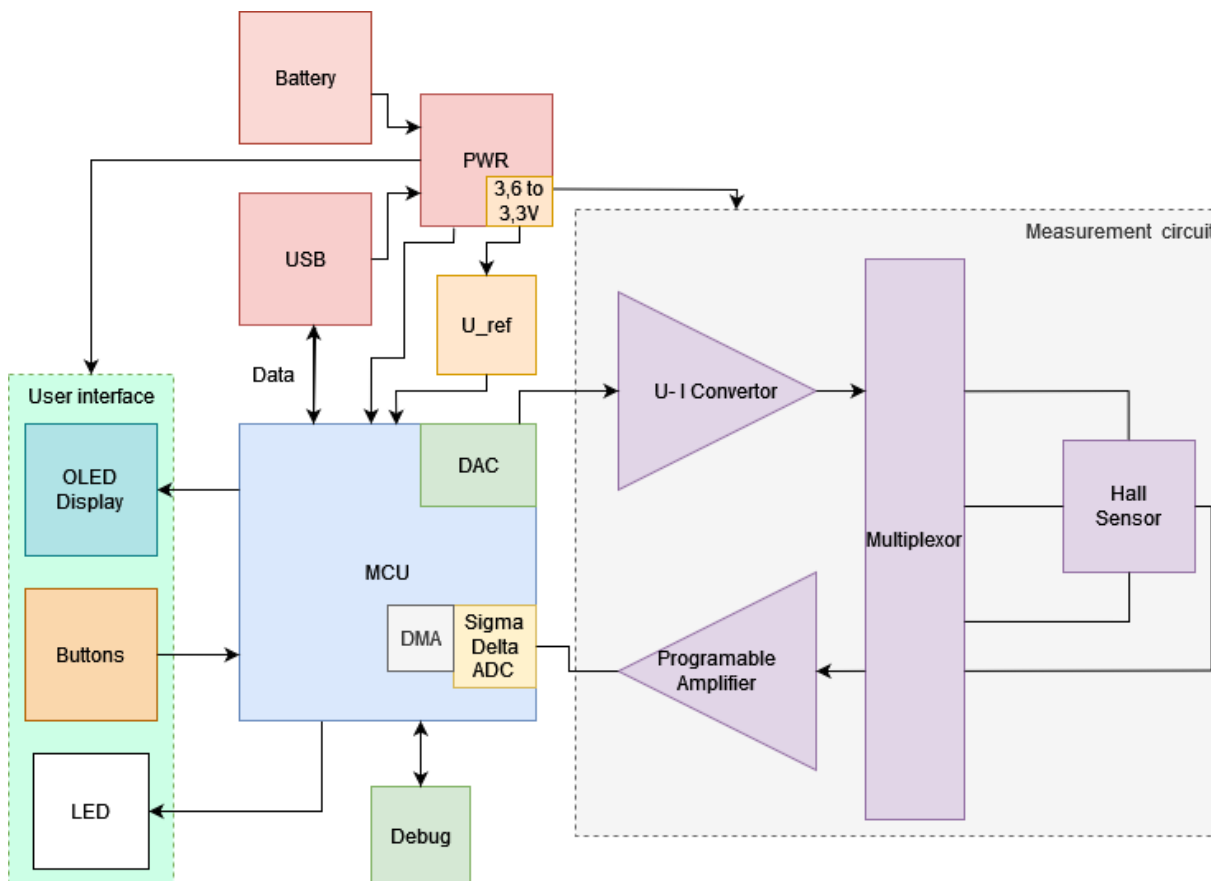
Cílem naší práce je tedy vytvořit teslameter, který je přenositelný, jednoduchý k ovládaní a po připojení k počítači schopen zaznamenávat data a vykreslovat je ideálně do grafu. Tento graf je tvořen vzorkovou závislostí na magnetickém poli. Následně provedeme s našim zařízením měření a porovnáme je s profesionálními měřiči magnetického pole. Tvorba našeho zařízení mi byla předána ve fázi navrhnutého obvodu a už vytvořeného plošného spoje. V dalších kapitolách popíšu celé blokové schéma zapojení a následně funkce jednotlivých bloků zapojení. Dále se při postupu osazení budu věnovat jednotlivým důležitým součástkám zapojení a změnám, které jsme provedli v původním návrhu.

### 2.1 Popis bloků schématu

Blokové schéma popisuje detailněji jednotlivé součásti obvodu. Pro napájení máme dvě možnosti. První je možnost napájení pomocí baterie. Druhá je napájení skrze USB z počítače nebo jiného zařízení. Napětí je následně v napájecím bloku převedeno pomocí buck-boost převodníku na 3.6 V. Tímto napětím napájíme mikrokontrolér. Z buck-boost zároveň napájíme LDO stabilizátor na 3.3 V a následně zbytek obvodu od napěťové reference po Sigma-delta AD převodník, přes interface, multiplexory až po zesilovač výstupního měření Hallovy sondy. Pečlivě popíšeme celou cestu měření. Nejdříve nastavíme na DAC převodníku mikrokontroléru napětí v rozsahu od 0 do 1 V. Toto napětí převedeme na proud o velikosti 0 až 2 mA. Dle následujícího výpočtu.

$$I = \frac{U}{R} = \frac{1}{500} = 2mA \quad (2.1)$$

Kde  $R$  je velikost referenčního rezistoru v převodníku napětí-proud. Následně pomocí analogového multiplexoru (4:2) nastavíme vstup na Hallovu sondu. Hallova sonda má 4 vstupy. Rozdělíme si je na 2 protilehlé páry do kříže. Skrz první pár napájíme Hallovu

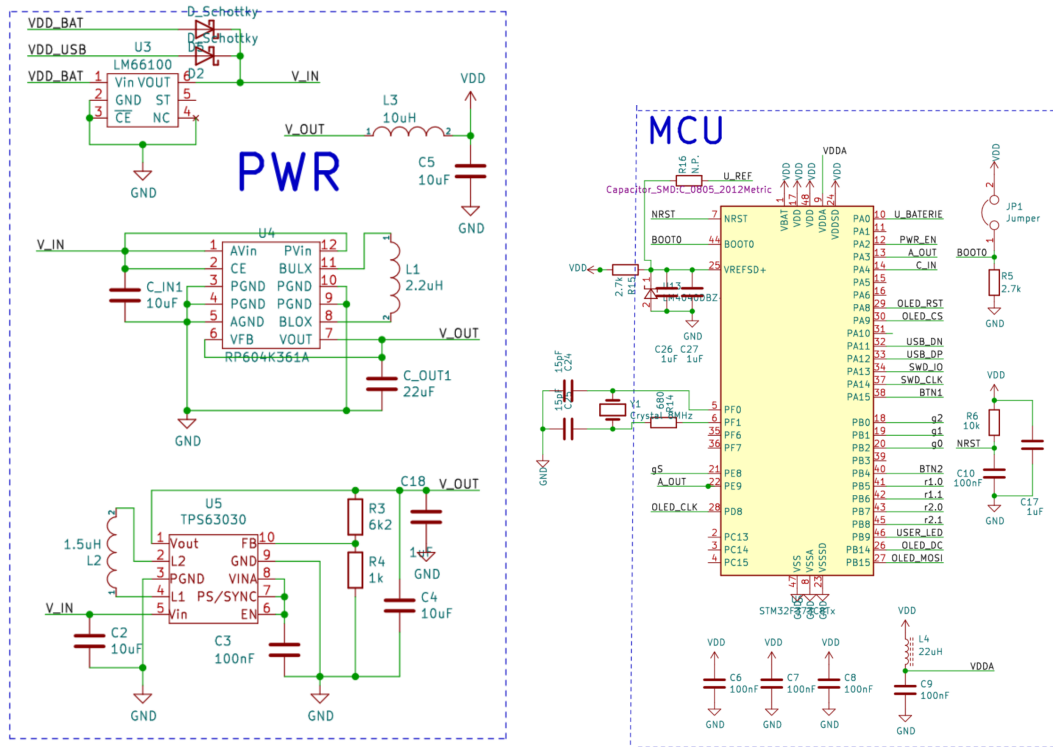


Obr. 2.1: Blokové schéma zapojení

sondu proudem. Na zbylém páru měříme výsledné napětí. To projde zpět kanálovým multiplexorem a přivedeme jej na zesilovač. Využijeme zesilovače s programovatelným zesílením. Ten nám dává možnost měřit ve velkém rozsahu napětí. Následně hodnotu zesíleného napětí měříme pomocí 16 bit Sigma-delta převodníku v mikrokontroléru. Displej ovládáme pomocí SPI sběrnice. Zároveň při připojení k počítači jsme schopni číst měřenou hodnotu a přenášet ji přes USB skrz virtuální sériový port.

## 2.2 Osazení a zprovoznění obvodu

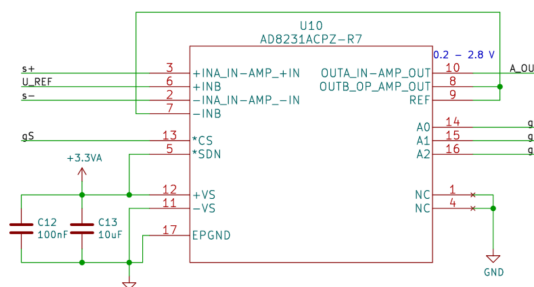
Realizaci jsme započali osazením a zprovozněním napájecího bloku. V PWR schématu můžeme vidět zapojení dvou buck-boost převodníků. Je to z důvodu malé dostupnosti čipu RP604. Proto máme možnost použít TPS63030 jako alternativu pro napájení. Oba převodníky mají chladičí pady (plošky) na spodní straně obalu. Tudíž jsme začínali s osazením jedním z převodníků. Jehož vlastností je schopnost držet na výstupu stále napětí i při napájení 5 V z USB nebo baterie, jejichž napětí může kolísat od 4,5 V po 2,5 V. Za všech podmínek drží na vstupu do procesoru 3,6 V. S převodníkem jsme zároveň osadili digitální zesilovač. Opět má pady na spodní straně, takže při pájení převodníku jsme



Obr. 2.2: Zapojení napájecího bloku a mikrokontroléru

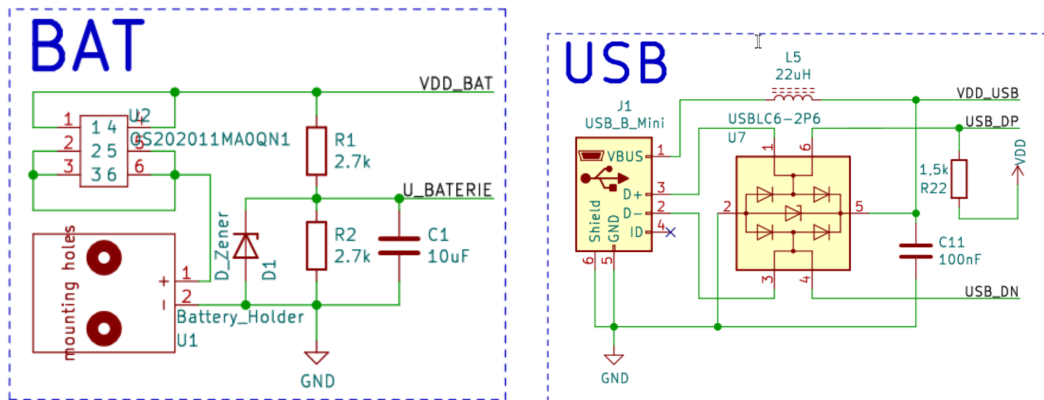
rovnou připájeli i zesilovač. Zahřívali jsme tedy celou desku horkým vzduchem, abychom nenamáhalí desku vícekrát. Jedná se o digitální zesilovač s nízkým šumem a nastavitelným zesílením 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 a 128.

Následně jsem připojili a otestovali mikrokontrolér STM32F373. Jedná se o mikrokontrolér založený na platformě ARM Cortex-M4 . Použili jsme jej v konfiguraci s 64 kB Flash pamětí, 48 kB SRAM pamětí a 48 piny pro naše zařízení. Hlavním důvodem pro použití tohoto mikrokontroléru je 16 bitový Sigma-delta převodník. Ten umožňuje dosáhnout vyššího dynamického rozsahu při měření výstupního napětí Hallovy sondy, než standardní 12-bitový aproximační převodník dostupný ve většině běžných mikrokontrolérů řady STM32.



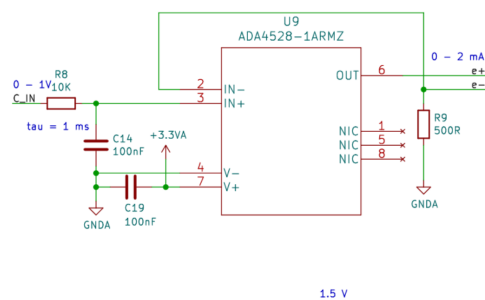
Obr. 2.3: Zapojení analogového zesilovače s programovatelným zesílením

Pokračovali jsme zapojením napětí USB a baterie. U napájení z baterie je použit spínač pro její vypnutí, zároveň je zde napěťový dělič pro měření napětí na baterii. Napájení je přiváděno do PWR bloku, kde je u napájení z baterie použita ideální dioda. Používáme typ diody LM66100 s malou spotřebou proudu 150 nA při 3,6 V, která má jeden vstup a jeden výstup. Skládá se z P-Mosfetu, který má funkční rozsah od 1,5 V do 5,5 V. Dioda se dá využít při aplikaci chytrých měřidel, automatizaci budov, v GPS a v primárních a záložních bateriích, jako ochrana před opačnou polaritou.[9] Pro napájení z USB použijeme na vstupu napětí LC filtr a ESD ochranu pro datové vstupy.



Obr. 2.4: Zapojení bateriového vstupu napájení a USB

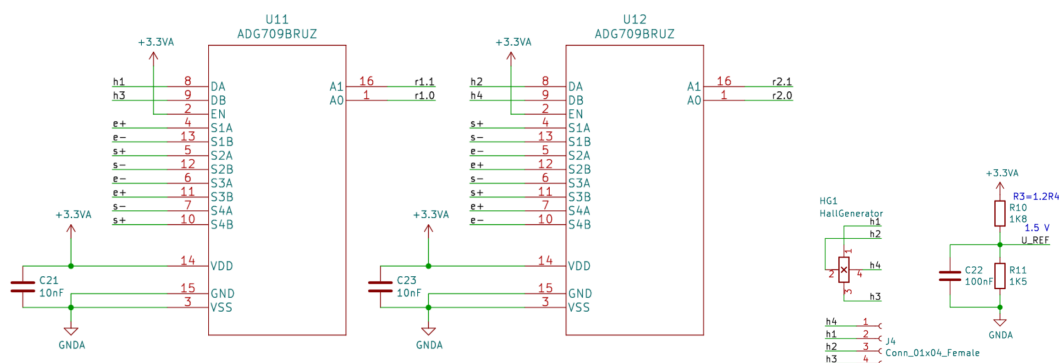
Nyní zapojíme analogovou část obvodu. Začali jsme operačním zesilovačem. Ten je zapojený jako převodník proudu na napětí. Zesilovač je tedy zapojen jako neinvertující. Výpočet přepočtu vyjádříme pomocí výše uvedené rovnice.



Obr. 2.5: Zapojení U-I převodníku

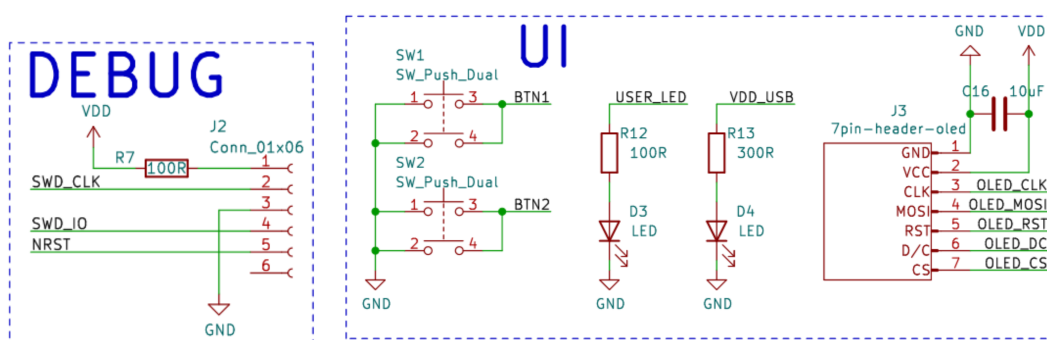
Pokračovali jsme zapojením kanálových multiplexorů. Ty jsou zajímavé tím, že umožňují zapojení oběma směry. Slouží pro výběr konkrétního vstupu na definovaný neměnný výstup a zároveň neměnným vstupem na různé výstupy. Tímto jsme tedy schopni aplikovat spinnig current metodu.

Nakonec před přivedením na vstup měření mikrokontroléru prochází signál skrz programovatelný zesilovač, který nám dává možnost měřit ve větším rozsahu. Díky jeho



Obr. 2.6: Zapojení analogového multiplexoru, Hallovy sondy a napěťové reference

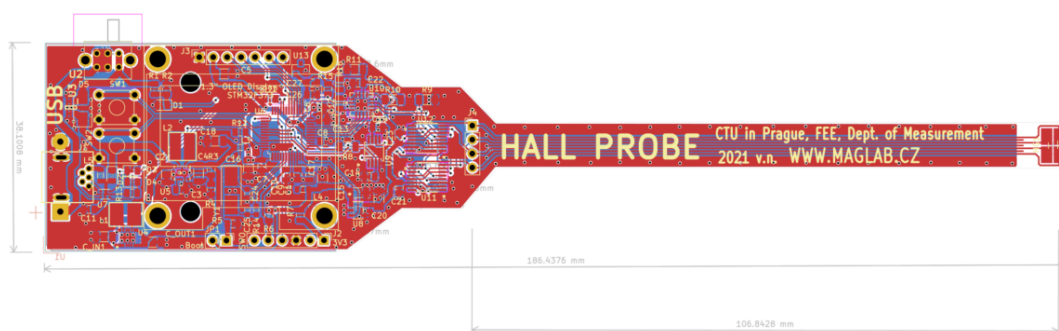
zesílení jsme schopni na sondě změřit i magnetické pole země, při nastaveném zesílení 128 krát. Osadili jsme desku konektory pro OLED displej, konektory pro debug a tlačítka. Displej má rozlišení 128 na 64 pixelů. Z důvodu malého rozlišení jsme museli optimalizovat a zjednodušovat jednotlivé výpisy. Mezi tyto optimalizace patří nevyužití největšího formátu písma.



Obr. 2.7: Zapojení debugu a uživatelského rozhraní

Při zprovoznění zařízení se nám nevyhly problémy. V zapojení jsme našli dvě chyby. První byla v zapojení výstupu měření, který byl připojen na pin mikrokontroléru s pouze 12 bitovým AD převodníkem. Hlavním důvodem pro výběr našeho mikrokontroléru, byl sigma-delta převodník. Tedy jeho nevyužití by šlo přímo proti naší motivaci. Chybu jsme vyřešili připojením pomocí tenkého drátku na pin PE9, který byl jediným volným pinem s touto funkcionalitou.

Druhým pochybením v návrhu je zapojení USB, kde dle dokumentace mikrokontroléru měl být připojený pullup rezistor. Tato chyba vznikla rozdílností mikrokontroléru oproti původnímu testování. Po opravě sigma-delta měření a přidání rezistoru jsme žádné další chyby nezaznamenali. V průběhu zkoušky měření napětí na baterii se nám ovšem povedlo zničit spínaný měnič napětí RMP604. Pokus o nahrazení čipem TPS63030 z důvodu nedostupnosti předchozího čipu se nám bohužel nepovedl. Nakonec jsme museli použít k



Obr. 2.8: Plošný spoj sondy

pokračování práce záložní sondou.



Obr. 2.9: Osazená sonda připravená pro firmware

## 2.3 Firmware

Hlavní náplní práce bylo udělat funkční firmware, který bude splňovat následující podmínky:

- Měřit rychlostí 5 Sa/s na displej
- Použít metodu spinnig current
- Data ze SDADC přenášet skrz DMA do paměti
- Přenášet data přes USB do desktopové aplikace
- Dlouhý stisk prvního tlačítka mění automatické a manuální volbu rozsahu měření
- Krátký stisk prvního tlačítka v manuálním režimu mění rozsahy
- Dlouhý stisk druhého tlačítka kalibruje nulu
- Krátký stisk druhého tlačítka relativní měření



- Schopnost měřit ve 4 rozsazích
- Udělat automatické přepínání rozsahů
- Zobrazovat na displej mód rozsah a hodnotu měření
- Zobrazovat na displej napětí na baterii a detekce USB

## 2.4 STM32 CubeID

Pro programování mikrokontroléru jsme použili prostředí přímo od firmy ST. Nástroj Cube ID nám umožnil jednoduše nakonfigurovat jednotlivé piny mikrokontroléru. Následně pro každý nakonfigurovaný pin nám vygeneroval kód včetně konfigurace jednotlivých periférií. Výhoda je, že nám ušetřil velké množství práce a hledání v registrech. Nevýhodou tohoto přístupu je občasná nedokonalost a chybovost v Halovské knihovně. Cube na této knihovně staví generaci kódu, tedy každá chyba a nedokonalost v ní je velmi těžce odhalitelná. Halovská knihovna je dobře popsána na stránkách ST[9]. I přes kvalitní popis jsme v ní ovšem narazili na chybu při generování inicializace.

## 2.5 Oživení mikrokontroléru

Nejdříve jsme zprovoznili mikrokontrolér. Jeho funkci jsme otestovali pomocí jednoduchého blikajícího programu.[11] Naším dalším krokem bylo zprovoznění Sigma-Delta AD (dále SDADC) převodníku. Museli jsme opravit pinout k SDADC. Následně jsme narazili na problém s měřením na tomto převodníku. Převodník je 16 bitový. Prvních 15 bitů tvoří hodnotu, 16-tý bit ovšem udává znaménko, takže převodník měří od -32 768 do 32 767. Tato vlastnost by šla nádherně využít u našeho pole . Problém nastává, že referenční napětí používáme 2,5 V, místo plánovaných 3 V. Tedy 0 převodníku je na 1,25 V a ne na původně zamýšlených 1,5 V, ke kterým je uzpůsobena napěťová reference. Musíme tedy naměřit nejdřív offset oproti nule převodníku, kterou chceme měřit v 1,5 V. Na této hodnotě bude pro nás velikost magnetické indukce nulová. Offset následně odečteme od naměřené hodnoty. Tím srovnáme napěťový offset na nulu. Dále jsme narazili na chybu v knihovně při generaci v Cube. Nefungovalo nám DMA k SDADC převodníku. Důvodem je, že se v DMA nastavují bity, které následně potřebujeme mít nastavené při inicializaci SDADC. Musíme tedy po každé nové generaci kódu tyto inicializace vyměnit. Nakonec se nám podařilo měření SDADC s přenosem do DMA zprovoznit.

## 2.6 Průběh měření

Po daném počtu DMA přenosů dojde ke callbacku. V tomto callbacku dochází k průměrování naměřených hodnot jednoho otočení. Tyto hodnoty nejdříve změříme do pole v paměti. Dále vypočteme jejich průměr. Ten si uložíme do paměti mimo oblast DMA. Následně při každém čtvrtém otočení dochází k průměrování všech průměrných veličin naměřených pro jednotlivé otáčky. Tímto postupem získáme výsledek našeho měření. Toto měření ovšem nelze jednoduše převést na celou hodnotu. Záleží totiž na nastaveném zesílení na programovatelném zesilovači. Ten je schopen hodnot zesílení 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 a 128. Pro měření používáme následující velikosti zesílení 1, 4, 32 a 128. Následně jsme spočítali jednotlivé rozsahy.

$$I = 1\text{mA}, U_{mes} = 1\text{V}, K_H = 380$$

$$K_H = \frac{U}{IB}$$

$$B_{max} = \frac{U}{IK_H} = \frac{1}{0,38} = 2,6315 \quad (2.2)$$

$$B_{roz} = \frac{U_{ref}}{N} \cdot N_{mes}$$

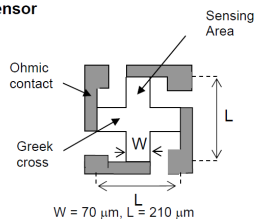
$$B_{roz} = \frac{2,5}{N} \cdot N_{mes}$$

$\vec{I}$  Proud protékající sondou  
 $U_{mes}$  Rozsah použitý pro měření napětí  
 $K_H$  Citlivost sondy

Používáme sondu CY-P3A. Sonda má velkou citlivost 380 V/AT a vysoký rozsah měření (0,1  $\mu\text{T}$  - 2 T). Její parametry jsou následující. Maximální napětí  $V_c$ , které sonda zvládne, je 6 V. Maximální proud  $I_c$  je 4,5 mA. Její skladovací a operační teplota je -100 až 180  $^{\circ}\text{C}$ . Její výstupní Hallovo napětí  $U = 38$  mV při proudu  $I = 1$  mA a indukci  $B = 100$  mT. Sonda je symetrická, a tak její vstupní i výstupní rezistence je 1,3 k $\Omega$ . [12]

Maximální proud se snažíme zanechat na 1 mA. Zesilovač nám při 0 V dává na výstup

Shape of the 2DEG Hall sensor



Obr. 2.10: Tvar hallovy sondy uvnitř pouzdra a její osazení na desce

0,1 V. Zároveň referenční napětí pro SDADC máme 2,5 V. Nakonec jsme tedy ponechali

napětovou referenci pro 0 hodnotu magnetické indukce na 1,5 V. To nám dává rozsah  $\pm 1$  V pro změny na SDADC převodníku. Zároveň se kalibruje nula převodníku dle aktuálních podmínek. Tedy rozsah 2,6315 T je trochu větší, než jsme v realitě schopni měřit. Po vyhodnocení nepřesností jsme rozsahy mírně zmenšili a dostaneme následující rozsahy měření  $\pm 2,5$  T, 0,6 T, 0,08 T a 0,02 T. Nejnižší rozsah je nastaven velmi hraničně, může být tedy menší, protože offset se přeměřuje automaticky před každým měřením. Offset má tedy přímý vliv na rozsah.

## 2.7 Nastavení rozsahu měření

Pro nastavení rozsahu měření máme dvě možnosti. První možností je použití autorange rozsahu. Ten se snaží nastavit nejlepší rozsah dle typu měření. Když zjistí, že můžeme měřit na menším rozsahu, přepne se na něj. Ten by měl mít lepší přesnost měření. Na menší rozsah přepínáme ve chvíli, kdy měření ukazuje nižší hodnotu než referenční. Tato hodnota je vypočtena následujícím způsobem.

$$ref_{min} = \frac{SDADC_{max-range}}{zesílení \pm hystereze} \quad (2.3)$$

Pro přechod na vyšší rozsah použijeme následující možnost.

$$ref_{max} = SDADC_{max-range} \pm hystereze \quad (2.4)$$

Kdy k převodu na vyšší rozsah dojde po překročení maximální hodnoty, která se vyskytuje v blízkosti krajních měřitelných mezí SDADC převodníku. Při dosažení této hodnoty se automaticky přepneme na vyšší rozsah. Druhou možností je použití manuálního režimu. Do manuálního režimu se dostaneme dlouhým stiskem horního tlačítka. Po dlouhém stisku se aktivuje manuální režim. Následně při krátkém stisku horního tlačítka dochází ke změně mezi jednotlivými režimy směrem od nejvyššího k nejnižšímu. Druhé tlačítko slouží k přenastavení nulového offsetu. Tato změna se v automatickém rozsahu provádí při nastavení na nejnižší citlivost (největším rozsahu) a při aktuálním rozsahu u manuálního režimu. Výsledkem této operace je získání asi nejlepšího možného offsetu. Důsledkem měření na nejvyšší citlivost dostáváme při nižších citlivostech hodnotu okolo 0 a ne čistou 0. Důvodem tohoto nastavení je, abychom jsme se s převodníkem nedostali do extrémních hodnot. V tu chvíli by mohlo nastat, že zařízení nebude měřit správně a některé jeho vlastnosti nebudou použitelné, jako například autorange. Můžeme se totiž dostat do krajních hodnot nad  $ref_{max}$  SDADC převodníku. Tedy by nefungovalo přepínání rozsahů na vyšší hodnotu,

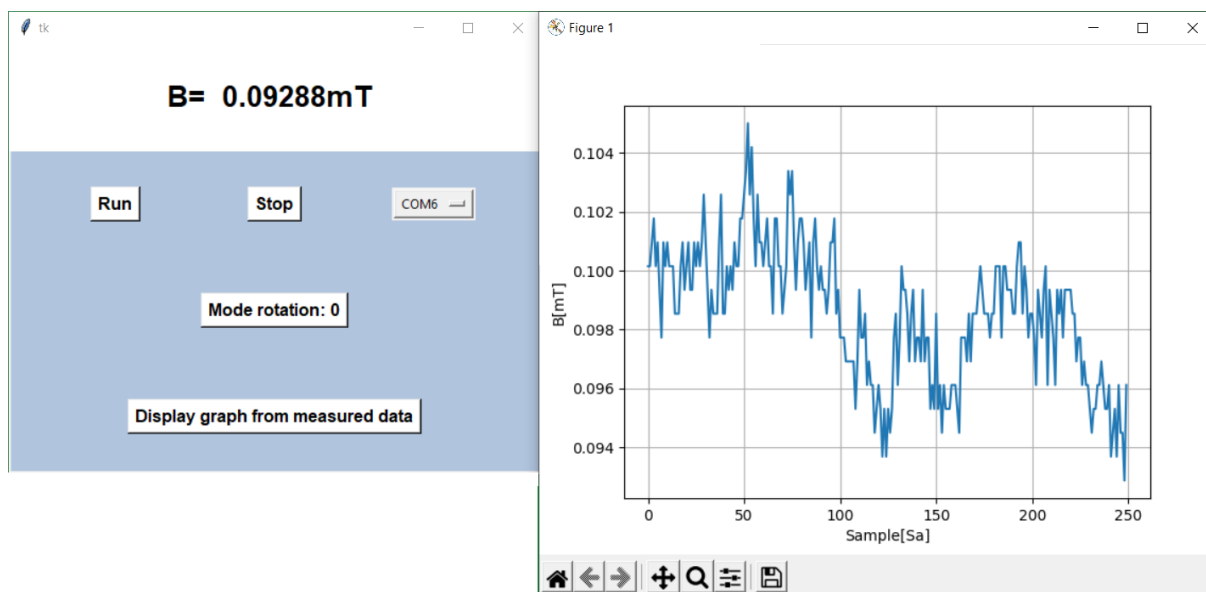
## 2.8 Aplikace programu

Zařízení se spustí po připojení k USB nebo při zapnutí napájení z baterie. Automaticky si změří nulovou hodnotu offsetu a snaží se tím zkalibrovat svoji nulovou hodnotu. Po kalibraci zůstává zařízení v autorange režimu. Na displej zapisujeme pomocí timeru rychlosti (30 FPS). V hlavní smyčce nastavujeme, v jakém režimu měříme. Následně v ní zapisujeme na displej a měníme nastavení zesílení. Měření běží paralelně. Jeho výsledky se plní do DMA bufferu. Když dojde k naplnění bufferu, zavolá se automatický callback, ve kterém se vypočte průměr z bufferu. Při každém dokončení rotace dojde zároveň k výpočtu naměřené hodnoty z průměru metody spinning current. Následně dojde k přepočtu převodníkové hodnoty na odpovídající hodnotu magnetické indukce. K přesnému výpočtu použijeme stav na zesilovači napětí. Slouží, jako reference pro rozdělení do jednotlivých výpočtů napětí. Tato informace se následně propisuje na displej a USB, kde se vytvoří virtuální sériový port, ke kterému se lze snadno připojit z uživatelské aplikace. Zde ji můžeme vidět a číst z terminálu nebo z vytvořené aplikace. Zároveň jsme schopni pomocí virtuálního portu ovládat možnost volby měření bez metody spinning current. Tuto možnost ovládáme pomocí posílání číslic 1-4. Pro zpětné vrácení se k metodě spinning current použijeme číslici 0.

## 2.9 Desktopová Aplikace

Jedním z dobrovolných úkolů bylo vytvořit desktopovou aplikaci pro měření. Vytvořili jsme tedy aplikaci v jazyce Python s názvem main.py . Tato aplikace funguje na principu čtení z portu USB. Po spuštění aplikace musíme zvolit port, na kterém je připojena sonda. Program automaticky aktualizuje seznam portů po jeho spuštění. Dostaneme jen výběr z portů momentálně přístupných z počítače. Zvolíme si tedy port se sondou a můžeme začít s měřením stiskem tlačítka RUN. Následně zobrazujeme data v reálném čase do grafu a zároveň je vypisujeme do aplikace. V grafu vykreslujeme pouze posledních 500 vzorků. Zároveň po celou dobu měření ukládáme naměřená data do souboru. Tyto data jsou uloženy v souboru result.txt . Ten se při novém měření přepisuje. Měření jde ukončit kliknutím na měřenou hodnotu (na tlačítko stop).

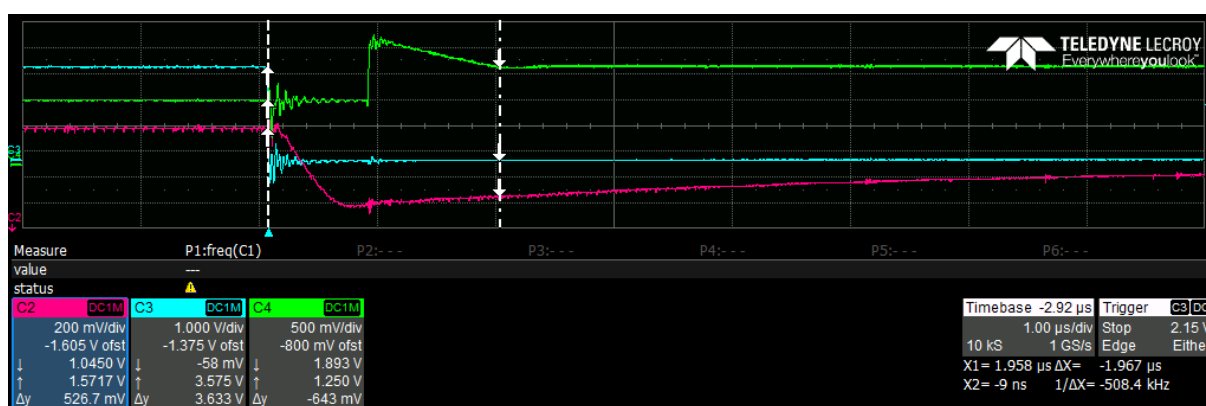
Tímto zavřeme spojení na USB port. Při zavření okna aplikace dojde k zavření programu. Toto pravidlo platí i pouze pro zavření vyskakovacího okna měření za běhu. Aplikace zároveň podporuje skrytou funkcionalitu, měření bez metody spinning current. Tuto funkci jsme schopni ovládat pouze pomocí sériového portu. Nemáme možnost ji ovládat pomocí rozhraní zařízení. Zároveň aplikace dovoluje načíst si starší soubory z měření do grafu. Data v grafu lze přiblížit, posunovat a lze také vygenerovat obrázek z grafu.



Obr. 2.11: Měření ve vytvořené aplikaci

## 2.10 Přechodová charakteristika měření

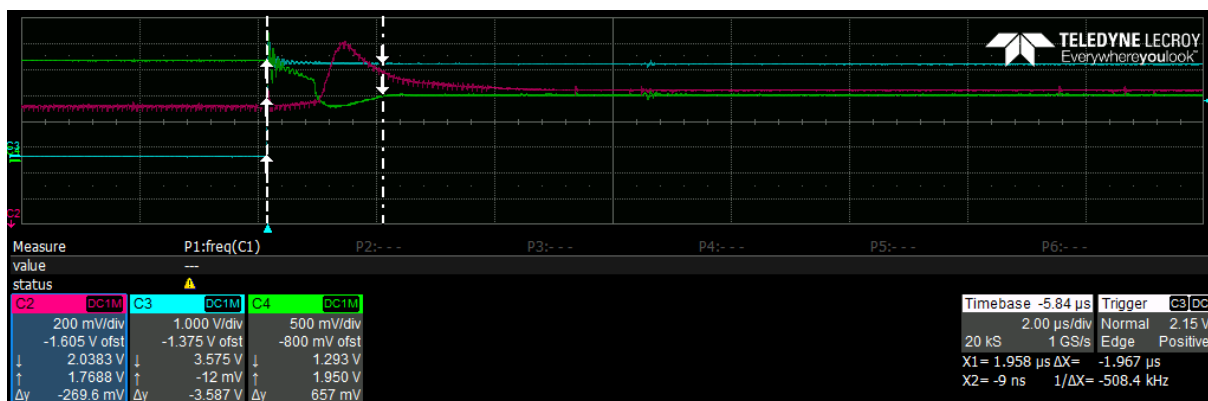
Při metodě spinnig current měníme směr měření a proudu na Hallové sondě. Je důležité znát chování během této změny proudu. Očekáváme, že při změně napájecího páru dochází k zákmitu měřeného napětí. Když nastane zákmit, musíme znát jeho délku, abychom byli schopni říci, za jak dlouho tento jev odezní. Ideálně chceme měřit až po konci zákmitu, pro co největší přesnost. Zároveň naměřenou charakteristiku porovnáme s naměřenými hodnotami SDADC převodníku. Připojili jsme k našemu zařízení osciloskop s několika sondami a měřili postupné změny na napětí. Zjednodušíme si měření rotací pouze



Obr. 2.12: Změna po otočení na Hallově sondě

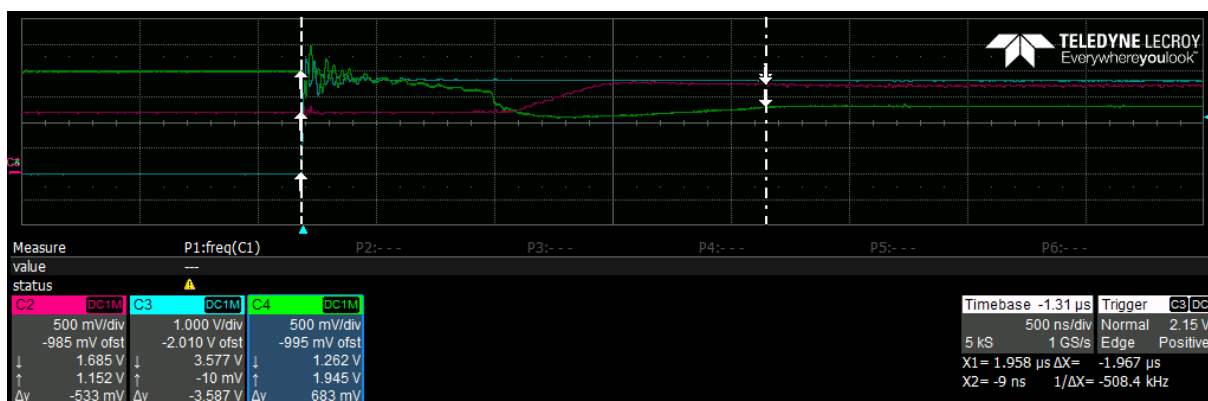
mezi dvěma pozicemi. Bude nám tedy stačit triggerovat na jednom bitu rotace. Modrý signál ukazuje změnu na vstupu do multiplexoru. Je to řídicí signál a ukazuje změnu bitu na multiplexoru. Červený signál zobrazuje změnu na vstupu do Hallové sondy. Zelený signál ukazuje změnu na výsledku zesilovače. Tento signál velmi jasně ukazuje, že

spínáme na dvou multiplexorech. Vidíme nejdříve sepnutí na vstupu. Chování napovídá, že se nejdříve připneme na vstup proudu a následně na měření sepnutím druhého multiplexoru na výstupu. Rozdíl v době sepnutí je 1 us. Zároveň jasně identifikujeme dobu přechodu. Ta je 2 us. SDADC převodník má vzorkovací frekvenci 50 kSa/s. Z toho jsme vypočítali, že doba měření na SDADC je 20 us. Spinem na sondě by měl být zasažený pouze první vzorek. Jelikož měříme 750 hodnot, které následně průměrujeme, tak vliv na měření by měl být zanedbatelný. Další měření jsme provedli při spinu do výchozí



Obr. 2.13: Změna po otočení zpět na Hallově sondě

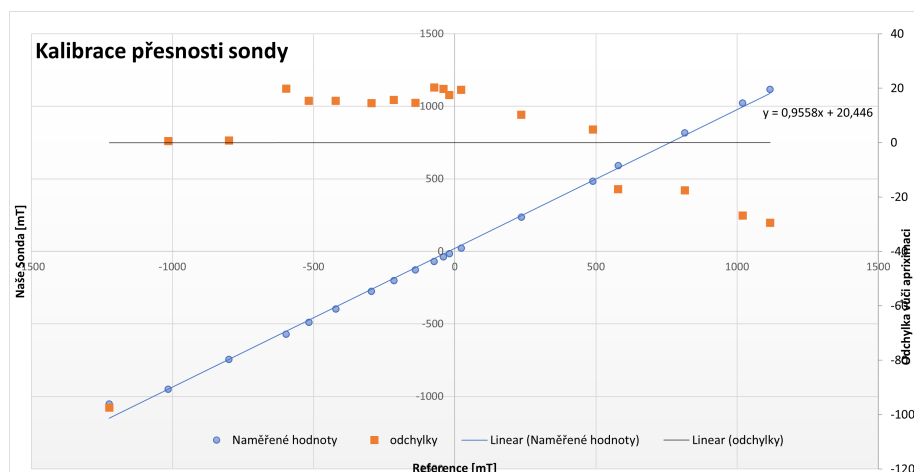
polohy, která byla před prvním měřením. Modrý bitový signál jde tedy nahoru. Následně vidíme přesný opak. Nejprve sepneme multiplexor na měření a následně až druhý na vstup proudu. Opět je 1 us mezi jednotlivými sepnutími multiplexoru. K době ustálení také dochází za 2 μs.



Obr. 2.14: Měření s Hallovou sondou

## 2.11 Magnetické Jho

Magnetické Jho je zařízení, které se nejčastěji využívá pro magnetování permanentních magnetů. Je napájené z usměrňovače, dynama nebo akumulátorové baterie. Pro nejlepší



Obr. 2.15: Proložení naměřených hodnot přímkou a výpočet odchylky od refernce

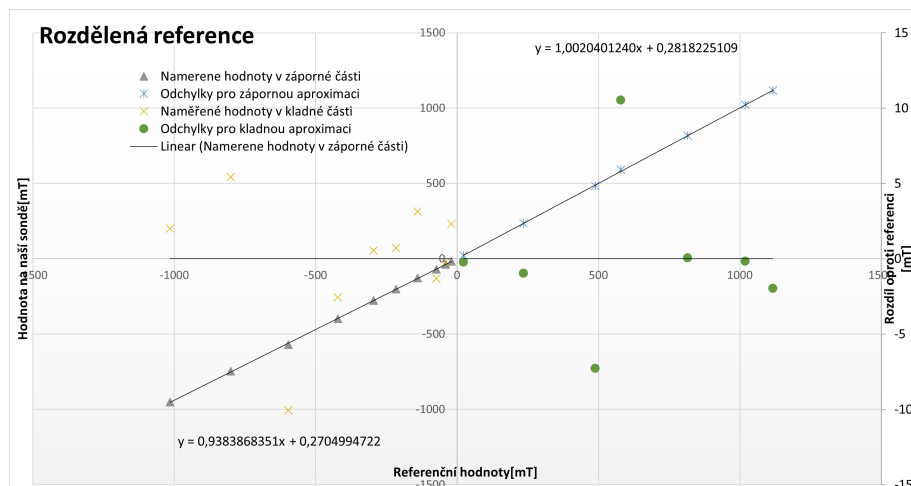
využití magnetovacího napětí cívek jsou cívky umístěné co nejbližže mezeře Jha. Zároveň se tímto zmenšují rozptylové vzdálenosti cívky. Ve středu Jha jsme schopni udržovat stejnosměrné magnetické pole. Proto jsme tento přípravek využili ke kalibraci sondy. Většinou se do středu Jha umísťují magnety, které chceme zmagnetizovat. Magnetizační Jho má velkou časovou konstantu. Celá aparatura je postavena na magnetickém materiálu ve tvaru písmene U pro usměrnění siločár v magnetickém materiálu.[13]

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (2.5)$$

Je to doba, kterou potřebujeme k dosažení ustáleného proudu Jha při magnetizaci stejnosměrným proudem a při které nemusíme počítat s povrchovým jevem magnetu.

## 2.12 Kalibrace v Magnetickém Jhu

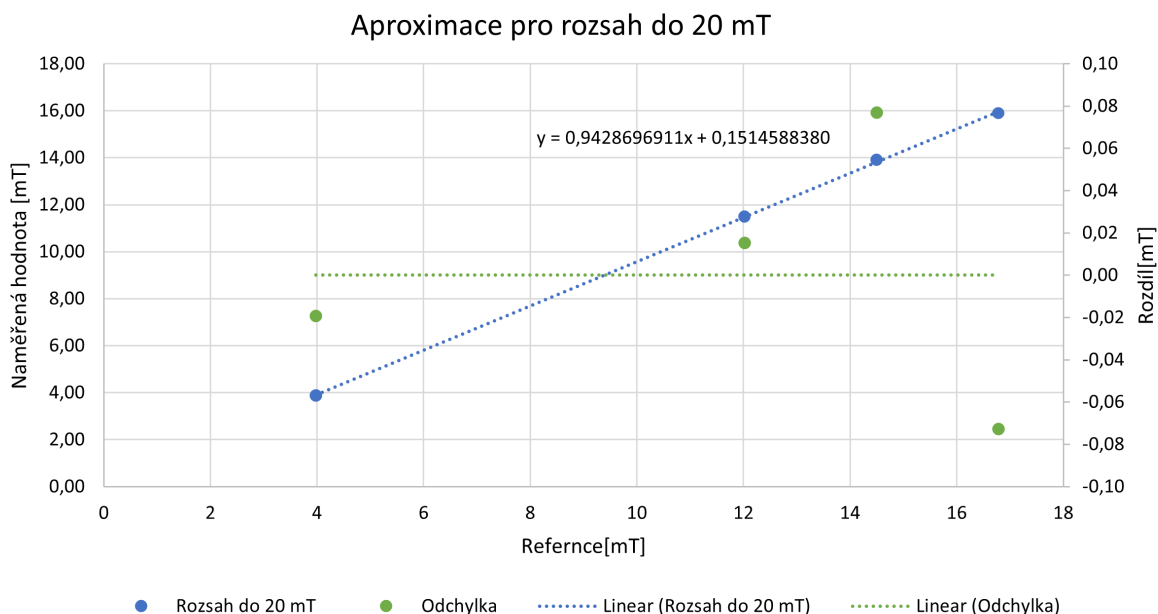
Magnetické Jho je tvořeno dvěma silnými elektromagnety. Mezi našimi dvěma póly elektromagnetu se nachází stejnosměrné pole. Sílu elektromagnetu jsme schopni regulovat pomocí velikosti proudu. Výhoda zařízení je, že jsme schopni simulovat různé hodnoty magnetického pole. Zároveň je ideální pro měření Hallovo sondou s jednoosým senzorem. Provedli jsme měření se dvěma zařízeními. První zařízení je naše vytvořené zařízení. Jako referenční zařízení pro měření tohoto pole jsme použili komerční zařízení od firmy Lakeshore. První měření bylo pouze orientační, neproměřovali jsme jednotlivé rozsahy. Snažili jsme se všechny rozsahy optimalizovat pomocí jedné přímky. Spočítali jsme průměrnou odchylku pomocí metody nejmenších čtverců. Následně jsme proložili měření přímkou a spočítali velikost odchylky vůči naší přímce. Z vypočtených hodnot odchylky je vidět, že se křivka chová různě pro zápornou a kladnou část měření. Odchylky v kladné části jsou záporné, zatímco odchylky v záporné části jsou kladné. Zkusili



Obr. 2.16: Vypočtené aproximace po rozdělení na kladnou a zápornou část

jsme tedy rozdělit hodnoty na kladnou a zápornou část. Výpočet s rozdělením jsme si opět vynesli do grafu pro lepší viditelnost. V grafu jde vidět, že odchylky jsou daleko víc vertikálně rozprostřeny kolem osy X.

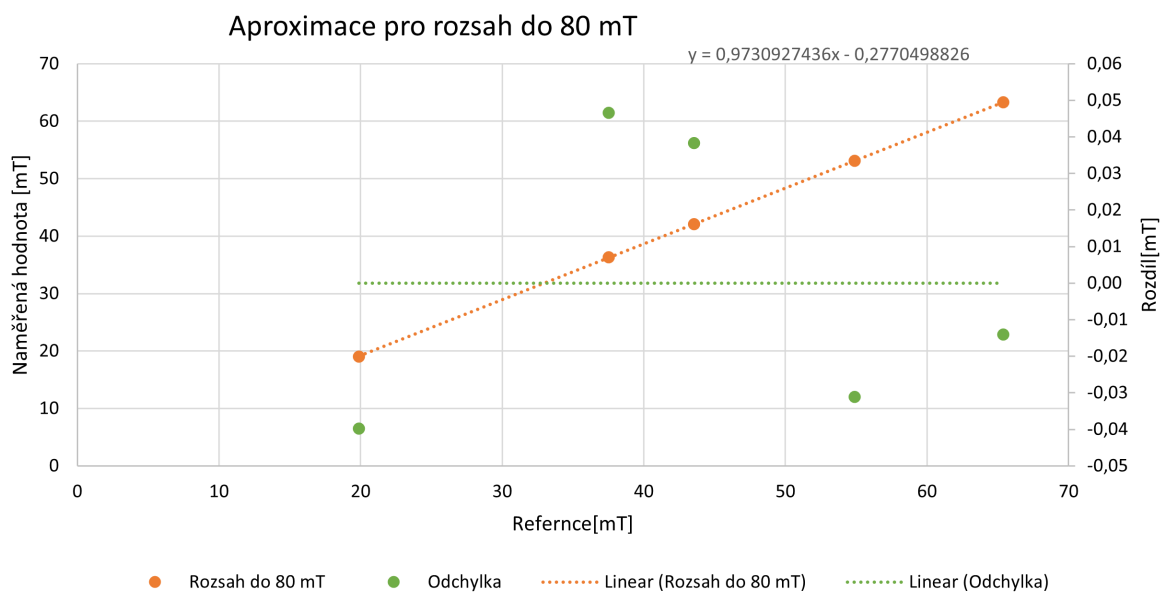
Rozhodli jsme se rozdělit měření na dvě poloviny a každou prokládat jinou směrnici. Provedli jsme nové měření s naší novou konfigurací. Ani tato konfigurace se ovšem nejevila jako dostatečná. Provedli jsme tedy další měření a každý rozsah jsme zvlášť zkalibrovali. Pro jednotlivé rozsahy nám vyšly následující koeficienty. Po aproximaci na rozsahu 20



Obr. 2.17: Vypočtené aproximace pro kladné rozdělení na rozsahu 20 mT

mT , nám vyšla odchylka 0,08 mT. Po aproximaci na rozsahu 80 mT , nám vyšla odchylka 0,05 mT. Po aproximaci na rozsahu 600 mT nám vyšla odchylka 0,4 mT. Po aproximaci



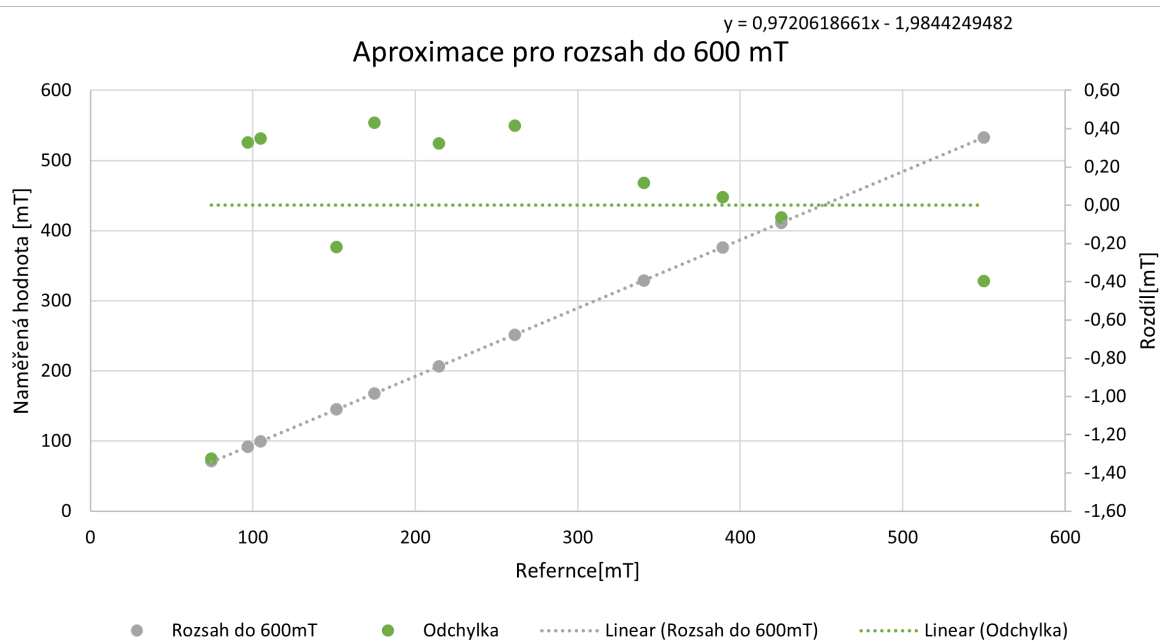


Obr. 2.18: Vypočtené aproximace pro kladné rozdělení na rozsahu 80 mT

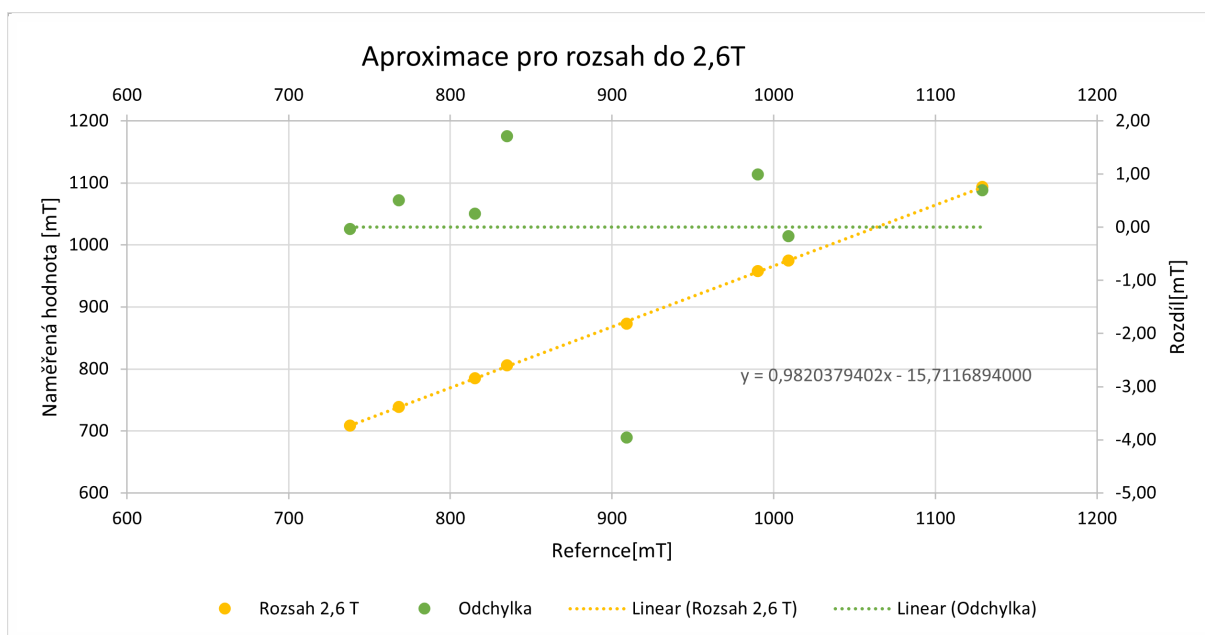
na rozsahu 2,6 T , nám vyšla odchylka 2,5 mT. Následně jsme se pokusili tyto aproximace aplikovat na kladnou i zápornou část. Nakonec jsme provedli měření oproti referenci.

## 2.13 Lakeshore model 475

Jedná se o měřič magnetického pole s Hallovou sondou vyráběný firmou Lakeshore. Měřič využívá metodu s digitálním signálovým mikrokontrolérem pro měření s pomocí Hallové sondy. Zařízení je schopno měřit plně v rozsahu 35 mG až 350 kG. To je po převodu 3,5  $\mu\text{T}$  až 35 T. Přístroj je schopný měření stejnosměrného pole až po velikost 0,02 mG. Dále umí měřit od stejnosměrného pole po pole o frekvenci 50 kHz. Podporuje možnost použití speciálních a vlastních sond. Mezi pokročilé vlastnosti se řadí vlastnosti, které podporují automatizované měření. V přístroji je sběrnice IEEE-488, která může být nastavená pro posílání binárních hodnot oproti klasickému posílání v běžnějším ASCII formátu. Vnitřní paměť obsahuje úložné místo pro 1024 vzorků. Zároveň buffer může být plněný rychlosti vyšší než 1000 vzorků za sekundu. Přístroj obsahuje TTL úroňový hardwarový trigger. Zároveň TTL konečný trigger, který značí naplněný buffer.



Obr. 2.19: Vypočtené aproximace pro kladné rozdělení na rozsahu 600 mT



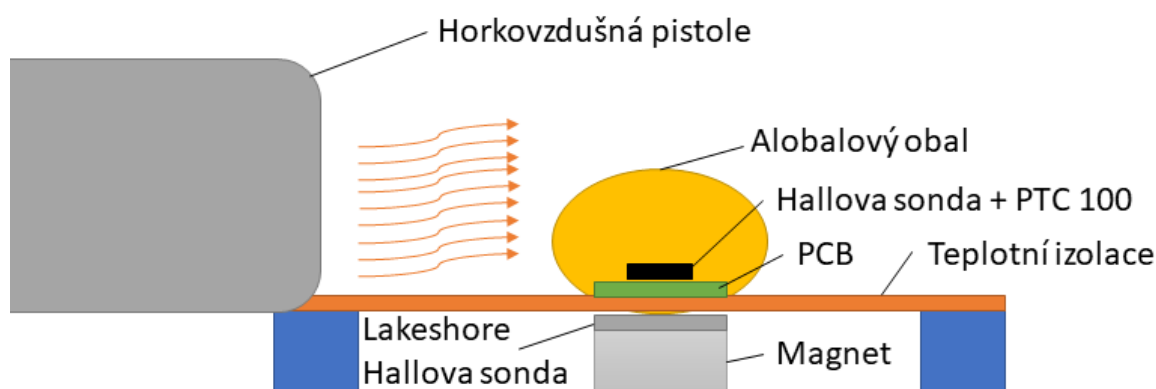
Obr. 2.20: Vypočtené aproximace pro kladné rozdělení na rozsah 2,6 T

# Kapitola 3

## Měření

### 3.1 Měření teplotní závislosti

Pro ověření teorie metody spinning current jsme museli provést měření při zvýšené teplotě sondy. Při provedení měření jsme se setkali s celou řadou obtíží. První háček pro realizaci teplotně závislého měření je chování magnetu během zahřívání. Ten ztrácí magnetické vlastnosti. Museli jsme tedy vymyslet měřicí experiment, kdy budeme zahřívát pouze sondu bez magnetu a zároveň měřit stacionární magnetické pole. Vytvořili jsme

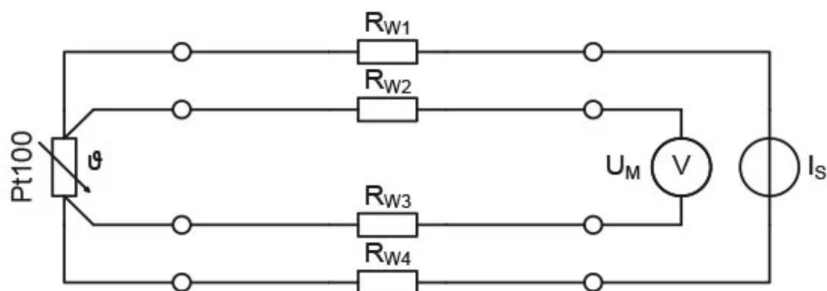


Obr. 3.1: Aparatura měření teploty

následující měření. Umístili jsme magnet pod teplotně izolační materiál. Mezi magnet a izolační materiál jsme vložili referenční měřič s Hallovu sondou. Neustálým měřením magnetické indukce po celou dobu pokusu jsme kontrolovali neměnnost stacionárního

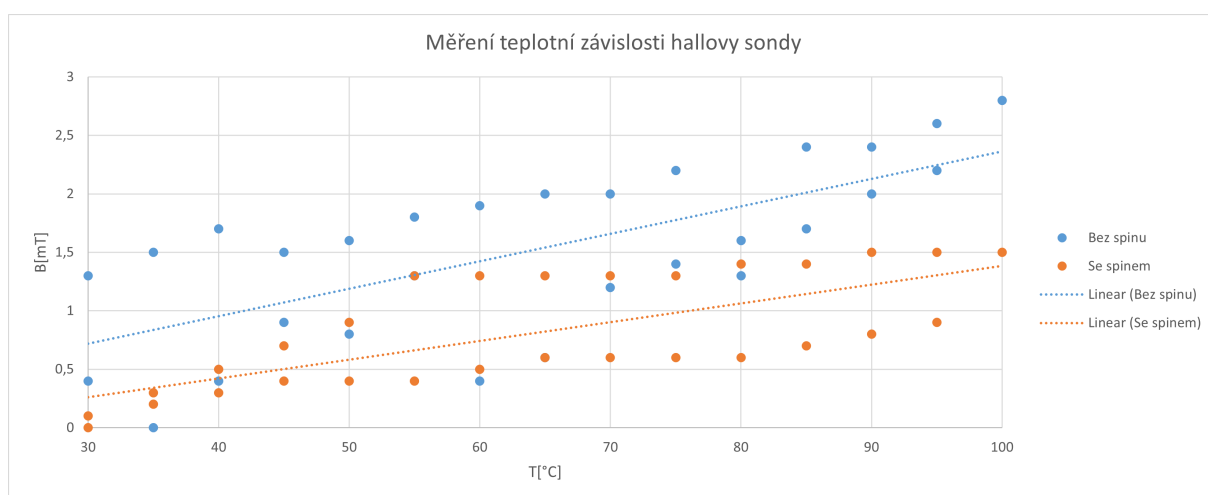
magnetického pole během zahřívání. Vznikla teplotně nezávislá kapsa. Na horní stranu kapsy byl umístěn námi vytvořený měřič. Na konec měřiče jsme připevnili teplotní senzor PT100, hned vedle Hallovy sondy. PT100 jsme zapojili následovně:

↖



Obr. 3.2: Zapojení 4 svorkového měření teploty

Jedná se o čtyř svorkové měření teploty. [14] Tímto měřením jsme schopni potlačit nepřesnosti vzniklé odporem přívodů do senzoru teploty. Pokračovali jsme obalením senzoru hliníkovou fólií pro stálejší změny teploty během zahřívání. Konec sondy jsme zahřívávali pomocí horkovzdušné pistole. Zahřívání fungovalo velmi rychle. Alobal v okolí čidel sloužil k delšímu uchování teploty během měření. Naměřili jsme následující rozdíly hodnot:



Obr. 3.3: Graf tepelné závislosti na rozdílu měření

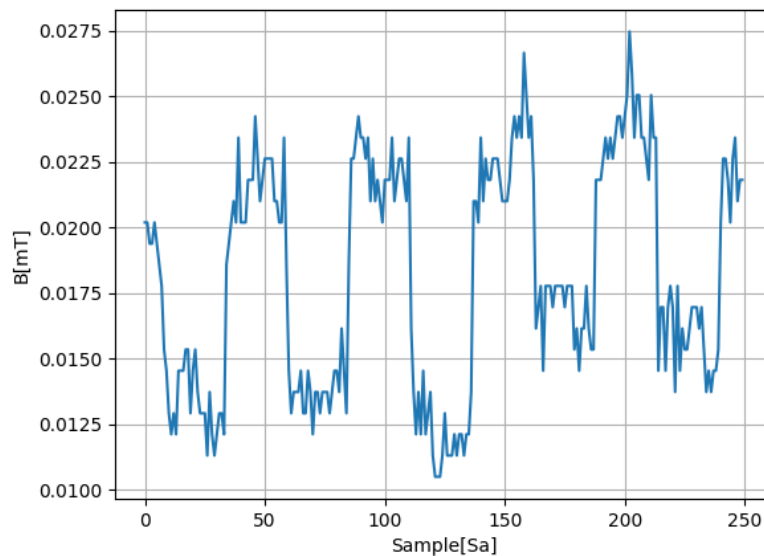
Z naměřených veličin lze vidět, že spinning current metoda drží od 55°C do 100°C velmi malou odchylku o velikost 0,3 mT. Bez metody spinning current nám vzniká rozdíl na



Obr. 3.4: Měření tepelné závislosti

tomto rozsahu o velikosti 1 mT. Metoda spinning current, tedy zlepšuje přesnost měření při změně teploty.

### 3.2 Měření šumu a chyby rozptylu



Obr. 3.5: Graf nejmenšího rozlišení

Poslední provedené měření se zabývalo šumem a pokusem naměřit co nejnižší hodnotu rozlišení. Nejmenší rozlišitelnou změnu jsme měřili pomocí cívek. Uvnitř nich jsme indukovali magnetické pole, které jsme přepínali z kladné na zápornou hodnotu. Naměřili jsme následující změnu z obrázku 3.5 .

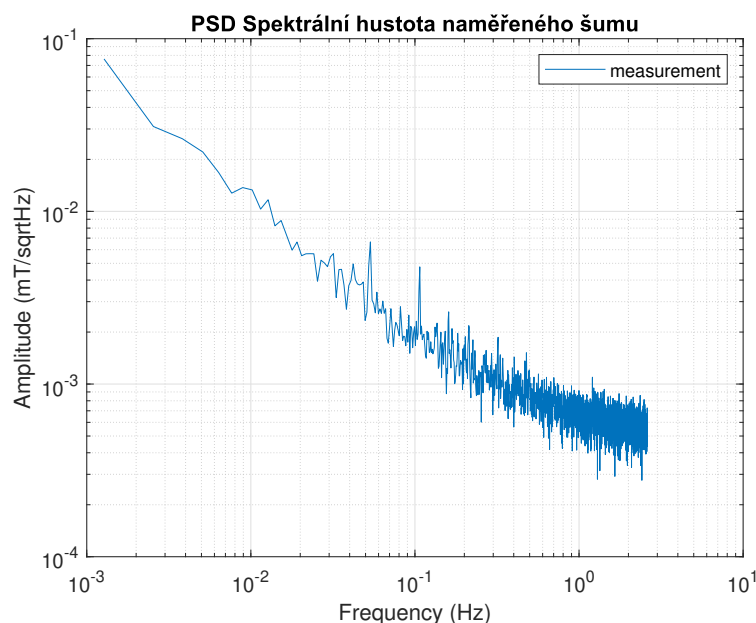
V klidovém režimu v magnetickém stínění jsme naměřili následující hodnoty  $B = 135 \mu T$  a  $I = 22,6 \text{ mA}$ . Ty nevyhovují referenční konstantě  $101,4 \text{ mA/T}$ . Magnetické pole cívky je tedy ovlivněno blízko umístěným feromagnetickým materiálem stínění a konstanta cívky je mírně větší. Z naměřených hodnot si vypočteme novou konstantu a následně určíme rozlišení. Vypočetli jsme hodnotu magnetické indukce, kterou budíme.

$$\begin{aligned} B &= 135; I = 22,6 \text{ mA}; I_{mes} = 300 \mu A \\ B_{mes} &= 0.135/22.6 \cdot 0,683 \cdot 10^{-3} = 4 \mu T \end{aligned} \quad (3.1)$$

Následně jsme měřili šum našeho magnetometru. Umístili jsme tedy magnetometr do stínění a provedli jsme hodinové měření, při němž jsme ukládali jednotlivé hodnoty měření do počítače. Pokusným měřením jsme zjistili, že za 30 minut jsme měli 9200 vzorků. Takže vypočtem vzorkovací frekvenci následovně.

$$\begin{aligned} samples &= 9200 \\ t &= 60 \cdot 30 \\ fs &= \frac{samples}{t} = \frac{9200}{1800} = 5.1 \text{ Sa/s} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Zajímá nás hodnota z grafu spektrální hustoty, při frekvenci 1 Hz [15]. Při této hodnotě,



Obr. 3.6: Graf spektrální hustoty šumu

nabývá amplituda velikosti  $B_n = 0,7 \mu T/\sqrt{Hz}$ . Naměřenou hodnotu jsme porovnali s hodnotu pro Hallův senzorem A1366. Ten má  $B_n = 1,1 \text{ mG}/\sqrt{Hz}$ . Po převedení na stejnou jednotku zjistíme, že námi naměřená hodnota je sedmkrát větší než u senzoru A1366. (z jeho katalogového listu ale není zřejmé pro kterou frekvenci uvedená hodnota

platí)

# Kapitola 4

## Závěr

Podařilo se mi sestavit příruční měřič s Hallovou sondou. Odladil jsem obvod a opravil chyby v návrhu. Do mikrokontroléru jsem vytvořil a nahrál firmware, který je schopný měřit metodou spinnig current, při minimální rychlosti 5 Sa/s, a zobrazovat naměřenou hodnotu na displej. Provedl jsem kalibraci magnetometru a ověřil jsem základní parametry, jako jsou šum, linearita a teplotní stabilita. Zároveň jsem splnil volitelné zadání a to vytvoření programu, který načte data z přístroje, vypíše je v aplikaci a nakonec vykreslí data do grafu. Splnil jsme tedy z plna všechny body zadání včetně rozšířené funkcionality. Vytvořil jsem tedy funkční zařízení, které používá spinnig current metodu a je levnější než komerční přístroje. Při tom je schopno konkurovat dražším zařízením. Zároveň lze obsluhovat z počítače a umí zaznamenávat naměřená data.



# Reference

[1] Lakeshore 475 [online]. In: . [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.lakeshore.com/products/categories/overview/magnetic-products/gaussmeters-teslameters/model-475-dsp-gaussmeter>

[2] Senis 3MTS USB handheld Teslameter [online]. In: . [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://matesy.de/en/products/magnet-measurement-calibration/3mts-teslameter-gaussmeter>

[3] Phywe COBRA SMARTSENS. [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/p/phywe-cobra-smartsense-3-axis-magnetic-field-pristroj-pro-mereni-magnetickeho-pole-2564603?vat=true&clid=Cj0KCQjw1ZeUBhDyARIsAOzAqQK7E8UouFmEqVYzJUQlp7-DbPI3tjJQliaAsjzTn8p-uivAo4HTHFkaAs0xEALw-wcB>

□

[4] DRAXLER, Karel, Petr KAŠPAR a Pavel RIPKA. Magnetické prvky a měření. Vyd. 3. V Praze: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03970-0. s. 5-9

[5] (ED), Pavel Ripka. Magnetic Sensors and Magnetometers. Measurement Science and Technology. 2002, 13(4), 645-645. ISSN 0957-0233. Dostupné z: doi:10.1088/0957-0233/13/4/707

[6] DRAXLER, Karel, Petr KAŠPAR a Pavel RIPKA. Magnetické prvky a měření. Vyd. 3. V Praze: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03970-0. s. 94-96

[7] L. Osberger, V. Frick, L. Hébrard, Four-phase Bi-current Spinning Current on Shallow Vertical Hall Sensor, Procedia Engineering, Volume 120, 2015, Pages 120-123, ISSN 1877-7058,

- [8] MOSSER, Vincente, MATRINGE, Nicolas and HABBAB, Youcef. A Spinning Current Circuit for Hall Measurements Down to the Nanotesla Range. IEEE Xplore Full-text PDF: [online]. 4 April 2017. [Accessed 18 May 2022]. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7845584>
- [9] STMicroelectronics, "Stm32 ide user guide", User manual, PDF: [online], 2021 , Available from: [https://www.st.com/resource/en/user\\_manual/um2609-stm32cubeide-user-guide-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/user_manual/um2609-stm32cubeide-user-guide-stmicroelectronics.pdf)
- [10] Texas Instruments, "LM66100", LM66100 datasheet, PDF: [online], 2019 , Available from: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm66100.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-wwets=1652964115171ref\\_url=https%253A%252F%252Fcz.mouser.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm66100.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-wwets=1652964115171ref_url=https%253A%252F%252Fcz.mouser.com%252F)
- [11] BINDAL, Ahmet, 2017, Electronics for embedded systems. Cham: Springer.
- [12] ChenYang Technologies, "Hall Effect Sensor CY-P3A," CY-P3A datasheet, 2018. Markt Schwabener Str. 8 [Offline]
- [13] DRAXLER, Karel, Petr KAŠPAR a Pavel RIPKA. Magnetické prvky a měření. Vyd. 3. V Praze: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03970-0. s. 182-183
- [14] HOROWITZ, Paul a Winfield HILL, 2015. The art of electronics. Third edition. New York: Cambridge University Press. ISBN 978-052-1809-269.
- [15] RIPKA, Pavel a Michal JANOSEK. Advances in Magnetic Field Sensors. IEEE Sensors Journal [online]. 2010, 10(6), 1108-1116 [cit. 2022-05-19]. ISSN 1530-437X. Dostupné z: [doi:10.1109/JSEN.2010.2043429](https://doi.org/10.1109/JSEN.2010.2043429)