

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra měření

Senzory pro měření magnetických vlastností hornin

Vít Machanec

Vedoucí: Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D.
Studijní program: Kybernetika a robotika
Obor: Kybernetika a robotika
Květen 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Machanec** Jméno: **Vít** Osobní číslo: **474382**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Studijní obor: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Senzory pro měření magnetických vlastností hornin

Název diplomové práce anglicky:

Sensors for measurement of rock sample magnetic properties

Pokyny pro vypracování:

- pomocí simulace magnetického pole optimalizujte návrh senzorů pro měření susceptibility a remanence válcových vzorků z horninových vrstev nebo odběru sedimentů
- vypracujte podklady pro výrobu senzorů (fluxgate senzor pro měření remanence a diferenciální transformátor pro měření susceptibility) a tyto realizujte
- měřením pomocí přístrojové techniky ověřte funkčnost a parametry senzorů
- v případě nedostatku času se pokuste realizovat specifickou elektroniku pro tyto senzory

Seznam doporučené literatury:

Ripka (ed.): Magnetic Sensors and Magnetometers, Artech, Boston, ISBN 1-58053-057-5, 2nd edition 2021
Paul Horowitz, Winfield Hill, The Art of Electronics, 3rd edition, Cambridge University Press 2015
Ahmet Bindal, Electronics for Embedded Systems, Springer International Publishing, Switzerland 2017
K. Draxler, P. Kašpar, P. Ripka, Magnetické prvky a měření, vydavatelství ČVUT 2008

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D., 13138

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **03.01.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce:

do konce zimního semestru 2022/2023

Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Tímto děkuji Ing. Vojtěchu Petruchovi, Ph.D. za profesionální vedení mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Michalu Janoškovi, Ph.D. za rady k simulacím senzorů. Také bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během studia.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

V Praze, 20. května 2022

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je návrh a realizace dvou senzorů pro měření magnetických vlastností především vrtných jader, ale případně i horninových vzorků podobných rozměrů. První ze senzorů je určen k měření remanence a pracuje na principu fluxgate magnetometru. Druhý senzor má sloužit k měření susceptibility a využívá principu rozdílového transformátoru.

V rámci návrhu byly oba senzory nejprve simulovány pomocí metody konečných prvků, aby se teoreticky ověřila jejich funkčnost a u druhého senzoru optimalizovaly jeho požadované vlastnosti. Konstrukce senzorů byly přizpůsobeny pro jejich primární účel měření na vrtných jádrech a po realizaci byly také prakticky testovány pro určení jejich základních parametrů. K fluxgate senzoru byla navíc navržena a vyrobena GPS jednotka pro možnost ukládání poloh měření v terénu.

Klíčová slova: horniny, magnetismus, senzory, simulace

Vedoucí: Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D.

Abstract

The goal of this diploma thesis is design and implementation of two sensors for measuring magnetic properties of drill cores but possibly also other rock samples of similar dimensions. The first sensor is designed to measure remanence and works on the principle of fluxgate magnetometer. The second sensor is designed to measure susceptibility and uses the principle of differential transformer.

As part of the design, both sensors were first simulated using the finite element method to theoretically verify their functionality and to optimize properties of the second sensor. Construction of both sensors were adjust for their primary purpose of measuring drill cores. After realization both sensors were tested to estimate their basic parameters. A GPS unit was also designed and built for fluxgate sensor to allow saving positions of measurements in terrain.

Keywords: rocks, magnetism, sensors, simulations

Title translation: Sensors for measurement of rock sample magnetic properties

Obsah

1 Úvod a motivace	1
2 Teoretická část	3
2.1 Základní magnetické veličiny	3
2.2 Magnetické vlastnosti hornin	6
2.3 Způsoby měření susceptibility a remanence	10
2.4 Současná měřicí technika	13
3 Simulace senzorů	17
3.1 Metoda konečných prvků	17
3.1.1 Princip MKP	17
3.2 Simulace v programu Flux 12 . .	19
3.2.1 Obecný postup simulace	20
3.3 Výsledky simulací	21
3.3.1 Fluxgate	21
3.3.2 Susceptimetr	24
4 Realizace	29
4.1 Fluxgate	29
4.1.1 Návrh konstrukce a sestavení senzoru	29
4.1.2 Elektronika a firmware	30
4.2 Susceptimetr	31
5 Testování	33
5.1 Fluxgate	33
5.2 Susceptimetr	36
6 Závěr	39
A Literatura	41
B Nákrety konstrukcí fluxgate a susceptimetru	43
C Elektrické schéma GPS modulu	45

Obrázky

2.1 Hysterezní smyčka feromagnetika [2]	6
2.2 Ukázky diamagnetických minerálů. Zdroj obrázků: Wikipedia	7
2.3 Ukázky magnetických minerálů a meteoritů	10
2.4 Fluxgate ve zpětnovazebním zapojení [1]	11
2.5 Schéma senzoru pro měření susceptibility od firmy Zurich Instruments AG [7]	12
2.6 KM-7 - senzor magnetické susceptibility [8]	14
2.7 JR-6 - senzor remanentní polarizace [9]	14
2.8 MPP - sonda pro měření magnetické susceptibility a elektrické vodivosti [12]	16
2.9 KT-10 v2 - senzor magnetické susceptibility [13]	16
3.1 Ukázka typického uspořádání cívek fluxgate. Skutečné rozměry cca $2,7 \times 2,7$ cm	21
3.2 Vzájemná poloha provizorního vzorku a fluxgate vyvinutého v rámci diplomové práce	21
3.3 Diskretizovaný model fluxgate senzoru s jemnější sítí v objemu jádra. Pro přehlednost bylo okolo senzoru vypnuto zobrazení infinite boxu. . .	22
3.4 Hustota magnetického indukčního toku jádrem při počáteční relativní permeabilitě 80 000	23
3.5 BH smyčky materiálu pro jádro fluxgate před a po žihání magnetickým jhem	23
3.6 Výsledek simulace s relativní permeabilitou 363 520 zjištěnou z BH smyčky naměřené po žihání materiálu jádra. Černou šipkou zvýrazněn směr remanence vzorku.	24
3.7 Tvarování jádra susceptimetru pro dosažení co nejrovnoměrnějšího rozložení magnetických siločar přes celý řez vzorku. Žlutě umístění excitační cívky.	25
3.8 Model susceptimetru - pohled shora a s <i>infinite box</i>	26
3.9 Model susceptimetru - pohled z boku a simulovaný el. obvod	26
3.10 Ukázky plošných řezů středem vzorku - nahoře vzorek s $\mu_r = 0,99$, dole vzorek s $\mu_r = 3$. S vyšší μ_r vzorku se v jeho objemu zvyšovala magnetická indukce a magnetické pole se více rozpínalo mimo rovinu jádra senzoru.	27
3.11 Průběhy velikosti indukce přes střed vzorku (pravá část průběhů) a vzduchovou mezeru (levá část průběhů) z <i>Magneto Static 3D</i> aplikace. Velikosti indukcí 100-600 μ T. Tloušťka jádra 0,5 mm pro urychlení simulace.	28
4.1 Návrh dílů fluxgate konstrukce ve Fusion 360	29
4.2 Jádro fluxgate s navinutou excitační cívkou	29
4.3 Vpravo námi zhotovený senzor, vlevo fluxgate z FEL	30
4.4 Blokové schéma jednotky pro obsluhu fluxgate senzoru navržené v rámci závěrečné práce Martina Peška [20]	30
4.5 DPS GPS jednotky	31
4.6 Realizace susceptimetru	32
5.1 Zapojení pro ladění fluxgate senzoru	33
5.2 Průběhy na osciloskopu: zeleně budící proud (píky cca ± 650 mA), žlutě (kanál A) a růžově (kanál B) indukovaná napětí při natočení jednotlivých párů cívek do gradientu zemského magnetického pole. Vpravo ladění snímacích cívek.	34
5.3 Zapojení fluxgate pro měření citlivosti	34
5.4 Fluxgate ve stínící trubici	34
5.5 Šumová spektra vypočtená programem SR830spetrumMeas.vi	35

5.6 Ilustrace procesu testování fluxgate senzoru	36
5.7 Ukázky průběhů z osciloskopu při testování fluxgate s ovládací elektronikou. Zeleně budící proud, žlutě a modře napětí indukované v kanálu A a B resp.	37
5.8 Zapojení pro testování susceptimetru	37
5.9 Testování susceptimetru - zeleně budící proud ($f = 4,6$ kHz, $I_{pp} = 580$ mA), žlutě indukovaná napětí	37
5.10 Testování vzorků - zleva: páska s vysokou μ_r , lávový odlitek, jezerní sediment v plastové trubici	38
B.1 Okótované nákresy vnitřního a vnějšího dílu fluxgate senzoru	43
B.2 Nákres krytu susceptimetru	43
C.1 Elektrické schéma GPS modulu	45

Tabulky

2.1 Příklady diamagnetických a paramagnetických minerálů a jejich měrných magnetických susceptibilit [3]	8
2.2 Porovnání parametrů senzorů pro měření magnetické susceptibility. Znakem '-' jsou vyplněny buňky, kde informace nebyly k dispozici, příp. u KLY5 nejsou kvůli umístění přístroje v laboratoři významné.	16
3.1 Rozměry modelu v milimetrech .	21
3.2 Vybrané parametry materiálu pásky použité jako jádro fluxgate magnetometru	22
5.1 Napětí naměřená senzorem na různých vzorcích	37

Kapitola 1

Úvod a motivace

Měření magnetických vlastností hornin nacházejí široké uplatnění ve vědě, ale i v komerčním sektoru. Paleomagnetismus např. využívá zbytkový magnetismus některých hornin k datování změn polarity zemského magnetického pole a zkoumání historie geologických procesů. Pro litografii slouží údaje o magnetismu hornin k určení jejich složení i struktury a také mapování jejich výskytu, čehož lze případně využít pro těžbu magnetických rud a potenciálně dalších prvků, které jejich výskyt mohou doprovázet. V enviromentálních aplikacích lze využít magnetismus částic ke stopování znečištění nebo jako indikátory původu půd a vzdálenosti jejich přesunu při erozi.

Předkládaná práce má za cíl vyvinout a otestovat dva senzory určené k měření remanence a susceptibility vrtných jader. Iniciátorem projektu byl doc. Günther Kletetschka z ústavu hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky na PřF UK, který by byl jejich zamýšleným uživatelem a senzory by mu mohly eventuálně pomoci např. s určením původu jednotlivých vrstev jader (vulkanický, sedimentární naplavenina...), složení, porézности a dalších vlastností. Pro tyto účely by také bylo nejvhodnější umět měřit vrtná jádra po co nejtenčích vrstvách.

Navržené senzory pracují na principu fluxgate a rozdílového transformátoru. Technologie fluxgate senzorů byla využita pro měření remanence vzorků proto, že její vývoj probíhá na katedře měření FEL ČVUT ve skupině MAGLAB dlouhodobě a je velmi dobře zvládnutá. Naopak měření susceptibility byl neobvyklý zajímavý úkol, a proto pro něj byla raději vybrána technologie založená na osvědčeném principu rozdílového transformátoru.

Kapitola 2

Teoretická část

Tato kapitola se věnuje základním fyzikálním veličinám používaným pro popis magnetických vlastností materiálů a relevantním k vyrobeným sensorům. Dále jsou v ní popsány magnetické vlastnosti hornin a látek obecně a způsoby měření susceptibility a remanence. Na konci je uvedeno několik příkladů současné měřicí techniky dostupné na trhu, která je využívána ke zkoumání vlastností horninových vzorků a vrtných jader.

2.1 Základní magnetické veličiny

Magnetická indukce

Magnetická indukce je základní veličina v magnetismu, která vyjadřuje silové účinky magnetického pole na částice s nábojem nebo dipólovým momentem, které se v daném poli pohybují. Jedná se o vektorovou veličinu s označením \mathbf{B} a jednotkou 1 T (Tesla). Pokud by vodičem o délce $l = 1$ m procházel proud $I = 1$ A a tento vodič byl umístěn v magnetickém poli tak, aby byl kolmý na směr \mathbf{B} , působila by na něj síla F o velikosti právě 1 N. Formálně lze toto chování vyjádřit vzorcem

$$\mathbf{F} = I[\mathbf{l} \times \mathbf{B}]. \quad (2.1)$$

Pro představu o velikostech indukcí v přírodě a technické praxi má např. zemské magnetické pole v našich zeměpisných šířkách velikost okolo $49 \mu\text{T}$, na povrchu permanentních magnetů je indukce v řádu desetin T a supravodivými cívkami lze dosáhnout indukci i 10 až 20 T. [1]

Magnetickou indukci lze také vyjádřit pomocí magnetického toku a to vztahem $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb} \cdot \text{m}^{-2}$, což nás přivádí k další důležité veličině.

Magnetický indukční tok

Magnetický indukční tok je skalární veličina značená jako Φ . Jednotkou magnetického toku je 1 Wb (Weber). Pokud se v závitě, který je kolmý na směr magnetického pole, indukuje za 1 s napětí $u_i = 1$ V, znamená to, že se tok během této doby změnil o 1 Wb. Vztah mezi časovou změnou

magnetického toku a napětím indukovaným v závitě lze psát jako

$$u_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (2.2)$$

Na tok lze také nahlížet jako na veličinu, která je úměrná počtu indukčních čar procházejících nějakou myšlenou plochou S nacházející se v magnetickém poli. Elementární magnetický tok $d\Phi$ elementem plochy dS lze pak zavést vztahem

$$d\Phi = B_n dS = \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}, \quad (2.3)$$

kde B_n je složka \mathbf{B} kolmá k ploše $d\mathbf{S}$. Celkový magnetický tok plochou S pak můžeme získat součtem elementárních magnetických toků jejími elementy, tedy integrací přes plochu S ,

$$\Phi = \iint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = \iint_S B_n dS. \quad (2.4)$$

Tok vycházející z uzavřené plochy je vždy roven nule, což popisuje II. Maxwellova rovnice

$$\oiint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0, \quad (2.5)$$

která vyjadřuje vírový charakter magnetických polí, tedy že nemají žádná zřídla toků.

■ Intenzita magnetického pole

Intenzita magnetického pole je vektorová veličina značená \mathbf{H} , která je definována z I. Maxwellovy rovnice

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I + \iint_S \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}, \quad (2.6)$$

která říká, že elektrický proud spolu se změnami elektrického indukčního toku vytvářejí magnetické pole. Jednotkou intenzity je $1 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$, kterou má magnetické pole ve vzdálenosti $r = 1/(2\pi)$ m od rovného vodiče protékaného proudem $I = 1 \text{ A}$. Intenzitu lze pak vyjádřit jako

$$H = \frac{I}{2\pi r}. \quad (2.7)$$

Intenzita má také souvislost s indukci, kterou lze vyjádřit vztahem

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}, \quad (2.8)$$

kde μ_r je relativní permeabilita prostředí, pro vakuum a prakticky i pro vzduch rovna jedné, a $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ je permeabilita vakua nazývaná též magnetickou konstantou.

■ Magnetizace a magnetická polarizace

Magnetizace je vektorová veličina se značením \mathbf{M} a jednotkou stejnou jakou má intenzita magnetického pole, tedy $1 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$. Fyzikálně charakterizuje magnetizace stupeň uspořádání Ampérových magnetických momentů molekulárních proudů do směru vnějšího magnetického pole. Magnetizace tedy závisí na výsledné intenzitě magnetického pole uvnitř daného tělesa nebo obecně nějaké látky. Definována je jako

$$\mathbf{M} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{H}. \quad (2.9)$$

Magnetická polarizace je taktéž vektorovou veličinou, značenou jako \mathbf{J} a mající jednotku shodnou s magnetickou indukcí, tedy 1 T . Magnetická polarizace představuje změnu indukce pole vyvolanou mírou magnetizace tělesa, které se v tomto poli nachází. Definována je jako

$$\mathbf{J} = \mathbf{B} - \mu_0 \mathbf{H}. \quad (2.10)$$

Pro vakuum a prakticky i pro vzduch jsou M i J nulové. Z 2.9 a 2.10 vyplývá, že mezi oběma veličinami platí vztah

$$\mathbf{J} = \mu_0 \mathbf{M}. \quad (2.11)$$

■ Susceptibilita

Susceptibilita χ_m je bezrozměrná veličina, kterou lze zavést jako

$$\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}, \quad (2.12)$$

z čehož pak vychází, že

$$\mathbf{J} = \mu_0 \chi_m \mathbf{H}. \quad (2.13)$$

Tyto vztahy se týkají lineárních magnetik, pro která tedy susceptibilita udává poměr mezi intenzitou vnějšího magnetického pole a jejich vnitřní magnetizací. U magneticky anizotropních látek nemá \mathbf{J} a \mathbf{H} stejný směr, takže u nich už není susceptibilita skalární veličina, ale tenzor (2. řádu).

Z 2.10 a 2.13 lze odvodit vztah mezi susceptibilitou a relativní permeabilitou,

$$\mathbf{B} = \mathbf{J} + \mu_0 \mathbf{H} = \mu_0 \chi_m \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{H} = \mu_0 (1 + \chi_m) \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = \mu \mathbf{H}, \quad (2.14)$$

z čehož dostáváme

$$\chi_m = \mu_r - 1. \quad (2.15)$$

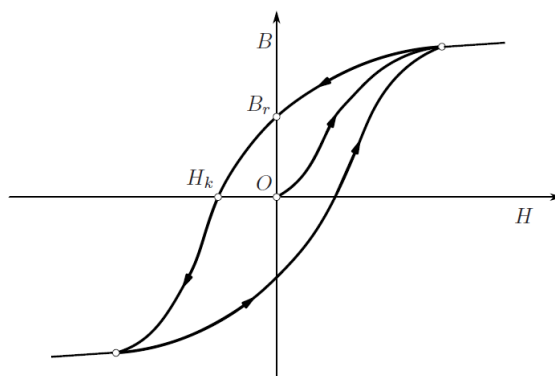
Susceptibilita je pro vakuum rovna nule a obecně může nabývat kladných i záporných hodnot, podle čehož lze dělit látky na tři skupiny.

- diamagnetické: $\chi_m < 0$, ($\mu_r < 1$), χ_m i μ_r jsou nezávislé na H .
- paramagnetické: $\chi_m > 0$, ($\mu_r > 1$), χ_m i μ_r jsou nezávislé na H .
- feromagnetické: $\chi_m > 0$, ($\mu_r \gg 1$), $\chi_m = f(H)$, $\mu_r = f(H)$.

■ Remanence

Remanence je remanentní (zbytková) polarizace, která zůstane materiálu po přerušení působení vnějšího magnetického pole. Značí se \mathbf{B}_r a jednotku má shodnou s magnetickou indukcí a polarizací, tedy 1 T.

Velkou remanencí mají feromagnetické látky jako např. železo nebo nikl. Závislost magnetické indukce na vnější intenzitě pole pro tyto i další feromagnetika se obecně zobrazuje pomocí tzv. hysterezní smyčky ilustrované na obr. 2.1.



Obrázek 2.1: Hysterezní smyčka feromagnetika [2]

Na obrázku je kromě hysterezní smyčky zachycena křivka prvotní magnetizace vedoucí z počátku k pravému krajnímu bodu smyčky. Ta zachycuje závislost $B = f(H)$ za počátečních podmínek $H = 0$, $B = 0$, tedy když je materiál dokonale odmagnetován. Při dosažení pravého, resp. levého krajního bodu křivky dochází k nasycení materiálu, kdy další zesílení intenzity vnějšího pole už nezvyšuje indukci.

Poté přechází závislost $B = f(H)$ na tzv. statickou hysterezní smyčku, na které jsou zaznačeny dva výrazné body v průsečících se souřadnými osami. Průsečík křivky s vertikální osou je rozebíraná remanence B_r . Průsečík křivky s horizontální osou mezi 2. a 3. kvadrantem se pak nazývá koercivita H_k (nebo H_c) a udává intenzitu potřebnou k zpětnému odmagnetování materiálu.

■ 2.2 Magnetické vlastnosti hornin

Vlastnosti hornin jsou obecně dány jejich složením a strukturou. Pokud tedy kus horniny obsahuje zrna nebo krystaly magnetických minerálů, bude také podle koncentrace a druhu těchto minerálů vykazovat magnetické vlastnosti. U zavedení susceptibility bylo uvedeno, že látky podle jejich magnetických vlastností rozlišujeme na diamagnetické, paramagnetické a feromagnetické. Dalšími typy látek jsou antiferomagnetické, ferimagnetické a superparamagnetické.

Horniny se obecně skládají z minerálů, což jsou přírodní chemické sloučeniny nebo vzácněji i čisté prvky, které vznikly při geologických procesech. Mohou být tvořeny seskupením více minerálů (např. žula, čedič), ale i jediným minerálem (vápenec, dolomit). V zemské kůře jsou nejvíce zastoupeny právě

horninotvorné minerály jako křemen, živce, slídy nebo kalcit. Magnetické vlastnosti hornin mají kvantově mechanickou podstatu, proto budou následovat pouze hrubé fyzikální popisy jednotlivých druhů magnetických látek a k nim příklady hornin či minerálů, které magnetické vlastnosti těchto látek projevují.

■ Diamagnetické látky

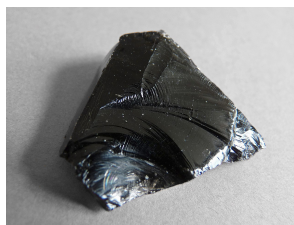
Diamagnetické látky se skládají z atomů, jejichž vnitřní magnetické momenty se navzájem ruší. Magnetický moment jednoho elektronu se skládá z orbitálního a spinového příspěvku elektronu a lze ho vyjádřit jako

$$\boldsymbol{\mu} = -g\left(\frac{q_e}{2m_e}\right)\mathbf{L},$$

kde q_e , m_e a \mathbf{L} jsou po řadě náboj, hmotnost a moment hybnosti elektronu a g je činitel, který charakterizuje stav elektronu a nabývá hodnot 1 až 2 (1 pro čistě orbitální moment, 2 pro čistě spinový moment, 1-2 pro kombinaci těchto momentů). Spiny elektronů a jejich orbitální pohyby jsou v takovýchto atomech v rovnováze, takže výsledný magnetický moment každého atomu je nulový. Při vystavení diamagnetika magnetickému poli se v jeho atomech indukují dodatkové proudy, které mají podle Lenzova zákona takový směr, aby jimi indukované magnetické momenty atomů působily proti směru pole vnějšího. Vnější magnetické pole je tak uvnitř látky mírně zeslabeno. Tento jev nezávisí nijak zvlášť na teplotě. Příkladem diamagnetických látek jsou bismut, rtuť, měď, zlato, sklo nebo uhlík. Bismut, měď i zlato lze v přírodě nalézt ryzí, přírodním sklem je např. obsidián nebo vltavín.



(a) : Bismut



(b) : Obsidián

Obrázek 2.2: Ukázky diamagnetických minerálů. Zdroj obrázků: Wikipedia

■ Paramagnetické látky

V paramagnetických látkách mají atomy permanentní magnetické momenty, tedy spiny elektronů a orbitální pohyby v jednotlivých atomech se skládají na nenulový smyčkový proud. Při vystavení paramagnetik magnetickému poli mají magnetické momenty jeho atomů tendenci orientovat se do směru tohoto vnějšího pole, které je tak uvnitř látky lehce zesíleno. Ve srovnání se silami způsobenými tepelným pohybem atomů uvnitř látky jsou ale síly vyrovnávající magnetické momenty do směru vnějšího pole poměrně malé.

Vyrovňávání je tedy silně rušeno a paramagnetismus je slabý jev, který se silněji projevuje při nižších teplotách, při kterých klesá tepelný pohyb atomů.

Obecně mají magnetický moment atomy, které obsahují lichý počet elektronů, např. sodík, který má ve valenční vrstvě 1 elektron. Při vzniku sloučenin se však většinou valenční elektrony vážou tak, že se jejich magnetické momenty navzájem ruší a molekuly magnetické momenty nemívají. Příkladem paramagnetických látek jsou hliník, sodík, draslík nebo platina. Níže v tabulce 2.1 jsou uvedeny další příklady paramagnetických i diamagnetických minerálů a jejich susceptibilit vztahované na jednotku hustoty ($\chi_{mass} = \chi/\rho$).

Minerály - příklady			
Diamagnetické	χ_{mass} [$10^{-8}\text{m}^3/\text{kg}$]	Paramagnetické	χ_{mass} [$10^{-8}\text{m}^3/\text{kg}$]
křemen (SiO_2)	-0,62	Pyrit (FeS_2)	30
Kalcit (CaCO_3)	-0,48	Siderit (FeCO_3)	123
Forsterit (Mg_2SiO_4)	-0,39	Ilmenit (FeTiO_3)	100-113
Ortoklas (KAlSi_3O_8)	-0,58	Olivín ($(\text{Fe,Mg})_2\text{SiO}_4$)	36

Tabulka 2.1: Příklady diamagnetických a paramagnetických minerálů a jejich měrných magnetických susceptibilit [3]

■ Feromagnetické látky

Ve feromagnetických látkách je výsledný účinek magnetických momentů výrazně silnější než u diamagnetik a paramagnetik, protože magnetické momenty atomů těchto látek mají silnou tendenci se zarovnávat rovnoběžně. Nejvýznamnější látkou s takovými vlastnostmi je železo a pak další dva prvky z triády železa - kobalt a nikl. V krystalech těchto látek samovolně vznikají miniaturní oblasti, tzv. domény, které mají určitý vektor magnetizace. Vektory magnetizací jednotlivých domén však mají náhodné směry a navzájem vyruší.

Krystaly mají také tzv. směr snadné magnetizace, ve kterém pro jejich magnetizaci stačí slabší vnější pole než v jiných směrech. Např. kus železa se však neskládá z jednoho krystalu ale z mnoha vůči sobě různě orientovaných, a také obsahuje příměsi, nečistoty a poruchy. Při postupném zesilování vnějšího magnetického pole rostou domény, které mají směr magnetizace shodný s vnějším polem, na úkor ostatních domén. Mezi doménami jsou tzv. doménové stěny, které se při změnách objemů domén dají do pohybu, při kterém se zasekávají o defekty v kusu železa a posunou se skokově až při dalším zesílení vnějšího pole. Tyto skokové posuny však způsobují energetické ztráty. Jednak tím, že způsobují rychlé změny magnetických polí, která v kusu železa vyvolávají vířivé proudy způsobující tepelné ztráty. A dále pak tím, že rychlá změna objemu domény způsobí vlivem magnetostrikce změnu rozměrů části krystalu, a tedy slabou zvukovou vlnu, která odnáší určitou

energii. Při magnetizaci např. kusu železa tedy kvůli energetickým ztrátám dochází od určité velikosti magnetického pole k nevratným změnám, což je příčinou hysterezního jevu.

Feromagnetické látky mají své vlastnosti pouze v krystalickém stavu. V kapalném i plynném skupenství se chovají jako látky paramagnetické. Feromagnetismus je tedy vlastností struktury látky a ne pouze jednotlivých atomů. Tyto látky mají také určitou teplotu, nad kterou své vlastnosti ztrácejí. Té se říká Curierova teplota a např. pro železo je okolo 770 °C, pro kobalt 1127 °C a pro nikl 358 °C.

■ Antiferomagnetické látky

V antiferomagnetických látkách se magnetické momenty atomů střídají, takže takové látky sice magnetické jsou, ale nemají vnější magnetické projevy. V externím magnetickém poli se antiparalelní uspořádání momentů poruší a látka se magnetizuje. Uspořádání lze také porušit zvýšením tepelného pohybu atomů zahřátím látky, která se pak začne chovat jako paramagnet. Susceptibilita těchto látek je srovnatelná s tou, jakou mají paramagnetika. Příkladem antiferomagnetických minerálů jsou hematit ($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$) nebo goethit (αFeOOH). Antiferomagnetickým prvkem je např. chrom.

■ Ferimagnetické látky

Ve ferimagnetických látkách je uspořádání magnetických momentů atomů podobné jako u antiferomagnetických látek. Rozdíl je v tom, že antiparalelně uspořádané momenty nejsou v rovnováze, ale převažují na jednu stranu, látce probíhá pod Curierovou teplotou spontánní magnetizace a působí navenek magneticky. Nad Curierovou teplotou se tyto látky chovají paramagneticky. Mají také mnohem větší elektrický odpor než kovové feromagnetické látky, a proto se uplatňují např. jako jádra cívek.

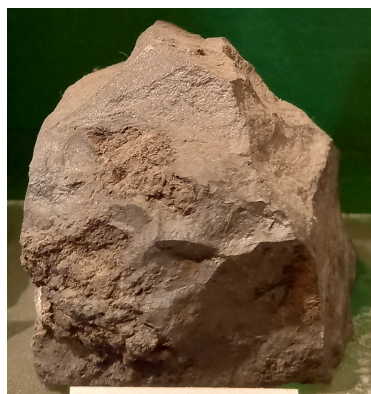
Nejvýznamnějším přírodním minerálem spadajícím do této skupiny známým již ve starověkém Řecku je magnetit (Fe_3O_4). Jeho významná naleziště jsou např. v severním Švédsku u města Kiruna nebo v ruském Magnitogorsku na Uralu. Přírozená remanence magnetitu je okolo (3,8 - 12,5) mT. Pro srovnání u magmatických hornin je typicky 125 nT - 50 μT a u sedimentů (1,3 - 125) nT [5].

Silný magnetismus vykazují i některé meteority spadlé na Zem z vesmíru, které magnetické minerály obsahují. Na obrázku 2.3 jsou fotky magnetických minerálů a meteoritů ze sbírky jednoho sběratele ze Stříteže nad Ludinou, který byl navštíven za účelem získání informací o magnetických horninách.

■ Superparamagnetické látky

Pokud horniny obsahují pouze feromagnetické nebo ferimagnetické nanočástice, je samovolné zarovnávání magnetických momentů rušeno tepelným pohybem atomů a látka se navenek neprojevuje magneticky, ale magnetické

momenty, které se uvnitř látky navzájem ruší, jsou mnohem větší, než momenty atomů, které se ruší v paramagnetických látkách. Superparamagnetické látky lze magnetovat vnějším magnetickým polem a mají oproti paramagnetickým látkám mnohem větší susceptibilitu (pro 30 nm částice magnetitu při pokojové teplotě je susceptibilita okolo 650 [3]). Superparamagnetickými látkami jsou např. ferokapaliny.



(a) : Magnetit Vlastějovice



(b) : Železoolivínový meteorit PALASIT



(c) : Železný meteorit Campo del Cielo Argentina



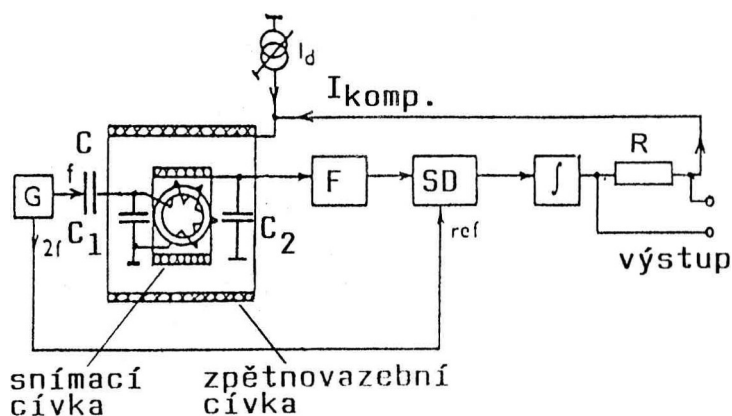
(d) : Ferochrom

Obrázek 2.3: Ukázky magnetických minerálů a meteoritů

2.3 Způsoby měření susceptibility a remanence

Fluxgate

Fluxgate je senzor, jehož hlavní části jsou feromagnetické jádro, budící a snímací cívka. Na obrázku 2.4 je schéma fluxgate sondy s toroidním jádrem zapojené ve zpětnovazební smyčce. Budící cívkou namotanou kolem jádra s vysokou μ_r protéká periodický proud $i_{exc}(t)$ o frekvenci f a velké amplitudě, čímž se vytváří excitační magnetické pole, které periodicky přesycuje jádro sondy. Tímto polem se moduluje μ_r jádra, které se saturuje 2krát za periodu i_{exc} . Bez vnějšího magnetického pole se ve snímací cívce omotané přes jádro v ideálním případě neindukuje žádné napětí. Pokud je ale takové vnější stejnosměrné pole přidáno např. vystavením snímací cívky horninovému vzorku se zbytkovou polarizací B_r , začne se do ní úměrně velikosti vnějšího



Obrázek 2.4: Fluxgate ve zpětnovazebním zapojení [1]

pole indukovat napětí u_i s frekvencí $2f$. Toto napětí je dáno základním vztahem pro fluxgate sondu

$$u_i(t) = -NS(K\mu_0 \frac{d\mu_r(t)}{dt} H), \quad (2.16)$$

kde N , S , H a K jsou:

N počet závitů snímací cívky,

S střední plocha cívky (m^2),

H intenzita měřeného pole (A/m),

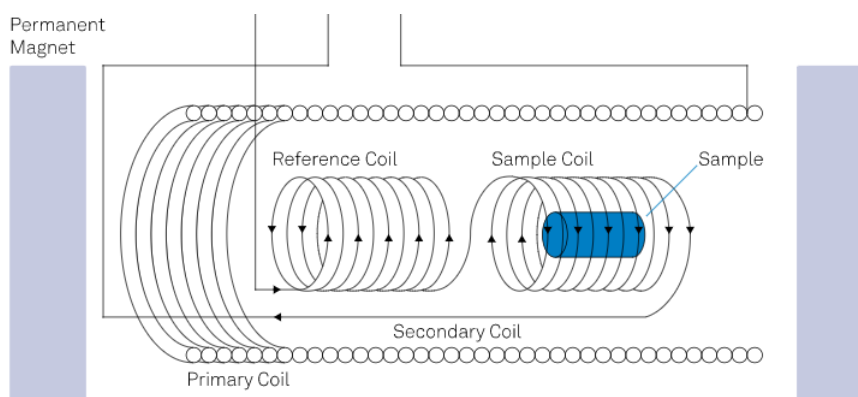
K konstanta zohledňující tvar a μ_r jádra, $K = \frac{1 - D}{[1 + D(\mu_r - 1)]^2}$

Konstantě $D \in \langle 0; 1 \rangle$ se říká demagnetizační činitel. Podle tvaru jádra v něm totiž dochází k částečné demagnetizaci, která působí proti měřenému vnějšímu poli a zeslabuje tak indukované napětí ve snímací cívce.

Zpětná vazba na obrázku 2.4 je realizována přidáním další cívky. Výstupem této sondy je potom napětí na odporu R úměrné proudu zpětnovazební cívkou, který je potřebný ke kompenzaci vnějšího magnetického pole. Kondenzátor C ve schématu slouží k filtraci případné stejnosměrné složky proudu i_{exc} , která by způsobila posun nuly sondy. Kondenzátorem C_1 lze s indukčností budicí cívky vytvořit rezonanční obvod naladěný na f proudu i_{exc} , tím zvýšit jeho špičky při stejné efektivní hodnotě, a dosáhnout tak hlubší saturace jádra. Paralelním kondenzátorem C_2 lze naladit snímací cívku (s indukčností L_P) na frekvenci u_i ($f_0 = 1/(2\pi\sqrt{L_P C_2}) = f_{u_i} = 2f$).

■ Rozdílové indukční metody

Tyto metody využívají kromě snímací cívky navíc ještě cívku referenční a výstupem je potom rozdíl napětí indukovaných v těchto dvou cívkách. Ukázka možného provedení je na obrázku 2.5, kde je zobrazeno schéma senzoru pro měření susceptivity od firmy Zurich Instruments AG. Permanentní magnety



Obrázek 2.5: Schéma senzoru pro měření susceptibility od firmy Zurich Instruments AG [7]

vytvářejí statické magnetické pole, jehož jednosměrnými změnami mezi dvěma hraničními hodnotami (ang. sweeping) senzor měří magnetizační charakteristiky (závislost $M(H)$). Cívky jsou připojeny k Lock-In zesilovači, kterým se do primární cívky posílá střídavý proud pro vytvoření proměnného magnetického pole, který zároveň slouží jako reference. Snímací cívka je namotána v opačném směru než cívka referenční, aby se v nich indukovaná napětí bez přítomnosti vzorku odečetla. Pokud je dovnitř snímací cívky umístěn vzorek, vytváří v něm střídavé magnetické pole proměnlivý magnetický moment úměrný susceptibilitě vzorku, čímž se poruší rovnováha mezi napětími indukovanými v referenční a snímací cívce. Lock-In zesilovač firma využívá proto, že s ním lze dosáhnout velmi dobrého SNR (poměr signál/šumu) [7].

■ Další metody

Pro měření slabých magnetických susceptibilit lze použít také SQUID (*Superconducting Quantum Interference Device*). Tento senzor umožňuje vůbec nejpreciznější měření magnetického pole na úrovni kvant magnetického toku ($\Phi_0 = h/(2e) = 2,067 \cdot 10^{-15}$ Wb). Lze tedy dosáhnout rozlišení až 10^{-14} T. Senzor využívá supravodivého kroužku typicky se dvěma Josephsonovými spoji, kterými do něj v přítomnosti vnějšího pole pronikají kvanta magnetického toku. Tím v kroužku dochází ke skokovým změnám o velikosti Φ_0 , čímž se indukuje napětí v měřicím vinutí okolo kroužku, které se dále vyhodnocuje. Senzor je však potřeba udržovat na značně nízké teplotě (např. na teplotě kapalného dusíku 77 K nebo i nižší podle materiálu kroužku), proto je provoz takového senzoru mírně náročnější a dražší.

Jinou možností určení susceptibility je využít silové účinky magnetického pole na vzorek jako např. u Faradayových vah. Při této metodě je zkoumaný vzorek vložen do nehomogenního magnetického pole s gradientem např. ve směru osy x . Sílu, která na něj působí, lze pak vyjádřit jako

$$F = \mu_0 \chi_m H \frac{dH}{dx} V,$$

kde χ_m je susceptibilita vzorku, H intenzita gradientního pole a V objem vzorku. Předpokládá se přitom, že susceptibilita i intenzita jsou uvnitř celého objemu vzorku konstantní.

2.4 Současná měřicí technika

KM-7

Jedná se o kapesní přístroj od brněnské firmy SatisGeo s.r.o. Je určený pro měření susceptibility vrtných jader i hornin v terénu. Přístroj má kvůli svému účelu pro terénní nasazení robustní konstrukci a je vodě a prachu odolný. Ilustrační foto přístroje je na obrázku 2.6.

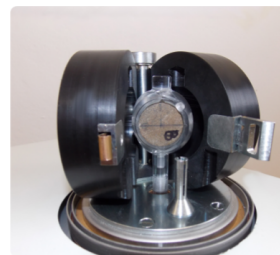
Základní částí KM-7 je LC oscilátor s měřicí cívkou v měřicí hlavě přístroje. Pracovní frekvence oscilátoru je 10 kHz. Při měření susceptibility se změří frekvence oscilátoru na vzduchu v určité vzdálenosti od vzorku a následně u vzorku. Z rozdílu těchto frekvencí je určena susceptibilita vzorku. Pro potlačení teplotní závislosti oscilátoru se provádí ještě třetí měření znovu na vzduchu. Z dvojího měření na vzduchu a znalosti časů mezi jednotlivými měřeními je zjištěn teplotní chod oscilátoru, což je použito pro teplotní kompenzaci, čímž je zvýšeno rozlišení, které je u KM-7 10^{-6} SI jednotek. Rozsah měření je $\pm 999 \cdot 10^{-3}$ SI jednotek. Přístroj je kalibrován pro ideální případ měření na hladkém povrchu tělesa s homogenními a izotropními vlastnostmi a měřená hodnota susceptibility je tak závislá na velikosti a tvaru měřeného objektu. Proto je KM-7 vybaven distančním pinem, čímž dává v režimu PIN na hrubších površích věrohodnější výsledky.

Dalšími režimy přístroje jsou CORE a REMOTE SCAN, které jsou uzpůsobeny pro měření na vrtných jádrech, přičemž je potřeba, aby na povrchu jádra nebyly kovové zbytky z vrtáku a přístroj tak neměřil falešně. V režimu CORE se zadává průměr jádra, režim REMOTE SCAN lze využít pro měření profilu vrtných jader. Pro orientační rozložení susceptibility je určen režim SCAN. Rozdíl v REMOTE SCAN a SCAN je pouze v možnosti přenosu naměřených dat do počítače a jejich uložení.

KM-7 umí také komunikovat s externími zařízeními pomocí Bluetooth, takže ho lze připojit např. k GPS přijímači a ukládat pak kromě naměřených hodnot i přesnou polohu místa měření, což lze využít při následné analýze dat. Firma k přístroji dodává také program KMdata, který slouží k přenosu dat a jejich rychlému grafickému zobrazení, uložení, třídění nebo exportu do textového souboru.



Obrázek 2.6: KM-7 - senzor magnetické susceptibility [8]



Obrázek 2.7: JR-6 - senzor remanentní polarizace [9]

JR-6

Přístroj JR-6 (obrázek 2.7) od firmy AGICO, s.r.o. slouží k měření remanentní polarizace horninových vzorků. Mezi přístroji založenými na klasických (ne kryogenních) principech se jedná o necitlivější a nejpřesnější přístroj na světě [9]. Lze s ním měřit i velmi slabě magnetické vzorky sedimentárních hornin jako je např. vápenec.

Přístroj se skládá z integrované sběrné jednotky, měřící jednotky a zdroje napájení. Princip měření spočívá v tom, že zkoumaný vzorek ve sběrné jednotce rotuje s konstantní úhlovou rychlostí uvnitř páru Helmholtzových cívek. Na cívkách se tak indukují proměnné napětí, jehož amplituda a fáze závisí na velikosti a směru vektoru remanence vzorku. Podle požadované přesnosti lze vzorek změřit ve dvou, čtyřech nebo šesti různých pozicích. Polohování vzorku je v základní verzi přístroje manuální, ale firma nabízí i verzi JR-6A, která pro kompletní určení remanence polohuje vzorek automaticky.

Vzorky, na kterých se provádí měření by měly být buď tvaru válce o průměru 25,4 mm a výšce 22 mm, nebo kostky o rozměrech 20 × 20 × 20 mm, příp. 23,5 × 23,5 × 23,5 mm v manuálním módu. Měřící cívky jsou kryty trojitou vrstvou z permalloye pro odstínění nízkofrekvenčních magnetických polí. Citlivost JR-6 je $2,4 \cdot 10^{-6}$ A/m při vyšší ze dvou provozních rychlostí, která je 87,7 rps. Nižší úhlová rychlost 16,7 rps se používá pro křehčí horniny. Měřící rozsah je do 12500 A/m. Váha sběrné jednotky je 24 kg, napájecího zdroje 2,5 kg, jedná se tedy spíše o laboratorní zařízení.

KLY5

Přístroj KLY5 byl také vyvinut firmou AGICO, s.r.o a slouží k měření magnetické susceptibility a její anizotropie. V principu jde o velmi přesný induktivní můstek s automatickým nastavením rozsahu, kompenzací teplotního driftu a dalšími funkcemi. Přístroj je podobně jako JR-6 laboratorního charakteru a má manuální (KLY5-B) a vylepšenou (KLY5-A) variantu, která umožňuje automaticky určit anizotropii magnetické susceptibility (AMS) zkoumaného vzorku. Pomocí volitelného příslušenství CS4 a CS-L lze také měřit závislost susceptibility na teplotě od -192 °C do 700 °C.

KLY5 dokáže kromě “in-phase” susceptibility měřit i “out-of-phase” susceptibilitu, která se projevuje, pokud je při měření použito proměnné magnetické

pole. Při vyšších frekvencích aplikovaného pole se magnetizování vzorku může vůči tomuto poli opožďovat (např. kvůli viskózní relaxaci (uvolnění napětí tečením) nebo vyvolanými vířivými proudy ve vodivých vzorcích). Z měření potom vystupuje jak velikost susceptibility χ , tak i její relativní fázový posun φ vůči aplikovanému poli. Lze tedy uvažovat reálnou $\chi' = \chi \cos \phi$ (“in-phase”) a imaginární $\chi'' = \chi \sin \phi$ (“out-of-phase”) složku susceptibility. Pro χ a φ pak lze psát vztahy

$$\chi = \sqrt{\chi'^2 + \chi''^2},$$

$$\varphi = \arctan(\chi''/\chi'). [11]$$

Pracovní frekvence přístroje je 1220 Hz, intenzita pole 5-750 A/m (pík) a měřící rozsah do 0,5 (SI) při 750 A/m a do 1 (SI) při 400 A/m. Citlivost je $2 \cdot 10^{-8}$ SI jednotek, v určení fáze 0,1°. Vhodné rozměry vzorků jsou podobné jako u JR-6.

■ MPP

MPP je příruční sonda od kanadské firmy Instrumentation GDD Inc. pro měření magnetické susceptibility a elektrické vodivosti horninových vzorků, vrtných jader, pro geofyzikální průzkum apod. Měřící rozsah sondy je pro χ_m $0,01 \cdot 10^{-3}$ až $> 6 \cdot 10^{-3}$ (SI) a pro el. vodivost 0,1 S/m - 40 MS/m. Rychlost vzorkování je 10 vzorků/s. Verzi MPP3wifi sondy lze přes wifi propojit s osobním mobilem a na něm průběžně zobrazovat data, která se ukládají do sondy ve formátu ASCII pro případnou další analýzu. Sonda je robustní a odolná vůči vlivům špatného počasí. Ilustrační foto sondy je na obrázku 2.8.

■ KT-10 v2

Jeden z přístrojů z řady KT-10 od kanadské firmy Terraplus Inc. pro měření magnetické susceptibility nebo el. vodivosti, příp. obojího, přičemž KT-10 v2 měří pouze susceptibilitu. Rozsah měření je $(0,0001 - 1999,99) \cdot 10^{-3}$ (SI) a citlivost 10^{-7} (SI). Jedná se o mobilní přístroj s váhou 0,33 Kg. Podobně jako KM-7 má k dispozici také pin mód pro měření na hrubých površích a módy pro diskrétní a kontinuální měření (20 vzorků/s). Kruhová měřicí cívka má průměr 65 mm a pracovní frekvence je 10 kHz. Také ho lze přes Bluetooth spárovat s GPS jednotkou a ukládat pak k naměřeným datům i polohy. K přístroji je k dispozici také Android aplikace a GeoView Software pro zobrazení a uložení dat na PC a jejich export do MS Excel. Kuriózní funkcionalitou KT-10 v2 je možnost pořizování hlasových záznamů pomocí zabudovaného mikrofону. Foto přístroje je na obrázku 2.9.



Obrázek 2.8: MPP - sonda pro měření magnetické susceptibility a elektrické vodivosti [12]



Obrázek 2.9: KT-10 v2 - senzor magnetické susceptibility [13]

■ Porovnání parametrů susceptimetrů

	KM-7	KLY5	MPP	KT-10 v2
citlivost [SI]	10^{-6}	$2 \cdot 10^{-8}$	10^{-5}	10^{-6}
rozsah [SI]	$\pm 999 \cdot 10^{-3}$	do 1	$(0,01 - 6) \cdot 10^{-3}$	10^{-6} až 1,99999
pracovní frekvence [kHz]	10	1,22	-	10
váha [kg]	0,25	-	0,4	0,33
teplotní rozsah [°C]	-20 až 60	-	-	-20 až 60
rozhraní	USB 2.0, Bluetooth	USB	RS-232, Bluetooth, Wifi	USB, Bluetooth
napájení	2 AAA baterie	100 - 240 V, 50/60Hz	3 AA baterie nebo dodaná Li-Ion baterie	2 AA baterie
výdrž	-	-	do 20h	až 2000 měření

Tabulka 2.2: Porovnání parametrů senzorů pro měření magnetické susceptibility. Znakem '-' jsou vyplněny buňky, kde informace nebyly k dispozici, příp. u KLY5 nejsou kvůli umístění přístroje v laboratoři významné.

Kapitola 3

Simulace senzorů

Pro simulaci senzorů byla zvolena metoda konečných prvků, protože jsme chtěli zjistit rozložení magnetického pole v jejich jádrech, měřených vzorcích i okolním vzduchu, abychom mohli před výrobou senzorů optimalizovat jejich návrh pro vytváření magnetických polí podle našich potřeb. V této kapitole je stručně vysvětlen princip použité metody, dále postup simulace v programu Flux 12 a na konci jsou uvedeny získané výsledky.

3.1 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (MKP, anglicky *FEM - Finite Element Method*), je metoda používaná k numerické simulaci fyzikálních systémů. Často se využívá ve strojírenství a stavebnictví např. pro výpočty průběhů napětí a deformací pro zjištění odolnosti vůči namáhání. Dále se využívá při analýze vedení tepla, jeho ztrát, proudění kapalin a při simulaci elektromagnetických jevů, čehož je využito v této práci.

3.1.1 Princip MKP

MKP je poměrně komplikovaná metoda, a proto je zde její princip vysvětlen pouze stručně, ale pro inženýrskou praxi snad dostatečně.

Fyzikální systémy jsou často popisovány diferenciálními rovnicemi s okrajovými podmínkami. Pro jednoduchost vezměme za příklad jednorozměrnou okrajovou úlohu

$$-u''(x) = f(x), \quad x \in (0, 1), \quad (3.1)$$

s okrajovými podmínkami $u(0) = 0$, $u(1) = 0$. Rovnice 3.1 může popisovat např. ohyb nosníku reprezentovaného intervalem $[0, 1]$, na který působí kolmo síly f . Při použití principu malých posunutí a za předpokladu lineární pružnosti platí

$$\begin{aligned} \sigma &= Eu' \text{ (Hookův zákon)} \\ -\sigma' &= f \text{ (podmínka rovnováhy sil)} \\ u(0) &= u(1) = 0 \text{ (okrajové podmínky/uchycení)} \end{aligned}$$

kde E je elastický modul, u posunutí, σ napětí a f intenzita sil. [14]

Pro potřeby MKP úlohu 3.1 formulujeme v tzv. *slabém smyslu* a dostaneme Galerkinův problém, ve kterém hledáme funkci $u \in V$ takovou, že

$$(u', v') = (f, v) \quad \text{pro všechna } v \in V. \quad (3.2)$$

Prostor $V = H_0^1(\Omega)$ je prostor funkcí z $H^1(\Omega)$, které jsou nulové na hranici Ω . Zde $\Omega = [0, 1]$. (H^1 je Hilbertův prostor (úplný vektorový se skalárním součinem)). Symbol

$$(v, w) = \int_0^1 v(x)w(x)dx$$

značí skalární součin v prostoru $L^2(\Omega)$ (prostory $L^p(\Omega)$ jsou Banachovy prostory V (vektorové, normované, úplné) s normou definovanou pomocí Lebesgueovy míry a integrálu [14]).

Dále budeme hledat aproximaci slabého řešení rovnice 3.1 v prostoru $V_h \subset V = H_0^1(\Omega)$ s konečnou dimenzí $\dim V_h = N_h < \infty$. To vede na diskretní Galerkinův problém, ve kterém hledáme funkci $u_h \in V_h$ tak, aby pro libovolnou funkci $v_h \in V_h$ platilo

$$(u_h', v_h') = (f, v_h). \quad (3.3)$$

Pokud budeme v prostoru $V_h \subset V$ uvažovat bázi $\varphi_1, \dots, \varphi_{N_h}$, můžeme potom libovolný prvek $v \in V_h$, včetně hledaného řešení u_h , vyjádřit jako lineární kombinaci bázevých funkcí,

$$v = \sum_{i=1}^{N_h} \alpha_i \varphi_i, \quad \alpha_i \in \mathbb{R}.$$

Metodu konečných prvků pak dostaneme tak, že prostor V_h nevezmeme libovolný, ale zvolíme ho jako prostor po částech polynomiálních funkcí sestavených ke zvolenému dělení oblasti $\Omega = [0, 1]$:

$$0 = x_0 < x_1 < \dots < x_M < x_{M+1} = 1,$$

přičemž nejjednodušší je uvažovat po částech lineární funkce.

■ Obecná formulace

Obecná formulace Galerkinova problému pracuje s Banachovým prostorem V , na kterém uvažuje symetrickou bilineární V -eliptickou spojitou formu \mathbf{a} ($\mathbf{a} : V \times V \mapsto \mathbb{R}$ splňující jisté podmínky, více v [14], str. 10) a lineární spojitou formu L ($L : V \mapsto \mathbb{R}$ splňující jisté podmínky, více v [14], str. 9).

Slabá formulace původní okrajové úlohy je pak vyjádřena právě pomocí forem \mathbf{a} a L , což umožňuje kroky zmíněné dále. V Galerkinově problému pak hledáme $u \in V$ takové, že

$$\mathbf{a}(u, v) = L(v) \quad \text{pro všechna } v \in V. \quad (3.4)$$

V diskretní verzi problému 3.4 pak analogicky k problému 3.3 hledáme aproximaci slabého řešení pouze v konečném prostoru $V_h \subset V$. Diskretní

Galerkinova formulace pak říká, že $u_h \in V_h$ řeší diskrétní Galerkinův problém, pokud

$$\mathbf{a}(u_h, v_h) = L(v_h) \quad \text{pro všechna } v_h \in V_h. \quad (3.5)$$

Ve formulaci 3.5 lze bez újmy na obecnosti požadovat splnění podmínky pouze pro všechny báze funkce φ_i . Řešení diskrétního Galerkinova problému 3.5 potom bude mít tvar

$$u_h = \sum_{i=1}^{N_h} \alpha_i \varphi_i. \quad (3.6)$$

Dosazením 3.6 do 3.5 dostaneme díky linearitě formy \mathbf{a} soustavu lineárních rovnic pro neznámé α_j , $j = 1, \dots, N_h$, kterou můžeme napsat ve tvaru

$$\mathbb{A} \boldsymbol{\alpha} = \mathbf{b}, \quad (3.7)$$

kde

$$\mathbb{A} = \left(\mathbf{a}(\varphi_i, \varphi_j) \right)_{i,j=1}^{N_h}, \quad \mathbf{b} = \left(L(\varphi_j) \right)_{j=1}^{N_h}, \quad \boldsymbol{\alpha} = \left(\alpha_j \right)_{j=1}^{N_h}.$$

Díky symetrii formy \mathbf{a} je matice \mathbb{A} symetrická a pozitivně definitní, tedy i regulární, což znamená, že existuje právě jedno řešení odpovídající soustavy lineárních rovnic pro libovolnou pravou stranu. Vypočtením soustavy 3.7 tak dostaneme aproximaci řešení Galerkinova problému u , které řeší slabou formulaci diferenciálních rovnic popisujících simulovaný fyzikální systém.

■ Diskretizace oblasti

V MKP se využívá tzv. triangulace výpočtové oblasti Ω , která je ve 2D případě rozdělena na trojúhelníky a ve 3D případě na čtyřstěny. Na dané triangulaci se zvolí prostor konečných prvků H_h jako prostor po částech lineárních funkcí, které jsou jednoznačně určeny hodnotami ve vrcholech trojúhelníků, resp. čtyřstěně a tedy $\dim H_h = N_P$ (počet vrcholů triangulace). Prostor $V_h \subset V$ se pak zvolí jako $V_h = H_h \cap V$.

Volba prostorů H_h a $V_h \subset H_h$ a jejich bází ovlivňuje náročnost implementace a výpočtu. Při jejich výběru se proto zohledňuje např. volba báze prostoru V_h tak, aby její prvky měly malý nosič (definiční obor, na kterém jsou nenulové) kvůli usnadnění výpočtu prvků matice soustavy a její řídké struktury.

■ 3.2 Simulace v programu Flux 12

Analýzu vlastností navrhovaných systémů metodou konečných prvků lze provést v různých specializovaných programech jako např. v Ansysu a dokonce i v Matlabu s pomocí Partial Differential Equation Toolbox.

Pro simulaci senzorů byl použit program Flux 12 od francouzské firmy CEDRAT kvůli své specializaci na elektromagnetickou (a tepelnou) doménu, a také protože na katedře měření, kde byla tato práce vypracována, s ním mají velké zkušenosti a mohli mi v případě potíží poradit. Dále je popsán obecný postup simulace v tomto programu.

3.2.1 Obecný postup simulace

Hlavní kroky při simulaci systémů ve Flux 12 jsou následující:

1. Návrh geometrie
 - a. Tvorba symetrií (např. podle YZ plochy)
 - b. Tvorba geometrických nástrojů pro zjednodušení konstrukce
 - geometrické parametry (délky, tloušťky, poloměry...)
 - souřadnicové systémy (s počátky definovanými vůči původnímu systému nebo i vůči sobě navzájem)
 - transformace (např. posunutí o vektor, zrcadlení přes plochu)
 - c. Tvorba bodů a linek (využití symetrie, propagace, extruze)
 - d. Tvorba povrchů a objemů určených linkami (využití symetrie, propagace extruze)
 - e. Tvorba *Infinite Box* okolo objektu - ohraničení výpočtové oblasti, mimo ni program počítá, že jdou hodnoty k nule (př. magnetického pole)

2. Diskretizace modelu
 - a. Tvorba pomocné sítě (triangulace, anglicky *mesh*) s výchozím nastavením
 - b. Optimalizace pomocné sítě - úprava její hustoty v jednotlivých podoblastech nástroji *meshpoints*, *meshlines*, *deviation*,...
 - c. Opětovná diskretizace s použitím přidaných lokálních nastavení a vygenerování sítě s prvky 2. řádu (*2nd order mesh elements*) (obecně doporučováno, oproti generování sítě s prvky 1. řádu jsou funkce prokládající uzly v síti polynomy 2. řádu, což zvýší výpočetní náročnost, ale i počet uzlů v síti, která je tak jemnější, takže získáme přesnější simulaci)

3. Popis fyzikálních vlastností
 - a. Nastavení aplikace (v diplomové práci *Magneto Static 3D* a *Steady State AC Magnetic*)
 - b. Definice materiálů (jejich vlastností)
 - c. Tvorba a přiřazení objemových oblastí
 - d. Tvorba zdrojů (např. excitační cívky, snímacích cívek)
 - e. Definování elektrického obvodu

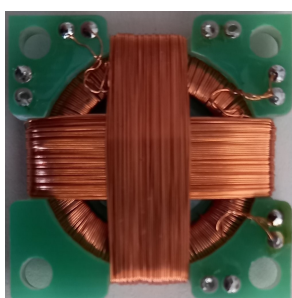
4. Výpočet
 - statická situace, scénář se sadou fyzikálních veličin/prostorových parametrů,...

5. Zpracování výsledků
 - zobrazení hustoty magnetického toku, proudové hustoty, ..., na povrchu, v řezu,...

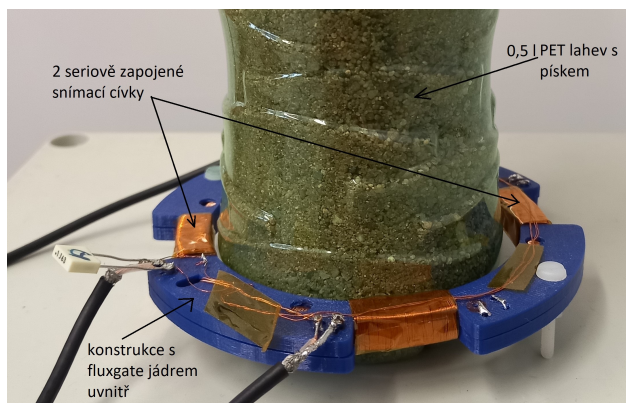
3.3 Výsledky simulací

3.3.1 Fluxgate

U senzoru pracujícím na principu fluxgate magnetometru bylo hlavním cílem simulace ověřit jeho funkčnost i přes netypickou konstrukci, která musela být upravena pro potřeby měření na vrtných jádrech. Běžné fluxgate magnetometry mají snímací cívky navinuté přes střed kruhového jádra (obrázek 3.1), ale my jsme uvnitř potřebovali místo pro vrtné jádro, abychom v něm mohli měřit remanenci, ideálně podle požadavku po co nejtenčích vrstvách. V simulaci byl proto pozorován především vliv horninového vzorku umístěného uprostřed jádra fluxgate na magnetickou indukci v tomto jádře. Chtěli jsme tak ověřit, že na cívky, které bychom zapojené v sérii umístili na protilehlých stranách jádra fluxgate, by mělo případné magnetické pole vzorku nějaký efekt. Na obrázku 3.2) je pro ilustraci zachyceno umístění provizorního vzorku vůči jádru v námi vyrobeném fluxgate s modifikovanou konstrukcí.



Obrázek 3.1: Ukázka typického uspořádání cívek fluxgate. Skutečné rozměry cca $2,7 \times 2,7$ cm



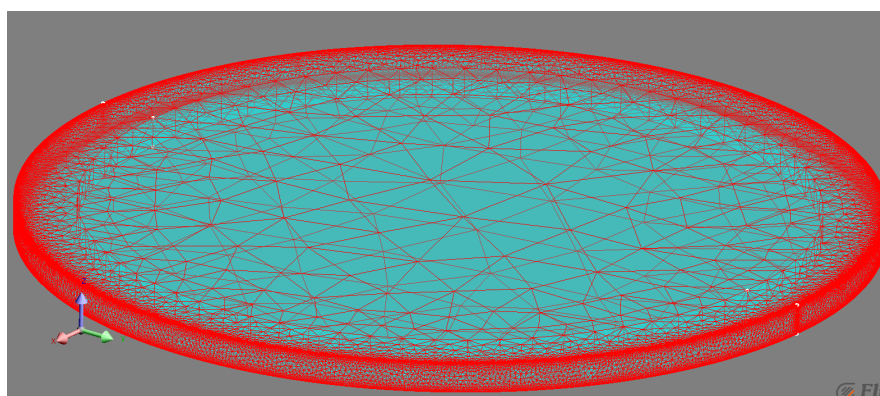
Obrázek 3.2: Vzájemná poloha provizorního vzorku a fluxgate vyvinutého v rámci diplomové práce

Rozměry modelu, který byl sestaven v simulačním prostředí, jsou uvedeny v tabulce 3.1. Tloušťka jádra je $80 \mu\text{m}$, což odpovídá 4 závitům $20 \mu\text{m}$ pásky z dále popsaného materiálu, kterou jsme jako jádro použili. K diskretizaci

	vzorek	jádro	<i>infinite box</i>
poloměr (vnitřní/vnější) [mm]	30	35	60/70
výška (vnitřní/vnější) [mm]	2,5	2,5	30/50

Tabulka 3.1: Rozměry modelu v milimetrech

modelu stačilo v tomto případě výchozí nastavení, které vhodně zjemnilo síť v objemu jádra. Po diskretizaci byla síť pouze upravena tak, aby se skládala z prvků 2. řádu. Výsledek je na obrázku 3.3.



Obrázek 3.3: Diskretizovaný model fluxgate senzoru s jemnější sítí v objemu jádra. Pro přehlednost bylo okolo senzoru vypnuto zobrazení infinite boxu.

■ Materiály

Materiál vzorku byl v simulaci definován jako lineární magnet s vektorem \mathbf{B}_r o velikosti $100 \mu\text{T}$ a směrem shodným s osou y . Relativní permeability v osách x a z byly nastaveny na 1 a v ose y na 1,15.

Jako jádro jsme zamýšleli použít kovovou pásku o šířce 2,5 mm a tloušťce $20 \mu\text{m}$ z amorfni magnetické slitiny na bázi kobaltu označené jako 2714A od firmy Metglas, Inc. Tento materiál má řadu příznivých vlastností jako velmi nízkou magnetostrikci, vysokou permeabilitu, odolnost vůči korozi nebo možnost žíhání pro zvýšení permeability. V tabulce 3.2 jsou uvedeny některé konkrétní parametry materiálu pásky.

hustota [kg/m^3]	7590
saturační indukce [T]	0,57
maximální μ_r dosažitelná žíháním [-]	1 000 000
μ_r při dodání [-]	> 80 000
saturační magnetostrikce [ppm]	< 0,5
elektrická rezistivita [$\mu\Omega.\text{cm}$]	142
Curieho teplota [$^\circ\text{C}$]	225

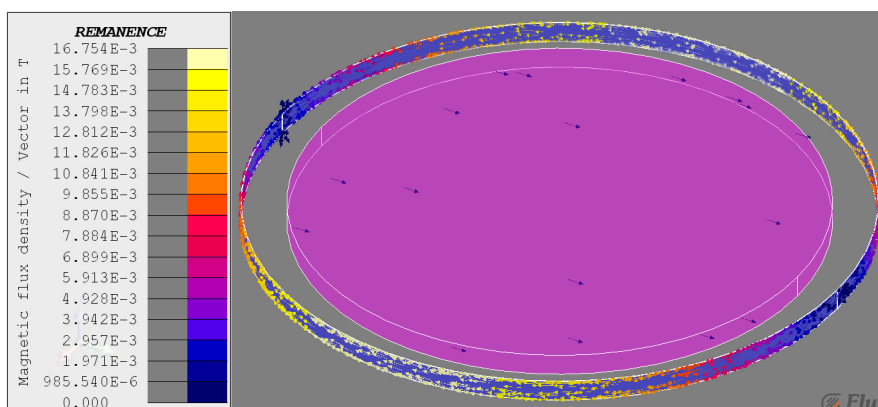
Tabulka 3.2: Vybrané parametry materiálu pásky použité jako jádro fluxgate magnetometru

V simulaci bylo jádro definováno jako izotropický materiál s počáteční $\mu_r = 80\,000$ a saturací 0,57 T. Zbylé objemy byly nastaveny na typ "vzduch nebo vakuum".

■ Výsledky

Po vypočtení modelu s použitím *Magneto Static 3D* aplikace byly vykresleny vektory magnetické indukce v jádře a vzorku. Výsledek je na obrázku 3.4.

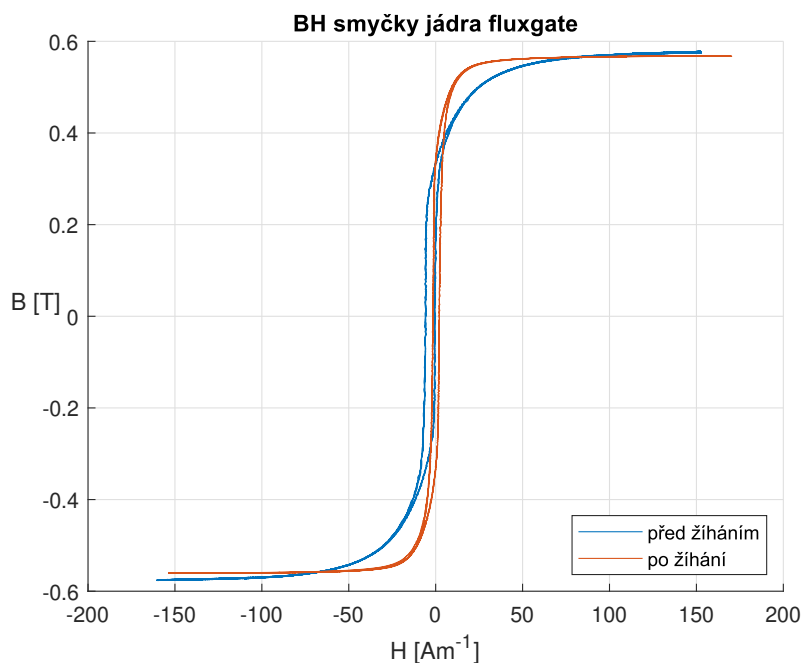
Ze simulace je vidět, že rozdíly v magnetické indukci v jádře v navzájem kolmých směrech jsou až kolem 16 mT. Simulace tedy ověřila, že vzorek se



Obrázek 3.4: Hustota magnetického indukčního toku jádrem při počáteční relativní permeabilitě 80 000

zbytkovou polarizací umístěný uvnitř jádra bude mít dostatečný vliv na hustotu siločar v jádře tak, aby bylo možné tento rozdíl měřit snímacími cívkami navinutými v sérii na protilehlých stranách jádra. Indukce v jednotlivých částech jádra bude záviset na vektoru remanence vzorku a největší (cca 16,7 mT) bude ve směru kolmém k vektoru remanence vzorku.

Po dodání byla páska na jádro fluxgate ještě žíhána při teplotě cca 400 °C v kolmém magnetickém poli, které vytvářelo magnetické jho, pro zvýšení její permeability a zlepšení vlastností BH smyčky. Na obrázku 3.5 je porovnání smyček před a po žíhání materiálu. Z té po žíhání byla určena permeabilita

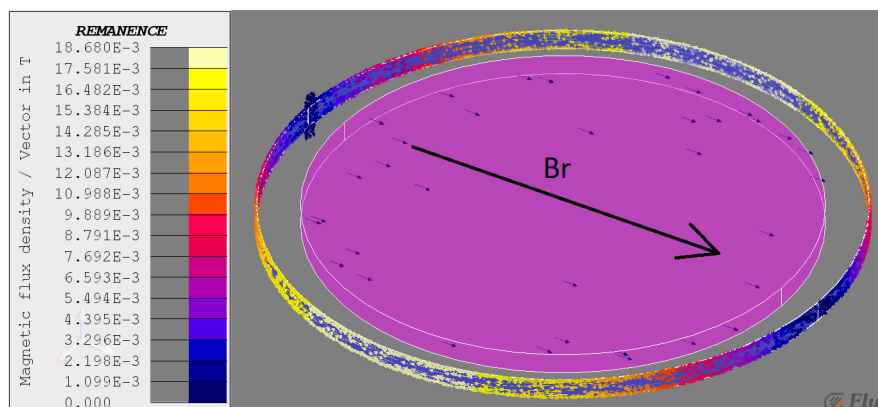


Obrázek 3.5: BH smyčky materiálu pro jádro fluxgate před a po žíhání magnetickým jhem

jádra pomocí vztahu 2.8, ze kterého byla vyjádřena jako

$$\mu_r = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta B}{\Delta H}.$$

Za ΔB a ΔH byly dosazeny rozdíly souřadnic bodů [1, 953; -0, 100] a [2, 393; 0, 101], které se nacházejí v části, kde má BH smyčka lineární průběh. Takto určená permeabilita vyšla jako $\mu_r = 363\,520$ a byla použita pro zpětnou přesnější simulaci fluxgate. Výsledek je na obrázku 3.6 Rozdíl oproti



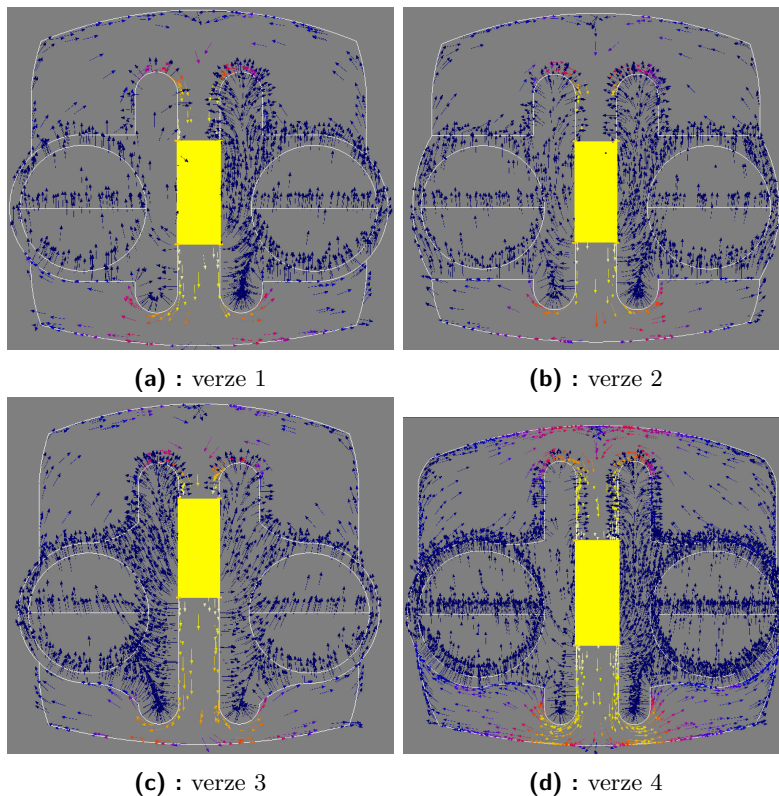
Obrázek 3.6: Výsledek simulace s relativní permeabilitou 363 520 zjištěnou z BH smyčky naměřené po žíhání materiálu jádra. Černou šipkou zvýrazněn směr remanence vzorku.

simulaci s předchozí relativní permeabilitou není nijak výrazný a ani charakter simulace se nezměnil. Vyšší relativní permeabilita jádra má za následek zvýšení maximální indukce uvnitř jádra na 18,68 mT při použití vzorku o stejné remanenci, takže senzor by měl být citlivější.

3.3.2 Susceptimetr

U simulace susceptimetru bylo důležité najít ideálně takový tvar jádra, který by zajistil, že siločáry magnetického pole budou procházet se stejnou hustotou přes celý objem vzorku, a vyhoví tak potřebám doc. Kletetschky. Na obrázku 3.7 jsou ukázky tvarů, které byly vyzkoušeny, než se došlo k tomu konečnému na obrázku 3.7d Jeho rozměry jsou velmi podobné těm, které jsou v nákresu B.2 později vyrobeného krytu pro toto finální vyříznuté jádro. Průměr vzorků v simulaci byl 60 mm. Na obrázku 3.11 jsou průběhy indukce přes střed vzorku odpovídající zmíněným tvarům jader. Snaha byla, aby byly průběhy přes vzorek i vzduchovou mezeru co nejvíce vodorovné.

Diskretizace probíhala kvůli nepoměru rozměrů (výška a šířka vs. tloušťka) modelu pomaleji. Tloušťka plechu na jádro byla 0,1 mm, ale kvůli realizovatelnosti i délce diskretizačního a později i výpočetního procesu byla používána tloušťka modelu 0,5 mm. Síť byla pomocí nástroje *mesh line* zahuštěna ve středu vzorku a pro porovnání také symetricky na druhé straně ve vzduchové mezeře. V ostatních částech modelu bylo pro tvorbu *mesh* použito výchozí nastavení.



Obrázek 3.7: Tvarování jádra susceptimetru pro dosažení co nejrovnoměrnějšího rozložení magnetických siločar přes celý řez vzorku. Žlutě umístění excitační cívky.

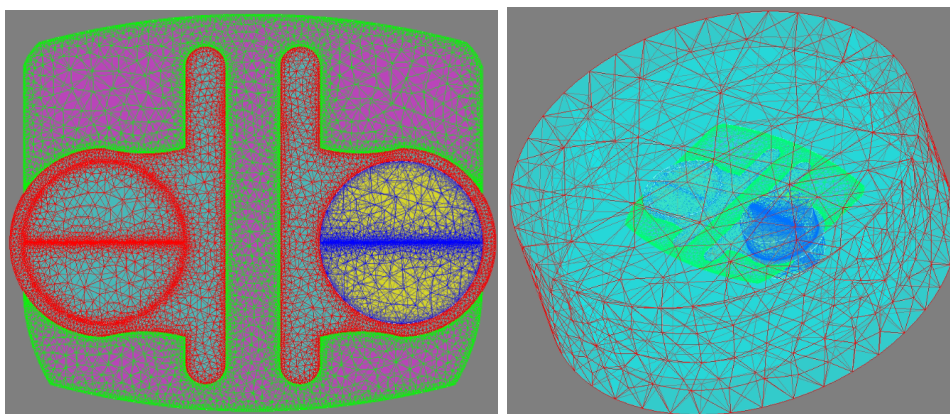
Při nastavení fyzikálních vlastností modelu se použila stejná aplikace jako u fluxgate, tedy *Magneto Static 3D*. Materiál vzorku byl v simulaci definován jako lineární izotropní se saturací 1,5 T s počáteční $\mu_r = 2$ a jako elektricky nevodivý. Indukční cívce byly definovány rozměry a umístění, počet závitů 330 a proud 1 A. Jádro bylo nastaveno jako magnetický materiál se saturací 0,74 T a počáteční $\mu_r = 250\,000$. Tomu měl odpovídat materiál ULTRAPERM 80, později použitý pro jádro senzoru a objednaný u firmy Sekels GmbH. Materiál je složen přibližně z 80% Ni, 4,6% Mo, 14% Fe a z malých množství Mn, Si a Cu [19].

Z výsledků pro finální tvar jádra vyšlo, že průběh indukce středem vzorku nabývá mezních hodnot $447\ \mu\text{T}$ a $486\ \mu\text{T}$, největší rozdíl indukce by tedy byl $39\ \mu\text{T} \doteq 8\%$ z její maximální hodnoty. Indukce v referenční vzduchové mezeře se pohybovala okolo $230\ \mu\text{T}$. Mezi oběma stranami senzoru byl tedy podle simulace rozdíl indukcí přibližně $235\ \mu\text{T}$.

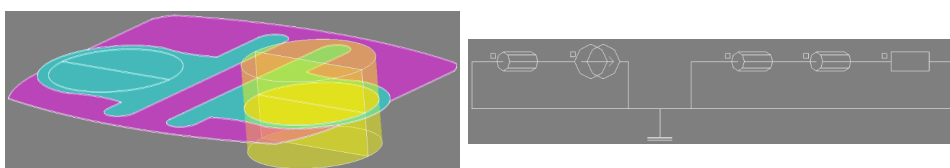
Později, již po vyříznutí jádra, bylo zamýšleno provést také simulaci ve *Steady State AC Magnetic* aplikaci, která umožňovala lépe popsat senzor včetně jeho jednoduchého elektrického obvodu. V této simulaci jsme chtěli zjistit, jaké napětí by se indukovalo na koncích sériově zapojených snímacích cívek, jak by se měnilo pro vyšší μ_r vzorku, a také jak moc magnetické pole zasahuje do vzorku mimo rovinu jádra. Bohužel přibližně měsíc před

termínem odevzdání této práce byl zavírován poměrně výkonný školní počítač s procesorem Intel Core i9-10900X s frekvencí 3,7 GHz a 64 GB RAM, na kterém byl Flux 12 licencován, a data ze simulací na něm uložená byla ztracena. Následně se na něm povedlo rozběhnout pouze 32bitovou verzi programu Flux s omezenou pamětí. V ní byl znovu sestaven model senzoru - tentokrát v *Steady State AC Magnetic* aplikaci, ale bohužel se ho pro výpočetní náročnost v 32bitové verzi nepovedlo vyřešit. Zkusilo se ručně nastavit hrubší síť i různé řešiče a jejich parametry, ale nestačilo to. Po opětovné přeinstalaci PC se na Windows 7 nakonec povedlo zprovoznit 64bitovou verzi Flux 12, model se však pro nedostatek času nepovedlo odladit.

Na obrázcích 3.8 a 3.9 jsou ukázky modelu susceptimetru v *Steady State AC Magnetic* aplikaci. Elektrický obvod na obrázku 3.9 se skládá vlevo z primární cívkou o 330 závitů a odporu 1Ω a zdroje střídavého proudu s $I_{\text{rms}} = 0,2 \text{ A}$, aby jeho peak-peak hodnota přibližně odpovídala 580 mA, které jsme pozorovali v osciloskopu při testování. Vpravo jsou potom 2 sekundární cívkou, každá o 150 závitů a odporu 3Ω . Za nimi je $10 \text{ M}\Omega$ rezistor, protože konec cívek nemohl zůstat v programu nezapojen. Výška válce představujícího vzorek je 4,05 cm.

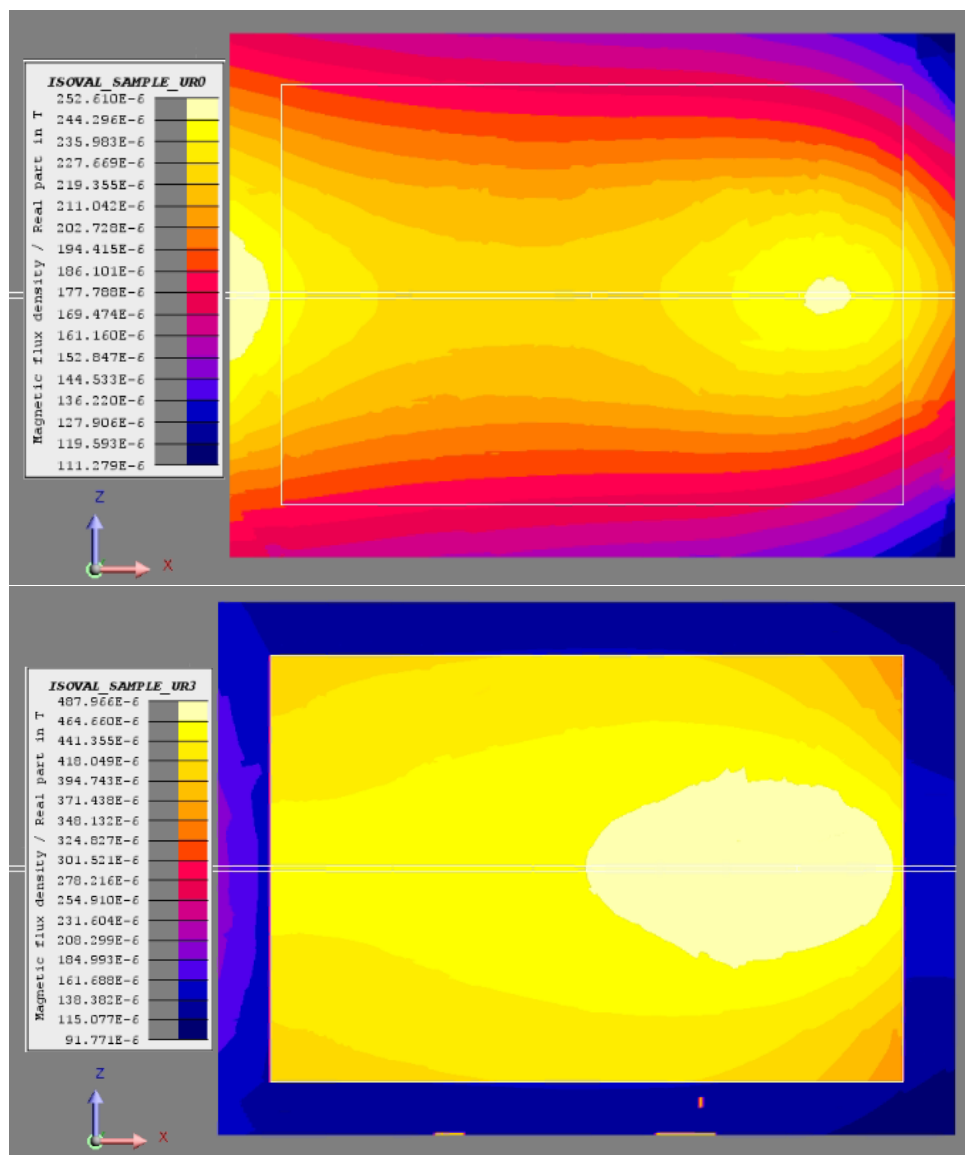


Obrázek 3.8: Model susceptimetru - pohled shora a s *infinite box*



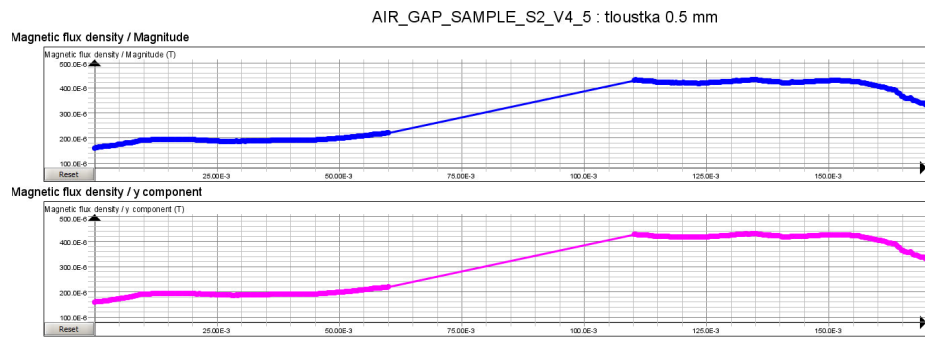
Obrázek 3.9: Model susceptimetru - pohled z boku a simulovaný el. obvod

V simulaci byly vyzkoušeny μ_r vzorku 0,99, 1,01, 2 a 3. Také byly provedeny plošné řezy středem vzorku (obrázek 3.10), podle kterých není vertikální rozlišitelnost vzhledem k výšce vzorku příliš velká. Simulace v závislosti na μ_r vzorku vypočítala rozdíl indukovaných napětí na sekundárních cívkách mezi 0,10 V a 1,12 V, což je ale příliš mnoho a neodpovídá to hodnotám, které jsme naměřili při testování.

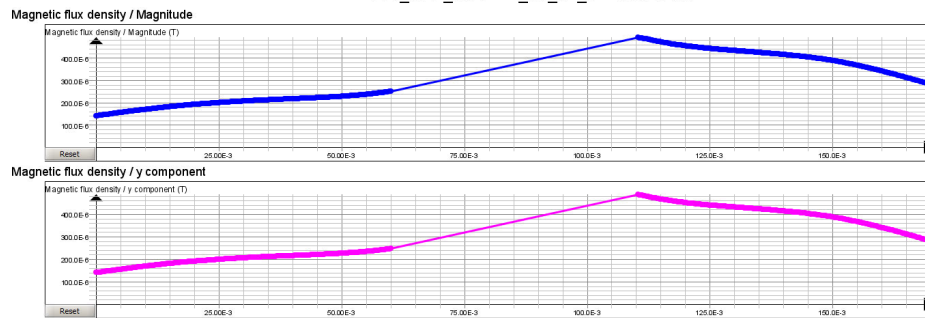


Obrázek 3.10: Ukázky plošných řezů středem vzorku - nahoře vzorek s $\mu_r = 0,99$, dole vzorek s $\mu_r = 3$. S vyšší μ_r vzorku se v jeho objemu zvyšovala magnetická indukce a magnetické pole se více rozpínalo mimo rovinu jádra senzoru.

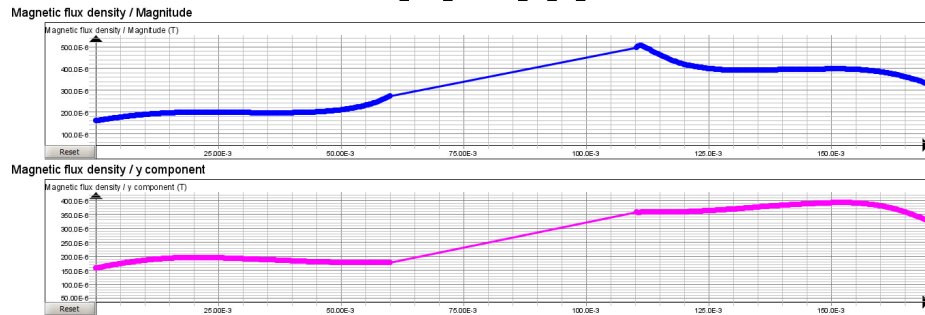
3. Simulace senzorů



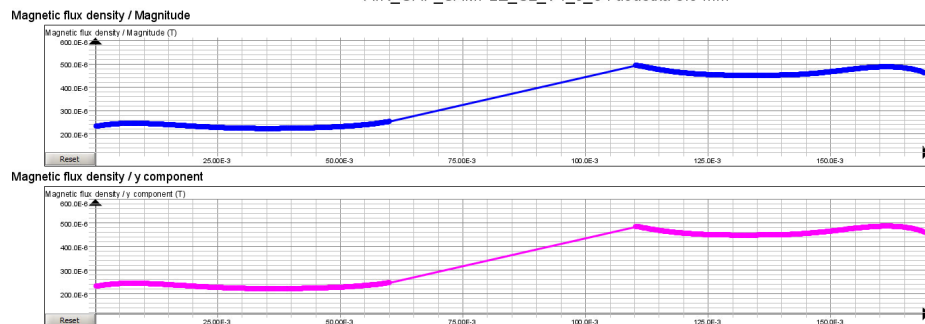
(a) : verze 1 - řez
AIR_GAP_SAMPLE_S2_V4_6 : tloušťka 0.5 mm



(b) : verze 2 - řez
AIR_GAP_SAMPLE_S2_V4_7 : tloušťka 0.5 mm



(c) : verze 3 - řez
AIR_GAP_SAMPLE_S2_V4_9_8 : tloušťka 0.5 mm



(d) : verze 4 - řez

Obrázek 3.11: Průběhy velikosti indukce přes střed vzorku (pravá část průběhů) a vzduchovou mezeru (levá část průběhů) z *Magneto Static 3D* aplikace. Velikosti indukcí 100-600 μT . Tloušťka jádra 0,5 mm pro urychlení simulace.

Kapitola 4

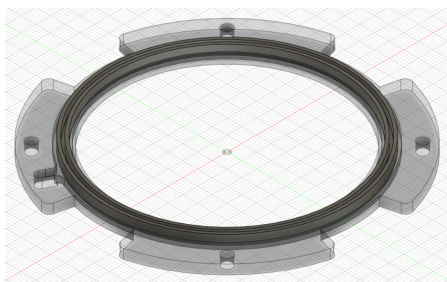
Realizace

4.1 Fluxgate

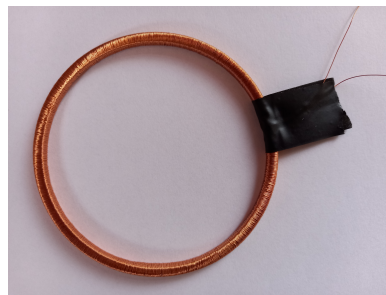
4.1.1 Návrh konstrukce a sestavení senzoru

K návrhu konstrukce byl použit software Fusion 360 od firmy Autodesk, Inc. Konstrukce samotná sestává ze tří dílů - vnitřního kruhu se žlábkem pro uložení feromagnetického jádra a dalších dvou symetrických částí pro uložení prvního dílu a namotání snímacích cívek. Na obrázku 4.1 jsou navrhované díly konstrukce senzoru v programu Fusion 360. Šířka senzoru je 102 mm, vnitřní prostor pro vzorek má průměr 76 mm. Rozměry konstrukce jsou podrobněji uvedeny v okótovaném výkresu na obrázku B.1.

Komponenty konstrukce byly vytištěny na 3D tiskárně Creality ENDER 6 na FEL ČVUT. Materiál použitý k tisku byl PLA. Po zasazení jádra byla na vnitřní díl navinuta excitační cívka. Jádro s navinutou cívkou je na obrázku 4.2. Počet závitů budicí cívky je přibližně 856 a tloušťka měděného drátu 0,3 mm.



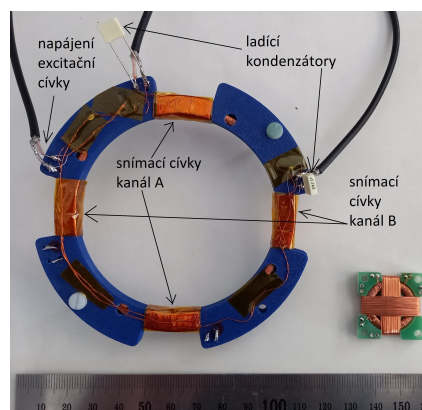
Obrázek 4.1: Návrh dílů fluxgate konstrukce ve Fusion 360



Obrázek 4.2: Jádro fluxgate s navinutou excitační cívkou

Následně bylo jádro zasazeno do vnějšího nosiče, na který byly namotány snímací cívky. V každém ze čtyř úseků nosiče vyhrazených pro snímací cívky je navinut drát ve dvou vrstvách po 100 závitěch. Celkově je tedy v každém úseku 200 závitů, tloušťka drátu snímacích cívek je 0,18 mm. Na obrázku 4.3 je zhotovený senzor s již připájenými ladícími kondenzátory. Pro porovnání

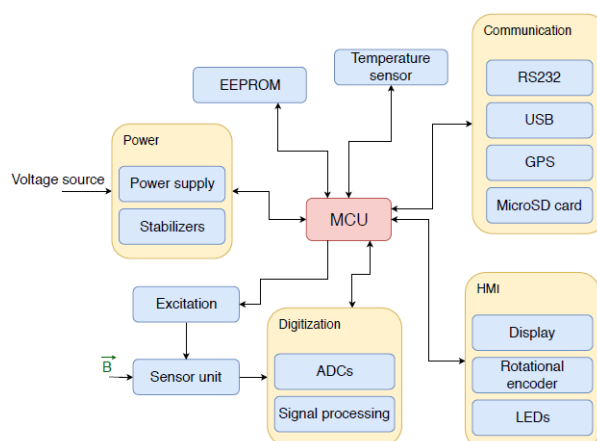
je vedle přiložen dvouosý fluxgate z FEL.



Obrázek 4.3: Vpravo námi zhotovený senzor, vlevo fluxgate z FEL

4.1.2 Elektronika a firmware

Pro výrobu ovládací jednotky senzoru byl využit návrh elektroniky vytvořený v rámci závěrečné práce Martina Peška: *Modular fluxgate magnetometer with digital output*. Blokové schéma jednotky je na obrázku 4.4. Jednotka je řízena



Obrázek 4.4: Blokové schéma jednotky pro obsluhu fluxgate senzoru navržené v rámci závěrečné práce Martina Peška [20]

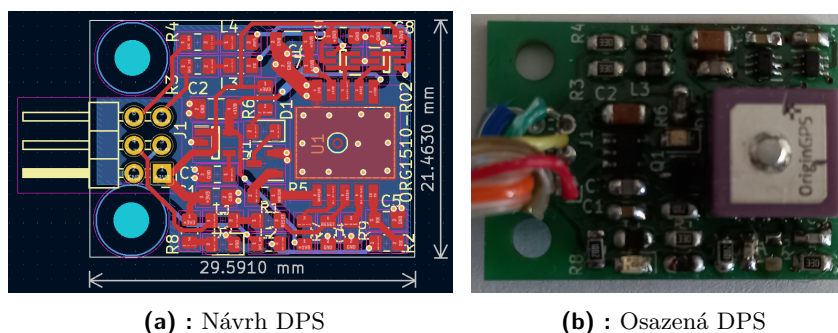
mikroprocesorem STM32L452VE od STMicroelectronics a excitace budící cívky je zajištěna H-můstkem sestávajícím ze dvou dvojitéch výkonových MOSFET a jejich ovladačů MCP1405. Signál ze snímací cívky je zpracován tak, že je zesílen, usměrněn fázově citlivým detektorem a vyfiltrován dolní propustí. Na konci je integrátor, jehož výstup vede zpět do snímací cívky, která je tedy zároveň použita jako cívka zpětnovazební. Proud vystupující z integrátoru je převáděn odporem na napětí, které je měřeno A/D převodníkem a dále zpracováváno. Více informací o funkci celé jednotky v [20]. Pájení jednotky zajistil vedoucí této práce dr. Petrucha.

Z části *Communication* blokového schéma 4.4 je vidět, že má jednotka kromě rozhraní pro USB, RS-232 a microSD kartu také možnost připojit GPS jednotku, která byla v rámci této práce navržena a vyrobena.

■ GPS jednotka

Tato jednotka byla navržena, aby bylo možné pro pozdější analýzu kromě naměřených hodnot ukládat také jejich polohy. K jejímu vývoji byl použit volně dostupný EDA software KiCad 6. Hlavní součástí je GPS modul ORG1510-R02 s integrovanou anténou, který byl vybrán, protože se s jeho pozdějším připojením počítalo při návrhu ovládací jednotky senzoru. ORG1510-R02 využívá GPS nebo GLONASS satelity, má vysokou citlivost až -165 dBm, která umožňuje i sledování v interieru, přesnost pod 2 m a TTFF (*Time to First Fix* - doba určení polohy) pod 1 s (při Hot Start podmínkách). Má 52 kanálů, jeho spotřeba je pod 15 mW, napájecí napětí 1,8 V, rozměry 10×10 mm, váha 2,5 g a operační teplota -40°C až 85°C .

GPS modul komunikuje s MC pomocí USART a předávaná data jsou ve formátu NMEA. Z modulu jsou vyvedeny signály RESET a PPS (*Pulse per Second*). Pro napájení modulu na 1,8 V byl použit regulátor napětí TPS73018DBVT a pro signály PPS a TX převodníky napěťové úrovně SN75AUP1T97DCKR. Pro ESD a EMI ochranu a filtraci vysokých frekvencí byly použity 100 pF kondenzátory, 33R odpory a feritové perličky 742792095. GPS jednotka má také 2 LED, jednu pro indikaci napájení a jednu pro indikaci stavu - *Standby* a *Hybernate* (LED zhasnutá), *Full Power state* (LED svítí). Elektrické schéma celé GPS jednotky je v příloze C. Na obrázku 4.5a je návrh desky plošných spojů v programu KiCad 6, na obrázku 4.5b osazená GPS jednotka.



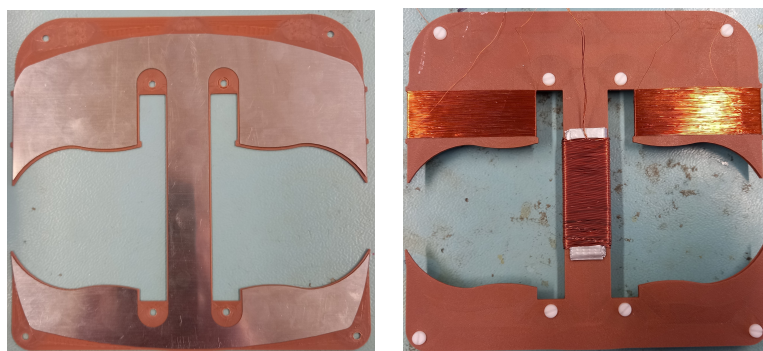
Obrázek 4.5: DPS GPS jednotky

■ 4.2 Susceptimetr

Při realizaci senzoru pro měření susceptibility byl nejprve vyexportován finální tvar jádra ze simulace a byly mu v programu Fusion 360 lehce zaobleny hrany, ale změny tvaru už byly minimální. Poté byl uhlazený tvar vyexportován do

souboru .dxf a zaslán společně s materiálem ULTRAPERM 80 popsaným v části 3.3.2 k vyřiznutí firmě Hofmeister s.r.o. do Plzně.

Program Fusion 360 byl použit také k navržení krytu pro senzor. Vnitřní oblast krytu kopíruje tvar jádra s tím, že byla kvůli rezervě pomocí funkce *Shell* rozšířena o 0,5 mm. Hloubka vybrání pro zasazení jádra je 0,25 mm, což bylo nejnižší rozlišení použité tiskárny Creality ENDER 3. Jeho rozměry jsou v příloze na výkresu B.2. Podle tohoto výkresu byl kryt dvakrát vytištěn, zasadilo se do něj jádro (obrázek 4.6a), díly se sešroubovaly plastovými šroubky a maticemi a na tělo senzoru se navinuly cívký. Pro excitační cívku byl použit měděný drát o průměru 0,3 mm a cívka má přibližně 330 závitů. Snímací cívky po stranách byly vinyty drátem o průměru 0,14 mm a mají každá 150 závitů. Na obrázku 4.6b je ukázka sestaveného senzoru.



(a) : Jádro susceptimetru uložené ve spodní části krytu

(b) : Sestavený susceptimetr s navinutými cívkami

Obrázek 4.6: Realizace susceptimetru

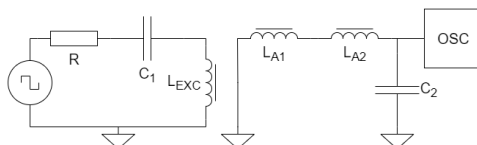
Kapitola 5

Testování

5.1 Fluxgate

Ověření funkčnosti a ladění

Pro základní otestování byl senzor zapojen podle schématu na obrázku 5.1 vlevo, abychom naladili excitační proud. Vstup do budící cívky jsme přitom

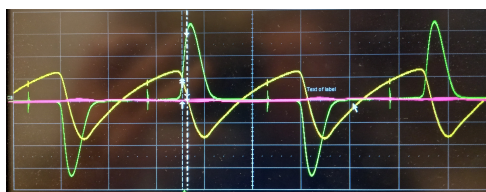
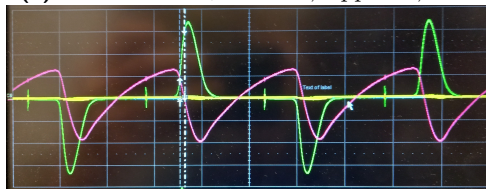
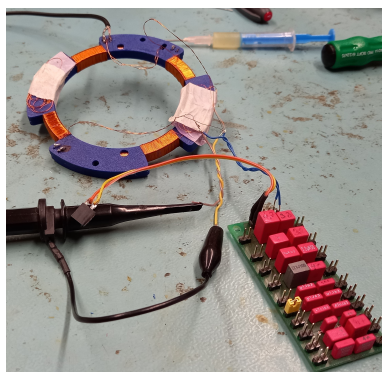


Obrázek 5.1: Zapojení pro ladění fluxgate senzoru

sledovali v osciloskopu a zkoušením jsme hledali vhodné hodnoty R a C_1 , abychom zvýšili špičky budícího proudu a dosáhli tak hlubší saturace jádra. Došli jsme k $R = 12 \Omega$ a $C_1 = 220 \text{ nF}$. Poté jsme na osciloskop napojili snímací cívky jednoho z kanálů a ladili je téměř do rezonance paralelně zapojenou kondenzátorovou řadou a došli jsme k hodnotě $C_2 = 100 \text{ nF}$, kterou jsme použili u obou kanálů. Budící cívka byla napojena na generátor obdélníkového signálu s amplitudou $U = 9 \text{ V}$, $f = 10 \text{ kHz}$ a střídou 50%. Průběhy, které jsme tak získali, jsou na obrázcích 5.2a a 5.2c.

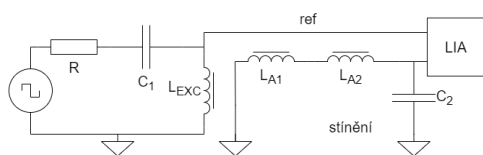
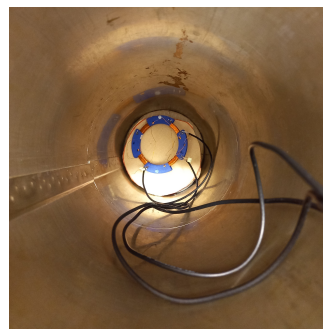
citlivost

Citlivost senzoru byla měřena pomocí Lock-in zesilovače (LIA) SR830 podle zapojení na obrázku 5.3. Pomocí funkce *Auto-phase* LIA bylo referenční napětí posunuto do takové fáze, aby dávalo po složení s měřeným napětím největší možnou hodnotu usměrněného napětí. Příruční magnetickou sondou byla naměřena hodnota vnějšího magnetického pole v citlivém směru cívek $10 \mu\text{T}$. Na kanálu A se indukovalo napětí $+0,372 \text{ V}$ a při opačném zapojení cívek $-0,45 \text{ V}$, což dává citlivost $(0,372 - (-0,45))/2 \text{ V}/10\mu\text{T} = 0,411 \text{ V}/10\mu\text{T} = 41,1 \text{ kV/T}$ s offsetem $(0,411 - 0,45) \text{ V} = -39 \text{ mV}$. Na kanálu B byla naměřena napětí $+0,45 \text{ V}$ a $-0,386 \text{ V}$, což dává citlivost $(0,45 - (-0,386))/2 \text{ V}/10\mu\text{T} = 0,418 \text{ V}/10\mu\text{T} = 41,8 \text{ kV/T}$ s offsetem $(0,418 - 0,386) \text{ V} = 32 \text{ mV}$.

(a) : Maximum u_i kanál A, $V_{pp} = 6,13$ V(c) : Maximum u_i kanál B, V_{pp} cca 6,4 V

(b) : Ladění snímacích cívek na 2. harmonickou pomocí paralelně připojené řady kondenzátorů

Obrázek 5.2: Průběhy na osciloskopu: zeleně budící proud (píky cca ± 650 mA), žlutě (kanál A) a růžově (kanál B) indukovaná napětí při natočení jednotlivých párů cívek do gradientu zemského magnetického pole. Vpravo ladění snímacích cívek.

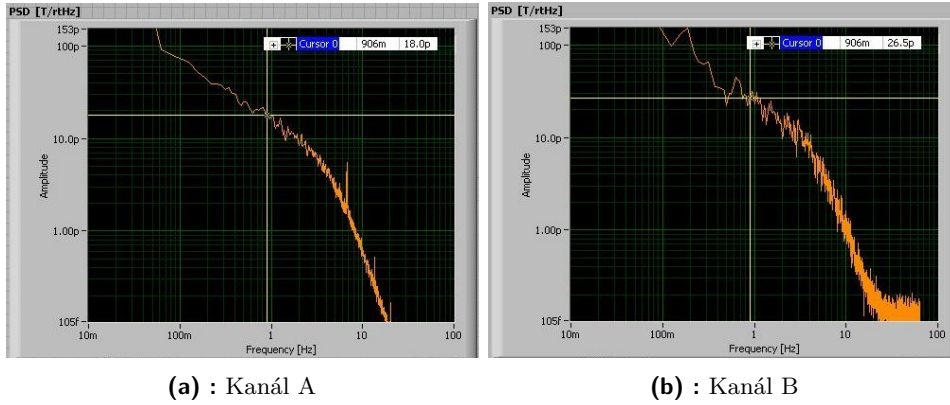
**Obrázek 5.3:** Zapojení fluxgate pro měření citlivosti**Obrázek 5.4:** Fluxgate ve stínící trubici

■ Šum

Šum senzoru byl změřen pomocí programu SR830spetrumMeas.vi vyvinutého v LabVIEW v laboratoři MAGLAB na FEL ČVUT. Senzor byl připojen k LIA a obdélníkovému generátoru podle obrázku 5.3 a navíc byl vložen do trubice ze šestivrstvého magnetického Permalloyového stínění a LIA byl propojen s PC, do kterého posílal naměřené vzorky napětí. Z toho program vypočetl šumová spektra (obrázek 5.5) a určil na frekvenci 1 Hz hodnoty výkonové spektrální hustoty (PSD) $18 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ pro kanál A a $23 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ pro kanál B.

■ Měření na vzorcích

První byl připraven vzorek ze sádrové kostky s železnými pilinami, která byla zmagnetována ve jhu. Její magnetický moment byl následně určen pomocí fluxmetru a Helmholtzových cívek způsobem popsáním v [24] na str. 60-



Obrázek 5.5: Šumová spektra vypočtená programem SR830spetrumMeas.vi

61. Kostka byla vložena do Helmholtzových cívek s konstantou $K' = 101,4 \mu\text{T}/20 \text{ mA}$ tak, aby směr, ve kterém byla zmagnetována, byl kolmý na rovinu závitů cívek. Poté bylo s kostkou otočeno o 180° , aby vektor její polarizace ukazoval opačným směrem. Magnetický tok Φ_i , ke kterému tímto pohybem došlo, integroval fluxmetr, model 480 od firmy LakeShore, napojený na cívky. Změřená hodnota Φ_i byla $5 \mu\text{Vs}$. Magnetický moment kostky byl vypočten pomocí vzorce

$$m_i = \frac{\Phi_i}{2\mu_0 K'}, \quad (5.1)$$

kde K je konstanta cívek v m^{-1} (resp. $\text{A}/(\text{m}\cdot\text{A})$). Jelikož konstanta byla na cívkách uvedena v T/A , bylo ji možno díky vztahu 2.8 použít ve vzorci 5.1 přímo namísto členu $\mu_0 K$. Magnetický moment kostky pak vyšel

$$m_i = \frac{\Phi_i}{2K'} = \frac{5 \cdot 10^{-6} \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{A}}{\frac{2 \cdot 101,4}{20} \cdot \frac{10^{-6}}{10^{-3}} \text{ T}} \doteq 493 \mu\text{A} \cdot \text{m}^2$$

Magnetický moment kostky byl poté určen také pomocí metody měření magnetické indukce na definované vzdálenosti popsané v [24] na str. 62. Kostka byla vložena do stínící trubice a pomocí fluxgate byla ve vzdálenosti $r = 5 \text{ cm}$ od ní naměřena magnetická indukce 600 nT a při otočení kostky -602 nT . Vzal jsem průměrnou velikost indukce 601 nT a dosadil do vzorce

$$m_i = \frac{10^7}{2} B_i r^3, \quad (5.2)$$

ze kterého vyšel magnetický moment $m_i = 376 \mu\text{A} \cdot \text{m}^2$. Ze vzorce 5.2 jsem ještě vyjádřil B_i a dosadil do něj magnetický moment určený prvním způsobem. Fluxgate by podle toho měl ve vzdálenosti 5 cm naměřit indukci

$$B_i = \frac{2m_i}{10^7 \cdot r^3} = \frac{2 \cdot 493 \cdot 10^{-6}}{10^7 \cdot 0,05^3} = 779 \text{ nT}.$$

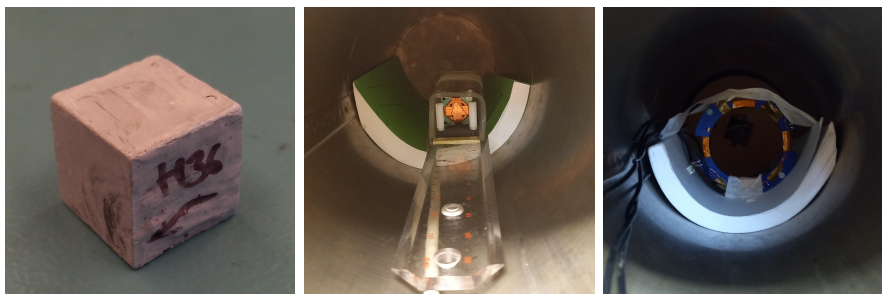
Následně byl laboratorní fluxgate ve stínění nahrazen naším zhotoveným. Budící frekvence byla 10 kHz a napětí 6 V . Při tomto nastavení byla citlivost

senzoru určena orientačně laboratorní sondou jako 46 kV/T. Při měření byl použit pouze kanál A, protože stačila jedna osa, ve které byla potřeba remanenci kostky měřit. Lock-in zesilovačem bylo podle orientace kostky na cívkách naměřeno indukované napětí ± 28 mV. To odpovídá remanenci

$$B = \frac{28 \cdot 10^{-3}}{46 \cdot 10^3} \doteq 609 \text{ nT},$$

což se poměrně dobře shoduje s hodnotou naměřenou laboratorním fluxgate.

Poté co byla funkce senzoru ověřena na kostce se známou remanencí, bylo přistoupeno ke vzorku poskytnutém doc. Kletetschkou. Jednalo se o jezerní sediment odebraný z hloubky přibližně 8,5 m z aljašského jezera Windmill. Vzorek byl uchován v plastové trubici obalené v igelitové folii (obrázek...?), přes což jsme také zkoušeli jeho remanenci měřit. Největší hodnotu indukovaného napětí jsme naměřili -2,09 mV, ale při rotaci trubice o 180° ani o plných 360° jsme nezaznamenali hodnotu, která by se blížila opačným +2 mV nebo je přesahovala. Vyhodnotili jsme tedy, že se nám na vzorku remanence naměřit nepodařila.



(a) : Zmagnetovaná kostka

(b) : Určení remanence kostky

(c) : Náš fluxgate připravený k testování

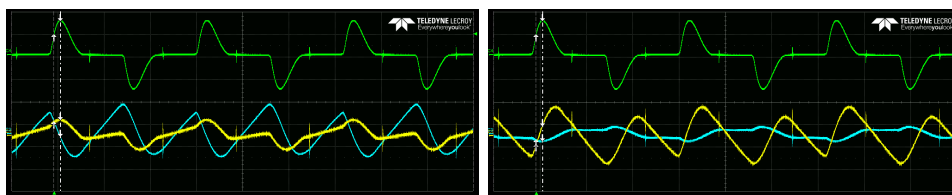
Obrázek 5.6: Ilustrace procesu testování fluxgate senzoru

■ Test s elektronikou

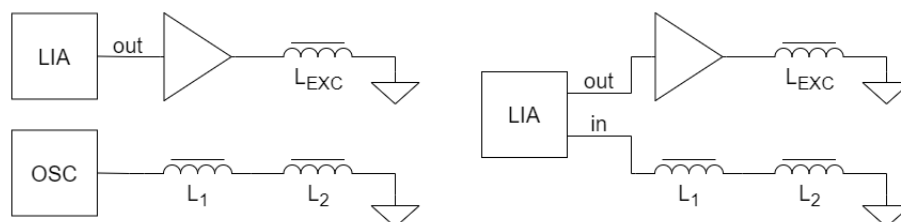
Původní nastavení ovládací jednotky pro buzení bylo 5,5 V a 12,8 kHz, což ale nevedlo k požadovanému chování senzoru. Proto byl výstup regulátoru 5V5exc dodávajícího napětí pro excitaci fluxgate přenastaven výměnou odporu R1 z 16 kOhm na 7,5 kOhm a napětí bylo tak zvýšeno na 10,33 V. Také byla pro nastavení frekvence buzení na 16 kHz upravena konstanta předděličky časovače 1 z 32 na 25, což byla v podstatě jediná provedená změna firmware. Na obrázku 5.7 jsou ukázky zaznamenaných průběhů na osciloskopu při testování. Špičky budícího proudu byly kolem ± 765 mA, takže při tomto nastavení buzení byla spotřeba senzoru poměrně velká. Vpp indukovaných napětí na obou kanálech bylo přibližně 1,2 V.

■ 5.2 Susceptimetr

Senzor byl nejprve zapojen podle schématu na obrázku 5.8 vlevo. Pro napájení

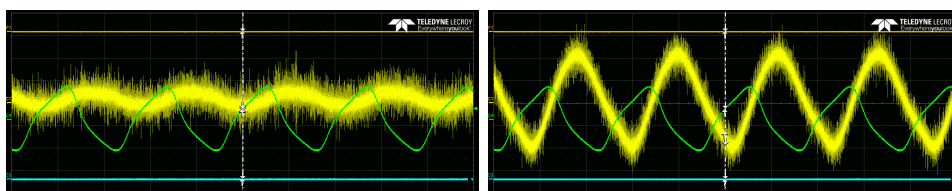


Obrázek 5.7: Ukázky průběhů z osciloskopu při testování fluxgate s ovládací elektronikou. Zeleně budící proud, žlutě a modře napětí indukované v kanálu A a B resp.



Obrázek 5.8: Zapojení pro testování susceptimetru

indukční cívky byl použit generátor v LIA se zesilovačem BOP 50-8M od KEPCO, Inc. Proud primární cívkou měl $I_{pp} = 580 \text{ mA}$ a $f = 4,6 \text{ kHz}$ a jeho průběh byl zobrazen na osciloskopu společně s napětím indukovaným ve snímacích cívkách. Na obrázku 5.9 je vlevo průběh při měření bez vzorku (V_{pp} cca 10 mV) a vpravo průběh při použití tenké pásky z materiálu s vysokou permeabilitou (V_{pp} cca 50 mV).



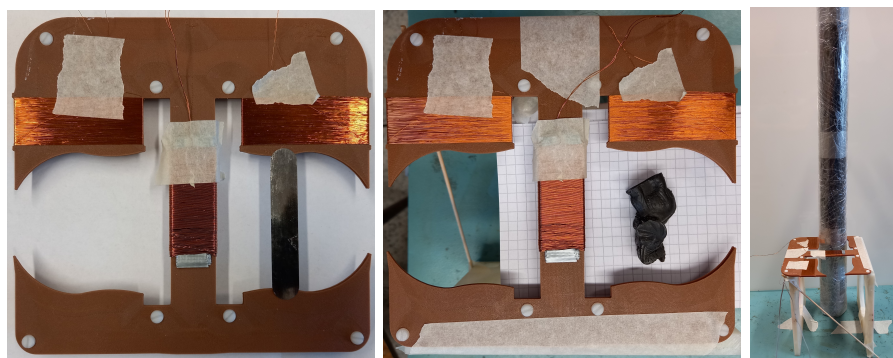
Obrázek 5.9: Testování susceptimetru - zeleně budící proud ($f = 4,6 \text{ kHz}$, $I_{pp} = 580 \text{ mA}$), žlutě indukovaná napětí

Po základním otestování byl odpojen osciloskop a indukované napětí se změřilo pomocí LIA podle schématu na obrázku 5.8 vpravo. Bylo vyzkoušeno několik vzorků uvedených v tabulce 5.1 společně se změnami napětí, které vyvolaly. Bohužel je potřeba zmínit, že u pásky s vysokou μ_r a lávového

vzorek	$\Delta u_i [\mu\text{V}]$
páska s vysokou μ_r	$13,8 \cdot 10^3$
lávový odlitek	12
písek v pet lahvi	6,5

Tabulka 5.1: Napětí naměřená senzorem na různých vzorcích

odlitku rostla u_i při umístění těchto vzorků blíže k primární cívce, což zřejmě



Obrázek 5.10: Testování vzorků - zleva: páska s vysokou μ_r , lávový odlitek, jezerní sediment v plastové trubici

ukazuje na nerovnoměrné rozložení pole přes otvor pro vzorek, čehož jsme se ale chtěli tvarováním jádra susceptimetru vyhnout.

Lávový odlitek byl později změřen také přístrojem SM-30 od ZH instruments, kterým byla orientačně určena susceptibilita 0,00194. SM-30 totiž předpokládá měření na velké rovné ploše, kterou ale odlitek nepředstavoval. Při natočení odlitku menší plochou k senzoru byla naměřena hodnota susceptibility menší, okolo 0,0012. Dalo by se tedy předpokládat, že materiál odlitku má susceptibilitu o trochu větší, ale stále v řádech 10^{-3} , maximálně 10^{-2} . Pokud jsme měřili pomocí LIA indukované napětí s přesností na 10^{-7} V, dostáváme citlivost susceptimetru

$$x = \frac{10^{-7}}{12 \cdot 10^{-6}} \cdot 0,00194 \doteq 1,62 \cdot 10^{-5} \doteq 2 \cdot 10^{-5}.$$

Proměřena byla také trubice se vzorkem, ale naměřené hodnoty byly příliš nízké, nestálé a nelišily se nijak výrazně v části se vzorkem a tam, kde byla trubice prázdná. Od doc. Kletetschky jsme zpětně dostali data, která naměřil svým senzorem, a jezerní sediment měl mít susceptibilitu okolo 0,04856. Než jsme však přišli na katedře měření na SM-30, bylo už vrtné jádro vráceno na PřF UK a nemohli jsme tuto překvapivě poměrně velkou hodnotu naším senzorem ověřit.

Kapitola 6

Závěr

V rámci této práce se povedlo podle původního záměru odsimulovat, vyrobit a otestovat dva senzory uzpůsobené k měření remanence a susceptibility vrtných jader průměrů přibližně 60 mm.

První ze senzorů je určen k měření remanence a pracuje na principu fluxgate magnetometru. Oproti klasickým fluxgate senzorům má kruhovou konstrukci se snímacími cívkami po obvodu, čímž uprostřed vznikl prostor pro vrtná jádra i další horninové vzorky s podobnými rozměry. Testy senzoru ukázaly citlivost v závislosti na nastaveném buzení okolo 40 kV/T a šum snímacích cívek 18 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ a 23 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$. K senzoru byla také dr. Petruchou vyrobena ovládací elektronika, ke které byla navržena a realizována GPS jednotka pro možnost ukládání poloh případných měření v terénu.

Druhý senzor slouží k měření susceptibility a využívá principu rozdílového transformátoru. V rámci návrhu byl v programu Flux 12 sestaven model senzoru a simulacemi jsme se snažili optimalizovat tvar jeho jádra tak, abychom dosáhli podle požadavku doc. Kletetschky jakožto zamýšleného uživatele senzorů rovnoměrného rozložení magnetických siločár přes celý objem měřené vrstvy vzorku, která měla být ideálně co nejtenčí. Testování realizovaného senzoru a další simulace pak ukázaly, že příliš rovnoměrného rozložení siločár se pravděpodobně dosáhnout nepodařilo. Při měření indukovaného napětí na sekundárních cívkách s přesností na 10^{-7} V byla určena citlivost senzoru $2 \cdot 10^{-5}$, která je zřejmě pro některé druhy hornin příliš nízká.

Vhodnými dalšími kroky ke zlepšení senzorů by u fluxgate bylo ověření kompatibility GPS jednotky s firmware ovládací elektroniky a případně i doladění buzení senzoru pro snížení jeho spotřeby. U susceptimetru by ke zvýšení citlivosti pomohlo sekundárním cívkám přidat závity. Také by bylo vhodné provést další simulace tohoto senzoru, případně ještě pozměnit tvar jádra pro rovnoměrnější rozložení magnetických siločár měřeným vzorkem. A eventuálně v budoucnu pro senzor vyvinout ovládací elektroniku.

Příloha A

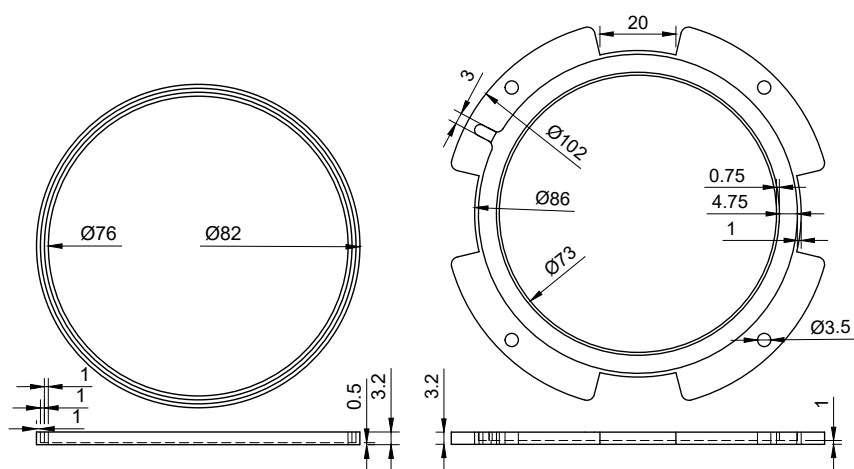
Literatura

- [1] DRAXLER, Karel, Petr KAŠPAR a Pavel RIPKA. *Magnetické prvky a měření*. Vyd. 3. V Praze: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03970-0.
- [2] BEDNAŘÍK, Michal. *Fyzika 1*. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04834-4.
- [3] DUNLOP, David a Özden ÖZDEMİR. *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*. Spojené království: Cambridge University Press, 1997. ISBN 0 521 325145.
- [4] FEYNMAN, Richard Phillips, Robert B. LEIGHTON a Matthew L. SANDS. *Feynmanovy přednášky z fyziky: revidované vydání s řešenými příklady*. 2. vydání. Přeložil Ivan ŠTOLL. Praha: Fragment, 2013. ISBN 978-80-253-1643-6.
- [5] KLEIN, Cornelis a Robert S. CARMICHAEL. "rock". Encyclopedia Britannica, 7 May 2021. URL <https://www.britannica.com/science/rock-geology/Electrical-properties#ref80197>
- [6] ĎUĎA, Rudolf a Luboš REJL. *Minerály*. Praha: Aventinum, 1997. Velký průvodce (Aventinum). ISBN 80-7151-030-0.
- [7] Zurich Instruments AG: AC Susceptibility Measurements. 2022. URL <https://www.zhinst.com/europe/en/applications/nanotechnology-materials-science/ac-susceptibility-measurements>
- [8] SatisGeo s.r.o.: KM-7 měřič magnetické susceptibility. 2020. URL <https://satisgeo.com/cs/susceptibility-meters/km-7-magnetic-susceptibility-meter/>
- [9] AGICO, s.r.o.: JR-6 Dual Speed Spinner Magnetometer. 2021. URL <https://www.agico.com/downloads/leaflets/jr6.pdf>
- [10] AGICO, s.r.o.: KLY5-A/KLY5-B In-phase and Out-of-phase Susceptibility Kappabridges. 2019. URL <https://www.agico.com/downloads/leaflets/kly5.pdf>

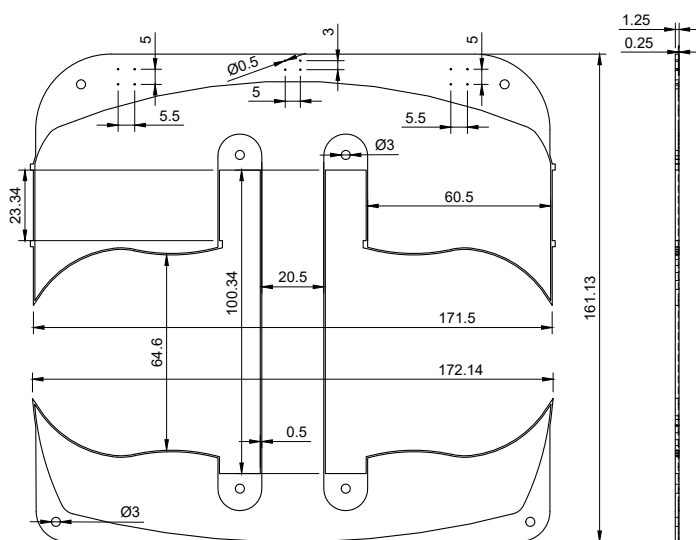
- [11] Quantum Design North America: Introduction to AC Susceptibility. 2010. URL <https://qdusa.com/siteDocs/appNotes/1078-201.pdf>
- [12] Instrumentation GDD Inc.: MPP Probe. 2017. URL https://www.gddinstrumentation.com/mpp-probe?gclid=Cj0KCQjwjN-SBhCkARIsACs rBz4x606fsWf1PMGBHzi1AgWoma0wT1R6ixSMp61L7fmBc002XKPr3-4aAi3 NEALw_wcB
- [13] Terraplus Inc.: KT-10 v2. 2020. URL <https://terraplus.ca/wp-content/uploads/terraplus-Brochures-English/KT-10-Magnetic-Susceptibility-Conductivity-Meters.pdf>
- [14] SVÁČEK, Petr a Miloslav FEISTAUER. *Metoda konečných prvků*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03522-0.
- [15] CEDRAT S. A.: *Flux - Magnetostatic application tutorial - 3D basic example*. 2012. Volně nepřístupné.
- [16] CEDRAT S. A.: *Flux 12: User guide*. 2015. Volně nepřístupné.
- [17] Metglas, Inc.: 2714A Technical Bulletin. 2021. URL <https://metglas.com/wp-content/uploads/2021/06/2714A-Magnetic-Alloy-updated.pdf>
- [18] Vacuumschmelze GmbH: Soft Magnetic Materials and Semi-finished Products. 2002. URL https://vacuumschmelze.com/03_Documents/Brochures/PHT%20001%20en.pdf
- [19] Vacuumschmelze GmbH: Prüfungsprotokol vom 30. 6. 2009 für Legierung ULTRAPERM 80. Poskytnuto Ing. Vojtěchem Petruchou, Ph.D.
- [20] PEŠEK, Martin. *Modular fluxgate magnetometer with digital output*. Praha, 2018. Bakalářská práce. FEL ČVUT. Vedoucí práce Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D.
- [21] OriginGPS: Multi Micro Hornet – ORG1510-R02 datasheet. 2022. URL <https://origingps.com/wp-content/uploads/2022/03/Multi-Micro-Hornet-ORG1510-R02-Datasheet-Rev-2.1.pdf>
- [22] Texas Instruments, Inc.: SN74AUP1T97 Single-Supply Voltage-level Translator With Nine Configurable Gate Logic Functions datasheet. 2022. URL <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74aup1t97.pdf>
- [23] Texas Instruments, Inc.: TPS730 Low-Noise, High PSRR, RF, 200-mA Low-Dropout Linear Regulators datasheet. 2021. URL <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps730.pdf>
- [24] KUBAŠTA, Petr. *Kvazi-definitivní básování geomagnetických dat*. Praha, 2014. Diplomová práce. FEL ČVUT. Vedoucí práce Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D.

Příloha B

Nákresy konstrukcí fluxgate a susceptimetru



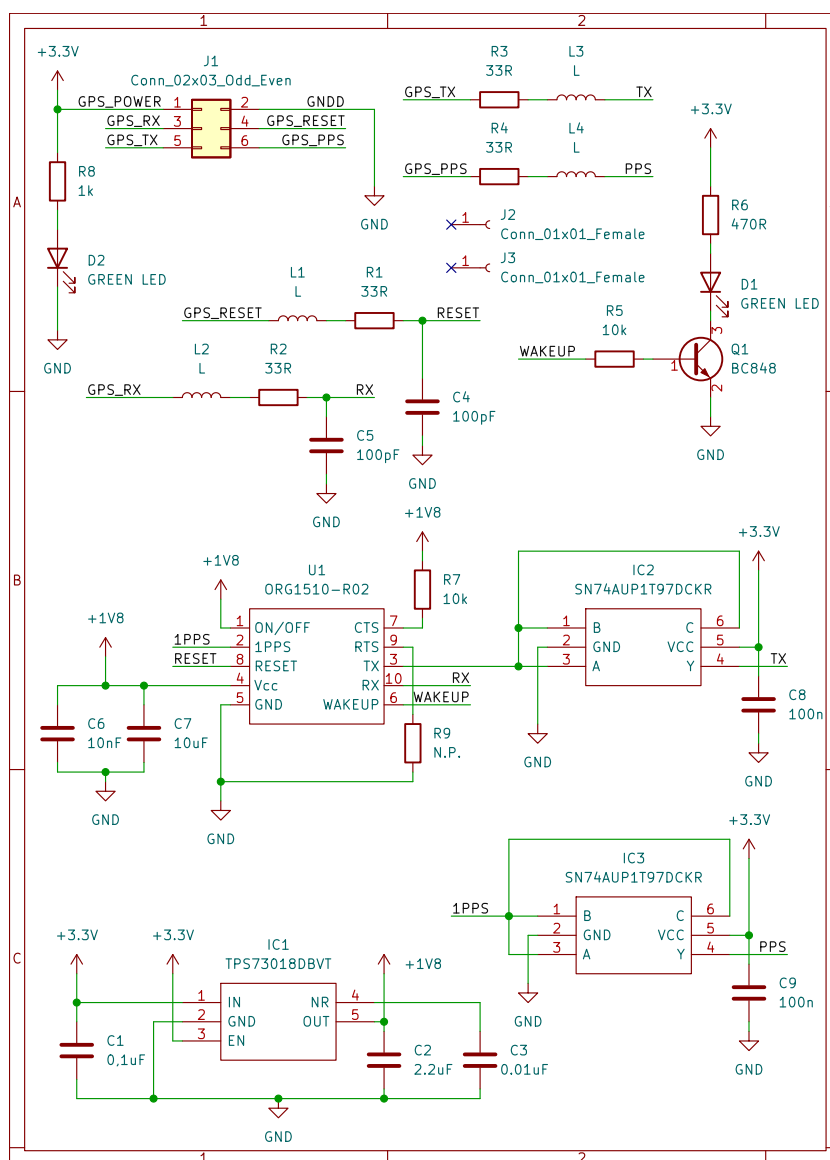
Obrázek B.1: Okótované nákresy vnitřního a vnějšího dílu fluxgate senzoru



Obrázek B.2: Nákres krytu susceptimetru

Příloha C

Elektrické schéma GPS modulu



Obrázek C.1: Elektrické schéma GPS modulu