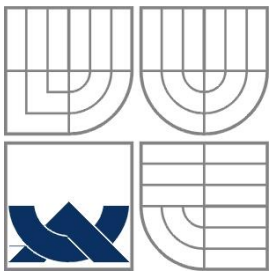
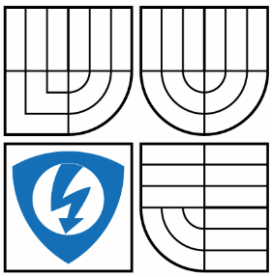


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

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

KVANTIFIKACE NEJISTOT MĚŘENÍ MAGNETICKÝCH VELIČIN

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PAVOL ŠLICHTA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MARIE HAVLÍKOVÁ, Ph.D.

BRNO 2016

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Kybernetika, automatizace a měření**
Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Pavol Šlichta ***ID:*** 146111
Ročník: 2 ***Akademický rok:*** 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Kvantifikace nejistot měření magnetických veličin

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vypracujte literární rešerši v oblasti stanovení nejistot přímých a nepřímých měření.
2. Vypracujte literární rešerši v oblasti snímačů magnetického pole.
3. Popište principy měření magnetických polí a navrhněte experimentální pracoviště pro měření magnetických veličin v jednoosé Helmholtzově cívce s ohledem na dostupné vybavení laboratoří UAMT.
4. Sestavte model měření, popište významné zdroje nejistot daných měření a vypracujte postup pro kvantifikaci nejistot měření magnetické indukce cívky klasickým postupem pomocí GUM.
5. Na základě sestaveného modelu měření realizujte experimentální měření a stanovte nejistoty měření.
6. Dosažené výsledky diskutujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Patočka, M., Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice, 1. vyd., VUTIUM, Brno, 2011, 564 s., ISBN: 978-80-214-4003-6.

[2] Boll, R., Overshott, K.J., Magnetic Sensors, Sensors: A Comprehensive Survey, Volume 5, VCH Weinheim, 1989, p. 513, ISBN: 3-527-26771-9.

Termín zadání: 8.2.2016 ***Termín odevzdání:*** 16.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Marie Havlíková, Ph.D.
Konzultant diplomové práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc., *předseda oborové rady*

UPOZORNĚNÍ:
Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být 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.

Abstrakt

Táto diplomová práca obsahuje prehľad stanovenia neistôt merania priamych a nepriamych meraní. Popisuje spôsob vytvorenia magnetického poľa pomocou Helmholtzovej cievky a bližší popis niektorých princípov snímačov magnetického poľa. V práci sa taktiež nachádza popis experimentov a vplyvy pôsobiace na tieto experimenty. Záverečná časť sa zaoberá kvantifikáciou neistôt meraných experimentov a diskusiou výsledkov týchto meraní.

Klíčová slova

neistoty merania, Helmholtzova cievka, magnetické snímače, fluxgate snímače, Hallov jav ,Hallove snímače, AMR snímače, GMR snímače, TMR snímače, magneto-optické snímače, NMR snímače, ESR snímače, etalóny magnetického poľa

Abstract

This Master's thesis contains an overview of determining measurement uncertainties of direct and indirect measurements. It describes a way of creating a magnetic field with the help of Helmholtz coil and a more detailed description of some principles of magnetic field sensors. This thesis also contains a description of the experiments and the factors influencing them. The last part deals with the quantification of uncertainties from measured experiments and with the discussion of the results from these measurements.

Keywords

measurement uncertainty, Helmholtz coil, magnetic sensors, fluxgate sensors, Hall efect, Hall effect sensors, AMR sensors, GMR sensors, TMR sensors, magneto-optic sensors, NMR sensors, ESR sensors, etalon of the magnetic unit

Bibliografická citácia:

ŠLICHTA, P. *Kvantifikace nejistot měření magnetických veličin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 87s. Vedoucí diplomové práce byla Ing. Marie Havlíková, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Kvantifikace nejistot měření magnetických veličin jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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: **16. května 2016** ……

podpis autora

Poďakovanie

Predovšetkým sa chcem poďakovať vedúcej diplomovej práce Ing. Marie Havlíková, Ph.D. a pánovi Ing. Jiřímu Fialkovi, Ph.D. za množstvo času, ktoré mi venovali pri odpovedaní odborné a aj praktické otázky spojené s diplomovou prácou, za ich odborné vedenie, pripomienky, návrhy a trpezlivosť. V neposlednom rade patrí veľká vďaka mojej rodine a priateľom za ich neustálu morálnu podporu.

V Brně dne: **16. května 2016** ……

podpis autora

Obsah

1 Úvod 10
2 Chyby merania 11
2.1 Absolútna chyba merania 11
2.2 Relatívna chyba merania 11
2.3 Rozdelenie chýb 11
2.3.1 Chyby systematické 12
2.3.2 Náhodné chyby 12
2.3.3 Hrubé chyby 13
2.3.4 Výsledná chyba 13
3 Neistoty merania 14
3.1 Zákon šírenia neistôt 14
3.2 Neistoty merania priamych meraní 15
3.2.1 Problematika odhadu a stanovenia zložiek neistôt merania podľa GUM 16
3.2.2 Vyhodnotenie štandardnej neistoty typu A 17
3.2.3 Vyhodnotenie štandardnej neistoty typu B 18
3.2.4 Štandardná kombinovaná neistota 21
3.2.5 Rozšírená neistota 21
3.3 Neistoty merania nepriamych meraní 22
3.3.1 Vyhodnotenie štandardnej neistoty typu A výstupného odhadu 23
3.3.2 Vyhodnotenie štandardnej neistoty typu B výstupného odhadu 24
3.3.3 Štandardná kombinovaná neistota 25
3.4 Zdroje neistôt 26
4 Magnetizmus 27
4.1 Helmholtzove cievky 28
4.2 Snímače magnetického poľa 30
4.2.1 Fluxgate (feromagnetické) snímače 31
4.2.2 Hallove snímače 33
4.2.3 AMR snímače 34
4.2.4 GMR (Giant Magneto Resistence effect) snímače 37
4.2.5 TMR (Tunnel Magneto Resistance) snímače 38
4.2.6 Snímače založené na Magneto-optických princípoch 39
4.2.7 Snímače založené na magnetických rezonančných princípoch 40
4.3 Etalóny magnetického poľa 41

5 Praktická časť 42
5.1 Meranie homogenity magnetického poľa Helmholtzovej cievky 42
5.1.1 Rozmery Helmholtzovej cievky 42
5.1.2 Schéma zapojenia experimentu 43
5.1.3 Postup pri meraní experimentu 44
5.1.4 Model magnetického poľa cievky 46
5.1.5 Významné vplyvy ovplyvňujúce experiment 48
5.2 Ovplyvnenie magnetického poľa cievky externým zdrojom magnetického poľa 49
5.2.1 Schéma zapojenia experimentu 49
5.2.2 Postup pri meraní experimentu 50
5.2.3 Významné vplyvy ovplyvňujúce experiment 51
5.3 Teplota cievky ovplyvňujúca veľkosť prúdu a magnetického poľa 51
5.3.1 Schéma zapojenia experimentu 51
5.3.2 Postup pri meraní experimentu 52
5.3.3 Významné vplyvy ovplyvňujúce experiment 53
5.4 Teplota cievky vplývajúca na veľkosť magnetického poľa pri konštantnom prúde 54
5.4.1 Schéma zapojenia experimentu 55
5.4.2 Postup pri meraní experimentu 55
5.5 Veľkosť zmeny magnetického poľa v závislosti na zmene veľkosti prúdu 56
5.5.1 Schéma zapojenia experimentu 56
5.5.2 Postup pri meraní experimentu 57
5.5.3 Významné vplyvy ovplyvňujúce experiment 57
5.6 Meranie magnetického poľa klimatickej komory 58
5.6.1 Zapojenie experimentu 58
5.6.2 Postup pri meraní experimentu 58
5.6.3 Významné vplyvy ovplyvňujúce meranie 59
6 Meranie vlastností magnetických snímačov 60
6.1 Schéma zapojenia experimentov 60
6.2 Meranie veľkých magnetických polí 61
6.2.1 Postup pri meraní experimentov 62
6.2.2 Úvod do neistôt 63
6.2.3 Výpočet neistôt 64
6.2.4 Výpočet neistoty prúdu 64
6.2.5 Výpočet neistoty referenčného prístroja 65
6.2.6 Výpočet linearity snímačov 66

6.3 Meranie malých magnetických polí 67
6.3.1 Výpočet neistoty prúdu 68
6.3.2 Výpočet neistoty referenčného prístroja 68
6.3.3 Výpočet linearity a neistoty snímača 69
6.4 Diskusia výsledkov 71
7 Záver 73
Literatúra 75
Zoznam skratiek a symbolov 78
Zoznam príloh 80

1 ÚVOD

Okolný svet je veľmi komplikovaný a prístroje nedokážu odmerať veličinu úplne presne. Chyby merania a neistoty v meraní predstavujú dôležitý problém pri výskume a poznávaní sveta. Preto je treba sa s nimi zaoberať a navrhovať riešenia ako ich eliminovať. Cieľom tejto práce je navrhnúť experimenty a ich praktickú realizáciu. Zistiť aké odchýlky vznikajú a aké sú veľké. Snímače magnetického poľa pracujúce na rôznych princípoch majú rôzne výhody a nevýhody. Napríklad pri snímačoch pracujúcich na princípe Hallovho javu vplýva na meranú hodnotu výrazne teplota, ktorá ovplyvňuje offset snímača. Magnetorezistenčné snímače AMR sa pri začiatkoch vývoja výpočtovej techniky používali ako čítacie hlavy harddiskov.

Cieľom tejto práce je návrh experimentov merania magnetických polí a ich následná praktická realizácia, ktorá v sebe zahŕňa výpočet neistôt týchto meraní. Práca je rozdelená na teoretickú a praktickú časť. V teoretickej časti najprv predstavíme rôzne typy chýb merania a následne neistoty priamych a nepriamych meraní. Nakoniec budú vysvetlené princípy, na ktorých sú založené rôzne druhy magnetických snímačov. V praktickej časti budú najprv popísané experimenty zaoberajúce sa homogenitou vytvoreného magnetického poľa pomocou Helmholtzovej cievky a závislosť vplyvu teploty a prúdu na veľkosť meraného magnetického poľa. Následne budú merané rôzne prístroje aj snímače, ktorých výsledky budú vyhodnotené na základe stanovených neistôt meraní. V závere práce budú vyhodnotené výsledky meraní snímačov magnetického poľa a porovnanie meraných snímačov.

2 CHYBY MERANIA

V praxi sa nedá povedať o žiadnom meraní, že je úplne presné. Každé meranie je ovplyvnené prostredím, meraným objektom, obsluhou a ďalšími faktormi. Tieto negatívne vplyvy ovplyvňujú výsledok merania, ktorý nezobrazuje skutočnú hodnotu merania, ale iba približnú hodnotu blízku skutočnej. Výsledok merania (*nameraná hodnota*) sa pohybuje v istom intervale, v ktorom sa nachádza *skutočná hodnota* merania. Z fyzikálnych príčin nedokážeme zistiť skutočnú hodnotu, a preto ju nahradzujeme hodnotou *konvenčne pravou*. Konvenčne pravá hodnota je natoľko blízka ku skutočnej, že rozdiel medzi nimi je zanedbateľný.
Vyjadrenie chýb poznáme v dvoch hodnotách a to v absolútnej a relatívnej. [1] [2] [3]

2.1 Absolútna chyba merania

Absolútna chyba merania sa označuje ako Δ_x a vypočítame ju ako rozdiel medzi hodnotou nameranou x_m a konvenčne pravou x_s . [1] [2] [3]

$$\Delta_x = x_m - x_s \tag{2.1}$$

2.2 Relatívna chyba merania

Ak podelíme absolútnu chybu skutočnou hodnotou, tak získame pomerné
vyjadrenie chyby. Takto vzniknutú chybu nazývame chyba relatívna a označujeme ju δ_x . [1] [2] [3]

$$\delta_x = \frac{\Delta_x}{x_s} = \frac{x_m - x_s}{x_s} \tag{2.2}$$

V praxi sa väčšinou vyjadruje v percentách:

$$\delta_x = \frac{\Delta_x}{x_s}.100 \quad [\%] \tag{2.3}$$

2.3 Rozdelenie chýb

Chyby merania dokážeme rozdeliť podľa ich pôsobenia na výsledok merania ako [2]

- chyby systematické,
- chyby náhodné,
- chyby hrubé.

2.3.1 Chyby systematické

Vplývajú na výsledok merania určitým spôsobom a s istou pravidelnosťou. Tieto vplyvy sa prejavujú trvale zvýšenou alebo trvale zníženou hodnotou, ako je hodnota konvenčne pravá. Príčinou takto vzniknutej chyby je obvykle zle zvolená meracia metóda, zvolený merací prístroj a osoba vykonávajúca meranie. Na stanovenie systematickej chyby je postačujúci vzťah (2.1). Z hľadiska užívateľa sú tieto chyby žiadúce z dôvodu ich jednoduchšieho určenia a ich vplyv sa dá zmenšiť vhodne zvolenou kompenzáciou. Najčastejšími typmi systematických chýb sú chyby metódy, chyba nuly a chyba zosilnenia. [2][4]

2.3.2 Náhodné chyby

Tento druh chyby sa dosť odlišuje od chyby systematickej. Ak vylúčime pôsobenie systematických chýb a meriame opakovane rovnakú veličinu za rovnakých podmienok, tak zistíme, že hodnoty tejto veličiny sa v každom meraní líšia a mení sa aj znamienko meranej veličiny, čo zodpovedá predpokladanému zákonu rozdelenia pravdepodobnosti. Príčinu týchto chýb nedokážeme presne určiť, pretože môžu byť spôsobené rôznymi vplyvmi, napr. malými časovými zmenami okolitých podmienok počas merania (t. j. teploty, tlaku, vlhkosti, elektromagnetických veličín atď.). Na určenie ich veľkosti sa používa opakované meranie s použitím statických metód zodpovedajúcich patričnému pravdepodobnostnému modelu, reprezentovaného zákonom rozdelenia príslušnej náhodnej chyby. Výsledok merania určený zo súboru opakovaných meraní realizovaných za rovnakých podmienok, dokážeme vypočítať, ako aritmetický priemer získaný priemerom pri n opakovaniach z hodnôt $x_1,\ x_2,\ \dots x_i,\ \dots x_n$, tj. [1][2][4]

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{2.4}$$

Náhodnú chybu v klasickej teórii chýb najčastejšie zastupuje smerodajná odchýlka výberového súboru $s(x)$, menej často smerodajná odchýlka aritmetického priemeru $s(\bar{x})$, ktoré môžeme získať podľa nasledujúcich vzťahov:

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta^2(\mathrm{x}_i)}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\mathrm{x}_i - \bar{x})^2}{n-1}} \tag{2.5}$$

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\mathrm{x}_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \tag{2.6}$$

Obidve smerodajné odchýlky vystihujú chovanie rozptýlenia výsledku (presnosti) merania náhodnej chyby. Z pravdepodobnostného hľadiska dokážeme popísať správanie týchto chýb a vo výsledku ich hodnotíme neistotou. [1][2][3]

2.3.3 Hrubé chyby

Hrubé chyby nedokážeme žiadnym spôsobom identifikovať, pretože sú nevyspytateľné. V prípadoch, keď sa namerané hodnoty výrazne líšia od rady meraných hodnôt, tak nie je možné v meraní pokračovať. Tieto odlišné hodnoty znehodnotia celé meranie a je potrebné toto meranie zopakovať. Chyba takéhoto druhu môže vzniknúť poruchou meracieho prístroja, zle zvolenou metódou merania, nevhodnými podmienkami pri meraní, atď. [1][2][3]

2.3.4 Výsledná chyba

Vyššie spomenuté chyby môžeme vyjadriť vzorcom, v ktorom je daná výsledná chyba súčtom systematickej zložky e a náhodnej zložky ε. Tento súčet je vyjadrený nasledujúcim vzorcom

$$\Delta(\mathrm{x}) = |e| + |\varepsilon| \tag{2.7}$$

a jej maximálnu hodnotu je možné odhadnúť ako

$$\Delta(\mathrm{x}) = (\bar{x} - x_s) + 2s \tag{2.8}$$

kde je systematická zložka $e = \bar{x} - x_s$ a náhodná zložka je $\varepsilon = s$, prípadne $\varepsilon = 2s$. Pravdepodobnosť pokrytia súvisí so súčiniteľom rozšírenia smerodajnej odchýlky a typom rozdelenia. [1][2][3]

Všetky chyby merania, ktoré sa v meracom procese nachádzajú, istým spôsobom znehodnocujú meranie. Existujú rôzne zdroje neistôt napríklad chyba prístroja. Táto chyba môže vzniknúť časovým intervalom používania prístroja (starnutie). Prístroj sa rôzne správa pri rozdielnych atmosférických podmienkach. Existuje veľa ďalších chýb, ktoré stoja za zmienenie, ako chyba metódy, pozorovania a vyhodnocovania, atď. [1][2][3]

3 NEISTOTY MERANIA

Neexistuje žiadne meranie, ktoré je vo svojej podstate úplne správne. Ak vynecháme skutočnosť, že predmet nášho skúmania sa mení už tým, že sa ho pokúšame pozorovať (tzn. aj merať), potom je potrebné vziať do úvahy mnoho pôsobiacich vplyvov (z pohľadu pozorovateľa vnútorných aj vonkajších), ktoré sa pri prebiehajúcom meracom procese prejavujú formou odchýlky medzi nameranou hodnotou meranej veličiny a jej pravou hodnotou. Výsledok merania sa potom v závislosti na použitej meracej metóde a použitom meradle pohybuje v určitom intervale okolo pravej hodnoty. Vyššie spomenuté fakty platia za podmienky, ak sa nám podarilo odstrániť pôsobenie najdôležitejších zdrojov systematických chýb. Pri nedostatočnom odstránení týchto chýb by sa pravá meraná hodnota mohla značne odlišovať. Interval, ktorý je potom možné priradiť k danej hodnote meranej veličiny, nazývame neistotou merania a podľa GUM má byť tento interval viazaný na číselne danú hodnotu pravdepodobnosti pokrytia neznámej pravej hodnoty týmto intervalom. [6]

Neistota merania je v súlade s GUM a VIM definovaná ako:
„Parameter pridružený k výsledku merania, ktorý charakterizuje rozptýlenie hodnôt, ktoré by mohli byť dôvodne prisudzované k meranej veličine.“

Je potrebné počítať s tým, že neistota merania je spôsobená radom vplyvov, ktoré sa na nej podieľajú. Tieto vplyvy sú zložky neistôt merania, ktoré majú podiel na výslednej neistote daného merania. [6]

3.1 Zákon šírenia neistôt

V prípade, ak nás zaujíma jedna veličina Y (výstupná veličina), ktorá je funkciou m veličín $X_1, X_2, \dots, X_m$ (vstupné veličiny), ktorých odhad, neistoty aj kovariancie poznáme a sú v tvare

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_m) \tag{3.1}$$

(f je známa funkcia), tak je možné určiť odhad y výstupnej veličiny Y zo vzťahu

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m) \tag{3.2}$$

kde

$x_1, x_2, \dots, x_m$ - sú odhady vstupných veličín $X_1, X_2, \dots, X_m$

Neistotu odhadu y veličiny Y v prípade, že odhady $x_1, x_2, \dots, x_m$ sú nekorelované (nie sú na sebe vzájomne závislé), určíme zo vzťahu (ak funkciu f môžeme linearizovať rozvojom do Taylorovho radu a zanedbaním vyšších členov)

$$u^2(\mathrm{y}) = \sum_{i=1}^{m} A_i^2 u^2(x_i) \tag{3.3}$$

kde
$u^2(\mathrm{y})$ - neistota odhadu y výstupnej veličiny Y,
$u^2(\mathrm{x}_i)$ - neistota odhadov x vstupných veličín X.

a A_i^2 sú koeficienty (citlivostné, prevodové), a platí pre ne vzťah:

$$A_i = \left.\frac{\partial f(X_1, X_2, \dots, X_m)}{\partial X_i}\right|_{X_1 = x_1, \dots, X_m = x_m} \tag{3.4}$$

V prípade ak sú odhady $x_1, x_2, \dots, x_m$ korelované, tak je potrebné uvažovať aj o kovariancii medzi jednotlivými odhadmi, ktoré tvoria ďalšie zložky výslednej neistoty. Kovariancia vyjadruje vzájomnú väzbu medzi odhadmi x vstupných veličín X. Kovariancie medzi odhadmi jednotlivých veličín určujú, ako sú vzájomne tieto odhady ovplyvnené spoločnými zdrojmi neistôt. Výslednú hodnotu neistoty môžu kovariancie zväčšiť, ale aj zmenšiť. Veľkosť vplyvu závisí od ich charakteru (či zdroje pôsobia súhlasne alebo nesúhlasne na dva uvažované odhady) a tiež od tvaru funkcie, ktorou sú viazané na výstupnú veličinu. Veľkosť neistoty pre korelované vstupné veličiny určíme z nasledujúceho vzorca

$$u^2(\mathrm{y}) = \sum_{i=1}^{m} A_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=2}^{m} \sum_{j<i}^{m-1} A_i A_j u(x_{i,j}) \tag{3.5}$$

A_i, A_j - koeficienty citlivosti jednotlivých odhadov podľa vzorca (3.4)

kde $u(x_{i,j})$ je kovariancia medzi korelovanými odhadmi x_i a x_j, ktorú určíme zo vzťahu

$$r(x_{i,j}) = \frac{u(x_{i,j})}{u(x_i)u(x_j)} \tag{3.6}$$

kde
$r(x_{i,j})$ - je Pearsonov korelační koeficient medzi odhadmi x_i, x_j,
$u(x_i)$ resp. $u(x_j)$ - sú neistoty odhadov x_i a x_j.
Korelačný koeficient vyjadruje mieru stochastickej závislosti odhadov x_i a x_j a môže nadobúdať hodnoty od -1 do +1. Pre silnú závislosť sa $r(x_{i,j})$ blíži k hodnote +1 alebo -1. Pre nezávislé odhady sa $r = 0$. [2][3][8]

3.2 Neistoty merania priamych meraní

Priame meranie je jeden zo spôsobov získania meranej veličiny a znamená meranie veličiny priamo prostredníctvom rovnakej veličiny. Priame merania sa rozdeľujú na:

- porovnávacie (komparačné) - priame porovnávanie veličín rovnakého druhu,

- vyrovnávacie (kompenzačné) - účinok je vyrovnaný, vyvážený, veličinou rovnakého druhu; veľmi často sa tento druh merania využíva v elektrotechnike ako mostíkové metódy,
- nahradzovanie (substitučné) - účinok veličiny je nahradený inými známymi hodnotami tej istej veličiny, napr. koncové mierky pri meraní dĺžok a iné,
- Premiestňovacie (transpozičné) - jedná sa o postupné premiestňovanie meranej veličiny a známych hodnôt tej istej veličiny, napr. váženie. [2]

3.2.1 Problematika odhadu a stanovenia zložiek neistôt merania podľa GUM

Klasický prístup k odhadu neistôt merania (prístup GUM) vychádza z nasledujúcich základných pravidiel:

- všetky zložky neistoty sú vyjadrené formou smerodajnej odchýlky,
- predpokladá sa, že všetky odchýlky (systematické chyby) sú korigované a prípadné neistoty v súvislosti s týmito systematickými chybami sú neistotou týchto korekcií,
- nulové korekcie sú možné, iba ak príslušné odchýlky (systematickej chyby) nemôžu byť korigované a potom musí byť stanovená neistota s nimi spojená,
- všetky intervaly neistôt musia byť symetrické.

Ako bolo uvedené v kapitole 3.1, tak sa neistota skladá z niekoľkých čiastkových neistôt (zložiek). Zložky, z ktorých sa skladá neistota:

- štandardná neistota - neistota výsledku merania vyjadrená ako smerodajná odchýlka,
- vyhodnotenie neistoty postupom A - metóda hodnotenia neistoty pomocou štatistickej analýzy série pozorovaní,
- vyhodnotenie neistoty postupom B - metóda hodnotenia neistoty pomocou iných spôsobov než je statická analýza rady pozorovaní; niekedy sa neistoty vyhodnocované postupom A stručne označujú ako neistoty typu A, obdobne neistoty získané postupom B ako neistoty typu B,
- kombinovaná štandardná neistota - štandardná neistota výsledku merania, ak je výsledok získaný z hodnôt niekoľkých ďalších veličín rovnajúci sa kladnej hodnote druhej odmocniny súčtu výrazov; kde výrazy sú rozptyly alebo kovariancie týchto ďalších veličín vážených podľa toho, ako sa výsledok merania mení v závislosti na zmenách týchto veličín,
- rozšírená neistota - je veličina stanovujúca interval okolo výsledku merania, ktorý dovoľuje očakávať pokrytie veľkého podielu rozdelenia hodnôt, ktoré môžu byť dôvodne priradené k meranej veličine,

- činiteľ rozšírenia - je číselná hodnota činiteľa, používaná ako násobok kombinovanej štandardnej neistoty k získaniu rozšírenej neistoty; činiteľ rozšírenia k je obvykle číslo, ktoré sa nachádza v rozsahu od 2 do 3. [2][3][6][7]

3.2.2 Vyhodnotenie štandardnej neistoty typu A

Výpočet štandardnej neistoty typu A pokrýva náhodné chyby aj odchýlky (systematické chyby). Vyhodnocovanie danej neistoty je založené na štatistickej analýze dát opakovanej sérii meraní. Ak je n nezávislých rovnako presných pozorovaní (n>1), tak bude odhad výslednej hodnoty x prezentovaný hodnotou výberového priemeru (aritmetického priemeru), vypočítaného rovnako ako v prípade chýb, t. j. podľa vzťahu (2.4). Neistota príslušná k odhadu x sa určí ako smerodajná odchýlka tejto výslednej hodnoty, teda výberového priemeru (2.5). Ak sa na celú situáciu zbežne pozrieme, táto situácia nám pripomína náhodné chyby. Neistota sa tu spravidla značí $u_A(x)$ a s použitím vzťahu (2.6) je možné napísať

$$\mathrm{u}_A(x) = s(\bar{x}) = \frac{s\,(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \tag{3.7}$$

kde
$\mathrm{u}_A(x)$ - štandardná neistota typu A,
$s(\bar{x})$ - smerodajná odchýlka aritmetického priemeru,
n - počet meraní,
x_i - i-tá nameraná hodnota,
$\bar{x}$ - aritmetický priemer.

Táto neistota je spôsobená kolísaním nameraných údajov. V prípade malého počtu meraní (n<10) je hodnota určená pomocou vzťahu (3.1) málo spoľahlivá. Počet opakovaní merania n by mal byť čo najväčší. Ak nie je počet meraní dostatočný tzn. (n<10), tak je potrebné vykonať doplnkovú korekciu neistoty podľa nasledujúceho vzorca

$$\mathrm{u}_A(x) = k_s . s_{\bar{x}} \tag{3.8}$$

kde
$\mathrm{u}_A(x)$ - štandardná neistota typu A,
k_s - koeficient závislí na počte meraní, viď tabuľka číslo 1,
$s_{\bar{x}}$ - smerodajná odchýlka aritmetického priemeru, vzorec (3.1),
n- počet meraní.

Tab. 1) Závislosť koeficientu $\boldsymbol{k_s}$ na počte meraní $\boldsymbol{n}$ [5]

$\boldsymbol{n}$	2	3	4	5	6	7	8	9
$\boldsymbol{k_s}$	7	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2

Pre jedno meranie (n = 1) alebo ak sa hodnota x nemení, nie je možné stanoviť neistotu typu A. Ak sa v systéme nachádza výrazná hysterézia, taktiež nie je vhodné neistotu typu A určovať. Pri meraní je dôležité, aby sa meraná veličina v priebehu opakovaných meraní nemenila. Ak nie je možné zaručiť spomínané podmienky, tak neistotu A nemá zmysel počítať. [2][3][6][7]

3.2.3 Vyhodnotenie štandardnej neistoty typu B

Tento spôsob vyhodnotenia zložiek neistôt meraní sa dá opäť aplikovať na zložky neistôt meraní, ktoré sú náhodného charakteru, tak aj zložky neistoty merania, ktoré vznikajú na báze odchýlky (systematických chýb). Zdroje neistôt, ktoré sú najčastejšie vyhodnocované neistotou typu B sú metódy hodnotenia neistôt založené na odlišnom princípe ako je statická analýza rady meraní. Tieto zdroje sú:

- meradlá a etalóny kalibrované v iných laboratóriách,
- fyzikálne konštanty používané pri výpočte výslednej uvádzanej hodnote,
- vplyvy prostredia, ktoré sa nedajú štatisticky vyšetriť,
- možné odlišnosti v usporiadaní meradiel a realizácii meracieho procesu,
- nedostatok rozlišovacej schopnosti meradla. [6]

Neistoty zisťované metódou B sú viazané na známe, identifikovateľné a kvantifikovateľné zdroje. Výpočet neistôt typu B vychádza z kvalifikovaného úsudku založeného na všetkých dostupných informáciách o meranej veličine X a jej možných zmenách. Pre určenie zdrojov informácií na zistenie neistoty typu B môžu byť použité nasledovné zdroje:

- výsledky predchádzajúcich meraní;
- skúsenosti a všeobecné znalosti o chovaní meraného objektu, meracích prostriedkoch, meracích metódach a podmienkach merania;
- informácie o meracích prostriedkoch a podmienkach ich použitia získané od výrobcov;
- neistoty referenčných údajov prevzatých z rôznych prameňov.

Záleží na skúsenostiach obsluhy, do akej miery budú získané informácie ocenené a využité, pretože charakter problému neumožňuje detailne špecifikovať jednotný postup.

Rámcový postup pri určovaní neistôt typu B je nasledovný:

1. Vytipujú sa možné zdroje neistôt $z_1, z_2, \dots\ z_i, \dots z_p$.
2. Určí sa štandardná neistota vplyvom každého zdroja rôznymi spôsobmi a to buď prevzatím z certifikátu, technickej dokumentácie, tabuliek, noriem a pod.
3. Posúdi sa korelácia medzi jednotlivými zdrojmi.
4. Je potrebné určiť vzťah medzi veličinou X a jednotlivými zdrojmi $z_1, z_2, \dots\ z_i, \dots z_p$, (charakterizovanými veličinami z_i).

$$X = f(z_1, z_2, \dots\ z_i, \dots z_p) \tag{3.9}$$

5. Výsledná neistota určovaná metódou B pre p zdrojov $(z_1, z_2, \dots\ z_i, \dots z_p)$ vychádza zo zákona šírenia neistôt (vzťah 3.3) sa vypočíta podľa nasledujúceho vzťahu:

$$u_B(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} A_i^2 u_B^2(z_i)} \tag{3.10}$$

kde
$u_B(z_i)$ - neistoty jednotlivých zdrojov,
A_i - koeficienty citlivostí jednotlivých zdrojov, vzorec (3.4).

Ak nie je k dispozícii priamo štandardná neistota príslušného zdroja, môže nastať niekoľko nasledovných situácií.

1. Ak sa v dokumentácii od výrobcu, alebo v iných prameňoch nachádza rozšírená neistota U a koeficient rozšírenia k, potom sa metóda B vyhodnotenia štandardnej neistoty $u_B(z_i)$ z daného zdroja z_i vypočíta pomocou vzťahu:

$$u_B(z_i) = \frac{U}{k} \tag{3.11}$$

2. Ak je známe rozpätie normálneho rozdelenia (dĺžka intervalu 2U), v ktorom sa môže nachádzať nameraná hodnota s istou pravdepodobnosťou (95 %, 99 %, 99,73 %), a je oprávnený predpoklad, že pri určovaní tohto intervalu sa uvažovalo s normovaným normálnym rozdelením, potom sa štandardná neistota $U_B(z_i)$ z daného zdroja z_i vypočíta pomocou vzťahu:

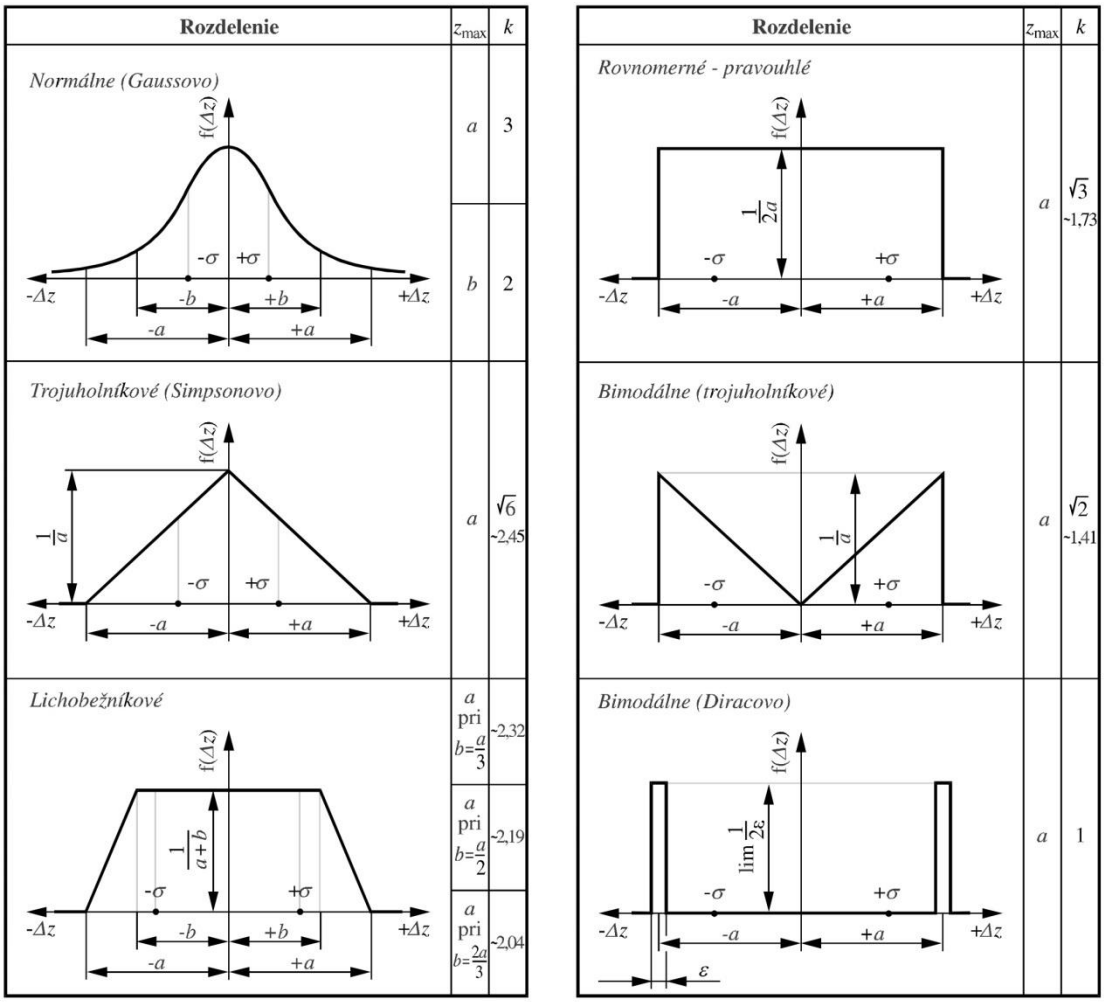
$$u_B(z_i) = \frac{U}{k_p} \tag{3.12}$$

kde k_p je koeficient rozšírenia rovný kvantilu normovaného normálneho rozdelenia pre pravdepodobnosť P (k_p=1,96 pre P=95 %, k_p=2,58 pre P=99 %, k_p=3 pre P=99,73 %).
3. Dokážeme odhadnúť iba hranice , v ktorých sa hodnoty veličiny nachádzajú vplyvom pôsobenia daného zdroja takmer na sto percent. Postup je nasledovný:
- odhadneme rozsah zmien - odchýlok $\pm z_{imax}$ od nominálnej hodnoty veličiny prislúchajúcej uvažovanému zdroju Z_i, ktorej prekročenie je málo pravdepodobné (teda prakticky nemožné),
- posúdime rozdelenie pravdepodobnosti odchýlok v tomto intervale a určíme jeho aproximácie,
- štandardnú neistotu uvažovaného zdroja $u_B(z_i)$ vypočítame pomocou nasledujúceho vzťahu:

$$u_B(z_i) = \frac{z_{imax}}{k} \tag{3.13}$$

kde k je hodnota prislúchajúca zvolenej aproximácii rozdelenia pravdepodobnosti:

- pre normálne rozdelenie (N) $k = 3$ $(k = 2)$,
- pre rovnomerné (pravouhlé) rozdelenie (R) $k = \sqrt{3}$,
- pre trojuholníkové rozdelenie (S) $k = 2{,}45$,
- pre bimodálne rozdelenie (U) $k = 1$.



Obr. 1) Rozdelenia pravdepodobnosti [8]

Aproximácia *normálnym* rozdelením sa používa vtedy, ak sa častejšie môžu vyskytovať odchýlky od nominálnej hodnoty malých hodnôt a s rastúcou hodnotou pravdepodobnosť ich výskytu klesá. Ako príklad môže byť zdroja neistoty môže byť merací prístroj, ktorý je od spoľahlivého výrobcu, pri ktorom sa dá predpokladať, že väčšina prístrojov bude s malými chybami.

Aproximáciu *rovnomerným* rozdelením použijeme vtedy, ak je rovnaká pravdepodobnosť výskytu ktorejkoľvek odchýlky v danom intervale $\pm z_{max}$. Táto aproximácia sa používa najčastejšie. Používa sa najčastejšie z toho dôvodu, pretože nemáme dostatočné poznatky o rozdelení pravdepodobnosti výskytu odchýlok a teda nemáme dôvod uprednostniť niektoré odchýlky.

Aproximácia *trojuholníkovým* rozdelením sa používa obdobne ako aproximácia normálnym rozdelením.

Aproximáciu *bimodálnym* rozdelením použijeme, napr. pri meracích prístrojoch, ktoré výrobca rozdeľuje do rôznych tried presnosti a teda pre niektorú prostrednú triedu presnosti nemôžu byť prístroje s príliš malými (zostanú v predchádzajúcej triede presnosti) ani príliš veľkými chybami (budú v nasledujúcej triede presnosti).

Možnosti aproximačného rozdelenia pravdepodobnosti sú graficky znázornené na obr. č.1.

4. Pri použití číslicového meracieho prístroja je jedným zo zdrojov neistôt rozlíšiteľnosť poslednej platnej číslice. Z toho vyplýva, že aj napriek nemeniacemu sa údaju pri opakovanom meraní neistota nie je nulová. Odhad neistoty sa v tomto prípade zakladá na predpoklade rovnomerného rozdelenia pravdepodobnosti v intervale, ktorý je vymedzený rozlíšiteľnosťou $\delta(z_i)$ daného prístroja

$$u_B(z_i) = \frac{\delta(z_i)}{2\sqrt{3}} = 0{,}29\delta(z_i) \tag{3.14}$$

5. Pri použití analógového meracieho prístroja je odčítateľnosť často daná hodnotou dielika stupnice $\delta(z)$. Potom štandardnú neistotu spôsobenú odčítavaním nameranej hodnoty určíme zo vzťahu (3.14).

6. Hysterézia prístroja má často významný vplyv. Pri posudzovaní neistoty spôsobenej týmto zdrojom postupujeme podobne ako v prípade 5 a štandardnú neistotu daného prístroja určíme zo vzťahu (3.14). [2][3][5][8]

3.2.4 Štandardná kombinovaná neistota

V praxi len málokedy stačí prvý alebo druhý typ neistoty samostatne. Preto je potrebné stanoviť výsledný efekt kombinovaných neistôt merania obidvoch typov, A aj B. Výsledná kombinovaná neistota veličiny x je označovaná $u_C(x)$ a určuje sa ako odmocnina súčtu štvorcov obidvoch typov neistôt A (u_A) a B(u_B) podľa vzťahu: [3]

$$u_C(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \tag{3.15}$$

3.2.5 Rozšírená neistota

V prípadoch, kde nevystačia štandardné neistoty, je potrebné použiť ich rozšírený tvar s pomocou koeficientu k_r. Pôvodne stanovená smerodajná odchýlka (teda aj štandardná

neistota) predstavuje napr. u najčastejšie používaného normálneho (Gaussovho) rozdelenia interval určený s pravdepodobnosťou asi 68 %. Podobne je tomu aj pri iných rozdeleniach. Aby bolo dosiahnuté lepšie pokrytie, ktorého pravdepodobnosť sa bude blížiť k 100 %, je nutné štandardnú neistotu rozšíriť koeficientom rozšírenia k_r, ktorého význam je v podstate rovnaký s významom kvantilov pri normálnom Gaussovom rozdelení, kde $k = 2$ pre rozšírenie na 95% pravdepodobnosť a $k = 3$ pre rozšírenie na 99,7% pravdepodobnosť atď. Rozšírená výsledná neistota je potom vyjadrená vzťahom [2]

$$U(x) = k_r . u_c(x) \tag{3.16}$$

kde
$U(x)$ - je rozšírená neistota,
k_r - koeficient rozšírenia,
$u_c(x)$ - štandardná kombinovaná neistota.

3.3 Neistoty merania nepriamych meraní

Pri nepriamom meraní je meraná veličina získaná sprostredkovane cez iné veličiny a jej hodnota vypočítaná, alebo inak určená. Nepriame merania je možné rozdeliť nasledovne.

1. Podľa spôsobu snímania meranej hodnoty sa rozdeľujú na
   - dotykové
   - bezdotykové
2. Podľa druhu meranej hodnoty sa rozdeľujú na
   - mechanické
   - optické
   - elektrické, atď. [2]

Uvažujme teraz prípad, keď veličinu Y, ktorá nás zaujíma nemôžeme priamo merať, ale ktorá je vo funkčnom vzťahu F s veličinami $X_1, X_2, \dots, X_m$. Tieto vieme priamo merať alebo poznáme ich odhady, neistoty a kovariancie. Platí nasledovné

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_m) \tag{3.17}$$

Odhad y veličiny Y bude (viď vzorec(3.1))

$$Y = F(x_1, x_2, \dots, x_m) \tag{3.18}$$

kde
$x_1, x_2, \dots, x_m$, sú odhady priamo meraných veličín vypočítané zo vzťahu (2.4) alebo zistené iným spôsobom (prevzaté z rôznych podkladov - certifikáty, literatúra, tabuľky, atď.).

Pri vyhotovený neistôt odhadu výstupnej veličiny (výstupného odhadu) v zásade môžeme postupovať dvojakým spôsobom:

1. vyhodnotíme zvlášť neistotu výstupného odhadu metódou A, metódou B a potom ich zlúčením dostaneme celkovú neistotu (kombinovanú),
2. vyhodnotíme priamo celkovú (kombinovanú) neistotu výstupného odhadu. [8]

3.3.1 Vyhodnotenie štandardnej neistoty typu A výstupného odhadu

Ak v modeli (3.17) sú $X_1, X_2, \dots, X_p$ priamo merané veličiny $(p < m)$ a $X_{p+1}, X_{p+2}, \dots, X_m$ sú iné vstupné veličiny, ktorých odhady $x_{p+1}, x_{p+2}, \dots, x_m$ poznáme z iných zdrojov (napr. z údajov výrobcov meradiel, certifikátov, tabuliek, výsledkov predošlých meraní) a každú priamo meranú veličinu $X_1, X_2, \dots, X_p$ meriame n-krát, zložku štandardnej neistoty vyhodnotenú metódou A odhadu y určíme vychádzajúc zo vzťahu (3.6) podľa nasledujúceho vzťahu:

$$u_A^2(y) = \sum_{i=1}^{p} A^2(x_i) u_A^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{p-1} \sum_{j>i}^{p} A(x_i) A(x_j) A(x_{i,j}) \tag{3.19}$$

pričom pre prevodové koeficienty $A(x_i)$ platí:

$$A(x_i) = \left. \frac{\partial (X_1, X_2, \dots, X_m)}{\partial X_i} \right|_{X_1 = x_1, \dots, X_m = x_m} \tag{3.20}$$

V tomto prípade

$$u_A(x_i) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{k=1}^{n} (x_k - x_{ki})^2} \tag{3.21}$$

sú výberové rozptyly pre priamo merané veličiny $X_1, X_2, \dots, X_p$, kde

$$x_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i \tag{3.22}$$

a

$$u_A(x_{i,j}) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^{n} (x_k - x_{ki})(x_k - x_{kj}) \tag{3.23}$$

je výberová kovariancia medzi odhadmi (aritmetickými priemermi) x_i a x_j. [8]

3.3.2 Vyhodnotenie štandardnej neistoty typu B výstupného odhadu

Štandardná neistota vyhodnotená metódou B závisí od neistôt vyhodnotených metódou B priamo meraných veličín a neistôt odhadov ostatných vstupných veličín vystupujúcich v modeli, ktorých neistoty získavame metódou B. Teda

$$u_B^2(y) = \sum_{i=1}^{p} A^2(x_i)u_B^2(x_i) + \sum_{i=p+1}^{m} A^2(x_i)u_B^2(x_i) \qquad (3.24)$$
$$+ 2\sum_{i=1}^{p-1}\sum_{j>1}^{p} A(x_i)A(x_j)u_B(x_{i,j}) + 2\sum_{i=p+1}^{m-1}\sum_{j>i}^{m} A(x_i)A(x_j)u_B(x_{i,j})$$

kde
$u_B(x_i)$ a $u_B(x_j)$ určíme pomocou spôsobu popísanom v časti (3.2.3),
$u_B(x_{i,j})$ je kovariancia medzi odhadmi x_i a x_j.

Kovariancia $u_B(x_{i,j})$ je kovariancia vyhodnotená metódou B, ktorá je iná ako metóda vychádzajúca zo štatistickej analýzy nameraných údajov.

Odhadom, medzi ktorými existujú kovariancie, hovoríme že sú korelované. Korelácie medzi priamo meranými veličinami je možné očakávať pri meraniach, na ktoré pôsobia rovnaké vplyvy, a to najmä:
- rovnaké ovplyvňujúce veličiny,
- použitie tých istých prístrojov.

Kovariancie medzi dvoma odhadmi (meraniami) sa dajú určiť:
- odčítaním z certifikátov prístrojov, literatúry atď.,
- výpočtom podľa nasledovného postupu:

1. Vytipujeme zdroje korelácií.
2. Pre každý zdroj pre každú dvojicu odhadov sa odhadne na základe skúseností korelačný koeficient $r(x_{i,j})$ vyjadrujúci stupeň závislosti medzi odhadmi. Ten môže nadobúdať hodnoty od -1 do +1. Hodnoty blízke 0 zodpovedajú slabej závislosti, hodnoty blížiace sa k ± 1 zodpovedajú silnej závislosti. Kovarianciu určíme z nasledovného vzťahu:

$$u(x_{i,j}) = r(x_{i,j})u(x_i)u(x_j) \qquad (3.25)$$

3. V prípade, že dve vstupné veličiny X_1, X_2 s odhadmi x_1, x_2 závisia od skupiny nezávislých veličín $Z_1, Z_2, \dots, Z_L$, pričom závislosti dokážeme vyjadriť vzťahmi:

$$\begin{aligned} X_1 &= g_1(Z_1, Z_2, \dots, Z_L) \\ X_2 &= g_2(Z_1, Z_2, \dots, Z_L) \end{aligned} \qquad (3.26)$$

určíme kovarianciu medzi odhadmi x_1, x_2 zo vzťahu:

$$u(x_1, x_2) = \sum_{i=1}^{L} A_{1i} A_{2i} u^2(z_i) \tag{3.27}$$

pričom A_{1i}, A_{2i} sú citlivostné koeficienty pre funkcie g_1, g_2 podľa vzťahu (3.5).

Vzťah (3.27) umožňuje určiť kovarianciu medzi odhadmi na základe znalosti funkčných závislostí vstupných veličín X_1 a X_2 od nezávislých veličín $Z_1, Z_2, \dots, Z_L$. To znamená, že vhodným postavením modelu merania, je niekedy možné obísť nevyhnuteľnosť odhadovania korelačného koeficienta. Ak veličiny X_1 a X_2 vystupujú v modeli (3.17) nahradíme vzťahmi (3.26), potom už vzájomne závislé veličiny X_1 a X_2 nebudú ďalej v modeli (3.26) vystupovať.

Ak nevieme určiť korelačný koeficient a tiež sa nevieme vyhnúť koreláciám postavením vhodného modelu, mali by sme určiť maximálny vplyv tejto korelácie na výslednú neistotu pomocou hornej hranice odhadu štandardnej neistoty meranej veličiny. Predpokladajme, že v modeli (3.26) sú veličiny X_1 a X_2 korelované a nepoznáme stupeň korelácie. Ostatné veličiny v modeli nie sú korelované. Potom platí:

$$u^2(y) \leq (|A_1 u(x_1)| + |A_2 u(x_2)|)^2 + \sum_{i=3}^{m} A_i^2 u^2(x_i) \tag{3.28}$$

To znamená, že ak nemáme dostatok informácií na presné ohodnotenie kovariacií a tým aj výslednej neistoty, môžeme udávať hornú hranicu neistoty. [8]

3.3.3 Štandardná kombinovaná neistota

Kombinovanú neistotu $u_C(y)$ získame zlúčením neistôt stanovených metódou A a metódou B pomocou vzťahu:

$$u_C(y) = \sqrt{u_A^2(y) + u_B^2(y)} \tag{3.29}$$

Uvedený postup spočíva vo vyhodnotení neistôt výstupného odhadu y metódou A a metódou B a v zlúčení týchto neistôt podľa vzťahu (3.29).

Iný, často používaný spôsob je taký, že sa priamo určí kombinovaná neistota odhadu výstupu y výstupnej veličiny Y zo vzťahu:

$$\begin{aligned} u_C^2(y) = &\sum_{i=1}^{p} A^2(x_i) u_A^2(x_i) + \sum_{i=1}^{p} A^2(x_i) u_B^2(x_i) + \sum_{i=p+1}^{m} A^2(x_i)\, u_B^2(x_i) \\ &+ 2 \sum_{i=1}^{p-1} \sum_{j>i}^{p} A(x_i) A(x_j) u_A(x_{i,j}) + 2 \sum_{i=1}^{p-1} \sum_{j>i}^{p} A(x_i) A(x_j) u_B(x_{i,j}) \\ &+ 2 \sum_{i=p+1}^{m-1} \sum_{j>i}^{m} A(x_i) A(x_j) u_B(x_{i,j}) \end{aligned} \tag{3.30}$$

alebo, ak najprv určíme kombinované neistoty priamo meraných vstupných veličín zo vzťahu: [8]

$$u_C^2(y) = \sum_{i=1}^{p} A^2(x_i)\, u_C^2(x_i) + \sum_{i=p+1}^{m} A^2(x_i)\, u_B^2(x_i) + 2\sum_{i=1}^{p-1}\sum_{j>i}^{p} A(x_i)A(x_j)u_C(x_{i,j}) + 2\sum_{i=p+1}^{m-1}\sum_{j>i}^{m} A(x_i)A(x_j)u_C(x_{i,j}) \tag{3.31}$$

3.4 Zdroje neistôt

Ako zdroje neistôt sa dajú označiť všetky javy, istým spôsobom ovplyvňujúce neurčitosť jednoznačného stanovenia výsledku merania. Tieto vplyvy vzďaľujú nameranú hodnotu od hodnoty skutočnej. Veľký vplyv na veľkosť výslednej neistoty majú použité metódy a to konkrétne priame alebo nepriame meranie výslednej veličiny. Neistoty sú ovplyvnené výberom meracích prístrojov analógových alebo číslicových, použitím rôznych filtrov, vzorkovačov a ďalších prostriedkov v celej trase prenosu a úpravy meracieho signálu. Výrazný vplyv na neistotu má prostredie v tom najširšom slova zmyslu.

Všetky zdroje neistôt sa vymenovať nedajú, a preto budú spomenuté najčastejšie vyskytujúce sa zdroje neistôt:

- neúplná definícia meranej veličiny,
- nevhodný postup pri meraní,
- nevhodne zvolená metóda merania,
- subjektívnosť odčítania z analógových prístrojov,
- nedokonalá realizácia definície meranej veličiny,
- nevhodný výber prístroja (rozlišovacia schopnosť ai.),
- obmedzená rozlišovacia schopnosť prístrojov,
- nepresnosť etalónov a referenčných materiálov,
- chyba obsluhy pri vyhodnocovaní výsledkov.

Niektoré zo zdrojov sa prejavujú výhradne alebo výraznejšie pri neistotách vyhodnocovaných metódou typu A, iné pri použití metódy typu B. Veľa zdrojov zapríčiňuje obe skupiny neistôt. V tomto prípade je veľkým problémom určiť veľkosť a správny typ neistoty, ktorý má v konečnom dôsledku výrazný skresľujúci účinok. Tieto zdroje nemusia byť vždy nezávislé. [3] [8]

4 MAGNETIZMUS

Každá hmota je zložená z atómov, ktoré ďalej obsahujú protóny, neutróny a elektróny. Každá z týchto častíc má jednu rovnakú vlastnosť, ktorou je spinové číslo inak povedané spin. Magnetické pole okolo častíc vytvára spin. V každom atóme a molekule je spin častíc daný Paulieho vylučovacím princípom. Paulieho vylučovací princíp sa uplatňuje iba pre malé vzdialenosti častíc a neplatí pre väčšie vzdialenosti častíc. Ak častice nie sú usporiadané podľa Paulieho vylučovacieho princípu, tak magnetické pole nevzniká, pretože magnetické momenty častíc sa navzájom rušia. [10]

Každý permanentný magnet označovaný ako dipól má dva póly, ktoré sú navzájom neoddeliteľné. Okolo permanentného magnetu sa vytvára magnetické pole z dôvodu súhlasného usporiadania jednotlivých magnetických momentov častíc. Čím je viac magnetických momentov častíc usporiadaných súhlasne, tým je magnetické pole okolo látky silnejšie. Medzinárodné označovanie pólov permanentného magnetu je odvodené z angličtiny a k o $\boldsymbol{N}$ (*north*), severný pól a $\boldsymbol{S}$ (*south*), južný pól. Ak permanentný magnet rozrežeme podľa ľubovoľnej roviny na dve časti, získame znova dva magnetické dipóly. Známe sú vlastnosti magnetických dipólov prejavujúce sa ich vzájomným silovým pôsobením. Ak dva stále magnety k sebe priblížime súhlasnými pólmi, odpudzujú sa. Naopak, dva magnety sa navzájom priťahujú, ak ich k sebe priblížime nesúhlasnými pólmi. [9]

Permanentný magnet okolo seba vytvára magnetické pole v každom bode priestoru okolo seba a môžeme ho popísať vektorovou veličinou $\boldsymbol{B}$, ktorá sa nazýva magnetická indukcia. Indukcia B charakterizuje magnetické pole z hľadiska silových účinkov na vodič, ktorým preteká elektrický prúd. Základnou veličinou magnetickej indukcie je tesla [T], ktorá znamená indukciu magnetického poľa pôsobiaceho na vodič s dĺžkou 1 [m], ktorým preteká prúd 1 [A] silou 1 [N] v kolmom smere k rovine určenej vektormi indukcie $\boldsymbol{B}$ a prúdu $\boldsymbol{I}$. Často sa v praxi používa menšia jednotka gauss [G] pričom platí, $1\ \mathrm{T} = 10\ 000\ \mathrm{G}$. Magnetická indukcia je definovaná ako vektor, ktorý má smer $\boldsymbol{v_{F=0}}$. Pre rýchlosť $\boldsymbol{v}$ kolmú k $\boldsymbol{v_{F=0}}$ je $\varphi = 90\ °$ a sila pôsobiaca na časticu má maximálnu veľkosť $\boldsymbol{F_{B,max}}$. Veľkosť magnetickej indukcie B je definovaná pomocou veľkosti tejto sily vzťahom

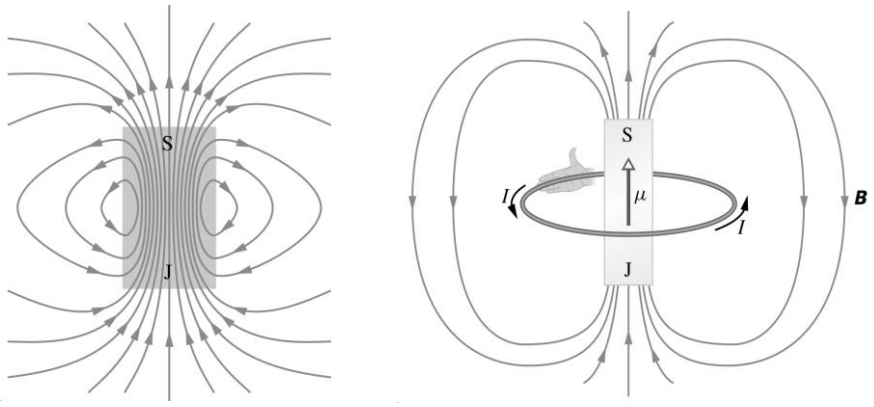
$$B = \frac{F_{B,max}}{|Q|v} \qquad [\mathrm{T}] \qquad (4.1)$$

kde

Q - je náboj častice [C].

Podobne ako znázorňujeme elektrické pole pomocou elektrických siločiar, znázorňujeme magnetické pole magnetickými indukčnými čiarami. Tieto čiary sa vytvárajú obdobne, čo znamená, že v každom bode platí, že smer magnetickej indukcie $\boldsymbol{B}$ je určený dotyčnicou k indukčnej čiare. Veľkosť vektoru $\boldsymbol{B}$ vystihuje hustota indukčných čiar v danej oblasti. Zobrazenie indukčných čiar tyčového magnetu sa

nachádzajú na obr. č. 2 a). Na obr. č. 2 b) je zobrazená slučka, ktorou preteká prúd a vytvára magnetické pole podobné poľu (krátkeho) tyčového magnetu. Magnetický dipólový moment $\boldsymbol{\mu}$ slučky, daný pravidlom pravej ruky, mieri od južného pólu k pólu severnému, v smere vektoru magnetickej indukcie $\boldsymbol{B}$ vo vnútri slučky. [10] [14]

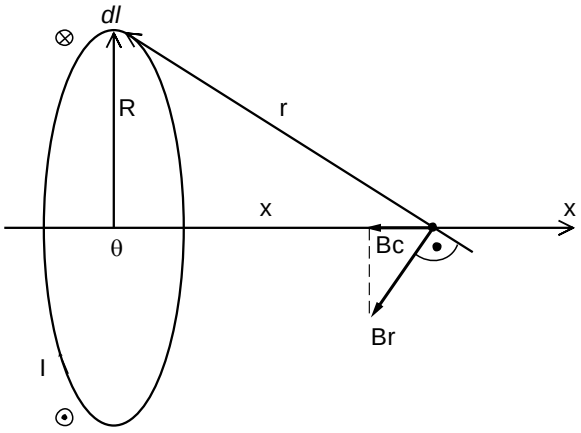


Obr. 2) a) Indukčné čiary tyčového magnetu. b) Slučka ktorou preteká elektrický prúd.

4.1 Helmholtzove cievky

Helmholtzove cievky je dvojica tenkých paralelne usporiadaných cievok, ktoré sú identické a vzdialenosť medzi nimi sa rovná ich polomeru. Tieto cievky sa bežne používajú na generovanie malého, avšak veľmi rovnomerného magnetického poľa medzi cievkami.

Magnetické pole jednej cievky je definované pomocou Biotovho-Savartovho zákona a dá sa aplikovať na kruhovú slučku (viď obr. č. 3) obsahujúcu $\boldsymbol{N}$ závitov navinutých tesne na sebe veľmi tenkým vodičom. Výpočet poľa v osi slučky je jednoduchý vzhľadom na kruhovú symetriu:

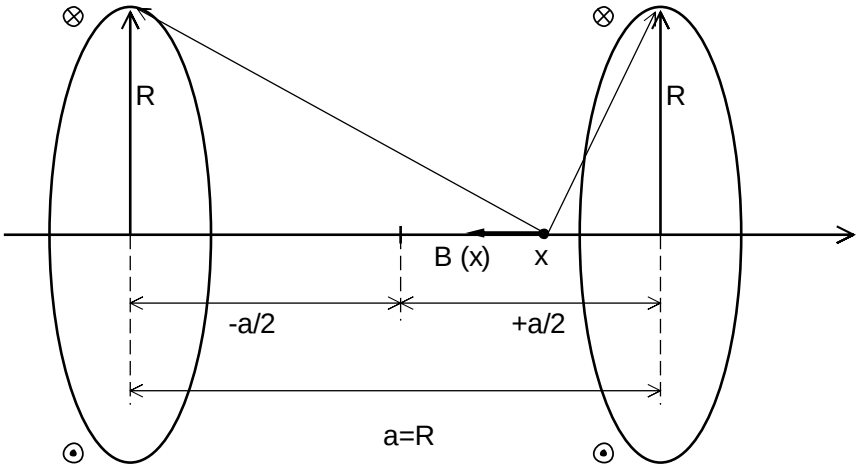


Obr. 3) Využitie Bio-Savartovho zákona pre výpočet poľa $\boldsymbol{B_c(x)}$ v osi kruhovéhpo závitu [11]

$$B_r = \frac{\mu_0 NIR}{2r^2} \quad [\mathrm{T}] \qquad (4.2)$$

kde
μ_0 - permeabilita vákua $4\pi 10^{-7}$ [Hm^{-1}],
N - počet závitov,
R - polomer [m],
r - vzdialenosť bodu na ose cievky od závitu cievky [m].

Základné usporiadanie Helmholtzových cievok je zobrazené na obr. č. 4.



Obr. 4) Helmholtzove cievky v základnom usporiadaní [11]

Helmholtzove cievky sú tvorené párom identických súosých tenkých cievok zapojených do série, s rovnakým počtom závitov $\boldsymbol{N}$, prúdom $\boldsymbol{I}$ nimi pretekajúcim v rovnakom smere a s polomerom $\boldsymbol{R}$ rovnajúcim sa ich vzájomnej vzdialenosti.

Celkový prierez $\boldsymbol{N}$ vodičov musí byť zanedbateľný voči rozmerom vyšetrovaného priestoru. Tento predpoklad vychádza z Biotovho-Savartovho zákona. Pole vytvorené cievkami je relatívne slabé.

Diferenciálne prírastky $\boldsymbol{dB_r}$ vektoru magnetickej indukcie sa dajú rozložiť na zložky kolmé k osi $\boldsymbol{x}$, ktoré sa vďaka kruhovej symetrii navzájom rušia, a na zložky $\boldsymbol{dB_c}$ rovnobežné s osou $\boldsymbol{x}$, ktorých celková veľkosť bude:

$$B_c(x) = B_r \frac{R}{r} = \frac{\mu_0 NIR^2}{2r^3} = \frac{\mu_0 NIR^2}{2(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} \quad [\mathrm{T}] \qquad (4.3)$$

Pole $\boldsymbol{B}$ v osi cievok bude super pozíciou polí $\boldsymbol{B_{c1}}, \boldsymbol{B_{c2}}$ generovaných jednotlivými cievkami:

$$B(x) = B_{c1}(x) + B_{c2}(x) \text{ [T]} \quad [\mathrm{T}] \qquad (4.4)$$

Do rovnice (4) dosadíme výrazy (3) ale s tým, že prvá (pravá) cievka je voči stredu posunutá o $+\boldsymbol{a/2}$, druhá (ľavá) cievka je posunutá o $-\boldsymbol{a/2}$:

$$B(x) = B_{c1}(x) + B_{c2}(x)$$

$$= \frac{\mu_0 NIR^2}{2\left[R^2 + \left(x - \frac{a}{2}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} + \frac{\mu_0 NIR^2}{2\left[R^2 + \left(x + \frac{a}{2}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \quad [\mathrm{T}] \quad (4.5)$$

Veľkosť magnetického poľa v strede cievok tzn. $\boldsymbol{a = R, x = 0}$:

$$B(0) = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{\mu_0 NI}{R} = 0{,}71554\ \frac{\mu_0 NI}{R} = KI \quad [\mathrm{T}] \quad (4.6)$$

Helmholtzove cievky majú v základnom usporiadaní dve nevýhody, ktoré spočívajú v tom, že závity každej cievky s počtom N musia byť navinuté čo najtesnejšie pri sebe.
1. Závitov nemôže byť veľa a nemôžu byť hrubé, pretože pole je potom slabé.
2. Ak sú závity navinuté tesne pri sebe, potom má vinutie veľké parazitné medzizávitové kapacity, ktoré tvoria s indukčnosťou cievky paralelný rezonančný obvod. Rezonančný kmitočet $\boldsymbol{f_0}$ následne obmedzuje dynamiku cievky.

V praxi sa požíva niekoľko modifikovaných druhov Helmholtzových cievok, ktoré potláčajú nedostatky základného usporiadania cievok. [11] [12]

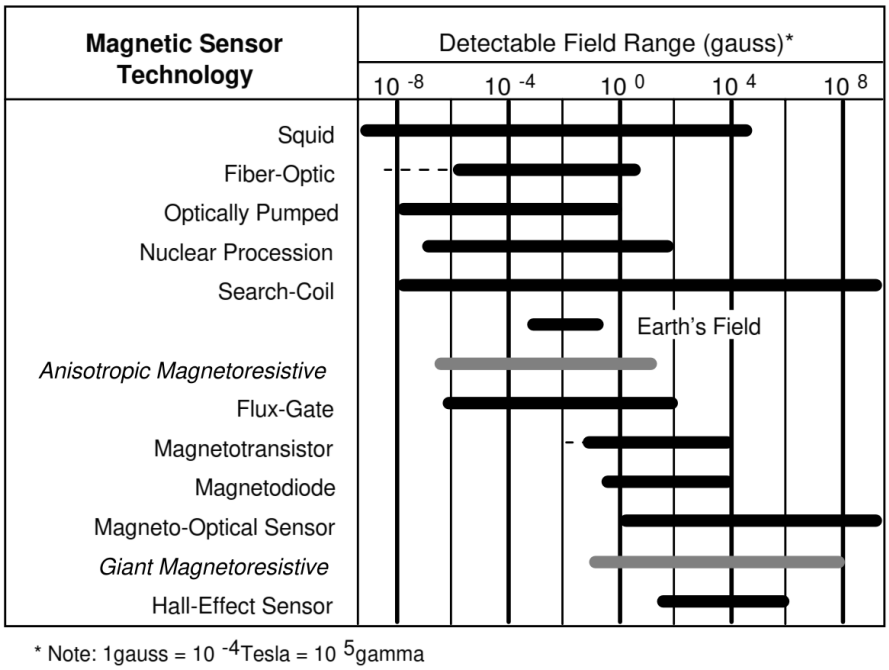
4.2 Snímače magnetického poľa

„Väčšina magnetických snímačov sú snímače vektorové, ktoré merajú zložku magnetického poľa v jednom smere. Iba rezonančné snímače sú skalárneho typu, t. j. merajú absolútnu veľkosť poľa bez ohľadu na jeho smer. “ [13]

Snímanie magnetických veličín reprezentuje oblasť merania vlastností magnetických polí, charakterizovaných dvojicou vektorových veličín a to intenzitou $\boldsymbol{H}$ a indukciou $\boldsymbol{B}$. Intenzitu magnetického poľa $\boldsymbol{H}$ dokážeme vyjadriť vzťahom, ktorý definuje súvislosť medzi elektrickým prúdom a ním vytvoreným magnetickým poľom v zmysle, že práca magnetického poľa po uzavretej dráhe je úmerná elektrického prúdu, ktorý dráha obopína a jej jednotkou je [Am^{-1}]. [14]

Magnetické snímače sa odlišujú od väčšiny ostatných snímačov v tom, že nemôžu priamo merať fyzikálne vlastnosti danej veličiny. Zo snímačov sledujúcich vlastnosti, ako sú teplota, tlak, napätie alebo prúd dokážeme získať výstup, ktorý zobrazuje priamo posudzovanú veličinu. Magnetické snímače detegujú zmeny alebo rušenie v magnetickom poli, ktoré bolo vytvorené alebo zmenené a vyhodnocujú informácie, ako je smer, prítomnosť alebo elektrický prúd. Z vyššie spomenutého vyplýva, že výstup snímača nie je v požadovanej veličine, a preto je potrebné následné spracovanie výstupu snímača. Snímače poskytujú aj bez fyzického kontaktu spoľahlivé a presné hodnoty magnetického poľa. Snímače je možné rozdeliť podľa viacerých kritérií, a to napríklad podľa veľkosti meraného magnetického poľa alebo princípu merania. Podľa veľkosti poľa ich delíme na meranie malých polí (polia do 0,1 pT), stredných polí (polia od 0,1 pT do 1 mT) taktiež nazývané aj snímače poľa Zeme a nakoniec snímače nad

0,1 mT nazývané snímače magnetického poľa. Na obr. č. 5 sú zobrazené použité technológie snímačov a ich rozsahy. [15] [16] [17]



Obr. 5) Technológie magnetických snímačov a ich rozsahy [15]

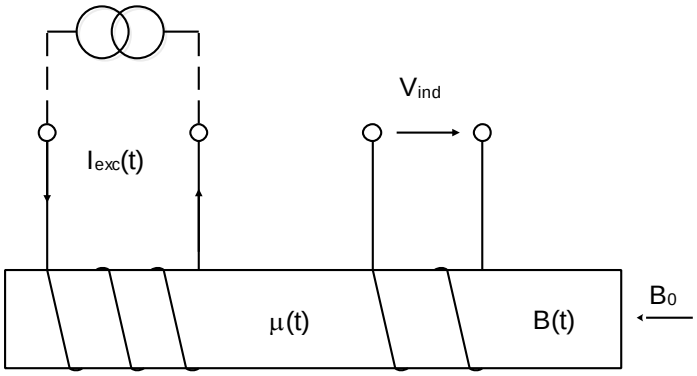
V nasledujúcich kapitolách budú bližšie popísané niektoré princípy snímačov magnetického poľa.

4.2.1 Fluxgate (feromagnetické) snímače

Fluxgate snímač známy ako snímač so saturovaným jadrom (saturable-core magnetometer) bol objavený v 30. rokoch dvadsiateho storočia a určený pre meranie magnetického poľa Zeme. Fluxgate snímače dokážu merať veľkosť aj smer magnetického poľa a využitie našiel ako magnetické kompasy lietadiel a lodí, na hľadanie feromagnetických materiálov pod zemou, atď. Pre zaujímavosť tieto snímače používala armáda na vyhľadávanie ponoriek. [15] [19]

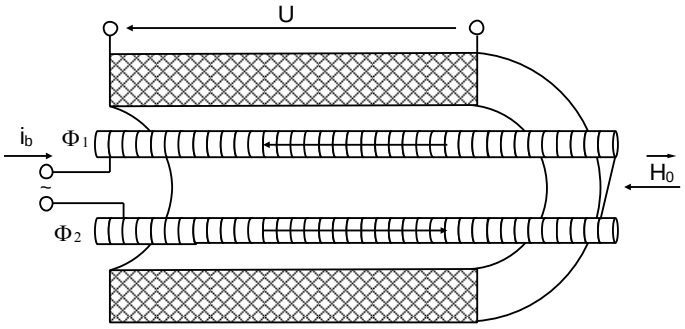
Základný princíp fluxgate snímača je zobrazený na obr. č. 6. Pre jednoduché pochopenie princípu je na obrázku zobrazený najjednoduchší typ, ktorý obsahuje feromagnetické jadro z materiálu, ktorý má vysokú premeabilitu a je obklopené budiacou a snímacou cievkou. Feromagnetické jadro je excitované prúdom $\boldsymbol{I_{exc}(t)}$ s frekvenciou f pretekajúcim budiacou cievkou a núti jadro oscilovať medzi saturačnými bodmi magnetizačnej krivky jadra. Z toho vyplýva, že jadro je periodicky budené pomocou budiacej cievky do saturačných hodnôt hysteréznej slučky. Permeabilita jadra $\boldsymbol{\mu(t)}$ sa mení v závislosti na frekvencii budenia dvakrát rýchlejšie $\boldsymbol{\mu(t) = 2f}$, pričom permeabilita jadra klesá skoro na 1 v stave prebudenia. Pri

prítomnosti časovo nemenného vonkajšieho poľa $\overrightarrow{\boldsymbol{B_0}}$ pôsobiaceho pozdĺž osi jadra, spôsobí posunutie budiaceho signálu od riadiacej cievky a na výstupe snímacej cievky dochádza k nesymetrii signálu. [13]



Obr. 6) Základný princíp fluxgate snímača [13]

Vyššie bol pre jednoduchosť vysvetlenia princípu popísaný snímač s jedným jadrom. V praxi sa najčastejšie používa tento snímač v prevedení s dvoma jadrami. Na týchto jadrách sú navinuté cievky tak, aby ich magnetické toky ϕ_1 a ϕ_2 na seba pôsobili proti sebe. Obidve jadrá budiacich cievok sú umiestnené vo vnútri snímacej cievky (viď obr. č. 7). Ak má externé magnetické pole nulovú hodnotu, tak magnetické toky sú rovnako veľké a pôsobia proti sebe. Na výstupnej snímacej cievke je nulové napätie. Ak feromagnetický snímač umiestnime do vonkajšieho magnetického poľa tak, že jej jadrá budú rovnobežné s vektorom intenzity magnetického poľa $\overrightarrow{H_0}$, nastane nesymetrické presycovanie jadier. Na výstupe je možné odmerať striedavé napätie U, ktorého veľkosť je úmerná meranému magnetickému poľu a jeho frekvencia je dvakrát väčšia ako vstupný signál. Pri pôsobení vonkajšieho magnetického poľa $\overrightarrow{H_0}$ sa navzájom poruší symetria magnetických tokov ϕ_1 a ϕ_2 pričom sa v snímacej cievke indukuje napätie U s obsahom párnych harmonických zložiek excitovaného prúdu. Druhá harmonická zložka z výstupného napätia U je priamoúmerná meranému poľu H_0.



Obr. 7) Fluxgate snímač s dvomi jadrami [13]

Existujú rôzne modifikácie fluxgate snímača z dôvodu presýtenia jadier snímača pri pôsobení veľkého poľa H, čo má za následok znižovanie výstupného napätia snímača. Vylepšená modifikácia je napr. kompenzovaný fluxgate snímač. Tento snímač má naviac kompenzačné vinutie súosé s meracím vinutím, ktorým preteká kompenzačný prúd. Týmto druhom snímačov je možné merať aj striedavé magnetické polia, ak je ich frekvencia o rád menšia ako frekvencia budiaceho signálu. Fluxgate snímače sú rádovo 1000 krát citlivejšie ako snímače založené na princípe Hallovho javu. Pri meraní bol použitý Milligaussmeter: AlphaLab 3AXISMGM ktorý využíval trojosí fluxgate snímač. Bohužiaľ v literatúre od výrobcu nebolo možné zistiť presný typ použitých snímačov. [13] [15] [16] [17] [19]

4.2.2 Hallove snímače

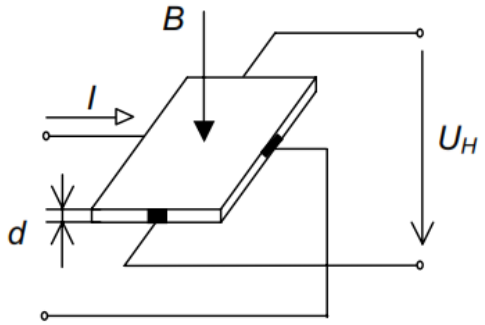
Hallov snímač je snímač magnetického poľa založený na princípe Hallovho javu. O snímačoch využívajúcich Hallov jav sa dá povedať, že sú pravdepodobne najviac všestranné a najpoužívanejšie snímače na svete, pretože viac než 90 % vyrábaných magnetických snímačov tvoria Hallove snímače. Presnosť snímačov sa väčšinou pohybuje okolo 1 %.

Obvykle sa takýto snímač skladá z tenkej obdĺžnikovej doštičky polovodičového materiálu. Najčastejšie používané materiály pre tieto snímače sú Ge, InAs, InSb, DaAs. Ak doštičkou prechádza v jednom pozdĺžnom smere jednosmerný prúd a vložíme túto doštičku do magnetického poľa (viď obr. č. 8), tak pôsobí na pohybujúce sa nosiče náboja Lorentzova sila a jej dráhy sa vychyľujú v kolmom smere k vektoru magnetickej indukcie a pohybu týchto nábojov. Tým vzniká na protiľahlých stranách doštičky takzvané Hallovo napätie:

$$u_H = \frac{R_H I B}{d} \quad [\mathrm{V}] \qquad (4.7)$$

kde
R_H - Hallova konštanta $[\mathrm{C}^{-1}.\mathrm{m}^3]$,
I - prúd prechádzajúci doštičkou [A],
B - indukcia magnetického poľa,
d - hrúbka doštičky.

Napätie u_H je pri konštantnom prúde I priamo úmerné magnetickej indukcii B a dá sa merať milivoltmetrom.



Obr. 8) Princíp Hallového snímača [19]

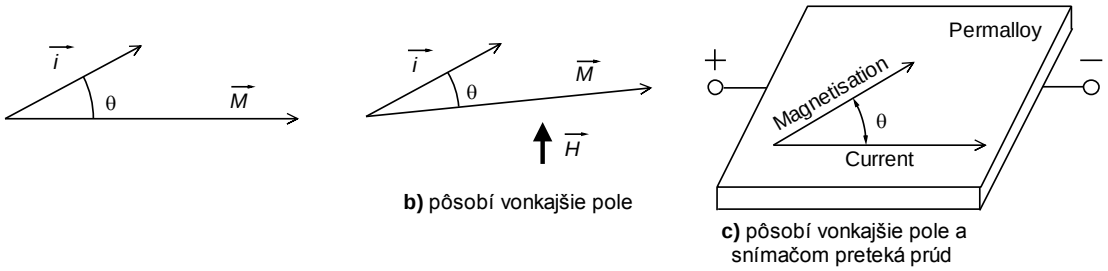
Hallove snímače sa vo väčšine prípadov napájajú z prúdového zdroja až na výnimky, kedy sa ukazuje vhodnejšie použitie napäťového napájania. Napäťové napájanie je vhodnejšie z dôvodu potlačenia teplotnej závislosti snímača.

Výhodou týchto snímačov sú ich malé rozmery, a preto je možné merať magnetickú indukciu aj v malých vzduchových medzerách. Meraná magnetická indukcia musí pôsobiť kolmo na plochu doštičky. Prevodné charakteristiky snímačov sú rôzne napr. lineárna, unipolárna, atď. Výhodou snímača je, že neovplyvňuje merané magnetické pole, pretože neobsahuje feromagnetické materiály.

Nevýhodou Hallových snímačov je závislosť offsetu na teplote. Pri meraní boli použité Hallove snímače s lineárnym výstupom od firmy Allegro a Honeywell.
[13] [16] [17] [18] [19] [20]

4.2.3 AMR snímače

AMR snímače sú založené na princípe anizotropickej magnetorezistencie. Anizotropná magnetorezistencia je zmena odporu spôsobená zmenou uhlu θ medzi vektorom magnetizácie $\vec{M}$ a smerom prúdovej hustoty $\vec{\imath}$, pretekajúcim materiálom. Elektrický odpor materiálu závisí na veľkosti uhla medzi vektorom magnetizácie a smerom prúdu. Pri nulovom vonkajšom poli je smer vektoru magnetizácie daný remanentnou magnetizáciou (obr. č. 9 a, malý odpor snímača). Pri vložení snímača do magnetického poľa sa smer vektoru magnetizácie zmení (obr. č. 9 b, veľký odpor snímača). Na obr. č. 9 c) je pre lepšiu predstavu zobrazený AMR snímač pri pôsobení magnetického poľa, pričom snímačom preteká prúd.

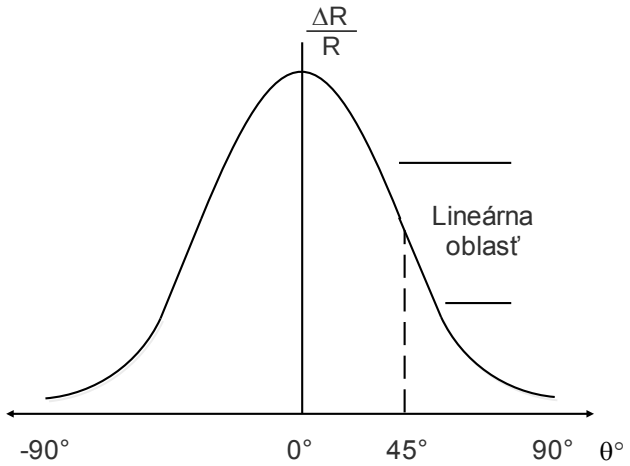


b) pôsobí vonkajšie pole

c) pôsobí vonkajšie pole a snímačom preteká prúd

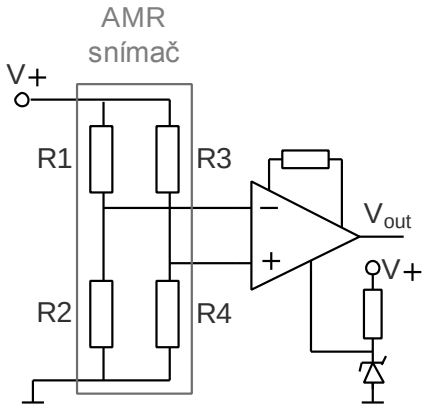
Obr. 9) Princíp anizotropnej magnetorezistencie [15] [21]

Typická závislosť relatívnej zmeny odporu ($\Delta R/R$) dosahuje maximálne hodnoty $2-3\ \%$. Výhodné je využívať oblasti $\theta \approx 45\ °$, kde ako môžete vidieť na obr. č. 10 je magnetorezistenčná odozva lineárna.



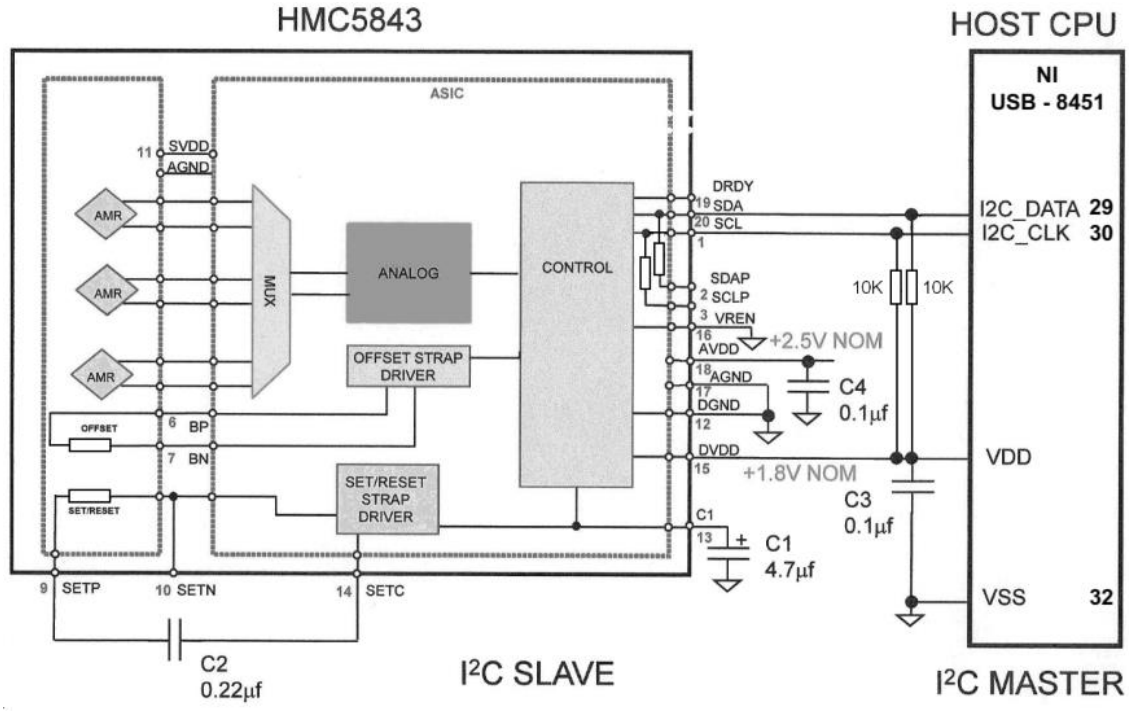
Obr. 10) Závislosť zmeny el. odporu na uhle medzi vektorom magnetizácie a smerom prúdu [15]

Snímač obsahuje tenkú vrstvu zliatiny permalloy, umiestnenej na kremíkovom substráte. Permalloy sa skladá z niklu, železa alebo kobaltu a jeho permeabilita je vysoká a histerézia malá. Obvyklé zloženie permalloya je $82\ \%$ niklu a $19\ \%$ železa. Teplotná závislosť permalloya s týmto zložením je $0{,}3\ \%/°\mathrm{C}$. Magnetická vrstva kovu v tvare úzkeho dlhého pásika je zmagnetizovaná od výroby tak, že vektor magnetizácie je rovnobežný s dlhšou stranou pásiku. Zmena odporu $\Delta R/R$ je dosť malá, a preto sa používa zapojenie do Wheatstoneovho mostíka v zapojení s rovnakými 4 pásikmi (viď obr. č. 11). Odpory R_1, R_3 a R_2, R_4 tvoria dve dvojice s uhlami $\theta_1 = \theta_4 = 45\ °$ a $\theta_2 = \theta_3 = -45\ °$. V tomto zapojení je súčasne kompenzovaná teplotná závislosť meraného odporu permalloya. Snímače tohto druhu sa používajú v mnohých aplikáciách. Používajú sa na meranie prúdu, v automobilovom priemysle aj ako kompasy a v rôznych ďalších aplikáciách. Výhoda týchto snímačov je nanášanie permaloya na kremíkový substrát. Z tohto dôvodu je možné snímače priamo implementovať do integrovaných obvodov, čo má priaznivý vplyv na cenu. [15] [17]



Obr. 11) Zapojenie snímačov do Wheatstoneovom mostíka [15]

Pri meraní bol použití snímač s označením HMC5843 od firmy Honeywell. Tento snímač je trojosí snímač, ktorý funguje na princípe AMR a je schopný merať magnetické pole v rozsahu ±0,4 mT. Snímač komunikuje pomocou komunikačnej zbernice I^2C. Snímač je periférna súčiastka (Slave) a karta NI USB-8451 je procesor (Master). Snímač bol napájaný pomocou dvojitého napájacieho napätia a hodnoty napätí boli nastavené na 1,8 V a 2,5 V. Na obrázku číslo 12 sa nachádza zapojenie a vnútorné uloženie snímača.

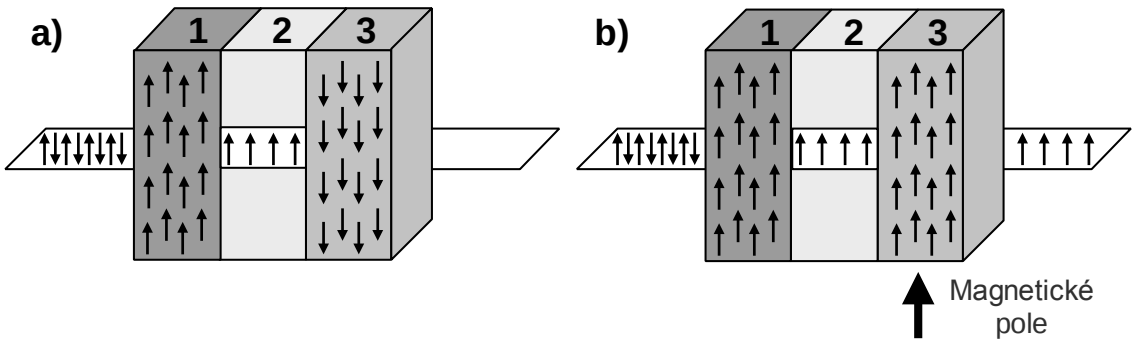


Obr. 12) Vnútorná schéma a zapojenie snímača HMC5843 [22]

Na ľavej strane obrázka sa nachádza snímač HMC5843 (Slave) a jeho vnútorné zapojenie. Ako je možné vidieť na vnútornom zapojení, tak snímač obsahuje 3 AMR snímače. Každý jeden pre os x, y a z. Na pravej strane sa nachádza karta NI USB-8451 a čísla portov na ktoré boli pripojené výstupné signály zo snímača (DATA, CLK, VSS). [22]

4.2.4 GMR (Giant Magneto Resistence effect) snímače

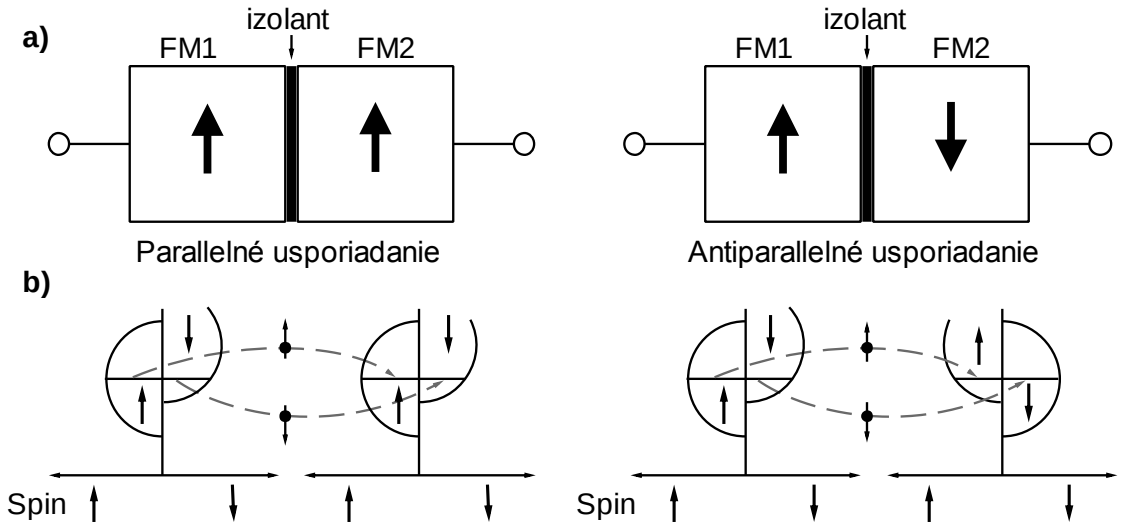
V preklade tento princíp znamená veľký magnetorezistenčný jav. Tento princíp bol objavený nedávno, pričom je účinnejší a výroba snímačov je lacnejšia, ako pri princípe AMR. Pomocou princípu GMR získavame rovnakú vlastnosť ako pri princípe AMR, ale zmena odporu vzhľadom k veľkosti magnetického poľa je o dosť väčšia. Percentuálne môžeme túto zmenu vyčísliť od 10 do 50 %, z čoho plynie názov veľký magnetorezistenčný jav. Tento jav spočíva v uložení dvoch (alebo viacerých) feromagnetických vrstiev (z kobaltu) umiestnených vedľa seba, medzi ktorými je umiestnená tenká medená vrstva tak tenká, že sa správa ako izolant (viď obr. č. 13 platnička číslo 2). Feromagnetické vrstvy sú od výroby nesúhlasne magnetizované, ak na ne nepôsobí magnetické pole (snímač má veľký odpor). Na obr. č. 13 a) je možné vidieť nesúhlasne magnetizované feromagnetické vrstvy (platnička 1 a 3). Do snímača vstupujú zľava elektróny, ktoré majú rôzny spin. Spin je veličina, ktorá udáva smer otáčania elektrónu. Na obr. č. 13 znamená šípka hore, smer otáčania elektrónu v smere hodinových ručičiek a šípka dolu zobrazuje spin proti smeru hodinových ručičiek. V elektricky vodivých nemagnetických materiáloch je počet elektrónov s navzájom opačným spinom rovnaký. Vo feromagnetických materiáloch sa môžu pohybovať iba elektróny s rovnakým spinom, ktorý je rovnaký ako magnetický moment materiálu. Z tohto dôvodu je možné vidieť na obr. č. 13 a) možný prechod polovice elektrónov, ktoré majú rovnaký spin ako magnetický moment materiálu platničky 1. Na tom istom obrázku vo variante b) začneme pôsobiť magnetickým poľom na snímač a magnetický moment platničky 3 je rovnaký ako moment platničky 1 (obvodom začne pretekať el. prúd). Hrúbka snímača, ktorý má tri vrstvy, sa obvykle pohybuje okolo 10 až 20 nm. Pri potrebe zvýšenia citlivosti sa pridávajú ďalšie vrstvy a vzniknú viacvrstvové GMR snímače. GMR snímače sa používajú v mnohých aplikáciách napr. detekcia vozidiel, snímače prúdu, pamäte atď. [17] [23]



Obr. 13) GMR princíp [25]

4.2.5 TMR (Tunnel Magneto Resistance) snímače

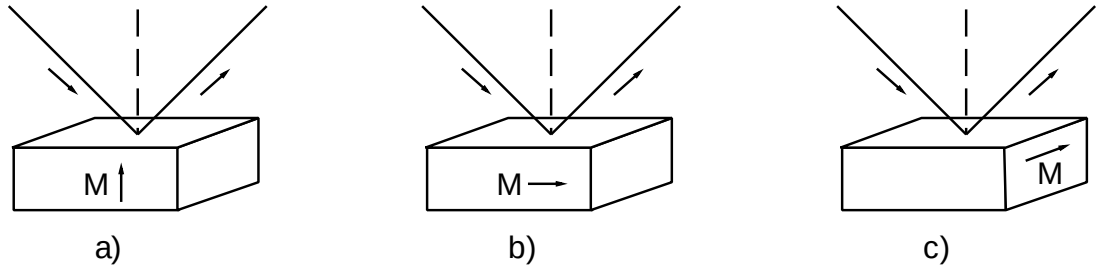
Taktiež je to magnetorezistívny princíp a uzatvára trojicu týchto princípov, pričom je z nich najmladší. V preklade TMR znamená tunelový magnetorezistívny jav. Snímač musí obsahovať minimálne 3 vrstvy a zvyšovaním počtu vrstiev sa zväčšuje citlivosť snímača. Rozdiel oproti vyššie spomenutým magnetorezistívnym javom je hlavne v citlivosti. Snímače tohto druhu využívajú tunelový jav. Rozsah zmeny elektrického odporu v závislosti od veľkosti magnetického poľa sa pohybuje v rozsahu 30 až 70 % a vo vývoji sa pracuje na snímačoch so zmenou odporu väčšou aj ako 100 %. Nevýhodou je veľmi obmedzená linearita nielen zmeny odporu v závislosti na hodnote magnetického poľa ale taktiež nelineárna VA charakteristika. Na prvý pohľad sa môže zdať princíp snímača GMR a TMR rovnaký. Rozdiel je v materiáli medzi feromagnetickými doštičkami. V GMR snímači sa používa materiál medzi doštičkami (najčastejšie meď) ako stredná nemagnetická vrstva oddeľovacia dve vrstvy magneticky vodivé. Pri TMR snímačoch sa používa stredná izolačná vrstva (napr. Al2O3) ako hlavný prvok štruktúry. Štruktúra snímača sa skladá z dvoch magneticky vodivých vrstvičiek (FM1, FM2), medzi ktorými je umiestnený izolant (viď obr. č. 14). Ak sú magneticky vodivé vrstvičky zmagnetizované rovnako (paralelný stav), tak pre elektróny s natočeným spinom paralelne k magnetickému poľu funguje tunelový jav a obvodom začne pretekať elektrický prúd (malý odpor snímača, viď obr. č. 14 ľavá časť). Ak sú magneticky vodivé vrstvičky zmagnetizované nesúhlasne (veľký odpor snímača, viď obr. č. 14 pravá časť), tak obvodom netečie elektrický prúd. Snímače tohto druhu našli využitie hlavne v čítacích - zapisovacích hlavách harddiskov. [24] [27]



Obr. 14) a) Zobrazenie paralelného a anitaparalelného zmagnetizovania magneticky vodivých vrstvičiek. **b)** Hustota stavovo spinov magneticky vodivých vrstvičiek. [27]

4.2.6 Snímače založené na Magneto-optických princípoch

V magnetooptických snímačoch sa využíva princíp, ktorý spočíva v tom, že magnetické pole je schopné ovplyvniť lúč svetla prechádzajúci prostredím (zmena polarizácie lúča svetla). Magnetooptické metódy sú založené na dvoch javoch. Faraday objavil nasledujúci jav: Ak lineárne polarizované svetlo prechádza médiom umiestneným v magnetickom poli a smer magnetického poľa je rovnobežný so smerom šírenia svetla, tak sa rovina polarizácie svetla otáča. Druhý jav sa nazýva Kerrov jav. Tento jav sa prejavuje v zmene parametrov svetla odrazeného od magnetického materiálu. Pri tomto jave je veľká závislosť medzi orientáciou svetla v rovine dopadu a smeru magnetizácie materiálu. Základné tri typy Kerrovho javu sú zobrazené na obrázku číslo 15.



Obr. 15) Magnetooptický Kerrovjav. a) Polárny kerrov jav, b) pozdĺžny Kerrov jav a c) Priečny Kerrov jav [13]

Faradayov jav je jednoducho aplikovateľný na magnetooptické snímače pretože lineárne polarizované svetlo, ktoré prešlo cez paramagnetický materiál sa pootočí o istý uhol θ ktorý priamo udáva veľkosť magnetického poľa. Veľkosť uhla natočenia polarizovaného svetla je možné zväčšiť tak, že polarizované svetlo prejde dva krát cez materiál. Pre uhol natočenia roviny polarizácie platí nasledujúci vzťah

$$\theta = V_{Verdet}\left|\vec{H}\right|d \tag{4.8}$$

kde V_{Verdet} je Verdetova konštanta, $H = \vec{H}$ je veľkosť intenzity magnetického poľa a d je hrúbka vzorky (alebo dĺžka cesty), ktorou prebieha interakcia magnetického poľa so svetlom. Vo feromagnetickom prostredí sa dá uhol rotácie θ vyjadriť pomocou magnetizácie M nasledovne

$$\theta = K_{Kundt}\left|\vec{M}\right|d \tag{4.9}$$

kde K_{Kundt} je Kundtova konštanta, $M = \left|\vec{M}\right|$ je veľkosť magnetizácie materiálu a d je hrúbka vzorky (alebo dĺžka cesty), ktorou prebieha interakcia magnetického poľa so svetlom.

Snímače na princípe Kerrovho javu zobrazujú doménovú povrchovú štruktúru feromagnetických materiálov. „*Lineárne polarizovaný lúč svetla dopadá na povrch vzorky, kde magnetizácia vo vnútri domén stočí rovinu polarizácie dopadajúceho svetla*

o uhol θ, ktorý je možné vyjadtiť pomocou magnetizácie M nasledovným vzťahom:" [16]

$$\theta = K_r M \tag{4.10}$$

Rotácia sa pohybuje rádovo v minútach. Napríklad pre saturovanú nikel to je 9 minút a pre kobalt a železo to je 20 minút. Iba v prípadoch keď je magnetizácia materiálu priamo úmerná indukcii magnetického poľa dokážu snímače určiť veľkosť magnetického poľa. [13] [16]

4.2.7 Snímače založené na magnetických rezonančných princípoch

Snímače založené na magnetických rezonančných princípoch využívajú tri princípy, ktoré sú elektrónová spinová rezonancia, jadrová magnetická rezonancia a nakoniec protónová precesia. Citlivosť snímačov založených na týchto princípoch sa pohybuje rádovo 10^{-14} T. Výhodou snímačov je meranie veľkosti magnetického poľa v určitej oblasti čo sa značne využíva v medicíne. Oproti iným snímačom sú nezávislé na orientácii magnetického poľa ako napríklad Hallove snímače. Zeeman objavil, že v prítomnosti magnetického poľa sa menia diskrétne elektrónové energetické hladiny v materiáli. „*Pri elektrónovej spinovej rezonancii (ESR) sú elektróny excitované vysokofrekvenčným žiarením a absorpcia alebo rezonancia žiarenia prebieha pri charakteristických frekvenciách. Zo znalosti rezonančnej frekvencie v_0 a veľkosti gyromagnetického pomeru γ dokážeme vypočítať veľkosť magnetického poľa podľa vzťahu:* " [16]

$$\omega_0 = 2\pi v_0 = \gamma B = \gamma \mu_0 H \tag{4.11}$$

„*Hodnota γ pre voľný elektrón (elektrón paramagnetickej spinovej rezonancie) je* $1{,}76.10^{-11}\mathrm{rad.\,s^{-1}.\,T^{-1}}$. " [16]

„*Jadrová magnetická rezonancia (nuclear magnetic resonance, NMR) závisí na rezonancii magnetického momentu jadra atómu v rádiofrekvenčnom poli a je podobná ESR. Energetické hladiny jadra sú kvantované a menia sa s prítomnosťou magnetického poľa.* " [16]

Rezonanciu a absorpciu je možné pozorovať vtedy ak má rádiofrekvenčný pulz rovnakú energiu ako rozdiel medzi kvantovými hladinami stavu jadra. Výpočet veľkosti magnetického poľa je rovnaký ako pri princípe ESR.

Odvodený princíp je protónová precesia. Protónová precesia sa využíva v geofyzike pre presné meranie intenzity magnetického poľa Zeme na určitom mieste. [13] [16]

4.3 Etalóny magnetického poľa

Vytvorenie magnetickej indukcie súvisí s vytvorením magnetického poľa a je možné ho vytvoriť dvomi spôsobmi. Prvý spôsob je vytvorenie magnetického poľa pomocou cievok a druhý spôsob je založený na princípe nukleárnej magnetickej rezonancie.

Pomocou cievkových etalónov je vytváraná veličina magnetickej indukcie v závislosti na prúde $\mathrm{T.A^{-1}}$ (konštanta cievky K) a táto hodnota sa buď prevádza ďalej alebo sa porovnáva. Vytvorenie magnetickej indukcie docielime prechodom prúdu vinutím cievky $B = KI$. Českým štátnym etalónom magnetickej indukcie je možné realizovať pole do 6 mT bez pripojenia sekundárnych cievkových etalónov. Pri pripojení sekundárnych etalónov je možné generovať magnetickú indukciu s hodnotou 100 mT. Jadro cievok je vyrobené z opaktného kremeňa v ktorom sú vybrúsené štyri drážky a v každej drážke je navinutá cievka s jednou vrstvou závitov. Aby homogenita magnetickej indukcie vo vnútri cievok bola čo najväčšia, tak sú zvolené špeciálne rozmery cievok.

Pre väčšie hodnoty magnetickej indukcie sa najčastejšie používajú metódy založené na princípe nukleárnej magnetickej rezonancie (NMR). Táto metóda funguje na princípe meranie kmitočtu f_p rezonancie protónov v magnetickom poli s magnetickou indukciou B. Magnetickú indukciu B je možné vypočítať z nasledujúceho vzťahu.

$$B = \frac{2\pi f_p}{\gamma_p'} \tag{4.12}$$

kde

γ_p' - gyromagnetický moment protónu vo vode je:

2,675153268(66) .108 $\mathrm{s^{-1}T^{-1}}$ (2,5. 10-8).

Ďalšou metódou je metóda založená na princípe NMR vynútenej precesii. Pri tomto princípe sa využíva polarizácia jadier pracovnej látky, indikácia rezonancie a rezonančný efekt spojený s meraním frekvencie v tom istom magnetickom poli. Štátny etalón Českej Republiky založený na tomto princípe dokáže generovať magnetickú indukciu s hodnotami 0,02 T až 2 T.

Existuje ešte jedna metóda ktorá vypĺňa medzeru medzi rozsahmi cievkového etalónu a princípu NMR vynútenej precesii. Táto metóda má názov NMR, metódou nutácie. Táto metóda využíva princíp rezonanciu protónov v tečúcej vode a vzájomne oddelené magnetovanie protónov v silnom pomocnom magnetickom poli, uskutočnením rezonančného efektu v meranom poli a meraním rezonancie v ďalšom pomocnom magnetickom poli najčastejšie permanentného magnetu. Štátny etalón Českej Republiky založený na tomto princípe dokáže generovať magnetickú indukciu s hodnotami 0,1 mT až 200 mT. [26]

5 PRAKTICKÁ ČASŤ

V praktickej časti práce po meranie vlastností magnetických snímačov budú popísané experimenty nasledujúcim popisom. Popis experimentov bude obsahovať zapojenie experimentov, grafické vyhodnotenie výsledkov meraní a nakoniec vplyvy ovplyvňujúce experimenty. Teplota v laboratóriu bola sa pohybovala počas všetkých experimentov okolo hodnoty 25 ± 2 °C a relatívna vlhkosť vzduchu nepresiahla 50 %.

5.1 Meranie homogenity magnetického poľa Helmholtzovej cievky

Pri meraní všetkých experimentov bola použitá jedna Helmholtzova cievka, ktorou bola malá Helmholtzova cievka. Okrem merania vplyvu externého magnetického poľa na pole meranej malej Helmholtzovej cievky, kde bola použitá veľká Helmholtzova cievka na generovanie externého magnetického poľa. Dostupných Helmholtzových cievok v laboratóriu ÚAMT bolo niekoľko (viď tabuľka číslo 2). Dostupné Helmholtzove cievky a ich parametre sa nachádzajú v tabuľka číslo 2. Polomer cievok je označený R, počet závitov N a teoretická konštanta cievok K**,** vypočítaná podľa vzťahu (4.6).

Tab. 2) Dostupné Helmholtzove cievky [29]

dostupné cievky		R [mm]	N [-]	K [mT/A]
Jednoosá Helmholtzova cievka		200	2x 80	0,36
Trojosá Helmholtzova cievka	Veľká cievka	225	2x 133	0,532
	Stredná cievka	165	2x 133	0,725
	Malá cievka	109	2x 133	1,097

Príklad výpočtu teoretickej konštanty malej cievky:

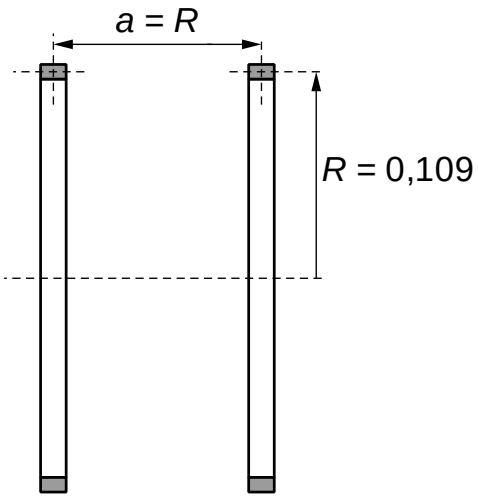
$$K = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} . \mu_0 \frac{N}{R} = 0{,}71554.4\pi . 10^{-7} \frac{133}{0{,}109.10^3} = 1{,}0979 \ [\mathrm{mT.A^{-1}}].$$

Veľkosť konštanty Helmholtzovej cievky priamoúmerne ovplyvňuje veľkosť generovaného magnetického poľa v závislosti na prúde, čo vyplýva zo vzťahu (4.6). Z tohto dôvodu bola zvolená Helmholtzova cievka s najväčšou konštantou, ktorá umožňuje dosiahnutie najväčšieho magnetického poľa. [29]

5.1.1 Rozmery Helmholtzovej cievky

Z teórie popísanej v kapitole 4.1 vychádza, že rozmery cievok musia byť zanedbateľne veľké vzhľadom na veľkosť meraného magnetického poľa. Malá Helmholtzova cievka (ďalej len cievka) sa skladá z dvoch cievok. Každá táto cievka má 133 závitov a cievky

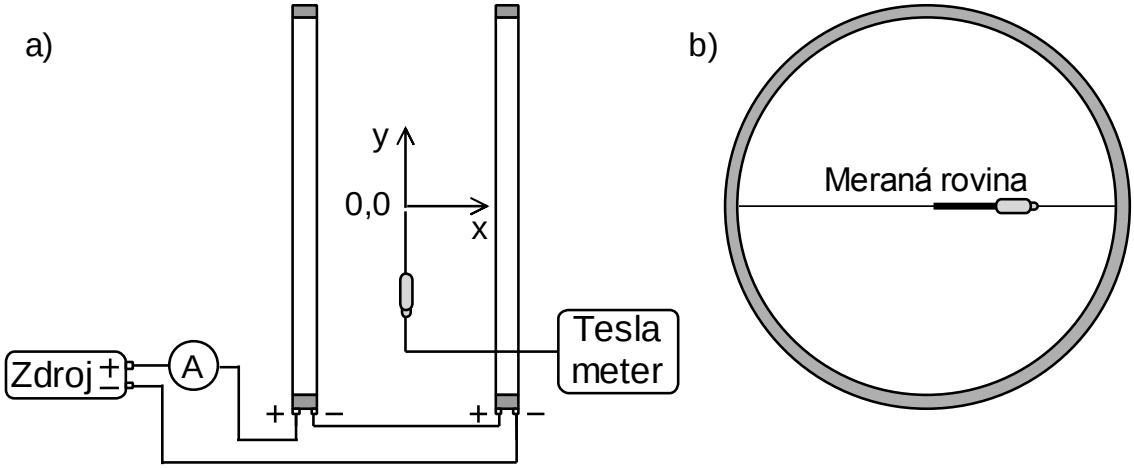
sú navinuté zo smaltovaného medeného drôtu s prierezom 1,25 mm. Polomer R a vzdialenosť medzi cievkami a, ktorá sa rovná polomeru ($a = R$), sú merané od horizontálneho a vertikálneho stredu vinutia každej cievky. Pre názornosť je tento popis zobrazený na obrázku číslo 16. Prúd prechádzajúci cievkou bol meraný pomocou bočníka skoro pri všetkých experimentoch okrem merania malých magnetických polí. [29]



Obr. 16) Rozmery malej Helmholtzovej cievky

5.1.2 Schéma zapojenia experimentu

Na obrázku číslo 17 sa nachádza schéma zapojenia experimentu.



Obr. 17) Schéma zapojenia experimentu merania homogenity magnetického poľa v rovine cievky. a) pohľad zhora, b) pohľad z boku

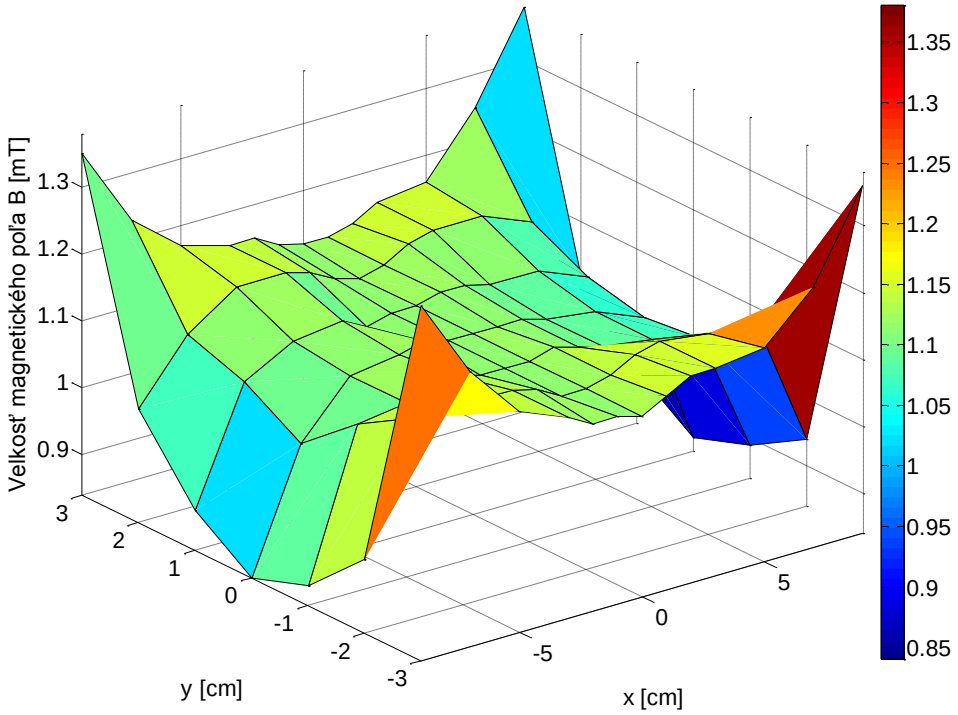
Použité prístroje a ich označenie v schéme zapojenia:

- Ampérmeter: Agilent 34410A (v. č.: MY47001058)
- Bočník: HP 34330A (v. č.: 9439)
- Teslameter : Gauss/Teslameter: F. W. Bell Model 5180 (v. č.: 1113367)
- Zdroj: Stabilizovaný zdroj: TTi Thurlby Thandar CPX400SP (v. č.: 363785)

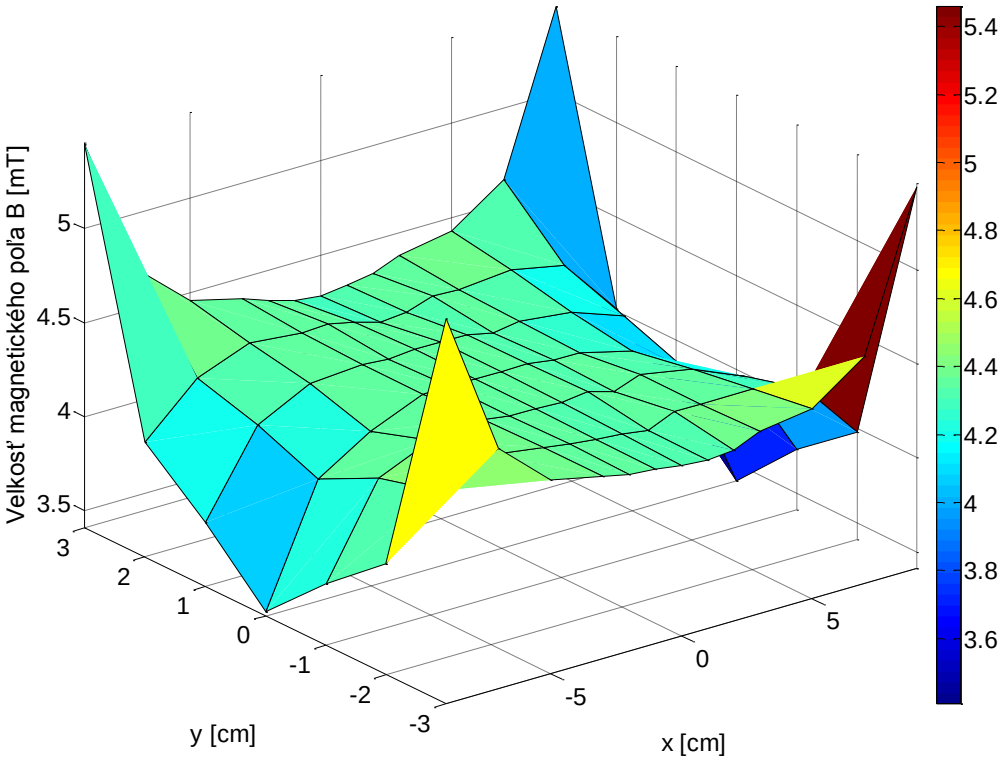
- Laboratórny prípravok: malá Helmholtzova cievka

5.1.3 Postup pri meraní experimentu

Výstup zdroja bol vypnutý a snímač teslametru (v. č.: 1113367, typ snímača STD18-0404) bol umiestnený do stredu cievky. Použitý teslameter bol zvolený ako referenčný snímač vzhľadom k prístrojom pre meranie veľkých magnetických polí. Ako referenčný prístroj bol zvolený z dôvodu najlepších parametrov. Snímač použitého teslametru pracuje na princípe Hallovho javu a je v prevedení plochého snímača. Pri všetkých meraniach s teslametrami (typ 5180) boli použité ploché snímače typu STD18-0404 (axiálny nebol v obsahoch balení). Poloha snímača bola vždy nastavená kolmo na smer snímaného magnetického poľa. Stred roviny cievky je na obr. č. 17 a) označený polohou 0,0 (súradnica x, súradnica y), pretože to je zároveň aj stred Helmholtzovej cievky. Poloha roviny, v ktorej bolo merané magnetické pole, bola horizontálnym stredom cievky (viď obr. č. 17 b). Prístroj bol následne v bode 0,0 vynulovaný. Výhodou vynulovania prístroja v bode 0,0 je prispôsobenie sa prístroja na okolité magnetické pole. Parazitné magnetické pole vzniknuté počas merania magnetického poľa nie je možné žiadnym spôsobom eliminovať. Umiestnenie cievky bolo zvolené čo najďalej od kovovej konštrukcie stola kvôli ovplyvneniu magnetického poľa. Výstup zdroja bol zapnutý a meranie bolo realizované pre dve hodnoty prúdu 1 A, 4 A. Zdroj pracoval v režime konštantného prúdu. Po zapnutí výstupu zdroja bola menená poloha snímača v súradniciach x a y. Krok merania poľa bol zvolený 1 cm v ose x a v ose y bol krok zvolený blízko stredu takktiež na 1 cm v rozsahu ±3 cm. Od 3 cm sa v ose y postupovalo s krokom 2 cm. Veľkosti magnetického poľa v závislosti na polohe snímača sa nachádzajú na obrázkoch číslo 18 a 19. Tabuľky s nameranými hodnotami sa nachádzajú na CD. [29]



Obr. 18) Homogenita magnetického poľa cievky v rovine x-y pre 1A



Obr. 19) Homogenita magnetického poľa cievky v rovine x-y pre 4A

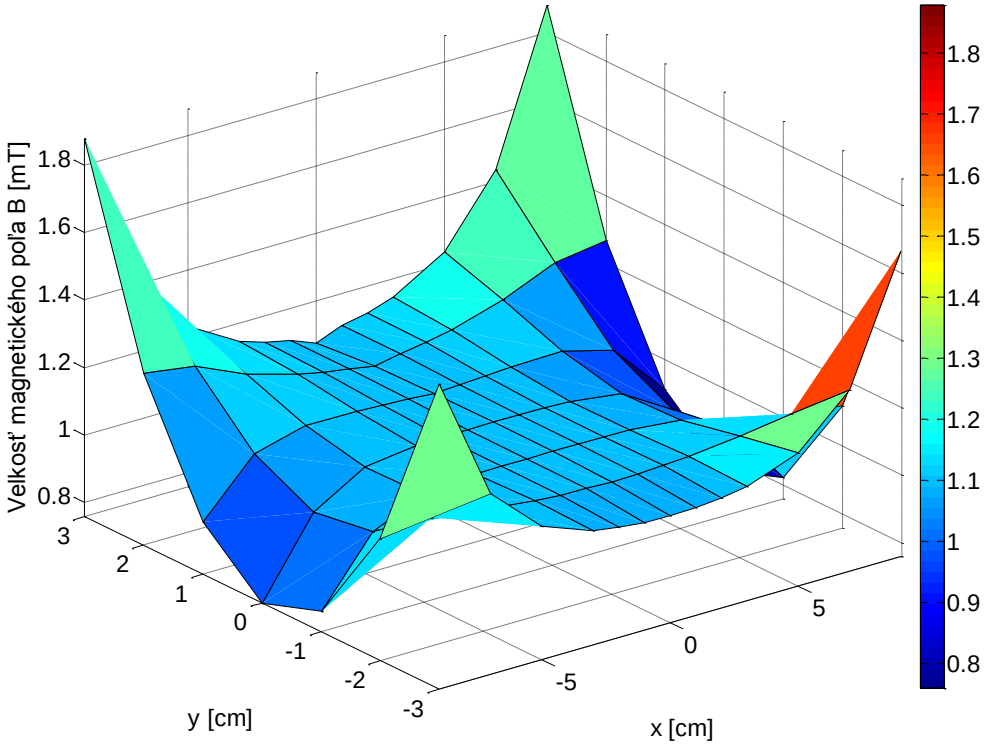
Ako je možné na obrázkoch vidieť, tak homogenita v strede cievky potvrdzuje teoretické predpoklady. Pole v strede cievky je homogénne, a preto je možné v strede cievky merať rôzne druhy snímačov pri rovnakej veľkosti magnetického poľa v závislosti na nastavenej veľkosti pretekajúceho prúdu cievkou.

V rovine merania bola umiestnená doska z textitu, na ktorej sa nachádza mriežka z milimetrového papiera. Pomocou mriežky bolo možné skontrolovať kolmý uhol snímača vzhľadom k magnetickému poľu. Umiestnenie snímača v horizontálnom smere (aj natočenie) malo veľký vplyv na meranie. Z tohto dôvodu bola poloha snímača dôkladne skontrolovaná pri každej zmene polohy snímača.

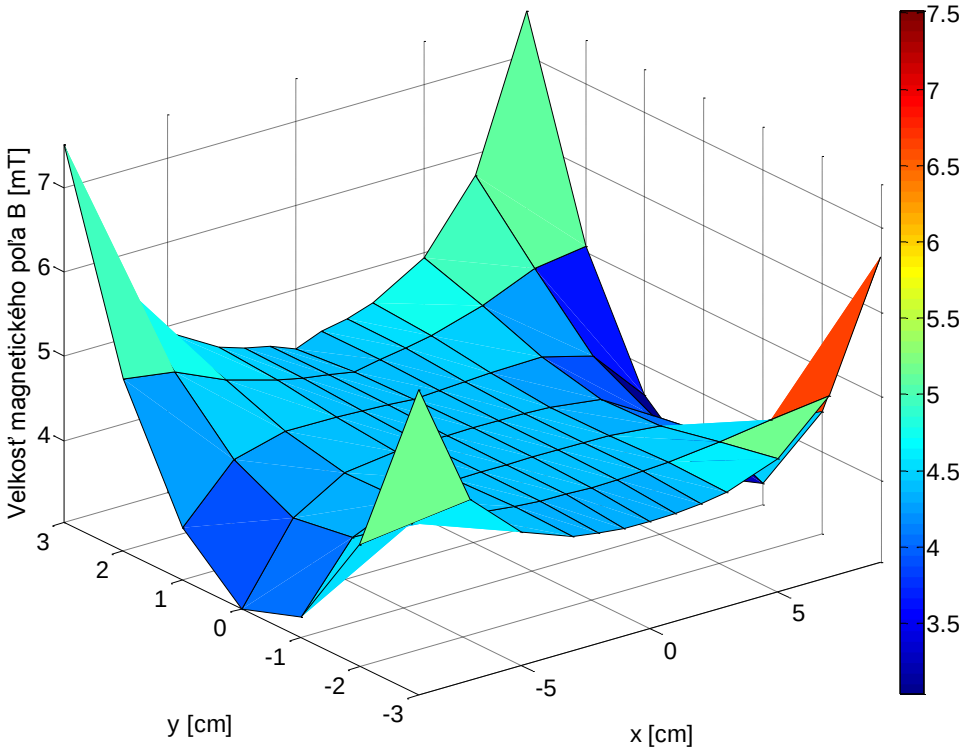
V laboratóriu bola zapnutá klimatizácia z dôvodu konštantnej teploty, ktorá sa pohybovala na hodnote 25±1 °C. Snímač bol ovievaný vzduchom z klimatizácie, aby nedošlo k posunutiu offsetu snímača a ovplyvneniu merania. Pred zmenou prúdu bol snímač vždy vynulovaný (pri prúde cievkou I=0 A).

5.1.4 Model magnetického poľa cievky

Model cievky bol vytvorený v programe Matlab z dôvodu spracovávania výsledkov meraní v tomto programe. Model bolo možné vytvoriť aj pomocou programu Comsol Multiphysics. Model bol prevzatý od autorov:David J. DeTroye a Ronald J. Chase a upravený na cievku použitú pri experimentoch. Bližšie detaily výpočtu matematického modelu sa nachádzajú v citovanom článku „*The Calculation and Measurement of Helmholtz Coil Fields*“ v časti s názvom „*Helmholtz Coil Predicted Results*“. [28]
V modeli nie sú zahrnuté žiadne vplyvy pôsobiace na meranie ako napr. zmena odporu vodiča cievky, zmena prúdu napájania cievky, konštrukčné nedostatky atď. Na obrázkoch č. 20 a 21 je zobrazený model meranej cievky pri prúdoch 1 A, 4 A.

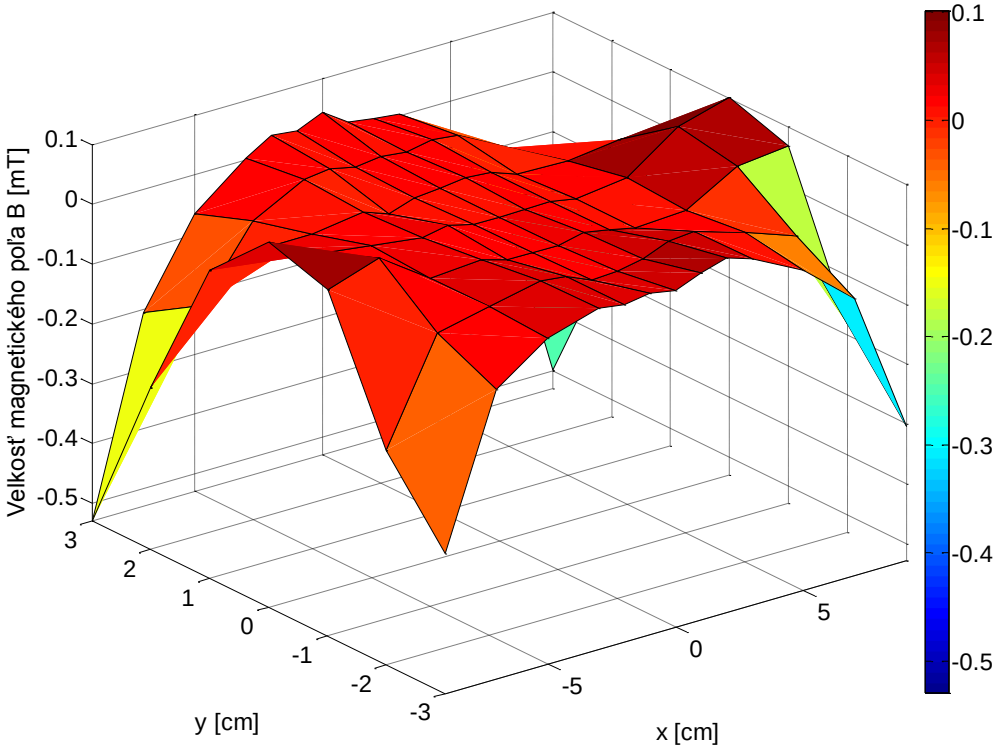


Obr. 20) Homogenita magnetického poľa cievky v rovine x-y pre 1A model [28]

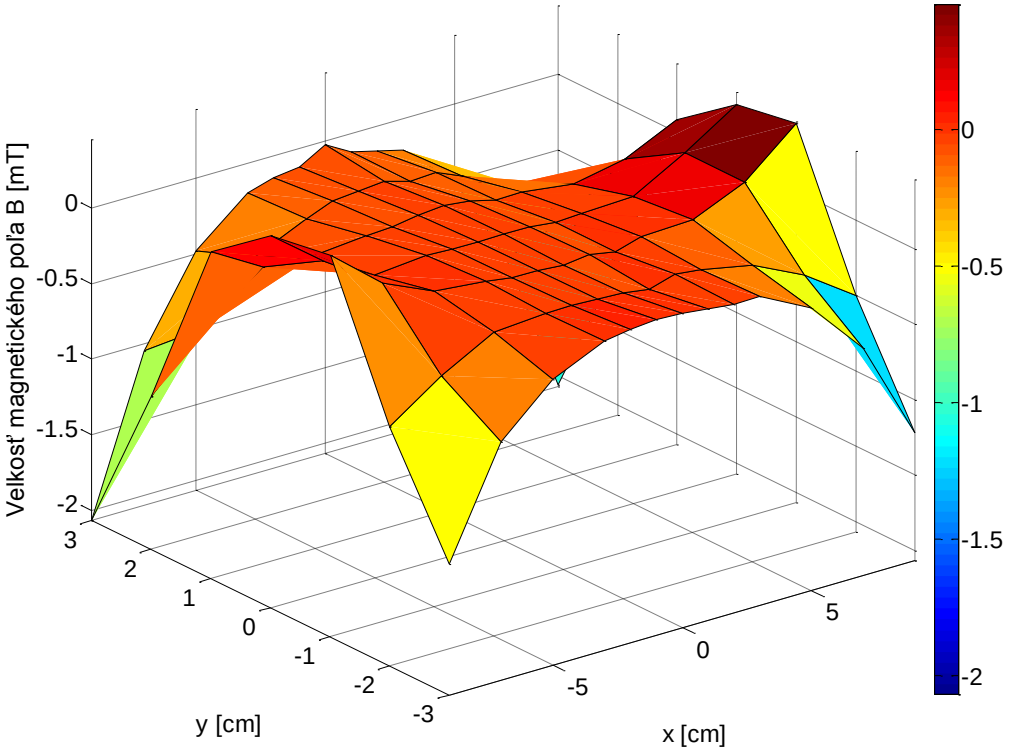


Obr. 21) Homogenita magnetického poľa cievky v rovine x-y pre 4A model [28]

Obrázky potvrdzujú teóriu, ale dôležité je porovnať prax s teóriou. Z tohto dôvodu boli vytvorené obrázky rozdielu nameraného magnetického poľa s teoretickým. Výsledky sú zobrazené na obrázkoch číslo 22 a 23.



Obr. 22) Rozdiel homogenity magnetického poľa v rovine x-y pre 1 A (meranie-model) [28]



Obr. 23) Rozdiel homogenity magnetického poľa v rovine x-y pre 4 A (meranie-model) [28]

Na obrázku číslo 23 je možné vidieť v strede cievky a v jej okolí skoro úplnú zhodu meraného a matematického modelu magnetického poľa. Na okrajoch obrázku je rozdiel najväčší, ako v kladných hodnotách tak aj v záporných hodnotách. Pre vykreslenie modelu a aj rozdielu medzi meraným poľom a teoretickým poľom bol rozsah vykreslenia zmenšený z dôvodu veľkých rozdielov hodnôt. Bolo to spôsobené neistotou umiestnenia snímača. Namerané hodnoty a model cievok sa nachádzajú v priloženom CD.

5.1.5 Významné vplyvy ovplyvňujúce experiment

Pri tomto experimente bolo meranie najviac ovplyvnené neistotou umiestnenia snímača. Snímač bol podrobne kontrolovaný pri každej zmene polohy, a preto na obrázkoch nie je možné vidieť žiadnu hodnotu výrazne odlišnú od okolitých hodnôt. V tomto prípade bola táto chyba minimálna. Najviac sa chyba umiestnenia snímača prejavovala v blízkosti cievok, kde bolo pole najväčšie a kde nebolo možné magnetické pole merať úplne pri vinutiach cievok a len malé natočenie snímača malo veľký vplyv na meranú hodnotu.

S neistotou snímača súvisí aj teplota okolo snímača. Teplota v laboratóriu bola ±1 °C. Z katalógového listu výrobcu je možné vyčítať, že snímač má teplotnú stabilitu 3 µT/°C. Neistota spôsobená teplotou nemohla mať významný vplyv na zmenu meraného magnetického poľa, vzhľadom na tak malú teplotnú zmenu ako je ±1 °C alebo aj ±4 °C v prípade merania cievky, ktorou pretekal prúd 4 A, pričom sa snímač nachádzal v blízkosti cievok.

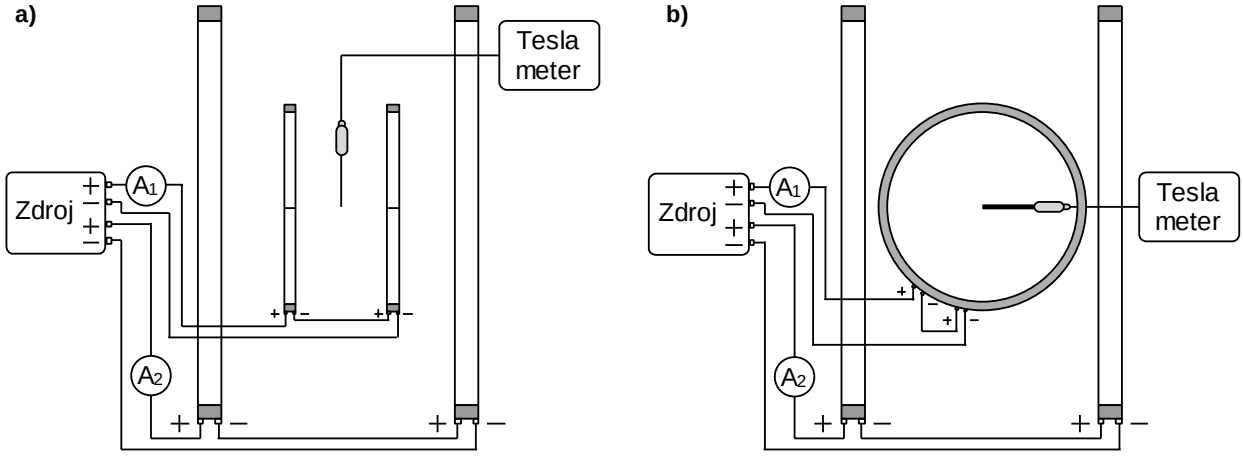
Zdroj bol nastavený na konštantnú hodnotu prúdu. Konštantná hodnota prúdu bola sledovaná pomocou bočníka zapojeného do Agilentu 34410A. Hodnota prúdu sa pohybovala v rozmedzí $\pm 0{,}005$ A. Prúd nebol významným zdrojom neistoty merania.

5.2 Ovplyvnenie magnetického poľa cievky externým zdrojom magnetického poľa

Pri vynulovaní snímača pri nulovom prúde cievkou dokážeme eliminovať parazitné magnetické pole tak, ako bolo uvedené v kapitole č. 5.1.3. Parazitné magnetické pole vzniknuté počas merania magnetického poľa nedokážeme žiadnym spôsobom eliminovať. Z tohto dôvodu bol uskutočnený tento experiment. Pri experimente boli využité dva umiestnenia malej a veľkej cievky. Bodom záujmu bolo meranie magnetického poľa malej cievky (referenčná).

5.2.1 Schéma zapojenia experimentu

Na obrázku číslo 24 sa nachádza schéma zapojenia experimentu.



Obr. 24) Schéma zapojenia experimentu merania ovplyvnenia magnetického poľa cievky externým zdrojom magnetického poľa. a) súosé uloženie cievok (pohľad zhora), b) malá cievka je položená v horizontálnej rovine veľkej cievky (pohľad zhora).

Použité prístroje a ich označenie v schéme zapojenia:

- Ampérmeter č. 1: Agilent 34410A (v. č.: MY47001058)
- Bočník: HP 34330A (v. č.: 9439)
- Ampérmeter č. 2: UNIT-T UT804 (v. č.: 6100019215)
- Teslameter : Gauss/Teslameter: F. W. Bell Model 5180 (v. č.: 1113367)
- Stabilizovaný zdroj: TTi Thurlby Thandar CPX400DP PowerFlex (v. č.: 376615)
- Laboratórny prípravok: malá Helmholtzova cievka
- Laboratórny prípravok: veľká Helmholtzova cievka

5.2.2 Postup pri meraní experimentu

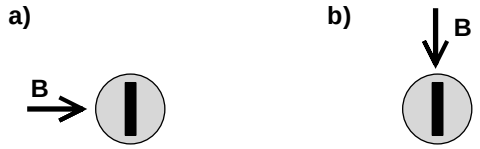
Žiadnou cievkou nepretekal elektrický prúd a snímač teslametru bol umiestnený do stredu malej cievky. Následne bol teslameter vynulovaný. Snímač bol vždy nastavený kolmo na smer snímaného magnetického poľa (malej cievky). Prvé zapojenie je možné vidieť na obr. č. 24 a). V tomto zapojení a uložení cievok sa pri súhlasných prúdoch obidvomi cievkami výsledné polia sčítavali a pri nesúhlasných prúdoch sa odčítavali. Malou cievkou pretekal elektrický prúd (zdroj bol nastavený na konštantnú hodnotu prúdu) a bola odčítaná hodnota magnetického poľa. Pre veľkú cievku meranie prebiehalo rovnako s tým rozdielom, že elektrický prúd pretekal iba veľkou cievkou. Pri poslednom meraní elektrický prúd pretekal obidvomi cievkami a bola odčítaná výsledná hodnota magnetického poľa.

Súčet hodnôt magnetických polí každej cievky, ktoré boli merané osobitne, by sa mal rovnať magnetickému poľu, pri ktorom pretekal prúd obidvomi cievkami. Toto tvrdenie dokazuje tabuľka číslo 3, pri ktorom pretekali prúdy obidvoch cievok v rovnakom smere.

Tab. 3) Hodnoty ovplyvnenia magnetického poľa veľkej a malej cievky v súosom zapojení pre rovnaký smer prúdov pretekajúcich cievkami

	B [mT]	I [A]	B [mT]	I [A]	B [mT]	I [A]
Magnetické pole malej cievky	1,11	1	3,25	3	5,43	5
Magnetické pole veľkej cievky	0,57	1	1,6	3	2,68	5
Magnetické pole obidvoch cievok (merané)	1,65		4,85		8,12	
Súčet polí obidvoch cievok	1,68		4,85		8,11	

Pri druhom zapojení (viď obr. č. 24 b) bol vplyv magnetického poľa veľkej cievky na magnetické pole malej cievky menší. Bolo to spôsobené umiestnením snímača. Pri tomto zapojení nevplývalo magnetické pole veľkej cievky kolmo na rovinu snímača. Na obrázku číslo 25 a) je vplyv magnetického poľa veľkej cievky počas prvého experimentu. Na obrázku číslo 25 b) je vplyv magnetického poľa veľkej cievky počas druhého experimentu.



Obr. 25) Vplyv magnetického poľa veľkej cievky na snímač (pohľad na snímač spredu). a) súosé uloženie cievok b) malá cievka je položená v horizontálnej rovine veľkej cievky

Pre rovnaký smer elektrických prúdov pretekajúcich cievkami sú výsledky merania zobrazené v tabuľke číslo 4.

Tab. 4) Hodnoty ovplyvnenia magnetického poľa veľkej a malej cievky, kde malá cievka je položená v horizontálnej rovine veľkej cievky pre rovnaký smer prúdov pretekajúcich cievkami

	B [mT]	I [A]	B [mT]	I [A]	B [mT]	I [A]
Magnetické pole malej cievky	1,09	1	3,22	3	5,39	5
Magnetické pole veľkej cievky	0,04	1	0,12	3	0,24	5
Magnetické pole obidvoch cievok (merané)	1,13		3,35		5,63	
Súčet polí obidvoch cievok	1,13		3,34		5,63	

5.2.3 Významné vplyvy ovplyvňujúce experiment

Vplyvy pôsobiace na tento experiment sú veľmi podobné ako pri predchádzajúcom experimente. Pri tomto experimente je vplyv umiestnenia snímača malý. Tento predpoklad bol overený pri meraní homogenity magnetického poľa v rovine malej cievky, kde bolo dokázané, že magnetické pole v strede cievky je homogénne.

Po porovnaní hodnôt v tab. č. 3 a č. 4 pri meraní samostatného poľa malej cievky je možné vidieť zmenu hodnôt meraného magnetického poľa. Táto zmena mohla byť spôsobená rôznym umiestnením snímača (aj natočením) a zmenou polohy malej cievky.

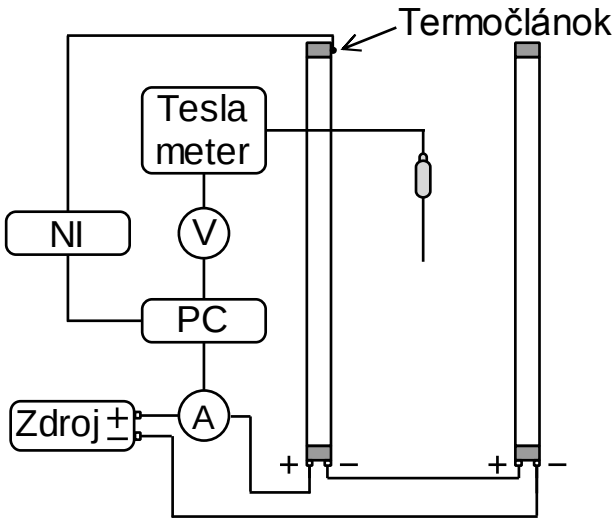
Zdroj bol nastavený na konštantnú hodnotu prúdu. Konštantná hodnota prúdu malej cievky bola sledovaná pomocou bočníka zapojeného do Agilentu 34410A. Hodnota prúdu veľkej cievky bola meraná pomocou multimetra UNIT-T. Merania boli krátke a počas sledovania obidvoch prúdov sa neprejavila žiadna zmena ani jedného z prúdov.

5.3 Teplota cievky ovplyvňujúca veľkosť prúdu a magnetického poľa

Ak cievkou preteká prúd, tak sa cievka zohrieva. Odpor cievky, v závislosti na zvyšujúcej sa teplote, priamoúmerne rastie a klesá vzhľadom na prúd. Pri tomto experimente bolo dokázané, ako veľmi sa zmení prúd pretekajúci cievkou v závislosti na teplote cievky a taktiež, ako sa zmení veľkosť magnetického poľa, v závislosti na zmene prúdu. Snímač bol umiestnený v strede cievky, kde nebolo zabezpečené dostatočné prúdenie vzduchu.

5.3.1 Schéma zapojenia experimentu

Termočlánok bol zapojený v karte NI 9219 na kanále č. 0. Karta NI 9219 bola zapojená v karte NI cDAQ-9171 a táto karta bola následne cez USB pripojená k počítaču. Hodnota teslametra bola snímaná pomocou analógového výstupu Agilentom 34410A. Ampérmeter aj voltmeter boli pripojené pomocou zbernice USB k počítaču. Na obrázku číslo 26 sa nachádza schéma zapojenia experimentu.



Obr. 26) Schéma zapojenia experimentu merania zmeny prúdu pretekajúceho cievkou, magnetického poľa v závislosti na teplote cievky

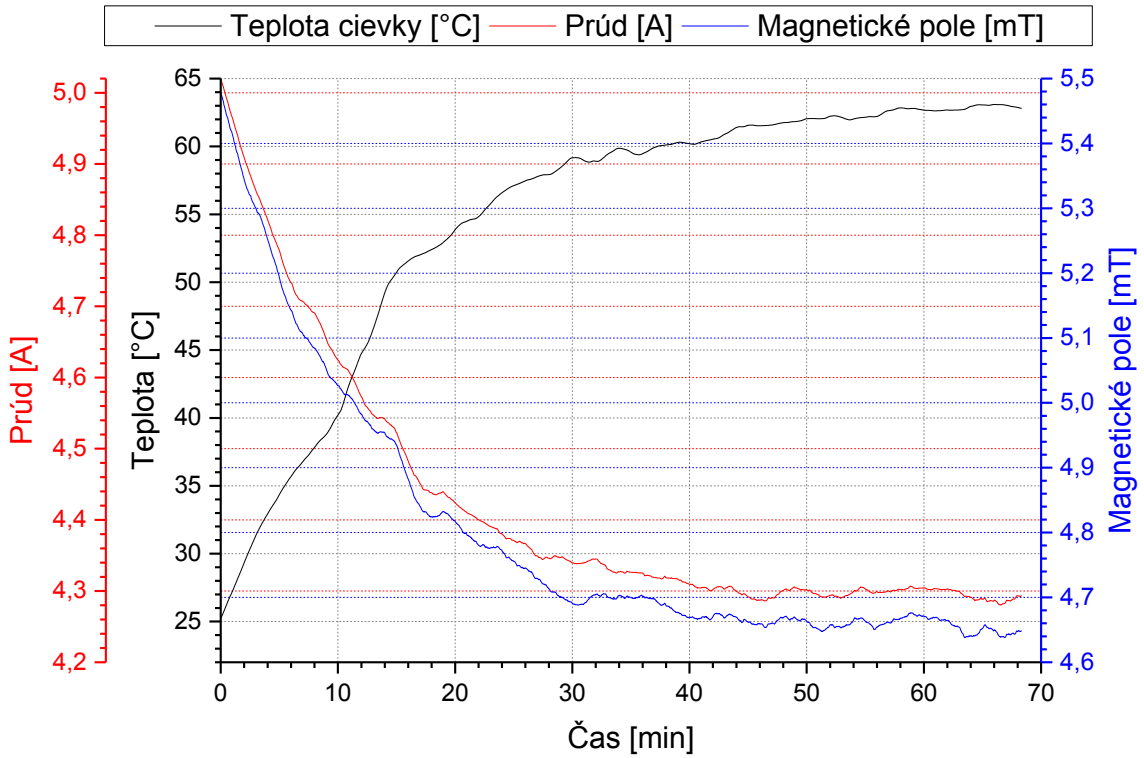
Použité prístroje a ich označenie v schéme zapojenia:

- Ampérmeter: Agilent 34410A (v. č.: MY47001058)
- Voltmeter: Agilent 34410A (v. č.: MY47001031)
- Bočník: HP 34330A (v. č.: 9439)
- Teslameter: Gauss/Teslameter: F. W. Bell Model 5180 (v. č.: 1113367)
- Stabilizovaný zdroj: TTi Thurlby Thandar CPX400SP (v. č.: 363785)
- Laboratórny prípravok: malá Helmholtzova cievka
- PC
- PC: Aplikácia v NI LabView
- NI: cDAQ-9171 (NI CompactDAQ 1-Slot USB Chassis) (v. č.: 1A2AD43)
- NI: 9219 (Universal Analog Input, 24-Bit, 100 S/s/ch, 4 Ch Module) (v. č.: 198848A-01L)
- Termočlánok typu K (chromel-alumel) od firmy Mavis.

5.3.2 Postup pri meraní experimentu

Cievkou nepretekal elektrický prúd a snímač teslametra bol umiestnený do stredu cievky. Následne bol teslameter vynulovaný a bolo potrebné zapnúť analógový výstup. Teslameter bol vynulovaný pred každým meraním. Poloha termočlánku bola zvolená čo najbližšie pri vodičoch cievky. Dôležité je pevné prichytenie termočlánku pri vodičoch cievky. Výstup zdroja bol zapnutý spolu s meracou aplikáciu v rovnakom čase. Zdroj bol nastavený v režime konštantného napätia. So zvyšujúcim sa časom klesal prúd. Každé meranie trvalo 4100 sekúnd s periódou vzorkovania $T_{vz} = 1\,\mathrm{s}$. Meranie bolo realizované pre štyri hodnoty prúdu. Meranie začínalo na hodnote 2 A s krokom 1 A a bolo ukončené pri 5 A. Ukončené bolo pri 5 A z dôvodu vysokej teploty cievky. Po každom meraní bola cievka ochladená na teplotu v laboratóriu. Z dôvodu vyhladenia šumu boli hodnoty pre vykreslenie upravené pomocou plávajúceho priemeru. Na

obrázku číslo 27 sú zobrazené hodnoty merania teploty cievky, prúdu a veľkosť magnetického poľa pri prúde 5 A. Pre ostatné hodnoty prúdov sa obrázky nachádzajú v prílohách.



Obr. 27) Zmena teploty cievky, prúdu cievky a magnetického poľa pre 5 A

Z obrázku číslo 27 je možné vidieť koreláciu medzi všetkými veličinami. Najdôležitejšia je korelácia medzi prúdom a veľkosťou magnetického poľa. V čase 14 až 20 minút je korelácia výrazne viditeľná. Prúd prechádzajúci cievkou a magnetická indukcia boli merané pri experimentoch merania vlastností rôznych snímačov, a preto sú najdôležitejším bodom záujmu merania. Na obrázku číslo 27 bola zmena prúdu $\Delta I = 0{,}74$ A a zmena magnetického poľa $\Delta B = 0{,}84$ mT.

5.3.3 Významné vplyvy ovplyvňujúce experiment

Prúd prechádzajúci cievkou a magnetické pole sú lineárne závislé. Bodmi záujmu skúmania korelácie boli veličiny I a B. Veľkosť lineárnej závislosti dvoch premenných je možné vyjadriť pomocou korelačného koeficientu. Pri meraní veličín je pre výpočet korelačného koeficientu potrebné zabezpečenie konštantných podmienok. V tomto prípade boli tieto podmienky zabezpečené. Na výpočet bol použitý Pearsonov korelačný koeficient $r(x_{i,j})$, v našom prípade označený ako $r(I, B)$. Výpočet koeficientu je možné vypočítať pomocou vzorcov 3.6, 3.21, 3.22 a 3.23. Príklad výpočtu bude zobrazený pre hodnoty z obrázka číslo 27, pri výpočte sú použité hodnoty neupravené plávajúcim priemerom. Príklad výpočtu pre 5 A:

$$I_{ik} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_{ik} = \frac{1}{4100}\sum_{k=1}^{4100} 5{,}03 + 5{,}03 + 4{,}9 + 5{,}012 + \cdots = 4{,}42 \text{ A}$$

$$B_{jk} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} x_{jk} = \frac{1}{4100}\sum_{k=1}^{4100} 0{,}55 + 0{,}54 + 0{,}53 + 0{,}54 + \cdots = 4{,}8 \text{ mT}$$

$$r(I,B) = \frac{u(I,B)}{u(I).u(B)} = \frac{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{k=1}^{n}(I_k - I_{ik})(B_k - B_{jk})}{\sqrt{\frac{1}{(n-1)}\sum_{k=1}^{n}(I_k - I_{ik})^2}.\sqrt{\frac{1}{(n-1)}\sum_{k=1}^{n}\left(B_k - B_{jk}\right)^2}}$$

$$= \frac{\frac{1}{4100.(4099-1)}\sum_{k=1}^{4100}(I_k - 4{,}42)(B_k - 0{,}48)}{\sqrt{\frac{1}{(4100-1)}\sum_{k=1}^{4100}(I_k - 4{,}42)^2}.\sqrt{\frac{1}{(4100-1)}\sum_{k=1}^{4100}(B_k - 0{,}48)^2}}$$

$$= \frac{0{,}0036}{0{,}18.0{,}202} \approx 1$$

Pri tomto meraní z veľkosti koeficientu vyplýva najväčšia možná lineárna závislosť, pretože koeficient môže nadobúdať hodnotu na intervale $< -1; 1 >$. Pre výsledok počítanej korelácie vyšiel koeficient ako vysoká priama lineárna závislosť.

Najväčšie vplyvy pôsobiace pri tomto experimente boli zmena teploty cievky, zmena prúdu prechádzajúceho cievkou a zmena teploty v okolí snímača. Na obrázku číslo 27 je viditeľná výrazná závislosť magnetického poľa na veľkosti prúdu, čo potvrdzuje aj veľkosť korelácie. Z dôvodu overenia tejto závislosti bol uskutočnený nasledujúci experiment. Namerané hodnoty a hodnoty korelácií sa nachádzajú v priloženom CD.

5.4 Teplota cievky vplývajúca na veľkosť magnetického poľa pri konštantnom prúde

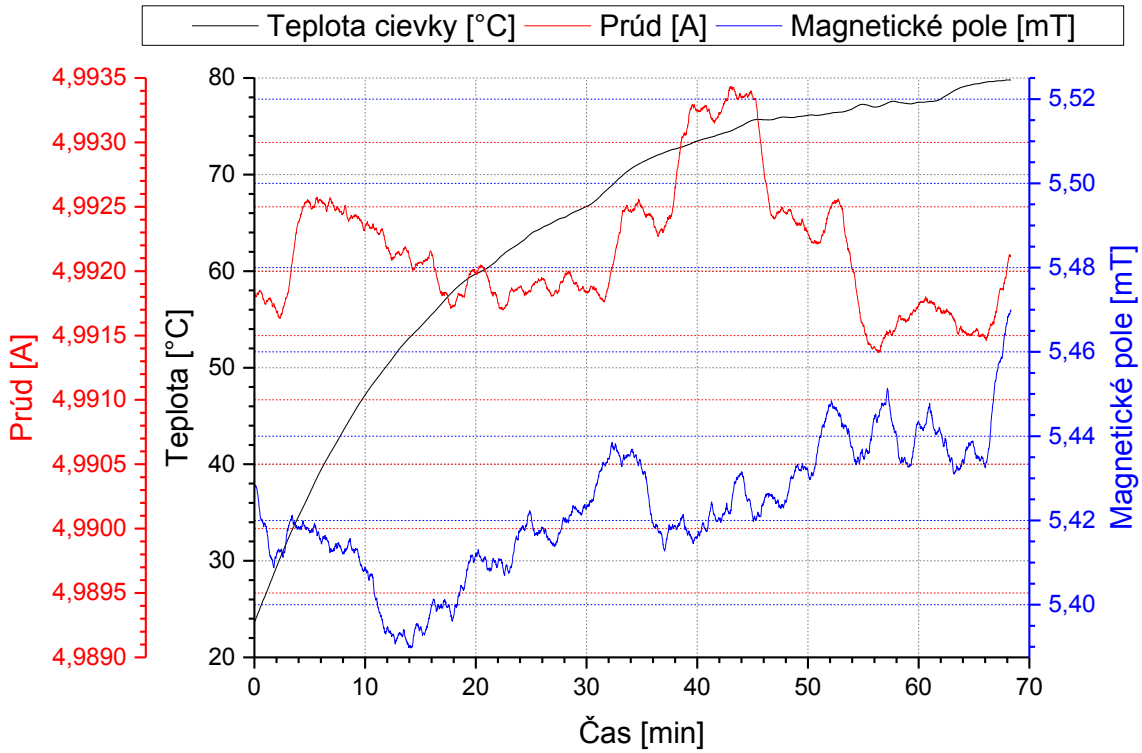
Pri tomto experimente bolo hlavnou úlohou zistiť ako veľmi sa mení veľkosť magnetického poľa v závislosti na zmene teploty v okolí snímača a kolísaní prúdu pri zdroji nastavenom na konštantný prúd. Snímač bol umiestnený v strede cievky, kde nebolo zabezpečené dostatočné prúdenie vzduchu. Pri tomto experimente nebudú diskutované vplyvy ovplyvňujúce meranie, pretože tieto vplyvy sú rovnaké ako pri predchádzajúcom experimente. Pri tomto experimente bola najväčšia hodnota koeficientu $r(I,B) = 0{,}62$ pri prúde prechádzajúcom cievkou 3 A. Korelácia medzi prúdom a magnetickým poľom je výraznejšie menšia z dôvodu nastavenia zdroja na konštantný prúd, v čom je hlavný rozdiel oproti predchádzajúcemu experimentu.

5.4.1 Schéma zapojenia experimentu

Zapojenie experimentu a použité prístroje sú rovnaké ako pri predchádzajúcom experimente. Zapojenie je zobrazené na obrázku číslo 26.

5.4.2 Postup pri meraní experimentu

Cievkou nepretekal elektrický prúd a snímač teslametra bol umiestnený do stredu cievky. Následne bol teslameter vynulovaný a bol zapnutý analógový výstup. Teslameter bol vynulovaný pred každým meraním. Výstup zdroja bol zapnutý spolu s meracou aplikáciu v rovnakom čase. Zdroj bol nastavený v režime konštantného prúdu. Každé meranie trvalo 4100 sekúnd s periódou vzorkovania $T_{vz} = 1$ s. Meranie bolo realizované pre štyri hodnoty prúdu. Meranie začínalo na hodnote 2 A s krokom 1 A a bolo ukončené pri 5 A. Po každom meraní bola cievka ochladená na teplotu v laboratóriu. Z dôvodu vyhladenia šumu boli hodnoty pre vykreslenie upravené pomocou plávajúceho priemeru. Na obrázku číslo 28 sú zobrazené hodnoty merania teploty cievky, prúdu a veľkosť magnetického poľa pri prúde 5 A. Pre ostatné hodnoty prúdov sa obrázky nachádzajú v prílohách.



Obr. 28) Zmena teploty cievky a teploty v okolí snímača pri konštantnom prúde pre 5 A

Na obrázku číslo 28 nie je viditeľná výrazná korelácia medzi prúdom a magnetickým poľom. Prúd sa menil približne v rozmedzí $\Delta I = 2{,}1.10^{-3}$ A. Veľkosť magnetického poľa sa menila v rozmedzí $\Delta B = 0{,}08$ mT. Pri tomto experimente nie je možné zistiť, či

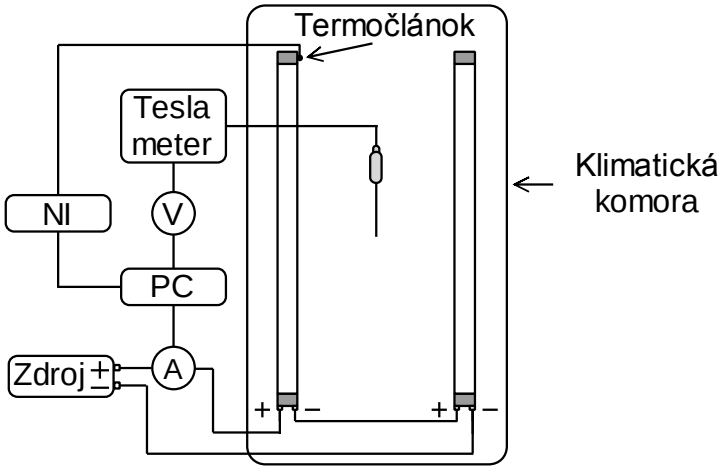
tento rozdiel veľkosti magnetického poľa spôsobila zmena prúdu alebo zmena teploty. Z tohto dôvodu bol realizovaný nasledujúci experiment.

5.5 Veľkosť zmeny magnetického poľa v závislosti na zmene veľkosti prúdu

Pri tomto experimente bolo hlavnou úlohou zistiť, aká je závislosť meraného magnetického poľa v závislosti na veľkosti prúdu pri teplote $\pm 0{,}8\ ℃$ v okolí snímača. Pri relatívne konštantnej teplote v okolí snímača je možné sledovať časovú stabilitu snímača a hodnotu magnetického poľa v závislosti na prúde.

5.5.1 Schéma zapojenia experimentu

Termočlánok bol zapojený v karte NI 9219 na kanále č. 0. Karta NI 9219 bola zapojená v karte NI cDAQ-9171 a táto karta bola následne cez USB pripojená k počítaču. Hodnota teslametra bola snímaná pomocou analógového výstupu Agilentom 34410A. Ampérmeter aj voltmeter boli pripojené pomocou zbernice USB k počítaču. Teplota v komore bola nastavená na $20 \pm 0{,}3\ ℃$. Výrobcom udávaná neistota od želanej hodnoty je $\pm 0{,}3\ ℃$. Hodnota prúdenia vzduchu v komore bola nastavená na 50 %. Pre overenie teploty pri snímači bolo realizované meranie, pri ktorom bol v mieste umiestnenia snímača umiestnený termočlánok. Čas merania bol jedna hodina a prúd cievkou bol nastavený na 5 A. Pri meraní bol maximálny rozdiel teploty na začiatku merania a na konci merania $\Delta T = 0{,}8\ ℃$ pri ustálenej teplote na konci merania. Na obrázku číslo 29 sa nachádza schéma zapojenia experimentu.



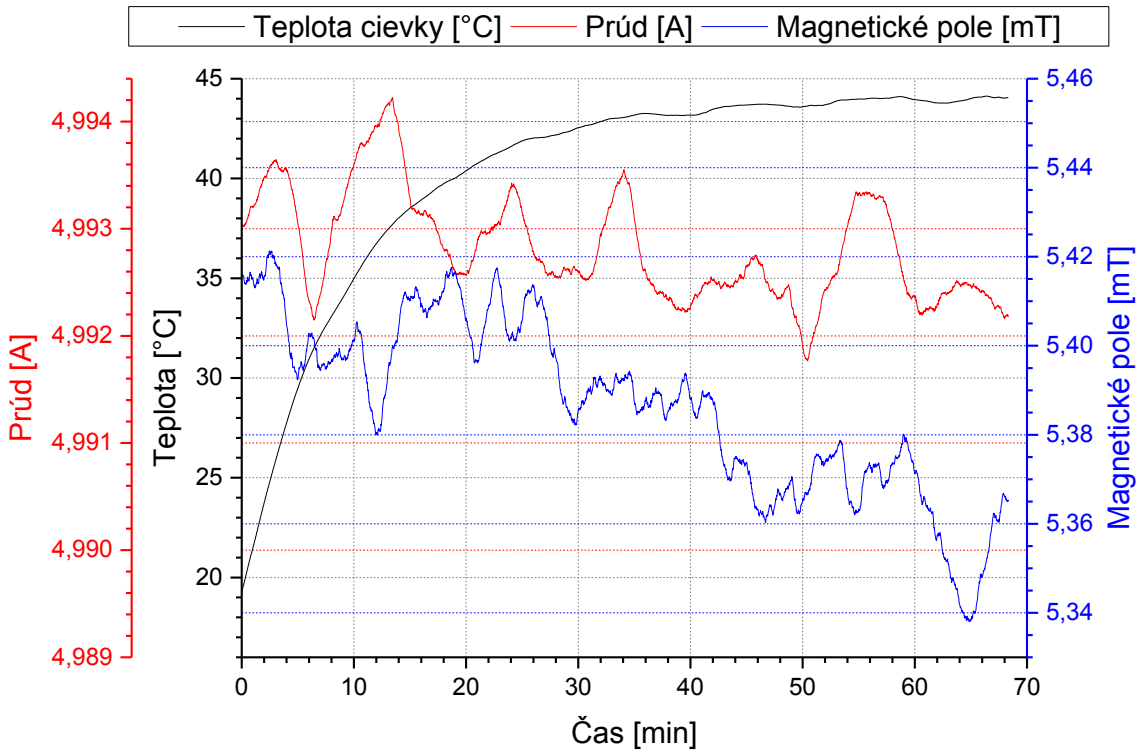
Obr. 29) Schéma zapojenia experimentu merania zmeny magnetického poľa v závislosti na konštantnom prúde

Použité prístroje sa zhodujú s prístrojmi použitými v kapitole 5.4.1, ale je tu na viac použitá:

- Klimatická komora: CTS T-65/50 (v. č.: 127003)

5.5.2 Postup pri meraní experimentu

Cievkou nepretekal elektrický prúd a snímač teslametra bol umiestnený do stredu cievky. Cievka a snímač teslametra boli umiestnené vo vnútri komory. Následne bol teslameter vynulovaný a bol zapnutý analógový výstup. Pred každým meraním bol teslameter vynulovaný. Výstup zdroja bol zapnutý spolu s meracou aplikáciu v rovnakom čase. Zdroj bol nastavený v režime konštantného prúdu. Každé meranie trvalo 4100 sekúnd s periódou vzorkovania $T_{vz} = 1$ s. Meranie bolo realizované pre štyri hodnoty prúdu. Meranie začínalo na hodnote 2 A s krokom 1 A a bolo ukončené pri 5 A. Po každom meraní bola cievka ochladená na teplotu v komore. Z dôvodu vyhladenia šumu boli hodnoty pre vykreslenie upravené pomocou plávajúceho priemeru. Na obrázku číslo 30 sú zobrazené hodnoty merania teploty cievky, prúdu a veľkosť magnetického poľa pri prúde 5 A. Pre ostatné hodnoty prúdov sa obrázky nachádzajú v prílohách.



Obr. 30) Zmena teploty cievky, konštantný prúd a teplota v okolí snímača pre 5 A

Na obrázkoch číslo 30 je viditeľná korelácia medzi hodnotou prúdu a magnetického poľa v čase 2 až 6 minút. Maximálny rozdiel prúdu z vykreslených hodnôt pri 5 A je $\Delta I = 2{,}46.10^{-3}$ A a magnetického poľa $\Delta B = 8{,}33.10^{-3}$ mT.

5.5.3 Významné vplyvy ovplyvňujúce experiment

Pri tomto experimente bolo eliminovaných čo najviac vplyvov ovplyvňujúcich meranie. Teplota okolia snímača bola stabilizovaná na $20 \pm 0{,}8$ °C. Najväčší vplyv na meranie malo umiestnenie snímača, hlavne jeho presnosť kolmého natočenia k meranému

magnetickému poľu. Eliminácia vplyvov ovplyvnila aj korelačný koeficient, ktorý mal maximálnu hodnotu $r(I,B) = -0{,}42$ (nepriama lineárna závislosť) pri prúde pretekajúcom cievkou $I = 4$ A. Podľa Cohena má koeficient strednú veľkosť. Veľkosť koeficientu ovplyvňuje aj dĺžka merania.

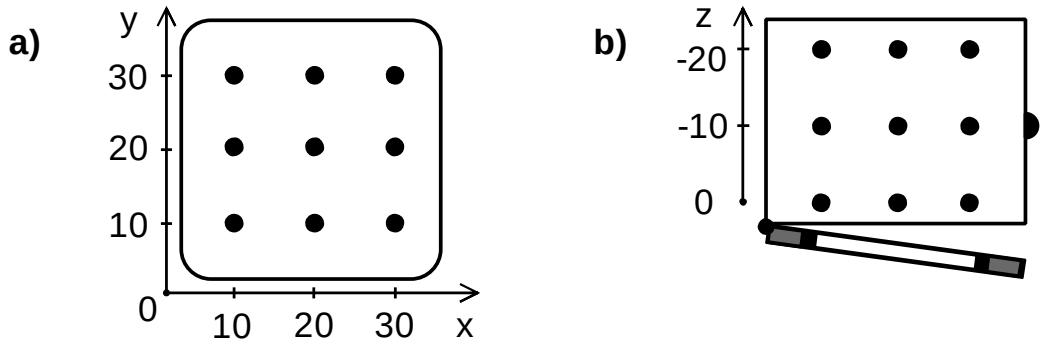
5.6 Meranie magnetického poľa klimatickej komory

Pri predošlých experimentoch (okrem posledného experimentu) bol snímač magnetického poľa značne ovplyvnený teplotou okolia. Zvýšenú teplotu okolia vytvárala cievka, ktorá mala pri prúde 5 A po 68 minútach teplotu 80 °C (viď. obr. č. 28). Pre eliminovanie zvyšovania teploty v okolí snímačov bolo potrebné pri meraniach zabezpečiť rovnaké podmienky merania. Z tohto dôvodu boli všetky ďalšie experimenty uskutočnené v klimatickej komore.

Meranie bolo realizované pomocou prístroja Milligauss Meter 3AXISMGM, ktorého snímač pracuje na princípe fluxgate. Snímač prístroja meria magnetické pole v troch osiach.

5.6.1 Zapojenie experimentu

Zapojenie experimentu spočívalo v umiestňovaní snímača do zvolených bodov v osiach x, y, z. Body umiestnenia snímača sa nachádzajú obrázku číslo 31.



Obr. 31) Body merania pri meraní homogenity magnetického poľa vnútri komory. a) pohľad spredu, b) pohľad zhora

Použité prístroje:

- Klimatická komora: CTS T-65/50 (v. č.: 127003)
- Milligaussmeter: AlphaLab MGM3AXIS (v. č.: 962)

5.6.2 Postup pri meraní experimentu

Komora bola vypnutá a všetky tri osi prístroja boli vynulované. Následne boli odčítané hodnoty magnetického poľa všetkých troch osí prístroja vo všetkých zvolených bodoch merania. Značenie bodu je v súradniciach x, y, z. Následne bola komora zapnutá a postup pri meraní bol rovnaký.

5.6.3 Významné vplyvy ovplyvňujúce meranie

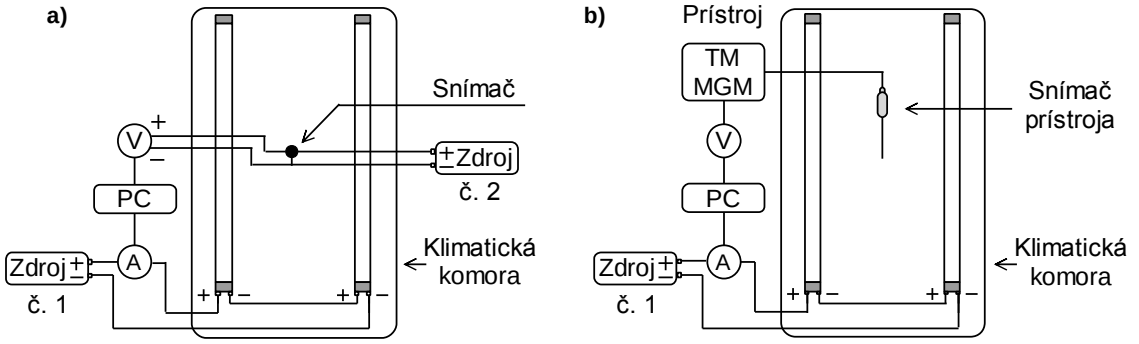
Najväčší vplyv na meranie z dôvodu veľkej citlivosti snímača malo rozdielne uloženie snímača pri zapnutej, vypnutej komore a natočenie vzhľadom na magnetické pole Zeme. Magnetické pole Zeme je približne 20 µT, čo je v prepočte 200 mG. Meranie bolo realizované milligaussmetrom a z tohto dôvodu bolo veľmi dôležité natočenie snímača vzhľadom k magnetickému poľu Zeme. Vplyv teploty nebol taký významný. V mieste merania, kde sa budú nachádzať merané snímače (bod 20, 20, -10), bol maximálny rozdiel 4 µT. Najväčší rozdiel magnetického poľa bol v bode 10, 10, 0 a to 7,5 µT.

6 MERANIE VLASTNOSTÍ MAGNETICKÝCH SNÍMAČOV

K dispozícii bolo viacero druhov snímačov a prístrojov, ktorých snímače pracujú na rôznych princípoch. Pre meranie veľkých magnetických polí boli použité snímače na princípe Hallovho javu. Na meranie menších polí boli použité prístroje na princípe fluxgate a AMR. V závere kapitoly budú diskutované výsledky meraní.

6.1 Schéma zapojenia experimentov

Ampérmeter aj voltmeter boli pripojené pomocou zbernice USB k počítaču. Teplota v komore bola nastavená počas všetkých meraní na hodnotu $20 \pm 0{,}3\ ℃$ a prúdenie vzduchu na 50 %. Každé meranie trvalo maximálne 5 minút a z tohto dôvodu bola teplota na snímači stanovená neistotou komory na $\pm 0{,}3\ ℃$. Teplota v laboratóriu bola $25 \pm 2\ ℃$ a relatívna vlhkosť vzduchu nepresiahla 50 % počas všetkých experimentov. Zapojenie všetkých experimentov sa nachádza obrázku číslo 32.



Obr. 32) Schémy zapojenia experimentov merania vlastností magnetických snímačov. a) zapojenie pre snímače, b) zapojenie pre prístroje.

Na obrázku číslo 32 a) je zobrazené zapojenie pre snímače A1301EUA, A1302KUA, SS49E, SS495A, SS495A1, kde bol použitý ako zdroj číslo 2 Agilent E3631A. Pre snímač HMC5843 bol použitý zdroj AUL 310. Zapojenie b) na obrázku číslo 32 je pre prístroje teslameter (TM) F. W. Bell Model 5180 (aj 5080) a milligaussmeter (MGM) AlphaLab 3AXISMGM.

Použité snímače, prístroje a ich označenie v schéme zapojenia:

- Ampérmeter: Agilent 34410A (v. č.: MY47001058)
- Voltmeter: Agilent 34410A (v. č.: MY47001031)
- Bočník: HP 34330A (v. č.: 9439)
- TM: Gauss/Teslameter: F. W. Bell Model 5180 (v. č.: 1113367)
- TM: Gauss/Teslameter: F. W. Bell Model 5180 (v. č.: 1113308)
- TM: Gauss/Teslameter: F. W. Bell Model 5080 (v. č.: 9927439)

- MGM: AlphaLab 3AXISMGM (v. č.: 962)
- Snímače: A1301EUA, A1302KUA, SS49E, SS495A, SS495A1, HMC5843
- Stabilizovaný zdroj č. 1: TTi Thurlby Thandar CPX400SP (v. č.: 363785)
- Stabilizovaný zdroj č. 1-2: Agilent E3631A (v. č.: 40040975)
- Stabilizovaný zdroj č. 2: AUL 310 (v. č.: 880414)
- Klimatická komora: CTS T-65/50 (v. č.: 127003)
- Laboratórny prípravok: malá Helmholtzova cievka
- PC
- Aplikácia v NI LabView
- NI USB-8451 (v. č.: 15603C6)

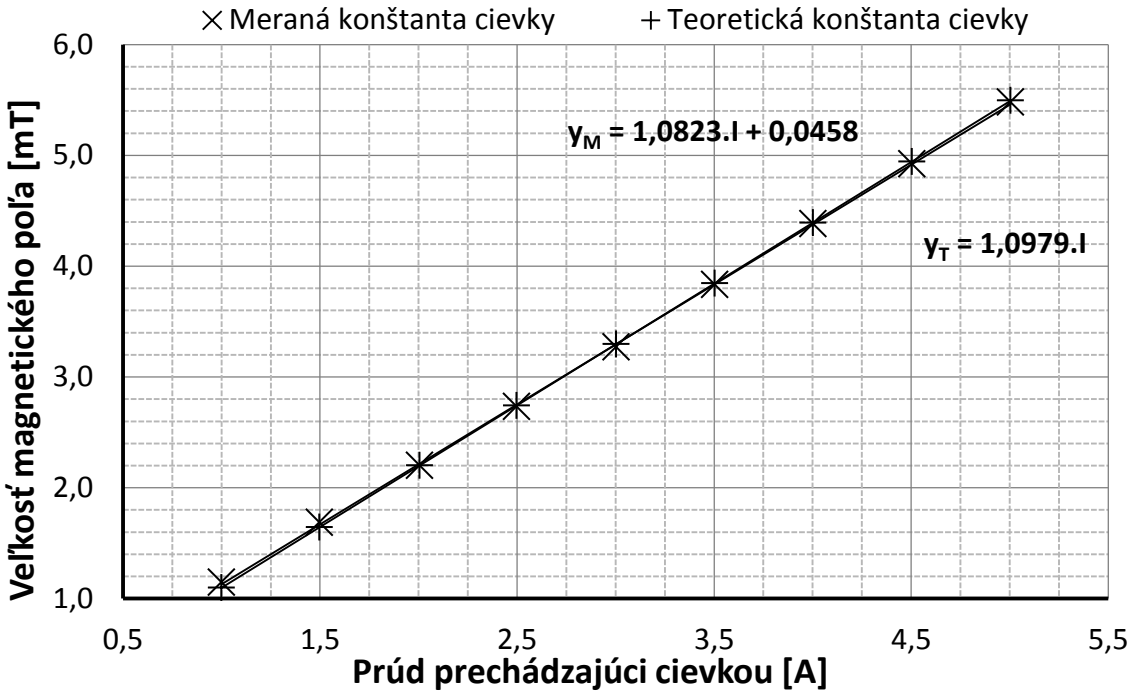
6.2 Meranie veľkých magnetických polí

Na meranie veľkých magnetických polí boli použité snímače a prístroje, ktoré sú zobrazené v tabuľke číslo 5. V tabuľke sú zobrazené základné informácie snímačov a prístrojov. Všetky snímače a aj snímače prístrojov, pracujú na princípe Hallovho javu. Pri prístroji F. W. Bell 5080 boli dva druhy snímačov, a to plochý a axiálny. Výpočet neistôt merania prístroja a snímača sa nachádzajú v kapitolách číslo 6.2.3 - 6.2.6.

Tab. 5) Použité snímače, prístroje pri meraniach veľkých magnetických polí

Výrobca	Označenie	Citlivosť	Rozsah	Snímač / Prístroj
		mv/G	G	
Honeywell	SS496A1	2,5 ± 0,075	± 840	Snímač
Honeywell	SS495A	3,125 ± 0,125	±670	
Honeywell	SS49E	Od 1 do 1,75	±1000	
Allegro	A1301EUA-T	2,5 ± 0,5	neudáva výrobca	
Allegro	A1302KUA-T	1,3 ± 0,3	neudáva výrobca	
F. W. Bell	5180	0,1 V/mT analog. výstup	$\pm 30.10^3$	Prístroj
F. W. Bell	5180	0,1 V/mT analog. výstup	$\pm 30.10^3$	
F. W. Bell	5080	0,1 V/mT analog. výstup	$\pm 30.10^3$	

Vzhľadom k snímačom a prístrojom pre meranie veľkých magnetických polí bol ako referenčný prístroj pre meranie veľkých magnetických polí zvolený prístroj F. W. Bell 5180 (v. č.: 1113367). Tento prístroj bol zvolený z dôvodu najlepších parametrov. Pre overenie presnosti merania prístroja bola odmeraná najprv konštanta cievky, ktorá bola porovnaná s teoretickou konštantou cievky. Schéma zapojenia, viď obrázok číslo 32 b). Výsledná hodnota meranej konštanty sa nachádza na obrázku číslo 33.



Obr. 33) Linearita konštanty cievky meraná pomocou prístroja F. W. Bell 5180

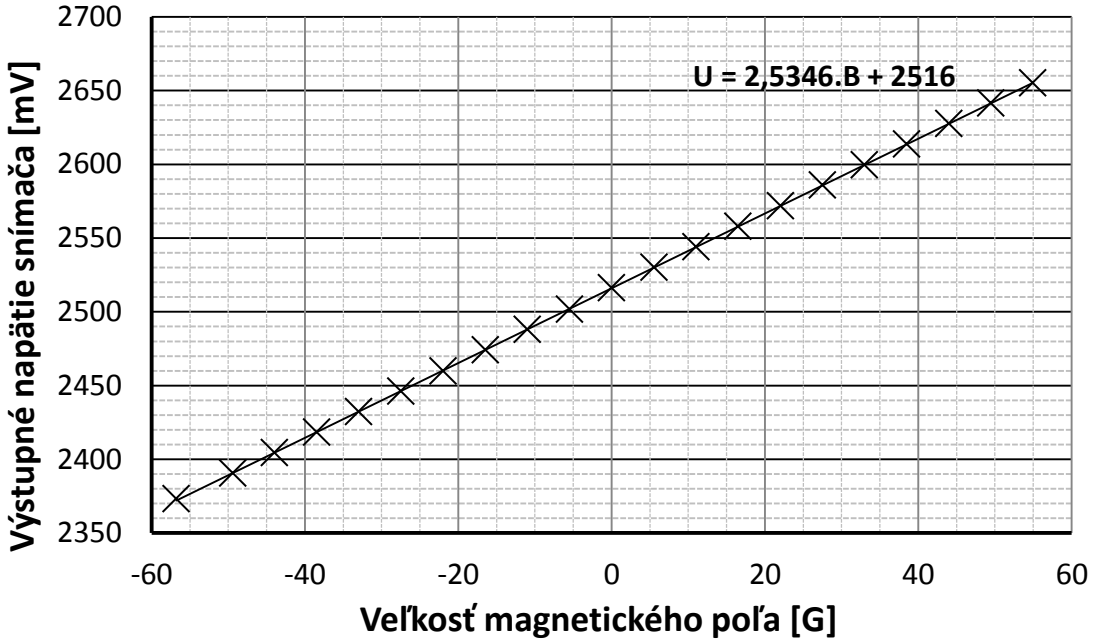
Výpočet teoretickej konštanty cievky sa nachádza v kapitole 5.1 pre prúd prechádzajúci cievkou 1A. Z nameraných hodnôt bola získaná konštanta cievky pomocou metódy najmenších štvorcov. Konštanta cievky z nameraných hodnôt má hodnotu $K = 1{,}0825\ \mathrm{mT.A^{-1}}$. Druhý člen rovnice linearity, ktorý má hodnotu $4{,}58.10^{-2}$, je offset snímača. Teoretická konštanta cievky má hodnotu $K = 1{,}0979\ \mathrm{mT.A^{-1}}$. Absolútny rozdiel medzi meranou a teoretickou konštantou je $\Delta K = 1{,}54.10^{-2}\ \mathrm{mT.A^{-1}}$.

6.2.1 Postup pri meraní experimentov

Cievkou nepretekal elektrický prúd a snímače (aj snímače prístrojov) boli umiestnené do stredu cievky. Na začiatku experimentu je dôležité počkať na ustálenie teploty v komore. Pri prístrojoch je možné začať meranie pri zvolených referenčných hodnotách prúdu prechádzajúcich cievkou. Referenčné hodnoty prúdu prechádzajúceho cievkou boli zvolené od 1 A s krokom 0,5 A až do 5 A.

Pri snímačoch bola veľkosť napájania každého snímača 5V. Meranie je možné začať až po umiestnení snímača do nepájivého poľaPri snímačoch bolo najprv potrebné odmerať linearitu každého snímača. Linearita každého snímača bola meraná v dvoch smeroch prúdu. Pri kladne pôsobiacom magnetickom poli vzhľadom na snímač a pri záporne pôsobiacom magnetickom poli vzhľadom na snímač. Meranie linearity začínalo pri prúde pretekajúcom cievkou -5 A a s krokom 0,5 A bolo ukončené pri hodnote 5 A. Každý bod na priamke sa počítal z priemeru 10 hodnôt výstupného napätia snímača a prúdu pretekajúceho cievkou. Offset snímača pri prúde pretekajúcom cievkou $I = 0$ A bol odmeraný osobitne pred začiatkom každého merania.

Pre snímače a prístroje bol odtiaľto postup pri experimentoch rovnaký. Výstup zdroja bol zapnutý a následne bola zapnutá aplikácia v NI LabWiev. Perióda vzorkovania bola $T_{vz} = 200\ \mathrm{ms}$ a meranie bolo nastavené na 900 hodnôt. Na obrázku číslo 34 sa nachádza odmeraná linearita snímača A1301EUA. Veľkosť magnetického poľa bola pri prúdoch prechádzajúcich cievkou meraných pri linearite snímača vypočítaná pomocou teoretickej konštanty cievky.



Obr. 34) Meraná linearita snímača A1301EUA

6.2.2 Úvod do neistôt

Pri snímačoch je možné určiť neistotu merania z rozptylu meraného napätia. Snímače majú daný rozptyl citlivosti snímača, ktorý je daný výrobou. Z hľadiska toho, že použité snímače sú vyrábané sériovo, nie je možné zabezpečiť to, aby citlivosti dvoch rovnakých snímačov boli rovnaké. Pri použitých snímačoch dokážeme vyhodnotiť, či výrobca dodržal rozptyl citlivosti uvádzaný v katalógovom liste a linearitu snímačov.

Pri prístrojoch je udávaná neistota meranej hodnoty a z tohto dôvodu je možný výpočet neistôt meraného magnetického poľa. Prúd prechádzajúci cievkou bol meraný pomocou bočníka a preto je možné vypočítať nepriamu neistotu prúdu prechádzajúceho cievkou.

Ako bolo spomenuté v kapitole 6.1, tak každé meranie netrvalo dlhšie ako 5 minút. Z tohto dôvodu je možné predpovedať, že koeficient $r(I, B)$ bude nadobúdať malé hodnoty. Pri každom meraní s prístrojmi bol tento koeficient vypočítaný, preto aby bolo možné zistiť veľkosť korelácie medzi I a B.

6.2.3 Výpočet neistôt

Vzorový výpočet neistôt bude zobrazený pre referenčný prístroj pre hodnotu prúdu prechádzajúceho cievkou 3 A.

6.2.4 Výpočet neistoty prúdu

Neistota typu A bola počítaná z 900 hodnôt. Veľkosť korelácie $r(I,B) = 0{,}03$ pre 3 A. Z tohto dôvodu je možné počítať neistotu typu A zo všetkých hodnôt, pretože závislosť medzi veličinami je podľa interpretácie Cohena triviálna.

Meranie prúdu: Bočník: HP 34330A, hodnota odporu $R = 0{,}001\ \Omega$, katalógová hodnota chyby odporu DC - 1kHz $\pm 0{,}03$ %, citlivosť 1 mV/A

Meranie napätia: Agilent 34410A, v režime merania napätia, rozsah 100 mV, udávaná chyba $\pm(0{,}005\ \%$ z čítanej $+\ 0{,}0035\ \%$ z rozsahu)

Prúd je možné vypočítať z Ohmovho zákona $I = U/R$, kde je za napätie dosadený aritmetický priemer nameraných dát a za hodnotu odporu je dosadená hodnota odporu získaná z datasheetu.

$$\bar{V} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} V_i = \frac{2702{,}36}{900} = 3{,}003\ \text{mV}$$

Jednosmerný prúd tečúci obvodom je:

$$I = \frac{\bar{\bar{V}}}{R} = \frac{3{,}003.10^{-3}}{0{,}001} = 3{,}003\ \text{A}$$

Z nameraných hodnôt na voltmetri je možné vypočítať neistotu typu A ako:

$$u_A(U) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(U_i - \bar{V})^2} = \sqrt{\frac{1}{900(900-1)}\sum_{i=1}^{900}(U_i - 3{,}003.10^{-3})^2}$$
$$= 1{,}501.10^{-5}\ \text{mV}$$

Neistotu typu B veličiny X je možné všeobecne stanoviť pomocou vzťahu 3.13. Pri meracích prístrojoch bola zvolená aproximácia rozdelenia $k = \sqrt{3}$ z dôvodu predpokladaného rovnomerného rozdelenia hodnôt.

Príklad výpočtu neistoty typu B pre meranú hodnotu napätia:

$$u_B(U) = \frac{\frac{0{,}005}{100}.\bar{V} + \frac{0{,}0035}{100}.100.10^{-3}}{\sqrt{3}} = \frac{\frac{0{,}005}{100}.3{,}003.10^{-3} + \frac{0{,}0035}{100}.100.10^{-3}}{\sqrt{3}}$$
$$= 8{,}88.10^{-5}\ \text{mV}$$

Príklad výpočtu neistoty typu B bočníka:

$$u_B(R) = \frac{\frac{0{,}3.R}{100}}{\sqrt{3}} = \frac{\frac{0{,}3.0{,}001}{100}}{\sqrt{3}} = 1{,}74.10^{-6}\ \Omega$$

Výstupnou meranou veličinou je prúd a vstupnými veličinami sú napätie a odpor. Pomocou Ohmovho zákona $I = U/R$ je možné vypočítať kombinovanú neistotu prúdu.
Príklad výpočtu kombinovanej neistoty prúdu $u_c(I)$:

$$u_c(I) = \sqrt{\left(\frac{\partial \frac{U}{R}}{\partial U}\right)^2 . (u_A(U)^2 + u_B(U)^2) + \left(\frac{\partial \frac{U}{R}}{\partial R}\right)^2 . u_B(R)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 . (u_A(U)^2 + u_B(U)^2) + \left(-\frac{\bar{V}}{R^2}\right)^2 . u_B(R)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1}{0{,}001}\right)^2 . ((1{,}501.10^{-8})^2 + (8{,}88.10^{-6})^2) + \left(-\frac{3{,}003.10^{-3}}{0{,}001^2}\right)^2 . 1{,}74.10^{-6}}$$

$$= 6{,}6.10^{-3}\ \text{A}$$

Pri výpočte neistoty v programe Excel, ktorý počíta s viacerými desatinnými miestami, vyšla, hodnota $u_c(I) = 7.10^{-3}$ A po zaokrúhlení smerom hore. Pre názornosť celého postupu výpočtu pri výpočte rozšírenej neistoty, sa bude počítať s hodnotou 6.10^{-3} A.

Pre výpočet rozšírenej neistoty $U(I)$ bol zvolený koeficient rozšírenia $k_r = 2$ pre rozšírenie na 95% pri pokrytí neistoty pre normálne rozdelenie.
Príklad výpočtu rozšírenej neistoty merania prúdu $U(I)$:

$$U(I) = k_r . u_c(I) = 2{.}6{,}6.10^{-3} = 1{,}32.10^{-2}\ \text{A}$$

Z dôvodu ovplyvnenia výslednej hodnoty prúdu na dvoch desatinných miestach bol výsledok neistoty zaokrúhlený na $U(I) = 1{,}2.10^{-2}$ A. Po výpočte rozšírenej neistoty je možné zapísať konečný výsledok pre prúd prechádzajúci cievkou 3 A:

$$I = I \pm U(I) = 3{,}003 \pm 0{,}014\ \text{A}$$

6.2.5 Výpočet neistoty referenčného prístroja

Pri meraní veľkých magnetických polí boli použité tri prístroje. Príklad výpočtu bude uvedený pre referenčný prístroj F. W. Bell 5180 pri prúde pretekajúcom cievkou 3 A.

Meranie magnetického poľa: teslameter F. W. Bell 5180, rozsah 30 mT, udávaná chyba analógového výstupu $\pm(0{,}75\%$ z čítanej $+ 6.10^{-3}$ mV)

Neistota typu A bola počítaná z 900 hodnôt. Veľkosť korelácie $r(I, B) = 0{,}07$ pre 3 A.
Z nameraných hodnôt na teslametri je možné vypočítať neistotu typu A ako:

$$\bar{B} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} B_i = \frac{2943{,}81}{900} = 3{,}27 \text{ mT}$$

$$u_A(B) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(B_i - \bar{B})^2} = \sqrt{\frac{1}{900(900-1)}\sum_{i=1}^{900}(B_i - 3{,}27.10^{-3})^2}$$
$$= 7{,}16.10^{-4} \text{ mT}$$

Pre výpočet neistoty typu B teslametra sa používa rovnaká aproximácia $k_r = 2$, ako v kapitole 6.2.4.

Príklad výpočtu neistoty typu B meraného magnetického poľa pomocou prístroja B_p:

$$u_B(B_p) = \frac{\frac{0{,}75}{100}.\bar{B} + 6.10^{-3}}{\sqrt{3}} = \frac{\frac{0{,}75}{100}.3{,}27 + 6.10^{-3}}{\sqrt{3}} = 1{,}77.10^{-2} \text{ mT}$$

Príklad výpočtu neistoty typu B_V pre Agilent 34410A na rozsahu 10 V :

$$u_B(U) = \frac{\frac{0{,}003}{100}.\bar{B} + \frac{0{,}0005}{100}.10}{\sqrt{3}} = \frac{\frac{0{,}005}{100}.3{,}27.10^{-3} + \frac{0{,}0005}{100}.10}{\sqrt{3}} = 8{,}56.10^{-5} \text{ mV}$$

Hodnotu neistoty $u_B(U)$ je potrebné previesť cez prevodnú konštantu na mT nasledovne:

$$u_B(B_V) = \frac{u_B(U)}{K} = \frac{8{,}56.10^{-5}}{0{,}1} = 8{,}56.10^{-4} \text{ mT}$$

Príklad výpočtu kombinovanej neistoty magnetického poľa $u_C(B)$:

$$u_C(B) = \sqrt{\mathrm{u_A(B)}^2 + \mathrm{u_B}\left(B_p\right)^2 + \mathrm{u_B}(B_V)^2}$$
$$= \sqrt{(7{,}16.10^{-4})^2 + (1{,}77.10^{-2})^2 + (8{,}56.10^{-4})^2} = 1{,}78.10^{-2} \text{ mT}$$

Pre výpočet rozšírenej neistoty $U(B)$ bol zvolený koeficient rozšírenia $k_r = 2$.

Príklad výpočtu rozšírenej neistoty U merania magnetického poľa:

$$U(B) = k_r.u_c(B) = 2.1{,}78.10^{-2} = 3{,}6.10^{-2} \text{ mT}$$

Z dôvodu ovplyvnenia výslednej hodnoty prúdu na dvoch desatinných miestach, bol výsledok neistoty zaokrúhlený na $U(I) = 0{,}04$ mT. Zápis výslednej hodnoty merania magnetického poľa:

$$B = B \pm U(B) = 3{,}27 \pm 0{,}04 \text{ mT}$$

6.2.6 Výpočet linearity snímačov

Pri snímačoch magnetického poľa bolo možné chybu lenearity snímačov porovnať s údajmi výrobcu. Pri meraní snímačov bolo meranie hodnoty výstupného napätia pri zvolených referenčných prúdoch merané pre 900 hodnôt.

Linearita snímača je vyjadrená odchýlkou od ideálnej lineárnej charakteristiky. Je možné ju vyjadriť vzťahom:

$$\delta_L = \left(\frac{y_N - y_L}{y_{max} - y_{min}}\right) \tag{6.1}$$

kde y_L je lineárnou náhradou. Veličina y_L je priamka získaná lineárnou aproximáciou pomocou metódy najmenších štvorcov a y_{max}, y_{min} sú horná a dolná medza na meranom rozsahu.

Pri niektorých snímačoch nebol udávaný rozsah merania snímača. Z tohto dôvodu bol za hodnoty y_{max}, y_{min} dosádzaný meraný rozsah pri všetkých snímačoch snímačov, tzn. maximálne namerané napätie a minimálne namerané napätie.
Z obrázku číslo 34 je získaná linearita snímača A1301EUA:

$$y_L = 2{,}5346.B \; + \; 2516$$

Najväčšia hodnota rozdielu:

$$U_N - U_L = 1{,}075 \text{ mV}$$

Rozdiel hodnôt

$$U_{max} - U_{min} = 282{,}089 \text{ mV}$$

Výpočet chyby linearity v percentách:

$$\delta_L = \left(\frac{U_N - U_L}{U_{max} - U_{min}}\right) = \frac{1{,}075}{282{,}089} = 0{,}38\ \%$$

Výrobcom udávaná linearita je $\pm 2{,}5$ %. Vypočítaná chyba nelinearity spadá do rozsahu udávaného výrobcom.

Výpočet hodnoty meraného magnetického poľa pre 5 A snímačom A1301EUA:

$$B = \frac{U_{5A} - U_{offset}}{K} = \frac{2{,}67 - 2{,}52}{2{,}5346} = \frac{93{,}7.10^{-3}}{2{,}5346} = 37 \text{ G} = 3{,}7 \text{ mT}$$

Veľkosť magnetického poľa meraná referenčným snímačom pri 3 A bola 3,27 mT. Ako je možné vidieť, tak rozdiel hodnôt v absolútnej hodnote je $\Delta B = 0{,}43$ mT. Tento rozdiel je dosť značný. Pri hodnote 1A bol tento rozdiel $\Delta B = 0{,}3$ mT.

6.3 Meranie malých magnetických polí

Pre meranie malých magnetických polí bol použitý jeden snímač a jeden prístroj. Ich základné vlastnosti sú zobrazené v tabuľke číslo 6. Ako referenčné hodnoty prúdov prechádzajúcich cievkou boli zvolené hodnoty od 0,03 A s krokom 0,03 A až do 0,15 A. Z dôvodu nestability zdroja CPX400SP pri malých prúdoch prechádzajúcich cievkou na napájanie cievky bol použitý zdroj Agilent E3631A. Hodnota prúdu bola meraná priamo cez prístroj

Tab. 6) Použitý snímač a prístroj pri meraní malých magnetických polí

Výrobca	Označenie	Konštanta mV/G	Rozsah G	Snímač / Prístroj
Honeywell	HMC5843		± 4	Snímač
AlphaLab	3AXISMGM	0,001	± 2	Prístroj

Ako referenčný prístroj pre meranie malých magnetických polí bol zvolený prístroj AlphaLab 3AXISMGM (v. č.: 962). Prístroj bol zvolený z dôvodu priloženého kalibračného listu, ktorý dokazuje dôveryhodnosť nameraných hodnôt. Konštanta cievky bola zmeraná pomocou snímača HMC5843 a jej hodnota je $K = 1{,}1663$. Rozdiel medzi nameranou a teoretickou konštantou je $\Delta K = 6{,}84.10^{-2}$ mT. A^{-1}.

6.3.1 Výpočet neistoty prúdu

Ako zdroj bol použitý Agilent E3631.
Meranie prúdu: Agilent 34410A, v režime merania prúdu, rozsah 1 A,
udávaná chyba $\pm(0{,}1\ \%$ z čítanej $+\ 0{,}01\ \%$ z rozsahu$)$

Výsledná neistota typu A prístroja Agilent 34401A pre 1,2 A:

$$\bar{I} = 120{,}89 \text{ mA}$$
$$u_A(A) = 2{,}67.10^{-4} \text{ mA}$$

Príklad výpočtu neistoty typu B_V pre Agilent 34410A na rozsahu 1 A:

$$u_B(I) = \frac{\frac{0{,}1}{100}.\bar{I} + \frac{0{,}01}{100}.1}{\sqrt{3}} = \frac{\frac{0{,}1}{100}.120{,}89\ .10^{-3} + \frac{0{,}01}{100}.1}{\sqrt{3}} = 1{,}28.10^{-4} \text{ A}$$

Príklad výpočtu kombinovanej neistoty prúdu $u_C(I)$:

$$u_C(I) = \sqrt{u_A(I)^2 + u_B(I)^2} = \sqrt{(2{,}67.10^{-7})^2 + (1{,}28.10^{-4})^2} = 1{,}28.10^{-4} \text{ mA}$$

Pre výpočet rozšírenej neistoty $U(B)$ bol zvolený koeficient rozšírenia $k_r = 2$.
Príklad výpočtu rozšírenej neistoty U merania prúdu:

$$U(I) = k_r.u_c(B) = 2.\,1{,}28.10^{-4} \ = 2{,}56.10^{-4} \text{ mA}$$

Zápis výslednej hodnoty merania magnetického poľa:

$$I = I \pm U(I) = 120{,}89 \pm 0{,}27 \text{ mA}$$

6.3.2 Výpočet neistoty referenčného prístroja

Pre snímač a aj prístroj bolo meraných pri zvolených referenčných prúdoch 900 hodnôt. V tejto kapitole nebudú podrobne prebraté všetky základné postupy pri spracovaní dát

a výpočtov základných štatistických charakteristík tak, ako v predchádzajúcej kapitole. Zobrazené výpočty sú uvedené pre prúd prechádzajúci cievkou 0,12 A.

Výsledná neistota typu A prístroja AlphaLab 3AXISMGM:

$$\bar{B} = 1340{,}59 \text{ mG}$$
$$u_A(B) = 2{,}15.10^{-6} \text{ mG}$$

Príklad výpočtu neistoty typu B meraného magnetického poľa pomocou prístroja B_p (počítané s chybou analógového výstupu prístroja 0,5 %):

$$u_B(B_p) = \frac{0{,}5\ \%.\bar{B}}{\sqrt{3}} = \frac{\frac{0{,}5}{100}.1340{,}59}{\sqrt{3}} = 3{,}87 \text{ mG}$$

Príklad výpočtu neistoty typu B_V pre Agilent 34410A na rozsahu 10 V :

$$u_B(\mathrm{U}) = \frac{\frac{0{,}003}{100}.\bar{B} + \frac{0{,}0005}{100}.10}{\sqrt{3}} = \frac{\frac{0{,}005}{100}.1340{,}59.10^{-3} + \frac{0{,}0005}{100}.10}{\sqrt{3}}$$
$$= 5{,}21.10^{-5} \text{ V}$$

Hodnotu neistoty $u_B(\mathrm{U})$ jr potrebné previesť cez prevodnú konštantu prístroja na mG nasledovne:

$$u_B(B_V) = \frac{u_B(U)}{K} = \frac{5{,}21.10^{-5}}{0{,}001} = 5{,}21.10^{-2} \text{ mG}$$

Príklad výpočtu kombinovanej neistoty magnetického poľa $u_C(B)$:

$$u_C(B) = \sqrt{u_A(B)^2 + u_B(B_p)^2 + u_B(B_V)^2}$$
$$= \sqrt{(2{,}15.10^{-6})^2 + (3{,}87.10^{-1})^2 + (8{,}56.10^{-4})^2} = 3{,}9 \text{ mG}$$

Pre výpočet rozšírenej neistoty $U(B)$ bol zvolený koeficient rozšírenia $k_r = 2$.
Príklad výpočtu rozšírenej neistoty U merania magnetického poľa:

$$U(B) = k_r.u_c(B) = 2.3{,}9 = 7{,}8 \text{ mG}$$

Zápis výslednej hodnoty merania magnetického poľa:

$$B = B \pm U(B) = 1340 \pm 8\text{mG}$$

6.3.3 Výpočet linearity a neistoty snímača

Postup výpočtu linearity snímača HMC5843 je pri použití vzorca 6.1 rovnaký ako v kapitole 6.2.6
Výsledná rovnica linearity snímača HMC5843:

$$y_L = 11{,}663.B - 133{,}27$$

Hodnota rozdielu:

$$B_N - B_L = 1{,}073 \text{ mG}$$

Pri tomto snímači výrobca udáva rozsah, a preto bude počítaná z celého rozsahu:

$$B_{max} - B_{min} = 4000 \text{ mG}.$$

Výpočet chyby linearity v percentách:

$$\delta_L = \left(\frac{y_N - y_L}{B_{max} - B_{min}}\right) = \frac{1{,}073}{4000} = 0{,}27\ \%$$

Výrobcom udávaná linearita je $\pm 0{,}1$ %. Vypočítaná chyba nelinearity nespadá do rozsahu udávaného výrobcom.

Výpočet neistôt je pri prúde prechádzajúcom cievkou 0,12 A.
Výsledná neistota typu A prístroja snímača HMC5843:

$$\bar{B} = 1241{,}89 \text{ mG}$$

$$u_A(B) = 1{,}66.10^{-2} \text{ mG}$$

Výslednú neistotu typu B vypočítame pomocou znalosti A/D prevodníku. V snímači je použitý 12 bitový A/D prevodník. Zo znalosti rozsahu snímača a rozlíšenia prevodníka je možné vypočítať kvantizačnú chybu q A/D prevodníka. Predpokladom je zaokrúhľovanie menšej hodnoty ako 0,5 dole a väčšej hodnoty hore. To ale nie je možné z katalógového listu zistiť.

Výpočet kvantizačnej chyby q A/D prevodníku snímača HMC:

$$u_B(q) = \frac{\frac{rozsah}{2^{12}}}{2} = \frac{\frac{8}{4096}}{2} = 9{,}77.10^{-4} \text{ G} = 0{,}977 \text{ mG}$$

Príklad výpočtu kombinovanej neistoty magnetického poľa $u_C(B)$:

$$u_C(B) = \sqrt{\mathrm{u_A(B)}^2 + u_B(q)^2} = \sqrt{(1{,}66.10^{-2})^2 + (0{,}977)^2} = 0{,}98 \text{ mG}$$

Pre výpočet rozšírenej neistoty $U(B)$ bol zvolený koeficient rozšírenia $k_r = 2$.
Príklad výpočtu rozšírenej neistoty U merania magnetického poľa:

$$U(B) = k_r . u_c(B) = 2.0{,}018.10^{-3} = 1{,}96 \text{ mG}$$

Z dôvodu veľkej hodnoty offsetu až -133,27 mG bolo potrebné tento offset odpočítať od meranej hodnoty. Výpočet hodnoty meraného magnetického poľa pre 0,12 A snímača MHC58436 :

$$B = B_{mer} - offset = 1241{,}89 - (-133{,}27) = 1374{,}23$$

Zápis výslednej hodnoty merania magnetického poľa:

$$I = I \pm U(B) = 1374 \pm 2 \text{ mG}$$

6.4 Diskusia výsledkov

Ako prvý experiment bol zvolený meranie homogenity poľa cievky v rovine x, y (viď kap. 5.1). Dostupných bolo niekoľko Helmholtzových cievok. Cievka vybraná na meranie snímačov bola malá Helmholtzova cievka z dôvodu jej najväčšej konštanty, ktorej hodnota je $K = 1{,}0979\ \mathrm{mT.A^{-1}}$. Pre overenie homogenity generovaného poľa bolo uskutočnené meranie homogenity poľa cievky v rovine x, y (viď obr. č. 18, 19). Na nasledujúcich obrázkoch (viď obr. 20-23) sa nachádza porovnanie matematického modelu homogenity poľa s meranou homogenitou poľa. Na obrázkoch je možné vidieť v strede cievky malé odchýlky meraného poľa od matematického modelu. So vzďaľovaním sa snímača od stredu cievky bol rozdiel hodnôt výraznejší. Merania snímačov prebiehali v strede cievky. Tento rozdiel je spôsobený hlavne neistotou umiestnenia snímača.

Pri druhom experimente bol skúmaný vplyv externého poľa na veľkosť poľa cievky (viď kap. 5.2). Pri meraní bol potvrdený vplyv externého poľa. Veľmi dôležité bolo umiestnenie snímača a cievky generujúcej externé pole vzhľadom na merané pole snímačom. Pri súosom umiestnení cievok sa polia sčítavali tzn. vplyv externého poľa bol najväčší. Pri umiestnení malej cievky v horizontálnej rovine cievky veľkej cievky, externé pole nepôsobilo na rovinu merania snímača ako je možné vidieť na obrázku číslo 25, tzn. malý vplyv externého poľa.

Lineárna závislosť medzi veľkosťou prúdu prechádzajúceho cievkou a veľkosťou magnetického poľa v strede cievky vyjadruje vzťah 4.6. Z tohto dôvodu boli uskutočnené experimenty, pri ktorých bola skúmaná táto závislosť. Pri prvom experimente bol zdroj prúdu prechádzajúceho cievkou nastavený na konštantnú hodnotu napätia. Pri zvyšujúcej sa teplote cievky prúd prechádzajúci cievkou klesal v závislosti na ňom, klesalo aj merané magnetické pole. Veľkosť korelačného koeficientu medzi prúdom a magnetickým poľom bola skoro pri všetkých hodnotách prúdu blízko jednej. Pri nasledujúcom experimente bol zdroj nastavený na konštantnú hodnotu prúdu a veľkosť magnetického poľa bola ovplyvnená teplotou v okolí snímača a časovou nestabilitou snímača prístroja. Tento experiment dokázal, ako veľmi ovplyvňuje teplota a časová nestabilita hodnotu meraného magnetického poľa. Zaujímavá je veľkosť koeficientu pri prúde prechádzajúcom cievkou 3 A, kde dosahuje veľkosť $r(I, B) = 0{,}619$ (veľká závislosť premenných), pričom pri prúde 5 A dosahuje hodnotu $r(I, B) = -0{,}063$ (nepriama lineárna závislosť). Počas posledného experimentu boli zabezpečené najlepšie podmienky merania. Meranie prebiehalo v klimatickej komore a teplota v okolí snímača sa pohybovala s rozptylom $\pm 0{,}8\ °C$. Zdroj bol nastavený na konštantnú hodnotu prúdu. Veľkosť koeficientu $r(I, B) = -0{,}418$ bola najväčšia pri prúde prechádzajúcom cievkou 3 A. Veľkosti korelácií boli ovplyvnené hlavne dĺžkou časového intervalu merania.

Najväčší rozdiel veľkosti magnetického poľa medzi zapnutou a vypnutou komorou bol 4 μT. Pri meraní veľkých magnetických polí je táto hodnota pod

rozlíšiteľnosťou prístrojov. Pri meraní malých magnetických polí sa táto hodnota môže prejaviť a ovplyvniť veľkosť magnetického poľa.

Meranie veľkých magnetických polí pozostávalo z merania prístrojov a snímačov. Ako referenčný prístroj bol zvolený teslameter F. W. Bell Model 5180 (v. č.: 1113367). Z výsledných hodnôt neistôt bolo dokázané, že tento prístroj dokazoval najmenšiu neistotu spomedzi prístrojov použitých pri meraní a bol dokázaný správny výber prístroja. Pri 5 A bola rozšírená neistota tohto prístroja $\pm 0{,}06$ mT. Rovnaký model tohto prístroja dosahoval pri $5\,A$ rovnakú neistotu. Pri prístroji od rovnakej firmy s modelovým označením 5080 boli merané dva snímače prístroja, a to axiálny a plochý. S axiálnym snímačom bola rozšírená neistota prístroja rovnaká ako s plochým snímačom a to $\pm 0{,}07$ mT. Citlivosti prístrojov boli získané z technických dokumentácií výrobcov. Hodnota magnetického poľa meraná, pomocou snímačov bola, porovnávaná s hodnotou referenčného prístroja. Ani jeden zo snímačov nemal väčšiu chybu linearity ako bola hodnota udávaná výrobcom. Najväčšiu chybu linearity mal snímač SS49E, ktorej hodnota bola 1,1 % a najmenšiu chybu dosahoval snímač A1302KUA s hodnotou 0,15 %. Rozsahy citlivostí boli taktiež splnené pri všetkých snímačoch. Najväčšiu chybu voči referenčnému prístroju pri zvolených referenčných hodnotách prúdov dosahoval snímač SS495A s priemernou hodnotou 41,8 %. Najmenšou chybou sa vyznačoval snímač A1302KUA s priemernou hodnotou 4,78 %. Veľkosti neistôt prúdu boli pri všetkých merania podobné. Pre zaujímavosť, snímače SS496A1 a SS495A majú rovnakú citlivosť. Veľkosť magnetického poľa zeme taktiež ovplyvnila meranie. Po vložení snímača A1301EUA do dutinky na vyrušenie okolitého magnetického poľa sa veľkosť výstupného napätia snímača zmenila o 0,5 mV. Magnetické pole Zeme má hodnotu približne 200 mG. Príklad výpočtu napätia je nasledovný:

$$U = K.B = 0{,}2.2{,}5346 = 0{,}51 \text{ mV}$$

Pri meraní malých magnetických polí bol použitý prístroj AlphaLab 3AXISMGM a snímač HMC5843. Ako je možné vidieť na obrázku číslo 5, tak AMR snímače (HMC5843) sú o jednu citlivostnú triedu vyššie ako fluxgate snímače (3AXISMGM). Hodnota chyby linearity snímača HMC5843 dosahovala hodnotu 0,27 %. Výrobcom udávaná maximálna chyba linearity je 0,1 %. Ako referenčný prístroj bol zvolený 3AXISMGM. Z vypočítaných neistôt prístroja a snímača v kapitolách 6.3.2 a 6.3.3 vyplýva nesprávny výber referenčného prístroja. Maximálny rozdiel medzi meraným a teoretickým poľom pri prístroji 3AXISMGM bol -89 G, pri prúde prechádzajúcom cievkou 0,15 A, pričom pri predchádzajúcej hodnote prúdu bol rozdiel 13 G. Pri snímači HMC5843 bol dokonca podobný ako pri prístroji a to 93 G pri prúde prechádzajúcom cievkou 0,15 A. Takto citlivé snímače zaznamenávajú veľkosť magnetického poľa Zeme. Z tohto dôvodu bolo veľmi dôležité aj umiestnenie snímača vzhľadom k tomuto poľu. Pri meraní takto citlivých snímačov je potrebné eliminovať čo najviac parazitných magnetických polí. Pre meranie snímačov tohto druhu je potrebné zabezpečiť vhodnejšie podmienky merania čo nebolo bohužiaľ možné. Veľká chyba pri meraní mohla byť spôsobená nevhodne zvolenou metódou merania.

7 ZÁVER

Cieľom teoretickej časti práce bolo zoznámiť čitateľa s neistotami priamych a nepriamych meraní. Ako úvod do kapitoly s neistotami boli čitateľovi priblížené chyby merania (viď kap. 2). V kapitole 3 sú popísané metódy výpočtov neistôt priamych a nepriamych meraní s popísaným vyhodnotením neistôt pri každej metóde merania.

Nasledujúcim cieľom práce bolo naštudovanie problematiky magnetických snímačov (viď kap. 4). V práci sú popísané rôzne snímače pracujúce na rôznych princípoch. Kapitola bola písaná v logickom slede vzhľadom na zložitosť princípov. Medzi snímače pracujúce na jednoduchých princípoch sa radia fluxgate snímače a hallove snímače. Ďalšou skupinou snímačov boli snímače pracujúce na princípe magnetorezistencie. Popísané snímače založené na tomto princípe boli snímače AMR, GMR a nakoniec TMR. V poslednej a principiálne najzložitejšej časti snímačov boli popísané princípy magneto-optických a magnetických rezonančných magnetických snímačov.

Úlohou praktickej časti práce (viď kap. 5, 6) bolo navrhnúť experimenty pre meranie magnetického poľa (ďalej len poľa) v jednoosej Helmholtzovej cievke vzhľadom na dostupné vybavenie ÚAMT.

V úvode praktickej časti bola homogenita magnetického poľa meraná pomocou poľa, ktoré bolo vytvorené pomocou Helmholtzovej cievky. Namerané výsledky sú zobrazené na obrázkoch číslo 18 a 19. Homogenita meraného magnetického poľa zodpovedá matematickému modelu magnetického poľa hlavne v strede cievky. Čím bližšie sa snímač nachádza k vinutiam cievok, tým je rozdiel medzi meraním a modelom väčší. Tento rozdiel je spôsobený hlavne neistotou umiestnenia snímača.

Pri druhom experimente bol skúmaný vplyv externého poľa na veľkosť poľa cievky (viď kap. 5.2). Pri meraní bol potvrdený vplyv externého poľa. Veľmi dôležité bolo umiestnenie snímača a cievky generujúcej externé pole vzhľadom na merané pole snímačom. Pri súosom umiestnení cievok sa polia sčítavali tzn. vplyv externého poľa bol najväčší. Pri umiestnení malej cievky v horizontálnej rovine cievky veľkej cievky, externé pole nepôsobilo na rovinu merania snímača ako je možné vidieť na obrázku číslo 25 tzn. malý vplyv externého poľa.

Pri treťom okruhu experimentov bola skúmaná závislosť medzi prúdom a veľkosťou poľa pomocou korelačných koeficientov (viď kap. 5.3, 5.4, 5.5). Pri prvom experimente bola veľkosť korelačného koeficientu $r(I,B) = 1$ čo znamená najväčšiu závislosť premenných. Pri druhom experimente dosahoval korelačný koeficient hodnotu $r(I,B) = 0{,}619$ čo je menšia závislosť medzi prúdom a poľom. Pri poslednom experimente bol koeficient $r(I,B) = -0{,}418$. Na veľkosť koeficientov mal v prvom rade najväčší vplyv prúd a v druhom rade teplota v okolí snímača. Bližší popis sa nachádza v kapitole 6.4. V kapitole číslo 5.6 je popísaný rozdiel poľa medzi vypnutou a zapnutou komorou ktorý bol maximálne 4 μT.

Štvrtý a pritom posledný okruh meraní pozostával z meraní vlastností magnetických snímačov a kvantifikácii neistôt meraní (viď kap. 6). Pri meraní veľkých polí bol zvolený ako referenčný prístroj F. W. Bell 5180. Dostupné boli dva rovnaké modely tohto prístroja pričom hodnoty neistôt obidvoch prístrojov boli rovnaké. Pri prístroji F. W. Bell 5080 boli porovnané dva snímače prístroja. Axiálny a plochý. Neistota oboch snímačov bola taktiež rovnaká. Pri meraní snímačov vykazoval najmenšiu chybu vzhľadom na referenčný prístroj snímač A1302KUA s priemernou hodnotou 4,78 %. Najväčšiu chybu vzhľadom na referenčný prístroj vykazoval snímač SS495A s priemernou hodnotou 41,8 %. Pri meraní malých polí bol zvolený ako referenční prístroj AlphaLab 3AXISMGM. Po výpočte celkovej neistoty dosahoval väčšiu hodnotu ako porovnávaný snímač HMC5843. Maximálny rozdiel hodnoty prístroja AlphaLab 3AXISMGM od referenčnej hodnoty poľa je -89 G a snímača HMC5843 je 93 G. Diskusia k výsledkom získaným v praktickej časti sa nachádza v kapitole 6.4.

Ako vhodné pokračovanie experimentov by bolo možné pri meraniach veľkých polí použiť rôzne druhy Helmholtzových cievok. Pri meraní malých polí je potrebné sa zamerať s veľkou presnosť na umiestenia snímačov vzhľadom k poľu Zeme. Meranie bolo ovplyvnené hlavne externým magnetickým poľom vzhľadom k citlivosti snímačov. Z tohto dôvodu by bolo potrebné sa zamerať na kompenzáciu vonkajších parazitných polí. Kompenzáciu by bolo možné vykonať pomocou trojosej Helmholtzovej cievky. Zvoliť odlišnú metódu merania od použitej metódy, ktorá vykazovala tak veľkú chybu a použiť viacej druhou snímačov na porovnanie výsledkov meraní.

LITERATÚRA

[1] Bejček,L., Čejka,M. a kol.: *Měření v elektrotechnice*, skripta VUT Brno. 242 s.

[2] Vdoleček,F.:*Technická měření*, FSI, skripta VUT Brno, 2002. 64 s.

[3] PALENČAR, R., VDOLEČEK, F., HALAJ,M. Nejistoty v měření I až V, Soúbor článkov v časopisoch AUTOMA, č. 7-8/2001, č.10/2001, č.12/2001, č.4/2002, č.5/2002

[4] NOVÁK, Jiří. *Základy teorie chyb a zpracování fyzikálních měření*. Praha, 2001. Dostupné také z: http://webfyzika.fsv.cvut.cz/PDF/teoriechyb.pdf. Pomůcka pro vypracování laboratorních úloh. ČVUT.

[5] ČEJKA, M.: *Stručný úvod do problematiky nejistot měření.* Kurzy BMVE a KMVE, VUT Brno, skriptum, 2012.

[6] LUDVÍK, Vladimír. *Nejistoty měření* [online]. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005, 1 elektronický optický disk (CD-ROM) [cit. 2015-12-29]. Sborníky technické harmonizace.

[7] *JCGM 100:2008: Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM 1995 with minor corrections)* [online]. Paris: BIPM Joint Committee for Guides in Metrology, 2008, 134 s. [cit. 2015-12-29].

[8] CHUDÝ, Vladimír. *Meranie technických veličín*. 1. vyd. V Bratislave: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 1999, 688 s. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 80-227-1275-2.

[9] KOUBEK, Václav a Oldřich LEPIL. *Fyzika pre 3. ročník gymnázií*. 6. upr. a preprac. vyd. Bratislava: Slovenské pedagogické nakladateľstvo, 2003. ISBN 8010001899.

[10] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika*. 2. přeprac. vyd. Editor Petr Dub. Brno: VUTIUM, c2013, 1 sv. (různé stránkování). Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-4123-1.

[11] PATOČKA, Miroslav. *VYBRANÉ STATĚ Z VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY SVAZEK IV: Magnetické obvody ve výkonové elektronice, puslní měniče s transformátorem.* Brno, 2010. Skriptum. VUT v Brně.

[12] TROUT, S. R. Use of Helmholtz coils for magnetic measurements. Magnetics, IEEE Transactions on, 1988, 24.4: 2108-2111.

[13] RIPKA, Pavel. *Magnetic sensors and magnetometers*. Boston: Artech House, c2001. ISBN 1580530575.

[14] BENEŠ, Pavel. *Automatizace a automatizační technika*. Vyd. 3. Brno: CP Books, 2005. ISBN 8025107957.

[15] CARUSO, Michael J., et al. A new perspective on magnetic field sensing.*SENSORS-PETERBOROUGH-*, 1998, 15: 34-47.

[16] *Fyzikální princip měření magnetického pole & SQUID & mpms xl magnetometr* [online]. Olomouc, 2009 [cit. 2015-11-15]. Dostupné z: http://atmilab.upol.cz/texty/squid.pdf. Univerzita Palackého v Olomouci.

[17] BOLL, Richard. a K. J. OVERSHOTT. *Magnetic sensors*. New York, NY, USA: VCH, c1989. Sensors (Weinheim an der Bergstrasse, Germany), v. 5. ISBN 0895736772.

[18] GULDAN, Arnošt. *Mikroelektronické senzory*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1987.

[19] GESCHEIDTOVÁ, Eva; REZ, Jiří; STEINBAUER, Miloslav. Měření v elektrotechnice. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2002.

[20] POPOVIC, Radivoje S. Hall effect devices. CRC Press, 2003.

[21] VOJÁČEK, Antonín. Integrované AMR senzory magnetického pole. *Automatizace.hw.cz* [online]. 2011 [cit. 2015-11-17]. Dostupné z: http://automatizace.hw.cz/integrovane-amr-senzory-magnetickeho-pole7

[22] *3-Axis Digital Compass IC HMC5843: datasheet*. Plymouth: Honeywell, 2010,20 s. Dostupné také z: http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Defense_Brochures-documents/HMC5843.pdf

[23] VOJÁČEK, Antonín. GMR senzory mag. pole - 1. díl - princip a struktura. *Automatizace.hw.cz* [online]. 2011 [cit. 2015-11-17]. Dostupné z: http://automatizace.hw.cz/gmr-senzory-mag-pole-1-dil-princip-a-struktura

[24] VOJÁČEK, Antonín. TMR – Tunelová magnetoresistence – 1. díl - princip. *Automatizace.hw.cz* [online]. 2011, (1) [cit. 2015-11-18]. Dostupné z: http://automatizace.hw.cz/tmr-tunelova-magnetoresistence-1-dil-princip

[25] Aldebaran. [online]. 2000 [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/animace/Phy_gmr.mpg

[26] Státní etalon magnetické indukce. *Český Metrologický Institut* [online]. Praha: Český Metrologický Institut, 2001 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: https://www.cmi.cz/node/420

[27] MAEKAWA, S. a Teruya SHINJŌ. *Spin dependent transport in magnetic nanostructures*. 3. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 0415272262.

[28] DETROYE, David J.; CHASE, Ronald J. *The calculation and measurement of Helmholtz coil fields*. ARMY RESEARCH LAB ADELPHI MD, 1994.

[29] VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav automatizace a měřící techniky. Skupina měření. *MSNV úloha 4 - Měřením magnetického pol - Popis pracoviště*. 6s. 2014.

ZOZNAM SKRATIEK A SYMBOLOV

GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (Pokyny pre vyjadrovanie neistôt merania)
VIM	International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology (Medzinárodný slovník základných a všeobecných termínov v metrológii)
AMR	Anisotropic magnetic resistance - anizotropná magnetorezestencia
GMR	Giant Magneto Resistence effect - veľký magnetorezistývny jav
TMR	Tunnel Magneto Resistance - tunelový magnetorezistívny jav
ESR	Elektrónová spinová rezonancia
NMR	Nuclear magnetic resonance (jadrová magnetická rezonancia)
ÚAMT	Ústav automatizace a měřicí techniky
USB	Universal Serial Bus
NI	National Instruments
I^2C	komunikačná zbernica
Δ_x	absolútna chyba merania
x_m	nameraná hodnota
x_s	konvenčná pravá hodnota
δ_x	relatívna chyba merania
n	počet opakovaní
$\bar{x}$	aritmetický priemer
$s(x)$	smerodajná odchýlka výberového súboru
$s(\bar{x})$	smerodajná odchýlka aritmetického priemeru
e	systematická zložka
ε	náhodná zložka
$X_1, X_2, \dots, X_m$	vstupné veličiny
Y	výstupná veličina
$\Delta(x)$	výsledná chyba
Y	výstupná veličina
$u^2(y)$	neistota odhadu y výstupnej veličiny Y
$u^2(x_i)$	neistota odhadov x vstupných veličín X
A_i^2	citlivostné a prevodové koeficienty
$u(x_{i,j})$	kovariancia medzi korelovanými odhadmi x_i a x_j
$r(x_{i,j})$	korelační koeficient medzi odhadmi x_i, x_j
$u(x_i)$	neistota odhadu
B	magnetická indukcia, jednotka tesla [T], menšia jednotka gauss [G]
I	elektrický prúd, jednotka ampér [A]
F	sila, jednotka newton [N]
v	vektor rýchlosti

Q	náboj častice, jednotka [C]
μ	magnetický dipólový moment slučky
k	činiteľ rozšírenia
n	počet meraní
x_i	i-tá nameraná hodnota
k_s	koeficient závislí na počte meraní
z_i	zdroj neistoty
$u_B(z_i)$	neistoty jednotlivých zdrojov
A_i	koeficienty citlivostí jednotlivých zdrojov
U	rozšírená neistota
k_p	koeficient rozšírenia rovný kvantilu normovaného normálneho rozdelenia pre pravdepodobnosť
$u_C(x)$	výsledná kombinovaná neistota
k_r	koeficient rozšírenia
m	meter (základná jednotka dĺžky)
T	tesla (základná veličinou magnetickej indukcie)
A	ampér (jednotka pre elektrický prúd)
N	newton (základná jednotka sily)
G	gauss
B_r	veľkosť magnetického poľa na ose cievky vzdialeného od cievky o r [T]
μ_0	permeabilita vákua $4\pi 10^{-7}$ [Hm^{-1}]
N	počet závitov [-]
R	polomer [m]
r	vzdialenosť bodu na ose cievky od závitu cievky [m].
dB_r	diferenciálne prírastky
$\mu(t)$	permeabilita jadra
ϕ_1	magnetický tok [Wb]
U	napätie (V)
$\overrightarrow{H_0}$	vonkajšie magnetické pole
u_H	Hallovo napätie [$C^{-1}.m^3$]
R_H	Hallova konštanta [$C^{-1}.m^3$],
I	prúd prechádzajúci doštičkou [A],
B	indukcia magnetického poľa [T]
d	hrúbka doštičky [m]
θ	uhol [°]
V_{Verdet}	Verdetova konštanta
K_{Kundt}	Kundtova konštanta
$M = \lvert\vec{M}\rvert$	veľkosť magnetizácie materiálu
B	magnetická indukcia
γ_p'	gyromagnetický moment protónu vo vode

ZOZNAM PRÍLOH

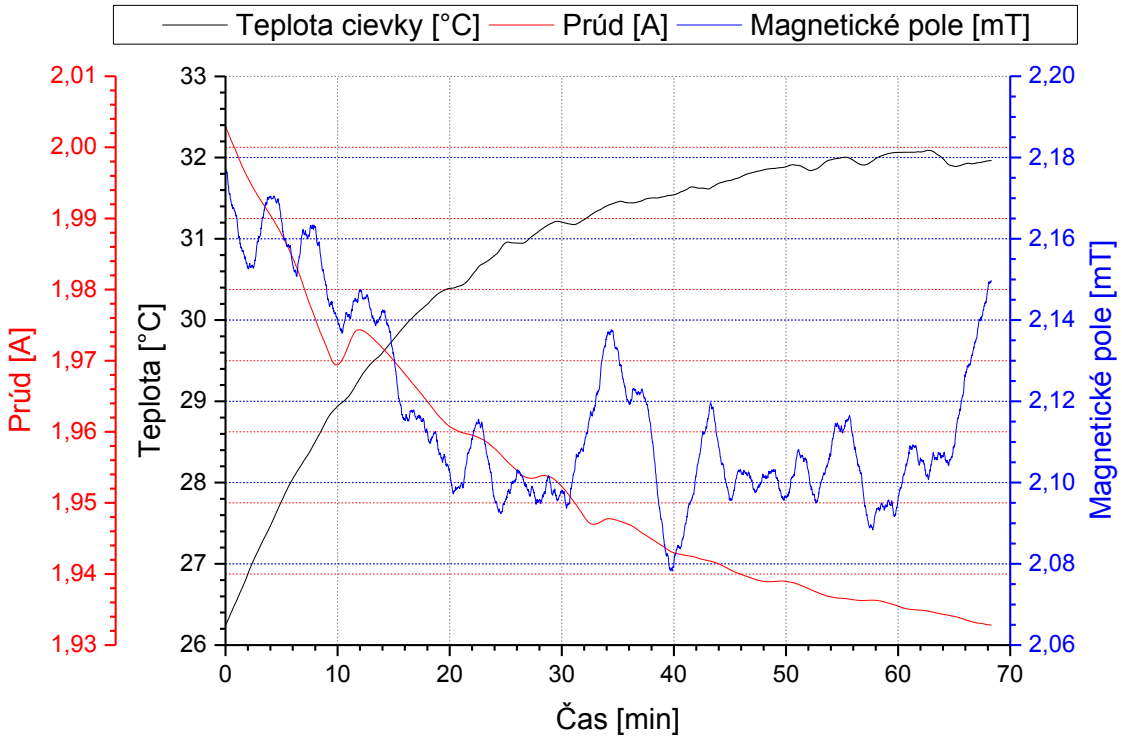
Príloha *A* Použité prístroje pri experimentoch
Príloha *B* Doplňujúce grafy ku kapitolám 5.3, 5.4, 5.5
Príloha *C* Obsah priloženého CD

A Použité prístroje pri experimentoch

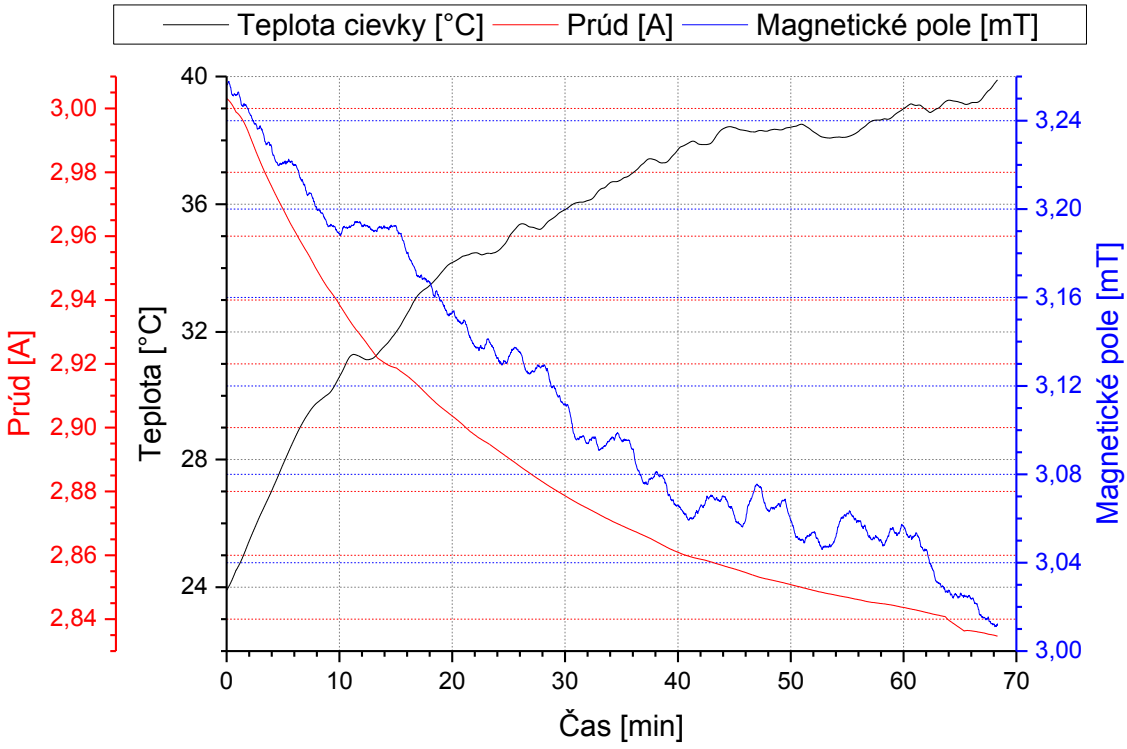
V experimentoch boli nasledujúce prístroje použité v rôznych kombináciách.

- Multimeter: Agilent 34410A (v. č.: MY47001058)
- Multimeter: Agilent 34410A (v. č.: MY47001031)
- Multimeter: UNIT-T UT804 (v. č.: 6100019215)
- Bočník: HP 34330A (v.č.: 9439)
- Gauss/Teslameter: F. W. Bell Model 5180-r (v. č.: 1113367)
- Gauss/Teslameter: F. W. Bell Model 5180 (v. č.: 1113308)
- Gauss/Teslameter: F. W. Bell Model 5080 (v. č.: 9927439)
- Milligaussmeter: AlphaLab 3AXISMGM (v. č.: 962)
- Stabilizovaný zdroj: TTi Thurlby Thandar CPX400DP PowerFlex (v. č.: 376615)
- Stabilizovaný zdroj: TTi Thurlby Thandar CPX400SP (v. č.: 363785)
- Stabilizovaný zdroj: Agilent E3631A (v. č.: 40040975)
- Stabilizovaný zdroj: AUL 310 (v. č.: 880414)
- Klimatická komora: CTS T-65/50 (v. č.: 127003)
- Laboratórny prípravok: malá Helmholtzova cievka
- Laboratórny prípravok: veľká Helmholtzova cievka
- PC
- Aplikácia v NI LabView
- NI cDAQ-9171 (NI CompactDAQ 1-Slot USB Chassis) (v. č.: 1A2AD43)
- NI 9219 (Universal Analog Input, 24-Bit, 100 S/s/ch, 4 Ch Module) (v. č.: 198848A-01L)
- NI USB-8451 (v. č.: 15603C6)
- Termočlánok typu K (chromel-alumel) od firmy Mavis.

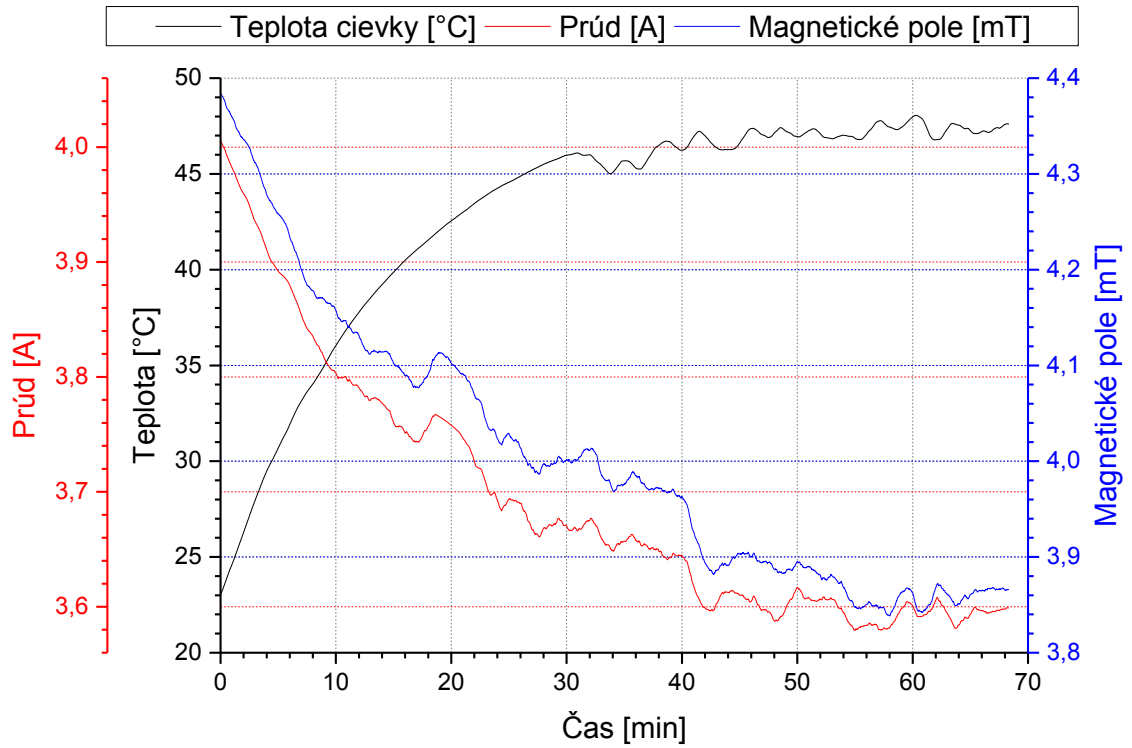
B Doplňujúce grafy ku kapitolám 5.3, 5.4, 5.5



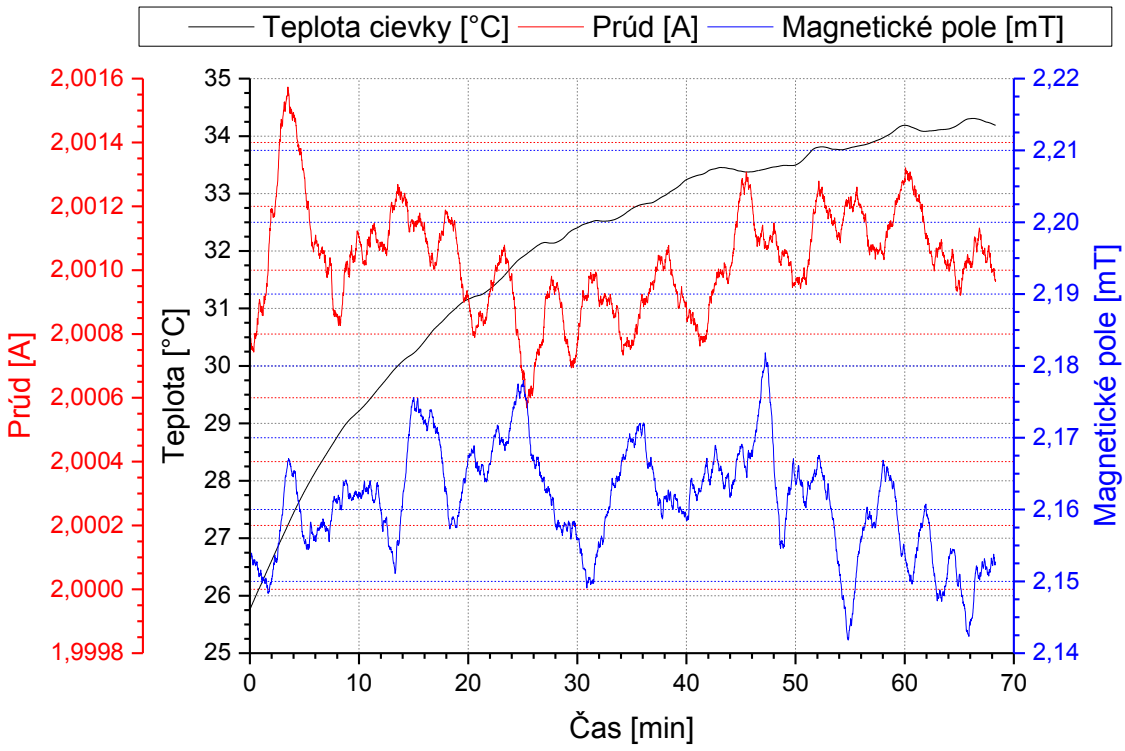
Obr. B 1) Zmena teploty cievky, prúdu cievky a magnetického poľa pre 2 A



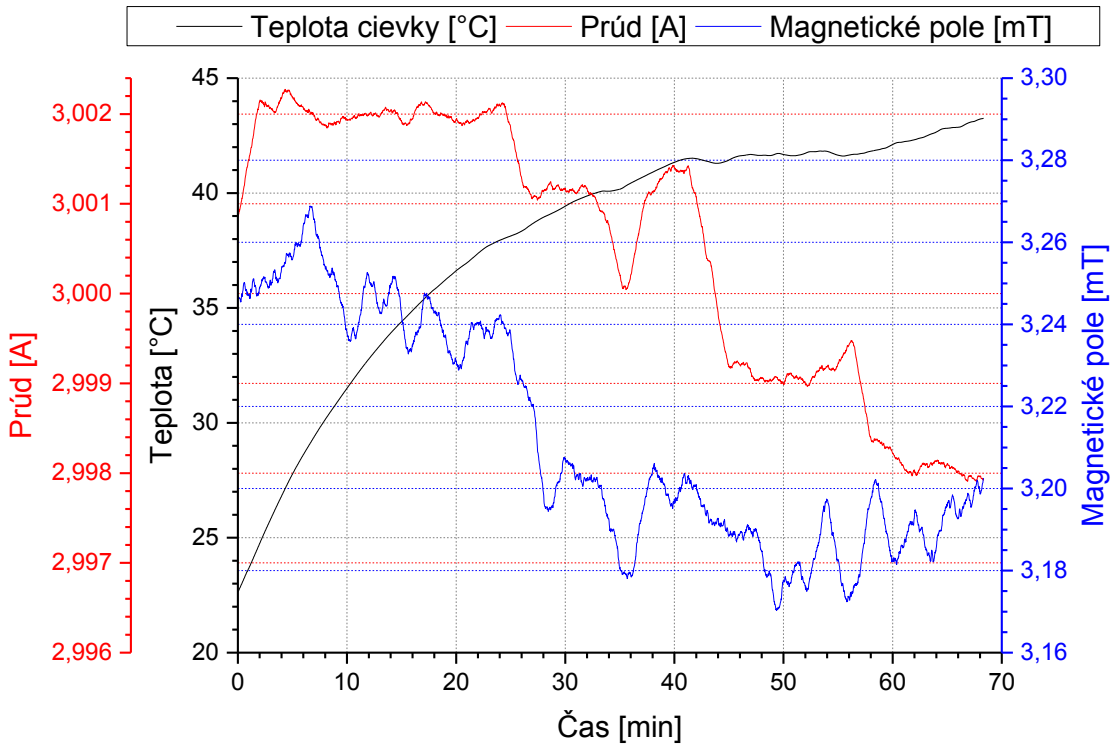
Obr. B 2) Zmena teploty cievky, prúdu cievky a magnetického poľa pre 3 A



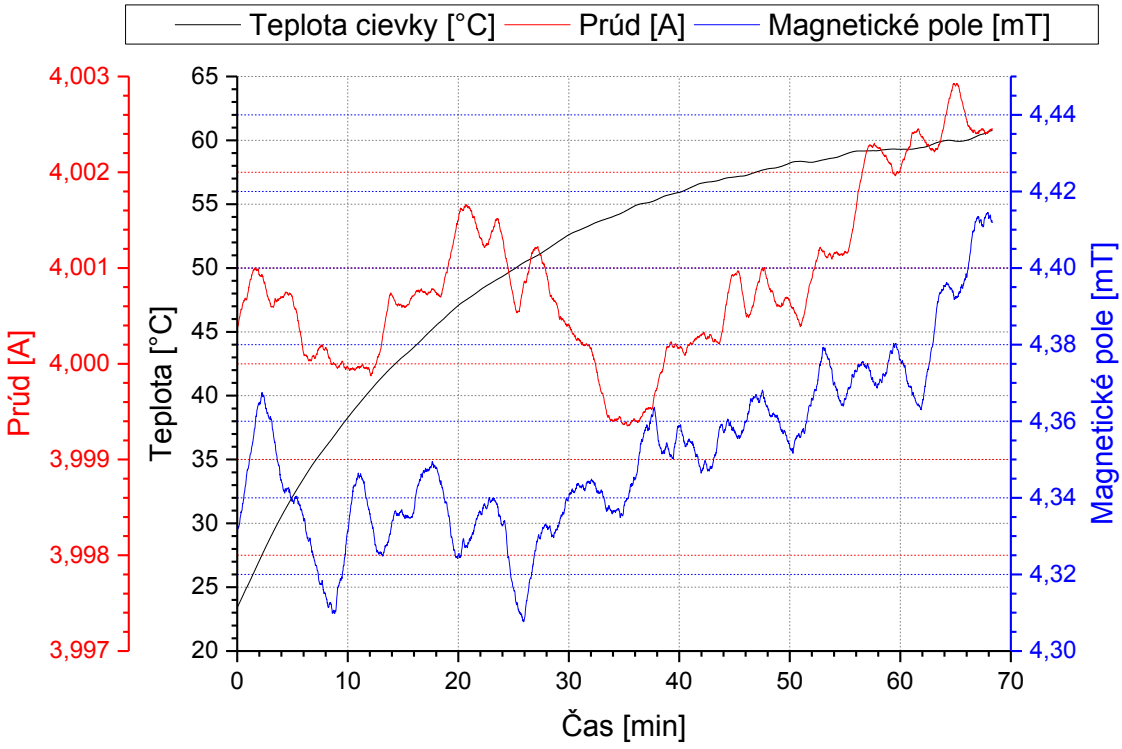
Obr. B 3) Zmena teploty cievky, prúdu cievky a magnetického poľa pre 4 A



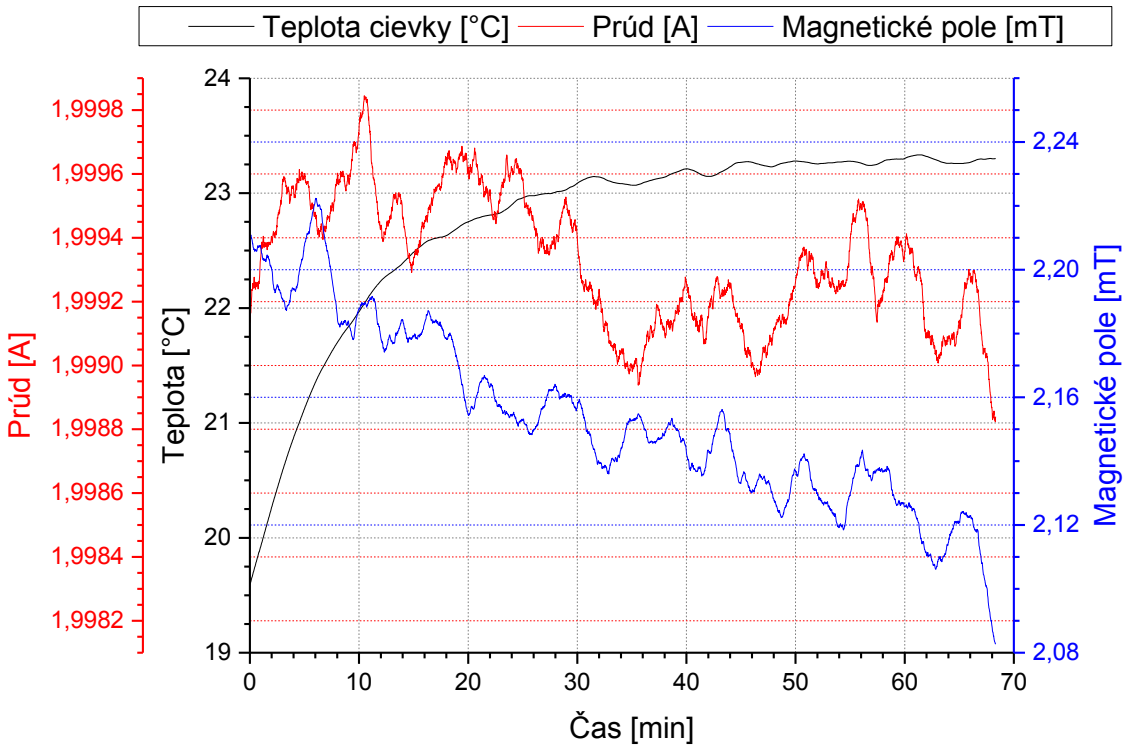
Obr. B 4) Zmena teploty cievky a teploty v okolí snímača pri konštantnom prúde pre 2 A



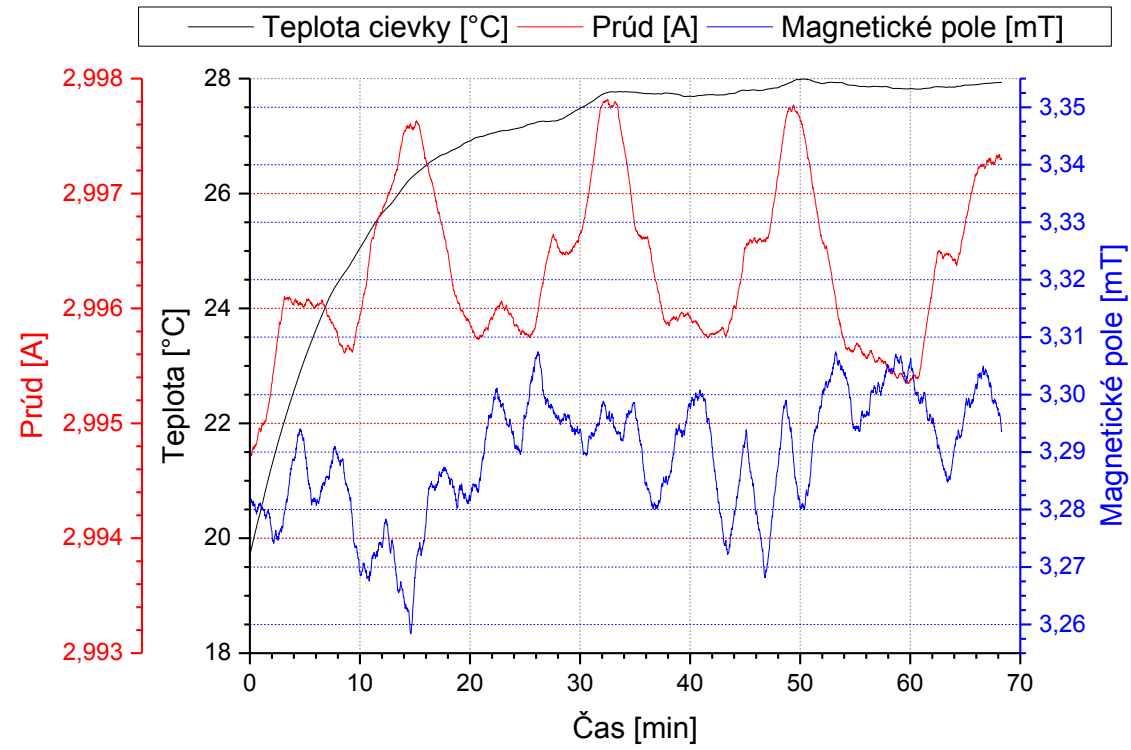
Obr. B 5) Zmena teploty cievky a teploty v okolí snímača pri konštantnom prúde pre 3 A



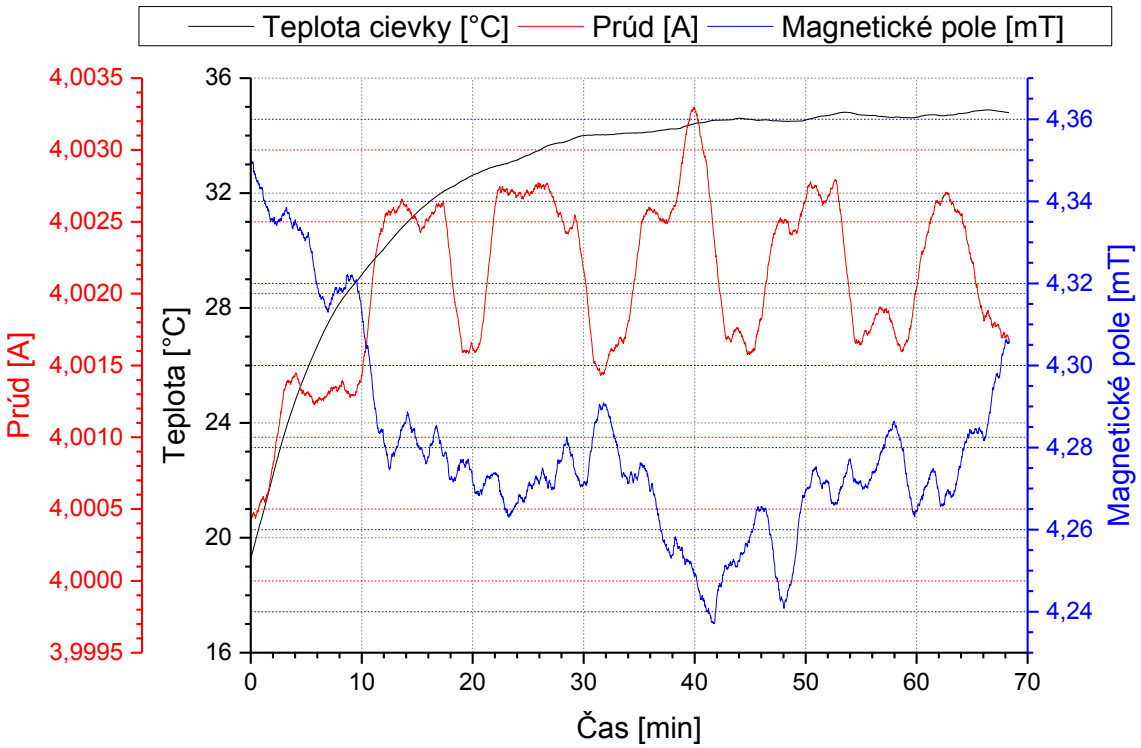
Obr. B 6) Zmena teploty cievky a teploty v okolí snímača pri konštantnom prúde pre 4 A



Obr. B 7) Zmena teploty cievky, konštantný prúd a teplota v okolí snímača pre 2 A



Obr. B 8) Zmena teploty cievky, konštantný prúd a teplota v okolí snímača pre 3 A



Obr. B 9) Zmena teploty cievky, konštantný prúd a teplota v okolí snímača pre 4 A

C Obsah priloženého CD

a) Vykreslenie meranej homogenity poľa cievky s matematickým modelom.
priečinok: *Matlab*

b) Dáta prístrojov a výpočty neistôt
priečinok: *Pristroje*

c) Dáta snímačov a výpočty neistôt
priečinok: *Snimace*

d) Dáta vykreslených hodnôt závislostí teploty, prúdu a magnetického poľa, výpočty neistôt
priečinok: *Pristroje*

e) Elektronická verzia DP
Súbor: *Slichta_Pavol_2016_DP.pdf*