

**Využití Helmholtzových cívek pro řízení orientace magneticky aktivních
těles a zařízení ve vodném prostředí.**

Orientation control of magnetic active bodies and devices in aqueous
environment using Helmholtz inductors.

David Frelich

Bakalářská práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: David FRELICH
Osobní číslo: A10013
Studijní program: B3902 Inženýrská informatika
Studijní obor: Informační a řídicí technologie
Forma studia: prezenční

Téma práce: Využití Helmholtzových cívek pro řízení orientace magneticky aktivních těles a zařízení ve vodném prostředí

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši popisující současný stav dané problematiky.
2. Seznamte se s vhodným programovacím prostředím (Vee PRO, C++, C, Matlab) a jeho možnostmi s připojením a ovládáním měřicích přístrojů.
3. Z dostupných technických prostředků navrhnete a zkonstruujete ovládací zařízení využívající Helmholtzovy cívky, zapojte a ověřte jeho funkčnost, odhadnete meze použitelnosti zařízení.
4. Navrhnete a vytvořte uživatelskou aplikaci v tomto prostředí pro řízení orientace magneticky aktivních těles.
5. Vyhodnoťte výsledky experimentů a navrhnete možnosti pokračování.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **STRÍTESKÝ, Zdeněk.** Systém pro automatické řízení magnetického pole. Zlín, 2004. 41 l., [3] l. příl. Bakalářská práce. UTB ve Zlíně. Vedoucí práce Martin Procházka.
2. **HUBEŇÁK, Josef.** Elektřina a magnetismus: skriptum pro základní kurs fyziky. Vyd. 1. Hradec Králové: Gaudeamus, 2002, 204 s. ISBN 8070410892.
3. **FRADEN, Jacob.** Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications. 4th ed. New York: Springer, c2010, xv, 663 s. ISBN 9781441964656.
4. **ZAJÍC, Jan.** Fyzika II: (elektřina a magnetismus). 2., oprav. vyd. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2004, 171 s. ISBN 80-719-4641-9.
5. **OTÝPKA, Jan.** Magnetická pole pro biomedicínské experimenty: Magnetic fields for biomedical experiments. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 1 elektronický optický disk ICD-ROM / DVDI. Diplomová práce. VUT v Brně.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Milan Navrátil, Ph.D.

Ústav elektroniky a měření


Datum zadání bakalářské práce:

24. února 2013

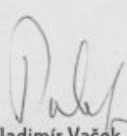
Termín odevzdání bakalářské práce:

14. června 2013

Ve Zlíně dne 24. února 2013


prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan




prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá řízením magneticky aktivních těles ve vodním prostředí. K tomuto řízení je využito Helmholtzových cívek. V práci je popsán jejich princip, konstrukce, návrh a možnosti využití. Dále se práce věnovala detailnímu zmapování prostoru cívkami zaujímaném a volbě prostoru takového, jenž je nejvíce vhodný pro náš případ či řízení magneticky aktivních těles obecně.

Klíčová slova: magnetická indukce, vektor magnetické indukce, Helmholtzovy cívky, elektrické napětí, elektrický proud, magneticky aktivní těleso, endoskopická kamera

ABSTRACT

This work is about control of magnetically active TĚLES in the aquatic environment. For this control are used Helmholtz coils. In this work is described the principle, construction, design and lability of Helmholtz coils. The work is devoted to detailed mapping of coil area between coil. This area is most suitable for our case management or magnetically active bodies in general.

Keywords: magnetic induction, vector of magnetic induction, Helmholtz coil, electric voltage, electric current, magnetic active unit, endoscopic camera

Velice bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Milanu Navrátilovi, Ph.D., za odborné rady, pomoc a jeho čas, který mi věnoval při řešení mého úkolu.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 ELEKTRICKÝ PROUD	11
1.1 VEDENÍ PROUDU V PEVNÝCH LÁTKÁCH.....	12
1.1.1 Elektrický proud ve vodičích.....	12
2 MAGNETICKÉ POLE	14
2.1 MAGNETICKÁ INDUKCE.....	14
2.2 VEKTOR MAGNETICKÉ INDUKCE.....	15
2.2.1 Operace s vektory.....	16
2.3 VÝPOČET MAGNETICKÉ INDUKCE.....	19
2.3.1 Biotův-Savartův (-Laplaceův) zákon:.....	19
2.4 PERMANENTNÍ MAGNETY.....	20
3 MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE	22
3.1 HALLŮV JEV.....	22
3.1.1 Senzory s Hallovým jevem.....	22
3.1.2 Stručný přehled typů Hallových sond.....	23
3.1.2.1 Lineární Hallova sonda.....	23
3.1.2.2 Hallova sonda ve spínacím režimu.....	24
3.1.3 Použití Hallových sond.....	25
3.2 MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE INDUKČNÍ METODOU.....	25
3.2.1 Feromagnetická sonda.....	27
3.3 VSM (VIBRATING SAMPLE MAGNETOMETER).....	27
4 HELMHOLTZOVY CÍVKY	29
4.1 ZÁKLADNÍ USPOŘÁDÁNÍ HELMHOLTZOVÝCH CÍVEK.....	29
II PRAKTICKÁ ČÁST	31
5 NÁVRH MĚŘICÍHO PRACOVÍŠTĚ	32
5.1 NAPÁJECÍ ZDROJ AGILENT E3631 A.....	32
5.1.1 Základní vlastnosti.....	33
5.1.2 Flexibilní systémové funkce.....	33
5.2 GAUSSMETR LAKESHORE 421.....	33
5.2.1 Lakeshore axiální sonda.....	35
5.2.2 LakeShore Příčná sonda.....	35
6 NÁVRH KONSTRUKCE-PROVEDENÍ CÍVEK	36
6.1 PARAMETRY CÍVEK.....	36
6.2 NÁVRH KONSTRUKCE.....	37
7 VLASTNÍ MĚŘENÍ	39

7.1	SCHÉMATA ZAPOJENÍ	39
7.2	MĚŘENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE V OSE X.....	40
7.3	MĚŘENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE V OSE Y.....	44
7.4	MĚŘENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE V OSE Z	48
7.5	MAGNETICKÉ POLE NA OSE HELMHOLTZOVÝCH CÍVEK.....	50
7.6	MAGNETICKÉ POLE V ROVINĚ OSY HELMHOLTZOVÝCH CÍVEK.....	50
8	UŽIVATELSKÁ APLIKACE PRO ŘÍZENÍ.....	52
8.1	AGILENT VEE PRO 9.2.....	52
8.2	NÁVRH UŽIVATELSKÉ APLIKACE	53
8.2.1	Popis programu	53
8.2.1.1	Popis Panelu.....	54
1.	<i>Horizontal-M, Vertikal-M</i> – ručičkové panelmetry, ukazující úhel vychýlení tělesa	54
8.2.1.2	Popis Detailu.....	54
9	EXPERIMENTÁLNÍ ŘÍZENÍ MAGNETICKY AKTIVNÍCH TĚLES.....	56
9.1	ENDOSKOPICKÉ KAMERY NEŘÍZENÉ	56
9.2	ENDOSKOPICKÁ KAMERA ŘÍZENÁ.....	57
9.3	ŘÍZENÍ EXPERIMENTÁLNÍHO OBJEKTU VE VODNÍM PROSTŘEDÍ	58
9.3.1	Meze použitelnosti experimentu	58
9.3.2	Vlastní testování řízení orientace	62
	ZÁVĚR	64
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....	66
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	68
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	71
	SEZNAM OBRÁZKŮ	72
	SEZNAM TABULEK.....	74
	SEZNAM PŘÍLOH.....	75

ÚVOD

V našem životě je spousta problémů, kterými se musí člověk zabývat a řešit je. Každodenními počínaje a vážnými konče. Mezi ty druhé lze zařadit problémy s naším zdravím. I když lékařská věda i vědy ostatní jsou neustále ve vývoji, stále i tyto „moderní vědy“ nedokáží všechny naše komplikace a problémy se zdravím vyřešit všechny.

Proto vznikla tato práce, která má za úkol demonstrovat chování a řízení magneticky aktivních těles, mezi které by mohla patřit například endoskopická kamera miniaturních rozměrů. Ta by sloužila například k nasnímání (naskenování) útroby lidského těla. Její orientace, resp. řízení by probíhalo uvnitř lidského těla, kam by se dostala polknutím. Běžný proces trávení by pak zaručil průchod kamery celými útroby. Pacient by se nacházel uvnitř prostoru Helmholtzových cívek, pomocí kterých by byla kamera řízena a její orientace by byla známa z vektoru magnetického pole.

Takováto idea však obnáší spoustu dalšího výzkumu a testování. Dle mého přesvědčení by však byla přínosnou pro lékařství a pro mnohé pacienty pohodlnější, než současné snímání.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ELEKTRICKÝ PROUD

Elektrický proud (jako jev) je uspořádaný pohyb volných částic s elektrickým nábojem. Uspořádaný znamená, že se většina elektronů pohybuje jedním směrem. Není-li vodič připojen ke svorkám zdroje (a není-li tedy důvod, aby elektrický proud procházel), elektrony se i tak pohybují. Ovšem chaoticky. Volné částice jsou ty, které nejsou silově vázány k jiným částicím (např. k jádrům atomů). Aby nějakým materiálem procházel elektrický proud, je nutné zajistit přítomnost těchto volných částic (např. ionizací).

A kdyby nebyly částice nabitě (neměly elektrický náboj) nemohli bychom hovořit o vzniku elektrického proudu.

Volné elektrony se ve vodiči pohybují od záporného pólu ke kladnému (tedy proti směru elektrické intenzity). Elektrický proud nemusí být jen pohyb volných elektronů - může se jednat i o částice nabitě kladně, které se pak pohybují ve směru elektrické intenzity. Elektrický proud může být tvořen i částicemi obojího znaménka (např. v polovodičích).

Směr elektrického proudu je tedy určen dohodou:

Směr elektrického proudu je dán směrem uspořádaného pohybu kladně nabitých částic.

Proud v jednoduchém elektrickém obvodu tedy vychází z kladného pólu zdroje a pohybuje se k pólu zápornému.

Elektrický proud je určen jako podíl celkového náboje Q , který projde průřezem vodiče za jednotku času, a tohoto času:

$$I = \frac{Q}{t} ; [A, C, s] \quad (1.1)$$

Q je celkový náboj, který projde daným průřezem vodiče, tedy $Q = Q_+ + |Q_-|$. Pokud je pohyb náboje nerovnoměrný, pak proud definujeme vztahem $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$, kde ΔQ je celkový náboj, který projde průřezem vodiče za čas Δt . Elektrický proud měříme **ampérmetrem**.

Pomocí definičního vztahu elektrického proudu lze vyjádřit jednotku elektrického náboje takto $Q = A * s$ (ampérsekunda). Tato jednotka (resp. jednotka ampérhodina) se občas používá i v technické praxi jako jednotka kapacity zdroje napětí.

Elektrický proud je několikerého druhu:

1. kondukční (vodivostní) - přenos náboje ve vodiči, mezi jehož konci je vytvořeno napětí (rozdíl potenciálů). Jsou způsobeny volnými elektrony v kovech, ionty v elektrolytech, elektrony a dírami v polovodičích, ...

2. konvekční - proud není způsoben pohybem částic s nábojem v důsledku existence potenciálového rozdílu

Např. proběhneme-li s nabitým tělesem dveřmi, proteče dveřním otvorem proudový impuls; přenos náboje nabitým pásem ve van de Graaffově elst. generátoru; ...

3. posuvné - tečou v dielektriku při jeho polarizaci

[5]

1.1 Vedení proudu v pevných látkách

To, jestli pevná látka po připojení na el. zdroj povede el. proud (vodič) nebo ne (izolant), závisí na její struktuře.

Vodiče (kovy) mají krystalickou mřížku, která je složena z kladných iontů kovů. Valenční elektrony jsou ke kationtům vázány kovovou vazbou, která je ale velmi slabá. Valenční elektrony lze proto velmi snadno odtrhnout.

Izolanty kovovou vazbu nemají a valenční elektrony jsou v obalu vázány silným silovým působením (př. iontová vazba).

1.1.1 Elektrický proud ve vodičích

Ohmův zákon vyjadřuje vztah mezi elektrickým odporem, napětím a proudem. Je pojmenován podle svého objevitele Georga Ohma. Zákon říká, že napětí na prvku je přímo úměrné procházejícímu proudu:

$$I = \frac{U}{R} \text{ resp. } U = RI$$

(1.2)

kde I je elektrický proud, U je elektrické napětí a R je elektrický odpor.

Elektrický odpor můžeme popsat na základě elektronové teorie. Kladné ionty, které tvoří krystalovou mřížku vodiče, nejsou v klidu, ale vykonávají kolem uzlových (rovnovážných) bodů mřížky tepelné kmity. Při průchodu elektronového plynu objemem vodiče dochází ke srážkám jednotlivých elektronů s kmitajícími ionty mřížky - důsledkem je elektrický odpor. S rostoucí teplotou se amplituda kmitů zvětšuje a srážky jsou častější - odpor vodiče roste. Při srážkách ztrácí elektronový plyn kinetickou energii potřebnou k pohybu. Elektrický odpor lze určit z vlastností vodiče pomocí vztahu:

$$R = \frac{\rho * l}{S} [\Omega] \tag{1.3}$$

kde ρ je měrný elektrický odpor, l délka a S průřez vodiče

[6]

2 MAGNETICKÉ POLE

Již ve starověku bylo známé silové působení mezi určitými (zmagnetovanými) látkami. Z látek jevících takovéto chování byly známy některé nerosty obsahující především oxidy železa (magnetit Fe_3O_4 , *maghemit* $\gamma - Fe_2O_3$ apod.) a také kovové železo. Byla také známa existence zemského magnetismu a magnetka.

Nová etapa ve vývoji poznatků o magnetismu nastala objevem magnetických účinků vodičů protékaných proudem. Bylo to především experimenty H. Ch. Oersteda, který (r. 1820) objevil silové působení mezi vodičem protékaným proudem a magnetkou. Zjistil, že magnetka umístěná do blízkosti vodiče protékaného proudem se vychýlí ze svého původního směru určeného zemským magnetismem. V případě dlouhého přímého vodiče má magnetka tendenci zaujímat polohu kolmou k vodiči, přičemž její orientace je závislá na směru proudu. Záhy po Oerstedových objevech objevil A. M. Ampère silové působení mezi dvěma vodiči protékanými proudem.

Na základě poznatků získaných z experimentů popsaného typu byl zaveden pojem magnetického pole, které se projevuje silovými účinky na zmagnetovaná tělesa, vodiče protékané proudem, či na pohybující se nositele elektrického náboje. Zdrojem magnetického pole mohou být zmagnetovaná tělesa nebo makroskopické elektrické proudy.

[3]

2.1 Magnetická indukce

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

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

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

$$B = \frac{F_{MAX}}{Qv} \quad (2.1)$$

[1]

2.2 Vektor magnetické indukce

Experimenty Oerstedova a Amperova typu ukazují, že magnetické pole může být v dané části prostoru vytvořeno buď náboji libovolného typu, pohybujícími se v makroskopickém měřítku, nebo přítomností látek nacházejících se ve zvláštním (zmagnetovaném) stavu. Experiment dále ukazuje, že makroskopické magnetické pole může existovat ve vakuu i v látkovém prostředí. Magnetické pole se projevuje silovými účinky jednak na vodiče protékané makroskopickým proudem, jednak na pohybující se tělesa nesoucí libovolný náboj, ale má rovněž účinky na všechny druhy látek v klidu.

Uvedené silové účinky je výhodné popsat pomocí vektorového pole. Lze si představit, že příslušné vodiče či zmagnetovaná tělesa vytvářejí ve svém okolí magnetické pole, které působí na jiné vodiče či na jiná tělesa.

Podrobný kvantitativní rozbor výsledků jednotlivých typů experimentů dovoluje formulovat základní definiční vztah pro veličinu charakterizující magnetické pole, která se z historických důvodů nazývá *magnetickou indukci*. Uvažujme nejdříve částici malých rozměrů nesoucí náboj q , který budeme považovat za bodový náboj. Jestliže se tato částice bude pohybovat v blízkosti vodičů protékaných proudem či v blízkosti zmagnetovaných těles, lze ukázat, že celkovou sílu **F** působící na částici lze vyjádřit vztahem

$$\mathbf{F} = q[\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}] \quad (2.2)$$

v němž \mathbf{v} je rychlost částice v dané inerciální soustavě. Vzorec (2.2) se nazývá *Lorentzovým vzorcem* a může být považován za definiční vztah pro intenzitu elektrického pole **E** i pro magnetickou indukci **B** (srov. vztahy. V případě, že elektrické pole je v daném místě nulové, působí na částici jen magnetická síla, která je dána vztahem

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2.3)$$

Jednotka magnetické indukce v Mezinárodní soustavě se nazývá *Tesla* (T). Z vztahu (2.2), snadno odvodíme, že Tesla = Newton.(Amper.metr). Lze tedy říci, že magnetické pole 1 Tesla působí na náboj jednoho coulombu, který se pohybuje rychlostí jednoho metru za sekundu, silou jednoho newtonu (za předpokladu, že směr rychlosti náboje je kolmý ke směru pole).

Jako pro každé vektorové pole lze tak pro vektor magnetické indukce zavést pojem toku. Mluvíme o *magnetickém toku* Φ . Pro libovolnou orientovanou plochu S platí

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \, d\mathbf{S} \quad (2.4)$$

Jednotkou magnetického toku je jeden *weber* (Wb). Podle definiční relace jednotky magnetické indukce platí: weber = joule.sekunda.coulomb⁻¹. [3]

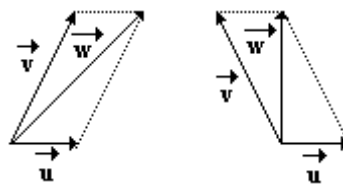
2.2.1 Operace s vektory

S vektory lze provádět některé matematické operace:

Násobení vektoru - \vec{v} nenulovým reálným číslem k (skalárem) - výsledný vektor $k\vec{v}$ k -násobkem původního vektoru. Výsledný vektor je rovnoběžný s původním vektorem \vec{v} a má stejný směr jako vektor \vec{v} , je-li k *kladné*. Pokud je k *záporné*, je výsledný vektor orientován opačně. Velikost výsledného vektoru je $|k|v = |k||\vec{v}| = |k\vec{v}|$

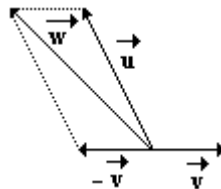
[4]

Sčítání dvou vektorů - ve fyzice má jisté omezení: sčítat lze jen fyzikální veličiny téhož druhu (např. nelze sčítat sílu a rychlost, ...). Součet dvou různoběžných vektorů \vec{u} a \vec{v} - vektor \vec{w} - sestojíme jako úhlopříčku vektorového rovnoběžníku, jehož strany tvoří vektory \vec{u} a \vec{v} . Výsledek vektorového sčítání závisí nejen na velikosti jednotlivých vektorů, ale také na jejich směrech, tj. na úhlu, který oba vektory svírají (viz obr. 2.1). Jsou-li vektory \vec{u} a \vec{v} rovnoběžné, stačí např. vektor přenést \vec{u} na vektorovou přímkou vektoru \vec{v} tak, aby počáteční bod vektoru \vec{u} byl totožný s koncovým bodem vektoru \vec{v} .



Obrázek 1 Sčítání vektorů[4]

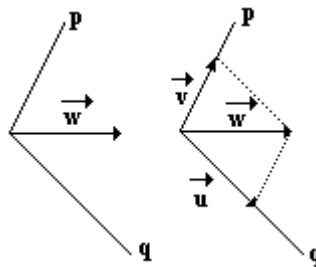
Rozdíl vektorů - platí stejné omezení jako u sčítání vektorů: opět lze odčítat pouze fyzikální veličiny stejného druhu. Rozdíl $\vec{w} = \vec{u} - \vec{v}$ různoběžných vektorů \vec{u} a \vec{v} sestojíme tak, že k vektoru \vec{u} přičteme vektor opačný k vektoru \vec{v} , tj. provedeme operaci $\vec{w} = \vec{u} - \vec{v} \equiv \vec{u} + \overrightarrow{(-v)} = \vec{u} + (-1)\vec{v}$ (viz obr. 2.2). V případě rovnoběžných vektorů se jejich rozdíl provádí analogicky jako jejich součet.



Obrázek 2 Rozdíl vektorů[4]

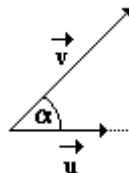
Rozklad vektoru do dvou daných směrů - operace, která se ve fyzice používá velice často. V tomto případě hledáme dva takové vektory, které leží v daných směrech a jejichž vektorovým součtem dostaneme zadaný vektor. Máme-li např. vektor \vec{w} rozložit do směrů daných polopřímkami p a q , (viz obr. 4), uvědomíme si, že při sčítání dvou vektorů (dva nalezené vektory musí po sečtení dát vektor \vec{w}) využíváme vektorového rovnoběžníku. V tomto případě postupujeme „odzadu“: koncovým bodem vektoru \vec{w} vedeme rovnoběžky s polopřímkami p , q . Průsečíky sestrojených rovnoběžek s polopřímkami p a q určují

koncové body hledaných vektorů \vec{u} a \vec{v} . Vektor \vec{w} jsme tedy rozložili na dvě složky \vec{u} a \vec{v} , pro něž platí: $\vec{w} = \vec{u} + \vec{v}$.



Obrázek 3 Rozklad vektorů[4]

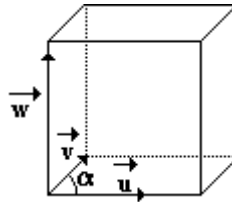
Skalární součin dvou vektorů - \vec{u} a \vec{v} je definován takto: $\vec{u} \cdot \vec{v} = u_1 v_1 + u_2 v_2 + u_3 v_3$, kde příslušné vektory mají souřadnice $\vec{u} = (u_1, u_2, u_3)$ a $\vec{v} = (v_1, v_2, v_3)$. Skalární součin je možné určit také vztahem $\vec{u} \cdot \vec{v} = |\vec{u}| |\vec{v}| \cos \alpha$, kde α je úhel, který tyto vektory svírají. Jedná se vlastně o součin velikosti jednoho z vektorů a kolmého průmětu druhého vektoru do směru prvního vektoru (viz obr. 2.3). Výsledkem skalárního součinu dvou vektorů je tedy číslo. Budou-li vektory \vec{u} a \vec{v} nenulové, pak $\vec{u} \cdot \vec{v} = 0$ v případě, že vektory jsou na sebe vzájemně kolmé, $\vec{u} \cdot \vec{v} > 0$ jestliže příslušné vektory svírají ostrý úhel a $\vec{u} \cdot \vec{v} < 0$ v případě, že svírají úhel tupý. Skalární součin lze aplikovat i na dva vektory v rovině. $\vec{u} \cdot \vec{v} = 0$



Obrázek 4 Rozklad vektorů[4]

Vektorový součin dvou vektorů - \vec{u} a \vec{v} (viz obr. 2.5) $\vec{u} \times \vec{v} = \vec{w}$ je opět vektor, který je definován takto: $\vec{w} \perp \vec{u} \wedge \vec{w} \perp \vec{v}$, velikost $|\vec{w}|$ vektoru \vec{w} je číselně rovna obsahu rovnoběžníku určeného vektory \vec{u} a \vec{v} , tj. $|\vec{w}| = |\vec{u}| \cdot |\vec{v}| \sin \alpha$ (α je úhel, který svírají vektory \vec{u} a \vec{v}) a \vec{w} je orientován vůči rovině vektorů \vec{u} a \vec{v} podle pravidla pravé ruky. Souřadnice vektoru \vec{w} jsou:

$\vec{w} = (u_2v_3 - u_3v_2, u_3v_1 - u_1v_3, u_1v_2 - u_2v_1)$, kde $\vec{u} = (u_1, u_2, u_3)$ a $\vec{v} = (v_1, v_2, v_3)$. Platí-li: $\vec{v} = k\vec{u}, k \in \mathbf{R} - \{0\}$, pak $\vec{w} = \vec{u} \times \vec{v} = \vec{u} \times k\vec{u} = 0$. Další podstatnou vlastností je $\vec{w} = \vec{u} \times \vec{v} = -\vec{v} \times \vec{u}$, tj. uvedená operace mezi vektory není komutativní. Vektorový součin je definován pouze pro dva vektory ze 3D prostoru.



Obrázek 5 Rozklad vektorů[4]

[4]

2.3 Výpočet magnetické indukce

2.3.1 Biotův-Savartův (-Laplaceův) zákon:

Biotův-Savartův (-Laplaceův) zákon, který formuloval P. S. Laplace na základě experimentálních poznatků Biota a Savarta:

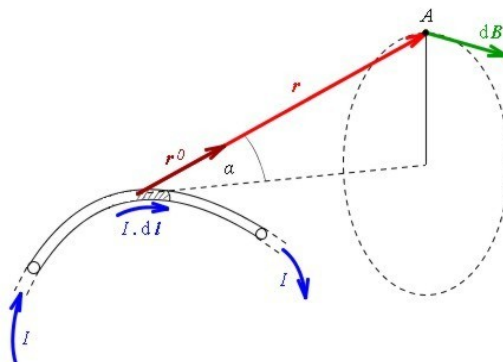
$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\mathbf{l} \times \mathbf{r}^0}{r^2} \quad (2.4)$$

Vodič je myšleně rozdělen na infinitezimální délkové elementy $d\mathbf{l}$, které mají směr tečny vodiče a orientaci ve směru proudu. \mathbf{r}^0 je jednotkový vektor s počátkem, který splývá s počátkem vektoru $d\mathbf{l}$ a míří k bodu A (Obr. 2.6), r odpovídá vzdálenosti bodu A od proudového elementu $Id\mathbf{l}$. Předpokládáme, že vodič obklopuje vakuum. Konstanta μ_0 je tzv. permeabilita vakua, jejíž hodnotu definujeme přesně: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot T \cdot mA^{-1}$. Velikost vektoru $d\mathbf{B}$ je:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin\alpha}{r^2} \quad (2.5)$$

Úhel α svírají vektory $d\mathbf{l}$ a \mathbf{r}^0 .

Při výpočtu magnetické indukce pole v daném bodě A okolí vodiče protékaného stacionárním proudem, vektorově sečteme infinitezimální příspěvky $d\mathbf{B}$ všech proudových elementů vodiče k celkové magnetické indukci. Platí **Biotův-Savartův (-Laplaceův) zákon** (2.4), který formuloval P. S. Laplace na základě experimentálních poznatků Biota a Savarta.

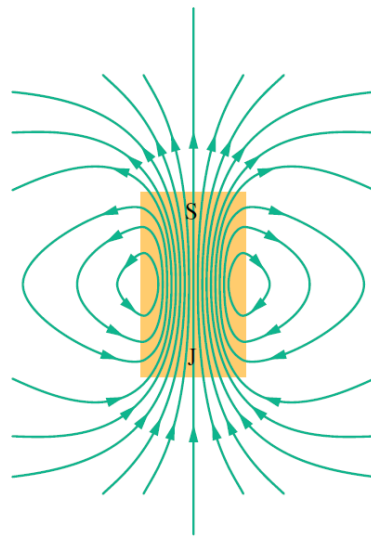


Obrázek 6 Vodič s protékajícím proudem[6]

Na základě platnosti (2.4) můžeme tvrdit, že příspěvky $d\mathbf{B}$ od všech elementů vodiče jsou shodně orientované ve směru tečny ke kružnici, která leží v rovině kolmé k vodiči a prochází bodem A . Protože platí princip superpozice, stačí, abychom určili vektor \mathbf{B} , sečíst velikosti všech vektorů $d\mathbf{B}$ integrací. [7]

2.4 Permanentní magnety

Permanentní magnety jsou vyrobeny z látek, které mají vnitřní uspořádání částic takové, že se jejich magnetické momenty nevyrušují, ale naopak sčítají a vytvářejí kolem sebe magnetické pole. Magnetické pole kolem permanentního magnetu znázorňují indukční čáry. Ty procházejí magnetem a vytvářejí uzavřené smyčky. Místo, kde tyto indukční čáry vystupují z magnetu, je nazýváno severním pólem magnetu. Místo, kde se do magnetu vracejí, nazýváme jižní pól magnetu. Permanentní magnety mohou být různých tvarů a velikostí. Na Obr. (1.1) je permanentní magnet tyčové tvaru s indukčními čarami znázorňující jeho magnetické pole.



Obrázek 7 Tyčový permanentní magnet[2]

Každý permanentní magnet má alespoň jeden severní a jeden jižní magnetický pól. Pojem pól je zaveden pro popis magnetů. Pól tedy není jedno konkrétní místo, ale jde o oblast se specifickými vlastnostmi. Při rozpůlení magnetu nezískáme pouze jednu část se severním pólem a jednu s jižním pólem, ale dostaneme dva magnety, kdy každý z nich bude mít opět jeden severní a jeden jižní magnetický pól. [2]

3 MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE

3.1 Hallův jev

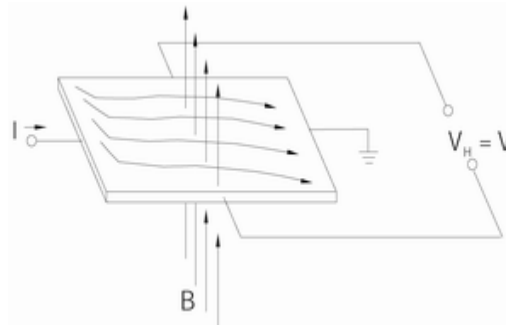
Hallův jev či Hallův efekt, tedy vliv magnetického pole na směr toku elektrického proudu, byl objeven v roce 1879 Edwinem Hallem během jeho doktorského studia na univerzitě Johna Hopkinse v Baltimoru. Hall si během pokusu, který měl potvrdit vliv magnetického pole na změnu odporu vodiče, všimnul, že pokud položí magnet kolmo k ploše tenkého kvádru zlata, kterým protéká proud, objeví se na jeho protějších stranách rozdílové napětí. Dále zjistil, že toto napětí je úměrné hodnotě proudu, hustotě magnetického toku a magnetické indukci. Tento jev dále studoval, plně vyzkoušel a popsal, ale vzhledem k tehdy omezeným technologiím, došlo k jeho praktickému využití v aplikacích až po objevení a zvládnutí výroby polovodičových materiálů. V roce 1965 pak pánové Everett Vorthmann a Joe Maupin vytvořily plně integrovaný křemíkový bezkontaktní spínač s Hallovým jevem, který poté našel masové nasazení například v elektronických klávesnicích.

3.1.1 Senzory s Hallovým jevem

Hallův jev tedy spočívá ve vychylování směru toku elektrického proudu v závislosti na velikosti indukce magnetického pole B , které je kolmé na polovodičovou (křemíkovou) tenkou destičku, tzv. Hallův element. Výsledkem je generování rozdílového napětí na bočních stranách elementu úměrné právě velikosti působícího magnetického pole či jeho kolmosti vzhledem k destičce.



Obrázek 8 Hallův element bez působení magnetického pole[19]



Obrázek 9 Hallův element s působením magnetického pole[19]

Pokud tedy Hallův element, jímž protéká konstantní hodnota proudu I_C (je připojen na zdroj konstantního napětí), není vystaven působení magnetického pole B , je napětí V_H na jeho svorkách nulové.

Pokud se objeví v jeho okolí magnetické pole, působí na elementem procházející proud elektronů tzv. Lorenzova síla, která elektrony vychyluje z přímého směru vždy k jedné boční straně destičky silou podle vzorce $F = Q (v \times B)$, kde Q je náboj, v je jejich rychlost a B je indukce působícího magnetického pole. Změní se tak rozložení náboje, kdy na jedné straně je větší koncentrace nosičů náboje (elektronů) než na druhé a tedy obě boční stěny destičky mají rozdílný potenciál. Vzniká tak elektrické pole E a na svorkách Hallova elementu se generuje tzv. Hallovo napětí V_H .

[19]

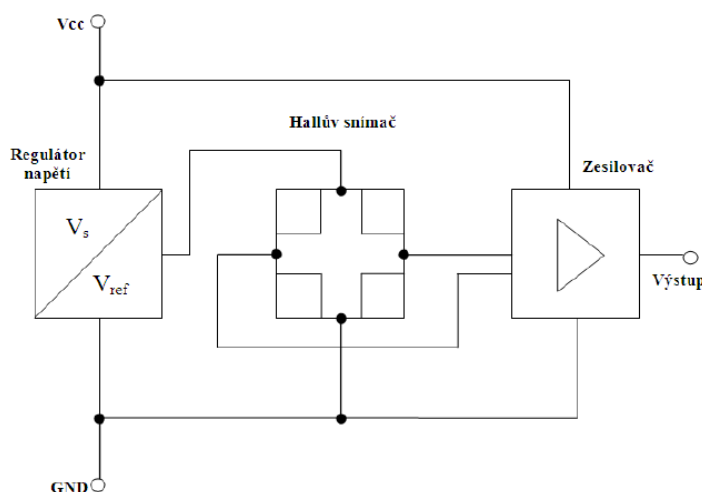
3.1.2 Stručný přehled typů Hallových sond

Hallové sondy lze rozdělit podle principu činnosti, na snímače lineární a snímače pracující ve spínacím režimu.

3.1.2.1 Lineární Hallova sonda

Hallova sonda, která pracuje v lineárním režimu, převádí hustotu magnetického toku na signál (napětí), který je přímo úměrný tomuto poli. Takovým snímačem pak lze vyhodnocovat vzdálenost od zdroje konstantního magnetického toku (většinou permanentní magnet) nebo velikost, který prochází vodičem (elektromagnetem) v konstantní vzdálenosti od sondy. Výstupní napětí samotné Hallové sondy je velmi malé. Pokud je napájecí napětí Hallové sondy příliš zvlněné (obsahuje šum) dochází ke znehodnocení získaného signálu. Toto znehodnocení je úměrné míře zarušení signálu. [8]

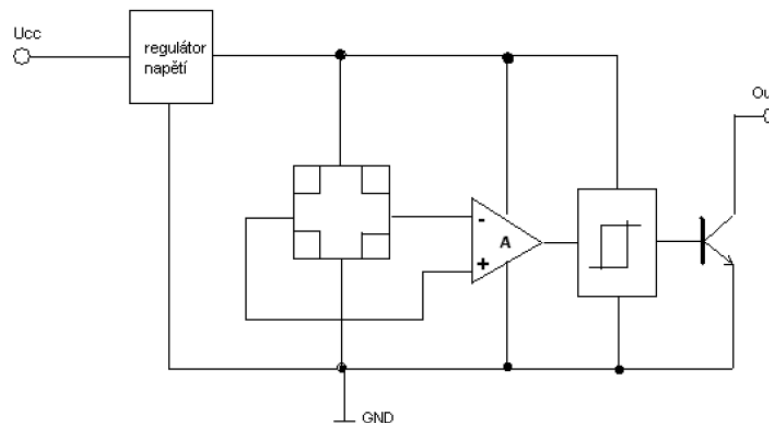
Proto se Hallovy sondy doplňují o další elektronické prvky, které pomáhají zlepšit jeho parametry. Regulátor napětí zajistí dostatečně stabilní napájecí napětí, aby výstup sondy měl konstantní napětí při konstantním magnetickém toku snímačem. Na výstupu z Hallovy sondy je i přes to velmi malé Hallovo napětí, které je pro lepší použitelnost zesíleno operačním zesilovačem a vyvedeno na výstupní svorky. Díky zařazení zesilovače na výstup získáme úroveň napětí v rozumné velikosti pro detekce změn hustoty magnetického pole. Tyto tři prvky jsou integrovány do jednoho čipu s několika výstupními vývody, které se používají pro napájení i pro výstup získaného signálu. Vnitřní uspořádání je vidět na obrázku (3.2).



Obrázek 10 Vnitřní uspořádání lineární Hallovy sondy[8]

3.1.2.2 Hallova sonda ve spínacím režimu

Druhým typem snímačů, je Hallova sonda doplněná o Schmittův klopný obvod (SKO) obrázek (4.3). Tento snímač funguje jako magnetický spínač, který mění hodnotu na svém výstupu pouze v hodnotách logické 1 a 0. Vhodným nastavením výstupního zesilovače je možné měnit práh spínání v závislosti na intenzitě magnetického pole. Pokud přiblížíme permanentní magnet nebo elektromagnet do nastavené vzdálenosti od snímače, nebo ještě blíže, dojde na jeho výstupu k překlopení do úrovně logické 1, po oddálení magnetu, se opět vrátí do původní úrovně logická 0.



Obrázek 11 Vnitřní uspořádání Hallovy sondy se Schmittovým klopným obvodem[8]

U Hallových spínačů, se do Schmittova klopného obvodu navíc záměrně zavádí hystereze, která omezuje oscilace snímače na prahové hodnotě. Tedy pokud se magnet pohybuje na hranici překlopení snímače, nedochází k náhodným spínáním. Výstup snímače bývá ještě z praktických důvodů posílen o bipolární nebo unipolární tranzistor, který umožňuje spínání větších proudů. Tranzistor je v zapojení s otevřeným kolektorem.

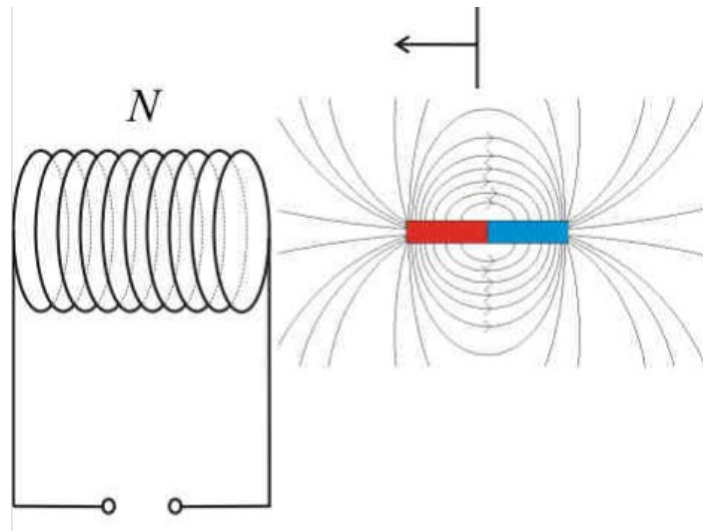
3.1.3 Použití Hallových sond

Hallovy sondy se s úspěchem používají v nejrůznějších elektronických a elektrotechnických systémech, které jsou například náročné na údržbu a čistotu prostředí. Magnet se většinou integruje do systému, například zalitím do umělé hmoty, nebo pryskyřice a sonda se rovněž může zalít do některé z umělých hmot, nebo pryskyřic. Takto vytvořený systém je prakticky bezúdržbový, a kromě rušivých magnetických polí, nebo nechtěné změny vzdálenosti v důsledku mechanického poškození systému, nepůsobí na tento snímač žádné jiné vlivy. Nejvíce se však používají Hallové sondy v automobilním průmyslu, a v drobné elektronice, jako jsou například chladicí ventilátory a malé EC motorky. Své uplatnění mají rovněž v měřicí technice, kde mají největší využití při měření stejnosměrných proudů. [8]

3.2 Měření magnetického pole indukční metodou

Tato metoda využívá jevu elektromagnetické indukce: změní-li závit polohu vůči vyšetřovanému magnetickému poli, indukuje se v něm elektromotorické napětí.

Elektromagnetická indukce



Obrázek 12 Cívka s N závity a magnetická tyč s magnetickým polem [9]

Výpočet indukovaného napětí

$$U_{em} = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{dB}{dt}$$

(3.1)

Umístíme-li cívku do stacionárního magnetického pole, nebude se na cívce indukovat žádné napětí U_{em} .

Pohybem magnetu způsobíme časově proměnné magnetické pole (tj. v prostoru cívky se mění magnetické indukční tok Φ), které způsobí indukci elektromotorického napětí U_{em} na cívce.

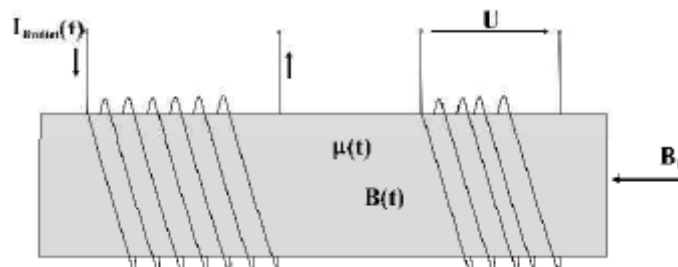
Měřením magnetického toku procházející cívkou a znalostí velikosti plochy závitu S vedou k velice jednoduché metodě měření magnetické indukce B .

[9]

3.2.1 Feromagnetická sonda

Magnetická sonda měří pouze komponenty externího magnetického pole paralelní k budícím a snímacím cívkám, a proto se nejčastěji používá v kompasech letadla, lodí nebo k měření kolísání magnetického pole Země, atd.

Feromagnetické sondy jsou schopné detekovat magnetické pole o magnetické indukce v rozsahu $10^{-10} - 10^{-7}$ T, což odpovídá magnetické intenzitě v rozsahu $10^{-4} - 10^{-7} \text{ Am}^{-1}$ (ve volném prostoru). Feromagnetickou sondou lze měřit také střídavé magnetické pole, jenže jejich frekvence musí být alespoň o řád menší, než frekvence budícího proudu.



Obrázek 13 Feromagnetická sonda [9]

[9]

3.3 VSM (Vibrating Sample Magnetometer)

VSM pracuje jako gradiometr měřící rozdíl magnetické indukce se vzorkem a bez vzorku v prostoru mezi póly magnetu.

Okolí kolem vzorku nacházejícího se v prostoru magnetu se popíše magnetickou indukcí ve tvaru látkového prostředí (3.2).

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H}_{ext} + \vec{M}) \quad (3.2)$$

V případě, kdy se vzoreček (3.2) nachází mimo oblast magnetu, popíšeme magnetickou indukcí v tvaru pro volné prostředí.

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}_{ext} \quad (3.3)$$

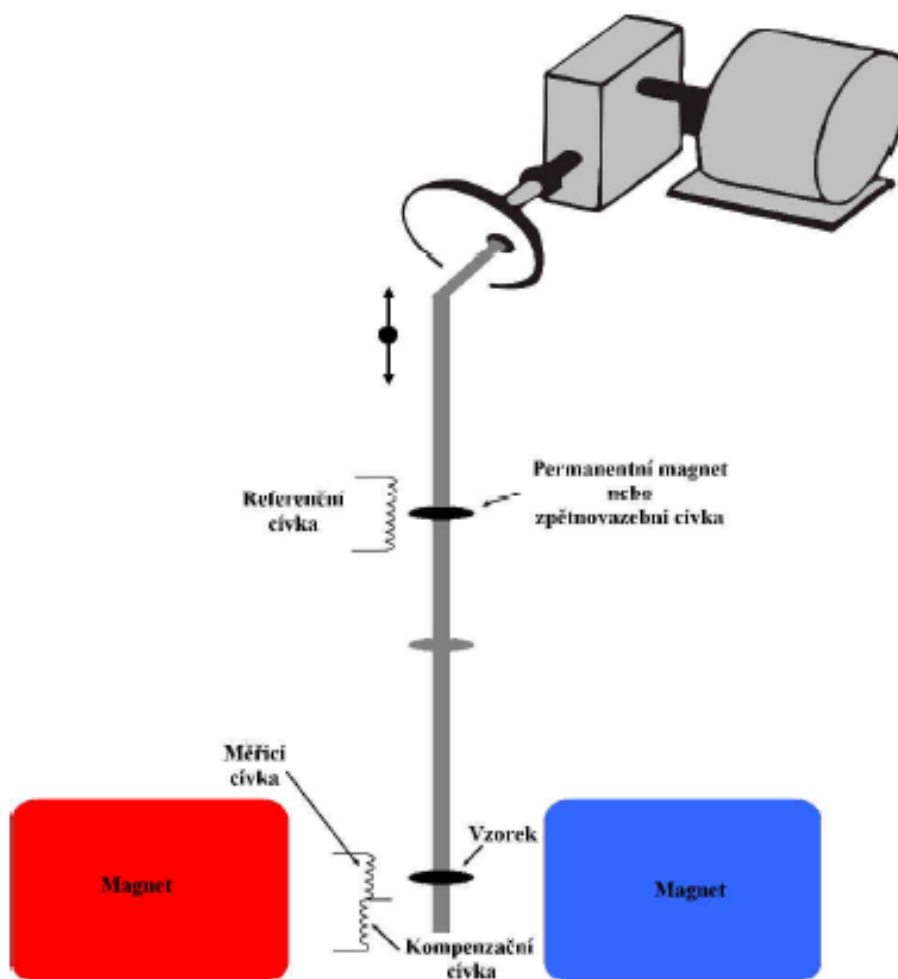
Vyjádření změny v magnetické indukci.

$$\Delta \vec{B} = \mu_0 \vec{M} \quad (3.4)$$

$$\int U_{em} dt = -NA \int dB = -NA |\Delta \vec{B}| = -NA \mu_0 \vec{M} \quad (3.5)$$

VSM (3.5) je schopen měřit magnetický moment o velikost $5 \times 10^{-8} \text{ Am}^2$ ($5 \times 10^{-5} \text{ emu}$) s přesností lepší jak 2 %.

[9]



Obrázek 14 VSM (Vibrating Sample Magnetometer) [9]

4 HELMHOLTZOVY CÍVKY

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

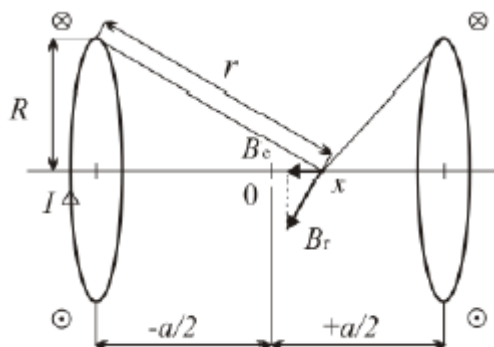
Velikost magnetického pole cívky, která má délku vzhledem k průměru zanedbatelnou, lze spočítat podle Biotova-Savartova zákona. Ten umožňuje výpočet intenzity magnetického pole \mathbf{H} nebo magnetické indukce \mathbf{B} , generované vodičem libovolného tvaru, v libovolném bodě prostoru, který je vyplněn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

[1]

Helmholtzovy cívky slouží k vytvoření homogenního magnetického pole v poměrně velkém prostoru. Nevýhodou je, že pole je relativně slabé, protože cívky jsou vzduchové, neobsahují feromagnetický obvod.

4.1 Základní uspořádání Helmholtzových cívek

Helmholtzovy cívky v základním uspořádání jsou naznačeny na obrázku (4.1). Každá z cívek může být tvořena N závitů těsně přiléhajícími na sebe.



Obrázek 15 Schematické zobrazení Helmholtzových cívek[10]

Při výpočtu magnetické indukce B_c v podélné ose x cívky se vychází z Biotova-Savartova zákona. Výpočet je přesný při splnění následujících podmínek:

- Průřez vinutí (všech N závitů) je zanedbatelný oproti rozměrům R , a .

- Vodiče se nacházejí v magneticky homogenním, izotropním a lineárním prostředí. Pak má Biotův-Savartův zákon tvar křivkového integrálu, v němž je křivka l určena tvarem vodiče:

$$d\vec{B}r = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \Rightarrow \vec{B}r = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_l \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \quad (4.1)$$

Diferenciální přírůstky $d\vec{B}r$ vektoru magnetické indukce vybuzené jednou cívkou lze rozložit podle obrázku (4.1) na složky kolmé k ose x , které se díky kruhové symetrii navzájem zruší, a na složky ležící v ose cívky, které se sčítají, a jejichž celková velikost ve vzdálenosti x od středu 0 bude:

$$B_{c(x)} = Br \frac{R}{r} = \frac{\mu_0 I N R^2}{2r^3} = \frac{\mu_0 N I R^2}{2(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (4.2)$$

[10]

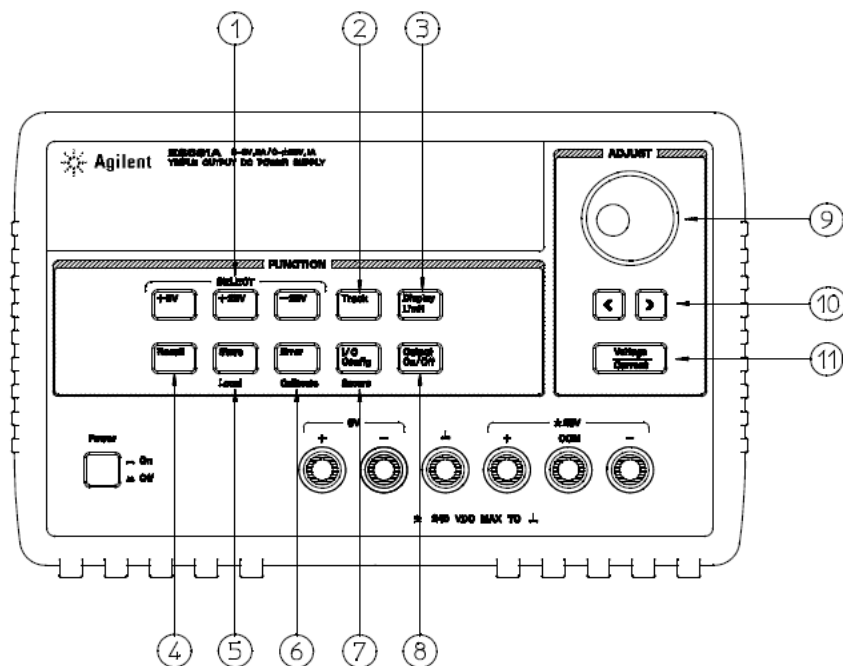
Výše uvedený vztah lze tedy snadno aplikovat pro další praktické výpočty, které v této práci budou následovat.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 NÁVRH MĚŘÍCÍHO PRACOVISTĚ

Úvodem k praktické části bakalářské práce je popis pracoviště. To sestávalo z několika přístrojů, které budou níže blíže popsány a fyzického experimentu resp. sestavy Helmholtzových cívek. Celkem tedy byly použity 3 napájecí číslicové zdroje Agilent, stolní multimetr Agilent, gaussmetr Lakeshore a Helmholtzovy cívky. Měření a veškeré experimenty byly prováděny v laboratoři Fakulty aplikované informatiky.

5.1 Napájecí zdroj Agilent E3631 A



Obrázek 16 Pohled na přední panel zdroje[11]

- 1) Tlačítka pro výběr napěťového rozsahu (+6 V, +25 V, -25 V)
- 2) Tlačítko Tracking módu- zap./vyp. (Zapnutí/vypnutí „trackovacího“ módu při rozsahu ± 25 V)
- 3) Tlačítko Display limit (Zobrazí proudové a napěťové limity na display. Pomocí otočného knoflíku 9 a kláves se šipkami je možné tyto hodnoty upravit)
- 4) Tlačítko Recall operating state (slouží pro vyvolání nastavení parametrů zdroje uložených v paměti)
- 5) Tlačítko Store operating state/Local slouží k uložení nastavených parametrů zdroje do paměti. Dále lze klávesy použít při přechodu z dálkového do místního ovládání.

- 6) Tlačítko Error/Calibrate slouží k zobrazení a odstranění chyb které mohou vznikát během dálkového ovládání. Dále lze klávesu použít ke kalibraci/k povolení kalibračního módu.
- 7) Tlačítko I/O Configuration/Secure-Nastaví zdroj pro vzdálené ovládání nebo povolí/zakáže nastavení zdroje pro kalibraci.
- 8) Tlačítko Output On/Off-Slouží k aktivaci/deaktivaci výstupů zdroje
- 9) Knoflík Control-Inkrementuje/Dekrementuje hodnoty napětí a proudu dle volby
- 10) Tlačítka Resolution -slouží pro výběr čísel z proudového/napěťového rozsahu
- 11) Tlačítko Voltage/Current-slouží pro výběr napětí či proudu které lze pak nastavit pomocí otočného knoflíku.

5.1.1 Základní vlastnosti

- Tři výstupy
- Jednoduché nastavení proudu a napětí pomocí otočného knoflíku
- Jasný display
- Tracking operace pro ± 25 V
- Excelentní regulace a nízké zvlnění a šum
- Přenosný, robustní pouzdro s protiskluzovými nohami

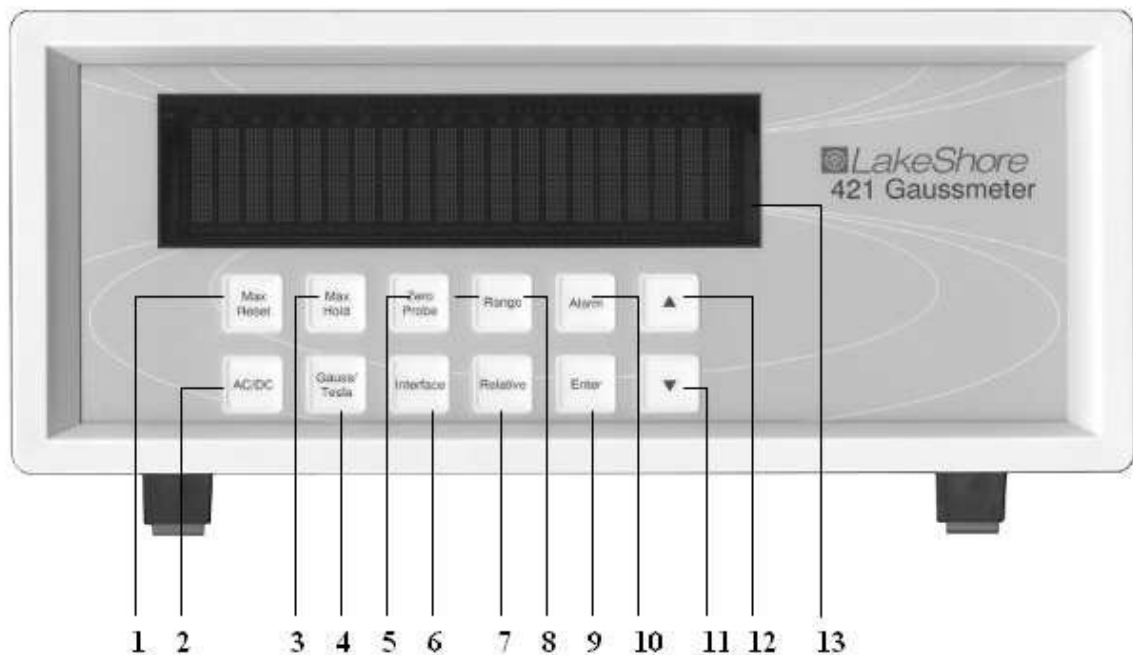
5.1.2 Flexibilní systémové funkce

- Rozhraní GPIB (IEEE-488) a RS-232 jsou standardem
- SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments) kompatibilní
- I/O nastavení lze snadno provést z čelního panelu

[11]

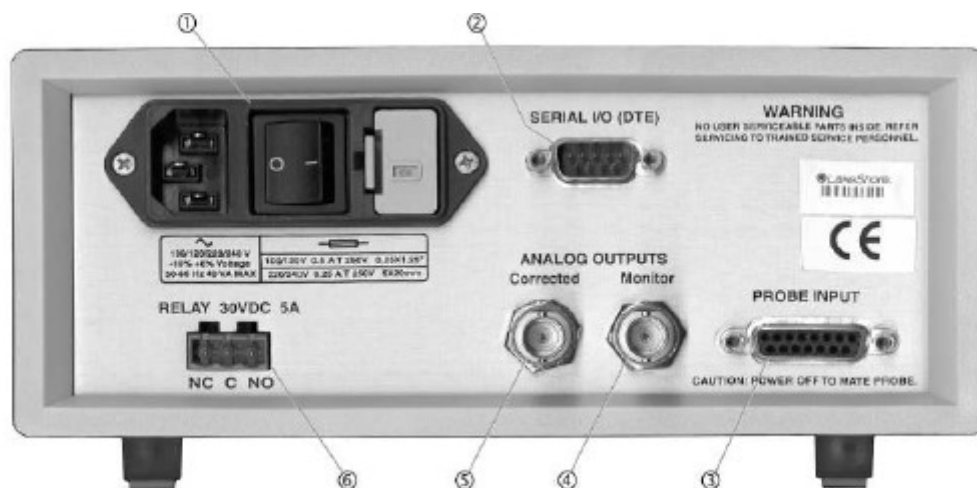
5.2 Gaussmetr Lakeshore 421

Model LakeShore 421 Gaussmeter byl použit na měření elektromagnetické indukce. Zařízení se vyznačuje snadnou manipulací, rychlou aktualizací, vysokým rozlišením a lehce odečitatelnými hodnotami na rozsáhlém vakuovém fluorescenčním displeji. Na obr. (5.2) je zobrazen přední panel a na obr. (5.3) zadní panel měřícího zařízení



Obrázek 17 Lakeshore 421 gaussmeter-přední panel [12]

1. Tlačítko RESET pro vynulování měřených hodnot, 2. Přepínání měření stejnosměrných/střídavých polí, 3. Zobrazení maximální naměřené hodnoty, 4. Přepínání jednotek Gauss/Tesla, 5. Tlačítko pro kalibraci měřicího přístroje, 6. Tlačítko pro nastavení rozhraní, 7. Tlačítko Relative, 8. Nastavení rozsahu měření, 9. Tlačítko Enter, 10. Tlačítko pro nastavení alarmu, 11. Kurzorové tlačítko ▼, 12. Kurzorové tlačítko ▲, 13. Displej



Obrázek 18 Lakeshore 421 gaussmeter-zadní strana[12]

1. Síťové napájení (konektor síťového kabelu + vypínač), 2. Sériové rozhraní RS232, 3. Vstupní rozhraní sondy (D konektor 15 pin), 4. Analogový výstup pro monitor (konektor BNC), 5. Korigovaný analogový výstup (konektor BNC), 6. Přenosový terminálový blok

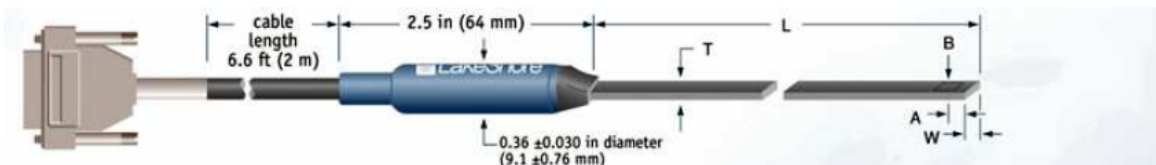
5.2.1 Lakeshore axiální sonda



	L	D		Aktivní oblast	Stem Materiál	Frekvenční rozsah	Použitelná v rozsahu tlaků	Opravena přesnost (% rdg)	Provozní Temp Range	Temp koeficient (max) nulová	Temp koeficient (max) kalibrace
MMA-2502-VH	2 $\pm 0,063$ V	0.25 in dia $\pm 0,006$ V	0.015 s $\pm 0,005$ V	0.030 s dia (cca)	Hliník	DC a 10 Hz až 400 Hz	30 G, 300 G, 3 kg, 30 kg	$\pm 0,25\%$ do 30 kg	0 °C až +75 °C	$\pm 0,09$ g / °C	-0,04% / °C
MNA-1904-VH	4 $\pm 0,125$ V	0.187 s dia $\pm 0,005$ V	0.005 s $\pm 0,003$ V		Laminát epoxid						
MMA-2502-VG	2 $\pm 0,063$ V	0.25 in dia $\pm 0,006$ V	0.015 s $\pm 0,005$ V		Hliník						
MNA-1904-VG	4 $\pm 0,125$ V	0.187 s dia $\pm 0,005$ V	0.005 s $\pm 0,003$ V		Laminát epoxid						

Obrázek 19 Axiální sonda[12]

5.2.2 LakeShore Příčná sonda



	L	T	W	A	Active area	Stem material	Frequency range	Usable full scale ranges	Corrected accuracy (% rdg)	Operating temp range	Temp coefficient (max) zero	Temp coefficient (max) calibration
MMT-6J04-VH	4 in $\pm 0,125$ in	0.061 in max	0.180 in $\pm 0,005$ in	0.150 in $\pm 0,050$ in	0.040 in dia (approx)	Aluminum	DC	30 G, 300 G, 3 kG, 30 kG	$\pm 0,25\%$ to 30 kG	0 °C to +75 °C	$\pm 0,09$ G/°C	-0.04%/°C
MNT-4E04-VH	4 in $\pm 0,125$ in	0.045 in max	0.150 in $\pm 0,005$ in			Rigid glass epoxy	DC and 10 Hz to 400 Hz					
MMT-6J04-VG	4 in $\pm 0,125$ in	0.061 in max	0.180 in $\pm 0,005$ in			Aluminum	DC	300 G, 3 kG, 30 kG	$\pm 0,15\%$ to 30 kG			
MNT-4E04-VG	4 in $\pm 0,125$ in	0.045 in max	0.150 in $\pm 0,005$ in			Rigid glass epoxy	DC and 10 Hz to 400 Hz					

Obrázek 20 Příčná sonda[12]

6 NÁVRH KONSTRUKCE-PROVEDENÍ CÍVEK

Pro naše měření a experimenty musely být cívky vyhotoveny, jelikož jejich dostupnost a cena nejsou příliš příznivé. Celá konstrukce je zhotovena z 6 kotoučů o 3 různých průměrech přičemž jeden pár slouží k orientaci v ose X, 2. pár k orientaci v ose Y a 3. pár k orientaci v ose Z.

6.1 Parametry cívek

K našemu experimentu bylo nutno stanovit přibližné parametry, které by měla konstrukce cívek v Helmholtzově uspořádání splňovat. Parametry tedy byly stanoveny empiricky a po konzultaci s vedoucím bakalářské práce p. Ing. Milanem Navrátilem, Ph.D. a s p. doc. RNDr. Vojtěchem Křesálkem, CSc. s ohledem na výstupní výkon dodaných zdrojů v laboratoři.

Cívky pro osu X mají tedy průměr 250 mm a vzdálenost mezi nimi je 125 mm. Obě cívky mají 70 závitů, které jsou navinuty těsně na sobě. Jejich odpor resp. odpor celého vinutí je 6,656 Ω .

Cívky pro osu Y mají průměr 225 mm a jsou od sebe vzdáleny přibližně 110 mm. Obě tyto cívky mají 61 závitů, které jsou navinuty těsně na sobě. Odpor celého vinutí je 6,344 Ω .

Cívky pro osu Z mají průměr 210 mm a jsou od sebe vzdáleny přibližně 100 mm. Obě tyto cívky mají 53 závitů, které jsou navinuty těsně na sobě. Odpor celého vinutí je 4,109 Ω .

Vinutí je z měděného lakovaného drátu o průměru 0,6 mm. Lak je polyuretanový, odolný vůči teplotě až 190°C

Maximální dodávaný proud do cívek tedy snadno zjistíme z Ohmova zákona (6.1)

$$I = \frac{U}{R}; [A, V, \Omega] \tag{6.1}$$

Nezapomeňme ovšem na proudová omezení zdrojů.

$$\text{Cívky X: } I_{6V} = \frac{6}{6,656} = 0,901$$

$$I_{+25} = \frac{25}{6,656} = 3,756 \Rightarrow I_{MAX} = 1 [A]$$

$$\text{Cívky Y: } I_{6V} = \frac{6}{6,344} = 0,945$$

$$I_{+25} = \frac{25}{6,344} = 3,941 \Rightarrow I_{MAX} = 1 [A]$$

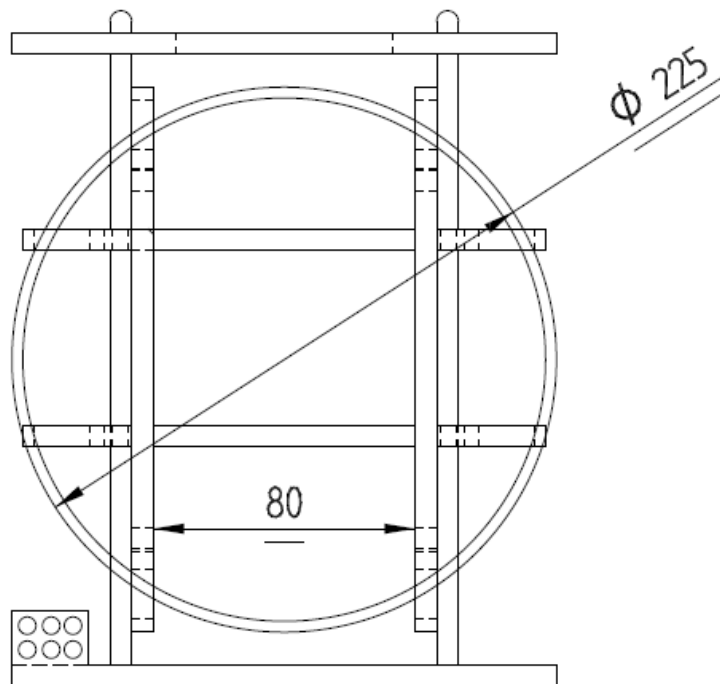
$$\text{Cívky Z: } I_{6V} = \frac{6}{4,109} = 1,460$$

$$I_{+25} = \frac{25}{6,084} = 3,941 \Rightarrow I_{MAX} = 1,460 [A]$$

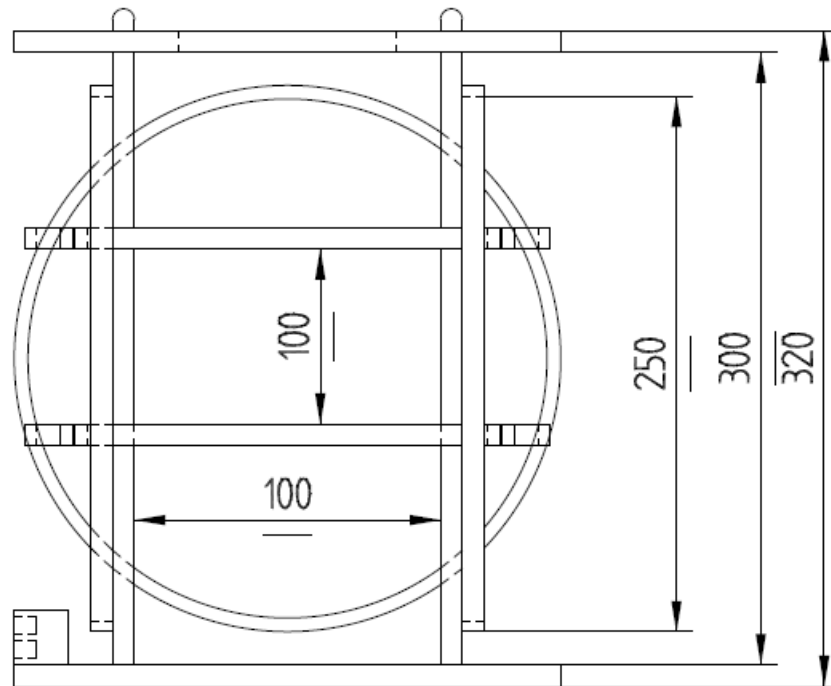
Po dosazení a porovnání s parametry zdrojů jasně vidíme, na jaké výstupy zdroje bude vhodné zátěže připojit. Skutečný dodávaný proud se může lišit. „Peaky“ (špičky) zdrojů bývají obvykle o něco vyšší.

6.2 Návrh konstrukce

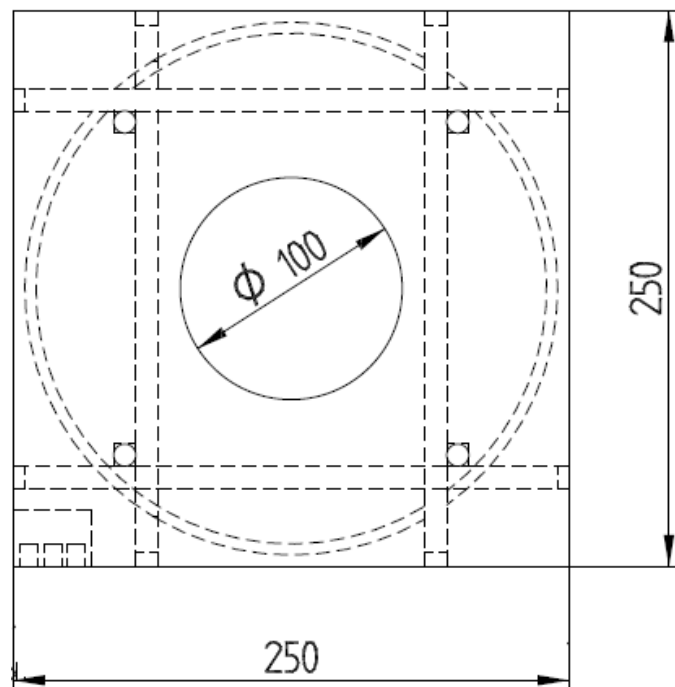
Kotouče jsou zhotoveny z plastové roury o průměru 250 mm. Vrchní a spodní díly jsou z OSB desek, opracovány a nalakovány mající rozměr 250x250 mm. V horním dílu je kruhový výřez o průměru 100 mm, viz obrázky níže.



Obrázek 21 Pohled zepředu-nárys



Obrázek 22 Pohled z boku-bokorys

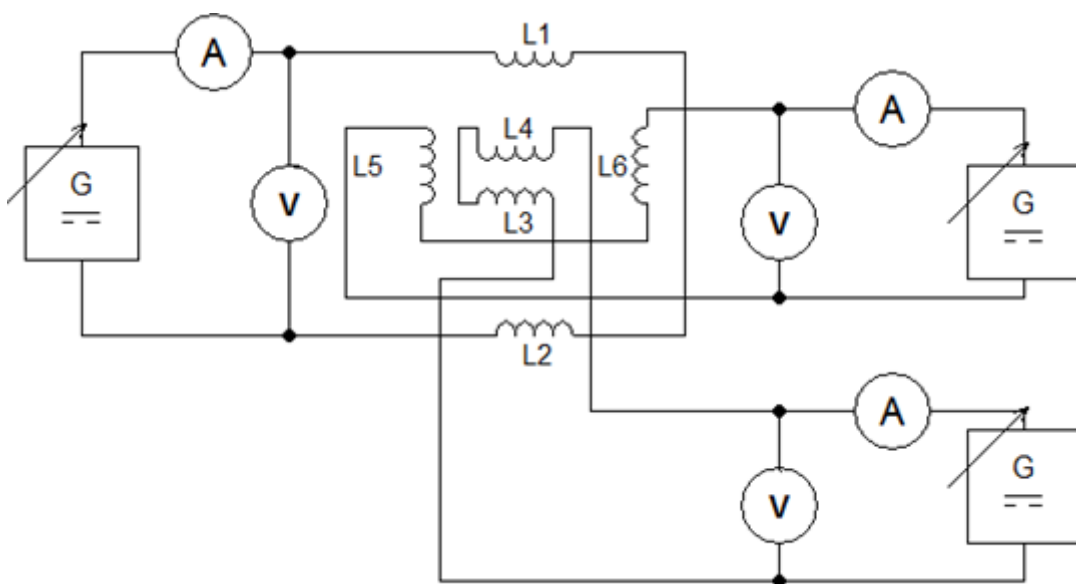


Obrázek 23 Pohled shora-půdorys

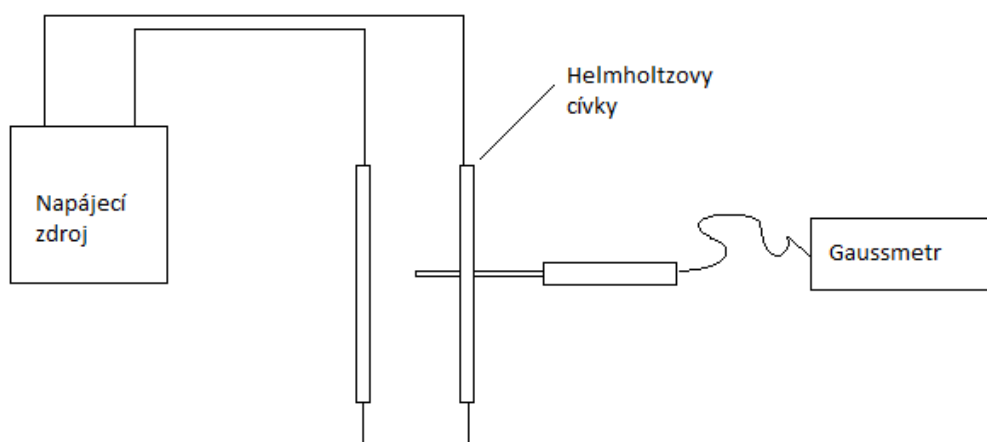
7 VLASTNÍ MĚŘENÍ

Při vlastním měření bylo použito výše uvedených přístrojů a cívky v Helmholtzově uspořádání. Pro přesnější posun axiální sondy jsem zhotovil několik primitivních přípravků s měřidly. Při měření byl nastaven konstantní proud a pohyb sondy probíhal ve všech 3 osách. Pro zmapování magnetické indukce v prostotu uvnitř cívek bylo provedeno měření ve 3 horizontálních úrovních a to pro páry cívek X a Y. V ose Z je dostačující měření pro 1 vertikální úroveň, jenž je v ose cívek.

7.1 Schémata zapojení



Obrázek 24 Schéma zapojení Helmholtzových cívek



Obrázek 25 Blokové schéma zapojení s gaussmetrem

V níže uvedených tabulkách jsou použity symboly a zkratky č. m., d a B. Jejich význam uvádí tabulka (7.1).

Tabulka 7.1 Význam použitých symbolů a zkratk

Zkratka	Popis	Jednotky
č. m.	Číslo měření, číslováno od 1	[-]
d	Vzdálenost sondy od průsečíku os všech 6 cívek, tento bod je brán jako počátek systému souřadnic X, Y a Z	[mm]
B	Magnetická indukce	[G]

Měření sond je závislé na úhlu snímače s ohledem na magnetické pole. Čím větší je úhel mezi sondou a magnetickým polem, tím větší je procento chyby. Například, 5 ° odchylka způsobí chybu 0,4%, 10 ° odchylka způsobí chybu 1,5%, atd.

Určení nejistoty A:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 3,35475 \text{ G/A}$$

$$u_{Ax} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0,048681 \text{ G/A}$$

7.2 Měření magnetické indukce v ose X

Pracoviště jsem zapojil dle schématu (7.1) pouze s tím rozdílem, že napájecí zdroje pro páry Y a Z jsou vypnuté.

Při mapování magnetického pole v ose X jdeme od kladných hodnot, až do hodnot záporných (myšleno od středu cívek) viz obr. (4.1) tak, abychom sondou zmapovali všechna potenciální místa vhodná k řízení magneticky aktivních těles. Připojíme ke zdroji 25 V a proud nastavíme na maximální hodnotu, která činí 1,128 A.

Měření provádíme pro 3 horizontální vrstvy a to pro vrstvu či rovinu, která protíná střed resp. osu cívek a pro vrstvy, jenž hraničí s horní a dolní částí páru cívek.

Tabulka 7.2 Měření pro 0. horizontální vrstvu osa X

č. m.	d	B	č. m.	d	B	č. m.	d	B
[-]	[mm]	[G]	[-]	[mm]	[G]	[-]	[mm]	[G]
1	-200	1,43	15	-60	4,08	29	80	4,07
2	-190	1,60	16	-50	4,05	30	90	4,00
3	-180	1,72	17	-40	4,02	31	100	3,90
4	-170	2,02	18	-30	4,00	32	110	3,73
5	-160	2,22	19	-20	4,01	33	120	3,57
6	-150	2,45	20	-10	4,01	34	130	3,35
7	-140	2,68	21	0	4,03	35	140	3,13
8	-130	3,00	22	10	4,03	36	150	2,66
9	-120	3,17	23	20	4,03	37	160	2,45
10	-110	3,45	24	30	4,04	38	170	2,20
11	-100	3,64	25	40	4,03	39	180	2,06
12	-90	3,86	26	50	4,05	40	190	1,91
13	-80	3,96	27	60	4,09	41	200	1,38
14	-70	4,03	28	70	4,10			

Tabulka 7.3 Měření pro -I. horizontální vrstvu osa X

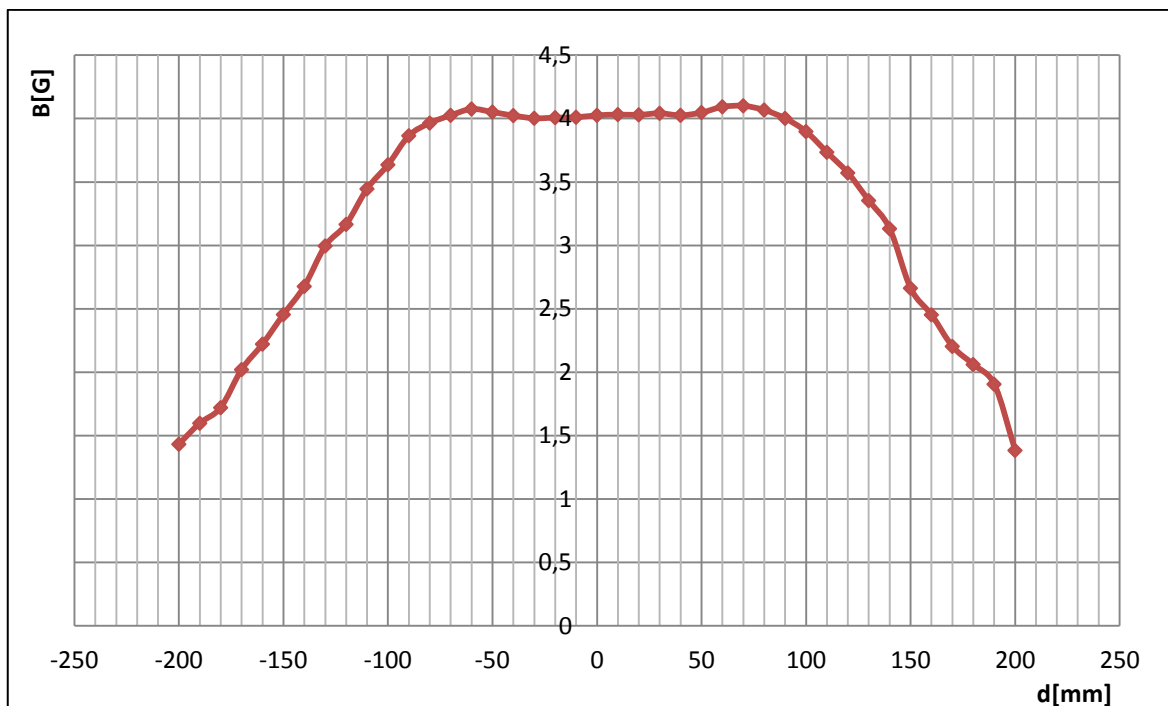
č. m.	d	B	č. m.	d	B
[-]	[cm]	[G]	[-]	[cm]	[G]
1	-150	1,57	17	10	2,35
2	-140	2,30	18	20	2,49
3	-130	3,08	19	30	2,74
4	-120	3,90	20	40	3,32
5	-110	4,28	21	50	3,80
6	-100	6,32	22	60	5,57
7	-90	9,52	23	70	9,03
8	-80	10,65	24	80	11,58
9	-70	8,28	25	90	10,11
10	-60	5,74	26	100	6,53
11	-50	3,75	27	110	3,89
12	-40	3,02	28	120	2,81
13	-30	2,79	29	130	2,59
14	-20	2,56	30	140	2,14
15	-10	2,40	31	150	1,86
16	0	2,31			

Tabulka 7.4 Měření pro +1. horizontální vrstvu osa X

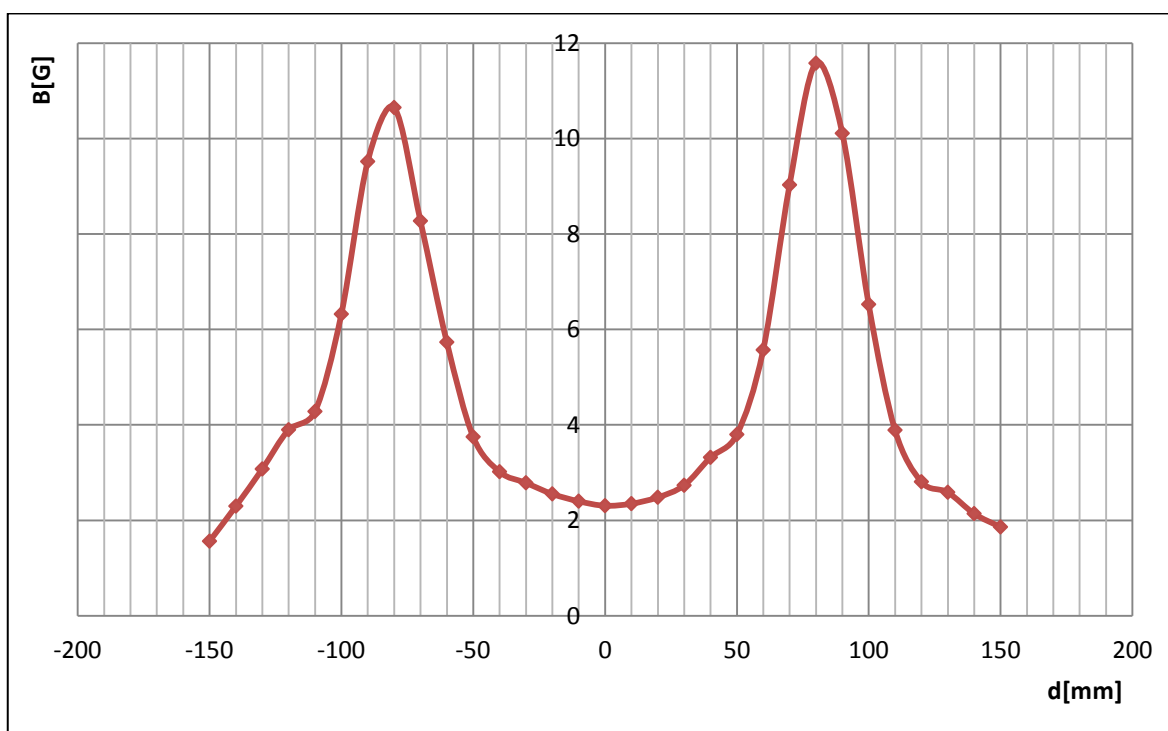
č. m.	d	B	č. m.	d	B	č. m.	d	B
[-]	[cm]	[G]	[-]	[cm]	[G]	[-]	[cm]	[G]
1	-200	1,24	15	-60	5,03	29	80	5,46
2	-190	1,40	16	-50	5,00	30	90	5,35
3	-180	1,60	17	-40	4,75	31	100	4,87
4	-170	1,77	18	-30	4,41	32	110	4,59
5	-160	2,04	19	-20	4,10	33	120	3,82
6	-150	2,25	20	-10	3,75	34	130	3,35
7	-140	2,54	21	0	3,68	35	140	2,82
8	-130	3,09	22	10	3,70	36	150	2,52
9	-120	3,40	23	20	3,72	37	160	2,34
10	-110	3,77	24	30	3,81	38	170	1,70
11	-100	4,17	25	40	3,95	39	180	1,57
12	-90	4,54	26	50	4,22	40	190	1,31
13	-80	4,92	27	60	4,20	41	200	1,29
14	-70	5,12	28	70	5,12			

Příklad výpočtu pro 21. měření, 0. horizontální vrstva, tabulka 7.1:

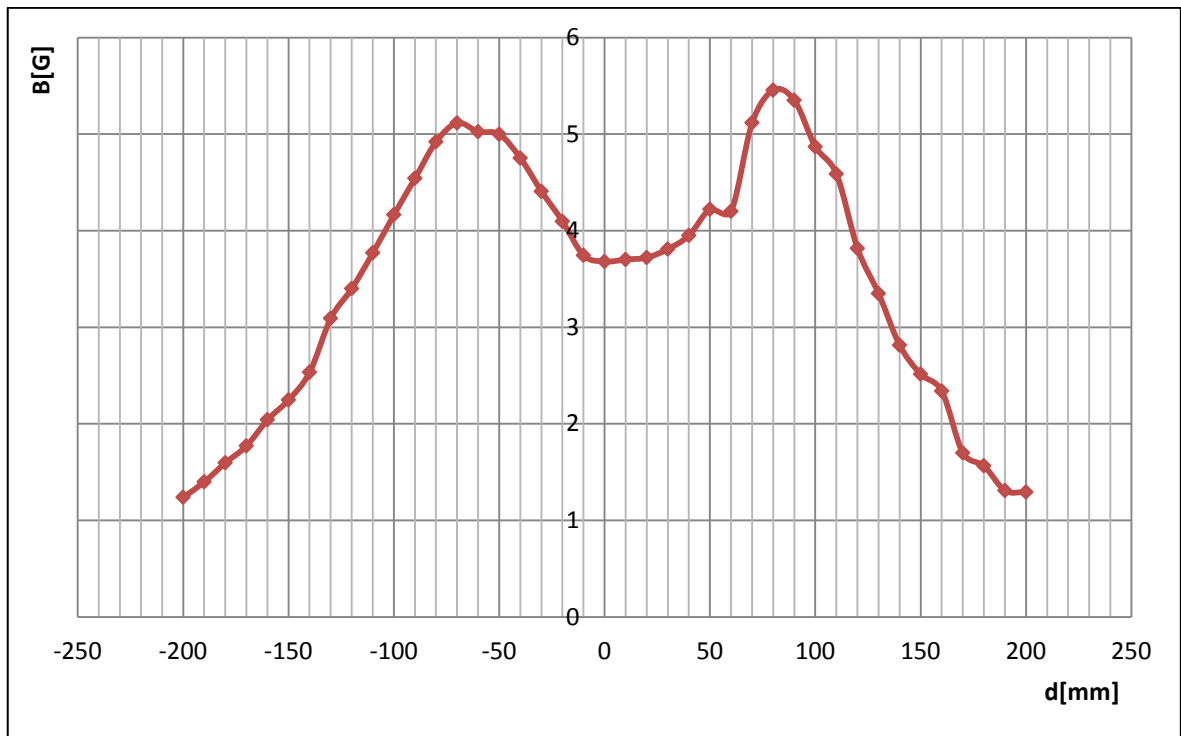
$$\begin{aligned}
 B_{C(x)} &= Br \frac{R}{r} = \frac{\mu_0 INR^2}{2r^3} = \frac{\mu_0 NIR}{2(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\mu_0 * 70 * 1,128 * 0,125^2}{2(0,125^2)^{\frac{3}{2}}} = 396,896 \mu T \\
 &= 3,96 G
 \end{aligned}$$



Graf 7.1 Závislost magnetické indukce na vzdálenosti od středu v 0. vrstvě osa X



Graf 7.2 Závislost magnetické indukce na vzdálenosti od středu v -1. vrstvě osa X



Graf 7.3 Závislost magnetické indukce na vzdálenosti od středu v +1. vrstvě osa X

Z grafických závislostí je jasně patrné, že oblast vhodná pro řízení je v ose cívek tedy v 0. horizontální vrstvě jelikož magnetické pole v této oblasti je homogenní. Má velikost přibližně 4 G což pro experimentální úlohy dostačuje. Pokud tedy umístíme míček s magneticky aktivním tělesem uvnitř, můžeme jej horizontálně orientovat.

7.3 Měření magnetické indukce v ose Y

Pracoviště jsem zapojil dle schématu (7.1) pouze s tím rozdílem, že napájecí zdroje pro páry X a Z jsou vypnuté.

Při mapování magnetického pole v ose Y jdeme od kladných hodnot, až do hodnot záporných, viz obr. (4.1) tak, abychom sondou zmapovali všechna potenciální místa vhodná k řízení magneticky aktivních těles. Připojíme ke zdroji 25 V a proud nastavíme na maximální hodnotu, která činí 1,132 A.

Měření provádíme pro 3 horizontální vrstvy a to pro vrstvu či rovinu, která protíná střed resp. osu cívek a pro vrstvy, jenž hraničí s horní a dolní částí páru cívek.

Tabulka 7.5 Měření pro 0. horizontální vrstvu osa Y

č. m.	d	B	č. m.	d	B	č. m.	d	B
[-]	[mm]	[G]	[-]	[mm]	[G]	[-]	[mm]	[G]
1	-200	1,23	15	-60	4,50	29	80	3,92
2	-190	1,46	16	-50	4,58	30	90	3,67
3	-180	1,65	17	-40	4,62	31	100	3,35
4	-170	1,83	18	-30	4,64	32	110	3,07
5	-160	2,14	19	-20	4,64	33	120	2,76
6	-150	2,36	20	-10	4,64	34	130	2,46
7	-140	2,66	21	0	4,64	35	140	2,18
8	-130	2,84	22	10	4,64	36	150	1,90
9	-120	3,06	23	20	4,64	37	160	1,68
10	-110	3,34	24	30	4,56	38	170	1,48
11	-100	3,64	25	40	4,54	39	180	1,27
12	-90	3,91	26	50	4,46	40	190	1,11
13	-80	4,21	27	60	4,34	41	200	0,91
14	-70	4,36	28	70	4,15			

Tabulka 7.6 Měření pro -1. horizontální vrstvu osa Y

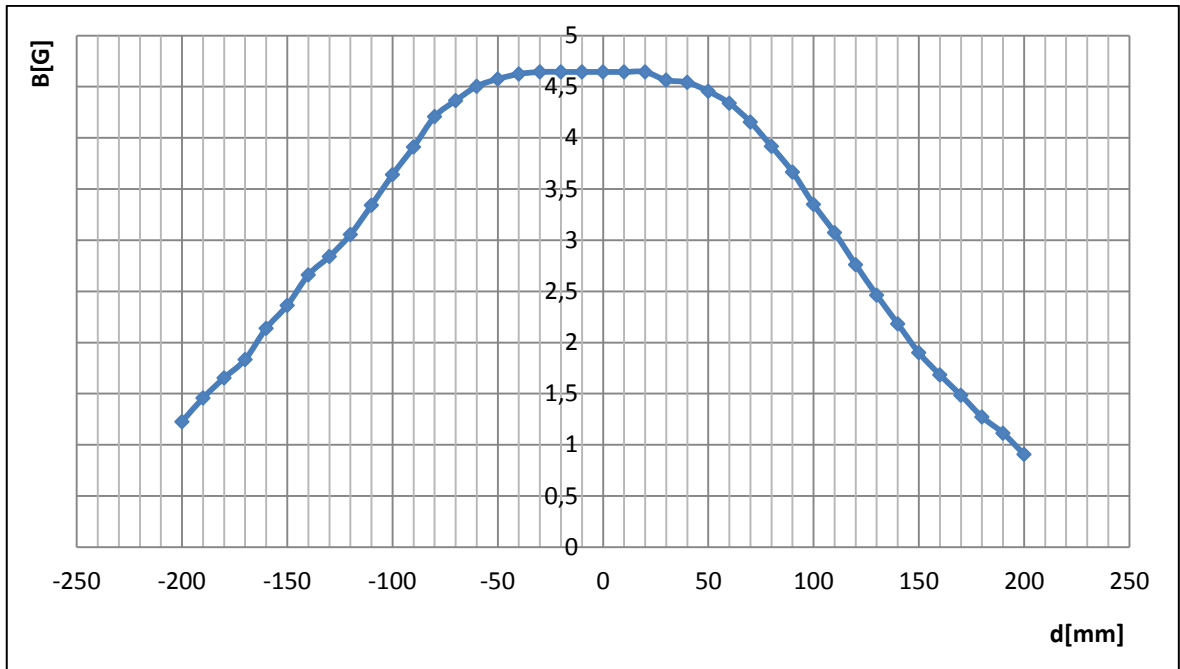
č. m.	d	B	č. m.	d	B
[-]	[cm]	[G]	[-]	[cm]	[G]
1	-150	0,91	17	10	2,93
2	-140	1,05	18	20	3,07
3	-130	1,23	19	30	3,43
4	-120	1,49	20	40	4,30
5	-110	1,73	21	50	6,15
6	-100	2,17	22	60	9,68
7	-90	2,57	23	70	10,79
8	-80	3,54	24	80	9,20
9	-70	6,32	25	90	6,46
10	-60	7,52	26	100	4,22
11	-50	11,90	27	110	2,88
12	-40	9,29	28	120	2,15
13	-30	5,82	29	130	1,70
14	-20	4,21	30	140	1,42
15	-10	3,38	31	150	1,27
16	0	2,99			

Tabulka 7.7 Měření pro +I. horizontální vrstvu osa Y

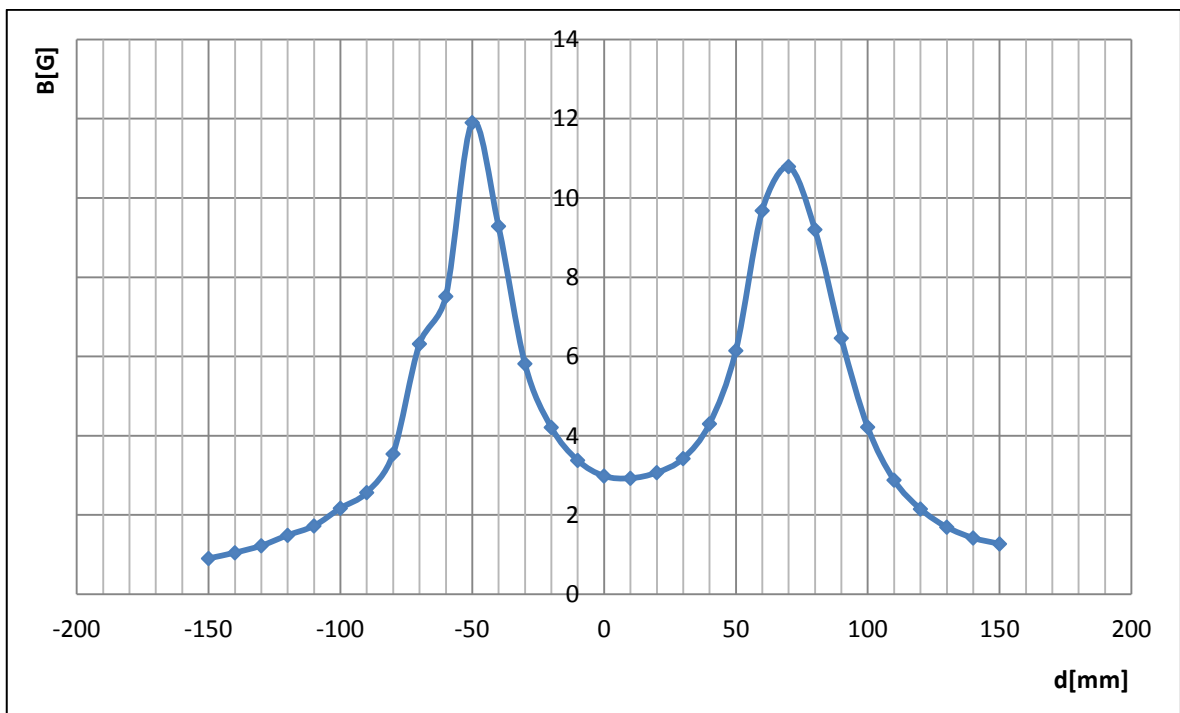
č. m.	d	B	č. m.	d	B
[-]	[cm]	[G]	[-]	[cm]	[G]
1	-200	0,672	22	10	3,050
2	-190	0,772	23	20	3,549
3	-180	0,928	24	30	4,564
4	-170	1,054	25	40	6,576
5	-160	1,142	26	50	9,065
6	-150	1,258	27	60	9,800
7	-140	1,535	28	70	8,612
8	-130	1,795	29	80	4,836
9	-120	2,284	30	90	3,257
10	-110	2,952	31	100	2,475
11	-100	4,184	32	110	1,745
12	-90	6,472	33	120	1,652
13	-80	9,055	34	130	1,425
14	-70	9,570	35	140	1,221
15	-60	7,524	36	150	1,069
16	-50	5,144	37	160	0,972
17	-40	3,735	38	170	0,877
18	-30	3,110	39	180	0,780
19	-20	2,899	40	190	0,700
20	-10	2,735	41	200	0,638
21	0	2,787			

Příklad výpočtu pro 10. měření, 0. horizontální vrstva, tabulka 7.4:

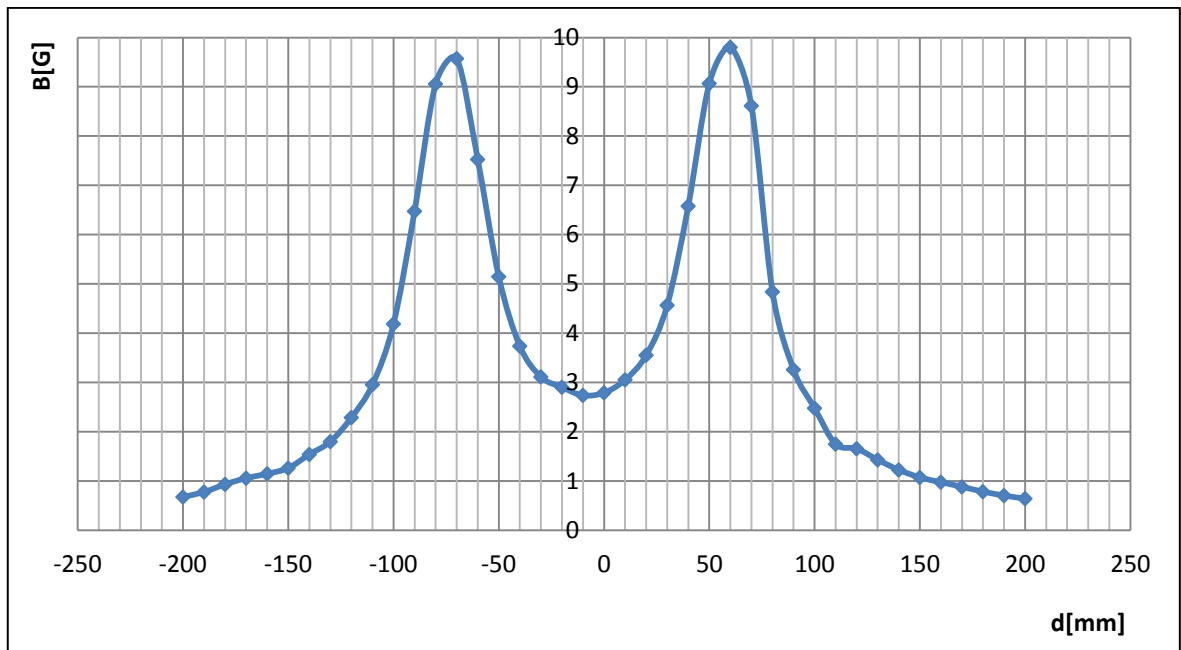
$$\begin{aligned}
 B_{c(x)} &= Br \frac{R}{r} = \frac{\mu_0 I N R^2}{2r^3} = \frac{\mu_0 N I R}{2(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\mu_0 * 61 * 1,132 * 0,1125^2}{2(0,1125^2)^{\frac{3}{2}}} = 364,264 \mu T \\
 &= 3,64 G
 \end{aligned}$$



Graf 7.4 Závislost magnetické indukce na vzdálenosti od středu v 0. vrstvě osa Y



Graf 7.5 Závislost magnetické indukce na vzdálenosti od středu v -1. vrstvě osa Y



Graf 7.6 Závislost magnetické indukce na vzdálenosti od středu v +1. vrstvě osa Y

Z grafických závislostí je opět jasně patrné, že oblast vhodná pro řízení je v ose cívek tedy v 0. horizontální vrstvě jelikož magnetické pole v této oblasti je homogenní v rozmezí přibližně 10 cm. Velikost magnetické indukce se pohybuje okolo 4,5 G.

7.4 Měření magnetické indukce v ose Z

Hlavní rozdíl oproti měřením předchozím spočíval v umístění a posunu sondy, který v tomto případě probíhal vertikálně, nikoli horizontálně. Jelikož předchozí dva případy jasně vyloučili využití oblastí mimo osu cívek, resp. oblast kolem jejich osy, považují za zbytečné monitorovat tyto zbylé 2 části. Proud protékající obvodem byl přibližně 1,510 A. Přesnost jsem zvolil na 5 mm. Pro přesnější měření byl vyhotoven pomocný přípravek, po kterém se sonda pohybovala.

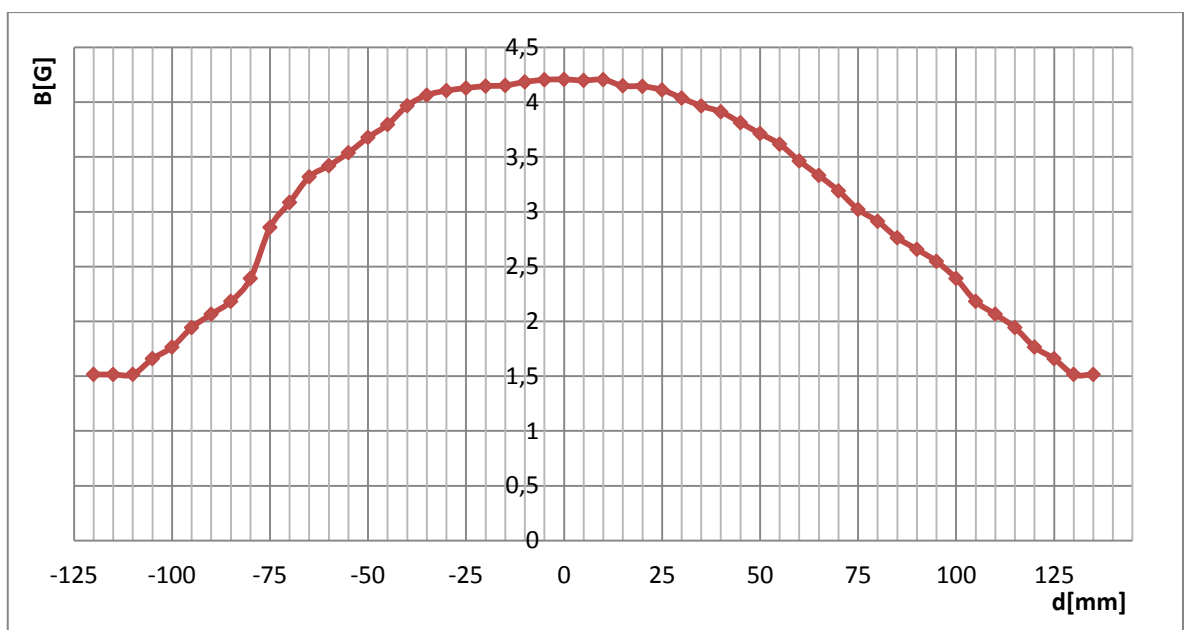
Tabulka 7.8 Měření pro 0. vertikální vrstvu osa Z

č. m.	d	B	č. m.	d	B	č. m.	d	B
-	[mm]	[G]	-	[mm]	[G]	-	[mm]	[G]
1	-120	1,516	19	-30	4,105	37	60	3,463
2	-115	1,515	20	-25	4,128	38	65	3,331
3	-110	1,516	21	-20	4,146	39	70	3,19
4	-105	1,659	22	-15	4,152	40	75	3,021
5	-100	1,765	23	-10	4,184	41	80	2,912
6	-95	1,943	24	-5	4,204	42	85	2,762
7	-90	2,065	25	0	4,207	43	90	2,657
8	-85	2,182	26	5	4,198	44	95	2,547
9	-80	2,391	27	10	4,205	45	100	2,391
10	-75	2,657	28	15	4,149	46	105	2,182
11	-70	3,085	29	20	4,144	47	110	2,065
12	-65	3,318	30	25	4,111	48	115	1,943
13	-60	3,420	31	30	4,037	49	120	1,765
14	-55	3,538	32	35	3,965	50	125	1,659
15	-50	3,678	33	40	3,911	51	130	1,516
16	-45	3,795	34	45	3,812	52	135	1,515
17	-40	3,867	35	50	3,713			
18	-35	4,063	36	55	3,616			

Příklad výpočtu pro 25. měření, 0. vertikální vrstva, tabulka 7.6:

$$B_{C(x)} = Br \frac{R}{r} = \frac{\mu_0 INR^2}{2r^3} = \frac{\mu_0 NIR}{2(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\mu_0 * 53 * 1,503 * 0,105^2}{2(0,105^2 + 0,01)^{\frac{3}{2}}} = 466,750 \mu T$$

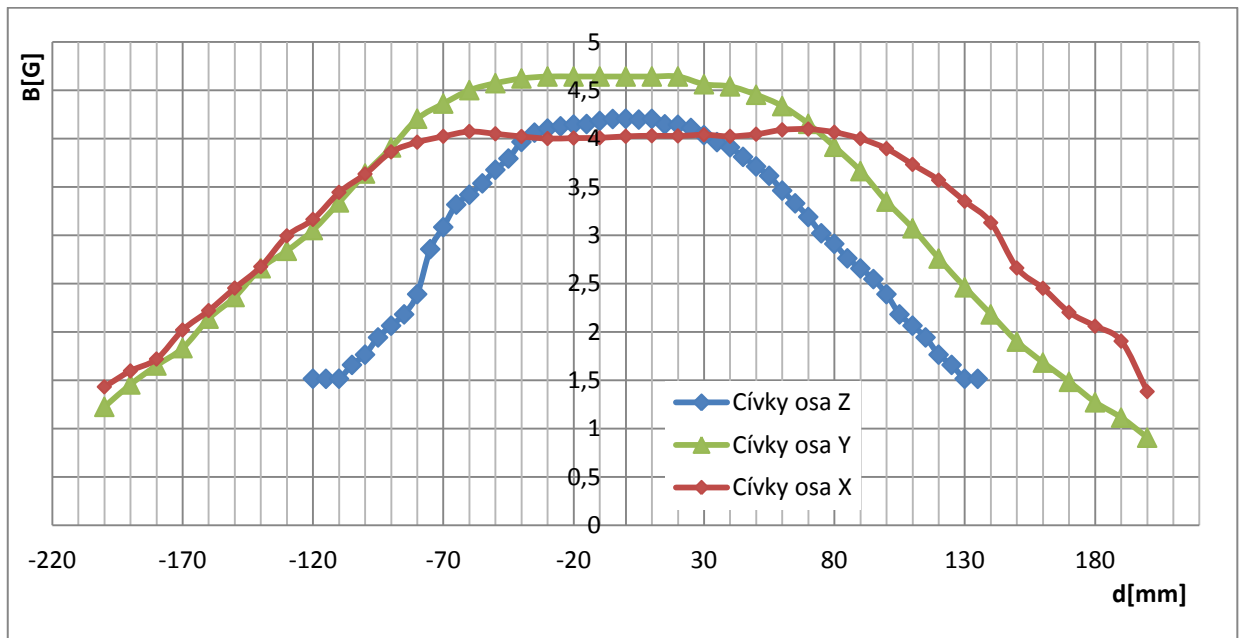
$$= 4,67 G$$



Graf 7.7 Závislost magnetické indukce na vzdálenosti od středu v 0. vrstvě osa Z

Opět je patrné, že magnetická indukce resp. magnetické pole je homogenní v ose cívek a to v polovině jejich vzdálenosti a jejím blízkém okolí.

7.5 Magnetické pole na ose Helmholtzových cívek



Graf 7.8 Magnetická pole jednotlivých cívek v jejich ose

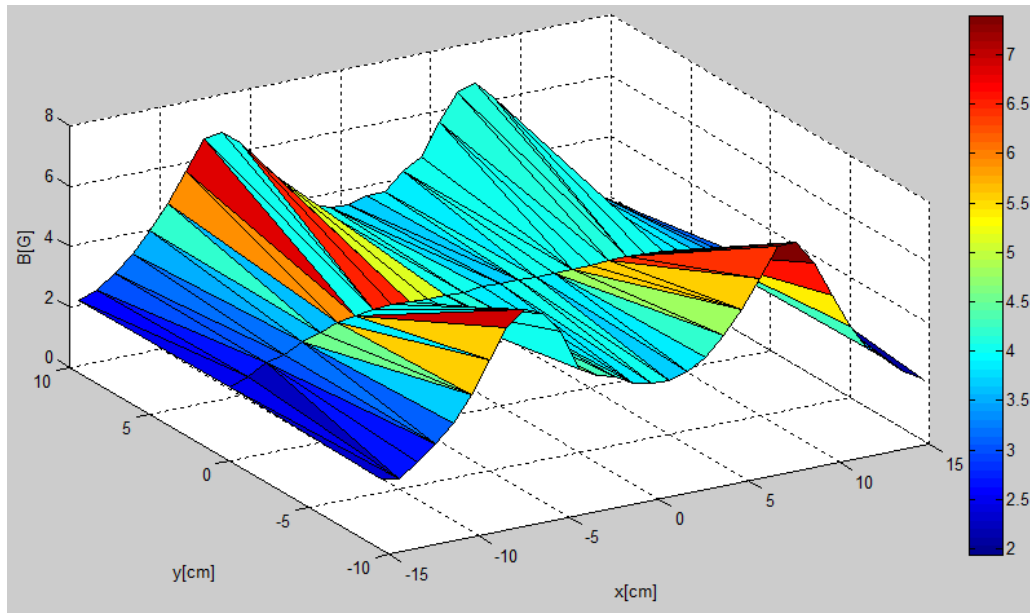
Z grafu (7.8) je zřejmé, že všechny 3 páry mají uprostřed své vzdálenosti a ve své ose homogenní magnetické pole vhodné pro řízení a orientaci magneticky aktivních těles. Vizuálním vyhodnocením nalezneme snadno extrémy jednotlivých funkcí. Při jejich porovnání zjistíme, že nejvýhodnější poměr počet závitů/odpor (N/R) mají cívky v ose Y. Tuto hodnotu, ovšem také ovlivňuje velikost cívek.

7.6 Magnetické pole v rovině osy Helmholtzových cívek

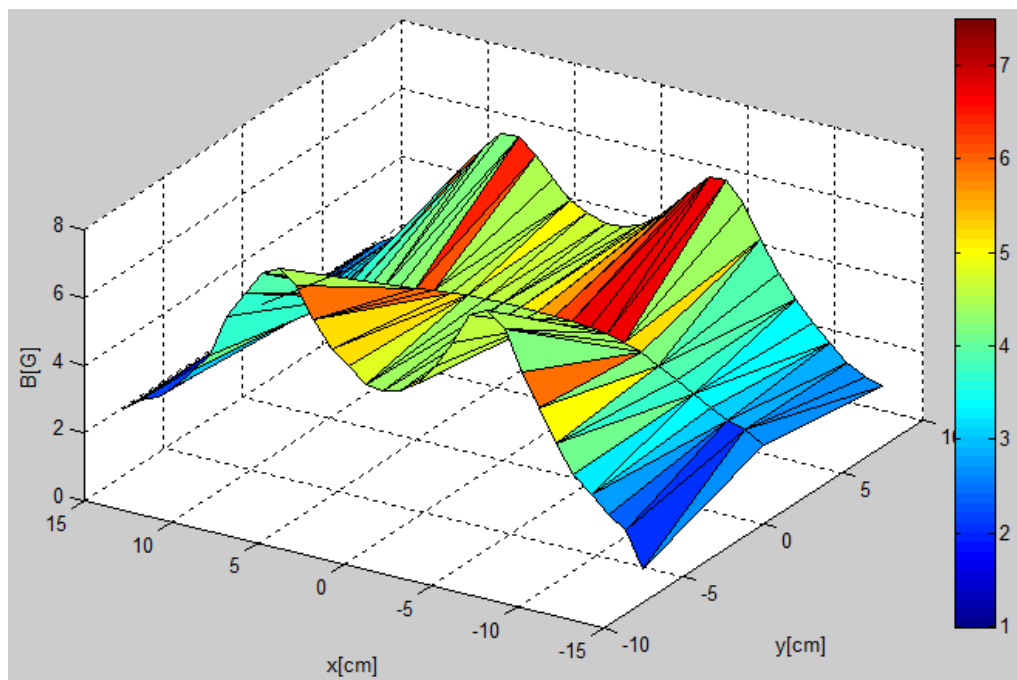
Z předchozích měření vidíme, že homogenní magnetické pole je nejen přesně ve středu Helmholtzových cívek ale i v jeho blízkém okolí. Toto okolí bylo zmapováno stejně, jako v předchozích měřeních. Poté byly sestrojeny 3D grafy z nichž je patrná oblast homogenního magnetického pole vhodného pro aplikace řízení orientace.

Grafy (7.9) a (7.10) obsahují 3 osy, kde B představuje magnetickou indukci, x reprezentuje osu jednotlivých cívek a y posun v rovině osy cívek.

Grafy byly zpracovány v programu Matlab R2011b, v němž jsem vytvořil matici o rozměru 3×100 a do něj načelil hodnoty z textového souboru. Tabulky a zdrojový kód jsou přiloženy v příloze.



Graf 7.9 Magnetická indukce v ose cívek X a jejím okolí



Graf 7.10 Magnetická indukce v ose cívek Y a jejím okolí

Pokud se tedy opět podíváme na 2 výše uvedené grafy (7.9) a (7.10) vidíme, že magnetické pole je homogenní okolo středu, v ose cívek. Oblasti kde je funkce rostoucí, resp. kde jsou lokální maxima funkce, jsou body v blízkosti některé z cívek.

8 UŽIVATELSKÁ APLIKACE PRO ŘÍZENÍ

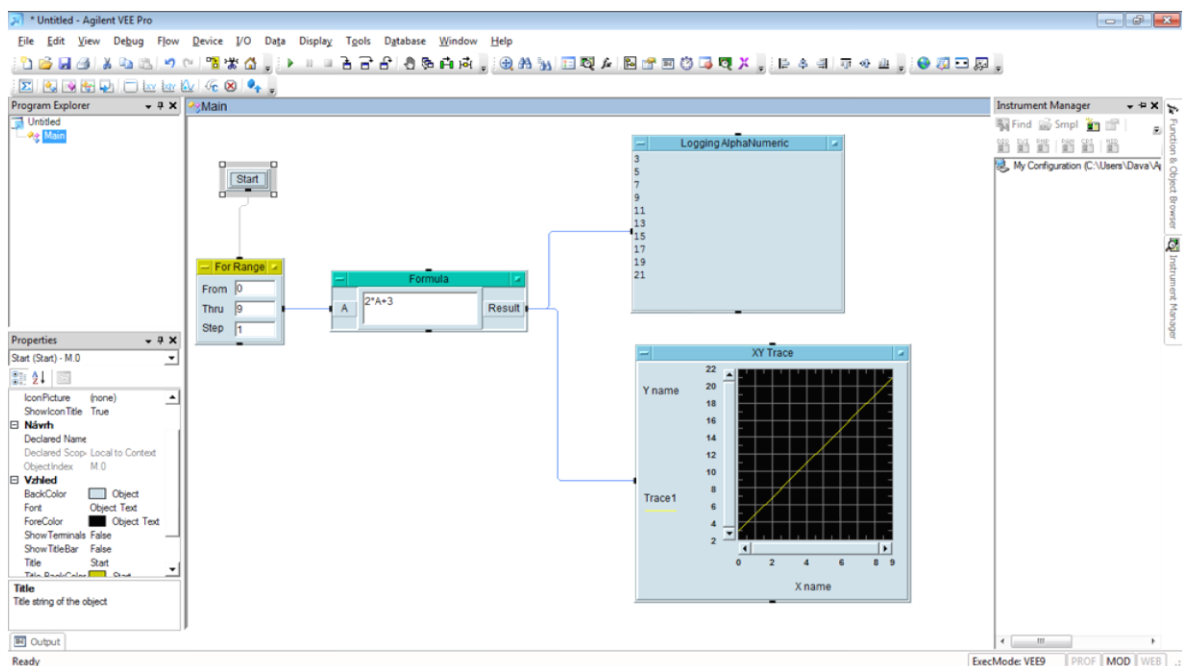
Jelikož je nezbytné, nějakým způsobem magneticky aktivní tělesa řídit a polohovat, je nutné, vyvinout aplikaci, která tuto činnost bude umožňovat. Neméně podstatným požadavkem je kompatibilita, lépe řečeno komunikace se zařízeními na pracovišti. Všechny tyto požadavky a mnohé další nabízí software Agilent Vee Pro.

8.1 Agilent Vee Pro 9.2

Softwarové produkty firmy Agilent Technologies umožňují vyšší produktivitu práce a tak se uživatel může zaměřit na řešení technologických problémů a ne na programování. Program Agilent Vee Pro 9.2 je silný intuitivní grafický jazyk, který umožňuje jednoduchou a rychlou cestu k měření a k analýze.

Agilent Vee je vizuální technické prostředí, které umožňuje programovat za pomoci využití blokových částí se specifickými vlastnostmi. Bloky jsou vybírány z menu nebo nástrojů. Bloky jsou spojovány podle potřeby spojnicemi, za účelem určení chodu programu a simulace úkolů definované uživatelem. Agilent Vee zobrazuje objekty a spojení mezi nimi s barevným odlišením, takže jsou snáze pochopitelné pro ostatní uživatele.

[13]



Obrázek 26 Náhled na programové prostředí Vee Pro s příkladem programu

Agilent Vee je schopen komunikovat za použití GPIB, LAN, USB, RS – 232, VXI a LXI rozhraní. Agilent Vee umí ovládat měřicí nástroje i měřicí počítačové karty za pomoci ovladače k nástroji podporovaný DLL, nebo Agilent Vee Pro's. S Agilent Vee Pro, s adresami nástrojů a další parametry mohou být ověřeny za běhu a změněny za chodu programu bez přeprogramování programu. Agilent Vee Pro automaticky uchovává rozdílné datové typy, umožňuje změnu datového typu a tím komplexní programování. Profiler umožňuje rychle analyzovat problematické části kódu a tím ušetří čas při závěrečném doladování programu.

Agilent Vee Pro obsahuje Matlab skripty a nástroje MathWorks Signal Processing Toolbox, které jsou automaticky obsaženy.

[13]

8.2 Návrh uživatelské aplikace

Jak je již zmíněno výše, uživatelská aplikace byla vytvořena v prostředí Vee Pro. Pomocí této aplikace jsou řízeny programovatelné zdroje Agilent 3631A, ke kterým je připojen experiment, sloužící pro řízení magneticky aktivních těles. Dále posloužilo ke sběru dat z gaussmetru Lakeshore, kdy se v předem nastavené časové periodě zaznamenávala data do paměti a následně byla zapsána do textového souboru.

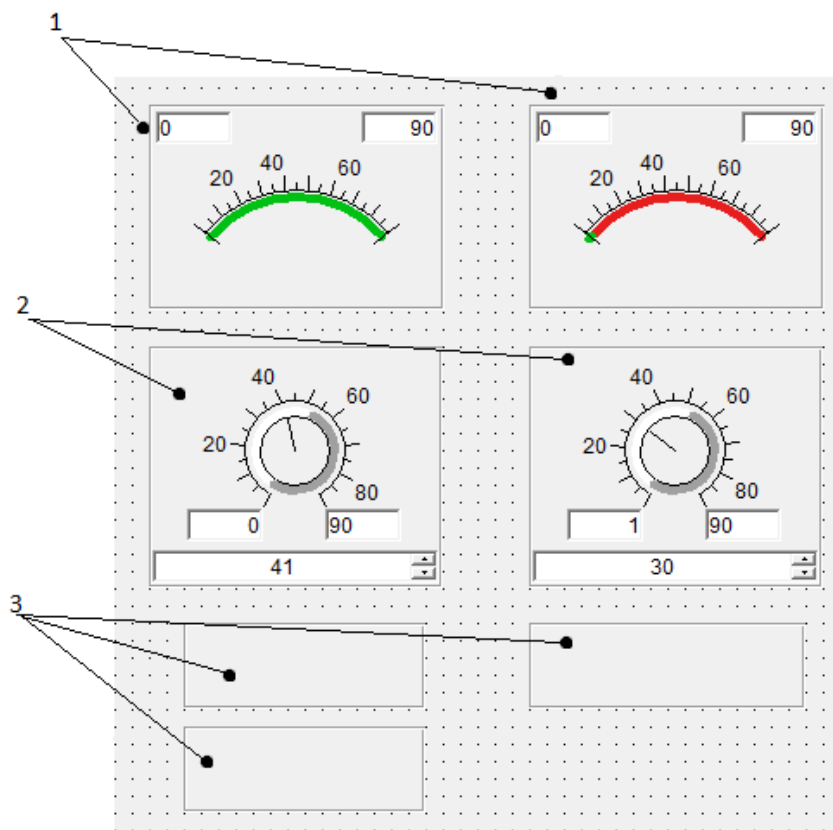
Orientaci je možno provádět z 2 otočných ovladačů, přičemž jeden slouží k orientaci v horizontálním směru v rozsahu 0° - 90° a druhý k orientaci ve směru vertikálním v rozsahu 0° - 90° . Nastavení se projeví změnami proudů, které tečou cívkami. Následně se pak na základě jejich velikosti vypočítá úhel natočení tělesa v polárních souřadnicích.

8.2.1 Popis programu

Popis sestává ze 2 částí a to sice z části pro uživatele (Panel) a z části detailní (Detail). Panel slouží pouze k ovládání a odečítání hodnot bez možnosti modifikace programu. Detail programového schématu již lze libovolně měnit. Vyžaduje však znalost grafického programování ve VeePro.

8.2.1.1 Popis Panelu

1. *Horizontal-M, Vertikal-M* – ručičkové panelmetry, ukazující úhel vychýlení tělesa
2. *Horizontal Knob, Veritkal Knob* – otočné ovladače sloužící k nastavení požadované orientace tělesa
3. *AlphaNumeric* – objekty sloužící k zobrazení hodnot indukce B jednotlivých párů cívek (vlevo: osy X, Y; vpravo: osa Z)



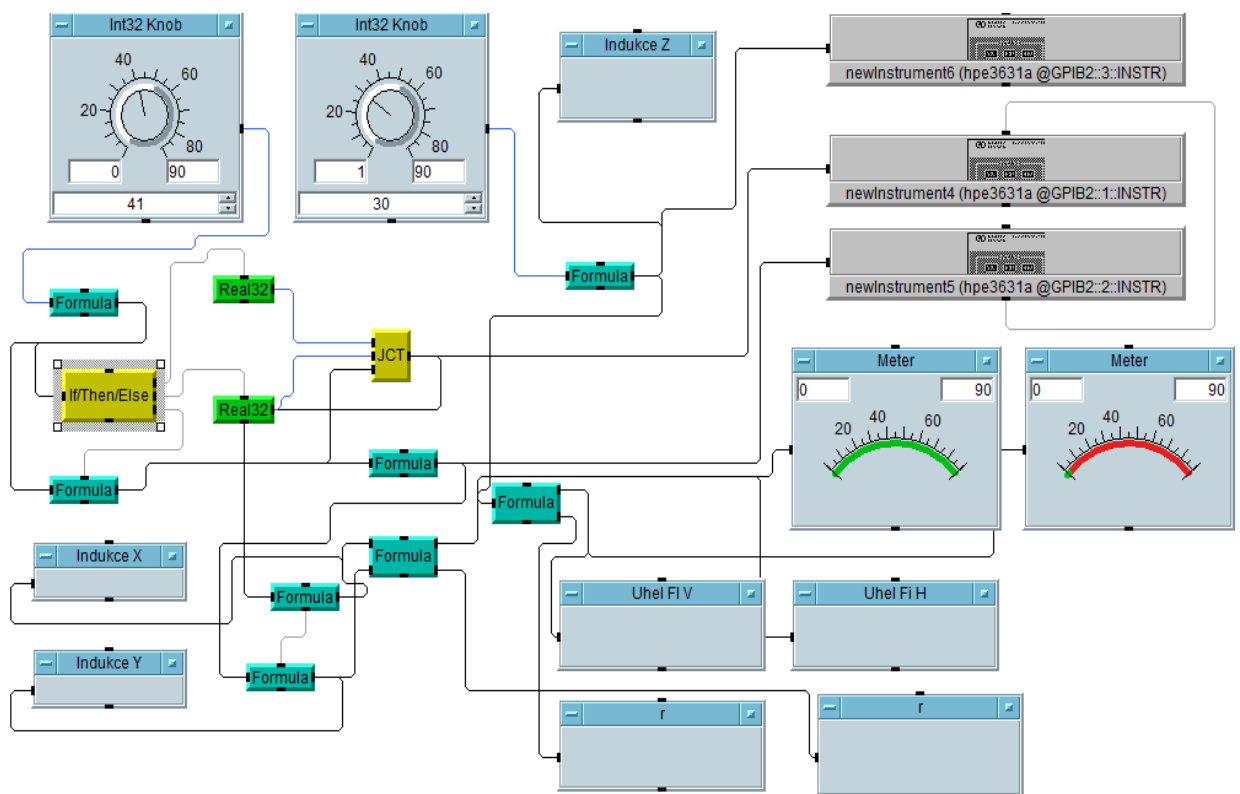
Obrázek 27 Aplikace pro řízení magnetických těles

ve Vee Pro (uživatelský panel)

8.2.1.2 Popis Detailu

- Int32Knob - Slouží pro orientaci ve 2 směrech nezávisle na sobě
- AlphaNumeric - Zobrazuje číselné hodnoty (indukce, úhel, absolutní hodnoty-r, atd.) které do ní vstupují

- newInstrument - Slouží k zapsání resp. vložení příkazů sloužící ke komunikaci s připojenými zařízeními (zdroje, gaussmetr)
- Meter – Zobrazuje úhel natočení tělesa, hodnota do něj vstupující je předem vypočítána (horizontální, vertikální)
- JCT – (Junction) slučuje vstupy v 1 výstup
- If/Then/Else – Podmínkový operátor
- Formula – Objekt který pracuje jako matematický operátor, jeho vstup/výstup je reálné číslo
- Real32 – Objekt s předdefinovaným reálným číslem (32 bit)



Obrázek 28 Aplikace pro řízení magneticky aktivních těles

9 EXPERIMENTÁLNÍ ŘÍZENÍ MAGNETICKY AKTIVNÍCH TĚLES

Jak je již uvedeno v úvodu, původní myšlenka vedoucí ke vzniku tohoto experimentu byla řízení endoskopické kamery malých rozměrů. Jedná se o těleso, jež je zavedeno do těla orálně a poté putuje útroby lidského těla a je řízeno soustavou cívek v helmholtzově uspořádání.

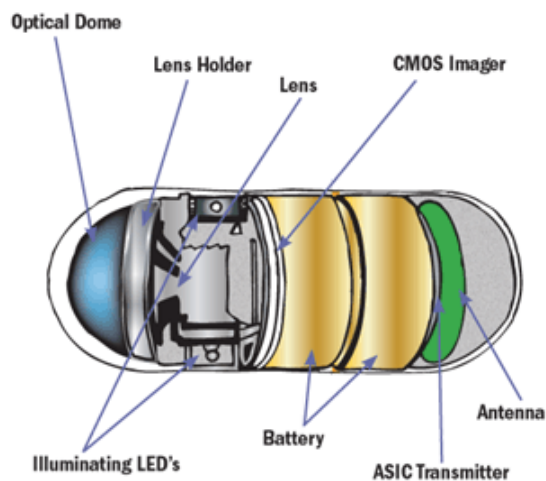
V našich laboratorních podmínkách toto těleso představuje pingpongový míček, s vloženým magneticky aktivním tělesem. V rámci experimentu tedy nahrazuje endoskopickou kameru. Slouží tedy pouze k ilustraci.

9.1 Endoskopické kamery neřízené

I když by možná tato kapitola měla spadat do části teoretické, zahrnul jsem ji zde z důvodu snazšího a rychlejšího pochopení a srovnání dané problematiky.

Jako inspiraci či motivaci pro další experimenty může sloužit fakt, že endoskopické kamery ve tvaru kapslí ve zdravotnictví již existují a jsou v některých zařízeních hojně využívány.

Kapslová endoskopie je procedura, která zahrnuje pozření malé (velikosti velké vitamínové pilulky) viz obr. (9.1) Given Imaging M2A kapsle, která zcela přirozeně projde Vaším zažívacím traktem a přitom dojde k obrazovému záznamu střev. Obrazový záznam je přenášen do sensorové jednotky, která je umístěna na Vašem břiše. Sensorová jednotka je připevněna k zaznamenávacímu zařízení velikosti walkmana, které uloží všechny záznamy. Toto zařízení je umístěno v monitorovacím pásu, který si upevníte kolem pasu.



Obrázek 29 Endoskopická kamera ve tvaru kapsle [15]

Videosignál vysílaný z kapsle je zachycen pomocí senzorů na břicho pacienta a následně zpracováván a nahráván do záznamového zařízení, které nosí pacient během vyšetření připevněný na opasku. Sensory vypadají a lepí se na kůži podobně jako EKG svody na jedno použití, jen jich je více; „datarekordér“ je velikosti MP3 přehrávačů. Vyšetření trvá – vždy podle vyšetřované oblasti – zpravidla několik hodin. Následně jsou údaje ze záznamu přehrány do počítače a pomocí speciálního software převedeny na endoskopický obraz. Tento záznam je následně vyhodnocován lékařem.

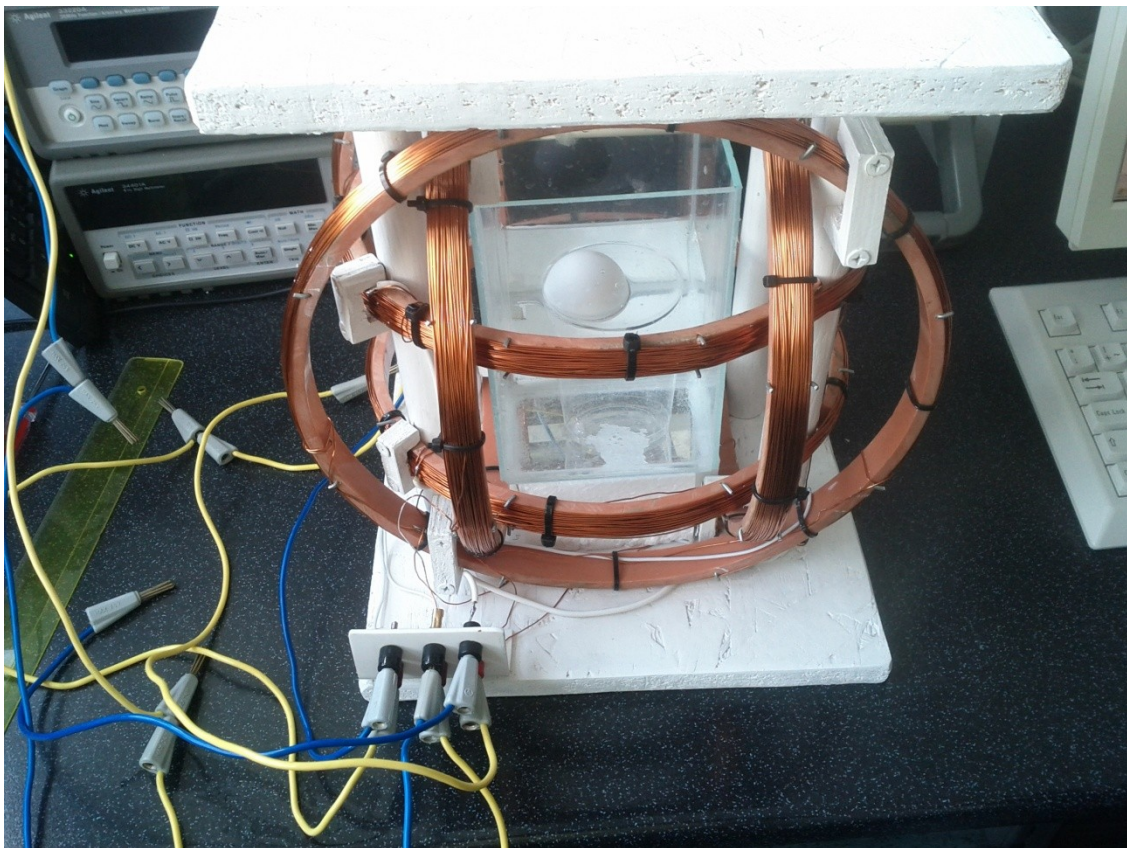
[18]

9.2 Endoskopická kamera řízená

Tato podkapitola je spíše podnětem či možnou variantou k pokračování. Dle mého názoru by bylo záhodno, držet se již odzkoušených metod a procesů a kameru konstruovat obdobně jako je tomu dosud, avšak s tím rozdílem, že snímky by se ukládaly buď to do flash paměti v kameře nebo by se před každým vysláním snímku, cívky odpojily od zdroje nebo se pouze vyplo napájení, jelikož magnetické pole uvnitř cívek by ovlivňovalo vysílání snímků bezdrátově. Kamera by také zaujímal jiný tvar, patrně kulovitý a to z důvodu snazší orientace. V neposlední řadě musí obsahovat magneticky aktivní těleso, aby mohla podléhat orientaci magnetickým polem. Tato otázka je ovšem rozsáhlá a dalece překračuje rozsah této práce.

9.3 Řízení experimentálního objektu ve vodním prostředí

Experimentální objekt se skládá z plastového míčku, do něhož je vložen magneticky aktivní materiál (předmět). Celé těleso je vyváženo, aby kladlo co nejmenší odpor při orientaci. Nachází se ve skleněném akváriu o rozměrech $100 \times 100 \times 160$ mm naplněném vodou do takové výšky, aby byl míček v průsečíku středů os všech 6 cívek. Tento bod si lze představit jako počátek souřadnicového systému. Okolo tohoto bodu je, jak již bylo zmíněno výše, homogenní magnetické pole.



Obrázek 30 Náhled na experiment

9.3.1 Meze použitelnosti experimentu

Směr tělesa a jeho natočení je ovlivněno vektorem magnetické indukce. Na těleso uvnitř Helmholtzových cívek působí celkem 3 vektory magnetické indukce. Jejich výslednice nám pak udává směr natočení tělesa.

Při testování citlivosti za pomoci stupnice a stříelky viz obrázek (9.3) byla zjištěna citlivost při horizontální polarizaci přibližně 5° . Menší změny proudu nevyvolaly změnu orientace

střelky. Pokud bychom ovšem brali v úvahu tuto přesnost, jež byla v laboratorních podmínkách, byl by teoretický počet kroků:

$$n = \frac{\varphi}{\sigma} = \frac{360}{5} = 72$$

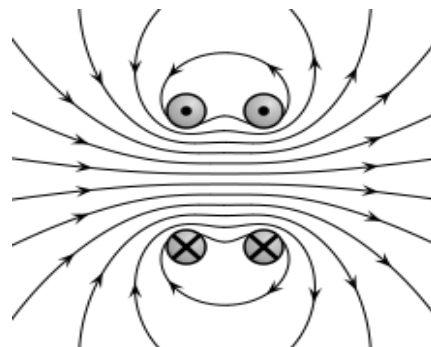
(9.1)

Teoretický počet kroků je dle mého názoru dostačující a pro endoskopické účely by stačila přesnost desetinná. Tedy citlivost 7 kroků. Je to ovšem pouze názor a od žádané či skutečné hodnoty se může lišit.

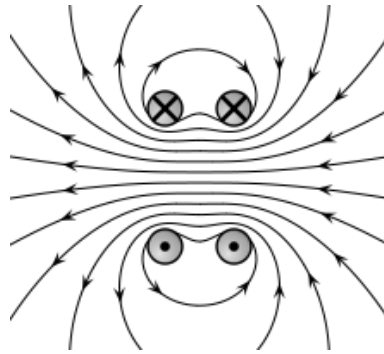


Obrázek 31 Střelka kompasu se stupnicí v homogenním magnetickém poli

Pro horizontální otáčení slouží páry cívek X a Y. Pokud jsou nesymetricky napájené, má těleso uvnitř cívek rozsah natočení 0° - 90° . Při symetrickém napájení 1 páru se rozsah zvyšuje na 2 násobek tedy na 0° - 180° protože se změní směr průchodu proudu cívkami jak je patrné z obrázku (9.3) a (9.4).



Obrázek 32 Směr magnetické indukce-vpravo



Obrázek 33 Směr magnetické indukce-vlevo

Pokud bychom chtěli přesně vypočítat úhel natočení, využijeme tzv. polárních a sférických souřadnic.

Při přepočtu na polární souřadnice využíváme vztahu (9.2)

$$\arctg2(x, y) = \begin{cases} \arctg\left(\frac{y}{x}\right) & \text{je-li } x > 0 \wedge y > 0 \\ \arctg\left(\frac{y}{x}\right) + \pi & \text{je-li } x < 0 \\ \arctg\left(\frac{y}{x}\right) + 2\pi & \text{je-li } x > 0 \wedge y < 0 \end{cases} \quad (9.2)$$

Kde x, y = udává vzdálenost bodu od počátku

$$\varphi = \arctg2(x, y) \quad (9.3)$$

Po dosazení do funkce *arcan* dostáváme úhel natočení $\varphi[^\circ]$.

Příklady výpočtů:

Př.: 1

$$B_x = 3,45 \text{ G}, B_y = 1,17 \text{ G}$$

Hodnoty indukci dosadíme do vztahu (9.2), jako hodnoty x a y

$$\arctg2(x, y) = \left(\frac{y}{x}\right) = \arctg\left(\frac{1,17}{3,45}\right) = 18^\circ 44'$$

a dostáváme tak úhel natočení tělesa.

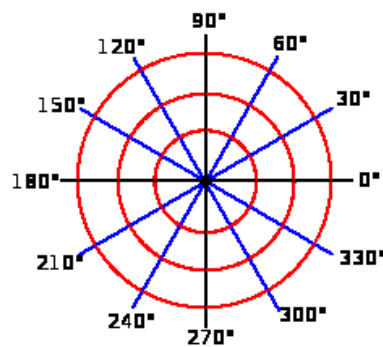
Př.: 2

$$B_x = 2,75 \text{ G}, B_y = 1,17 \text{ G}$$

Opět dosadíme hodnoty indukcí jako x a y . Obě budou kladná ovšem z výše uvedeného vztahu (9.2) platí:

$$\text{je-li } x < 0 \text{ arctg}\left(\frac{y}{x}\right) + \pi \Rightarrow \text{arctg}2(x, y) = \frac{1,17}{2,75} + \pi = 156^\circ 57'$$

Pro snadnější představu či ilustraci skutečné orientace slouží obr. (9.5).

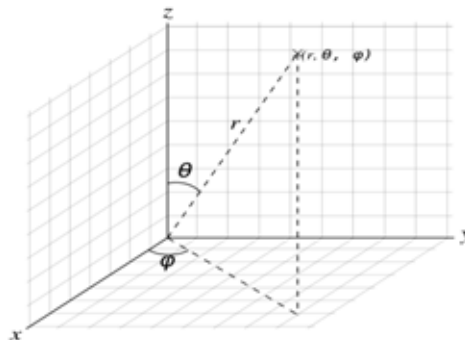


Obrázek 34 Souřadnicová síť v polárních souřadnicích[16]

Určení úhlu natočení ve vertikálním směru využijeme vztahu (9.3) pro soustavu souřadnic v prostoru též známých jako *polární souřadnice*.

$$\theta = \arccos\left(\frac{z}{r}\right) \tag{9.4}$$

θ nám udává velikost úhlu, který je svírán průvodičem a osou z . viz obrázek (9.6).



Obrázek 35 Sférická soustava souřadnic[17]

Vzhledem k tomu, že je prakticky obtížné, měřit výšku v ose z , vycházejme ze skutečnosti že:

$$I_{MAX Z} = 1,507 = 0^\circ, I_{MIN} = 0 = 90^\circ$$

Zvýše uvedeného vyplývá:

$$z = I_z * \frac{r/2}{I_{MAX Z}}; I_z = \text{proud tekoucí cívkami v ose } Z, r = \text{prům. tělesa} \quad (9.5)$$

Příklad výpočtu:

$$\theta = \arccos\left(\frac{z}{r}\right)$$

Po dosazení ze vztahu (9.4) dostáváme:

$$\theta = \arccos\left(\frac{I_z * \frac{r/2}{I_{MAX Z}}}{r}\right) \quad (9.6)$$

$$I_z = 1,311 \text{ A}, r = 40 \text{ mm}$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{I_z * \frac{r/2}{I_{MAX Z}}}{r}\right) = \arccos\left(\frac{1,311 * \frac{20 * 10^{-3}/2}{1,507}}{20 * 10^{-3}}\right) = 29^\circ 32'$$

9.3.2 Vlastní testování řízení orientace

Tato poslední kapitola je jak sám nadpis napovídá, věnována testování řízení orientace. Testování probíhalo v laboratorních podmínkách s cívkami v helmholtzově uspořádání a s magneticky aktivním tělesem. Toto těleso bylo na základě předchozích měření a monitorování prostoru, umístěno do bodu resp. oblasti, kterou protínají osy všech 3 párů cívek. Důvod tohoto umístění je homogenní magnetické pole.

Jeho výsledný vektor ovlivníme daným nastavením proudů ve zdrojích, které napájí cívky. Změny je třeba volit vhodně, protože při řízení dochází k velkým překmitům a jelikož se jedná o řízení bez zpětné vazby a regulátoru, není tento nedostatek eliminován. Do jisté míry by se dalo říci, že čím větší magnetické indukce budou, tím rychleji se těleso naorientuje do správného směru s menšími překmity.

V mém případě, pro experimentální řízení velikost indukce dosahovala maximálně hodnoty, okolo 4 G. Pro horizontální natáčení byla tato hodnota dostačující, avšak při řízení vertikálním, kdy se míček vychyluje o úhel θ od osy z se nepodařilo dosáhnout uspokojivých výsledků. Tento fakt způsobilo mnoho faktorů. Jedním z nich je nedostatečná přesnost vyvážení tělesa. Samotná střelka totiž váží 1,610 g. A i při malé chybě ve vyvážení tělesa v řádech desetin, dochází k fatálním blokům v řízení. Po několika méně úspěšných pokusech, kdy se těleso podařilo vychýlit o přibližně $10^\circ - 20^\circ$ jsem dospěl k závěru, že bez řádně a přesně vyváženého „aktivního“ tělesa nebo silného magnetického pole nelze řízení v tomto směru uskutečnit. Neznamená to ale, že vyrobený experiment je nefunkční. Jen nelze v amatérských podmínkách, dosáhnout při výrobě přesností, dostačující pro náročnější účely. Pro ilustraci jsou v příloze uvedeny fotografie

ZÁVĚR

V bakalářské práci jsem se zabýval orientací a řízením magneticky aktivních těles. V teoretické části byl popsán elektrický proud jako fyzikální veličina, elektrický náboj, typy elektrického proudu a jeho vedení v různých látkách v závislosti na jejich odporu. Dále byly objasněny pojmy, jako jsou: magnetická indukce, její vektor, měření magnetického pole, Hallův jev, výpočet magnetické indukce a Helmholtzovy cívky.

V praktické části jsem nejprve provedl návrh pracoviště, na kterém budu experiment provádět. Bylo zapotřebí pracoviště sestavit a nakonfigurovat. Poté následovalo sestavení cívek v helmholtzově uspořádání. Vycházel jsem z největšího páru tedy z cívek osy X. Další dvojice se postupně modifikovaly a byly určeny spíše empiricky a po konzultacích s vedoucím. Postupně jsem prováděl výpočty a měření magnetické indukce v prostoru zaujímaném cívkami. Naměřené hodnoty se od teoretických lišily jen nepatrně. Odchyšky jsou způsobeny patrně nepřesností v konstrukci. Vzhledem k tomu že podmínky pro výrobu byly méně příznivé, jsou výsledky vcelku uspokojivé. Další neméně významnou roli hraje zahřívání drátu, vinutí drátu, vazby atp.

Následně jsem prověřil, v jakých částech prostoru, který cívky obklopují, je magnetické pole jimi vytvářené homogenní. Tyto oblasti zobrazují 2D a 3D grafy. Na základě těchto měření a odečtu z grafů jsem tuto oblast určil.

Experimentální fáze probíhala ve 2 fázích. Nejprve probíhalo experimentální řízení pouze v polárních souřadnicích se 2 páry cívek. Posléze byl experiment doplněn o další 3. pár sloužící k řízení vertikálnímu. Tedy aby se magneticky aktivním tělesem dalo manipulovat nejen kolem jeho osy v rozsahu 360° , ale i nahoru a dolů kolem osy z v rozsahu 180° .

2. fáze však představovala různá úskalí. Mezi tato úskalí bych zařadil nízkou magnetickou indukci cívek v ose z, nedostačující k řízení orientace v této ose a nepřesná konstrukce magneticky aktivního tělesa. Pokud bychom se chtěli tohoto problému zbavit, bylo by nutné změnit konstrukci cívek a napájecí zdroj. Cívky by byly namotány z většího počtu závitů o vyšším průřezu, menším průměru a napájeny zdrojem s vyššími napěťovými a proudovými parametry. Jelikož ale takovéto zdroje ve vlastnictví UTB nejsou, sestával experiment ze zdrojů uvedených v kapitole – Návrh měřícího pracoviště.

Výše zmíněné mělo za cíl simulovat endoskopickou kameru miniaturních rozměrů a její řízení v lidském těle. V této práci je rozebrán současný stav této problematiky a návrh jejího pokračování. Změnou konstrukce endoskopické kamery počínaje, přenosem dat a konstrukcí cívek konče. Tato problematika je velice zajímavá a dle mého názoru by jednou mohla usnadnit alespoň jedno odvětví ve zdravotnictví, či jinde.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

In this work I dealt with orientation and control of magnetically active TĚLES. In the theoretical part is described an electric current as a physical quantity, electric charge, types of electric current, and its current in various substances according to their resistance. Further are explained these concepts: magnetic induction and its vector, magnetic field measurements, Hall's effect, the calculation of the magnetic induction and the Helmholtz coils.

In the practical part, I designed a possible workplace on which the experiment will be carried out. I built and configured the workplace. This was followed by construction of the coils in Helmholtz arrangement. The default pair was coils in X axis. Another pairs were modified and were determined rather empirically and after a consultation with the supervisor. Step by step I was doing the calculations and measurements of magnetic induction in the space occupied by the coils. The measured values from the theoretical differed only slightly. Variations are probably due to inaccuracies in the structure. As far as the conditions for the production were less favorable, results are quite satisfying. Another important part is heating of the wire, winding of the wire, binding, etc..

Lately I checked in which parts of the area surrounded by coils is the magnetic field generated by them homogeneous. These areas are shown in 2D and 3D graphs. Based on these measurements and readings from the graphs I declare this area.

The experimental phase was conducted in two phases. First experimental procedure was carried out only in polar coordinates with two pairs of coils. Finally, the experiment was completed by another three pairs of coils used for the vertical control, so in order to manipulate the magnetically active element not only around, in range 360° , but also up and down around the z axis-range 180° .

Second phase was full of variety challenges. These difficulties would include low magnetic induction of coils in the z-axis, insufficient for the control of the orientation in the axis and inexact construction of the magnetically active element. If we wanted to get rid of this problem, it would be necessary to redesign the coils and. The Coils would be entangled of a plurality of threads on the upper midship, of smaller diameter and supplied by a source with higher voltage and current parameters. As far as such resources are not owned by UTB, experiment consisted of the sources listed in Section - Návrh měřicího pracoviště (Design of measuring workplace).

The mentioned above was intended to simulate the miniature endoscopic camera and its control in the human body. In this work is analyzed the current state of this problematics and motion of its continuation. From the changes in the design of endoscopic cameras, to the transfer of data and structures of coils. This issue is very interesting and, in my opinion, once it could facilitate at least one sector in health care or elsewhere.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ŠIMBERSKÝ, Michal. *Měření magnetického pole: MEASUREMENT OF THE MAGNETIC FIELD* [online]. Brno, 2012 [cit. 2013-04-22]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/17380/Simbersky_Mereni%20magnetického%20pole.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce ING. JIŘÍ FIALKA.
- [2] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a JEARL WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. 1. české vyd., 2. dotisk. V Brně: Prometheus, 2006. vii, 1034-1198, [30]. ISBN 80-214-1868-0.
- [3] SEDLÁK, Bedřich. *Elektřina a magnetismus*. Vyd. 2., opr. a rozš. Praha: Academia, 2002, 632 s. ISBN 80-200-1004-1
- [4] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Operace s vektory. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006. vyd. 2006 [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/141-operace-s-vektory>
- [5] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Elektrický proud jako fyzikální veličina. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006-2013. 2006 [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/238-elektricky-proud-jako-dej-a-jako-fyzikalni-velicina>
- [6] KREJČÍŘÍK, David. *Počítačové řízení experimentu pro úlohu měření magnetického pole Země: Instrumentation of Earth magnetic field measurement*. Zlín, 2008. Dostupné z: <http://dspace.k.utb.cz/handle/10563/7618?show=full>. Bakalářská práce. Universita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. Vedoucí práce Ing. Milan Navrátil.
- [7] VSB. *Studijní opory s převažujícími distančními prvky pro předměty teoretického základu studia* [online]. 5.1.2006 - 4.1.2008. 5.1.2006 - 4.1.2008 [cit. 2013-04-25]. ISBN 15963/2005-303. Dostupné z: http://www.studopory.vsb.cz/studijnimaterialy/Fyzikaprobakalare/PDF/3_07_Magnet_pole_el_proudu.pdf
- [8] VACULÍK, Vlastimil. *Snímače proudu: Current sensors*. Brno, 2011. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/18620/DP%20SN%C3%8DMA%C4%8CE%20PROUDU%20Vlastimil%20Vacul%C3%ADk%202011.pdf?sequence=1>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a

komunikačních technologií. Vedoucí práce DOC. DR. ING. MIROSLAV PATOČKA.

- [9] ČUDA, Jan. Měření makroskopických magnetických veličin pomocí Magnetometrů: Nanosystémy – Workshop 14.04.2010 – Magnetické vlastnosti materiálů. In: *Měření makroskopických magnetických veličin pomocí Magnetometrů: Nanosystémy – Workshop 14.04.2010 – Magnetické vlastnosti materiálů* [online]. Olomouc, 14.4.2010 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDYQFjAB&url=http%3A%2F%2Fnanosystemy.upol.cz%2Fupload%2F10%2Fcu-da-mereni.pdf&ei=RziaUamNEsOwObbRgaAF&usg=AFQjCNH8Zhqx2vaDFL5bYbtqD-BaDNF-kw&sig2=Icvmq3KD3T-AooTdlAQ4OQ&bvm=bv.46751780,d.ZWU>
- [10] PATOČKA, Miroslav, Radoslav CIPÍN a Jan OTÝPKA. STRÍDAVÁ MAGNETICKÁ POLE PRO BIOMEDICÍNSKÉ EXPERIMENTY. *STRÍDAVÁ MAGNETICKÁ POLE PRO BIOMEDICÍNSKÉ EXPERIMENTY* [online]. 2011, č. 4, s. 5 [cit. 2012-04-27]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/file.php?id=200000597-c5c65c6c03>
- [11] AGILENT TECHNOLOGIES. *User's Guide: Agilent 3631A* [online]. 2012, 165 s. [cit. 28.4.2013]. Dostupné z: <http://www.home.agilent.com/en/pd-836433-pn-E3631A/80w-triple-output-power-supply-6v-5a-25v-1a>
- [12] LAKESHORE. User's Manual Model 421 Gaussmeter Lake Shore Model 421 [online]. 2004, 165 s. [cit. 28.4.2013]. Dostupné z: http://www.lakeshore.com/ObsoleteAndResearchDocs/421_Manual.pdf
- [13] KRČMÁŘ, Jakub. *Měření přechodových dějů na RC soustavách: Measurement of transient processes on the RC systems*. Zlín, 2010. Dostupné z: http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/11767/kr%C4%8Dm%C3%A1%C5%99_2010_bp.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. Vedoucí práce Ing. Milan Navrátil, Ph. D.

- [14] Kapslová endoskopie: Endoskopické vyšetření tlustého střeva kapslí. *IKEM* [online]. 2006-2011, s. 1 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.ikem.cz/www?docid=1004384>
- [15] STJOHN PROVIDENCE. *Procedures: Capsule Endoscopy* [online]. 2013 [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.stjohnprovidence.org/innerpage.aspx?PageID=4116>
- [16] Polární soustava souřadnic. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 3.4.2013 [cit. 2013-05-25]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Pol%C3%A1rn%C3%AD_soustava_sou%C5%99adnic
- [17] Sférická soustava souřadnic. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Sf%C3%A9rick%C3%A1_soustava_sou%C5%99adnic
- [18] Remedis. *Kapslová endoskopie* [online]. č. 1 [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: http://www.remedis.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=60&Itemid=64
- [19] VOJÁČEK, Antonín. Magnetické senzory s Hallovým efektem - 1. princip. *Magnetické senzory s Hallovým efektem - 1. princip* [online]. 23.11.2007, č. 1, s. 1 [cit. 2013-06-01]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/magneticke-senzory-s-hallovym-efektem-1-princip>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

zkratka	význam	jednotky SI
I	elektrický proud	A
Q	elektrický náboj	C
t	čas	s
U	elektrické napětí	V
R	elektrický odpor	Ω
ρ	měrný elektrický odpor	$\Omega \cdot m^2 \cdot m^{-1}$
B	magnetická indukce	T
F	síla	N
E	intenzita el. pole	$V \cdot m^{-1}$
v	rychlost	$m \cdot s^{-1}$
Φ	magnetický tok	Wb
μ_0	permeabilita	$T \cdot mA^{-1}$
l	délka	m
U_{em}	indukované napětí	V
N	počet závitů	-
H	intezita magnetického pole	A/m
M	magnetizace	A/m
r, a	vzdálenost	m
x	vzdálenost bodu od středu cívky	m
G	nastavitelný zdroj ss. Napětí	-
č. m.	číslo měření	-
d	vzdálenost sondy od středu cívek	mm
n	počet kroků	-
φ	úhel natočení v polárních souřadnicích	°
σ	Citlivost natočení tělesa při změně proudu	°
θ	úhel mezi průvodičem a osou z	°
I_{MAX}	maximální možný proud dodávaný zdrojem	

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 2.1</i> Sčítání vektorů[4]	17
<i>Obrázek 2.2</i> Rozdíl vektorů[4]	17
<i>Obrázek 2.3</i> Rozklad vektorů[4]	18
<i>Obrázek 2.4</i> Rozklad vektorů[4]	18
<i>Obrázek 2.5</i> Rozklad vektorů[4]	19
<i>Obrázek 2.6</i> Vodič s protékajícím proudem[6]	20
<i>Obrázek 2.7</i> Tyčový permanentní magnet[2]	21
<i>Obrázek 3.1</i> Hallův element bez působení magnetického	22
<i>Obrázek 3.2</i> Hallův element s působením	23
<i>Obrázek 3.3</i> Vnitřní uspořádání linární Hallovy sondy[8]	24
<i>Obrázek 3.4</i> Vnitřní uspořádání Hallovy sondy se Schmittovým	25
<i>Obrázek 3.5</i> Cívka s N závitů a magnetická tyč s magnetickým	26
<i>Obrázek 3.6</i> Feromagnetická sonda [9]	27
<i>Obrázek 3.7</i> VSM (Vibrating Sample Magnetometer) [9]	28
<i>Obrázek 4.1</i> Schematické zobrazení Helmholtzových cívek[10]	29
<i>Obrázek 5.1</i> Pohled na přední panel zdroje[11]	32
<i>Obrázek 5.2</i> Lakeshore 421 gaussmeter-přední panel [12]	34
<i>Obrázek 5.3</i> Lakeshore 421 gaussmeter-zadní strana[12]	34
<i>Obrázek 5.4</i> Axiální sonda[12]	35
<i>Obrázek 5.5</i> Příčná sonda[12]	35
<i>Obrázek 6.1</i> Pohled zepředu-nárys	37
<i>Obrázek 6.2</i> Pohled zboku-bokorys	38
<i>Obrázek 6.3</i> Pohled shora-půdorys	38
<i>Obrázek 7.1</i> Schéma zapojení Helmholtzových cívek	39
<i>Obrázek 7.2</i> Blokové schéma zapojení s gaussmetrem	39
<i>Obrázek 8.1</i> Náhled na programové prostředí Vee Pro s příkladem programu	52
<i>Obrázek 8.2</i> Aplikace pro řízení magnetických těles	54
<i>Obrázek 8.3</i> Aplikace pro řízení magneticky aktivních těles	55
<i>Obrázek 9.1</i> Endoskopická kamera ve tvaru kapsle [15]	57
<i>Obrázek 9.2</i> Náhled na experiment	58
<i>Obrázek 9.3</i> Střelka kompasu se stupnicí v homogenním	59
<i>Obrázek 9.4</i> Směr magnetické indukce-vpravo	59

<i>Obrázek 9.5 Směr magnetické indukce-vlevo</i>	60
<i>Obrázek 9.6 Souřadnicová síť v polárních</i>	61
<i>Obrázek 9.7 Sférická soustava souřadnic[17]</i>	61

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 7.1 Význam použitých symbolů a zkratk</i>	40
<i>Tabulka 7.2 Měření pro 0. horizontální vrstvu osa X</i>	41
<i>Tabulka 7.3 Měření pro -1. horizontální vrstvu osa X</i>	41
<i>Tabulka 7.4 Měření pro +1. horizontální vrstvu osa X</i>	42
<i>Tabulka 7.5 Měření pro 0. horizontální vrstvu osa Y</i>	45
<i>Tabulka 7.6 Měření pro -1. horizontální vrstvu osa Y</i>	45
<i>Tabulka 7.7 Měření pro +1. horizontální vrstvu osa Y</i>	46
<i>Tabulka 7.8 Měření pro 0. vertikální vrstvu osa Z</i>	49

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Tabulka měření magnetické indukce v ose cívek X

Příloha P II: Tabulka měření magnetické indukce v ose cívek Y

Příloha P III: Náhledy na řízené magneticky aktivní těleso ve vodním prostředí

Příloha P IV: Kód v Matlabu-vykreslení 3D grafů

Příloha P V: Technický výkres konstrukce

PŘÍLOHA P I: TABULKA MĚŘENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE V OSE CÍVEK X

y[cm]	-9,5	0	9,5
x[cm]			
-15	2,347	2,454	2,349
-14	2,238	2,676	2,574
-13	2,676	2,995	3,023
-12	3,126	3,165	3,536
-11	3,709	3,445	4,195
-10	4,535	3,635	4,966
-9	5,568	3,864	5,922
-8	6,508	3,964	6,846
-7	6,967	4,025	6,944
-6	6,197	4,075	6,505
-5	6,008	4,051	5,818
-4	4,658	4,023	5,132
-3	4,327	4,002	4,194
-2	4,131	4,007	3,958
-1	3,822	4,017	3,733
0	3,685	4,025	3,719
1	3,661	4,031	3,897
2	3,822	4,029	3,886
3	4,183	4,041	4,435
4	4,775	4,025	4,818
5	5,544	4,047	5,828
6	6,446	4,092	6,682
7	7,194	4,100	6,864
8	7,013	4,067	6,284
9	6,563	4,001	4,795
10	5,387	3,897	4,079
11	4,247	3,734	3,581
12	3,376	3,571	3,145
13	2,903	3,353	2,647
14	2,392	3,131	2,254
15	2,046	2,662	1,941

Hodnoty magnetické indukce B v rovině osy cívek X jsou uvedeny v G ; proud $I = 1 A$

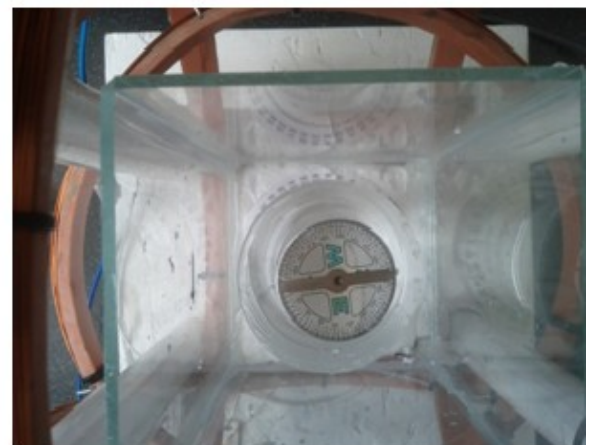
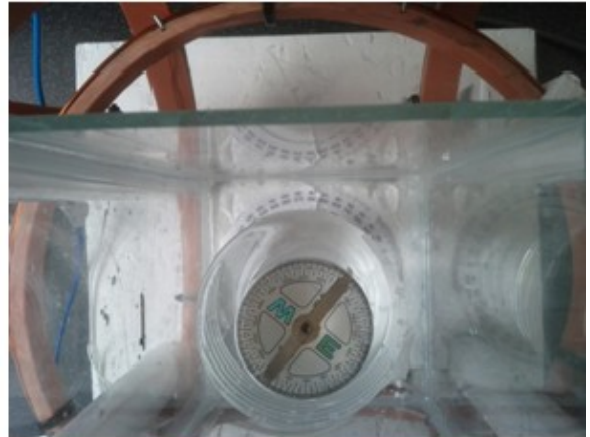
**PŘÍLOHA P II: TABULKA MĚŘENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE
V OSE CÍVEK Y**

x[cm]	-7,5	0	7,5
y[cm]			
-15	0.992	2.362	1.79
-14	2.027	2.66	1.926
-13	2.322	2.84	2.211
-12	2.817	3.055	2.656
-11	3.292	3.341	3.149
-10	4.068	3.64	3.694
-9	4.988	3.91	4.375
-8	5.909	4.207	5.239
-7	7.081	4.364	6.167
-6	7.492	4.503	6.7
-5	7.205	4.575	6.693
-4	6.274	4.624	6.175
-3	5.459	4.644	5.633
-2	4.864	4.644	5.14
-1	4.47	4.644	4.761
0	4.382	4.644	4.58
1	4.407	4.644	4.584
2	4.841	4.644	4.74
3	5.219	4.564	4.992
4	5.956	4.542	5.501
5	6.856	4.455	6.092
6	7.231	4.338	6.476
7	6.959	4.154	6.472
8	6.245	3.917	5.909
9	5.44	3.665	5.324
10	4.136	3.349	4.311
11	3.556	3.073	3.663
12	3.016	2.76	3.199
13	2.563	2.462	2.693
14	2.31	2.182	2.365
15	1.936	1.9	2.002

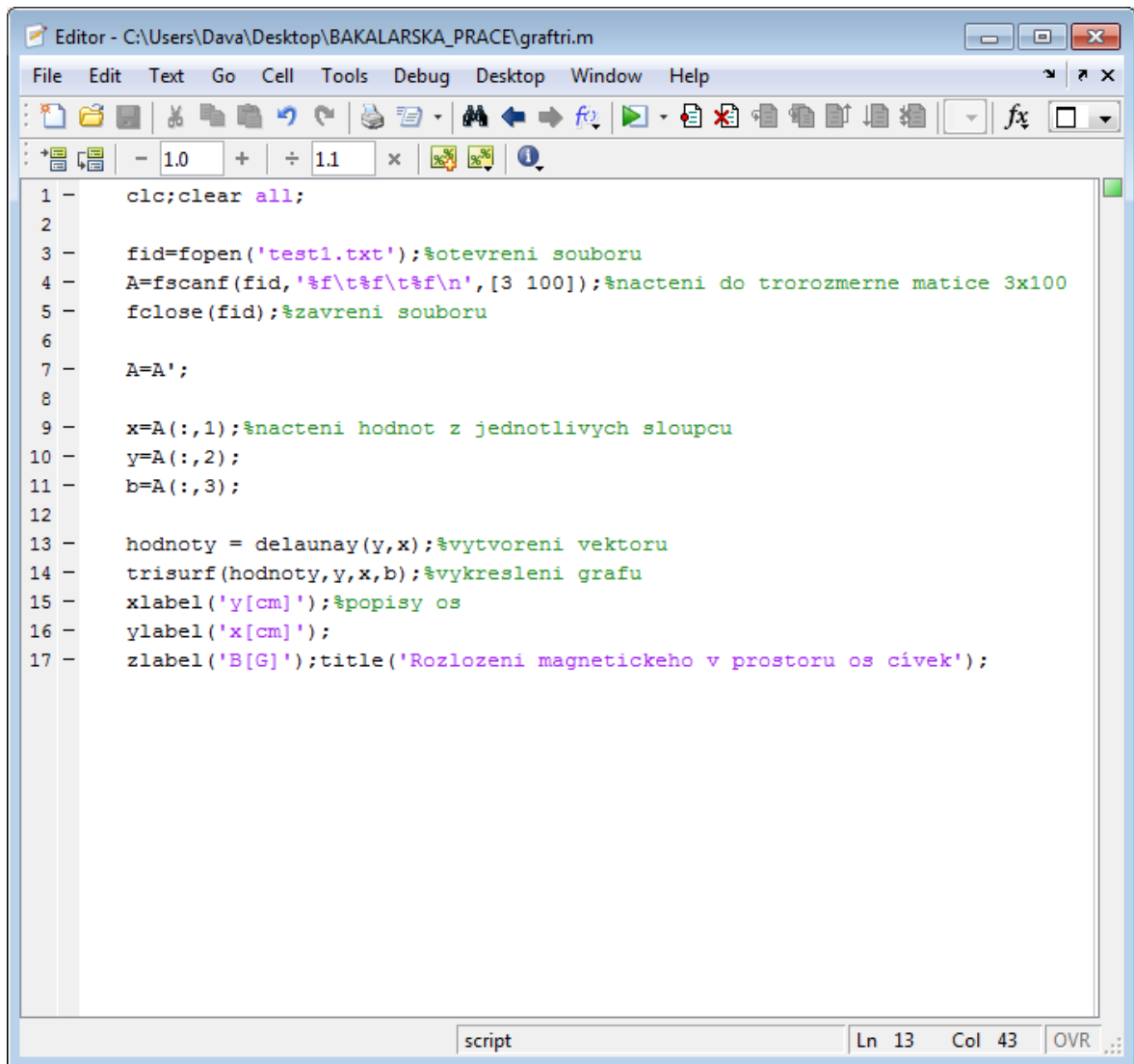
Hodnoty magnetické indukce B v rovině osy cívek Y jsou uvedeny v G; proud $I = 1 A$

PŘÍLOHA P III: NÁHLEDY NA ŘÍZENÉ MAGNETICKY AKTIVNÍ TĚLESO VE VODNÍM PROSTŘEDÍ

Vlevo napájecí zdroje Agilent 3631A, vpravo magneticky aktivní těleso orientované ve směru vektoru magnetické indukce. Můžeme pozorovat změny natočení v závislosti na změnách proudu protékajícího cívkami.



PŘÍLOHA P IV: KÓD V MATLABU- VYKRESLENÍ 3D GRAFŮ

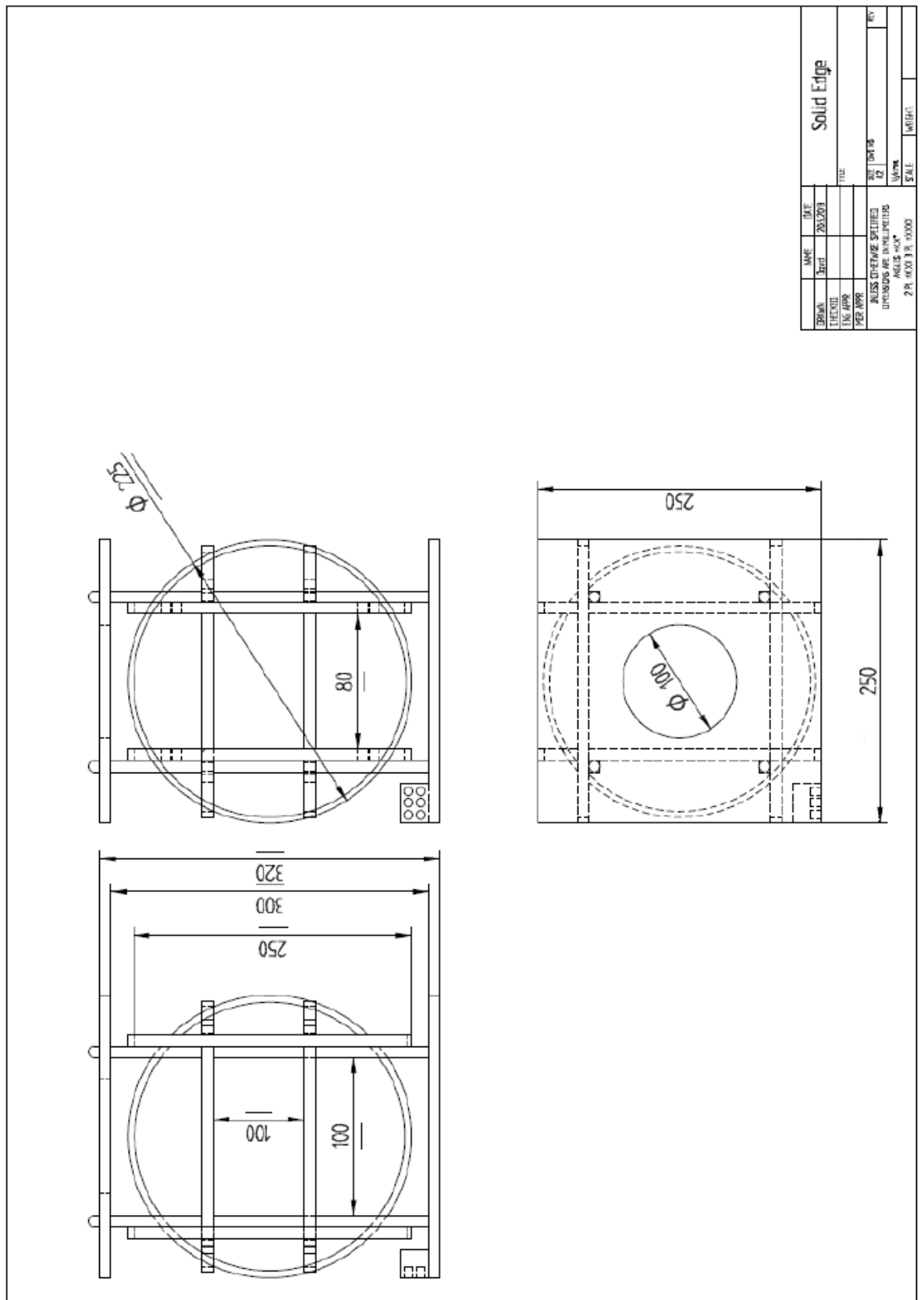


The image shows a screenshot of a MATLAB script editor window. The window title is "Editor - C:\Users\Dava\Desktop\BAKALARSKA_PRACE\graftri.m". The menu bar includes File, Edit, Text, Go, Cell, Tools, Debug, Desktop, Window, and Help. The toolbar contains various icons for file operations and execution. The script content is as follows:

```
1 -   clc;clear all;
2
3 -   fid=fopen('test1.txt');%otevreni souboru
4 -   A=fscanf(fid,'%f\t%f\t%f\n',[3 100]);%nacteni do trorozmerne matice 3x100
5 -   fclose(fid);%zavreni souboru
6
7 -   A=A';
8
9 -   x=A(:,1);%nacteni hodnot z jednotlivych sloupcu
10 -  y=A(:,2);
11 -  b=A(:,3);
12
13 -  hodnoty = delaunay(y,x);%vytvoreni vektoru
14 -  trisurf(hodnoty,y,x,b);%vykresleni grafu
15 -  xlabel('y[cm]');%popisy os
16 -  ylabel('x[cm]');
17 -  zlabel('B[G]');title('Rozlozeni magnetickeho v prostoru os cívek');
```

The status bar at the bottom indicates "script", "Ln 13", "Col 43", and "OVR".

PŘÍLOHA P V: TECHNICKÝ VÝKRES KONSTRUKCE



DRAWN		DATE	Solid Edge	
CHECKED		2013/01	TITLE	
DESIGNED			SCALE	
PER APPR			SHEET NO. OF	
			12	
			MATERIAL	
			2 PR. Ø 20 x 3 - 0000	
			SCALE	
			WEIGHT	
			REV	
			DATE	

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
TOLERANCES ARE AS SHOWN