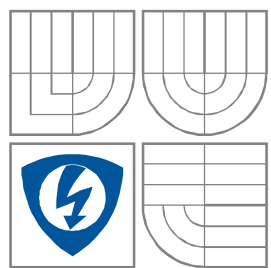


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE

MEASUREMENT OF THE MAGNETIC FIELD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

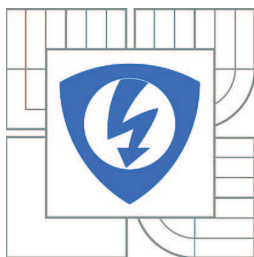
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MICHAL ŠIMBERSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. JIŘÍ FIALKA

BRNO 2012



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Michal Šimberský

ID: 119626

Ročník: 3

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Měření magnetického pole

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte literární průzkum na téma snímačů pro měření magnetického pole země založených na magnetorezistivních principech – typické konstrukce, principy, výrobci, dosažitelné parametry, srovnání dle katalogových hodnot. Proveďte stručné srovnání vhodnosti MR snímačů pro měření magnetického pole země s ostatními typy snímačů magnetického pole – uveďte výhody a nevýhody.

Proveďte návrh cívek v Helmholtzově uspořádání a tento návrh realizujte. Funkčnost výsledného konstrukčního uspořádání ověřte vlastním měřením v laboratoři a výsledné hodnoty porovnejte s teoretickými předpoklady. Určete nejistotu stanovení konstanty Helmholtzovy cívky. Definujte hlavní zdroje nejistot měření, stanovte jejich podíl na celkové nejistotě měření a navrhnete opatření pro snížení nejistot měření.

Proměřte vlastnosti dostupných snímačů magnetického pole určených do kompasů a demonstруйте vhodnost pro měření magnetického pole země. Pro kalibraci využijte přípravky s Helmholtzovými cívkami.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

BOLL, R., OVERSHOTT, K.J., Magnetic Sensors, Sensors: A Comprehensive Survey, Volume 5, VCH Weinheim, 1989, p. 513, ISBN:3-527-26771-9.

TROUT, S.R., Use of Helmholtz coils for magnetic measurements, IEEE Transactions on Magnetism, July 1988, vol. 24, no. 4, p. 2108 – 2111, ISSN: 0018-9464

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 28.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Jiří Fialka

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá měřením magnetického pole a senzory, jimiž lze snímat magnetické pole. V práci je vysvětlen princip Hallovy sond a třech typů senzorů magnetického pole založených na magnetorezistivních principech, a to AMR, GMR a TMR senzorů. Dále se práce zabývá generováním homogenního magnetického pole pomocí cívek v Helmholtzově uspořádání a návrhem takovýchto cívek.

Klíčová slova

Magnetické pole, magnetické pole Země, senzory magnetického pole, Hallova sonda, AMR senzory, GMR senzory, TMR senzory, Helmholtzovy cívky.

Abstract

This bachelor thesis deals with the measurement of the magnetic field and sensors, which can scan the magnetic field. In this work is explained the principle of Hall probes and three types of magnetic field sensors based on magnetoresistive principles namely AMR, GMR and TMR sensors. The thesis also deals with the generation of a homogeneous magnetic field with Helmholtz coils and design of such a coil.

Keywords

Magnetic field, magnetic field of Earth, magnetic field sensors, hall effect sensor, AMR sensors, GMR sensors, TMR sensors, Helmholtz coils.

Bibliografická citace:

ŠIMBERSKÝ, M. *Měření magnetického pole*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 64s. Vedoucí bakalářské práce byl Ing. Jiří Fialka.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Měření magnetického pole jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **24. května 2012**

.....
podpis autora

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Fialkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **24. května 2012**

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Magnetické pole.....	9
2.1	Permanentní magnety.....	10
2.2	Elektromagnety	11
3	Magnetické pole Země.....	12
3.1	Vznik magnetického pole.....	12
3.2	Inklinace a deklinace.....	13
3.3	Základní parametry magnetického pole Země.....	14
4	Senzory magnetického pole	16
4.1	Senzory s Hallovým jevem	16
4.1.1	Dostupné Hallovy sondy.....	17
4.2	AMR senzory	17
4.2.1	Dostupné AMR senzory.....	20
4.2.2	AMR senzor HMC5843.....	20
4.3	GMR senzory	21
4.3.1	Dostupné GMR senzory.....	23
4.4	TMR senzory.....	24
4.4.1	Dostupné TMR senzory	25
5	Helmholtzovy cívky.....	26
6	Vlastní měření.....	29
6.1	Určení konstanty Helmholtzovy cívky.....	29
6.1.1	Nejistoty měření.....	33
6.2	Magnetické pole na ose Helmholtzových cívek.....	34
6.3	Magnetické pole v rovině osy Helmholtzových cívek.....	39
6.4	Měření s Hallovými sondami	41
6.5	Měření magnetického pole Země.....	45
6.6	Měření magnetického pole Země pomocí HMC5843.....	50
6.7	Návrh konstrukce Helmholtzových cívek.....	53
7	Závěr	55

1 ÚVOD

Magnetické pole kolem naší planety je generováno samotnou planetou Země. Takto vytvořené pole není nikterak intenzivní, ale jeho přítomnost je velice důležitá. Magnetické pole kolem Země tvoří štít, který chrání Zemi před škodlivým kosmickým zářením, a tím umožňuje a chrání život na planetě.

Magnetického pole Země lze využít k orientaci a navigaci. Za tímto účelem vzniklo ve starověké Číně zařízení zvané kompas. Kompas se časem vyvíjel až do podoby v jaké ho známe dnes. S rozvojem techniky, elektrotechniky a elektroniky vzniká i elektronická verze kompasu - elektronický kompas. Základním prvkem elektronického kompasu je senzor, který dokáže snímat magnetické pole. Těmito senzory a způsoby jakým snímají magnetické pole se zabývá tato práce.

Magnetické pole však není jen kolem Země, ale je i kolem vodičů, kterými protéká proud. Speciálním případem generování homogenního magnetického pole je použití kruhových cívek v Helmholtzově uspořádání. Tomuto uspořádání a návrhu takovýchto cívek je věnována další část této práce.

2 MAGNETICKÉ POLE

Každá hmota je složená z atomů, které obsahují protony, neutrony a elektrony. Protony, neutrony a elektrony mají specifickou vlastnost, a to spinové číslo neboli spin. Spin dává každé této částici nějaké magnetické pole. Dalo by se tedy předpokládat, že všechna hmota bude magnetická. Přesto tomu tak není. V každém atomu a molekule je spin těchto částic uspořádán podle Paulieho vylučovacího principu. Tento princip uspořádání spinu však platí pouze na malé vzdálenosti a neplatí na relativně velkou vzdálenost mezi atomy a molekulami. Bez tohoto uspořádání částic tak nevzniká magnetické pole, protože magnetický moment každé z částic je vyrušen momentem ostatních částic.

Magnet můžeme chápat jako předmět, který ve svém okolí vytváří magnetické pole. Magnety se dělí do dvou základních skupin na magnety permanentní a na elektromagnety.

[1]

„Magnetické pole se projevuje silovými účinky na jiné vodiče protékané elektrickým proudem, na pohybující se náboj nebo jiné magnety. Základní veličinou magnetického pole, pomocí kterého se tyto silové účinky posuzují, je magnetická indukce **B**. Jednotkou magnetické indukce **B** je tesla [T]. “ ([23], str. 16)

Magnetická indukce **B** je vektorová veličina vyjadřující silové účinky magnetického pole. Velikost magnetické indukce **B** v určitém místě magnetického pole je definována jako maximální síla **F_{max}**, kterou působí pole na náboj **Q**, který se pohybuje rychlostí **v**.

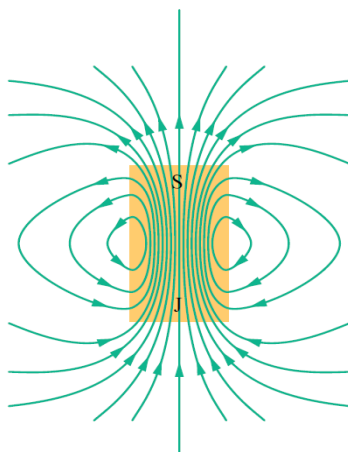
$$B = \frac{F_{\max}}{Qv} \quad [T]$$

Magnetickou indukci graficky znázorňujeme pomocí indukčních čar. Jsou to uzavřené křivky, na kterých tečna v libovolném bodě ukazuje směr magnetické indukce **B**.

[2][22][23]

2.1 Permanentní magnety

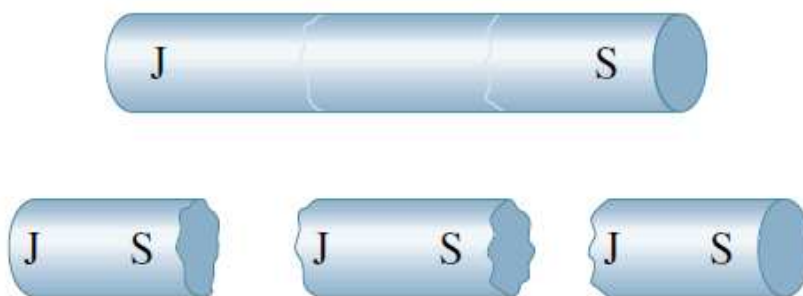
Permanentní magnety jsou vyrobeny z látek, které mají vnitřní uspořádání částic takové, že se jejich magnetické momenty nevyrušují, ale naopak sčítají a vytvářejí kolem sebe magnetické pole. Magnetické pole kolem permanentního magnetu znázorňují indukční čáry. Ty procházejí magnetem a vytvářejí uzavřené smyčky. Místo, kde tyto indukční čáry vystupují z magnetu, je nazýváno severním pólem magnetu. Místo, kde se do magnetu vracejí, nazýváme jižní pól magnetu. Permanentní magnety mohou být různých tvarů a velikostí. Na Obr. 2-1 je permanentní magnet tyčové tvaru s indukčními čarami znázorňující jeho magnetické pole.



Obr. 2-1 Tyčový permanentní magnet [2]

Každý permanentní magnet má alespoň jeden severní a jeden jižní magnetický pól. Pojem pól je zaveden pro popis magnetů. Pól tedy není jedno konkrétní místo, ale jde o oblast se specifickými vlastnostmi. Při rozpůlení magnetu ne získáme pouze jednu část se severním pólem a jednu s jižním pólem, ale dostaneme dva magnety, kdy každý z nich bude mít opět jeden severní a jeden jižní magnetický pól.

[2]

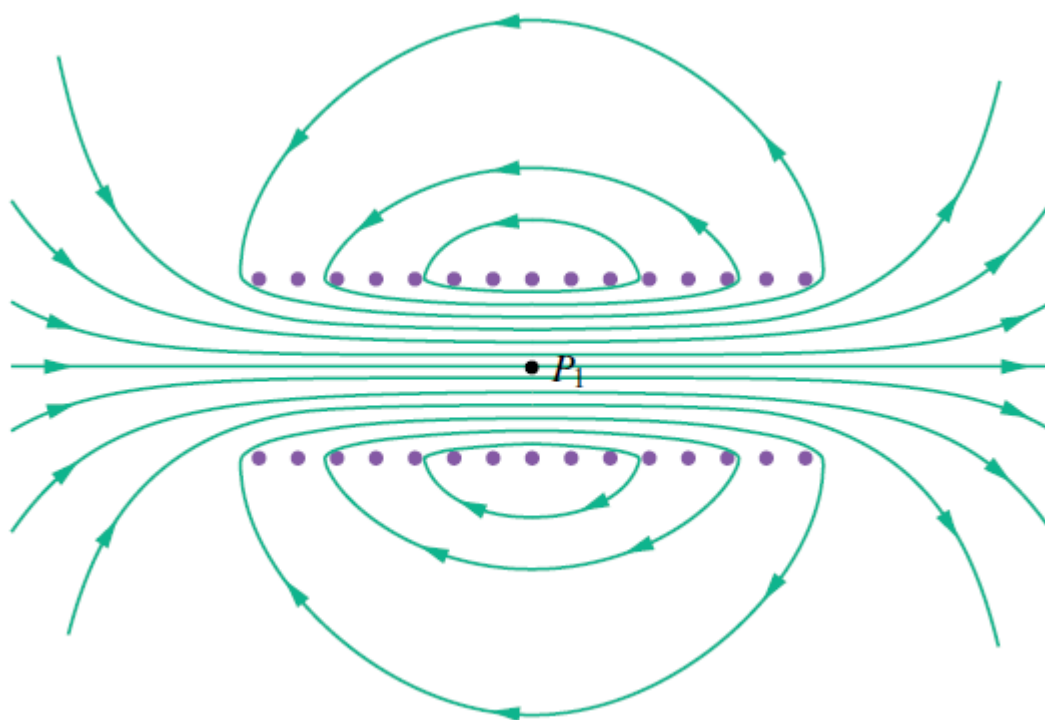


Obr. 2-2 Změna rozložení pólů při zlomení tyčového magnetu [2]

2.2 Elektromagnety

Elektromagnet je tvořen vodičem, kterým protéká proud. V důsledku pohybu elektricky nabitých částic vzniká v okolí vodiče magnetické pole. Elektromagnet bývá obvykle tvořen cívkou navinutou na feromagnetickém jádře nebo vzduchovou cívkou jak ukazuje Obr. 2-3. Velikost magnetického pole kolem cívky je dána procházejícím proudem, počtem závitů a materiálem jádra, na kterém je navinuta. Magnetické účinky elektromagnetu buzeného stejnosměrným proudem a permanentním magnetem jsou shodné.

[3]



Obr. 2-3 Řez elektromagnetem [2]

3 MAGNETICKÉ POLE ZEMĚ

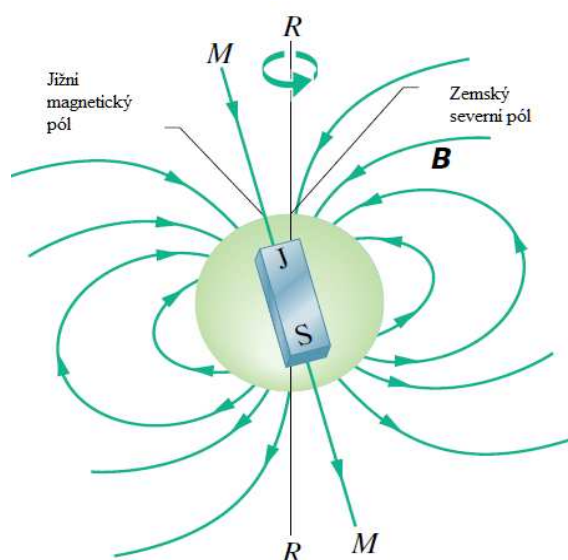
Magnetické pole Země neboli geomagnetické pole, je indukované magnetické pole v okolí Země. V tomto okolí Země působí magnetické síly vytvořené tzv. geodynamem uvnitř Země. Magnetické pole Země dosahuje až do vzdálenosti stotisíc kilometrů od povrchu planety. Magnetické pole kolem Země není symetrické. Jeho tvar je ovlivněn působením kosmického záření od Slunce. Na straně ke Slunci je pole zploštělé a na odvrácené straně naopak protáhlé.

[2] [3]

3.1 Vznik magnetického pole

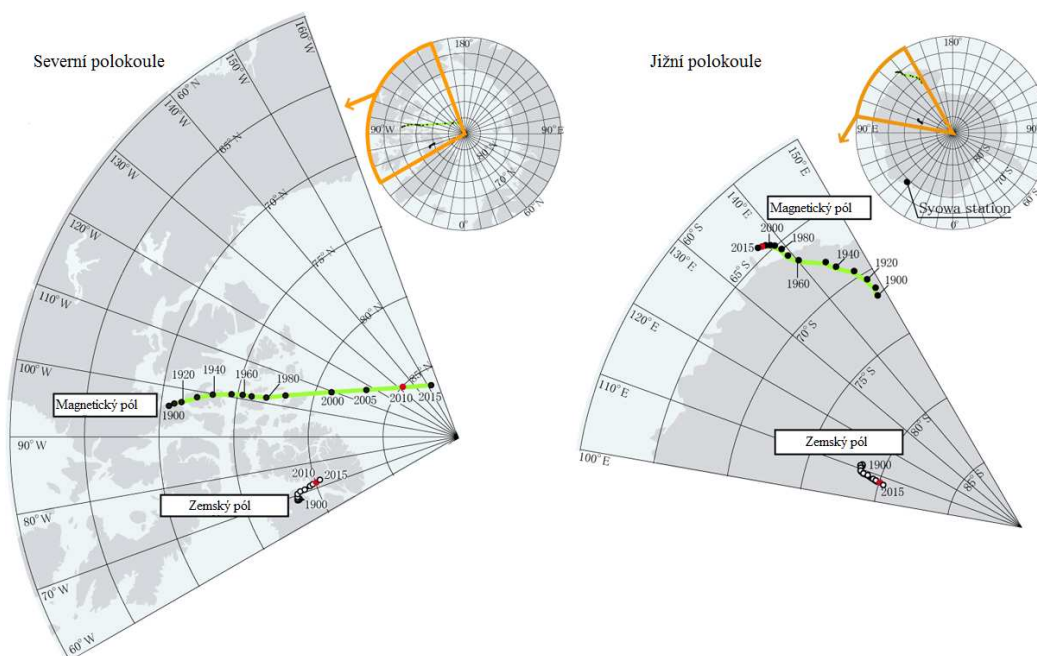
Magnetické pole Země vzniká v důsledku rotace elektricky vodivých hmot v jádře planety a následným třením s pevnou částí jádra. Vzniklé magnetické pole můžeme považovat za dipólové a Zemi si můžeme představit jako velký tyčový magnet. Magnetické póly však nesouhlasí s orientací ani polohou zemských pólů. Osa magnetických pólů je odkloněna od osy zemských pólů přibližně o 11 °. V blízkosti zemského jižního pólu vystupují magnetické siločáry ze Země a v blízkosti zemského severního pólu magnetické siločáry do Země vstupují. Z toho plyne, že v blízkosti zemského severního pólu se nachází jižní magnetický pól a v blízkosti jižního zemského pólu se nachází severní magnetický pól. Směr magnetických siločar je zobrazen na Obr. 3-1.

[3] [4]



Obr. 3-1 Směr magnetických siločar v okolí Země [2]

Poloha pólů, jak magnetických, tak zemských, je s časem proměnná a jejich změna je i nadále předpovídána. Změny polohy pólů od roku 1900 do roku 2015 zobrazuje Obr. 3-2.

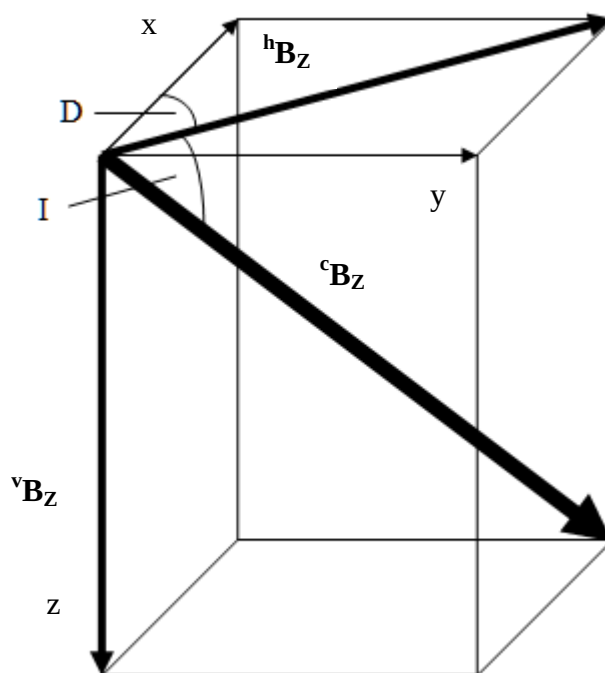


Obr. 3-2 Změna polohy magnetických a zemských pólů v čase [16]

3.2 Inklinace a deklinace

Směr a velikost magnetického pole na každém místě planety je možné popsat vektorem. Souřadnicový systém volíme tak, že osa x směřuje k zemskému severnímu pólu, osa z je ve směru gravitace v daném místě a osa y doplňuje pravoúhlý souřadnicový systém. Úhel D , který svírá horizontální část magnetického pole $^h\mathbf{B}_Z$ s osou x , nazýváme deklinace. Deklinace je tedy úhel mezi severním zemským pólem a jižním magnetickým pólem. Výsledný vektor magnetického pole je složen z horizontální části $^h\mathbf{B}_Z$ a z vertikální části $^v\mathbf{B}_Z$ magnetického pole a je popsán vektorem $^c\mathbf{B}_Z$. Vektor $^c\mathbf{B}_Z$ svírá s horizontální složkou magnetického pole úhel I . Tento úhel nazýváme inklinace. Grafické zobrazení je na Obr. 3-3.

[5]



Obr. 3-3 Zobrazení magnetického pole Země [5]

3.3 Základní parametry magnetického pole Země

K základním parametrům magnetického pole Země v určitém bodě patří jeho celková velikost, velikost jednotlivých složek celkové velikosti, inklinace a deklinace. Hodnoty jednotlivých složek podle NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) pro Brno ve 200 m.n.m. (49°12', 16°36'36"E) k roku 2012 jsou uvedeny v tabulce Tab. 3-1.

Tab. 3-1 Základní parametry magnetického pole Země v Brně pro rok 2012

Celková velikost	Horizontální složka	Vertikální složka	Inklinace	Deklinace
[μT]	[μT]	[μT]	[°]	[°]
48,792	20,346	44,347	65,21	3,39

Se změnou polohy magnetických a zemských pólů dochází i ke změně základních parametrů v čase. Jednotlivé parametry jsou dlouhodobě měřeny a archivovány. Tabulka Tab. 3-2 ukazuje jak se měnily základní parametry magnetického pole Země v Brně od roku 1950 do roku 2010. [15]

Tab. 3-2 Změna základních parametrů magnetického pole Země v Brně v čase

Rok	Celková velikost	Horizontální složka	Vertikální složka	Inklinace	Deklinace
	[μT]	[μT]	[μT]	[$^{\circ}$]	[$^{\circ}$]
1950	47,027	19,919	42,599	64,56	-1,14
1960	47,321	20,027	42,874	64,58	-0,22
1970	47,595	20,173	43,108	64,55	0,07
1980	47,927	20,291	43,420	64,57	0,49
1990	48,136	20,245	43,672	65,08	1,36
2000	48,413	20,260	43,969	65,16	2,24
2010	48,733	20,329	44,290	65,21	3,24

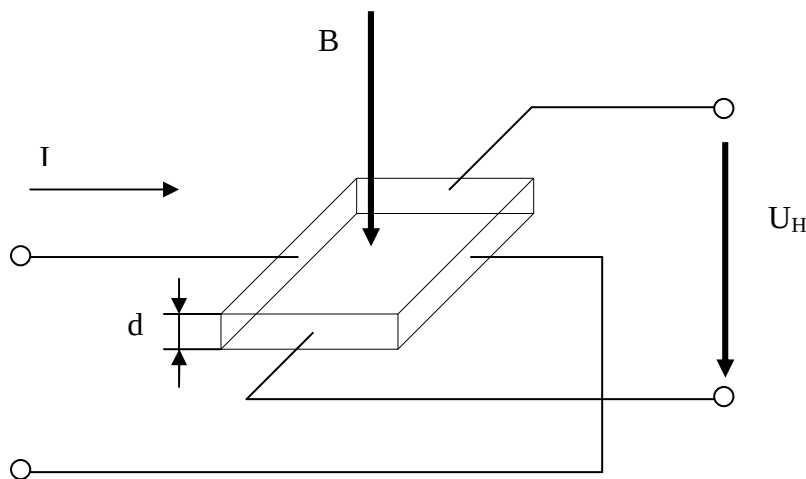
4 SENZORY MAGNETICKÉHO POLE

4.1 Senzory s Halloovým jevem

Vložíme-li polovodičovou nebo kovovou destičku o tloušťce d , kterou protéká proud I , do magnetického pole, jehož vektor magnetické indukce $\mathbf{B}$ je kolmý na směr proudu, vzniká na bočních stranách destičky napětí (Obr. 4-1). Toto napětí značíme U_H a nazývá se Hallovo napětí. Vznik Hallova napětí je zapříčiněn magnetickou silou $\mathbf{F}_M$, která působí na volné nosiče náboje tvořící proud I v destičce. Tato síla způsobí vychýlení nábojů z původního směru a tím naruší homogenitu koncentrace nábojů v průřezu destičky. Nehomogenní rozložení má za následek vznik elektrického pole o intenzitě $\mathbf{E}$. Silový účinek elektrického pole je opačný než silový účinek magnetického pole a během velmi krátké doby se ustálí rovnováha mezi elektrickou silou a magnetickou silou. Velikost Hallova napětí U_H je

$$U_H = \frac{1}{qn} \frac{BI}{d} = R_H \frac{BI}{d} \quad [\text{V}], \quad (4.1)$$

kde q je náboj jednoho nositele náboje, n je koncentrace nositelů náboje v jednotce objemu, $\mathbf{B}$ je magnetická indukce, I je proud, d je tloušťka destičky a R_H je Hallova konstanta.



Obr. 4-1 Princip snímače s Halloovým jevem [8]

Hallova konstanta $R_H = \frac{1}{qn} [m^3 A^{-1} s^{-1}]$ je závislá na materiálu jímž protéká proud a může nabývat kladných i záporných hodnot.

Senzory s Hallovým jevem se též nazývají Hallový sondy. Rozměry takových sond mohou být velice malé a díky tomu, že neobsahují feromagnetické materiály, neovlivňují měřené magnetické pole. Měřicí rozsah Hallových sond je od desetin mT až po jednotky T. Pro jejich spolehlivost a příznivou cenu se využívají ve spoustě aplikací, např. k měření výšky hladin, ke snímání polohy nebo pro bezkontaktní měření proudu. Jejich nevýhodou je velká teplotní závislost.

[6][7][8]

4.1.1 Dostupné Hallový sondy

Hallový sondy se vyrábějí v provedení se dvoustavovým výstupem, tak i s lineárním výstupem. V přehledu uvádím pouze některé, a to takové sondy, které mají lineární výstup. Se sondami s lineárním výstupem jsem provedl měření.

Tab. 4-1 Hallový sondy s lineárním výstupem

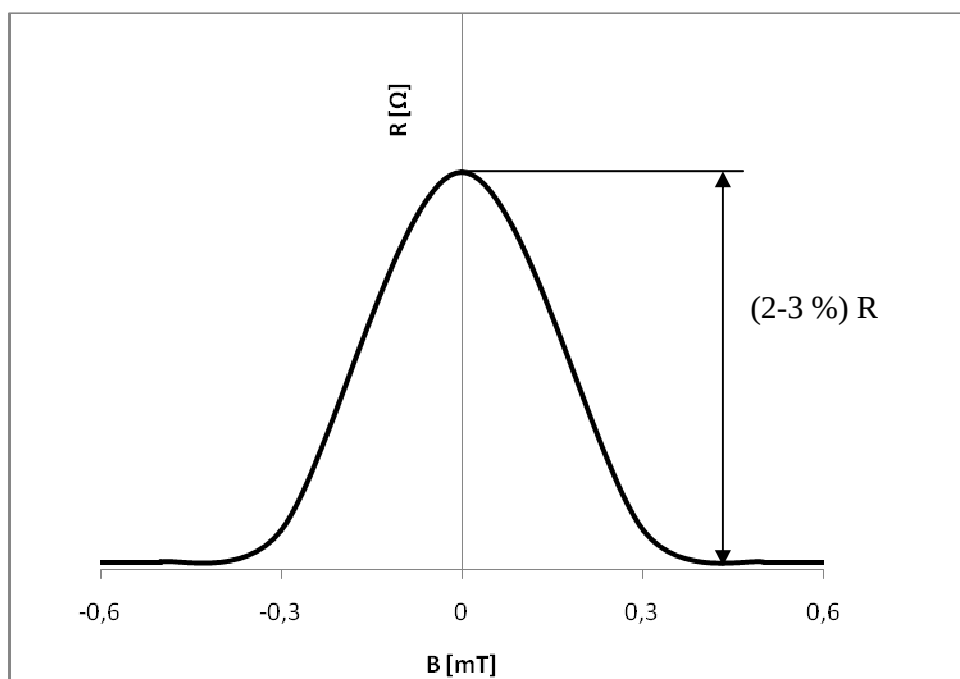
Výrobce	Označení	Rozsah [G]	Citlivost [mV/G]
Allegro	A1301	-	2,5
Allegro	A1302	-	1,3
Melexis	MLX90242LUA-CC03	-	4,0
Melexis	MLX90242ESE-BC03	-	1,5
Honeywell	SS496A1	± 840	2,5
Honeywell	SS495A	± 670	3,125

4.2 AMR senzory

Principem snímání AMR senzorů je Anisotropická Magnetická Resistance. Ta se označuje zkratkou AMR a hovoříme o ní jako o AMR jevu. Tento jev spočívá ve změně elektrického odporu vlivem magnetického pole. AMR senzor je tvořen tenkou vrstvou slitiny železa a niklu, tato slitina se nazývá permalloy. Permalloy, na který nepůsobí magnetické pole, má svůj klidový odpor. Působením magnetického pole tento klidový odpor klesá téměř lineárně, ale jen v rozsahu cca 2-3 % z původní hodnoty odporu. Dále

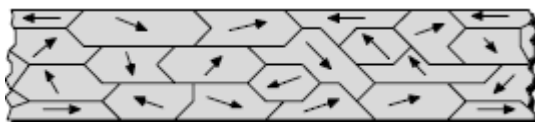
se odpor ani s rostoucí intenzitou magnetického pole nemění. Závislost změny odporu na intenzitě magnetického pole je na Obr. 4-2. Snímací rozsah je pak dán tvarem, složením a rozměry senzoru.

[10]

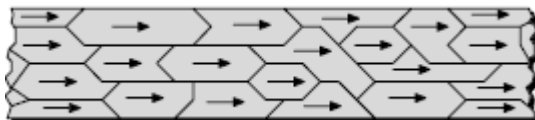


Obr. 4-2 Závislost změny odporu permalloy na intenzitě magnetického pole [10]

Kromě intenzity magnetického pole má na výsledný odpor měřicího senzoru vliv také orientace pole vzhledem k orientaci senzoru. Bez působení magnetického pole jsou magnetické domény orientovány se směrem delší strany AMR senzoru, na Obr. 4-3 je orientace magnetických domén různá, na Obr. 4-4 je pak orientace magnetických domén totožná. Této orientace je dosaženo při výrobě působením velmi silného magnetického pole. Takto orientované domény svírají poté s procházejícím proudem úhel θ . Má-li permalloy směr magnetických domén $\mathbf{M}$ rovnoběžný se směrem jím procházejícím proudem, je jeho odpor největší. Je-li jejich směr kolmý, pak je odpor nejmenší.



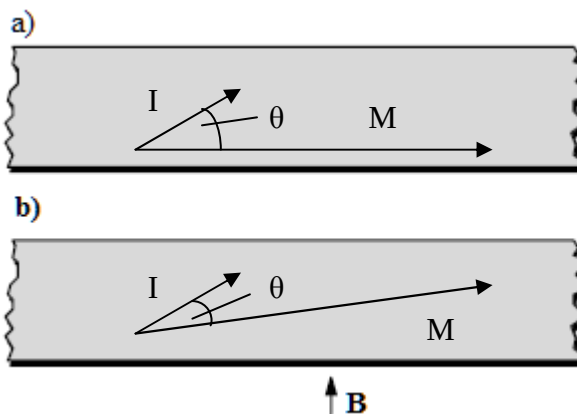
Obr. 4-3 Náhodná orientace magnetických domén [9]



Obr. 4-4 Orientace magnetických domén vlivem silného magnetického pole [9]

Při působení magnetického pole na permalloy dochází k natočení magnetických domén, a tím ke změně úhlu θ mezi směrem natočení domén a směrem procházejícího proudu. To má za následek změnu odporu senzoru.

[9]



Obr. 4-5 Změna úhlu mezi směrem proudu a směrem magnetických domén [9]

4.2.1 Dostupné AMR senzory

Tab. 4-2 AMR senzory s lineárním výstupem

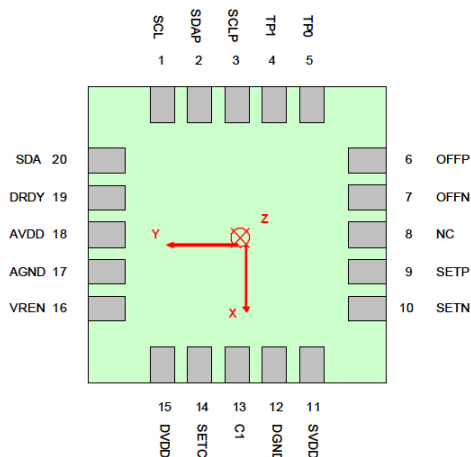
Výrobce	Označení	Počet os	Citlivost [mV/V/G]	Rozsah [G]
Honeywell	HMC1001	1	3,2	± 2
Honeywell	HMC1043	3	1,0	± 6
Honeywell	HMC1051Z	1	1,0	± 6
Honeywell	HMC1053	3	1,0	± 6
Sensitec	AFF756	1	0,8	± 10
Sensitec	AFF755B	1	1,2	± 5
Philips Semiconductors	KMZ51	1	1,3	± 2,5
Philips Semiconductors	KMZ52	2	1,3	± 2,5

4.2.2 AMR senzor HMC5843

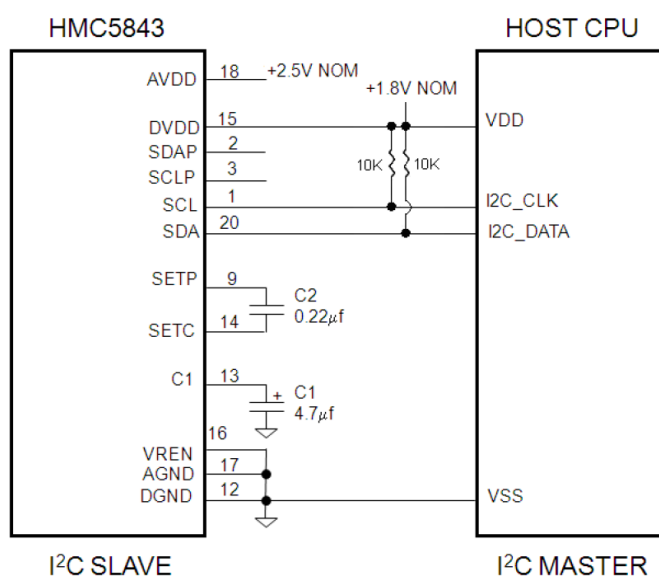
HMC5843 je AMR senzor od firmy Honeywell. Jedná se o tříosý senzor magnetického pole, který je schopen snímat magnetické pole v rozsahu ± 4 Gauss. Součástí senzoru je vyhodnocovací elektronika, set/reset a ofsetové cívky, rozhraní I²C (IIC, Internal-Integrated-Circuit) pro komunikaci. I²C je dvou vodičové datové propojení mezi jedním nebo několika procesory (Masters) a speciálními periferními součástkami (Slaves). Všechny procesory i periferie jsou připojeny k jedné sběrnici. Jejich výběr se řídí pomocí unikátních adres. Adresy i data jsou přenášeny stejnou dvojicí vodičů.

Obr. 4-6 znázorňuje rozmístění snímacích elementů pro jednotlivé osy.

[20] [21]



Obr. 4-6 Rozmístění snímacích os - pohled ze strany pinů [20]



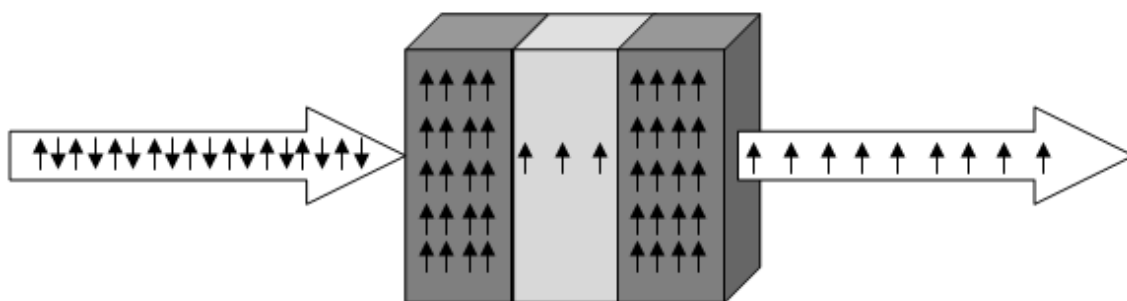
Obr. 4-7 Schéma zapojení HMC5843 v duálním režimu napájení [20]

4.3 GMR senzory

Tyto senzory se vyznačují tzv. GMR jevem (Giant Magneto Resistive effect). GMR senzory, podobně jako AMR senzory, mají závislost změny odporu na velikosti magnetického pole, jež na tento senzor působí. Změna odporu při působení magnetického pole je 10 až 50 % z hodnoty odporu při klidovém stavu, kdy na senzor magnetické pole nepůsobí.

Základní uspořádání GMR senzoru tvoří tenké vrstvy feromagnetické slitiny s rozměry v jednotkách nanometrů, mezi které je vložena ještě užší vrstva, která je

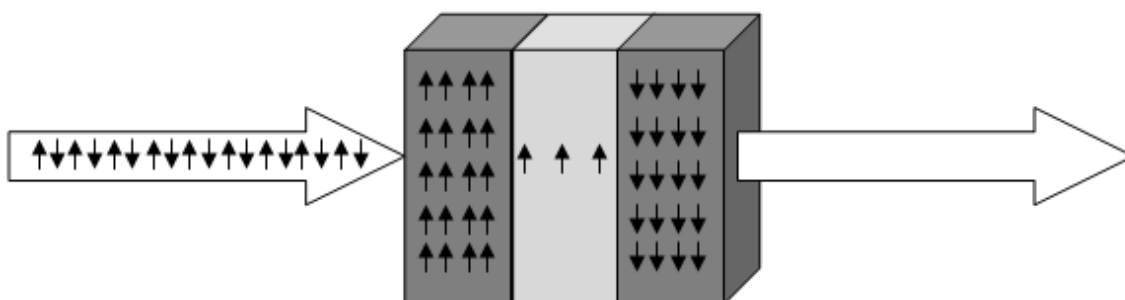
nemagnetická a elektricky vodivá. Střední vrstva je často měděná. Přestože měď je výborný vodič, tak při takto malých rozměrech u ní dochází k rychlému nárůstu elektrického odporu. Závislost odporu celé struktury je výrazně ovlivněna spinem procházejících elektronů. Spin je vlastnost elektronu, která udává jak se elektron otáčí. Otáčí-li se elektron po směru hodinových ručiček, má tzv. spin nahoru. Otáčí-li se opačně, má tzv. spin dolů. V elektricky vodivých nemagnetických materiálech se pohybuje vyrovnaný počet elektronů se spinem nahoru a dolů. Ve feromagnetických materiálech se můžou volně pohybovat pouze elektrony, jejichž spin souhlasí s magnetickým momentem materiálu. Průchod elektronů strukturou vlivem působení magnetického pole ukazují následující obrázky. Na Obr. 4-8 je vodičem, ve kterém se pohybuje shodný počet elektronů se spinem nahoru a dolů (spin je naznačen šipkami), přiveden elektrický proud na jednu z feromagnetických vrstev. Touto vrstvou projde pouze polovina elektronů, z celkového počtu, jejíž spin je shodný s magnetizací feromagnetické vrstvy. Tyto elektrony projdou přes střední vrstvu k druhé feromagnetické vrstvě a pokud tato vrstva má stejný směr magnetizace jako první, tak skrz ní elektrony projdou a celková hodnota odporu struktury je malá.



Obr. 4-8 Souhlasná orientace magnetizace vrstev GMR senzoru [12]

Na Obr. 4-9 je případ, kdy druhá feromagnetická vrstva je orientovaná opačně než vrstva první. V tomto případě přejde přes první vrstvu také polovina elektronů, ale ty se dále přes druhou vrstvu nedostanou a struktura vykazuje vysoký odpor.

[11]



Obr. 4-9 Nesouhlasná orientace magnetizace vrstev GMR senzoru [12]

4.3.1 Dostupné GMR senzory

Tab. 4-3 GMR senzory s lineárním výstupem

Výrobce	Označení	Citlivost [mV/V/G]	Lineární rozsah [G]
Sensitec	GF705	1,00	18,00
NVE	AA002-02	3,60	1,50
NVE	AA004-02	1,10	5,00
NVE	AA005-02	0,55	10,00
NVE	AAH002-02	14,50	0,60

Tab. 4-4 GMR senzory s dvoustavovým výstupem

Výrobce	Označení	Bod překlpení [G]
NVE	AD004-02	±20
NVE	AD024-00	±28
NVE	AD022-02	±40
NVE	ADH025-00	±11
Sensitec	GF708	±10

Tab. 4-5 GMR senzory měřící úhel natočení

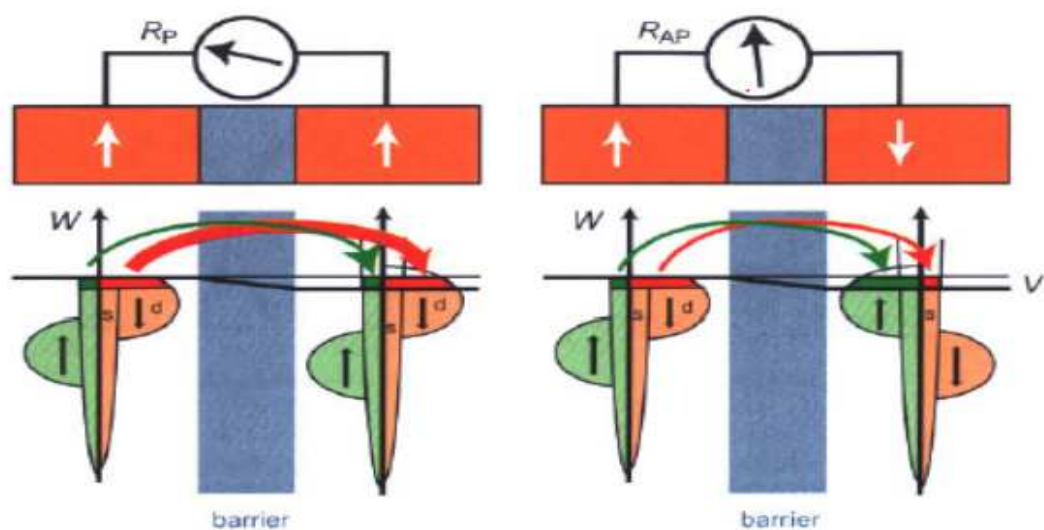
Výrobce	Označení	Citlivost [mV/V/G]	Lineární rozsah [G]
Sensitec	GF705	1,00	18,00
NVE	AA002-02	3,60	1,50
NVE	AA004-02	1,10	5,00
NVE	AA005-02	0,55	10,00
NVE	AAH002-02	14,50	0,60

4.4 TMR senzory

Trojici senzorů využívajících magnetorezistivního jevu jsou senzory TMR (Tunnel Magnetoresistance). Oproti předešlým dvou typům senzorů vykazují nejvyšší změnu odporu při působení vnějšího magnetického pole. Změna odporu je 30 až 70 % oproti klidovému stavu. Tato velká změna odporu je velká výhoda oproti GMR a AMR sensorům. Nevýhodou však je omezená linearita změny odporu vlivem magnetického pole, větší teplotní závislost a nelineární V-A charakteristika.

Základní uspořádání tvoří dvě feromagnetické vrstvy mezi nimiž je vrstva elektricky nevodivá, např. vrstva oxidu hliníku. Zde by vznikl předpoklad, že vrstvou nebude procházet elektrický proud, protože vodivé vrstvy jsou odděleny izolantem. Přesto tomu tak není. Šířka vrstvy izolantů je pouze pár atomů (řádově jednotky nanometrů) a elektrony mají takovou energii, že takto slabou vrstvu překonají – protunelují. Tento jev již nepopisuje klasická fyzika ale fyzika kvantová. Ta jednotlivé možnosti pohybu elektronů popisuje energetickým modelem s Fermiho hladinou. Ta odděluje valenční vrstvu od vodivostní vrstvy a udává, kolik energie se musí dodat elektronu k přechodu z valenční vrstvy do vodivostní. U vodičů se tyto hladiny téměř dotýkají nebo i překrývají a energie potřebná na přechod je tedy malá. U izolantů je mezi těmito vrstvami ještě tzv. zakázaná oblast a je tedy potřeba dodat větší energii k přechodu elektronu do vodivostní vrstvy. Pokud je vrstva izolantu slabá, a pokud za touto vrstvou je vrstva s dostatečným množstvím volných energetických hladin, kam se mohou elektrony přemístit, tak se elektrony mohou protunelovat přes vrstvu izolantu i s malou dodanou energií. Důležitá je zde podmínka volných energetických hladin za vrstvou izolantu jako ve vodivostní vrstvě před izolantem. Stejně jako u GMR zde hraje roli i spin elektronů. Jsou-li vrstvy okolo izolační vrstvy zmagnetovány souhlasně, tak elektrony, jejichž spin je souhlasný s magnetickým momentem feromagnetických vrstev, mohou tunelovat přes vrstvu izolantu. Strukturou tak bude protékat proud a odpor celé struktury bude malý. Bude-li jedna vrstva zmagnetizována opačně, pak pro elektrony, které jsou v první feromagnetické vrstvě, není za izolantem dostatečný počet energetických hladin, a tak není splněna podmínka pro tunelování a celkový odpor struktury bude velký.

[13]



Obr. 4-10 Princip TMR senzoru [13]

4.4.1 Dostupné TMR senzory

Tab. 4-6 TMR senzory s lineárním výstupem

Výrobce	Označení	Lineární rozsah [G]	Citlivost [mV/V/G]
Micro Magnetic	STJ-001	± 50	8
Micro Magnetic	STJ-240	± 30	10
Micro Magnetic	STJ-340	± 20	2
Micro Magnetic	STJ-301	± 15	3
Micro Magnetic	STJ-500	± 20	3
Multi Dimension	MMLH45F	± 15	12
Multi Dimension	MMLP57H	± 30	3

Tab. 4-7 TMR senzory měřící úhel natočení

Výrobce	Označení	Snímací rozsah [G]	Úhel snímání [°]
NVE	AAT001-10E	30-200	0-360
Multi Dimension	MMA253F	60-400	0-360

5 HELMHOLTZOVY CÍVKY

Pro různé aplikace, ať již laboratorní nebo lékařské, je třeba vytvořit a udržet stálé homogenní magnetické pole. Jedním ze způsobů, jak takové pole vytvořit, je pomocí cívek.

Jak již bylo řečeno v kapitole o elektromagnetech, kolem cívky, kterou protéká proud, je magnetické pole. Velikost magnetického pole cívky, která má délku vzhledem k průměru zanedbatelnou, lze spočítat podle Biotova-Savartova zákona. Ten umožňuje výpočet intenzity magnetického pole $\mathbf{H}$ nebo magnetické indukce $\mathbf{B}$, generované vodičem libovolného tvaru, v libovolném bodě prostoru, který je vyplněn magneticky izotropním, homogenním a lineárním prostředím. Zákon říká, že každá část vodiče o diferenciální délce $d\mathbf{l}$ vytváří ve sledovaném bodě diferenciální přírůstek intenzity magnetického pole $d\mathbf{H}$, respektive přírůstek magnetické indukce $d\mathbf{B}$, podle vztahu 5.1 a 5.2.

$$d\vec{H} = \frac{I}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \quad (5.1)$$

$$d\vec{B} = \mu_0 \frac{I}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}, \quad (5.2)$$

kde μ_0 je permeabilita vakua, $d\mathbf{l}$ je diferenciální přírůstek délky, $d\mathbf{H}$ je diferenciální přírůstek intenzity magnetického pole, r je vzdálenost bodu od závitů cívky a I je proud tekoucí cívku.

Celkové pole v daném bodě lze určit i integrací diferenciálních přírůstků způsobených všemi diferenciálními částmi $d\mathbf{l}$ vodiče. Konečná podoba Biotova-Savartova zákona má tvar křivkového integrálu, přičemž integrační křivka l je dána tvarem vodiče

$$\vec{H} = \frac{I}{4\pi} \int_l \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \quad (5.3)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \frac{I}{4\pi} \int_l \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \quad (5.4)$$

Pro obecný tvar vodiče je výpočet křivkového integrálu složitý. Jiná situace nastává v případě, kdy tvar vodiče vykazuje vhodnou geometrickou symetrii. Jedním

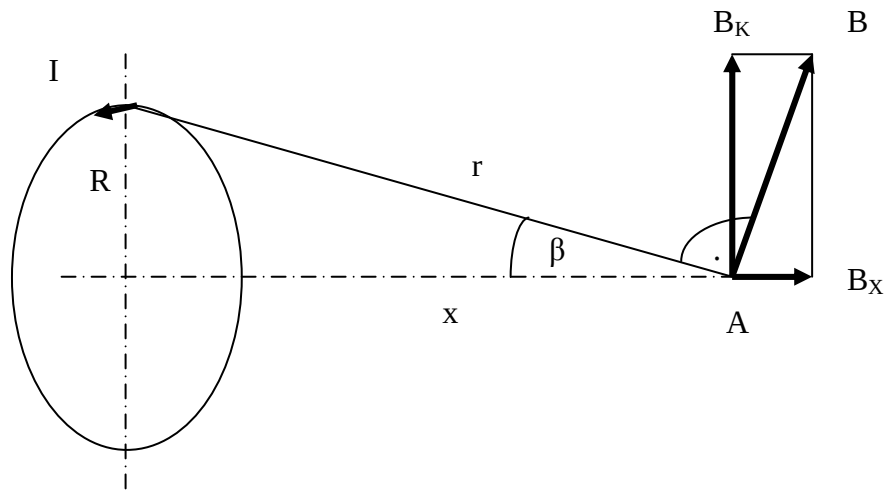
takovým případem je výpočet magnetického pole na ose cívky o N závitech, která tvoří kruhovou smyčku (Obr. 5-1). Diferenciální přírůstky $d\mathbf{B}$ vektoru magnetické indukce v libovolném bodě A na ose cívky, lze rozložit na vektor $\mathbf{B}_K$ kolmý k ose x a na vektor $\mathbf{B}_X$ rovnoběžný s osou. Kolmé složky $\mathbf{B}_K$ se navzájem vyruší díky symetrii a složky $\mathbf{B}_X$ rovnoběžné s osou x se sečtou.

$$d\vec{B} = \mu_0 \frac{NI}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$

$$B = \mu_0 \frac{NI}{4\pi} \int_0^{2\pi R} \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} = \mu_0 \frac{NI}{4\pi} \int_0^{2\pi R} \frac{dl r \sin \frac{\pi}{2}}{r^3} = \mu_0 \frac{NI}{4\pi r^2} \int_0^{2\pi R} dl = \mu_0 \frac{NI}{4\pi r^2} 2\pi R = \mu_0 \frac{NIR}{2r^2}$$

Vektor $\mathbf{B}_X$ ve vzdálenosti x od středu cívky se vypočítá podle vztahu

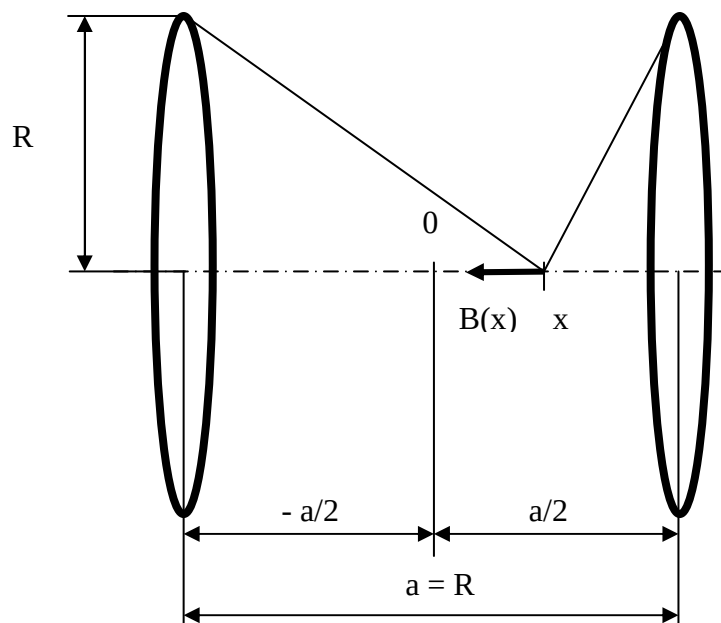
$$B_X = B \sin \beta = B \frac{R}{r} = \mu_0 \frac{NIR}{2r^2} \frac{R}{r} = \mu_0 \frac{NIR^2}{2r^3} = \mu_0 \frac{NIR^2}{2(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (5.5)$$



Obr. 5-1 Magnetická indukce v okolí cívky ve tvaru kruhového závitu [14]

Ze vztahu 5.5 je patrné, že nejde o homogenní pole. Pro dosažení homogenního pole je zapotřebí dvou stejných kruhových cívek, jejichž středy leží na stejné ose a jsou od sebe ve vzdálenosti a . Tato vzdálenost a je rovna poloměru cívek R . Jsou-li cívky

takto prostorově rozmístěny, hovoříme o Helmholtzových cívkách nebo o cívkách v Helmholtzově uspořádání. Helmholtzovy cívky jsou na Obr. 5-2.



Obr. 5-2 Helmholtzovy cívky [14]

Oběma cívkami pak protéká stejný proud o velikosti I . Každá z cívek pak generuje magnetické pole. Magnetické pole na ose cívek je pak dáno superpozicí jednotlivých polí podle vztahu

$$B_C(x) = B_{x1} + B_{x2} = \mu_0 \frac{NIR^2}{2(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} + \mu_0 \frac{NIR^2}{2(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (5.6)$$

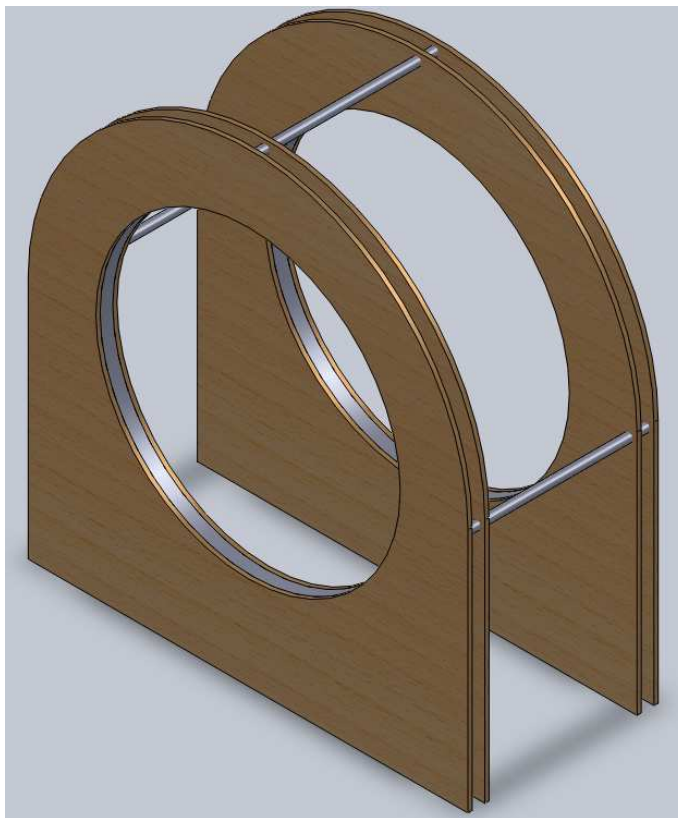
Uvažujeme-li střed mezi cívkami jako bod $x = 0$, pak střed pravé cívky je od toho bodu vzdálen o $+\frac{a}{2}$ a střed levé cívky je vzdálen o $-\frac{a}{2}$, můžeme upravit rovnici 5.6 na tvar

$$B_C(x) = B_{x1} + B_{x2} = \mu_0 \frac{NIR^2}{2\left(R^2 + \left(x - \frac{a}{2}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} + \mu_0 \frac{NIR^2}{2\left(R^2 + \left(x + \frac{a}{2}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (5.7)$$

[14]

6 VLASTNÍ MĚŘENÍ

Pro měření magnetického pole jsem využil cívky v Helmholtzově uspořádání. Cívky mají 80 závitů a jejich poloměr je 20 cm, pro navinutí byl použit měděný vodič o průměru 1,25 mm.



Obr. 6-1 Ilustrační obrázek cívek v Helmholtzově uspořádání

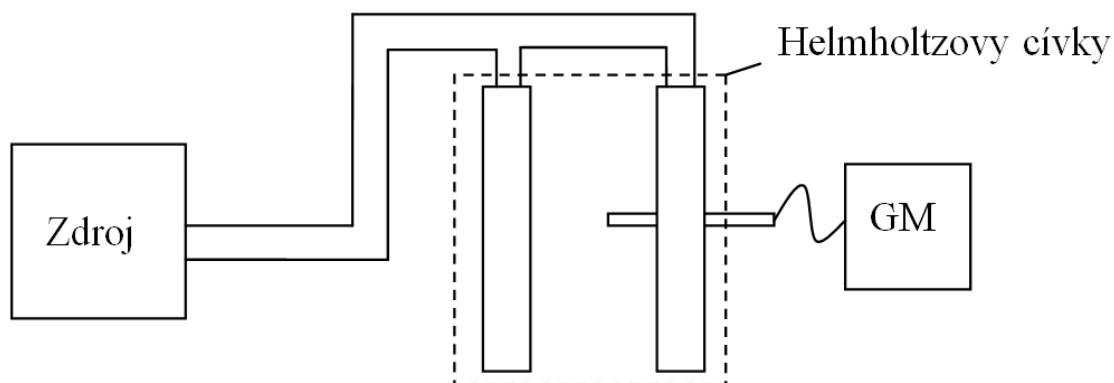
6.1 Určení konstanty Helmholtzovy cívky

Konstanta Helmholtzovy cívky K_h je podíl magnetické indukce $\mathbf{B}$ ve středu cívek a proudu I jimi procházejícím. Jinými slovy, známe-li konstantu Helmholtzovy cívky a proud, který jimi prochází, můžeme určit, jaká bude magnetická indukce v jejich středu. Konstanta cívky se určí ze vztahu

$$K_h = \frac{B}{I} [mT / A ; mT, A] \quad (6.1)$$

K určení konstanty jsem provedl měření, kdy jsem nastavoval proud tekoucí cívkami a pro každý proud odečítal hodnotu magnetické indukce ve středu cívek.

Schéma zapojení měřicího pracoviště je na Obr. 6-2. Naměřené hodnoty jsou v tabulce Tab. 6-1.



Obr. 6-2 Schéma zapojení pro určení konstanty K_h

Tab. 6-1 Magnetická indukce ve středu cívek v závislosti na proudu

I [A]	B₁ [mT]	B₂ [mT]	B₃ [mT]	B₄ [mT]	B₅ [mT]	B₆ [mT]	B₇ [mT]	B₈ [mT]	B₉ [mT]	B₁₀ [mT]
0,00	0,05	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,03
0,50	0,22	0,21	0,19	0,17	0,19	0,18	0,17	0,18	0,18	0,21
1,00	0,38	0,37	0,34	0,33	0,34	0,35	0,33	0,34	0,37	0,38
1,50	0,55	0,53	0,51	0,49	0,51	0,50	0,50	0,51	0,54	0,54
2,00	0,71	0,70	0,67	0,67	0,69	0,67	0,67	0,69	0,70	0,71
2,50	0,89	0,88	0,85	0,84	0,86	0,85	0,84	0,86	0,88	0,89
3,00	1,06	1,05	1,04	1,02	1,02	1,02	1,01	1,04	1,04	1,05
3,50	1,22	1,22	1,20	1,18	1,21	1,18	1,18	1,20	1,21	1,22
4,00	1,40	1,40	1,37	1,34	1,37	1,36	1,36	1,37	1,38	1,37
4,50	1,57	1,56	1,53	1,53	1,53	1,53	1,52	1,54	1,54	1,56
5,00	1,73	1,72	1,71	1,68	1,69	1,69	1,69	1,71	1,72	1,73
5,50	1,91	1,88	1,87	1,85	1,88	1,88	1,87	1,88	1,89	1,89
6,00	2,08	2,05	2,04	2,03	2,04	2,04	2,03	2,05	2,07	2,05
6,50	2,24	2,21	2,21	2,20	2,20	2,20	2,20	2,21	2,23	2,24
7,00	2,41	2,39	2,37	2,36	2,37	2,36	2,36	2,39	2,40	2,40
7,50	2,58	2,56	2,54	2,55	2,55	2,55	2,55	2,55	2,58	2,56
8,00	2,74	2,74	2,72	2,71	2,71	2,71	2,71	2,74	2,75	2,74

Po změření magnetické indukce jsem podle vztahu 6.1 určil konstantu cívek.

Příklad výpočtu:

$$Kh_1 = \frac{1,4}{4}$$

$$\underline{\underline{Kh_1 = 0,350 \text{ mT} / \text{A}}}$$

Výslednou konstantu jsem určil průměrem dílčích konstant. Výsledná konstanta má hodnotu $Kh = 0,346 \text{ mT} / \text{A}$.

Určení konstanty jsem zpracoval v tabulce Tab. 6-2.

Tab. 6-2 Určení konstanty Helmholtzovy cívky

Kh₁ [mT/A]	Kh₂ [mT/A]	Kh₃ [mT/A]	Kh₄ [mT/A]	Kh₅ [mT/A]	Kh₆ [mT/A]	Kh₇ [mT/A]	Kh₈ [mT/A]	Kh₉ [mT/A]	Kh₁₀ [mT/A]
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
0,440	0,420	0,380	0,340	0,380	0,360	0,340	0,360	0,360	0,420
0,380	0,370	0,340	0,330	0,340	0,350	0,330	0,340	0,370	0,380
0,367	0,353	0,340	0,327	0,340	0,333	0,333	0,340	0,360	0,360
0,355	0,350	0,335	0,335	0,345	0,335	0,335	0,345	0,350	0,355
0,356	0,352	0,340	0,336	0,344	0,340	0,336	0,344	0,352	0,356
0,353	0,350	0,347	0,340	0,340	0,340	0,337	0,347	0,347	0,350
0,349	0,349	0,343	0,337	0,346	0,337	0,337	0,343	0,346	0,349
0,350	0,350	0,343	0,335	0,343	0,340	0,340	0,343	0,345	0,343
0,349	0,347	0,340	0,340	0,340	0,340	0,338	0,342	0,342	0,347
0,346	0,344	0,342	0,336	0,338	0,338	0,338	0,342	0,344	0,346
0,347	0,342	0,340	0,336	0,342	0,342	0,340	0,342	0,344	0,344
0,347	0,342	0,340	0,338	0,340	0,340	0,338	0,342	0,345	0,342
0,345	0,340	0,340	0,338	0,338	0,338	0,338	0,340	0,343	0,345
0,344	0,341	0,339	0,337	0,339	0,337	0,337	0,341	0,343	0,343
0,344	0,341	0,339	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340	0,344	0,341
0,343	0,343	0,340	0,339	0,339	0,339	0,339	0,343	0,344	0,343

Z určené konstanty Kh jsem následně vypočítal hodnoty magnetické indukce **B** ve středu cívek v závislosti na proudu jimi protékajícím. Tyto hodnoty (Tab. 6-3) jsou v dalším měření jako referenční a při výpočtech je s nimi počítáno.

Tab. 6-3 Referenční hodnoty magnetické indukce ve středu cívek

I [A]	0,00	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00
B [mT]	0,000	0,173	0,346	0,519	0,692	0,865	1,038	1,211	1,384

I [A]	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00
B [mT]	1,557	1,730	1,903	2,076	2,249	2,422	2,595	2,768

Příklad výpočtu:

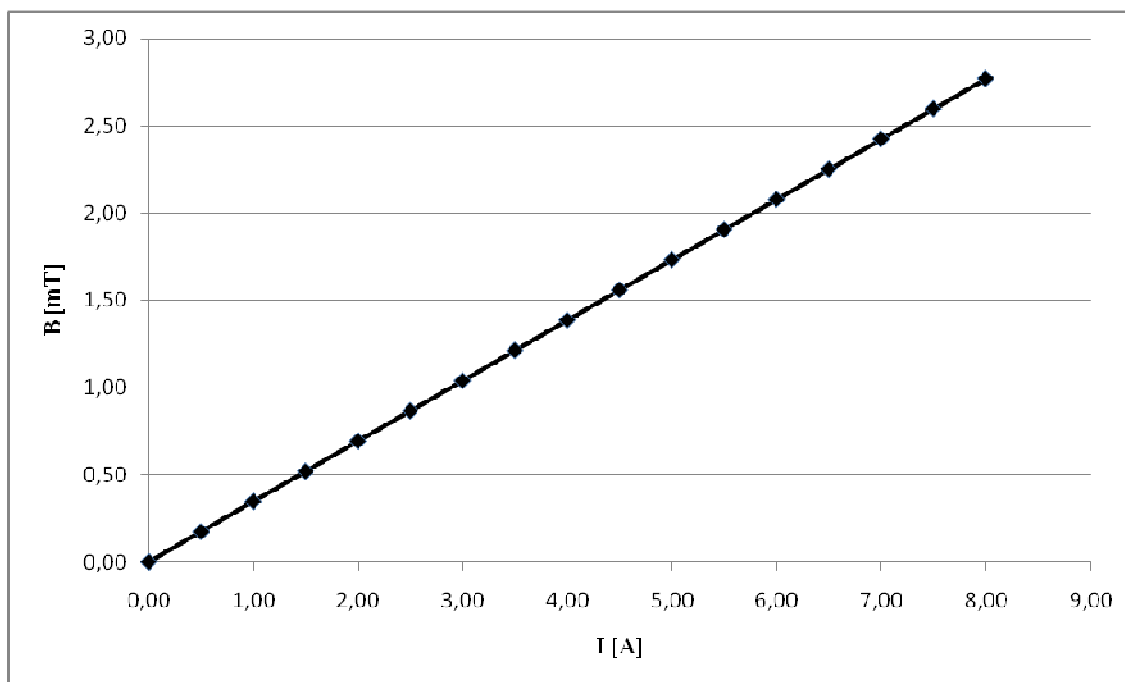
$$Kh = \frac{B}{I}$$

$$B = KhI$$

$$B = 0,346 \cdot 0,5$$

$$B = 0,173 \text{ mT}$$

Graf 6-1 Závislost magnetické indukce na velikosti proudu - referenční hodnota



Použité měřicí přístroje a pomůcky:

Gaussmetr F.W.BELL 5080

Zdroj CPX400SP

Helmholtzovy cívky

6.1.1 Nejistoty měření

Pro výpočet nejistoty měření jsem vycházel z literárních zdrojů [17], [18], [19].

PRO $I=4\text{ A}$

Určení nejistoty A

$$u_A(Kh) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (Kh_i - \overline{Kh})^2}$$

$$\underline{\underline{u_A(Kh) = 0,00144\text{ mT} / \text{A}}}$$

$$\overline{Kh} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} Kh_i = 0,343\text{ mT} / \text{A}$$

Určení nejistoty B

nejistota gaussmetru F.W. BELL 5080:

$$u_{BB} = \frac{\delta_{zB}}{2\sqrt{3}}$$

$$\delta_{zB} = \pm 2\% \text{ čtené hodnoty} \pm 3 \text{ digity}$$

$$\delta_{zB} = \pm 1,372 \cdot 0,02 \pm 3 \cdot 0,01 = \pm 0,05744\text{ mT}$$

$$u_{BB} = \frac{\delta_{zB}}{2\sqrt{3}} = \frac{\pm 0,05744}{2\sqrt{3}} = \underline{\underline{\pm 0,0166\text{ mT}}}$$

nejistota zdroje proudu CPX400SP:

$$u_{BZ} = \frac{\delta_{zZ}}{2\sqrt{3}}$$

$$\delta_{zZ} = \pm 0,3\% \text{ čtené hodnoty} \pm 20\text{ mA}$$

$$\delta_{zZ} = \pm 4 \cdot 0,003 \pm 0,02 = \pm 0,032\text{ A}$$

$$u_{BZ} = \frac{\delta_{zZ}}{2\sqrt{3}} = \frac{\pm 0,032}{2\sqrt{3}} = \underline{\underline{\pm 0,0093\text{ A}}}$$

$$u_B(Kh) = \sqrt{A_B^2 u_{BB}^2 + A_Z^2 u_{BZ}^2} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1}{I} u_{BB}\right)^2 + \left(-\frac{B}{I^2} u_{BZ}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0,0166}{4}\right)^2 + \left(-\frac{1,372}{16} 0,0093\right)^2} = \underline{\underline{0,00423 \text{ mT} / \text{A}}}$$

$$A_B = \frac{\partial Kh}{\partial B} = \frac{1}{I} \text{ mT} \cdot \text{A}^{-1} / \text{mT}$$

$$A_Z = \frac{\partial Kh}{\partial I} = \frac{-B}{I^2} \text{ mT} \cdot \text{A}^{-1} / \text{mA}$$

Určení celkové nejistoty:

$$u_c(Kh) = \sqrt{u_A(Kh)^2 + u_B(Kh)^2} = \sqrt{0,00144^2 + 0,00423^2} = \underline{\underline{0,00447 \text{ mT} / \text{A}}}$$

Určení rozšířené nejistoty:

$$u(Kh) = k_r \cdot u_c(Kh)$$

$$u(Kh) = 2 \cdot 0,00447$$

$$\underline{\underline{u(Kh) = 0,00894 \text{ mT} / \text{A}}}$$

Po určení nejistoty měření konstanty, můžu zapsat výsledek jako

$$Kh_1 = (0,343 \pm 0,009) \text{ mT} / \text{A}.$$

6.2 Magnetické pole na ose Helmholtzových cívek

Magnetické pole na ose Helmholtzových cívek jsem měřil při konstantním proudu a při posunu sondy gaussmetru jsem odečítal hodnoty magnetické indukce po celé ose cívek. Zapojení měřící pracoviště je na Obr. 6-2. Následně jsem provedl i teoretický výpočet magnetické indukce podle vztahu 5.7 a hodnoty jsem porovnal v grafu. Toto měření jsem provedl pro různé proudy tekoucí cívkami.

Tab. 6-4 Magnetická indukce na ose Helmholtzových cívek - část a)

	B [mT]					
	I = 1A			I = 3A		
x [cm]	měřeno	výpočet	rozdíl	měřeno	výpočet	rozdíl
14,00	0,26	0,30	-0,04	0,86	0,91	-0,05
12,00	0,29	0,32	-0,03	0,92	0,97	-0,05
10,00	0,30	0,34	-0,04	0,96	1,02	-0,06
8,00	0,31	0,35	-0,04	0,98	1,05	-0,07
6,00	0,33	0,36	-0,03	0,98	1,07	-0,09
4,00	0,33	0,36	-0,03	1,00	1,08	-0,08
2,00	0,33	0,36	-0,03	1,00	1,08	-0,08
0,00	0,33	0,36	-0,03	1,00	1,08	-0,08
-2,00	0,33	0,36	-0,03	1,00	1,08	-0,08
-4,00	0,33	0,36	-0,03	1,00	1,08	-0,08
-6,00	0,33	0,36	-0,03	1,00	1,07	-0,07
-8,00	0,33	0,35	-0,02	1,00	1,05	-0,05
-10,00	0,33	0,34	-0,01	0,98	1,02	-0,04
-12,00	0,33	0,32	0,01	0,93	0,97	-0,04
-14,00	0,31	0,30	0,01	0,86	0,91	-0,05

Tab. 6-5 Magnetická indukce na ose Helmholtzových cívek - část b)

	B [mT]					
	I = 4A			I = 5A		
x [cm]	měřeno	výpočet	rozdíl	měřeno	výpočet	rozdíl
14,00	---	1,21	---	1,52	1,51	0,01
12,00	1,25	1,30	-0,05	1,61	1,62	-0,01
10,00	---	1,36	---	1,68	1,70	-0,02
8,00	1,33	1,40	-0,07	1,71	1,75	-0,04
6,00	---	1,43	---	1,72	1,78	-0,06
4,00	1,36	1,44	-0,08	1,72	1,80	-0,08
2,00	---	1,44	---	1,72	1,80	-0,08
0,00	1,36	1,44	-0,08	1,72	1,80	-0,08
-2,00	---	1,44	---	1,72	1,80	-0,08
-4,00	1,36	1,44	-0,08	1,72	1,80	-0,08
-6,00	---	1,43	---	1,72	1,78	-0,06
-8,00	1,34	1,40	-0,06	1,71	1,75	-0,04
-10,00	---	1,36	---	1,65	1,70	-0,05
-12,00	1,25	1,30	-0,05	1,58	1,62	-0,04
-14,00	---	1,21	---	1,50	1,51	-0,01

Příklad výpočtu:

$$\begin{aligned}
 B(x) &= B_{x1} + B_{x2} = \mu_0 \frac{NIR^2}{2 \left(R^2 + \left(x - \frac{a}{2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} + \mu_0 \frac{NIR^2}{2 \left(R^2 + \left(x + \frac{a}{2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} = \\
 &= \mu_0 \frac{NIR^2}{2 \left(R^2 + \left(x - \frac{a}{2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} + \mu_0 \frac{NIR^2}{2 \left(R^2 + \left(x + \frac{a}{2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} = \\
 &= 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{80 \cdot 1 \cdot 0,2^2}{2 \left(0,2^2 + \left(0,08 - \frac{0,2}{2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} + 4\pi 10^{-7} \frac{80 \cdot 1 \cdot 0,2^2}{2 \left(0,2^2 + \left(0,08 + \frac{0,2}{2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} = \\
 &= 2,47604 \cdot 10^{-4} + 1,03210 \cdot 10^{-4} = 3,50814 \cdot 10^{-4} = \\
 &= \underline{\underline{0,35 \text{ mT}}}
 \end{aligned}$$

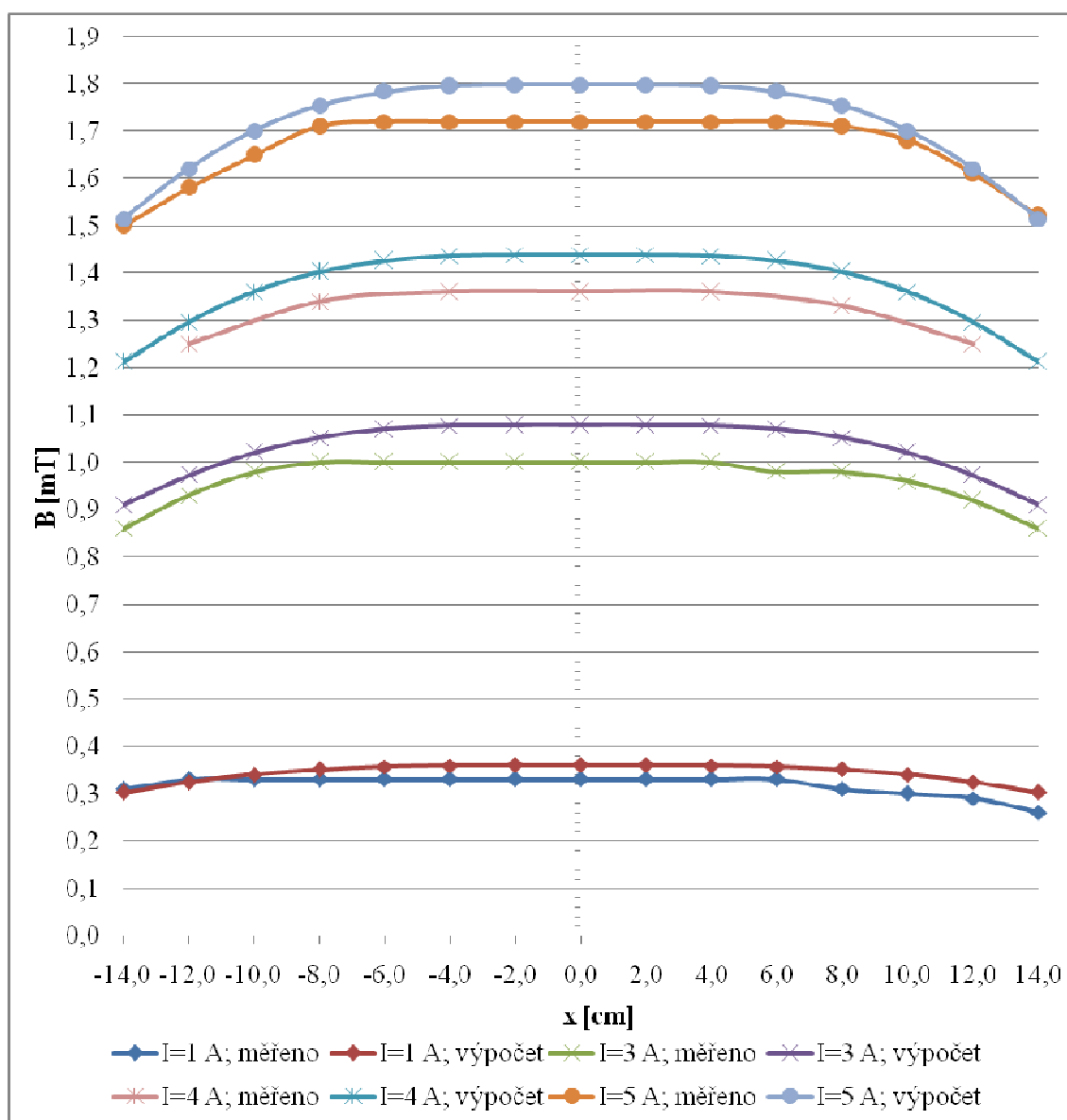
Rozdíl hodnot je vypočítán jako naměřená hodnota mínus hodnota vypočítaná.

$$Rozdíl = 0,33 - 0,35$$

$$\underline{\underline{Rozdíl = -0,02 \text{ mT}}}$$

U vypočítaných i naměřených hodnot magnetických indukcí je patrný požadovaný efekt homogenního pole. Homogenní oblast na ose cívek vyšla pro všechny proudy v rozmezí ± 4 cm od středu. Vypočítané hodnoty magnetických indukcí jsou větší než naměřené hodnoty. To je dáno tím, že ve výpočtech je počítáno s ideálními hodnotami a za ideálních podmínek. Je zanedbán rozměr cívek, její navinutí i vazby mezi jednotlivými závity. Všechny tyto vlastnosti mají za následek zmenšení výsledné magnetické indukce. V Tab. 6-6 je vypočítaná korekce. Korekce je hodnota, která se přičte k měřené hodnotě. Součet měřené hodnoty a korekce je vypočítaná hodnota. Korekční křivky jsou v grafu Graf 6-3.

Graf 6-2 Magnetická indukce na ose Helmholtzových cívek



Rozdíl mezi vypočítanou hodnotou a naměřenou hodnotou magnetické indukce není velký, řádově setiny mili Tesla. Nejvyšší rozdíl dosahuje ve středu cívek, směrem od středu se chyba zmenšuje. Pro proudy 3 A, 4 A a 5 A je rozdíl mezi měřenou hodnotou a vypočítanou shodný.

Tab. 6-6 Korekční tabulka

	O [mT]			
x [cm]	I = 1A	I = 3A	I = 4A	I = 5A
14,00	0,04	0,05	---	-0,01
12,00	0,03	0,05	0,05	0,01
10,00	0,04	0,06	---	0,02
8,00	0,04	0,07	0,07	0,04
6,00	0,03	0,09	---	0,06
4,00	0,03	0,08	0,08	0,08
2,00	0,03	0,08	---	0,08
0,00	0,03	0,08	0,08	0,08
-2,00	0,03	0,08	---	0,08
-4,00	0,03	0,08	0,08	0,08
-6,00	0,03	0,07	---	0,06
-8,00	0,02	0,05	0,06	0,04
-10,00	0,01	0,04	---	0,05
-12,00	-0,01	0,04	0,05	0,04
-14,00	-0,01	0,05	---	0,01

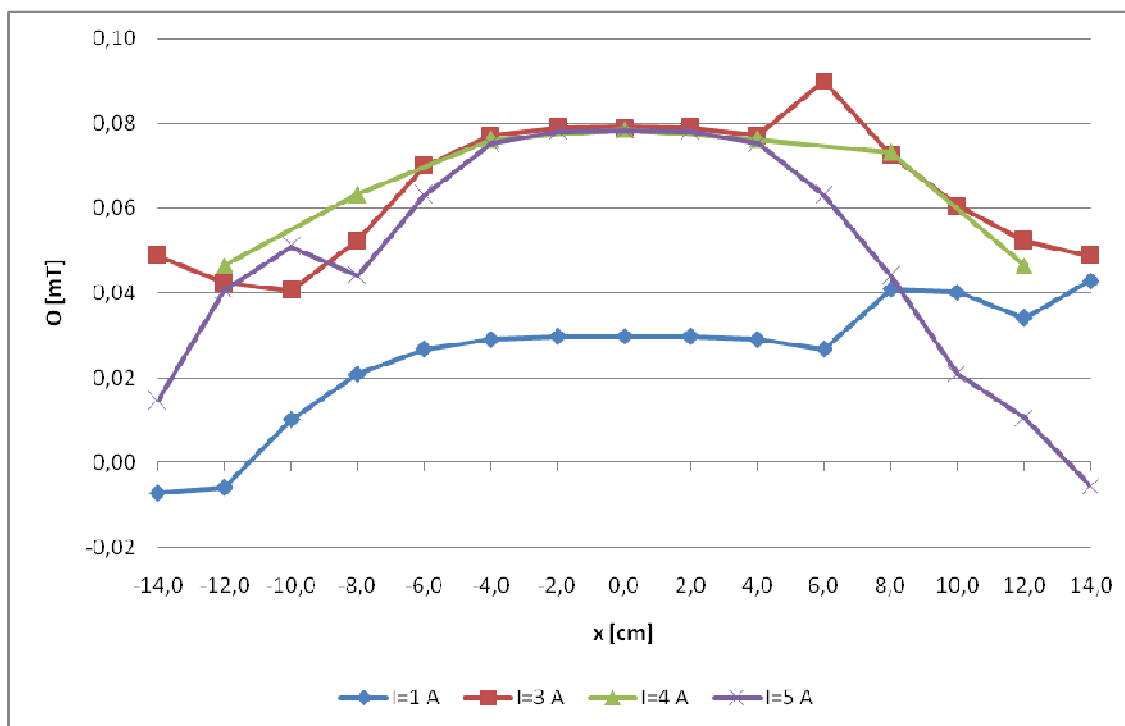
Příklad výpočtu:

$$O = -B_{\text{rozdíl}} = B_{\text{vypočteno}} - B_{\text{mereno}}$$

$$O = 0,30 - 0,26 =$$

$$\underline{\underline{O = 0,04 \text{ mT}}}$$

Graf 6-3 Korekční křivka Helmholtzových cívek



Použité měřicí přístroje a pomůcky:

Gaussmetr F.W.BELL 5080

Zdroj CPX400SP

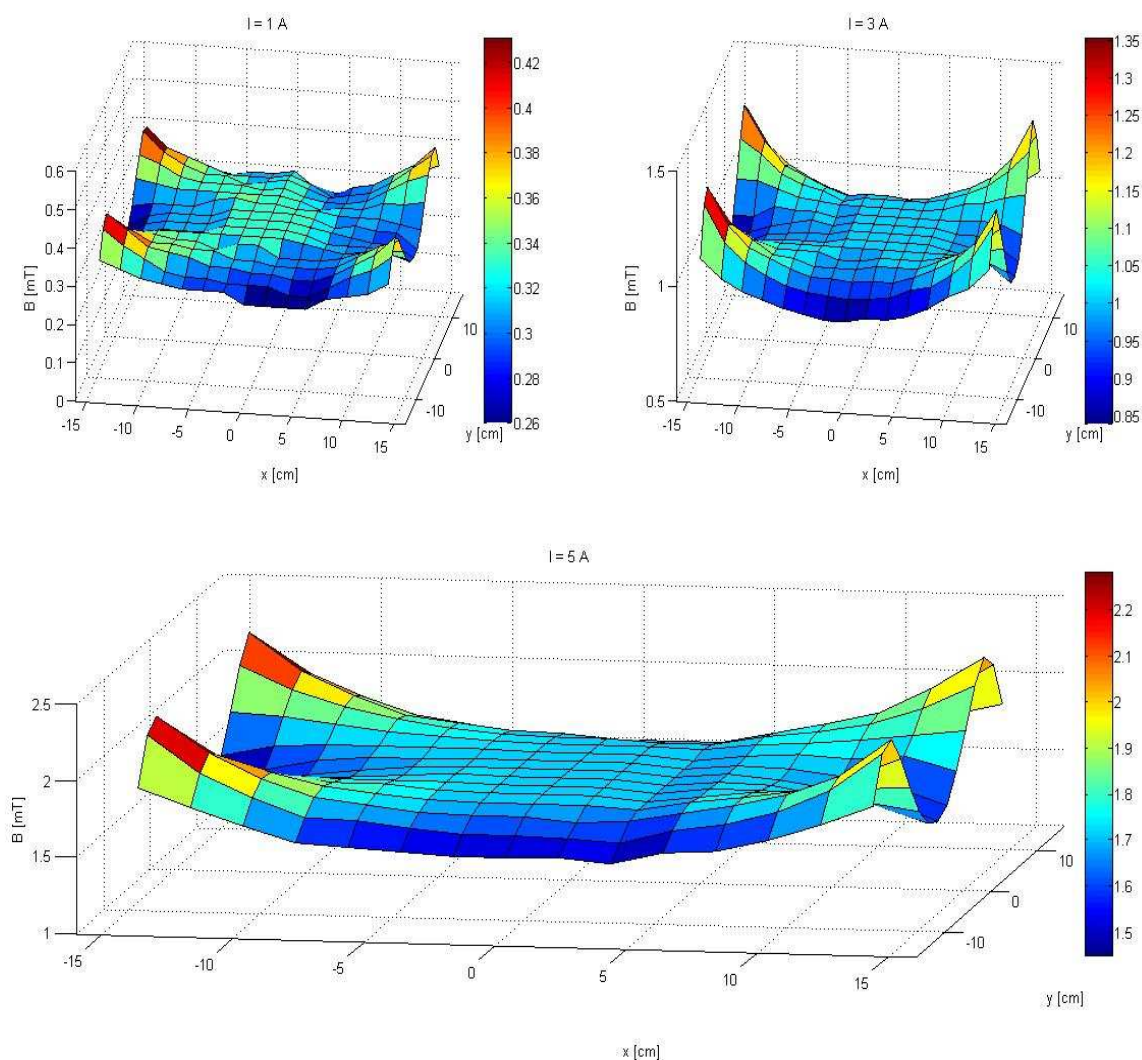
Helmholtzovy cívky

Přípravek s měřicí mřížkou

6.3 Magnetické pole v rovině osy Helmholtzových cívek

Magnetické pole Helmholtzových cívek nevzniká pouze na jejich ose, ale i v její rovině a okolním prostoru. Magnetické pole je pak homogenní pouze v blízkém okolí středu osy a se vzdáleností od osy a středu klesá. Velikost pole v rovině osy cívek jsem měřil pomocí gaussmetru podle zapojení na Obr. 6-2. Měření jsem provedl pro více proudů a naměřené hodnoty jsem zpracoval pomocí programu Matlab, kde jsem vytvořil trojrozměrné pole a vynesl ho do grafu. Tento graf ukazuje velikost magnetického pole v různých bodech v rovině osy cívek. Osa y reprezentuje osu cívek. Z grafů na Obr. 6-3 je patrné homogenní rozložení magnetického pole kolem středu a osy cívek. V krajních polohách grafů, tj. v místech blízko vinutí cívek, jsou vidět

rostoucí velikosti magnetického pole. Tabulky s naměřenými hodnotami velikosti magnetické pole jsou z důvodu velikosti přiloženy v příloze.



Obr. 6-3 Rozložení magnetického pole v rovině osy cívek

Použité měřicí přístroje a pomůcky:

Gaussmetr F.W.BELL 5080

Zdroj CPX400SP

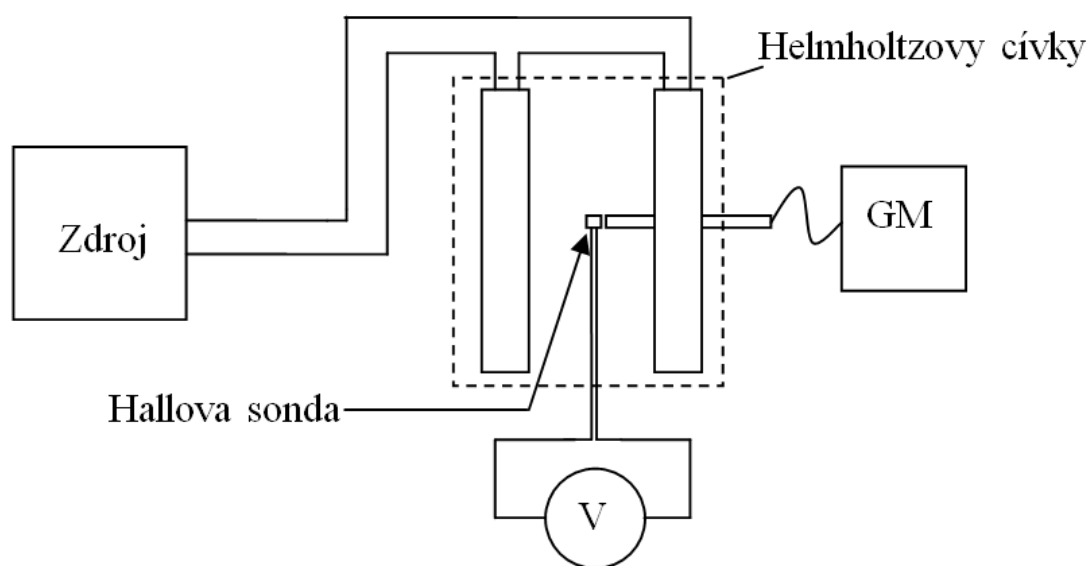
Helmholtzovy cívky

Přípravek s měřicí mřížkou

6.4 Měření s Hallovými sondami

Pro měření magnetického pole Hallovými sondami jsem vybral takové, které nemají pouze dvoustavový výstup, ale ty, které mají výstup spojitý. Měřil jsem se sondami A1302 od fy Allegro a SS496A1 od fy Honeywell. Obě sondy mají katalogovou hodnotu výstupního napětí bez vnějšího magnetického pole 2,5 V. S kladným magnetickým polem roste hodnota výstupního napětí, se záporným magnetickým polem klesá výstupní napětí.

Sondu jsem umístil do středu Helmholtzových cívek (Obr. 6-4) kolmo na směr magnetického pole. Napájecí napětí sondy jsem nastavil na 5 V. Cívkami jsem generoval magnetické pole a v závislosti na jeho velikosti a směru jsem odečítal výstupní napětí. Z naměřených hodnot (Tab. 6-7 a Tab. 6-8) jsem určil citlivost obou sond. Naměřené výsledky jsem porovnal s katalogovými hodnotami.



Obr. 6-4 Schéma zapojení pro měření s Hallovými sondami

Tab. 6-7 Výstupní napětí Hallovy sondy A1302

I [mA]	B [mT]	U_H [V]	ΔV [mV]
0,00	-0,03	2,6149	---
0,20	-0,10	2,6136	1,30
0,50	-0,20	2,6116	2,00
0,72	-0,30	2,6101	1,50
1,08	-0,40	2,6076	2,50
1,35	-0,50	2,6059	1,70
1,67	-0,60	2,6037	2,20
1,97	-0,70	2,6016	2,10
2,28	-0,80	2,5996	2,00
2,59	-0,90	2,5975	2,10
2,85	-1,00	2,5958	1,70
3,17	-1,10	2,5936	2,20
3,45	-1,20	2,5917	1,90
3,77	-1,30	2,5896	2,10
4,07	-1,40	2,5876	2,00
4,36	-1,50	2,5857	1,90
4,63	-1,60	2,5839	1,80
4,92	-1,70	2,5819	2,00
5,18	-1,80	2,5801	1,80
5,48	-1,90	2,5781	2,00
5,76	-2,00	2,5763	1,80
6,06	-2,10	2,5743	2,00
6,38	-2,20	2,5721	2,20
6,69	-2,30	2,5700	2,10
7,04	-2,40	2,5678	2,20
7,29	-2,50	2,5661	1,70
7,55	-2,60	2,5643	1,80
7,86	-2,70	2,5623	2,00

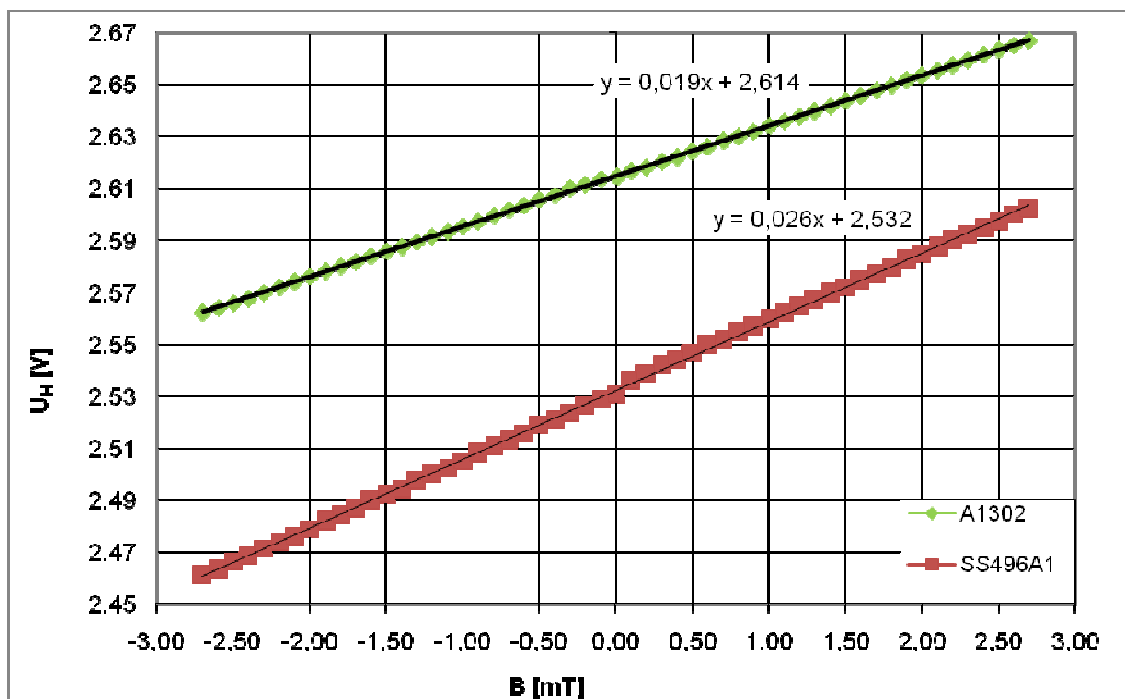
I [mA]	B [mT]	U_H [V]	ΔV [mV]
0,00	0,01	2,6147	---
0,29	0,10	2,6167	2,00
0,55	0,20	2,6184	1,70
0,88	0,30	2,6206	2,20
1,12	0,40	2,6222	1,60
1,43	0,50	2,6243	2,10
1,71	0,60	2,6262	1,90
2,04	0,70	2,6284	2,20
2,32	0,80	2,6302	1,80
2,60	0,90	2,6321	1,90
2,90	1,00	2,6341	2,00
3,20	1,10	2,6361	2,00
3,46	1,20	2,6379	1,80
3,76	1,30	2,6398	1,90
4,07	1,40	2,6419	2,10
4,35	1,50	2,6438	1,90
4,64	1,60	2,6458	2,00
4,93	1,70	2,6477	1,90
5,22	1,80	2,6496	1,90
5,53	1,90	2,6517	2,10
5,82	2,00	2,6536	1,90
6,12	2,10	2,6555	1,90
6,45	2,20	2,6577	2,20
6,71	2,30	2,6595	1,80
7,02	2,40	2,6615	2,00
7,29	2,50	2,6633	1,80
7,59	2,60	2,6653	2,00
7,85	2,70	2,6671	1,80

Tab. 6-8 Výstupní napětí Hallovy sondy SS496A1

I [mA]	B [mT]	U_H [V]	ΔV [mV]
0,00	-0,05	2,5320	---
0,46	0,10	2,5360	4,00
0,79	0,20	2,5389	2,90
1,12	0,30	2,5418	2,90
1,40	0,40	2,5443	2,50
1,70	0,50	2,5470	2,70
2,03	0,60	2,5498	2,80
2,30	0,70	2,5522	2,40
2,57	0,80	2,5546	2,40
2,85	0,90	2,5570	2,40
3,16	1,00	2,5597	2,70
3,45	1,10	2,5623	2,60
3,77	1,20	2,5651	2,80
4,00	1,30	2,5671	2,00
4,29	1,40	2,5697	2,60
4,57	1,50	2,5722	2,50
4,84	1,60	2,5746	2,40
5,11	1,70	2,5769	2,30
5,43	1,80	2,5798	2,90
5,76	1,90	2,5826	2,80
6,03	2,00	2,5851	2,50
6,31	2,10	2,5874	2,30
6,61	2,20	2,5901	2,70
6,90	2,30	2,5927	2,60
7,14	2,40	2,5947	2,00
7,46	2,50	2,5975	2,80
7,75	2,60	2,6002	2,70
7,98	2,70	2,6021	1,90

I [mA]	B [mT]	U_H [V]	ΔV [mV]
0,00	-0,02	2,5313	---
0,22	-0,10	2,5293	2,00
0,53	-0,20	2,5266	2,70
0,83	-0,30	2,5239	2,70
1,14	-0,40	2,5212	2,70
1,41	-0,50	2,5188	2,40
1,72	-0,60	2,5159	2,90
2,05	-0,70	2,5130	2,90
2,31	-0,80	2,5107	2,30
2,59	-0,90	2,5082	2,50
2,92	-1,00	2,5053	2,90
3,23	-1,10	2,5026	2,70
3,48	-1,20	2,5002	2,40
3,80	-1,30	2,4974	2,80
4,11	-1,40	2,4947	2,70
4,39	-1,50	2,4922	2,50
4,64	-1,60	2,4900	2,20
4,96	-1,70	2,4871	2,90
5,28	-1,80	2,4842	2,90
5,54	-1,90	2,4820	2,20
5,85	-2,00	2,4792	2,80
6,16	-2,10	2,4764	2,80
6,41	-2,20	2,4742	2,20
6,72	-2,30	2,4716	2,60
7,01	-2,40	2,4690	2,60
7,26	-2,50	2,4667	2,30
7,63	-2,60	2,4635	3,20
7,88	-2,70	2,4612	2,30

Graf 6-4 Výstupního napětí Hallových sond A1302 a SS496A1



Z naměřených hodnot vyšla citlivost Hallové sondy A1302 1,9 mV/G. Katalogová hodnota citlivosti pro referenční teplotu 25 ° je 1,3 mV/G. Pro teplotu různou od referenční je citlivost od 0,85 mV/G do 1,75 mV/G.

Pro Hallovu sondu SS496A1 vyšla z naměřených hodnot citlivost 2,56 mV/G. Katalogová hodnota je $2,50 \pm 0,075$ mV/G.

Použité měřicí přístroje a pomůcky:

Gaussmetr F.W.BELL 5080

Zdroj CPX400SP

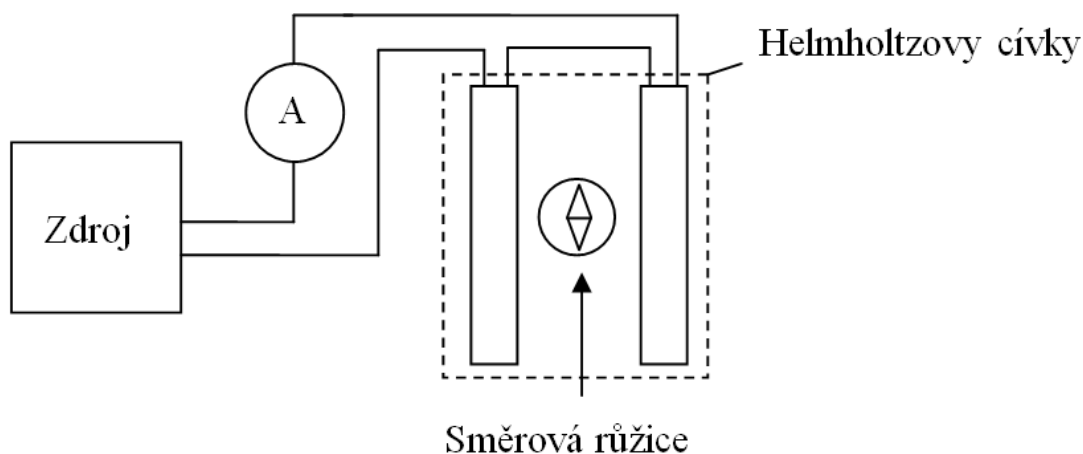
Multimetr Agilent34410A

Helmholtzovy cívky

Hallové sondy

6.5 Měření magnetického pole Země

Pomocí kompasu jsem nastavil Helmholtzovy cívky tak, aby jejich osa byla kolmo na směr magnetického pole Země. Do středu cívek jsem umístil magnetickou střílku. Neprotékal-li cívkami proud, magnetická střílka ukazovala na jižní magnetický pól. Proudem v cívkách jsem generoval magnetické pole. Toto pole mělo směr, díky orientaci cívek, kolmý na magnetické pole Země. Zvyšováním proudu v cívkách docházelo k vychylování magnetické střílky o úhel α . Výchyly pro jednotlivé proudy jsem zaznamenával a následně využil k výpočtu horizontální složky magnetického pole Země. Měření jsem provedl na stole (Tab. 6-9), na zemi v budově (Tab. 6-10) a na zemi mimo budovu (Tab. 6-11). Na Obr. 6-5 je schéma zapojení měřicího pracoviště.



Obr. 6-5 Schéma zapojení pro měření magnetického pole Země pomocí kompasu

Ze vztahu 6.1 jsem určil horizontální složku ${}^h\mathbf{B}_H$ magnetického pole generovaného cívkami. Z výchyly α a horizontální složky ${}^h\mathbf{B}_H$ magnetického pole cívek jsem určil podle vztahu 6.2 horizontální složku ${}^h\mathbf{B}_Z$ magnetického pole Země. Jako výslednou hodnotu složky ${}^h\mathbf{B}_Z$ jsem vzal průměr hodnot pro jednotlivé proudy a výchyly. Porovnání změřených hodnot je v Tab. 6-15.

$${}^hB_Z = {}^hB_H \cdot \cot \alpha \quad (6.2)$$

Příklad výpočtů:

$$^hB_H = I \cdot Kh$$

$$^hB_Z = ^hB_H \cdot \cot \alpha$$

$$^hB_H = 37,0 \cdot 10^{-3} \cdot 0,346$$

$$^hB_Z = 12,8020 \cdot 10^{-6} \cdot \cot(30)$$

$$\underline{\underline{^hB_H = 12,8020 \mu T}}$$

$$\underline{\underline{^hB_Z = 22,1737 \mu T}}$$

Tab. 6-9 Horizontální složka magnetického pole Země - měřeno na stole

I [mA]	α [°]	α [rad]	hB_H [μT]	hB_Z [μT]
3,7	5	0,0873	1,2802	14,6328
9,2	10	0,1745	3,1832	18,0528
15,5	15	0,2618	5,3630	20,0150
21,6	20	0,3491	7,4736	20,5335
37,0	30	0,5236	12,8020	22,1737
55,0	40	0,6981	19,0300	22,6791
66,9	45	0,7854	23,1474	23,1474
79,6	50	0,8727	27,5416	23,1101
124,8	60	1,0472	43,1808	24,9304
199,6	70	1,2217	69,0616	25,1364
286,7	75	1,3090	99,1982	26,5801

Tab. 6-10 Horizontální složka magnetického pole Země - měřeno na zemi v budově

I [mA]	α [°]	α [rad]	hB_H [μT]	hB_Z [μT]
15,1	10	0,1745	5,2246	29,6302
19,5	15	0,2618	6,7470	25,1801
26,2	20	0,3491	9,0652	24,9064
36,4	30	0,5236	12,5944	21,8141
51,4	40	0,6981	17,7844	21,1946
61,0	45	0,7854	21,1060	21,1060
75,4	50	0,8727	26,0884	21,8908
107,1	60	1,0472	37,0566	21,3946
167,7	70	1,2217	58,0242	21,1191
235,3	75	1,3090	81,4138	21,8148
376,4	80	1,3963	130,2344	22,9638

Tab. 6-11 Horizontální složka magnetického pole Země - měřeno na zemi mimo budovu

I [mA]	α [°]	α [rad]	hB_H [μT]	vB_Z [μT]
6,7	5	0,0873	2,3182	26,4971
11,9	10	0,1745	4,1174	23,3509
16,8	15	0,2618	5,8128	21,6937
18,9	20	0,3491	6,5394	17,9669
30,0	30	0,5236	10,3800	17,9787
49,8	40	0,6981	17,2308	20,5349
64,1	45	0,7854	22,1786	22,1786
76,5	50	0,8727	26,4690	22,2101
115,4	60	1,0472	39,9284	23,0527
180,4	70	1,2217	62,4184	22,7184
246,2	75	1,3090	85,1852	22,8253
355,8	80	1,3963	123,1068	21,7071

Pro měření vertikální složky magnetického pole Země vB_Z jsem otočil magnetickou střílku do vertikální polohy tak, aby docházelo k jejímu vychýlení působením magnetického pole generovaného Helmholtzovými cívkami. Opět jsem zaznamenával výchylku α pro jednotlivé proudy. Měření jsem provedl na stole (Tab. 6-12), na zemi v budově (Tab. 6-13) a na zemi mimo budovu (Tab. 6-14). Z naměřených hodnot jsem podle vztahu 6.3 vypočítal vertikální složku magnetického pole Země vB_Z pro jednotlivé proudy a výchylky. Výslednou hodnotu jsem určil průměrem. Porovnání změřených hodnot je v Tab. 6-15.

$$^vB_Z = ^hB_H \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \quad (6.3)$$

Příklad výpočtu:

$$^hB_H = I \cdot Kh$$

$$^hB_H = 181,7 \cdot 10^{-3} \cdot 0,346$$

$$\underline{\underline{^hB_H = 62,8682 \mu T}}$$

$$^vB_Z = ^hB_H \cdot \operatorname{tg}(\alpha)$$

$$^vB_Z = 62,8682 \cdot 10^{-6} \cdot \cot(30)$$

$$\underline{\underline{^vB_Z = 36,2970 \mu T}}$$

Tab. 6-12 Vertikální složka magnetického pole Země - měřeno na stole

I [mA]	α [°]	α [rad]	hB_H [μT]	vB_Z [μT]
13,3	80	1,3963	4,6018	26,0981
25,0	75	1,3090	8,6500	32,2822
35,5	70	1,2217	12,2830	33,7473
53,8	60	1,0472	18,6148	32,2418
78,6	50	0,8727	27,1956	32,4105
96,9	45	0,7854	33,5274	33,5274
117,3	40	0,6981	40,5858	34,0555
181,7	30	0,5236	62,8682	36,2970
292,5	20	0,3491	101,2050	36,8356
394,3	15	0,2618	136,4278	36,5557
535,0	10	0,1745	185,1100	32,6399

Tab. 6-13 Vertikální složka magnetického pole Země - měřeno na zemi v budově

I [mA]	α [°]	α [rad]	hB_H [μT]	vB_Z [μT]
19,5	80	1,3963	6,7470	38,2641
35,2	75	1,3090	12,1792	45,4534
47,4	70	1,2217	16,4004	45,0597
76,4	60	1,0472	26,4344	45,7857
112,2	50	0,8727	38,8212	46,2653
128,4	45	0,7854	44,4264	44,4264
155,8	40	0,6981	53,9068	45,2332
221,7	30	0,5236	76,7082	44,2875
375,0	20	0,3491	129,7500	47,2251
480,3	15	0,2618	166,1838	44,5288
665,6	10	0,1745	230,2976	40,6077

Tab. 6-14 Vertikální složka magnetického pole Země - měřeno na zemi mimo budovu

I [mA]	α [°]	α [rad]	$^h\mathbf{B}_H$ [μT]	$^v\mathbf{B}_Z$ [μT]
23,6	80	1,3963	8,1656	46,3094
37,3	75	1,3090	12,9058	48,1651
49,5	70	1,2217	17,1270	47,0560
75,2	60	1,0472	26,0192	45,0666
101,2	50	0,8727	35,0152	41,7295
122,7	45	0,7854	42,4542	42,4542
156,1	40	0,6981	54,0106	45,3203
237,3	30	0,5236	82,1058	47,4038
368,2	20	0,3491	127,3972	46,3688
518,6	15	0,2618	179,4356	48,0796
747,1	10	0,1745	258,4966	45,5799

Z naměřených a vypočítaných hodnot jednotlivých složek magnetického pole jsem určil celkovou hodnotu $^c\mathbf{B}_Z$ magnetického pole Země. Celková hodnota magnetického pole se určí ze vztahu 6.4.

$$^cB_Z = \sqrt{\left(^hB_Z\right)^2 + \left(^vB_Z\right)^2} \quad (6.4)$$

Příklad výpočtu

$$^cB_Z = \sqrt{\left(^hB_Z\right)^2 + \left(^vB_Z\right)^2}$$

$$^cB_Z = \sqrt{\left(21,8629 \cdot 10^{-6}\right)^2 + \left(45,7758 \cdot 10^{-6}\right)^2}$$

$$\underline{\underline{^cB_Z = 50,7417 \mu T}}$$

Tab. 6-15 Porovnání naměřených hodnot složek magnetického pole Země

	$^h\mathbf{B}_Z$ [μT]	$^v\mathbf{B}_Z$ [μT]	$^c\mathbf{B}_Z$ [μT]
na stole	21,9083	33,3355	39,8903
na zemi v budově	23,0013	44,2852	49,9023
na zemi mimo budovu	21,8929	45,7758	50,7417
referenční	20,3460	44,3470	48,7920

Použité měřicí přístroje a pomůcky:

Zdroj CPX400SP

Multimetr Agilent34410A

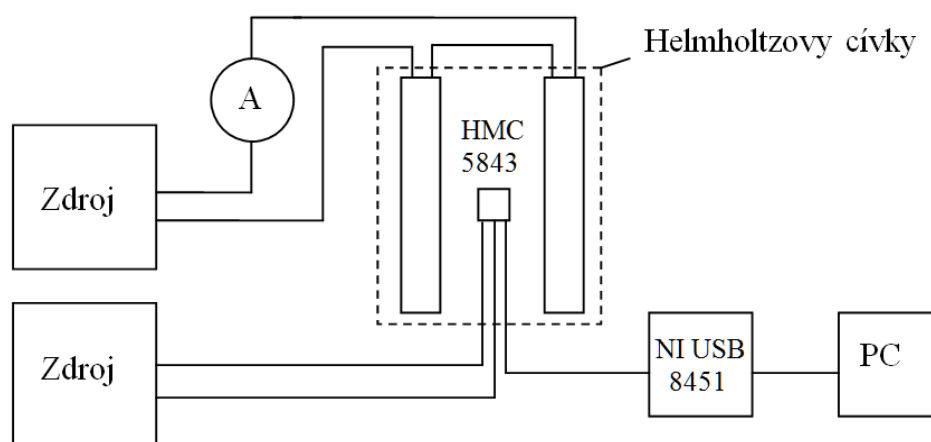
Helmholtzovy cívky, kompas, směrová růžice

6.6 Měření magnetického pole Země pomocí HMC5843

Snímání dat ze senzoru HMC5843 bylo zpracováno jako aplikace v programu LabView. K přenosu naměřených dat a nastavení parametrů je senzor HMC5843 vybaven sběrnicí I2C. Proto byla pro měření využita karta NI USB-8451 obsahující I2C rozhraní.

U senzoru lze zvolit dvě varianty napájecího napětí. Je možné použít odděleného napájení pro analogovou a digitální část obvodu, nebo použít jediného napájení. V tomto případě byla využita možnost odděleného napájení, schéma zapojení je zobrazeno na Obr. 4-7.

Senzor jsem umístil do středu Helmholtzových cívek tak, aby vždy jedna z měřících os senzoru byla orientována shodně s osou cívek. Z naměřených hodnot jsem podle vztahu 6.1 určil konstantu Helmholtzových cívek K_h . Výslednou konstantu jsem určil průměrem z dílčích konstant pro jednotlivé proudy a osy senzoru a její hodnota je $K_h = 0,379 \text{ mT} / \text{A}$. Do průměru jsem nezahrnul dílčí konstanty pro proud $I = 0,1 \text{ A}$ z důvodu jejich značné odlišnosti od ostatních. Schéma zapojení pracoviště je na Obr. 6-6.



Obr. 6-6 Zapojení pro měření magnetického pole Země pomocí HMC5843

Tab. 6-16 Magnetická indukce Helmholtzových cívek změřena senzorem HMC5843

I [A]	B _x [μT]	B _y [μT]	B _z [μT]	Kh _x [mT/A]	Kh _y [mT/A]	Kh _z [mT/A]
0,1	55,47	55,96	57,09	0,555	0,560	0,571
0,2	90,71	91,51	91,53	0,454	0,458	0,458
0,3	123,56	124,94	125,00	0,412	0,416	0,417
0,4	157,29	157,99	158,33	0,393	0,395	0,396
0,5	192,73	192,58	190,73	0,385	0,385	0,381
0,6	224,85	225,07	222,16	0,375	0,375	0,370
0,7	258,26	258,42	256,18	0,369	0,369	0,366
0,8	292,05	292,97	288,02	0,365	0,366	0,360
0,9	324,36	324,56	321,58	0,360	0,361	0,357
1,0	356,44	357,11	352,72	0,356	0,357	0,353
1,1	389,90	389,98	384,71	0,354	0,355	0,350
1,2	421,70	422,76	416,86	0,351	0,352	0,347

Příklad výpočtu:

$$Kh_x = \frac{B}{I}$$

$$Kh_x = \frac{224,85 \cdot 10^{-6}}{0,6}$$

$$\underline{\underline{Kh_x = 0,375 \text{ mT} / \text{A}}}$$

Pro měří magnetického pole Země pomocí AMR senzoru HMC5843 jsem využil aplikaci v programu LabView, která zobrazovala hodnoty magnetického pole ve všech osách a zároveň azimut natočení od severu.

Pomocí senzoru HMC5843 jsem nasměroval Helmholtzovy cívky tak, aby jejich osa byla kolmo k magnetickému poli Země. Měřicí osa y senzoru tak byla rovnoběžně s osou cívek a velikost magnetického pole v této ose zobrazované v LabView bylo nulové. Zvyšováním proudu v cívkách jsem generoval magnetické pole a pro jednotlivé proudy jsem zaznamenával azimut. Z konstanty Kh a proudu jsem vypočítal horizontální složku ${}^h\mathbf{B}_H$ cívek podle vztahu 6.1 a následně vypočítal podle vztahu 6.2 velikost horizontální složky ${}^h\mathbf{B}_Z$ magnetického pole Země. Měření i výpočet je analogický k měření magnetického pole Země pomocí kompasů. Výslednou hodnotu horizontální složky magnetického pole jsem určil průměrem dílčích hodnot. Výsledná hodnota je ${}^h\mathbf{B}_Z = 26,1557 \mu\text{T}$.

Tab. 6-17 Horizontální složka magnetického pole Země - měřeno s HMC5843

I [mA]	α [°]	α [rad]	hB_H [μT]	hB_Z [μT]
10	10	0,1745	3,7900	21,4942
23	20	0,3491	8,7170	23,9498
38	30	0,5236	14,4020	24,9450
58	40	0,6981	21,9820	26,1971
72	45	0,7854	27,2880	27,2880
86	50	0,8727	32,5940	27,3496
128	60	1,0472	48,5120	28,0084
204	70	1,2217	77,3160	28,1407
276	75	1,3090	104,6040	28,0286

Měření vertikální složky vB_Z magnetického pole Země se senzorem HMC5843 jsem provedl také analogicky jako při měření s kompasem. Senzor jsem umístil do středu cívek tak, aby zvětšování magnetického pole cívek způsobovalo změnu azimutu. Dílčí hodnotu vertikální složky magnetického pole jsem určil ze vztahu 6.3 a výslednou hodnotu jsem určil průměrem dílčích hodnot. Výsledná hodnota je $^vB_Z = 42,4670 \mu T$.

Tab. 6-18 Vertikální složka magnetického pole Země - měřeno s HMC5843

I [mA]	α [°]	α [rad]	hB_H [μT]	vB_Z [μT]
7	85	1,4835	2,6530	30,3239
18	80	1,3963	6,8220	38,6895
42	70	1,2217	15,9180	43,7343
66	60	1,0472	25,0140	43,3255
98	50	0,8727	37,1420	44,2641
118	45	0,7854	44,7220	44,7220
142	40	0,6981	53,8180	45,1587
211	30	0,5236	79,9690	46,1701
262	25	0,4363	98,2500	45,8147

Celková hodnota cB_z magnetického pole se vypočítá podle vztahu 6.4.

$${}^cB_z = \sqrt{({}^hB_z)^2 + ({}^vB_z)^2}$$

$${}^cB_z = \sqrt{(26,1557 \cdot 10^{-6})^2 + (42,4670 \cdot 10^{-6})^2}$$

$$\underline{\underline{{}^cB_z = 49,8755 \mu T}}$$

Tab. 6-19 Porovnání magnetického pole zjištěných pomocí kompasu a HMC5843

	${}^hB_z [\mu T]$	${}^vB_z [\mu T]$	${}^cB_z [\mu T]$
pomocí kompasu	21,8929	45,7758	50,7417
pomocí HMC5843	26,1557	42,4670	49,8755
referenční	20,3460	44,3470	48,7920

Použité měřicí přístroje a pomůcky:

Zdroj CPX400SP
 Zdroj Diametral P230R51D
 Ampermetr UNIT-UT84
 Helmholtzovy cívky
 AMR senzor HMC5843
 Měřicí karta NI USB-8451
 Aplikace v LabView
 PC

6.7 Návrh konstrukce Helmholtzových cívek

Měření magnetického pole je ovlivněno magnetickým polem Země. Čím je měřené pole menší, tím je měření ovlivněno více. K potlačení magnetického pole Země v místě měření je potřeba vytvořit magnetické pole, které má shodnou velikost, ale opačný směr než magnetické pole Země. Takové pole lze vytvořit pomocí tříosých cívek v Helmholtzově uspořádání, kde jedna dvojice cívek generuje magnetické pole ve směru x, jedna dvojice ve směru y a poslední dvojice ve směru z.

Pro konstrukci tříosých cívek jsem si dal požadavek na nejmenší poloměr vnitřních cívek na 10 cm, možnost používat jednotlivé dvojice cívek samostatně

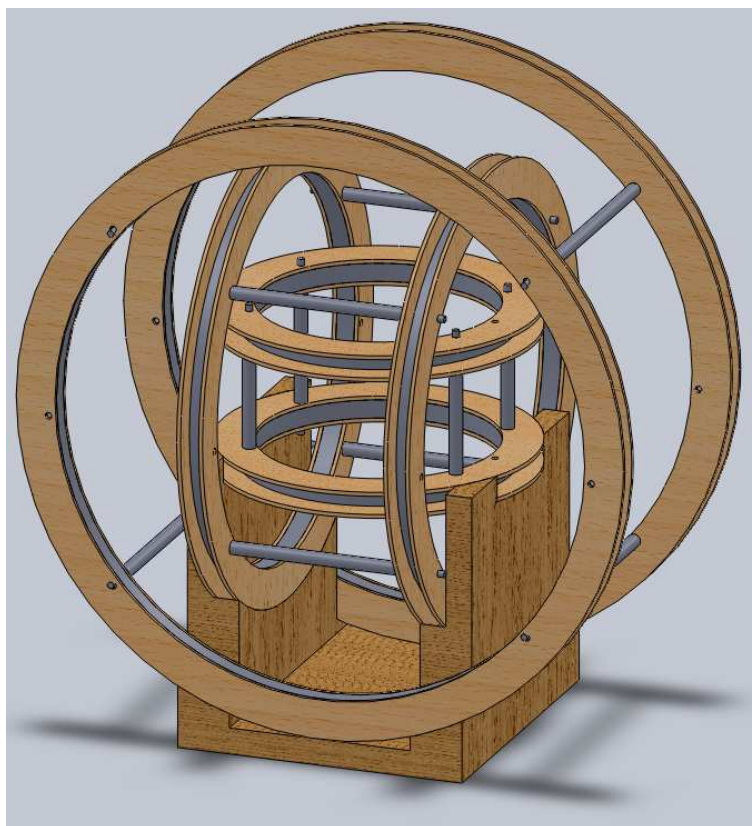
s možností jejich vyjmutí z celkové konstrukce a požadovanou konstantu cívek K_{h_v} alespoň na 0,4 mT/A.

Výsledný návrh jsem udělal tak, že poloměr největších (vnější) cívek je 22,0 cm, středních cívek 16,0 cm a poloměr nejmenších (vnitřních) cívek je 10,5 cm. Takovéto průměry cívek zajišťují možnost jejich vsunutí do sebe bez nutnosti demontáže a následné montáže. Následně podle poloměrů jsem určil počet závitů, aby výsledná konstanta K_{h_v} pro každé cívky byla přibližně 0,42 mT/A. Návrhy parametrů cívek shrnuje Tab. 6-20.

Tab. 6-20 Parametry navržených cívek

Cívky	Poloměr [cm]	Počet závitů [-]	K_{h_v} [mT/A]
vnější	22,0	100	0,41
střední	16,0	75	0,42
vnitřní	10,5	50	0,43

Výkresy konstrukčních prvků a jsou přiloženy v příloze.



Obr. 6-7 Model tříosých cívek v Helmholtzově uspořádání

7 ZÁVĚR

V bakalářské práci jsem se zabýval měřením magnetického pole. V teoretické části jsem popsal magnetické pole Země a magnetické pole Helmholtzových cívek. V další části jsem popsal snímače magnetického pole, a to Hallovu sondu, AMR senzory, GMR senzory a TMR senzory. U všech senzorů jsem popsal jakým způsobem reagují na magnetické pole. V této části jsem se věnoval i průzkumu trhu a uvedl jsem příklady senzorů, které lze zakoupit.

V praktické části jsem nejprve měřil s Helmholtzovými cívkami. Jako první jsem provedl měření pro určení konstanty těchto cívek a ověřil jsem teoretické předpoklady na homogenitu magnetického pole na ose těchto cívek. Naměřené hodnoty jsem porovnal s vypočítanými. Naměřené hodnoty se od teoretických lišily jen nepatrně. Důvody drobných rozdílů jsou dány tím, že ve výpočtech je počítáno s ideálními hodnotami a za ideálních podmínek. Je zanedbán rozměr cívek, její navinutí i vazby mezi jednotlivými závity. Po ověření homogenity magnetického pole na ose cívek, jsem proměřil i velikost magnetického pole v rovině osy cívek a vynesl ho do grafu.

Dále jsem ověřoval citlivost dvou Hallových sond a to sondy A1302 od fy Allegro a sondy SS496A1 od fy Honeywell. Z naměřených hodnot lze říci, že obě sondy mají lineární výstup kolem počátečního stavu, tedy stavu, kdy na ně nepůsobí vnější magnetické pole. Ke krajním hodnotám měřicího rozsahu se pomocí Helmholtzových cívek nepodařilo dosáhnout. Citlivost Hallovu sondy SS496A1 podle měření vyšla totožně s udávanou citlivostí výrobce a to 2,56 mV/G. Katalogové hodnoty citlivosti sondy A1302 se nepodařilo dosáhnout.

V teoretické části jsem popisoval magnetické pole Země, v praktické jsem potom toto pole měřil dvěma způsoby. Prvním způsobem, pomocí kompasu, jsem provedl měření na více místech. Nejlepších výsledků vzhledem k referenčním údajům o velikosti magnetického pole podle NOAA jsem dosáhl při měření na zemi v budově. Měření na stole bylo naopak nejméně přesné. To je způsobeno železnou konstrukcí stolu. Měření venku bylo ovlivněno povětrnostními podmínkami, ale i tak měření dosahovalo dobré přesnosti. Druhým způsobem, pomocí senzoru HMC5843, jsem provedl měření pouze na stole. Celková velikost magnetického pole měřená pomocí tohoto senzoru vyšla blíže k referenční hodnotě celkové velikosti magnetického pole.

Poslední část praktické části jsem věnoval návrhu Helmholtzových cívek. Z původního zadání navrhnout a zkonstruovat jednoosé Helmholtzovy cívky po domluvě s vedoucím práce sešlo, a to z důvodu, že ve vlastnictví VUT již jedny jednoosé Helmholtzovy cívky byly a s nimi jsem provedl měření. Místo původního zadání jsem měl navrhnout tříosé Helmholtzovy cívky. První návrh konstrukce jsem udělal v podobě dřevěného modelu. Následně jsem navrhl i 3D model pomocí PC softwaru.

Literatura

- [1] Magnet. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-04-07].
Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnet>
- [2] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: Elektřina a magnetismus*. Brno: Vutium, 2003. ISBN 80-214-1868-0.
- [3] MYSLÍK, Jiří. *Elektromagnetické pole: základy teorie*. Praha: BEN - technická literatura, 1998. ISBN 80-86056-43-0.
- [4] Earth's magnetic field. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-04-07].
Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Earth's_magnetic_field
- [5] LANGLEY, Richard. The Magnetic Compass and GPS. *GPS world: The Business and Technology of Global Navigation and Positioning* [online]. 2003, September [cit. 2012-04-07].
Dostupné z: <http://www.gpsworld.com/gps/the-magnetic-compass-and-gps-828>
- [6] VOJÁČEK, Antonín. Magnetické senzory s Hallovým efektem - 1. princip. *Automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. 2007, 23. Listopad 2007 [cit. 2012-04-07].
Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/magneticke-senzory-s-hallovym-efektem-1-princip>
- [7] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 [cit. 2012-04-07].
Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/294-halluv-jev>
- [8] MARTINEK, Radislav. *Senzory v průmyslové praxi*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 199 s. ISBN 80-730-0114-4.
- [9] CARUSO, Michael, Tamara BRATLAND, Carl SMITH a Robert SCHNEIDER. A New Perspective on Magnetic Field Sensing. [online]. 1998 [cit. 2012-04-07].
Dostupné z: http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense_Brochures-documents/Magnetic__Literature_Technical_Article-documents/A_New_Perspective_on_Magnetic_Field_Sensing.pdf

- [10] VOJÁČEK, Antonín. Integrované AMR senzory magnetického pole. *Automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. 2011, 12. Květen 2011 [cit. 2012-04-07].
Dostupné z:
<http://automatizace.hw.cz/integrované-amr-senzory-magnetického-pole>
- [11] VOJÁČEK, Antonín. GMR senzory mag. pole - 1. díl - princip a struktura. *Automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. 2011, 12. Červenec 2011 [cit. 2012-04-07].
Dostupné z:
<http://automatizace.hw.cz/gmr-senzory-mag-pole-1-díl-princip-a-struktura>
- [12] Aldebaran. [online]. 2000 [cit. 2012-04-07].
Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/animace/Phy_gmr.mpg
- [13] VOJÁČEK, Antonín. TMR – Tunelová magnetoresistence – 1. díl - princip. *Automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. 2011, 19. Srpen 2011 [cit. 2012-04-07].
Dostupné z:
<http://automatizace.hw.cz/tmr-tunelova-magnetoresistence-1-díl-princip>
- [14] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. 1. vyd. V Brně: VUTUM, 2011, 564 s. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [15] *National Oceanic and Atmospheric Administration: National Geophysical Data Center* [online]. [cit. 2012-04-07].
Dostupné z: <http://www.ngdc.noaa.gov/geomagmodels/struts/calcIGRFWMM>
- [16] World Data Center for Geomagnetism, Kyoto. [online]. [cit. 2012-04-08].
Dostupné z: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/poles/polesexp.html>
- [17] PALENČÁŘ, Rudolf, František VDOLEČEK a Martin HALAJ. Nejistoty v měření I: vyjadřování nejistot. *Automa: časopis pro automatizační techniku* [online]. Praha: FCC Public, 2001, 7-8 [cit. 2012-05-15]. ISSN 1210-9592.
Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au070150.pdf>

- [18] PALENČÁŘ, Rudolf, František VDOLEČEK a Martin HALAJ. Nejistoty v měření II: nejistoty přímých měření. *Automa: časopis pro automatizační techniku* [online]. Praha: FCC Public, 2001, č. 10 [cit. 2012-05-15]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au100152.pdf>
- [19] PALENČÁŘ, Rudolf, František VDOLEČEK a Martin HALAJ. Nejistoty v měření III: nejistoty nepřímých měření. *Automa: časopis pro automatizační techniku* [online]. Praha: FCC Public, 2001, č. 12 [cit. 2012-05-15]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au120128.pdf>
- [20] *Firemní literatura Honeywell.*
Dostupné z:
http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense_Brochures-documents/HMC5843.pdf
- [21] HANKOVEC, David. Sběrnice I2C. [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.dhservis.cz/iic.htm>
- [22] Magnetická indukce. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetická_indukce
- [23] BRANČÍK, Lubomír. *Elektrotechnika 1* [online]. 1. vyd. Brno: VUTÍUM, 2004, 135 s. [cit. 2012-05-23]. ISBN 80-214-2607-1.

Seznam obrázků

Obr. 2-1 Tyčový permanentní magnet [2]	10
Obr. 2-2 Změna rozložení pólů při zlomení tyčového magnetu [2]	10
Obr. 2-3 Řez elektromagnetem [2]	11
Obr. 3-1 Směr magnetických siločar v okolí Země [2]	12
Obr. 3-2 Změna polohy magnetických a zemských pólů v čase [16].....	13
Obr. 3-3 Zobrazení magnetického pole Země [5].....	14
Obr. 4-1 Princip snímače s Hallovým jevem [8]	16
Obr. 4-2 Závislost změny odporu permalloy na intenzitě magnetického pole [10]	18
Obr. 4-3 Náhodná orientace magnetických domén [9].....	19
Obr. 4-4 Orientace magnetických domén vlivem silného magnetického pole [9]	19
Obr. 4-5 Změna úhlu mezi směrem proudu a směrem magnetických domén [9]	19
Obr. 4-6 Rozmístění snímacích os - pohled ze strany pinů [20].....	21
Obr. 4-7 Schéma zapojení HMC5843 v duálním režimu napájení [20]	21
Obr. 4-8 Souhlasná orientace magnetizace vrstev GMR senzoru [12].....	22
Obr. 4-9 Nesouhlasná orientace magnetizace vrstev GMR senzoru [12].....	23
Obr. 4-10 Princip TMR senzoru [13].....	25
Obr. 5-1 Magnetická indukce v okolí cívky ve tvaru kruhového závitu [14].....	27
Obr. 5-2 Helmholtzovy cívky [14]	28
Obr. 6-1 Ilustrační obrázek cívek v Helmholtzově uspořádání	29
Obr. 6-2 Schéma zapojení pro určení konstanty K_h	30
Obr. 6-3 Rozložení magnetického pole v rovině osy cívek.....	40
Obr. 6-4 Schéma zapojení pro měření s Hallovými sondami	41
Obr. 6-5 Schéma zapojení pro měření magnetického pole Země pomocí kompasu	45
Obr. 6-6 Zapojení pro měření magnetického pole Země pomocí HMC5843.....	50
Obr. 6-7 Model tříosých cívek v Helmholtzově uspořádání.....	54

Seznam tabulek

Tab. 3-1 Základní parametry magnetického pole Země v Brně pro rok 2012.....	14
Tab. 3-2 Změna základních parametrů magnetického pole Země v Brně v čase	15
Tab. 4-1 Hallový sondy s lineárním výstupem	17
Tab. 4-2 AMR senzory s lineárním výstupem	20
Tab. 4-3 GMR senzory s lineárním výstupem	23
Tab. 4-4 GMR senzory s dvoustavovým výstupem.....	23
Tab. 4-5 GMR senzory měřící úhel natočení.....	23
Tab. 4-6 TMR senzory s lineárním výstupem	25
Tab. 4-7 TMR senzory měřící úhel natočení	25
Tab. 6-1 Magnetická indukce ve středu cívek v závislosti na proudu.....	30
Tab. 6-2 Určení konstanty Helmholtzovy cívky.....	31
Tab. 6-3 Referenční hodnoty magnetické indukce ve středu cívek	32
Tab. 6-4 Magnetická indukce na ose Helmholtzových cívek - část a)	35
Tab. 6-5 Magnetická indukce na ose Helmholtzových cívek - část b)	35
Tab. 6-6 Korekční tabulka	38
Tab. 6-7 Výstupní napětí Hallový sondy A1302	42
Tab. 6-8 Výstupní napětí Hallový sondy SS496A1.....	43
Tab. 6-9 Horizontální složka magnetického pole Země - měřeno na stole	46
Tab. 6-10 Horizontální složka magnetického pole Země - měřeno na zemi v budově ..	46
Tab. 6-11 Horizontální složka magnetického pole Země - měřeno na zemi mimo budovu	47
Tab. 6-12 Vertikální složka magnetického pole Země - měřeno na stole	48
Tab. 6-13 Vertikální složka magnetického pole Země - měřeno na zemi v budově	48
Tab. 6-14 Vertikální složka magnetického pole Země - měřeno na zemi mimo budovu	49
Tab. 6-15 Porovnání naměřených hodnot složek magnetického pole Země	49
Tab. 6-16 Magnetická indukce Helmholtzových cívek změřena senzorem HMC5843.	51
Tab. 6-17 Horizontální složka magnetického pole Země - měřeno s HMC5843	52
Tab. 6-18 Vertikální složka magnetického pole Země - měřeno s HMC5843	52
Tab. 6-19 Porovnání magnetického pole zjištěných pomocí kompasu a HMC5843.....	53
Tab. 6-20 Parametry navržených cívek	54

Seznam grafů

Graf 6-1 Závislost magnetické indukce na velikosti proudu - referenční hodnota.....	32
Graf 6-2 Magnetická indukce na ose Helmholtzových cívek.....	37
Graf 6-3 Korekční křivka Helmholtzových cívek	39
Graf 6-4 Výstupního napětí Hallových sond A1302 a SS496A1	44

Seznam použitých značek a symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
D	Deklinace	°
I	Inklinace	°
d	Tloušťka destičky Hallovy sondy	m
B	Magnetická indukce	T
U_H	Hallovo napětí	V
R_H	Konstanta Hallovy sondy	$\text{m}^3\text{A}^{-1}\text{s}^{-1}$
q	Náboj jednoho nositele náboje	C
n	Koncentrace nositelů náboje v jednotce objemu	m^{-3}
θ	Úhel mezi směrem natočení magnetických domén a proudem	°
M	Směr magnetických domén	-
H	Intenzita magnetického pole	A/m
μ_0	Permeabilita vakua	Hm^{-1}
R	Poloměr Helmholtzových cívek	m
B_K	Vektor kolmý k ose Helmholtzových cívek	T
B_X	Vektor rovnoběžný s osou Helmholtzových cívek	T
N	Počet závitů	-
r	Vzdálenost bodu na ose cívek od závitu cívky	m
x	Vzdálenost bodu na ose cívek od středu cívky	m
a	Vzdálenost cívek v Helmholtzově uspořádání	m
Kh	Konstanta Helmholtzových cívek	mT/A
O	Oprava	T
ΔV	Změna napětí	V
α	Úhel vychýlení magnetické střelky	°
hB_H	Horizontální složka magnetického pole cívek	T
hB_Z	Horizontální složka magnetického pole Země	T
vB_Z	Vertikální složka magnetického pole Země	T
cB_Z	Celková velikost magnetického pole Země	T
u_a	Nejistota A	mT/A
u_b	Nejistota B	mT/A
u_c	Celková nejistota	mT/A
u	Rozšířená nejistota	mT/A

Seznam příloh

Příloha 1-1 Magnetické pole v rovině osy Helmholtzových cívek pro $I = 1 \text{ A}$

Příloha 1-2 Magnetické pole v rovině osy Helmholtzových cívek pro $I = 3 \text{ A}$

Příloha 1-3 Magnetické pole v rovině osy Helmholtzových cívek pro $I = 5 \text{ A}$

Příloha 2-1 Konstrukční výkres - jádro malé

Příloha 2-2 Konstrukční výkres - jádro střední

Příloha 2-3 Konstrukční výkres - jádro velké

Příloha 2-4 Konstrukční výkres - kostra malá

Příloha 2-5 Konstrukční výkres - kostra střední

Příloha 2-6 Konstrukční výkres - kostra velká

Příloha 2-7 Konstrukční výkres - spojovací tyčky

Příloha 2-8 Konstrukční výkres - stojánek

Příloha 2-9 Model tříosých Helmholtzových cívek

Příloha 3-1 CD

Příloha 1-1 Magnetické pole v rovině osy Helmholtzových cívek pro $I = 1$ A; hodnoty jsou uvedeny v mT

x [cm]	-14	-12	-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10	12	14
y [cm]															
-14	0,35	0,33	0,31	0,30	0,29	0,29	0,29	0,26	0,26	0,26	0,26	0,29	0,30	0,31	0,34
-12	0,41	0,37	0,34	0,31	0,30	0,30	0,29	0,29	0,29	0,27	0,27	0,30	0,33	0,35	0,39
-10	0,43	0,39	0,35	0,34	0,33	0,31	0,31	0,30	0,30	0,29	0,29	0,31	0,34	0,37	0,42
-8	0,38	0,37	0,34	0,34	0,33	0,33	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30	0,31	0,34	0,37	0,39
-6	0,34	0,34	0,34	0,33	0,33	0,31	0,33	0,33	0,30	0,30	0,30	0,31	0,33	0,34	0,34
-4	0,30	0,31	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,32	0,31	0,30	0,31	0,31	0,30
-2	0,27	0,30	0,31	0,31	0,31	0,33	0,33	0,33	0,33	0,32	0,30	0,30	0,30	0,29	0,27
0	0,26	0,30	0,31	0,31	0,31	0,33	0,33	0,33	0,33	0,32	0,31	0,30	0,29	0,29	0,26
2	0,27	0,30	0,31	0,31	0,31	0,33	0,33	0,33	0,33	0,32	0,30	0,31	0,30	0,30	0,26
4	0,30	0,31	0,31	0,31	0,33	0,34	0,33	0,33	0,32	0,32	0,31	0,31	0,31	0,30	0,29
6	0,35	0,34	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,32	0,30	0,31	0,31	0,33	0,33	0,34
8	0,39	0,37	0,34	0,33	0,33	0,33	0,32	0,33	0,31	0,30	0,30	0,31	0,34	0,37	0,39
10	0,43	0,38	0,35	0,33	0,33	0,31	0,32	0,33	0,31	0,29	0,30	0,31	0,34	0,38	0,42
12	0,42	0,37	0,35	0,33	0,31	0,31	0,31	0,32	0,30	0,27	0,30	0,31	0,34	0,37	0,42
14	0,37	0,33	0,31	0,30	0,29	0,30	0,30	0,31	0,27	0,26	0,27	0,29	0,30	0,33	0,35

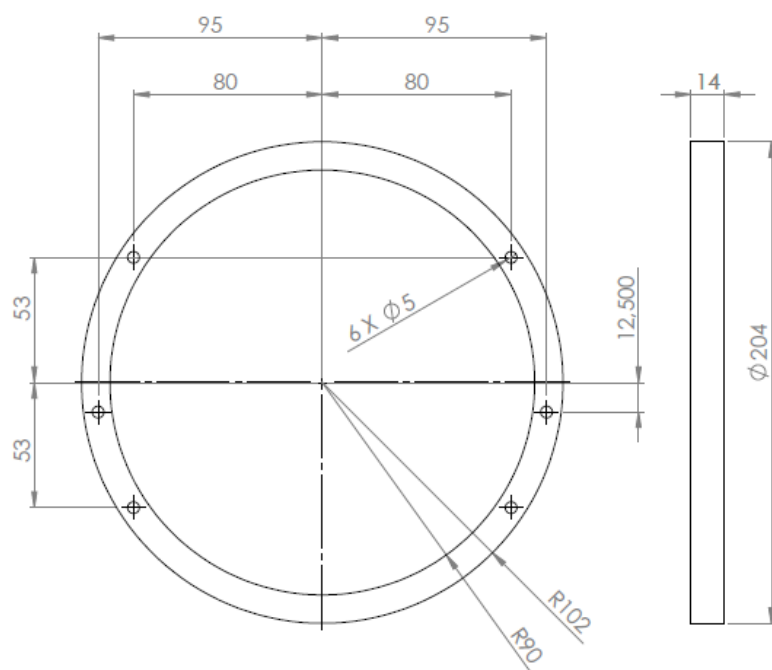
Příloha 1-2 Magnetické pole v rovině osy Helmholtzových cívek pro $I = 3 \text{ A}$; hodnoty jsou uvedeny v mT

x [cm]	-14	-12	-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10	12	14
y [cm]															
-14	1,09	1,01	0,96	0,93	0,90	0,88	0,86	0,86	0,88	0,88	0,90	0,94	1,00	1,04	1,13
-12	1,29	1,13	1,05	1,00	0,96	0,94	0,93	0,92	0,93	0,94	0,98	1,00	1,06	1,14	1,28
-10	1,33	1,17	1,08	1,04	1,00	0,97	0,97	0,96	0,97	0,97	1,00	1,04	1,09	1,17	1,32
-8	1,24	1,14	1,08	1,02	1,01	0,98	0,98	0,98	1,00	1,00	1,00	1,04	1,08	1,13	1,20
-6	1,08	1,06	1,04	1,01	1,01	1,01	0,98	0,98	1,00	1,00	1,00	1,02	1,04	1,06	1,08
-4	0,94	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,94
-2	0,86	0,93	0,97	0,98	0,98	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,96	0,93	0,86
0	0,84	0,92	0,96	0,97	0,98	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,96	0,92	0,85
2	0,86	0,93	0,96	0,98	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,98	0,94	0,88
4	0,96	0,96	1,01	1,00	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,00	0,96
6	1,08	1,08	1,05	1,02	1,01	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,04	1,05	1,08	1,10
8	1,22	1,16	1,08	1,04	1,02	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,02	1,05	1,09	1,16	1,25
10	1,33	1,18	1,08	1,04	1,00	0,97	0,98	0,98	0,97	0,98	1,01	1,04	1,09	1,18	1,35
12	1,28	1,13	1,05	1,00	0,96	0,93	0,93	0,93	0,93	0,94	0,96	1,00	1,05	1,12	1,25
14	1,14	1,04	0,97	0,93	0,92	0,89	0,86	0,86	0,88	0,88	0,90	0,92	0,97	1,00	1,06

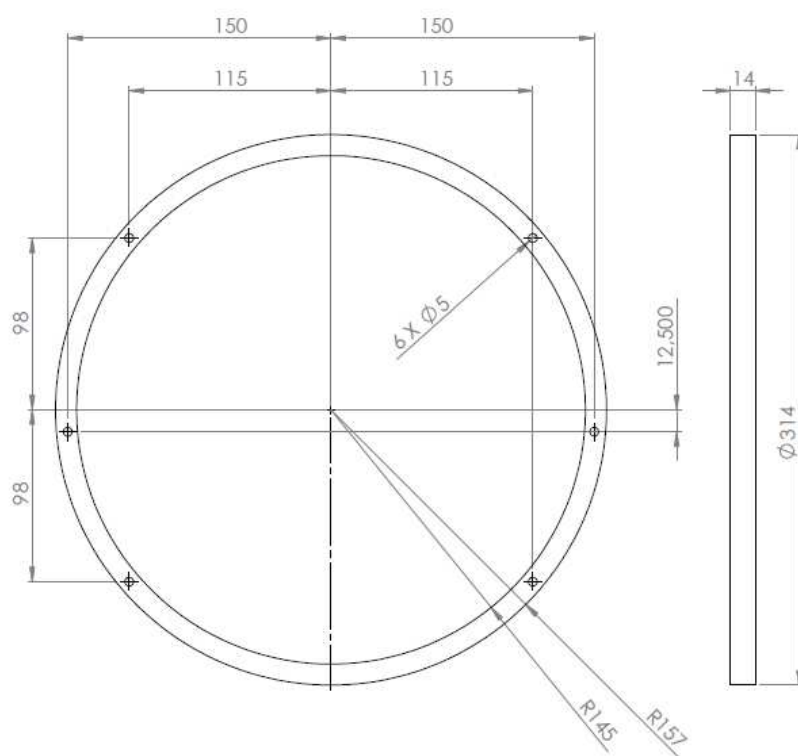
Příloha 1-3 Magnetické pole v rovině osy Helmholtzových cívek pro $I = 5$ A; hodnoty jsou uvedeny v mT

x [cm]	-14	-12	-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10	12	14
y [cm]															
-14	1,91	1,79	1,68	1,58	1,56	1,54	1,52	1,52	1,53	1,50	1,58	1,60	1,68	1,79	1,92
-12	2,20	1,96	1,81	1,69	1,68	1,64	1,61	1,61	1,60	1,58	1,67	1,72	1,81	1,96	2,21
-10	2,27	2,04	1,88	1,77	1,73	1,69	1,68	1,68	1,65	1,67	1,73	1,79	1,87	2,00	2,25
-8	2,08	1,97	1,87	1,79	1,75	1,72	1,71	1,71	1,71	1,69	1,75	1,79	1,84	1,93	2,07
-6	1,83	1,83	1,80	1,76	1,76	1,73	1,72	1,72	1,72	1,69	1,73	1,77	1,79	1,81	1,83
-4	1,61	1,71	1,73	1,73	1,73	1,73	1,72	1,72	1,72	1,69	1,73	1,73	1,71	1,67	1,62
-2	1,49	1,62	1,67	1,69	1,71	1,73	1,72	1,72	1,72	1,69	1,72	1,71	1,65	1,60	1,49
0	1,45	1,58	1,64	1,68	1,71	1,72	1,72	1,72	1,72	1,69	1,72	1,69	1,64	1,58	1,45
2	1,49	1,61	1,68	1,71	1,71	1,72	1,72	1,72	1,72	1,69	1,72	1,71	1,67	1,61	1,50
4	1,64	1,71	1,73	1,73	1,73	1,73	1,72	1,72	1,72	1,69	1,73	1,75	1,73	1,76	1,67
6	1,87	1,85	1,81	1,77	1,75	1,73	1,72	1,72	1,72	1,71	1,75	1,77	1,80	1,84	1,88
8	2,12	1,97	1,87	1,80	1,75	1,72	1,71	1,71	1,69	1,69	1,75	1,79	1,85	1,96	2,12
10	2,28	2,04	1,89	1,77	1,73	1,69	1,68	1,65	1,65	1,65	1,72	1,79	1,87	2,04	2,25
12	2,19	1,97	1,83	1,72	1,67	1,61	1,61	1,58	1,58	1,60	1,64	1,71	1,79	1,95	2,15
14	1,89	1,79	1,68	1,60	1,56	1,54	1,52	1,50	1,49	1,50	1,54	1,60	1,64	1,76	1,84

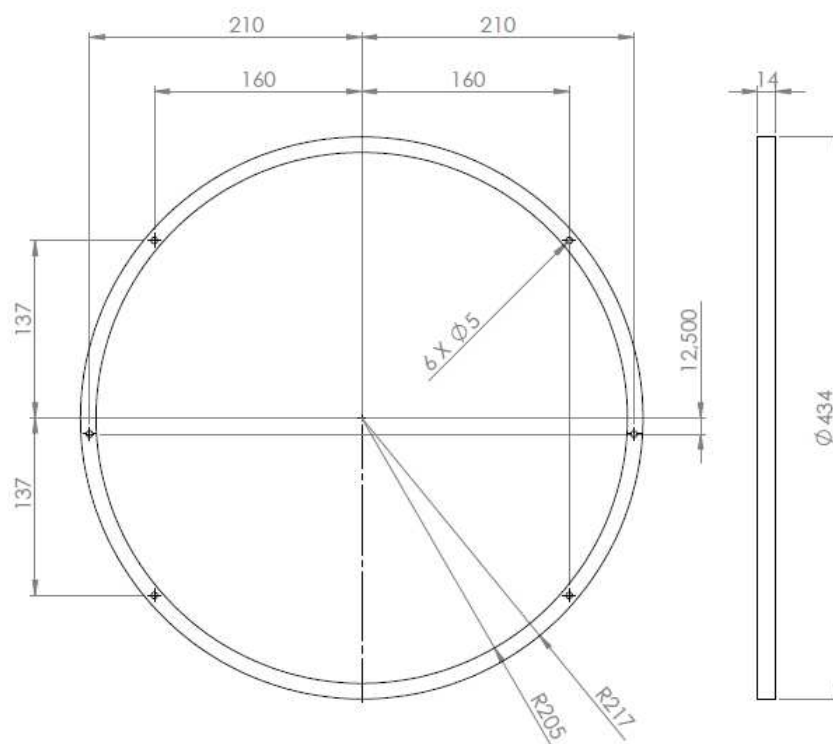
Příloha 2-1 Konstrukční výkres - jádro malé



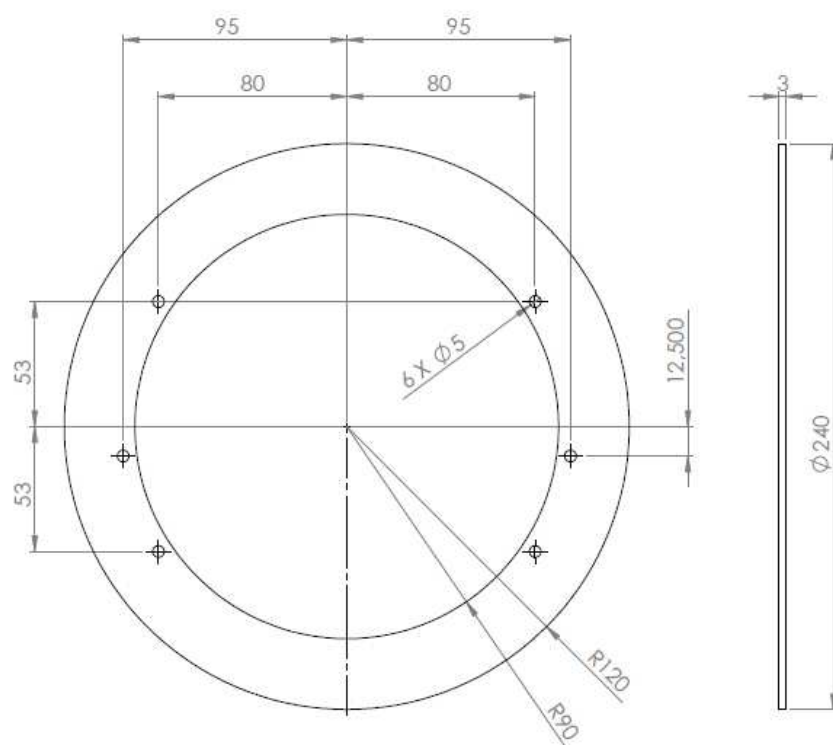
Příloha 2-2 Konstrukční výkres - jádro střední



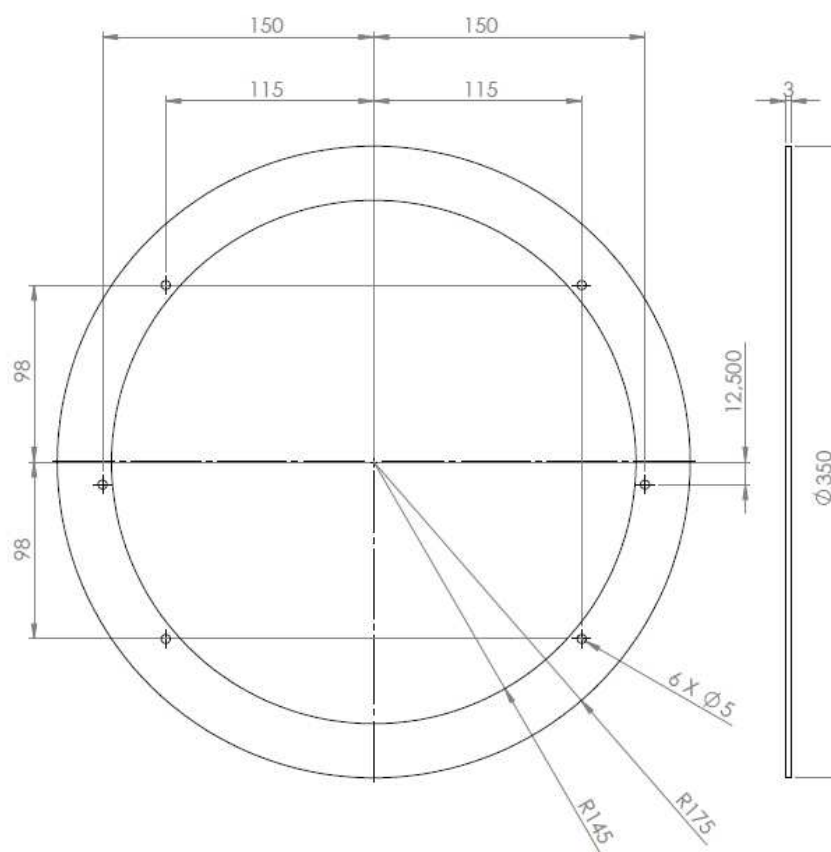
Příloha 2-3 Konstrukční výkres - jádro velké



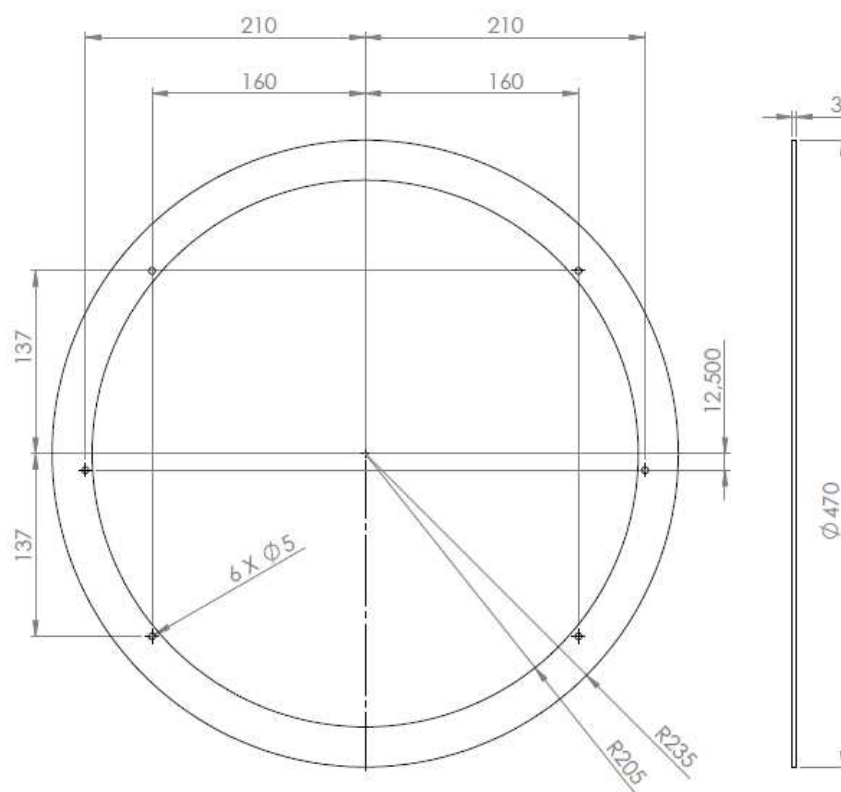
Příloha 2-4 Konstrukční výkres - kostra malá



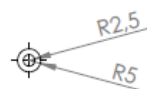
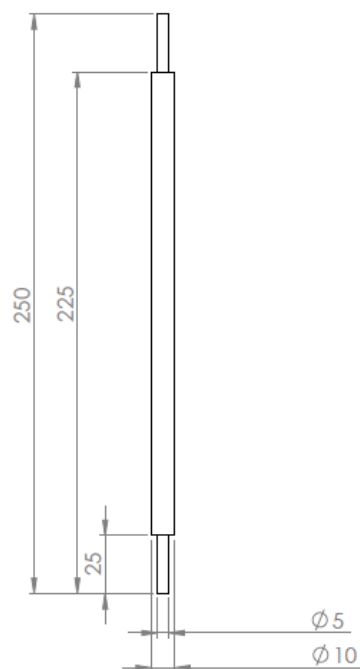
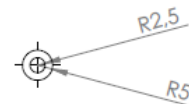
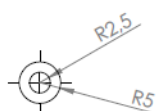
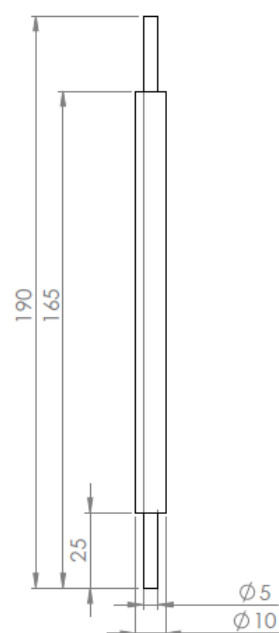
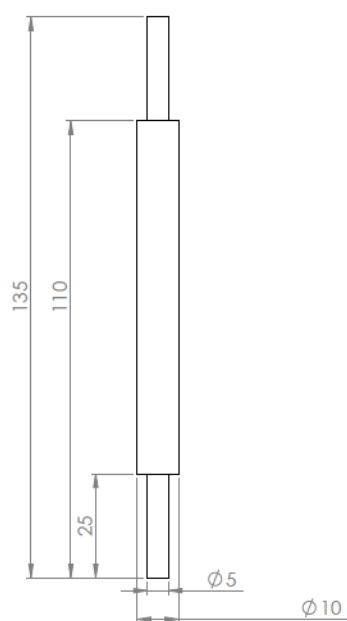
Příloha 2-5 Konstrukční výkres - kostra střední



Příloha 2-6 Konstrukční výkres - kostra velká



Příloha 2-7 Konstrukční výkres - spojovací tyčky



Příloha 2-8 Konstrukční výkres - stojánek

Příloha 2-9 Model tříosých Helmholtzových cívek

