

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor SOČ: 2. Fyzika

Detektor kovů a gradiometr se senzory fluxgate

Gradiometer and metal detector with fluxgate sensors

Autor: Martin Žilka

Škola: Gymnázium Matyáše Lercha, Brno

Kraj: Jihomoravský

Konzultant: Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D.

Brno 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci SOČ "Detektor kovů a gradiometr se senzory fluxgate" vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v seznamu přiloženém k práci SOČ.

Dále prohlašuji, že tištěná a elektronická verze práce SOČ jsou shodné.

Nemám žádné námitky proti zveřejnění této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb. o právu autorském a souvisejících a o změně autorského zákona v platném znění.

V Brně dne 6. 3. 2015

podpis:

Poděkování

Děkuji Ing. Vojtěchu Petruchovi Ph.D. za pomoc při řešení práce, trpělivost při odborné konzultaci a materiál, který mi během práce poskytoval.

Anotace

Cílem této práce SOČ je konstrukce magnetického gradiometru se senzory fluxgate s výstupem na voltmetr a testování zařízení ve dvou režimech kompenzace vnějšího magnetického pole. Přístroj je možno napájet z baterií. Dále tato práce popisuje princip činnosti různých druhů magnetických senzorů a jejich výhody a také princip funkce jednotlivých modulů celého gradiometru. Výsledkem práce jsou grafy a tabulky závislosti velikosti detekovaného předmětu na jeho vzdálenosti od senzorů a na vzdálenosti mezi senzory (bázi gradiometru) pro jednotlivé kompenzační režimy.

Klíčová slova: Fluxgate senzor, Magnetický gradiometr, Synchronní detekce, Gradiometrická báze

Summary

The purpose of this work is to construct a magnetic field gradiometer with fluxgate sensors with output to voltmeter and make some tests in two external magnetic field - compensation modes. This device could be powered from batteries. This work describes also principle of working different kinds of magnetic sensors and their advantages and the principal function of individual gradiometer modules. The result of this work are data presented in charts, which describe dependence between size of detected thing on its distance from sensors and on the distance between sensors (gradiometer base) for each compensation modes.

Key words: Fluxgate sensor, Magnetic gradiometer, Synchronous detection, Gradiometric base

Obsah:

1. Úvod	5
2. Základní poznatky o magnetismu	6
2.1 Zemské magnetické pole, magnetosféra	6
2.2 Pole magnetických materiálů	8
3. Teorie měření magnetických polí	9
3.1 Magneto-rezistivní senzory	9
3.2 Magneto-galvanické senzory	9
3.3 Indukční senzory	10
3.4 Měření gradientu magnetického pole	13
4. Praktická část - konstrukce gradiometru	14
5. Testování gradiometru a výsledky	21
6. Závěr	30
7. Literatura	32
8. Přílohy	33

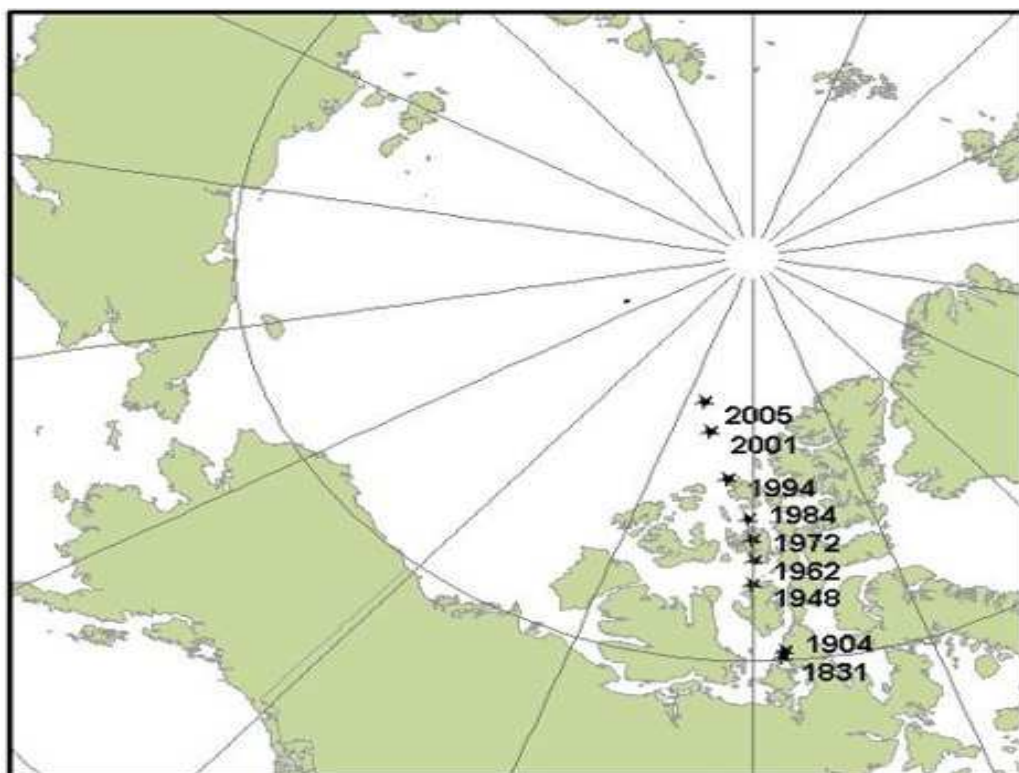
1. Úvod

Magnetismus jako jev je známý tisíce let. Ve starověké Číně bylo magnetismu poprvé využito. Nástrojem využití byl kompas určený k navigaci. Odtud se dostal do starověkého Řecka, Římské říše a přes středověk až do současnosti. Měření a výzkum magnetických polí se rozvinuly až v 19. století, kdy byla fyzikálními zákony a matematickými vzorci popsána souvislost mezi elektřinou a magnetismem. Od té doby se vyvinulo několik hlavních principů konstrukce senzorů pro měření vlastností magnetického pole. Hallový sondy jsou v dnešní době nejrozšířenější. Jsou sice miniaturní, trpí však malou citlivostí a nejsou spolehlivé při změnách teploty. Magnetorezistivní senzory (AMR) se stabilitou a citlivostí nachází někde mezi magnetoindukčními a magneto-galvanickými senzory. Nejlepšími z hlediska přesnosti, teplotní stability a měřitelného rozsahu se jeví magnetoindukční (např. fluxgate), které je nutno zapojit ve zpětné vazbě, aby bylo dosaženo linearity magnetometru. Cílem této práce SOČ je vytvořit gradiometr se dvěma senzory fluxgate, potažmo hledač kovů s co největší teplotní a časovou stabilitou a experimenty zjistit nejvhodnější vzájemnou vzdálenost senzorů a závislost velikosti detekovaného předmětu (citlivosti) na této vzdálenosti. Dále bude popsán rozdíl mezi kompenzací magnetického pole každým senzorem zvlášť a kompenzací homogenní a gradientní složky zvlášť. Tento výrobek se bude dát využít při hledání magnetických cílů, tedy například nevybuchlé munice, které je v českých lesích ještě hodně, či kovových artefaktů. Detektor může být využit také k lokalizaci magnetického gradientu od proudových vedení, což otevírá další možnosti jako navigace podzemních vrtů.

2. Základní poznatky o magnetismu

2.1 Zemské magnetické pole, magnetosféra

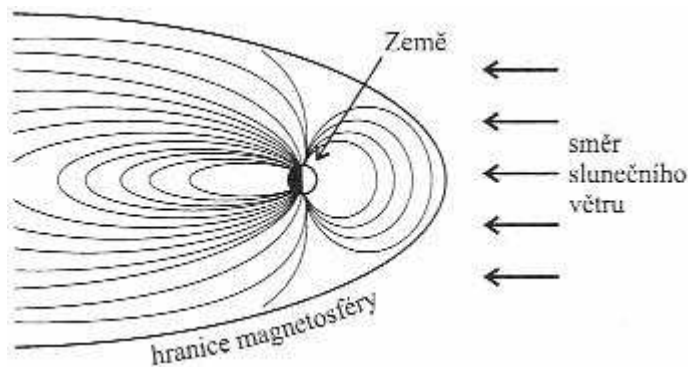
Existence magnetických pólů byla popsána ve 13. století. Až v roce 1600 n. l. Angličan William Gilbert zavedl pojmy severní a jižní pól a také publikoval myšlenku Země jako permanentního magnetu. Zjednodušeně řečeno Země je permanentní magnet s odchylkou magnetické osy od geografické přibližně 11°. Pozice obou pólů se v průběhu času mění, nyní řádově desítky kilometrů za rok. Původ magnetického pole nebyl ještě zcela vysvětlen. V dnešní době je obecně uznávaná teorie tzv. geodynamo. Je založená na principu generování elektrických proudů v tekuté části zemského jádra (složeno převážně z Fe, Ni) díky Coriolisově a odstředivé síle a díky termodynamickým jevům. Má to však háček. Při generování elektrického proudu tímto způsobem musí být přítomno magnetické pole.



Obr. 1 - Pohyb severního magnetického pólu Země (zdroj: osel.cz)

Magnetické pole Země vytváří magnetosféru, což je v ideálu pomyslný kruh kolem Země, ale v důsledku slunečního větru jsou magnetické siločáry na návětrné straně stlačeny a na závětrné protaženy až daleko za oběžnou dráhu Měsíce. Magnetosféra vychýlí sluneční vítr (tvořen nabitými částicemi) a ten ji "obteče". Kdyby neexistovala, nebo se porušila, zahynul by všechen život vlivem radiace.

Tvar magnetosféry byl popsán až s rozvojem kosmonautiky a družic.



Obr. 2 - Siločáry magnetosféry (zdroj: jreichl.com)

Silocháry magnetického pole Země nevychází jen z pólů. Vychází z celého povrchu, díky čemuž může být využito ptáky (např. holuby) a lidmi k navigaci. Velikost tohoto pole (magnetické indukce) se pohybuje mezi $20\mu\text{T}$ a $60\mu\text{T}$. Na rovníku je menší kvůli větší vzdálenosti od pólů a jádra, naopak na pólech je vyšší. V ČR je hodnota přibližně $48\mu\text{T}$ a silocháry svírají s magnetickou osou úhel cca 65° . Intenzita geomagnetického pole se časem mění.

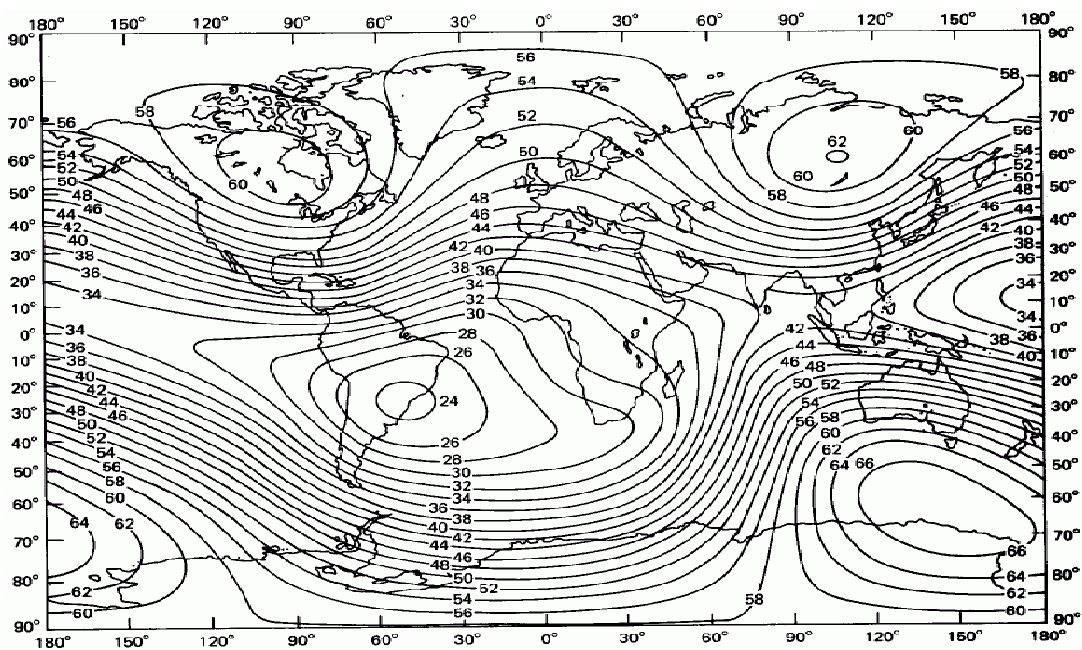


Figure 1-18 Present-day magnetic field of the earth. (a) Magnitude, μT .

Obr. 3 - Rozložení intenzity geomagnetického pole (zdroj: ou.edu)

2.2 Pole magnetických materiálů

Magnetické materiály dělíme na:

- magneticky tvrdé - vytvářejí vlastní magnetické pole, které klesá s třetí mocninou vzdálenosti, což je například permanentní magnet, některé horniny (magnetit), podobně také cívka pod proudem či přímý vodič pod proudem.
- magneticky měkké - deformují magnetické pole Země a magneticky tvrdých materiálů, například feritová anténa (koncentruje v sobě magnetické siločáry vysílače a tím zlepšuje příjem) nebo jakékoli jiné kovové předměty. Schopnost deformovat magnetické pole označujeme jako permeabilita materiálu.

$$\mu = \frac{B}{H}$$

B je magnetická indukce v T a H intenzita magnetického pole v $A \cdot m^{-1}$

Permeabilita vakua $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H \cdot m^{-1}$

Dále se zavádí relativní permeabilita, což je podíl skutečné permeability daného materiálu a permeability vakua.

Díky tomu je můžeme detekovat měřením gradientu magnetické indukce mezi dvěma body v různé vzdálenosti od předmětu (body musí být s předmětem v jedné ose), nebo pouhým měřením změn magnetické indukce v prostoru jediným senzorem. Čím vyšší je permeabilita, tím větší gradient způsobí. Permeabilní jsou i organické hmoty a plyny, ale mají mnohonásobně menší permeabilitu než železo, špatně se tedy detekují. Kovy jako měď nebo zlato mají permeabilitu obdobnou jako plyny, můžeme je tedy prakticky detekovat jen ve větším množství.

3. Teorie měření magnetických polí

Nejstarším způsobem měření magnetického pole je pomocí vzájemného působení magnetických dipólů (kompas). Od 19. století vzniklo několik druhů přesných senzorů:

- magneto-rezistivní - využívají změn odporu feromagnetických materiálů (AMR)
- magneto-galvanické - využití Hallova jevu
- magneto-impedanční - jsou založeny na změnách impedance feromagnetických materiálů
- indukční - využívají vzájemného působení mezi měřeným magnetickým polem a polem vytvářeným cívkou zapojenou v oscilátoru, nebo Faradayova indukčního zákona. Toto působení se projeví na indukčnosti cívky, tedy na frekvenci či amplitudě oscilátoru. Speciálním případem je fluxgate senzor.
- ostatní - (např. rezonanční) nebudu se jimi zabývat, jelikož pro můj účel jsou nepoužitelné především kvůli nutnosti provozu ve speciálních podmínkách, nebo malé citlivosti.

Senzory rozlišujeme na vektorové (mají osu citlivosti a rozlišují polaritu mag. pole, patří mezi ně indukční, magneto-galvanické, magneto-rezistivní) a skalární (výstupem je absolutní hodnota magnetické indukce, např. precesní protonový magnetometr)

3.1 Magneto-rezistivní senzory

Nejznámější senzory tohoto druhu jsou anizotropní magnetorezistory (AMR). Fungují na základě anizotropního magnetorezistivního jevu, který vzniká v tenkých vrstvách feromagnetických slitin (permalloy - 81% Fe, 19% Ni). Tyto senzory mají značně nelineární charakteristiku hlavně kolem nuly a špatně se jejich nelinearita kompenzuje. Využívají se v méně přesných kompasech (než se senzory indukčními), při bezkontaktním měření proudu a detekci přiblížení. Rozlišovací schopnost je u kvalitních senzorů menší než 10nT.

3.2 Magneto-galvanické senzory - Hallovy sondy

Hallovy sondy využívají hallova jevu v polovodičích, při kterém vzniká na PN přechodu (materiál Si, dotování InSb, nebo GaAs) napětí řádově desítek milivoltů. Hallův jev je důsledkem Lorentzovy síly působící na nosiče náboje, když je směr magnetického pole kolmý na protékající proud. Nevýhodou Hallových sond je velká teplotní nestabilita,

tedy změna offsetu (až 0,1%/°C). Využití nachází všude, kde není potřeba velká přesnost a je důležitá nízká cena a malá velikost. To je například bezkontaktní měření proudu. Nejrozšířenější jsou Hallovy sondy v počítačové technice, kde jsou využívány jako senzory polohy a otáček motorů v mechanikách. Mají zde podobu "smart" senzorů s dvoustavovým výstupem, tedy Hallova sonda se zesilovačem v jednom pouzdře.

3.3 Indukční senzory

Funkce těchto senzorů je založena na Faradayově indukčním zákonu.

Pracují na dvou odlišných principech:

Indukční cívky - měří časově proměnná magnetická pole. Každá změna pole vyvolá velmi malé napětí na cívce. Čím větší má cívka průměr a indukčnost (čím větší průměr, tím menší indukčnost), tím je citlivější. Vyrábí se buď vzduchové, nebo s jádrem.

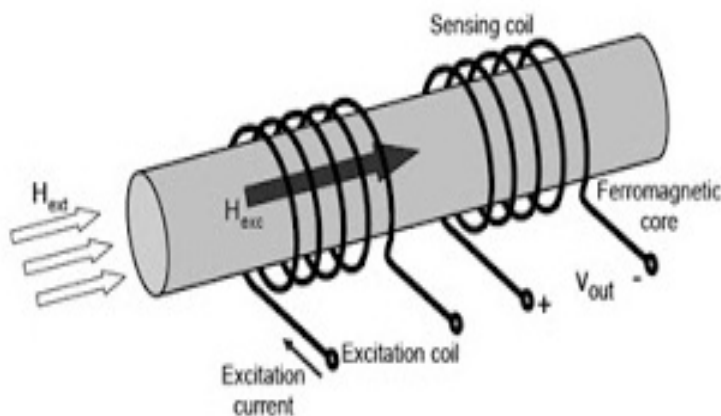
Vzduchové cívky mají menší vlastní šum, ale musí být větší kvůli nízké permeabilitě vakua. N je počet závitů, l je délka vinutí, S plocha průřezu cívky a μ_0 permeabilita vakua.

$$L = \mu_0 \cdot \frac{N^2}{l} \cdot S$$

Tento vzorec platí v případě, že l je větší než S . Z tohoto vzorce je patrné, že indukčnost je přímo úměrná permeabilitě. Používají se při detekci střídavých magnetických polí (silová vedení) nebo k navigaci. Citlivost se pohybuje řádově v mV/nT, resp. $\mu\text{V/nT}$.

Indukční senzory založené na změně permeability - vynikají svou přesností (při pokojové teplotě). Jsou dvojího druhu. Prvním druhem je cívka zapojená v rezonančním obvodu LC oscilátoru. Stejnoseměrné magnetické pole (nebo magnetické pole deformované magneticky měkkým předmětem) mění permeabilitu jádra cívky. Pokud je to vzduchová cívka, mění permeabilitu vakua (zjednodušeně řečeno). To vede ke změně frekvence oscilátoru. Změny se mohou vyhodnocovat například fázovým závěsem. Používají se k detekci stejnosměrných magnetických polí, jelikož u střídavých by citlivost silně ovlivňovala střední frekvence oscilátoru (musí být aspoň dvakrát vyšší než frekvence měřeného pole, ale maximální frekvence je limitována vlastní rezonanční frekvencí cívky). V praxi tedy jako hledače kovů nebo přesná měření vzdálenosti.

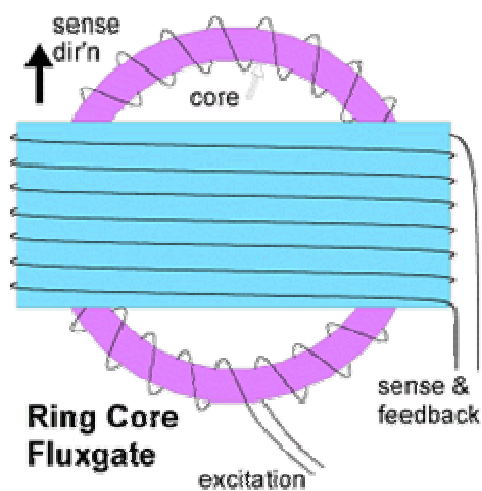
Fluxgate senzory - patří sice do předchozí skupiny, ale jsou přesnější a zjednodušují vyhodnocovací elektroniku. V současnosti mají nejvyšší citlivost ze všech senzorů používaných při pokojové teplotě. Rozlišovací schopnost je 100pT (s kvalitním jádrem) a měřitelný rozsah je 100pT - 100 μ T. Jsou dlouhodobě velmi stabilní. Za 2. světové války byly používány k hledání ponorek, nyní díky jejich stabilitě pro mapování geomagnetického pole družicemi, k navigaci, měření proudu a k archeologickým účelům. Funkce je založena na periodickém přesycování feromagnetického jádra excitačním proudem. Permeabilita jádra se mění a magnetický tok vytvářený externím magnetickým polem o intenzitě H_{ext} je modulován. Čím vyšší je H_{ext} , tím je vyšší i amplituda signálu indukovaného na snímací cívce. Uspořádání z Obr.4 má nevýhodu v tom, že elektromagnetická indukce způsobuje na snímací cívce signál na první harmonické, zatímco požadovaný modulovaný signál je na druhé harmonické.



Obr. 4 - Schéma fluxgate senzoru (zdroj: bp.blogspot.com)

Tento problém se dá odstranit použitím dvou antisériově zapojených budících cívek na dvou jádrech posazených rovnoběžně blízko sebe a kolem nich je pak namotána snímací cívka (tzv. Vacquierovo uspořádání).

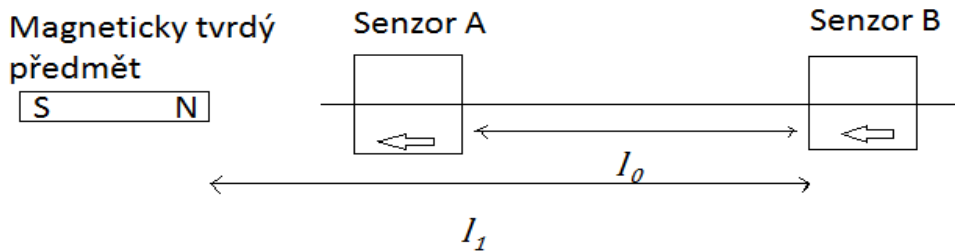
Další řešení je použít fluxgate senzor s toroidním jádrem. Výhodou je tedy signál na druhé harmonické (indukuje se na modrém vinutí - viz Obr.5 - díky hysterezní smyčce, jež způsobí za přítomnosti vnějšího magnetického pole přesycení jádra na jedné straně dřív, než na druhé) a omezení rušení při nulovém vnějším magnetickém poli otočením budící cívky (fialová barva). Nevýhodou je menší citlivost kvůli většímu demagnetizačnímu činiteli jádra. Polarita výstupního signálu vůči budícímu se mění s polaritou magnetického pole a amplituda s velikostí indukce magnetického pole. Šipka na obrázku označuje osu citlivosti. Speciálním typem toroidního senzoru je tzv. racetrack senzor, což je v zásadě totéž jako toroidní fluxgate, jen jádro nemá kruhový tvar.



Obr. 5 - Fluxgate senzor s toroidním jádrem (zdroj: sensorland.com)

3.4 Měření gradientu magnetického pole

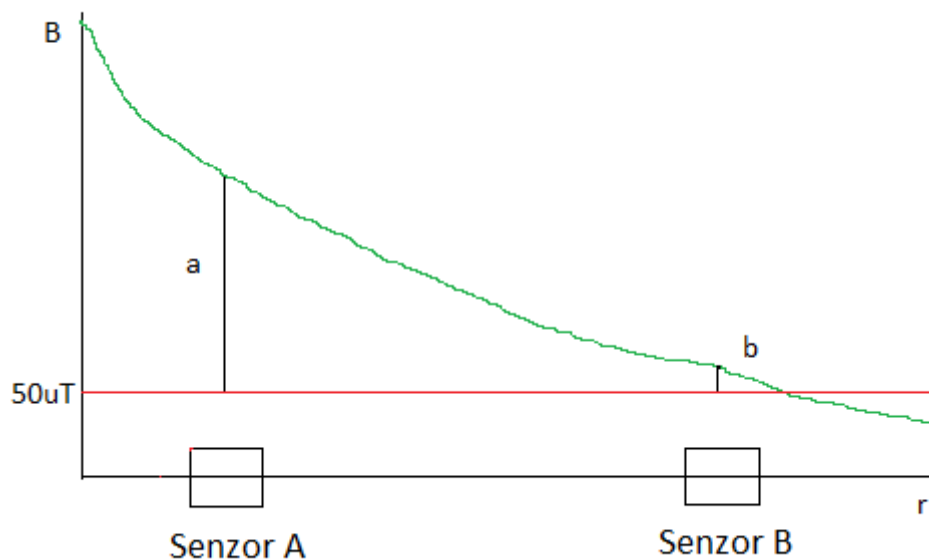
Měření gradientu je realizováno pomocí dvou vektorových senzorů ležících na přímce v určité vzdálenosti l_0 od sebe.



Obr. 6 - Základní schéma měření gradientu

Magnetická indukce předmětu na Obr.6 klesá se třetí mocninou vzdálenosti l_1 .

Teoreticky by tedy měla být citlivost vyšší, když bude vzdálenost senzorů l_0 větší. To znamená schopnost detekovat menší předměty. U magneticky měkkého předmětu je situace stejná (deformuje magnetické pole Země).

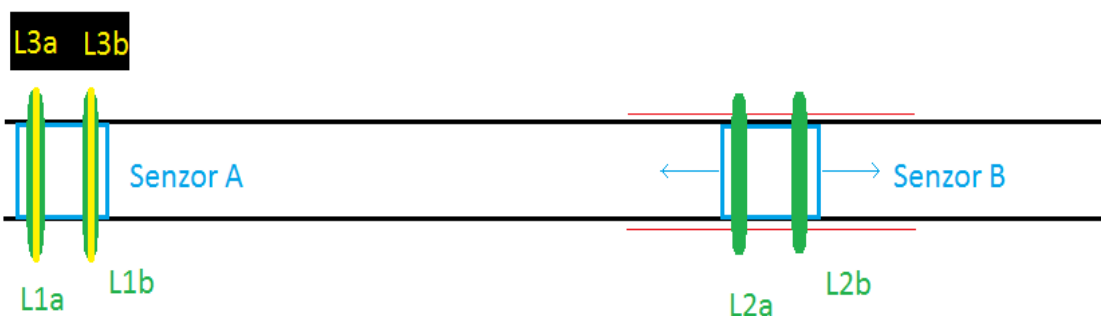


Obr. 7 - Princip měření gradientu

Na Obr.7 je na vodorovné ose vzdálenost od předmětu (předmět je v bodě křížení os) a na svislé ose je magnetická indukce. Červený graf platí pro nepřítomnost jakéhokoli předmětu. Na senzoru A i B je stejná hodnota, gradient není žádný. Pokud bude předmět v průsečíku os, platí zelený graf. Hodnota $a - b = \text{gradient}$.

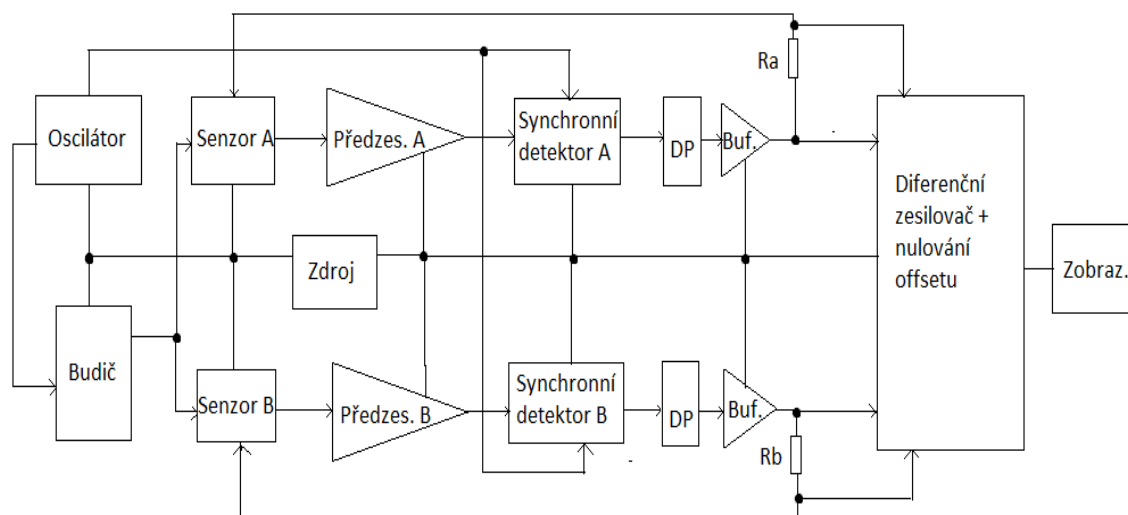
4. Praktická část - konstrukce gradiometru

Konfigurace samotného gradiometru je na Obr. 8. Černé čáry označují trubku z materiálu s malým koeficientem teplotní délkové roztažnosti, tedy např. sklo, keramika či uhlíková vlákna (já jsem použil kvůli snazší manipulaci plexisklo, vnější průměr 3,2cm, tloušťka stěny 0,4cm). Sensory jsou umístěny uvnitř, přičemž senzor A je pevný a senzor B posuvný. Pro dosažení dobré linearity je vnější magnetické pole přicházející ve směru trubky od senzoru A kompenzováno Helmholtzovými cívkami L1a + L1b, L2a + L2b. Cívky L2a,b jsou také posuvné. Jsou namotány na průhledné PE fólii. Cívky L1 a,b jsou namotány přímo na trubce. Cívky L3a,b jsou navinuty na L1a,b. Všechna tato kompenzační vinutí umožňují dosáhnout vysoké linearity, protože fluxgate je lineární kolem nulové mag. indukce a pomáhají měřit gradient.



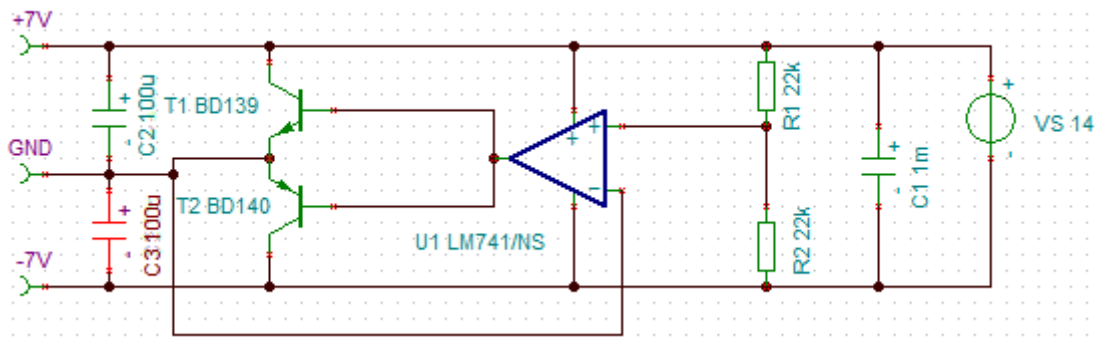
Obr. 8 - Konfigurace gradiometru

Blokové schéma celého gradiometru je na Obr. 9.



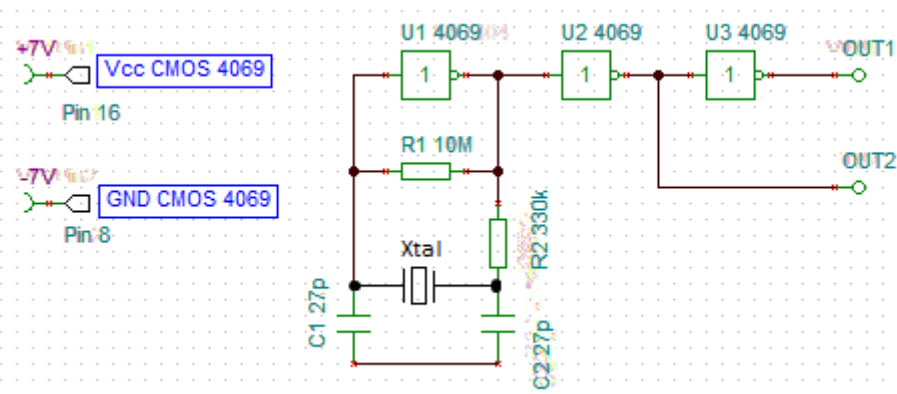
Obr. 9 - Blokové schéma gradiometru

Zdroj je lineární síťový, stabilizovaný obvodem LM723. Na výstupu je napětí 14V. Tohle napětí je následně rozděleno, je vytvořena tzv. virtuální zem (viz Obr.10). VS je síťový zdroj. Kondenzátory C1 tvoří filtr proti síťovému brumu, C2 a C3 filtr proti pronikání signálu přes zdroj. Kondenzátory jsou elektrolytické hliníkové. Pro použití děliče jsem se rozhodl z důvodu lepší stability napětí při zachování malých rozměrů.



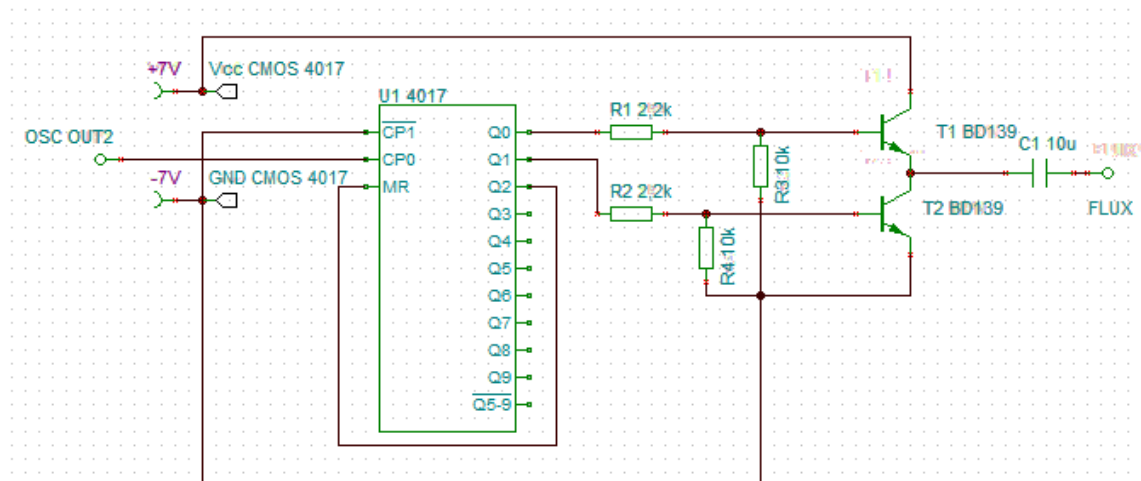
Obr. 10 - Virtuální zem

Oscilátor je krystalový ($f = 32\,768\text{Hz}$), jelikož je velmi časově stabilní a nezabere mnoho místa, na rozdíl od LC oscilátoru. Pro dosažení nejvyšší teplotní stability by bylo nutné krystal udržovat při konstantní teplotě asi 70°C , což by však zvýšilo objem a spotřebu přístroje, čemuž by byl výsledek neadekvátní. Schéma je na Obr. 11. Výstup OUT1 je určen synchronním detektorům, OUT2 děliče, která je součástí budiče.



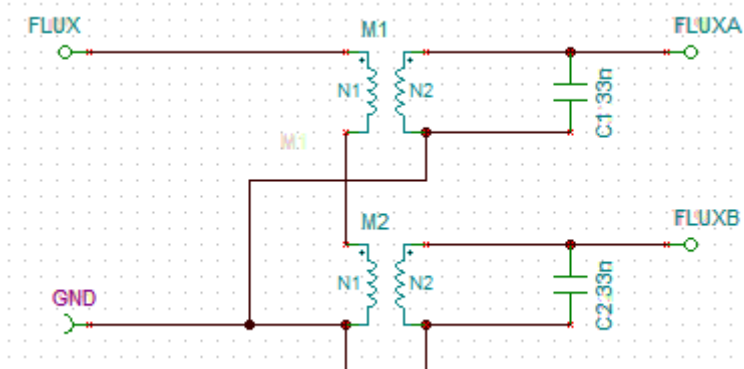
Obr. 11 - Schéma oscilátoru

Budič je tvořen děličkou dvěma (protože na snímací cívce fluxgate senzoru je dvojnásobná frekvence proudu, než na budící cívce) pro synchronizaci s detektorem a dvojicí tranzistorů buzených střídavě děličkou. C1 je vazební bipolární elektrolytický kondenzátor, který zvyšuje účinnost zapojení, jelikož budící signál má podobu krátkých proudových špiček.



Obr. 12 - Schéma budiče

Fluxgate senzory jsou dva. Jejich budící cívky jsou zapojeny sériově (na Obr. 13 označeny N1) k výstupu budiče FLUX. Snímací cívky (N2) tvoří s kondenzátory C1 a C2 (fóliové) paralelní rezonanční obvody, aby bylo odstraněno rušení a pro zlepšení citlivosti.

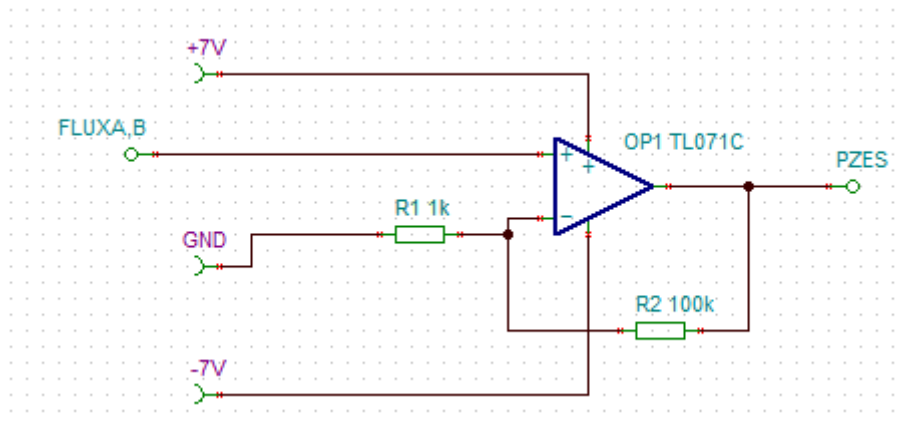


Obr- 13 - Zapojení senzorů

Předzesilovač slouží jako impedanční měnič (kvůli dosažení vyšší jakosti rezonančních obvodů z Obr. 13) a jako zesilovač signálu ze senzoru. Zvýší-li se napětí na neinvertujícím vstupu operačního zesilovače, je kompenzován výstupním proudem přes zpětnovazební odpor R2 a výstupní signál je tedy úbytek napětí na odporu R2.

Činitel zesílení má hodnotu 101, podle vztahu $R2/R1$, výstupní napětí

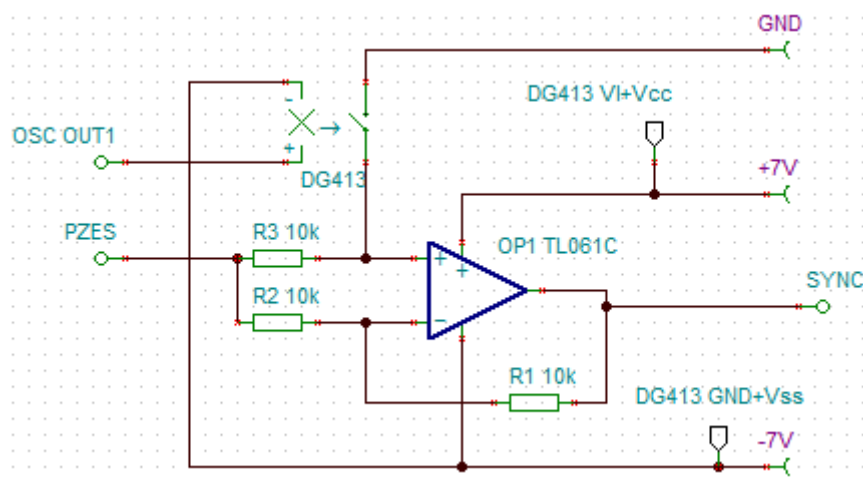
$$U_{out} = U_{in} \cdot \left(1 + \frac{R2}{R1}\right)$$



Obr. 14 - Zapojení předzesilovačů - pro každý senzor je jeden, ale oba jsou identické

V předzesilovači je použit operační zesilovač JFET TL071C firmy STMicroelectronics. Je to nízkošumový ($15\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$) exemplář s vysokým vstupním odporem ($1\text{T}\Omega$). Blokovací kondenzátor na vstupu není nutný, je dokonce nežádoucí, protože výstupní signál senzoru neobsahuje stejnosměrnou složku a sériový kondenzátor by znamenal zhoršení linearity. Výstupní blokovací kondenzátor také není potřeba, díky precizně vynulovanému offsetu.

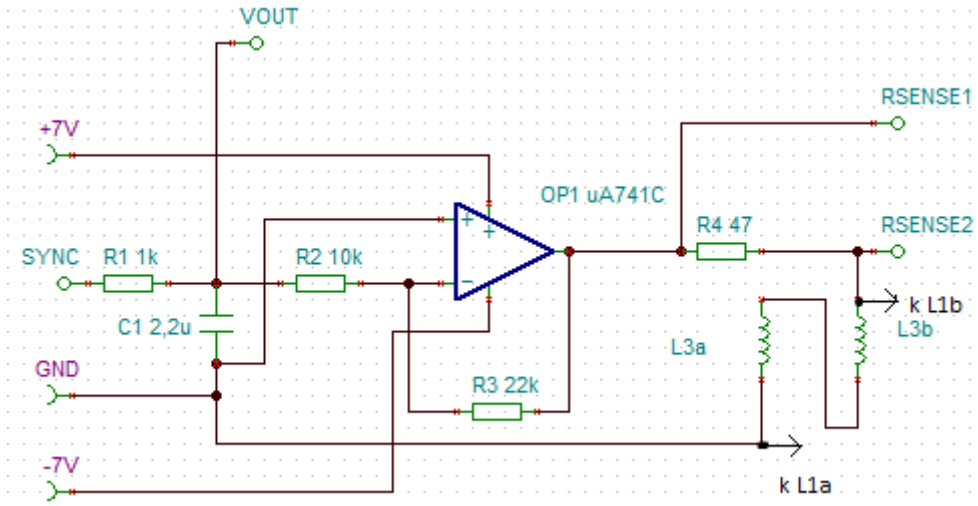
Synchronní detektor je klíčová část celého zapojení. Jeho schéma je na Obr. 15.



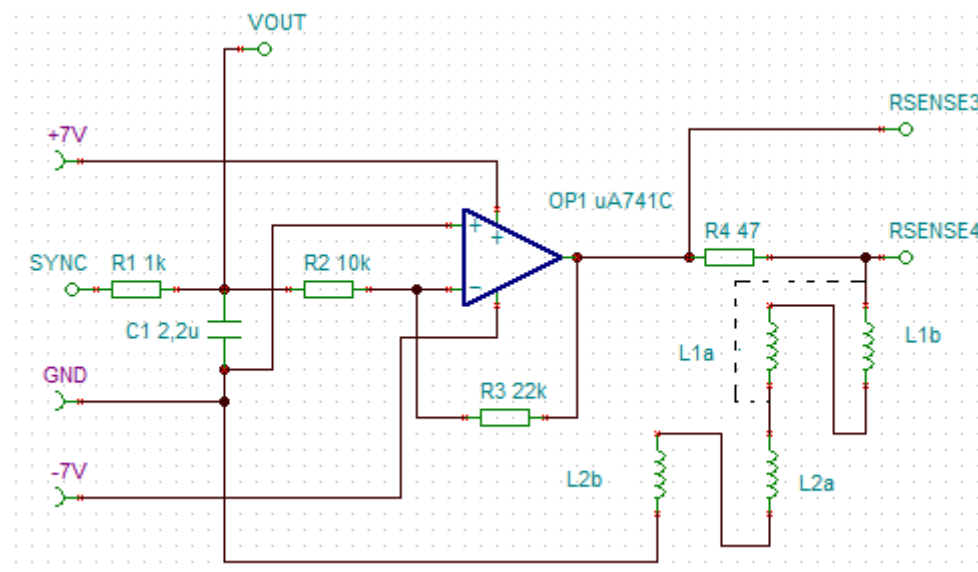
Obr. 15 - Schéma synchronního detektoru

Synchronní detektor pracuje na principu periodicky se měnícího zesilovacího činitele stupně. V mém případě je to +1 a -1. Spínač DG413 firmy Maxim je řízen z oscilátoru přes pin OUT1 (viz Obr. 11). Když je rozepnutý, je signál zesílen 1x (tedy není zesílen). Prochází skrz jen kladná či záporná hodnota napětí, podle toho, jaký je směr magnetického pole působícího na senzor. Pokud je spínač sepnutý, je zesílení detektoru -1 (stupeň invertuje vstupní signál). Protože v době sepnutého spínače se na výstupu senzoru objevuje opačná polarita napětí, než při rozepnutém spínači, výsledek vypadá jako při dvoucestném usměrnění.

Výstupním signálem detektoru je tedy usměrněný vstupní signál, u něhož se mění polarita v závislosti na polaritě magnetického pole. Výstupní signál detektoru je filtrován **dolní propustí**, aby nepronikal kmitočet oscilátoru do kompenzačních cívek. Za dolní propustí následuje **Buffer** čili měnič impedance. Schéma je na Obr. 16a,b.



Obr. 16a - Buffer A



Obr. 176b - Buffer B

Buffer A patří k senzoru A, tedy nepohyblivému, buffer B k senzoru posuvnému. L1a, b a L2a,b jsou Helmholtzovy cívky se 178 závitů, které jsou určeny hlavně ke kompenzaci zemského magnetického pole (viz Obr. 8) a jsou řízeny buď senzorem posuvným, nebo oběma (naznačeno čárkovaně na Obr. 16b, šipkami na Obr. 16a). Cívky L3a, b kompenzují magnetické pole detekovaného předmětu a jsou řízeny nepohyblivým senzorem. K počtu závitů jsem došel úvahou podle publikace J. L. Kirschvinka z roku 1992 (Uniform Magnetic Fields and Double-Wrapped Coil Systems). Podle Kirschvinka je podíl čísla 1,798 a průměru cívky (d) v metrech roven podílu magnetické indukce cívek (B) v mikrotésle a proudu (I) v ampérech při jednom závitě každé cívky (M).

$$\frac{1,798}{d} = \frac{B}{I} @ N = 1$$

$$d = 0,032\text{m}$$

$$B = 100\mu\text{T}$$

$$I = 0,01\text{A}$$

$$\frac{1,798}{d} = 56,1875 \frac{\mu\text{T}}{\text{A}}$$

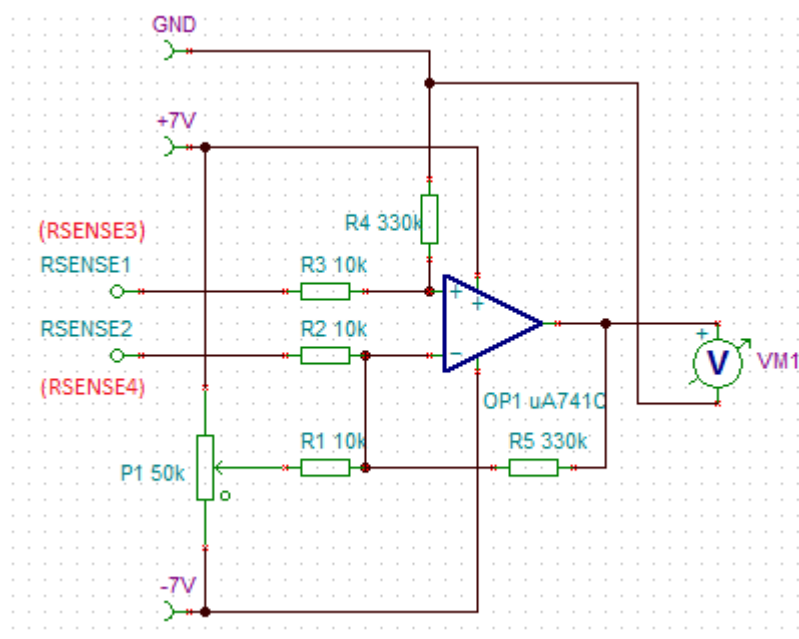
$$56,1875 / 100 = 0,561875 \frac{\mu\text{T}}{10\text{mA}}$$

$$100\mu\text{T} / 0,561875 = 178$$

$N = 178$, obě Helmholtzovy cívky mají tedy 178 závitů.

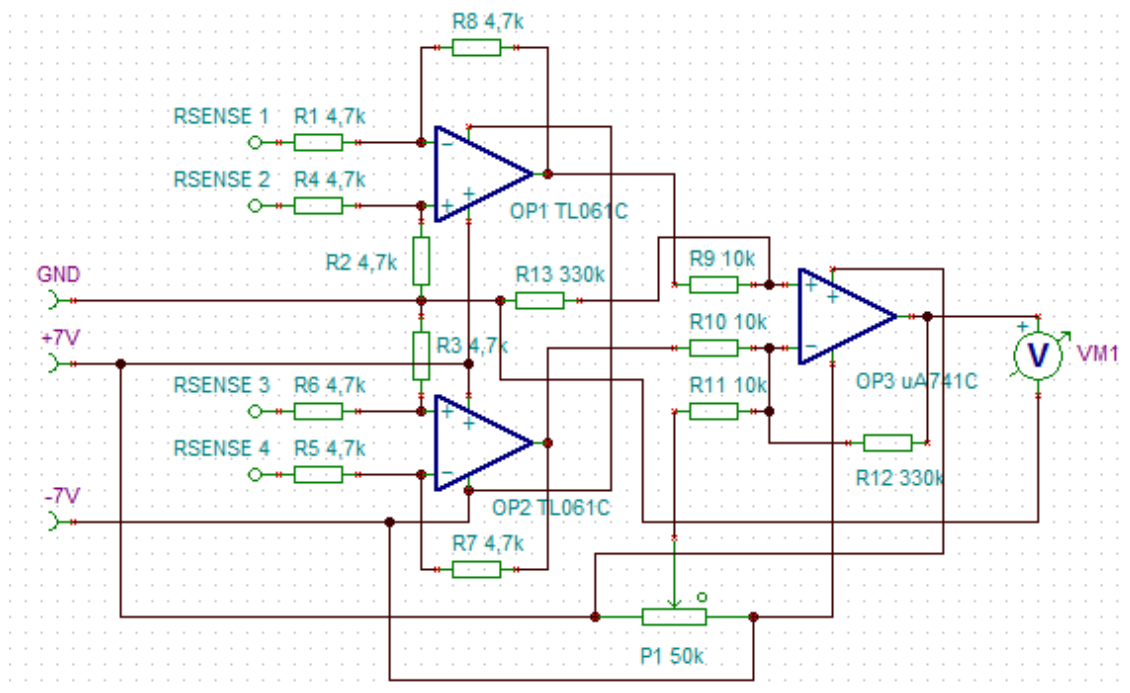
L3a,b se počítají stejně, jen dosadíme za magnetickou indukci (B) jinou hodnotu. Čím vyšší bude indukce, tím větší rozsah budeme moci měřit, ale také klesne citlivost. Já jsem zvolil hodnotu $28 \mu\text{T}$ při 10mA , závitů bude tedy 50. Pokud změníme hodnotu odporu $R4$ nebo odporu $R3$ či $R2$ (viz Obr. 16a), dá se citlivost měnit dle potřeby.

Vyhodnocení výstupního signálu probíhá dvěma způsoby. Pro případ, kdy jsou kompenzační cívky řízeny jedním senzorem je to **invertující a zesilující sčítačka s rozdílovým vstupem** (Obr. 17). Pro kompenzaci řízenou oběma senzory jsou třeba dva **diferenční zesilovače a sčítačka** (Obr. 18).



Obr. 187 - Sčítačka

Zapojení na Obr. 17 měří pomocí proudového bočnicku tvořeného odporem R4 na Obr. 16a proud kompenzační cívkou L3 (L1 a L2). Ten se mění v závislosti na vlastnostech magnetického pole působícího na senzor. Na odporu R4 (Obr. 16a) vzniká úbytek napětí zaznamenaný operačním zesilovačem. Toto napětí je zesíleno 33 krát (zesílení je dáno poměrem odporů R4/R3 a R5/R2 na Obr. 18) a k jedné polaritě je přičtena hodnota napětí nastaveného trimrem P1, protože cívkou L3 teče malý klidový proud (asi 1,5mA) a při tomto zesílení by byl zesilovač nasycen a choval se jako invertor (existovaly by prakticky jen hodnoty +- maximální možné výstupní napětí při napájení 14V, u uA741C je to 5,12V). Experimenty jsem zjistil, že větší zesílení než 33 krát není možné zde uplatnit kvůli vysoké úrovni šumu (při tomto zesílení je jeho hodnota +- 30mV vůči pinu GND, zjištěno osciloskopem) a časové nestabilitě (viz kapitola 5.). Schéma na Obr. 19 slouží k odečítání hodnot proudu cívkami L1 a L2 (Obr. 16).

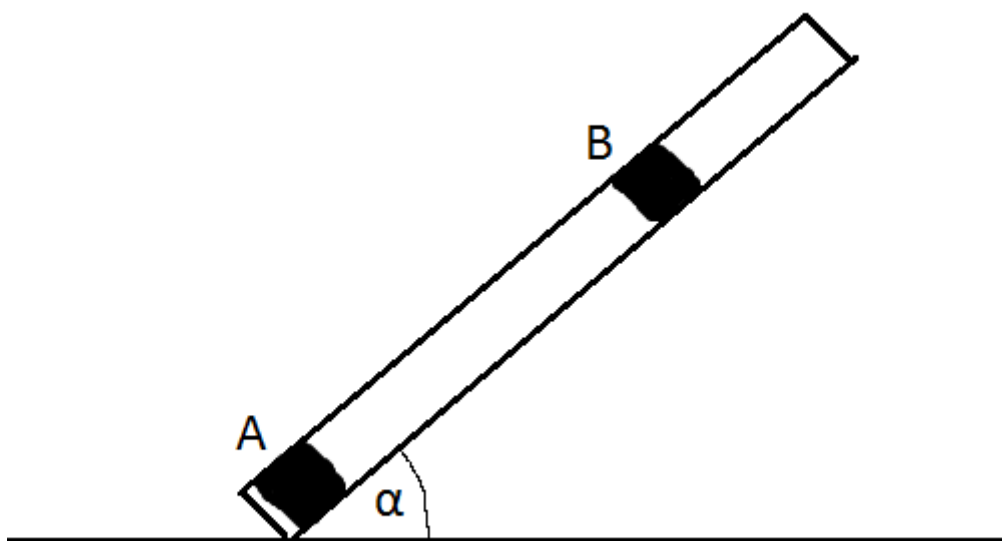


Obr. 198 - Diferenční zesilovače a sčítačka

Operační zesilovače OP1 a OP2 jsou diferenční zesilovače se zesilovacím činitelem 1. Slouží tedy jen jako měřiče proudu cívkami. Jejich výstupy jsou připojeny na sčítačku z Obr. 17. Voltmetr VM1 má automatickou volbu rozsahu (já jsem použil METEX M-3270). Rozlišení na desetiny mV nebylo možno použít kvůli nestabilitě.

5. Testování gradiometru a výsledky

Ověřil jsem funkčnost gradiometru změřením vektoru sklonu siločáry magnetického pole Země (viz kapitola 2.). Měření jsem prováděl na dvoře, o němž bezpečně vím, že pod ním nejsou žádné kovové předměty. Odstranil jsem také jakékoli železo v okruhu asi 5 metrů. Pro měření jsem použil plastový úhломěr. Jako vyhodnocovací jednotka bylo použito zapojení z Obr. 17, jehož vstupy jsem připojil na RSENSE 3 a 4 (Obr. 16b). Určil jsem pomocí mého gradiometru (přestavěného tedy na magnetometr) magnetický sever a porovnal s kompasem. Poté jsem si nakreslil na zem čáru ve směru severojižním. Vytvořil jsem pomocí dřevěné stoličky a vodováhy vodorovinu v severojižním směru podle čáry. Na stoličku jsem umístil gradiometr a úhломěr a postupně nakláněl gradiometr podle Obr. 19. Mnou naměřený úhel α je 62° vůči vodorovné ploše (na Obr. 19 horizontální silná čára).



Obr. 19 - Měření sklonu siločar Zemského magnetického pole

Dále jsem provedl testování následujících vlastností gradiometru: stabilita výstupního napětí při změnách teploty, stabilita výstupního napětí při dlouhodobém provozu a závislost mezi velikostí (hmotností) detekovaného předmětu, jeho vzdáleností od senzoru A a velikostí báze gradiometru (vzdáleností mezi senzory A a B, na Obr. 6 označena jako l_0).

Testování teplotní stability výstupu jsem prováděl ve stejných podmínkách, jako ověření funkce popsané na předchozí straně. Testoval jsem teplotní stabilitu elektroniky a senzorů v trubce zvlášť. Na zahřívání jsem použil fén na vlasy a pro určení teploty bodový teploměr VERNIER LabQuest. Při testování elektroniky jsem položil teploměr mezi součástky na plošný spoj a z různých vzdáleností foukal na ni fénem. Čím větší vzdálenost, tím nižší teplota. Po ustálení hodnoty na teploměru jsem zapsal teplotu a výstupní napětí. Pro testování stability senzorů jsem umístil teploměr doprostřed plexisklové trubky mezi senzory (středy vzdálené od sebe 15cm) a z různých vzdáleností foukal fénem. Po ustálení teploty jsem zapsal její hodnotu a hodnotu výstupního napětí.

Testování časové stability výstupu probíhalo doma při pokojové teplotě, v okolí se sice nacházely železné předměty (nohy od stolu, osciloskop), ale protože se gradiometr vůči nim nepohyboval, nemohly mít na měření žádný vliv. Časová stabilita byla testována po dobu dvou hodin, hodnota napětí na výstupu byla zjišťována každých 10 minut (viz Tabulka 2). Jako vyhodnocovací jednotka bylo použito zapojení z Obr. 17, připojené na senzor B (výstup RSENSE 3 a 4) voltmetr byl mezi měřeními vypnut a odpojen. Časovou nestabilitu napájecího zdroje zanedbáme.

Závislost mezi velikostí detekovaného předmětu, vzdáleností a bází gradiometru

jsem zjišťoval v podmínkách shodných s okolními podmínkami pro ověření funkce. Trubku se senzory jsem umístil rovnoběžně s hliníkovou třímetrovou latí. Trubka byla od ní vzdálena 1 centimetr. Lať ani gradiometr nebylo třeba nijak upevňovat. Rovnoběžně s okrajem latě se nacházelo délkové měřidlo.



Obr. 20 - Sestava pro měření závislostí - ilustrační foto. Na obrázku je trubka se senzory a kompenzačními cívkami ve finální podobě.

Předměty jsem pokládal do různých vzdáleností od senzoru A a průběžně měnil bázi gradiometru.

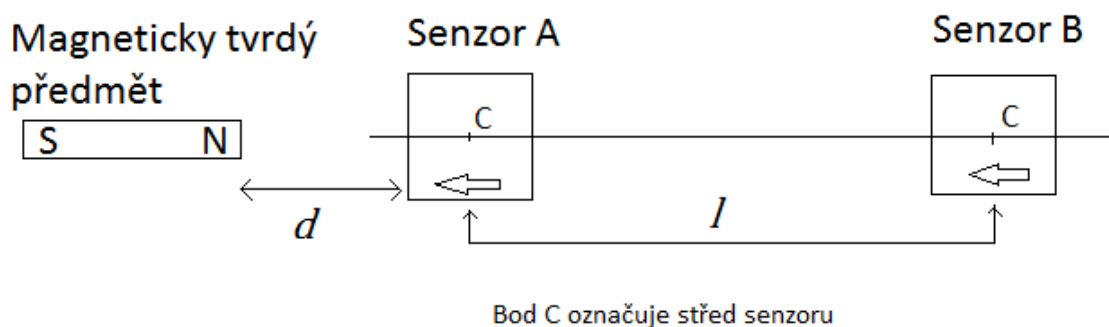
Napájecí zdroj byl při těchto pokusech asi 3 metry daleko od senzorů mimo osu jejich citlivosti, aby nedocházelo k ovlivňování gradiometru transformátorem. Pokusy jsem prováděl s těmito předměty:

1. Spojka na trubky (Fe) o vnějším průměru 4,5cm a délce 5cm (hmotnost 0,17 kg)
2. Kladivo (Fe), kovová část je dlouhá 13,5cm a široká 4cm (hmotnost 1,1 kg, vliv topora zanedbáme, jelikož má velmi nízkou permeabilitu i hmotnost)
3. Vidlička z martenzitické nerezové oceli dlouhá 18cm (hmotnost 0,03 kg)
4. Čerpadlo na vodu (Fe, Cu) s délkou 51cm a šířkou 23cm (hmotnost 46,5 kg), které mělo imitovat leteckou pumu z první světové války.

Podélná osa předmětů ležela na ose citlivosti senzorů, jelikož způsobuje větší změny magnetického pole.

Pro první režim kompenzace (dále "režim č.1") se zapojenou cívkou L3 (Obr. 16) byla zapojena vyhodnocovací jednotka na Obr. 17 (vstupy RSENSE 1 a 2). Na senzoru B (Obr. 7) je hodnota magnetické indukce odpovídající zemskému magnetickému poli a části pole způsobeného detekovaným předmětem. Toto pole je vyrušeno cívkami L1 a L2 (Obr. 8) na obou senzorech. Cívka L3 tedy kompenzuje pouze magnetické pole detekovaného předmětu. Hodnota proudu cívkou L3 tedy udává gradient. Teoreticky by měl být gradient magnetického pole mezi senzory tím menší, čím bude větší detekovaný předmět a menší báze gradiometru.

Druhý režim kompenzace (dále "režim č.2") spočívá v řízení cívky L1 senzorem A a L2 senzorem B. Cívka L3 zůstane nezapojena. Schéma zapojení cívek je na Obr. 16a naznačeno šipkami a na Obr. 16b čárkovaně. K vyhodnocení proudu cívkami je použito zapojení na Obr. 18. Cívka L1 kompenzuje zemské magnetické pole a pole detekovaného předmětu, cívka L2 kompenzuje zemské magnetické pole, ale pole detekovaného předmětu jen částečně. Rozdíl kompenzačních proudů odpovídá gradientu magnetického pole.

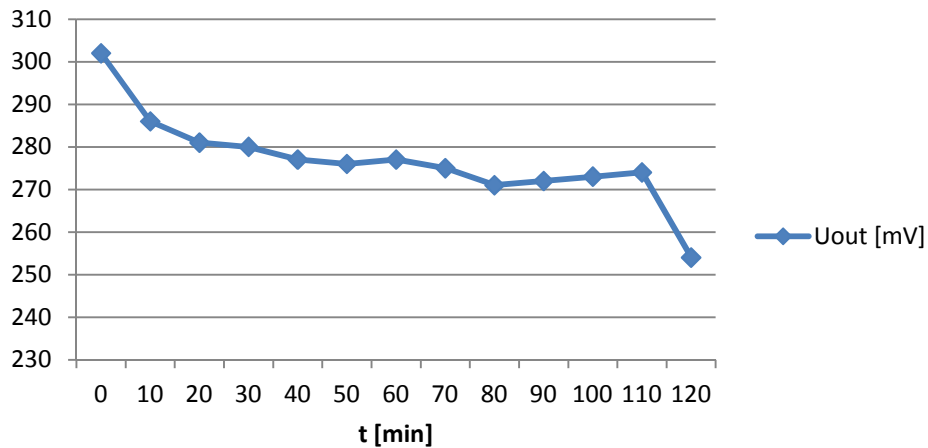


Obr. 21 - Označení hodnot v tabulkách

Výsledky měření

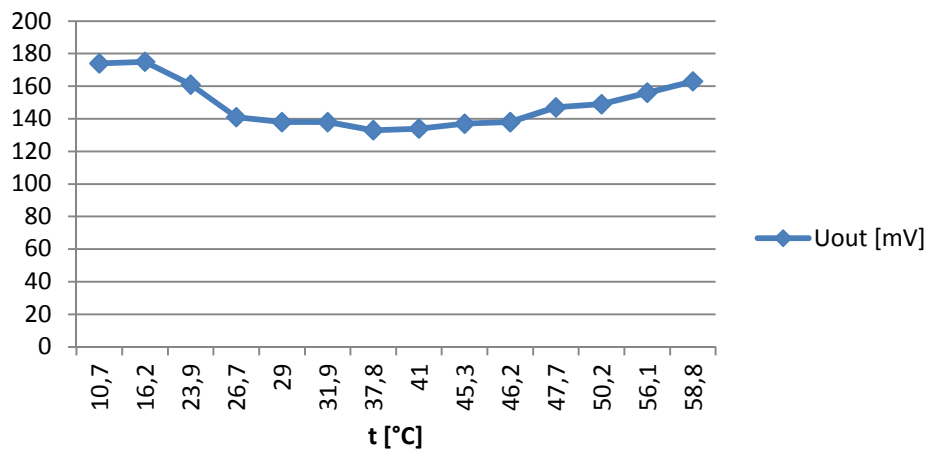
Výsledky měření teplotní a časové stability:

Časová stabilita



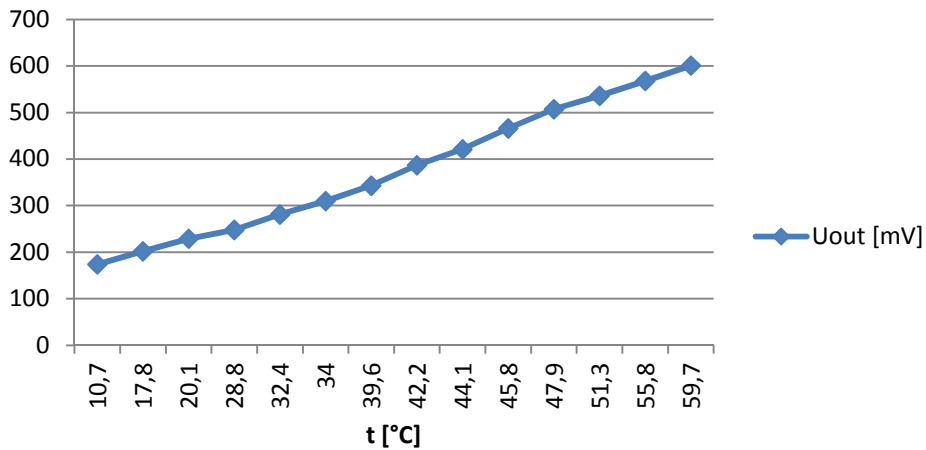
t [min]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Uout [mV]	302	286	281	280	277	276	277	275	271	272	273	274	254

Teplotní stabilita elektroniky



t [°C]	10,7	16,2	23,9	26,7	29	31,9	37,8	41	45,3	46,2	47,7	50,2	56,1	58,8
Uout [mV]	174	175	161	141	138	138	133	134	137	138	147	149	156	163

Teplotní stabilita senzorů

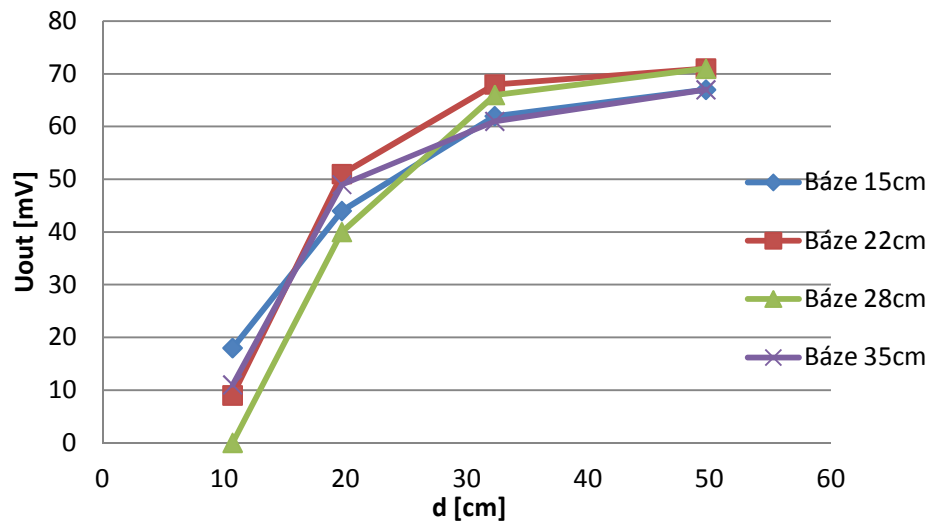


t [°C]	10,7	17,8	20,1	28,8	32,4	34	39,6	42,2	44,1	45,8	47,9	51,3	55,8	59,7
Uout [mV]	174	202	229	248	281	310	343	387	421	466	507	536	568	601

Výsledky měření gradientu v režimu č.1:

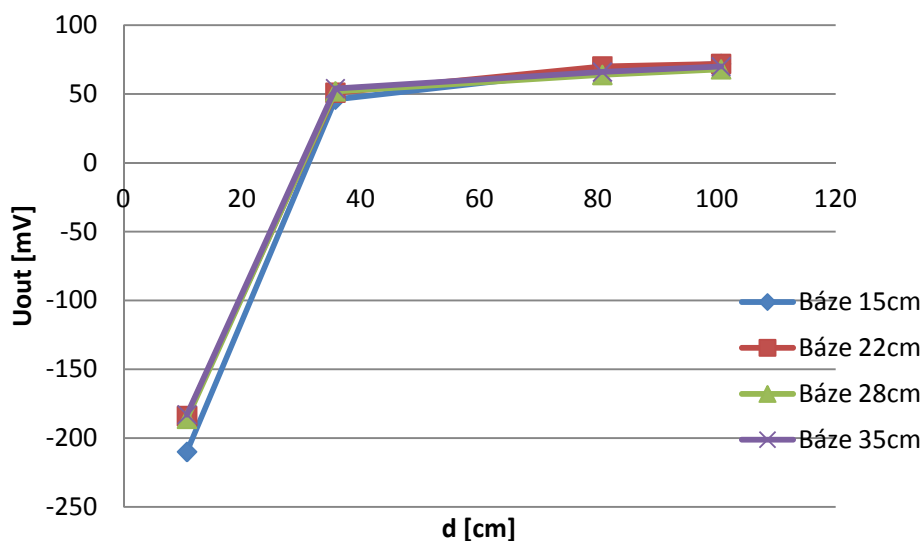
U všech následujících měření bylo výstupní napětí za nepřítomnosti kovového předmětu 73mV.

Spojka na trubky



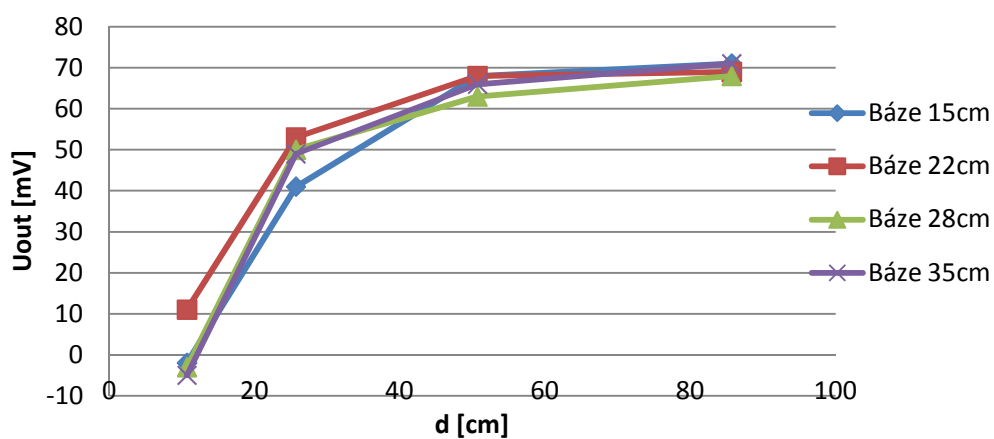
d [cm]	l=15cm	l=22cm	l=28cm	l=35cm
49,7	67	71	71	67
32,3	62	68	66	61
19,7	44	51	40	49
10,7	18	9	0	11

Kladivo



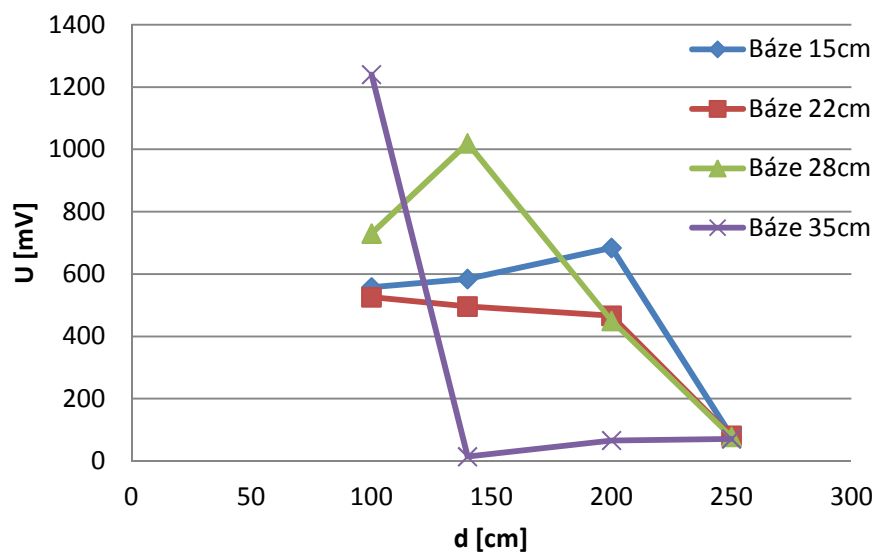
d [cm]	l=15cm	l=22cm	l=28cm	l=35cm
100,7	72	72	68	70
80,7	68	70	64	66
35,7	46	51	52	54
10,7	-210	-184	-186	-183

Nerez. vidlička



d [cm]	l=15cm	l=22cm	l=28cm	l=35cm
85,7	71	69	68	71
50,7	68	68	63	66
25,7	41	53	50	49
10,7	-2	11	-3	-5

Čerpadlo

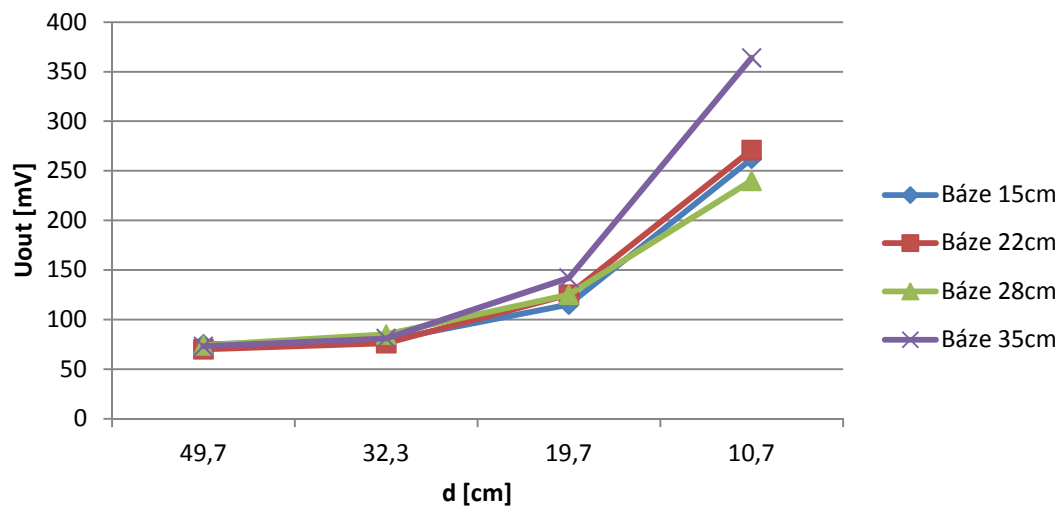


d [cm]	l=15cm	l=22cm	l=28cm	l=35cm
250	80	81	78	71
200	684	466	450	66
140	584	496	1020	14
100	558	526	730	1240

Při změně báze gradiometru se změnila hodnota výstupního napětí až o 2V a musela být znovu nastavena na 73mV trimrem P1 na Obr. 17.

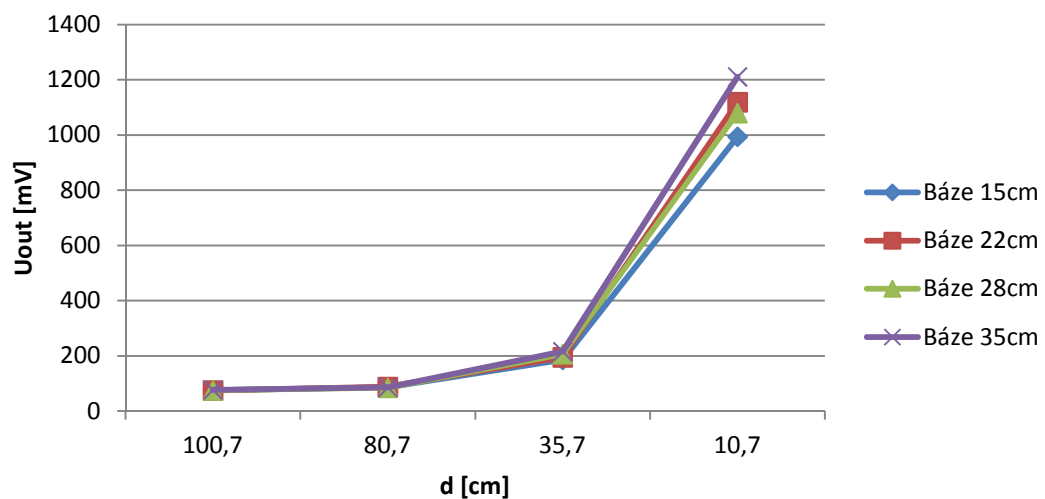
Výsledky měření gradientu v režimu č.2:

Spojka na trubky



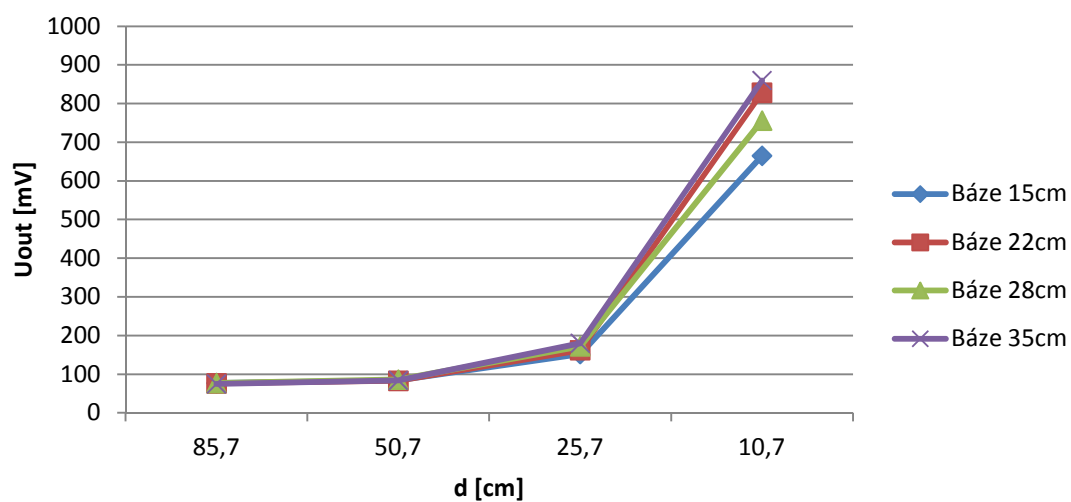
d [cm]	l=15cm	l=22cm	l=28cm	l=35cm
49,7	75	70	74	73
32,3	79	76	85	81
19,7	115	125	125	142
10,7	262	271	240	364

Kladivo



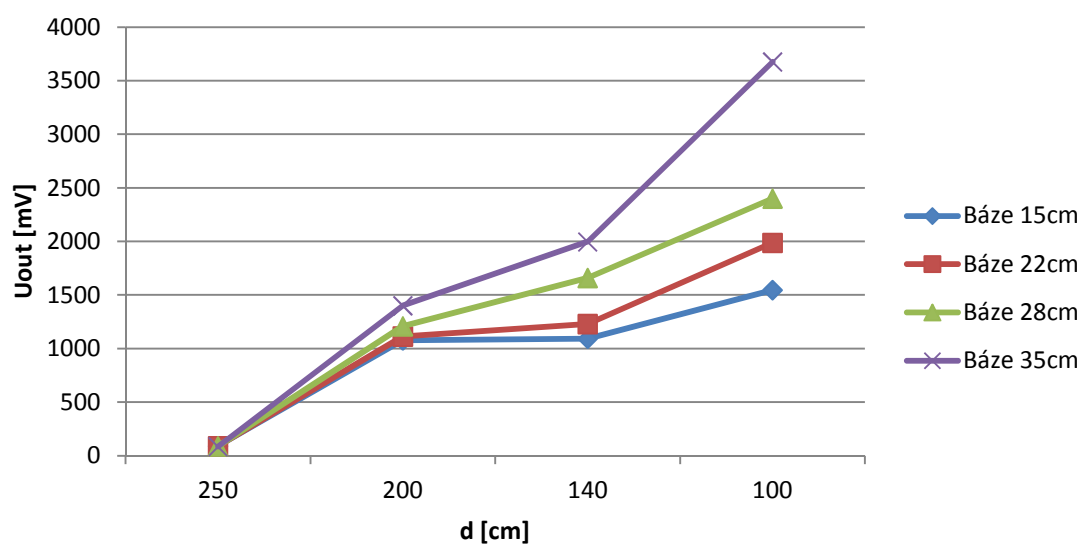
d [cm]	l=15cm	l=22cm	l=28cm	l=35cm
100,7	76	75	76	77
80,7	86	88	85	86
35,7	186	195	207	216
10,7	994	1119	1080	1211

Nerez. vidlička



d [cm]	l=15cm	l=22cm	l=28cm	l=35cm
85,7	77	76	77	75
50,7	84	83	86	84
25,7	152	162	172	180
10,7	665	828	756	860

Čerpadlo



d [cm]	l=15cm	l=22cm	l=28cm	l=35cm
250	92	91	89	86
200	1077	1114	1210	1401
140	1092	1230	1661	1997
100	1547	1988	2402	3677

6. Závěr

V rámci této práce SOČ jsem zkonstruoval magnetický gradiometr (zároveň detektor kovů) s měnitelnou bází a výstupem na voltmetr. Cílem bylo ověření závislosti báze gradiometru na velikosti předmětu, jež tímto způsobem detekujeme, a jeho vzdálenosti od senzorů. Dále měly být otestovány dva režimy kompenzace magnetického pole působícího na senzory. Výstup gradiometru měl být co nejméně proměnlivý při teplotních změnách a měl vykazovat vysokou časovou stabilitu, aby bylo možné s ním provádět potřebná měření co nejpřesněji. Jelikož vysoká stabilita výstupu nebyla primárním cílem práce, nemůže se rovnat s profesionálními výrobky. Vysoká hodnota výstupního šumu není podstatná, pokud nebudou data z výstupu gradiometru zpracovávána počítačem.

Toto téma jsem si vybral, protože mě zaujalo při návštěvě Katedry měření FEL ČVUT. Dostal jsem od mého konzultanta pana Petruchy fluxgate senzory a popis jejich funkce, tedy i princip vyhodnocení jejich výstupů. Veškerou elektroniku jsem s občasnými konzultacemi s panem Petruchou vyráběl a ladil sám. Bylo třeba navrhnout vhodné zesilovače a vhodný budič senzoru na základě popisu funkce fluxgate senzorů. Pro detekci a zobrazení polarity magnetického pole jsem použil synchronní detektor řízený oscilátorem. Napájecí zdroj jsem používal laboratorní s nastavitelným výstupním napětím, protože přístroj byl používán zatím pouze pro měření, nebylo tedy nutné jej přenášet. To ovšem nebrání jeho využití při hledání kovových předmětů v terénu (nebo k navigaci) a napájení přístroje z akumulátorů.

Výsledky měření vychází dle mých předpokladů, tedy že gradient je menší, pokud je gradiometrická báze menší a vzdálenost kovového předmětu větší. Senzory a jejich kompenzační vinutí na sebe vzájemně silně působí (především při malé bázi). Nepředvídal jsem, že se v kompenzačním režimu č.2 gradiometr chová jinak, než v kompenzačním režimu č.2. Citlivost je vyšší a nezáleží na polaritě magnetického pole (to vysvětluje rozdílné hodnoty na vodorovných osách grafů měření v obou kompenzačních režimech). Vektor sklonu siločar magnetického pole Země je v České Republice 65° . Můj výsledek 62° je způsoben nejspíše tím, že pod testovacím prostorem přece jen nějaké železo bylo. Toto nemohlo mít na ostatní měření vliv, protože se při nich senzory vůči podkladu nehýbaly.

Z mých měření vyplývá, že je obecně při konstrukci mobilních gradiometrů výhodnější kompenzační režim č.2. Pro detekci železných předmětů podobných mému kladivu je lepší použít větší bázi (kladivo spolehlivě detekováno ve vzdálenosti 100,7cm při bázi 35cm), zatímco pro větší předměty jako bomba o hmotnosti 50kg je vhodnější větší báze (čerpadlo spolehlivě detekováno ve vzdálenosti 250cm při bázi 35cm).

Z měření teplotní stability vyplývá, že můj gradiometr se nedá používat při velkých změnách teploty, především kvůli vzájemnému působení senzorů a teplotní délkové roztažnosti plexisklové trubky. Řešením je použití trubky z jiného materiálu, například z keramiky či skla a použití kvalitnějších součástek, tedy kondenzátorů a rezistorů s nižším teplotním koeficientem a operačních zesilovačů s vyšší stabilitou offsetu. Dalo by se využít i dříve zmíněného přehřívání krystalu v oscilátoru. Hodnota šumu na výstupu se dá snížit, pokud budou senzory buzeny větším proudem a předzesilovače budou mít menší zesílení (šum senzorů a budiče nebude tolik zesilován), a samozřejmě použitím kvalitnějších součástek s menším zkreslením, které ovšem nejsou v maloobchodech v České Republice běžně dostupné. Tím by se zvýšila částečně i citlivost, jelikož ta je dána mimo jiné i úrovní šumu před detektorem. Určitě by bylo také lepší z hlediska praktické použitelnosti zařízení, aby bylo umístěné na menším plošném spoji, já jsem ho postavil na univerzálním laboratorním cuprextitu. Pro spolehlivější a přesnější funkci kompenzačních vinutí by bylo dobré, namotat je na kroužky např. vytištěné na 3D tiskárně.

7. Literatura

Kirschvink, J. L.: *Uniform Magnetic Fields and Double-Wrapped Coil Systems*, 1992

Belza, J.: *Operační zesilovače pro obyčejné smrtelníky*, BEN, 2004

Janošek, M.: *Magnetometr s miniaturními senzory fluxgate*, diplomová práce ČVUT FEL, 2007

Kášpar, P.: *Měření slabých magnetických polí a jejich stínění*, digitalizovaná přednáška ČVUT FEL, 2005

Tkotz K., Bastian P., Bumiller H., Eichler W., Huber F., Jaufmann N., Manderla J., Spielvogel O., Stricker F. D., Winter U.: *Fachkunde Elektrotechnik 23/2001*, Europa - Lehrmittel, přeložil RNDr. Jiří Handlíř

Härtl, A.: *Optoelektronik in der Praxis*

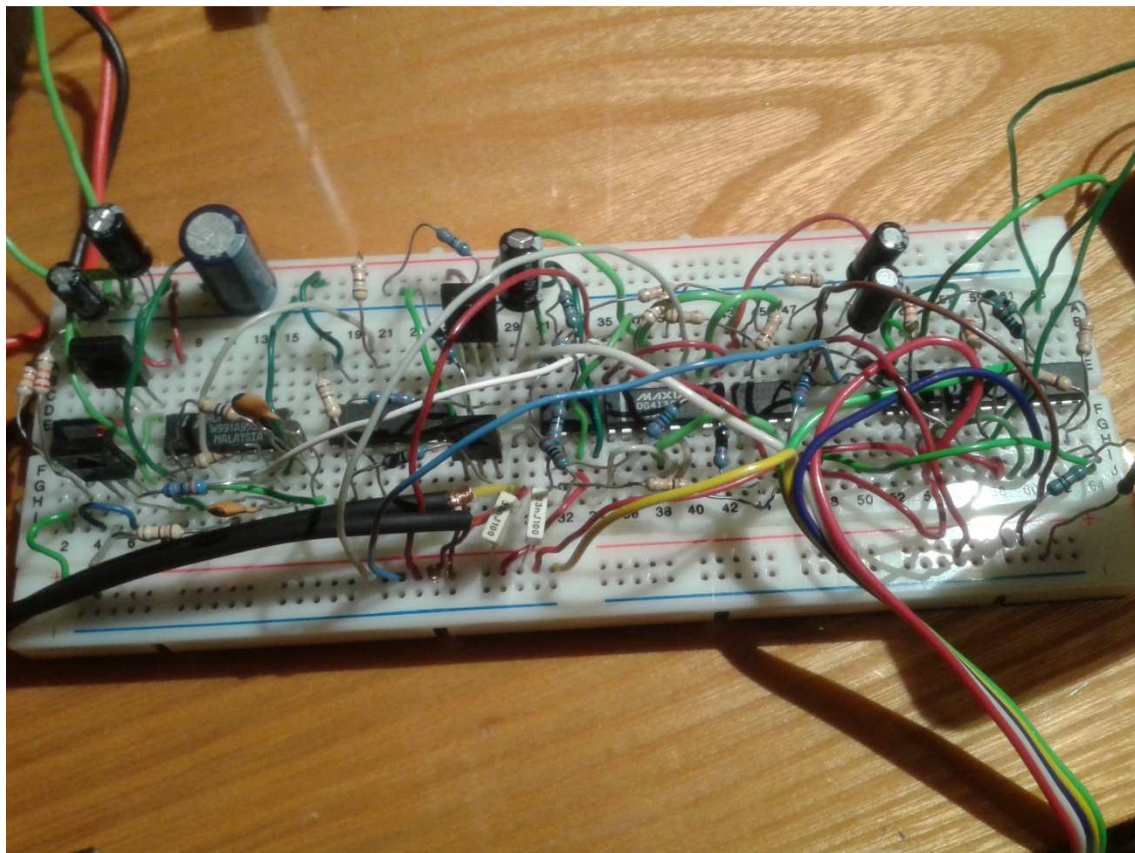
Faktor, Z.: *Transformátory a cívky*, BEN 1999

Katalogový list TL 061 STMicroelectronics

Katalogový list TL 071 STMicroelectronics

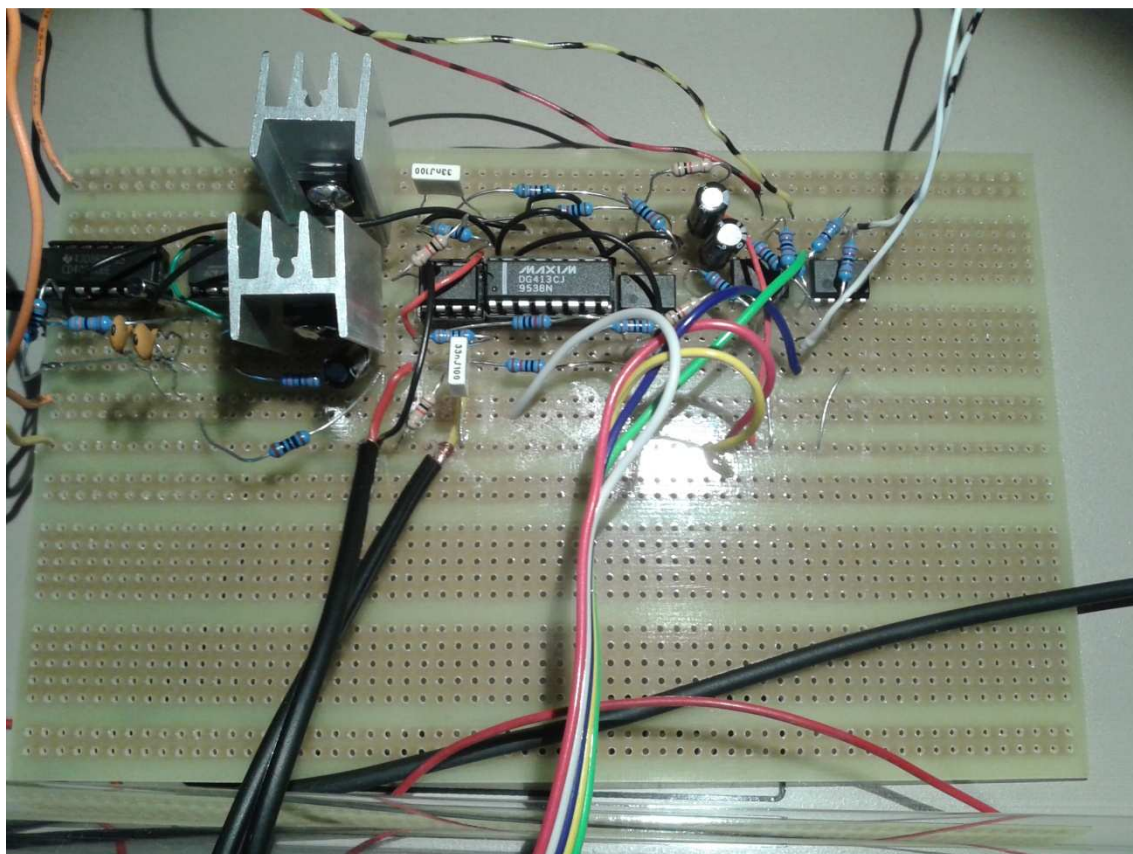
Katalogový list DG 413C Maxim Integrated

8. Přílohy



Obr. 22 - Elektronika gradiometru na zkušební desce

S elektronikou na nepájivém kontaktním poli nebylo možné realizovat nějaké experimenty, protože výstupní napětí se nepředvídatelně měnilo i řádově ve stovkách mV, ale na vývoj a hrubé ověření funkce posloužilo výborně. Plochý kabel a audio dvojlinka vedou k sensorům a kompenzačním cívkám.



Obr. 23 - Elektronika gradiometru na laboratorním plošném spoji

V tomto případě je již stabilita výstupu dobrá. Chladiče na tranzistorech jsou nutné, poněvadž senzory teče proud okolo 100mA. Dělič napájecího napětí z Obr.10 je na zvláštní desce, jelikož není jeho přítomnost nutná, pokud použijeme symetrický zdroj napájecího napětí.



Obr. 24 - Detail senzoru A s cívkami L3 (pod nimi L1) – cívky jsou zality lepidlem a omotány lepicí páskou



Obr. 25 - Senzor B a pohyblivé kompenzační cívky L2



Obrázek 26 - Detail senzoru B