

JIHOČESKÁ UNIVERZITA

v Českých Budějovicích

Pedagogická fakulta

Katedra fyziky

**Měření stacionárního magnetického pole
Measurement of the stationary magnetic field**

Diplomová práce

Pavel Stibor

Vedoucí diplomové práce: doc. PaedDr. Petr Adámek, Ph.D.

České Budějovice 2009

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci vypracoval samostatně, pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Českých Budějovicích dne 23.04.2009

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá výběrem, konstrukcí a realizací měřidla stacionárního magnetického pole a popisem základních zákonů užívaných v magnetismu. Popisuje principy a funkce jednotlivých sond a čidel užívaných v současné době pro měření magnetických polí, speciálně pak „fluxgate“ magnetometrem, jehož konstrukce byla v této práci realizována. Výsledkem práce je konkrétní realizace měřícího přístroje a ověřením funkčnosti měřícího systému.

Abstract

This diploma thesis deals with selection, construction and realization of measuring device of magnetostatic field and description of the basic laws used in magnetism. It also describes principles and functions of particular sensors and probes currently used for measuring of magnetic fields, especially fluxgate magnetometer, which has been constructed. The result of this work is a particular realisation of measuring device with functional testing measurements.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. PaedDr. Petru Adámkovi, Ph.D. a dále Ing. Karlu Dohnalovi a doc. Ing. Petru Kašparovi, Csc.

Obsah

1	Úvod a cíle práce	6
1.1	Úvod.....	6
1.2	Cíle práce	6
2	Teoretický úvod.....	7
2.1	Veličiny, jednotky a pojmy užívané v magnetismu.....	7
	Magnetická indukce	7
	Magnetický tok	8
	Intenzita magnetického pole	9
	Magnetomotorická síla, magnetické napětí a potenciál.....	9
	Magnetizace a magnetická polarizace	10
	Magnetický moment	11
	Magnetostatické pole a jeho účinky.....	13
	Magnetické účinky elektrického proudu.....	16
	Lenzovo pravidlo, Faradayův indukční zákon.....	18
	Napětí indukované pohybem vodiče v magnetickém poli.....	19
	Feromagnetikum v magnetickém poli, demagnetizační faktor.....	20
2.2	Magnetická měření, metody, senzory	24
	Měření magnetických polí	25
	Indukční metody měření	26
	Indukční měřicí cívka	27
	Rotační a vibrační měřicí cívky	30
	Feromagnetické sondy (v anglosaské literatuře nazývané jako „fluxgate“).....	31
	Teslametr s feromagnetickou sondou (<i>Fluxgate Magnetometer</i>).....	33
	Magnetogalvanická čidla	35
	Feromagnetická magnetorezistivní čidla	37
	Vláknové a magnetooptické senzory	37
	Rezonanční teslametry (<i>Resonance Magnetometers</i>).....	38
	Supravodivé magnetometry (<i>SQUID</i>)	40
	Metody založené na silových účincích	40
	Měření slabě magnetických látek	41
3	Výběr vhodné metody	43
4	Realizace měřicího systému	45
	Napájecí zdroj a generátor budicího signálu.....	45
	Modul synchronního detektoru a převodníku signálu z měřicí sondy na napětí	47
5	Naměřené hodnoty	50
6	Závěr	56
	Seznam použité literatury	57
	Přílohy	59

1 Úvod a cíle práce

1.1 Úvod

Přestože s magnetickým polem se lidé setkávají již několik tisíciletí a první vědecká diskuze týkající se magnetismu se údajně odehrála již kolem šestého století před naším letopočtem [1], k pochopení vztahů mezi elektřinou a magnetismem došlo až během devatenáctého století zejména díky lidem jako Oersted, Ampere, Gauss, Faraday, Maxwell a dalším [2]. Většina hlavních vědeckých prací vztahujících se k měření magnetického pole začala vznikat teprve od poloviny dvacátého století a to zejména proto, že s rozvojem techniky začalo nabývat měření magnetického pole čím dál větší důležitosti.

Magnetické pole dle [2] je fyzikální pole, jehož zdrojem je pohybující se elektrický náboj (tedy elektrický proud). Magnetické pole lze pozorovat kolem elektrických vodičů, kde je jeho zdrojem driftový pohyb elektronů, ale také kolem tzv. permanentních magnetů, kde jsou zdrojem pole vázané elektrické proudy. Magnetické pole může být také vyvoláno změnami elektrického pole.

Obecně je magnetické pole časově proměnné, tj. **nestacionární**. V případě, že vodičem protéká stacionární proud, pak vzniklé magnetické pole nazýváme polem **stacionárním** [2].

Podle původu můžeme magnetická pole dále rozdělit na [3]:

Přírodní – magnetické pole sestávající z komponenty vytvářené Zemí, která se chová jako permanentní magnet a několika dalšími menšími časově proměnnými komponentami spojenými se solární aktivitou a atmosférickými událostmi.

Industriální, člověkem vytvořená – statická a časově proměnná magnetická pole pocházející z člověkem vytvořených zdrojů a mající zpravidla vyšší intenzitu než přírodní pole. Zdrojem těchto polí jsou např. výzkumná pracoviště, zdravotnická zařízení a procedury, průmyslové procedury a další zdroje spojené s výrobou energie a dopravou.

Přístroje, které jsou schopny měřit intenzitu magnetického pole se nazývají **magnetometry**. Tyto přístroje využívají různých fyzikálních principů viz například [4,5,6,7].

Tato práce se zabývá především konstrukcí a realizací magnetometru.

1.2 Cíle práce

- seznámit se základními zákony magnetismu
- seznámit s vybranými fyzikálními principy měření magnetického pole
- zvolit vhodný, technicky realizovatelný princip měření magnetického pole
- na základě zvoleného principu navrhnout, zkonstruovat a realizovat magnetometr se schopností měřit stacionární i v čase proměnné magnetické pole, což je hlavním cílem práce.

2 Teoretický úvod

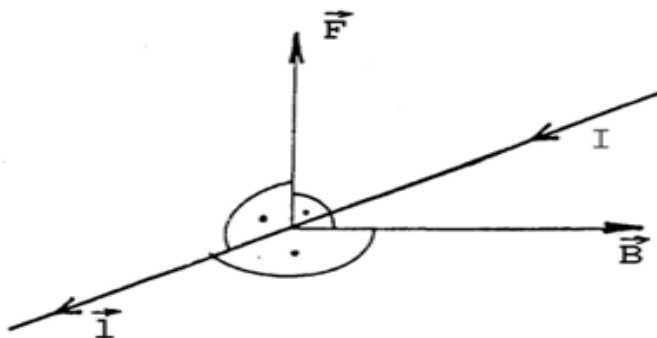
2.1 Veličiny, jednotky a pojmy užívané v magnetismu

V oblasti magnetismu se do r.1960 používala soustava jednotek CGSM. Na základě potřeb technické praxe vznikla soustava MKSA, která byla později modifikována jako soustava SI. Ta byla celosvětově převzata a u nás uzákoněna od roku 1975. V celém následujícím textu jsou používány jednotky soustavy SI. V soustavě SI, která vychází z Maxwellových rovnic, je základní magnetickou veličinou magnetická indukce viz [2], [5], [6].

Magnetická indukce

Magnetická indukce \mathbf{B} viz [2], [7], [8] je vektorová veličina, definovaná silou \mathbf{F} působící na vodič délky \mathbf{l} , jímž prochází elektrický proud I (obr. 2.1).
Dle [2]

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B} \quad [\text{N}; \text{A}; \text{m}; \text{T}]. \quad (2.1)$$



Obr. 2.1 Grafické znázornění veličin – převzato a upraveno z [7]

Měří se nejčastěji modul \mathbf{B} , nebo některá z jeho složek. Jednotkou magnetické indukce je 1 T (Tesla). Je to indukce homogenního pole, v němž na přímý vodič s délkou $l = 1 \text{ m}$ působí síla 1 N, je-li vodič kolmý ke směru \mathbf{B} a prochází-li jím proud 1 A. Indukci lze též vyjádřit pomocí magnetického toku (viz dále) $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb} \cdot \text{m}^{-2} = 1 \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$.

Jednotka magnetické indukce je realizována buď cívkovými etalony, nebo přímým měřením pomocí nukleární magnetické rezonance. Cívkové etalony jsou jednovrstvé cívky, vinuté na křemenné kostře, u nichž lze indukci ve středu vypočítat z rozměrů a proudu.

Těmito etalony lze dosáhnout indukce $\mathbf{B} = 10^{-3} \text{ T}$ s nejistotou $10^{-3} \%$ až $10^{-4} \%$. Metody nukleární magnetické rezonance převádějí měření indukce na měření kmitočtu, daného rezonancí atomových jader tekutin v magnetickém poli.

Rozsah měřených hodnot indukci je velmi široký - přibližně od 10^{-14} T do 10^2 T . Oblasti v okolí obou krajních hodnot ovšem vyžadují speciální uspořádání pro měření i generování takových magnetických polí. V běžné praxi se setkáme s indukci ve feromagnetiku, která dosahuje hodnot 1.5 T až 2 T. Zemské magnetické pole

v našich zeměpisných šířkách má hodnotu $(20 \div 30) \mu\text{T}$, vodorovná složka je $18 \mu\text{T}$; magnetická indukce na povrchu permanentních magnetů je $\mathbf{B}_m = 0,2 \text{ T}$ až $0,6 \text{ T}$; ve vzduchové mezeře laboratorních elektromagnetů $B = 1 \text{ T}$ až 2 T ; v supravodivých cívkách lze dosáhnout magnetických indukcí $(10 \div 20) \text{ T}$.

Magnetický tok

Magnetický tok viz [2], [7], [8] je skalární veličina definovaná napětím u_i indukovaným v závitě při časové změně t , toku ϕ podle vztahu dle [2]

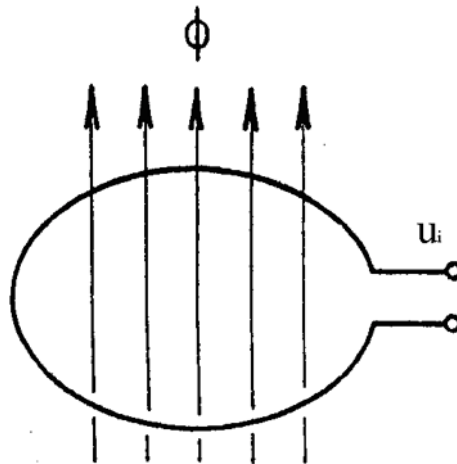
$$u_i = -\frac{d\phi}{dt} \quad [\text{V}; \text{Wb}; \text{s}]. \quad (2.2)$$

Magnetickému toku 1 Wb (Weber) odpovídá indukované napětí 1 V , které podle (obr. 2.2) vznikne v závitě obepínajícím tok při rovnoměrném poklesu toku z jednotkové hodnoty na nulu v čase $t = 1 \text{ s}$.

Tok lze také definovat pomocí vztahu dle [8]

$$\phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} \quad [\text{Wb}; \text{T}; \text{m}^2], \quad (2.3)$$

kde ϕ magnetický indukční tok, S je plocha závitu a \mathbf{B} magnetická indukce.



Obr. 2.2 Znárodnění toku uvnitř závitu - převzato a upraveno z [7]

Je-li pole homogenní a vektor \mathbf{B} kolmý k ploše S , dostaneme magnetický indukční tok

$$\phi = \vec{B} \vec{S} \quad [\text{Wb}; \text{T}; \text{m}^2]. \quad (2.4)$$

Představíme-li si v magnetickém poli uzavřenou plochu S , pak každá indukční čára, která vstupuje v určitém bodě uvažované plochy do oblasti ohraničené touto plochou, musí nutně (vzhledem k uzavřenosti magnetických indukčních čar) v jiném bodě plochy z této oblasti vystoupit, neboť žádná indukční čára nemůže v této oblasti končit ani začínat.

Z toho vyplývá, že celkový magnetický indukční tok uvažovanou uzavřenou plochou S , je roven nule. Tj. dle [8]

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0 \quad [T; m^2]. \quad (2.5)$$

Ze vztahu (2.2) je zřejmé, že jednotku magnetického toku 1 Wb lze také vyjádřit jako 1 Vs (voltsekunda).

Etalon magnetického toku je analogický etalonu vzájemné indukčnosti. Je tvořen sekundární cívkou, jejíž plochou protéká magnetický tok známé hodnoty vyvolaný proudem primární cívkou. Obě cívky mají přesné a stabilní rozměry. Výstupní veličinou etalonu je impuls napětí indukovaný v sekundární cívkě při skokové změně proudu primární cívkou. Těmito etalony se získají magnetické toky řádu 10 mWb.

Intenzita magnetického pole

Je to vektorová veličina definovaná z I. Maxwellovy rovnice viz [2], [7], [8], podle které je ve vzdálenosti r od přímého velmi dlouhého vodiče s proudem I intenzita magnetického pole \vec{H} dle [7]

$$\vec{H} = \frac{I}{2\pi r} \quad [Am^{-1}; A; m]. \quad (2.6)$$

Jednotkou intenzity magnetického pole je ampér na metr ($1 A \cdot m^{-1}$). Souvislost intenzity pole \vec{H} a indukce \vec{B} je dána vztahem dle [7]

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu\mu_0} \quad [Am^{-1}; T; -; Hm^{-1}], \quad (2.7)$$

kde μ je poměrná (relativní) permeabilita prostředí. Je to bezrozměrné číslo, pro vakuum a prakticky i pro vzduch platí, že $\mu = 1$. V následujícím textu bude poměrná permeabilita zjednodušeně označována jako permeabilita.

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H \cdot m^{-1}$ je magnetická konstanta (permeabilita vakua).

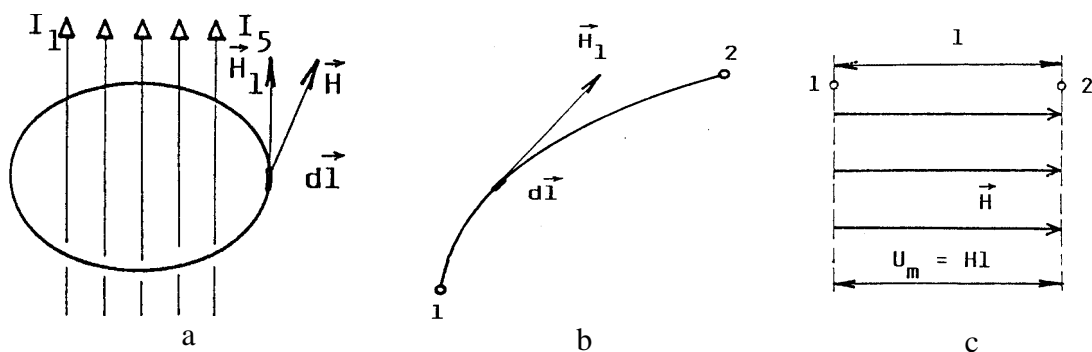
Etalony intenzity magnetického pole ve vzduchu jsou na základě vztahu (2.7) shodné s etalony magnetické indukce.

Magnetomotorická síla, magnetické napětí a potenciál

Magnetomotorická síla \vec{F}_m viz [2], [7], [8], vyvolaná proudem a působící na uzavřené dráze je skalární veličina, definovaná podle 1. Maxwellovy rovnice vztahem dle [7]

$$\vec{F}_m = \oint \vec{H} d\vec{l} = \oint H_l dl = \sum I \quad [A; Am^{-1}; m; A], \quad (2.8)$$

kde H_l je podle obr.2.3a průmět vektoru \vec{H} do směru elementu dráhy $d\vec{l}$, $\sum I$ celkový proud obepínaný uzavřenou drahou \vec{l} , daný součtem proudů všech vodičů včetně uvažování jejich směrů.



Obr. 2.3 K magnetomotorické síle - převzato a upraveno z [7]

Přiřazení směru vektoru \mathbf{H} k danému směru proudu je podle obr. 2.3a. Je-li po celé délce dráhy l všude stejně velká intenzita pole \mathbf{H} a má-li vektor \mathbf{H} všude směr elementu dráhy $d\mathbf{l}$, platí jednoduchý vztah dle [7]

$$F_m = Hl = \sum I \quad [A; Am^{-1}; m; A]. \quad (2.9)$$

Jednotkou magnetomotorické síly je IA .

Magnetické napětí U_m viz [2], [7], [8] mezi body 1 a 2 měřené po dráze l (obr. 2.3b) je skalární veličina definovaná vztahem dle [7]

$$U_m = \int_1^2 H dl \quad [A; Am^{-1}; m]. \quad (2.10)$$

V oblasti pole, kde neprochází elektrický proud, nezávisí hodnota integrálu na tvaru dráhy l a magnetické napětí můžeme vyjádřit rozdílem magnetických potenciálů bodů 1 a 2 dle [7]

$$V_{m2} - V_{m1} = \int_1^2 H dl \quad [A; A; Am^{-1}; m], \quad (2.11)$$

kde V_{m1} a V_{m2} jsou skalární magnetické potenciály bodů 1 a 2. V homogenním poli je mezi body 1 a 2, jejichž spojnice má směr vektoru \mathbf{H} (obr. 2.3c), magnetické napětí dle [7]

$$U_m = Hl \quad [A; Am^{-1}; m]. \quad (2.12)$$

Jednotkou magnetického napětí a potenciálu je IA .

Magnetizace a magnetická polarizace

Magnetizace \mathbf{M} představuje fyzikálně intenzitu pole uvnitř tělesa vyvolanou jeho magnetickými vlastnostmi, jinak řečeno, je to míra stavu zmagnetování magnetika. Magnetická polarizace \mathbf{J} potom udává změnu indukce, vyvolanou magnetickými vlastnostmi tělesa.

Magnetizace \mathbf{M} viz [2], [7], [8] je vektor definovaný vztahem dle [2]

$$\vec{M} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{H} \quad [\text{Am}^{-1}; \text{T}; \text{Hm}^{-1}; \text{Am}^{-1}], \quad \text{nebo} \quad \vec{M} = \frac{d\vec{m}}{dV}, \quad (2.13)$$

kde $d\mathbf{m}$ je vektorový součet všech magnetických momentů magnetických dipólů v elementárním objemu dV , \mathbf{B} je magnetická indukce, \mathbf{H} je intenzita magnetického pole. Magnetická polarizace \mathbf{J} je vektor vyjádřený dle [7]

$$\vec{J} = \vec{B} - \mu_0 \vec{H} \quad [\text{T}; \text{T}; \text{Hm}^{-1}; \text{Am}^{-1}]. \quad (2.14)$$

Mezi oběma veličinami tedy platí vztah dle [7]

$$\vec{J} = \mu_0 \vec{M} \quad [\text{T}; \text{Hm}^{-1}; \text{Am}^{-1}], \quad (2.15)$$

kde \mathbf{M} je magnetizace, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ je magnetická konstanta (permeabilita vakua).

Obě veličiny vyjadřují změnu pole vyvolanou magnetickými vlastnostmi látek. Pro vakuum a prakticky i pro vzduch je $\mathbf{M} = 0$ a $\mathbf{J} = 0$, neboť podle (2.7) je $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$.

Při měření parametrů feromagnetik je jedním z důležitých parametrů magnetická polarizace \mathbf{J} , pro kterou podle (2.14) a (2.15) platí dle [7]

$$\vec{J} = \vec{B} - \mu_0 \vec{H} = (\mu - 1)\mu_0 \vec{H} = \kappa \mu_0 \vec{H}, \quad \kappa = \mu - 1, \quad (2.16)$$

kde μ je relativní permeabilita, κ susceptibilita.

Magnetický moment

Uvažujme obdélníkový závit s proudem I v homogenním magnetickém poli o magnetické indukci \mathbf{B} . Strany závitů označme vektory \mathbf{l}_1 a \mathbf{l}_2 , které orientujeme ve směru proudu I (viz obr. 2.4). Na strany závitů \mathbf{l}_1 a \mathbf{l}_2 působí v magnetickém poli síly \mathbf{F}_{m1} a $-\mathbf{F}_{m1}$, které leží na téže přímce (v ose otáčení závitů) a mají opačné orientace. Jejich výslednice i moment jsou proto nulové.

Na strany \mathbf{l}_2 a $-\mathbf{l}_2$ působí v magnetickém poli síly \mathbf{F}_{m2} a $-\mathbf{F}_{m2}$ (tvoří dvojici sil), které se snaží závit otočit tak, aby jeho rovina byla kolmá na magnetické indukční čáry, tj., aby vektor plochy závitů \mathbf{S} zaujal směr vektoru \mathbf{B} . Vyjádříme \mathbf{F}_{m2} pomocí (2.1) a dostaneme dle [2], [8]

$$\vec{F}_{m2} = I \vec{l}_2 \times \vec{B}.$$

Rameno dvojice uvažovaných sil je l_1 , takže moment \mathbf{M} dvojice sil je dle [2], [8]

$$\vec{M} = \vec{l}_1 \times \vec{F}_{m2} = I \vec{l}_1 \times l_2 \times \vec{B}. \quad (2.17)$$

Avšak vektorový součin $\mathbf{l}_1 \times \mathbf{l}_2 = \mathbf{S}$, což je vektor plochy závitu, takže

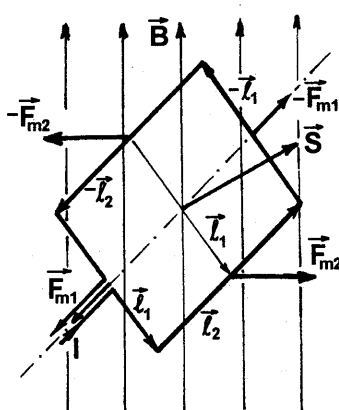
$$\vec{M} = I\vec{S} \times \vec{B}. \quad (2.18)$$

Pro rovinný závit s proudem I a plochou závitu \mathbf{S} definujeme **Ampérův magnetický moment** \mathbf{m}_A vztahem dle [2], [8]

$$\vec{m}_A = I\vec{S} \quad [\text{Am}^2; \text{A}; \text{m}^2]. \quad (2.19)$$

Takže pro moment dvojice sil působící na závit s proudem v magnetickém poli lze psát dle [2], [8]

$$\vec{M} = \vec{m}_A \times \vec{B}. \quad (2.20)$$



Obr. 2.4 K magnetickému momentu - převzato a upraveno z [2]

Jednotkou Ampérova magnetického momentu je 1 Am^2 .

Vztahy (2.18) a (2.20) platí i pro rovinné závity, které mají jiný tvar než obdélníkový (například kruhový apod.).

Výsledek lze shrnout takto: na rovinný závit (jakéhokoliv tvaru) s proudem I působí v homogenním magnetickém poli dvojice sil, jejíž moment \mathbf{M} je roven vektorovému součinu Ampérova magnetického momentu závitu \mathbf{m}_A a magnetické indukce \mathbf{B} .

Kromě Ampérova magnetického momentu se zavádí ještě tzv. **Coulombův magnetický moment** \mathbf{m}_c vztahem dle [8]

$$\vec{m}_c = \mu_0 I\vec{S}, \quad (2.21)$$

kde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ je magnetická konstanta (permeabilita vakua), I proud závitem, \mathbf{S} plocha závitu.

Jeho jednotkou je $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1} = 1 \text{ m}^2 \cdot \text{T} = \text{Wb} \cdot \text{m}$.

Nenulový magnetický moment má každý zdroj magnetického pole. Platí to nejen pro makroskopické objekty, ale i pro molekuly, atomy a elementární částice. Makroskopická tělesa o nenulovém magnetickém momentu, pokud jsou volně otáčivá (např. cívka s proudem, magnetka aj.), se ve vnějším magnetickém poli stáčí do polohy,

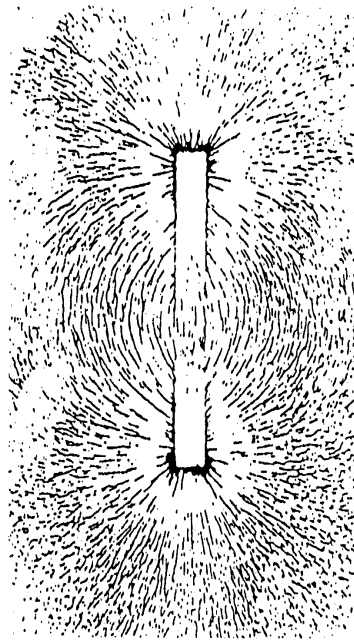
v níž má magnetický moment \mathbf{m}_A směr shodný se směrem vektoru magnetické indukce \mathbf{B} . Této stabilní poloze odpovídá minimum magnetické energie W_m dané skalárním součinem vektorů \mathbf{m}_A a \mathbf{B} , tj. dle [8]

$$W_m = -\vec{m}_A \vec{B}. \quad (2.22)$$

Magnetostatické pole a jeho účinky

Z historického hlediska se první objevy v oblasti magnetismu týkaly magnetostatiky, tj. projevu zmagnetovaných těles, která jsou v klidu. Zmagnetované těleso (magnet) se navenek projevuje svým magnetickým polem, které je vyvoláno magnetickou polarizací \mathbf{J} . Ta je podle moderní teorie způsobena orientací elementárních magnetů, vytvořených pohybem elektrických nábojů uvnitř molekuly viz [7].

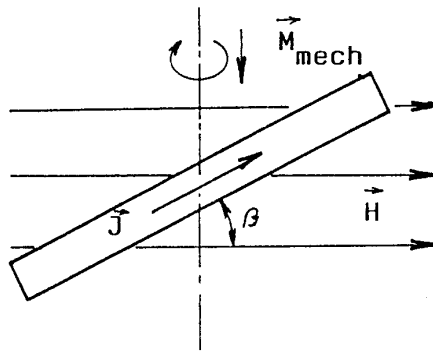
Magnetické pole je charakterizováno vektorem intenzity magnetického pole \mathbf{H} resp. magnetickou indukcí \mathbf{B} . Průběh \mathbf{H} v okolí magnetu je zobrazen pomocí siločar magnetického pole, což jsou místa se stejnou hodnotou \mathbf{H} . Průběh siločar rovinného pole tyčového magnetu, získaný pomocí drobných feromagnetických tělísek, je na (obr. 2.5).



Obr. 2.5 Průběh siločar rovinného pole tyčového magnetu - převzato a upraveno z [7]

Prvním pozorovaným projevem magnetického pole byly síly, které v něm působí na zmagnetované těleso. Na otočně uložené zmagnetované těleso (obr. 2.6) o objemu V , s homogenní polarizací \mathbf{J} , nacházející se v homogenním magnetickém poli o intenzitě \mathbf{H} , působí mechanický moment dle [7]

$$\vec{M}_{mech} = V[\vec{J} \times \vec{H}]. \quad (2.23)$$

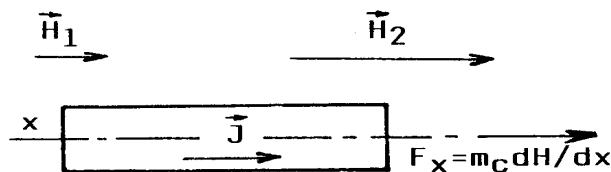


Obr. 2.6 Zmagnetované těleso v homogenním mag. poli - převzato a upraveno z [7]

Podobně, nachází-li se zmagnetované těleso (obr. 2.7) v magnetickém poli nehomogenním v ose x, působí na ně síla F_x dle [7]

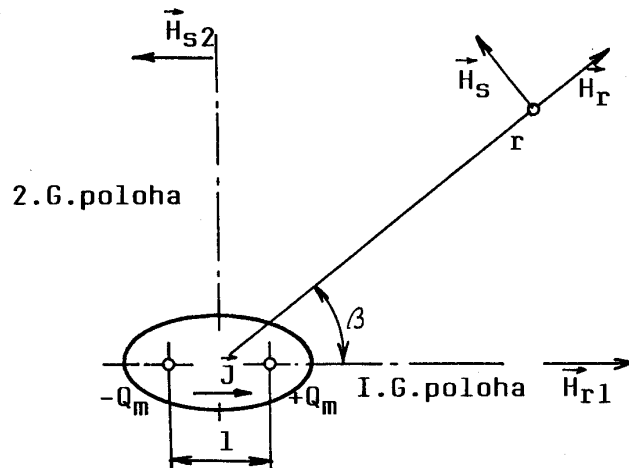
$$\vec{F}_x = m_c \frac{d\vec{H}}{dx}, \quad (2.24)$$

kde m_c je Coulombův magnetický moment, \mathbf{H} je intenzita magnetického pole.



Obr. 2.7 Zmagnetované těleso v nehomogenním mag. poli - převzato a upraveno z [7]

V zemském magnetickém poli, které lze považovat za homogenní, zaujme zmagnetované těleso, otočné kolem svislé osy, směr vodorovné složky zemského pole, tj. směřuje jedním koncem k severu. Tento konec magnetu byl označen jako kladný - severní - pól a druhý konec jako záporný - jižní - pól magnetu. Na základě analogie mezi elektrickým a magnetickým pole je používán pojem „magnetické množství“ respektive magnetický náboj Q_m . Pomocí něho je definován základní útvar – magnetický dipól (obr. 2.8). Na rozdíl od elektřiny nelze od sebe oddělit magnetická množství; zmagnetované těleso předpokládáme složené z elementárních dipólů, přičemž nejmenším dipólovým útvarem je molekula látky.



Obr. 2.8 K výpočtu mag. pole zmagnetovaného tělesa - převzato a upraveno z [7]

Při orientačním výpočtu magnetického pole zmagnetovaného tělesa (např. tyčového magnetu podle obr. 2.8)) zpravidla vycházíme z předpokladu, že pro dostatečnou vzdálenost od magnetu ($r \gg \Delta l$) můžeme jeho pole určit jako pole dipólu s momentem m_c , umístěným ve středu magnetu. Složky intenzity pole \vec{H}_r a \vec{H}_s lze vypočítat ze vztahu

$$\vec{H}_r = \frac{2m_c}{4\pi\mu_0 r^3} \cos \beta; \quad \vec{H}_s = \frac{m_c}{4\pi\mu_0 r^3} \sin \beta \quad (2.25)$$

kde m_c je Coulombův magnetický moment, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ je magnetická konstanta (permeabilita vakua), r je vzdálenost od magnetu.

Pomocí magnetického potenciálu V_m , který lze v potenciálním magnetostatickém poli vyjádřit pomocí intenzity \vec{H} vztahem

$$\vec{H} = -\text{grad}V_m. \quad (2.26)$$

Je-li $\beta = 0$ (tzv. I. Gaussova poloha), je dle [7]

$$\vec{H} = \vec{H}_{r1} = \frac{2m_c}{4\pi\mu_0 r^3}. \quad (2.27)$$

Pro $\beta = \pi/2$ (II. Gaussova poloha), je dle [7]

$$\vec{H} = \vec{H}_{s2} = \frac{m_c}{4\pi\mu_0 r^3}, \quad \vec{H}_r = 0. \quad (2.28)$$

Vztahů (2.27) a (2.28) lze prakticky využít při zjišťování Coulombova magnetického momentu m_c . Měřením \vec{H} v Gaussových polohách zjistíme, zda lze v dané oblasti pole zkoumaného útvaru považovat za dipólové. Pokud ano, lze jak z hlediska určení pole \vec{H} v kterémkoli bodě, tak z hlediska silového působení použít k výpočtům moment m_c zjištěný pomocí vztahů (2.27) resp. (2.28).

Při řešení magnetického pole permanentních magnetů nebo zjišťování jeho silových účinků je třeba mít na zřeteli, že se jedná o pole potenciální, v němž platí dle [7]

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = 0. \quad (2.29)$$

Magnetické účinky elektrického proudu

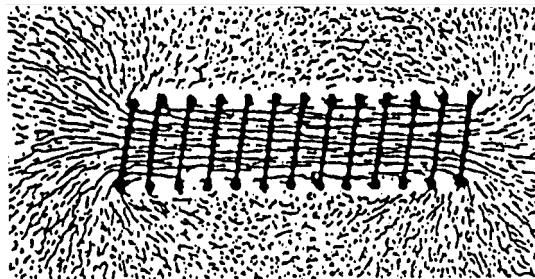
Podle Oerstedova objevu je elektrický proud provázen magnetickým polem viz [2], [7], [8]. Typický příklad je na (obr. 2.9), kde jsou pomocí feromagnetických tělísek zobrazeny siločáry magnetického pole cívky protékané proudem. Závislost mezi intenzitou magnetického pole \vec{H} a proudem I je popsána I. Maxwellovou rovnicí (vztah 2.8). Typickým případem je pole přímého dlouhého vodiče kruhového průřezu o poloměru r_0 podle (obr. 2.10), protékaného proudem I . Siločáry tohoto pole jsou soustředné kružnice v rovinách kolmých k ose vodiče. Je-li proud ve vodiči rovnoměrně rozložen, potom siločára s poloměrem $r \leq r_0$ (uvnitř vodiče) obepíná proud $I \cdot r^2/r_0^2$. Pro integraci po této silové čáře tedy platí dle [7]

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \vec{H} \oint d\vec{l} = 2\pi r \vec{H} = I \frac{r^2}{r_0^2}; \quad \vec{H} = \frac{I r^2}{2\pi r_0^2}. \quad (2.30)$$

Vně vodiče je analogicky dle [7]

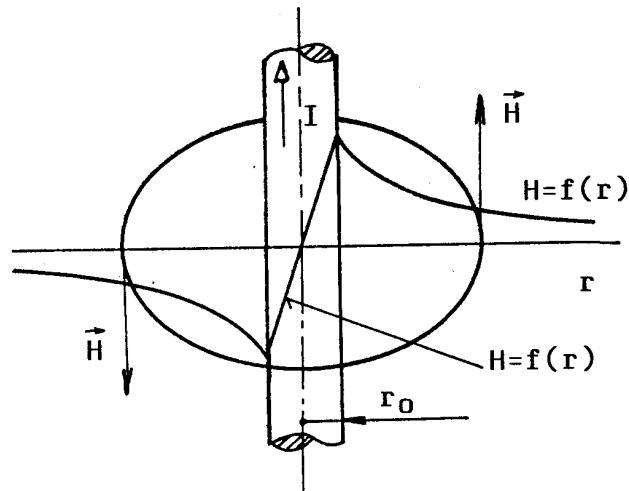
$$\vec{H} = \frac{I}{2\pi r}, \quad (2.31)$$

kde \vec{H} je intenzita magnetického pole,
 I je proud protékající vodičem,
 r je vzdálenost od vodiče.



Obr. 2.9 Zobrazení siločar mag. pole cívky - převzato a upraveno z [7]

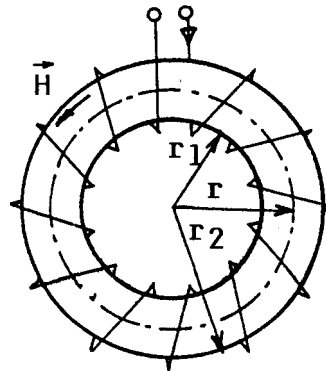
Průběh velikosti \vec{H} v závislosti na vzdálenosti od osy vodiče i přiřazení směru odpovídající pravidlu pravotočivého šroubu je patrné z (obr. 2.10).



Obr. 2.10 Průběh velikosti \mathbf{H} v závislosti na vzdálenosti od osy vodiče
- převzato a upraveno z [7]

Podobným typickým případem, kdy lze \mathbf{H} jednoduše vypočítat, je homogenní toroidní obvod podle (obr. 2.11), rovnoměrně ovinutý N závitů protékanými proudem I . Vzhledem k souměrnosti jsou siločáry kružnice, obepínané celkovým proudem $I = N \cdot I$. Intenzita pole uvnitř vinutí toroidu je potom dána vztahem dle [7]

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = 2\pi r \vec{H} = NI; \quad \vec{H} = \frac{NI}{2\pi r}, \quad (\text{pro } r_1 \leq r \leq r_2) \quad (2.32)$$

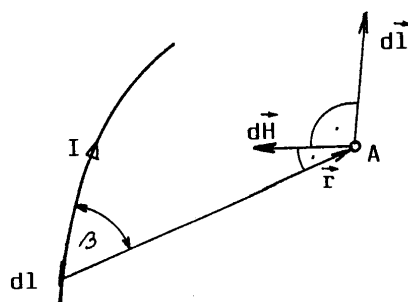


Obr. 2.11. Homogenní toroidní obvod - převzato a upraveno z [7]

Ve složitějších případech, kdy nelze jednoduše vyjádřit kruhový integrál $\mathbf{H}d\mathbf{l}$, používáme k výpočtu Biot-Savartův zákon. Podle tohoto zákona je intenzita pole vytvořeného elementem proudového vlákna v bodě A (obr. 2.12.), který neleží na proudovém vláknu dle [7],

$$d\vec{H} = \frac{I[d\vec{l} \times \vec{r}]}{4\pi r^3}; \quad d\vec{H} = \frac{I d\vec{l} \sin \beta}{4\pi r^2}, \quad (2.33)$$

kde $d\vec{l}$ je element proudového vlákna orientovaný podle smyslu proudu I ,
 \vec{r} je průvodič orientovaný od elementu $d\vec{l}$ k bodu A , v němž určujeme intenzitu pole.



Obr. 2.12. K výpočtu intenzity mag. pole - převzato a upraveno z [7]

Lenzovo pravidlo, Faradayův indukční zákon

Při každé časové změně magnetického pole dochází ke vzniku indukovaného elektrického pole, které má vírový charakter. V nejjednodušším případě, kdy vektor $\mathbf{B}(t)$ nemění svůj směr, podle (obr. 2.13a) rovnoběžný s osou z , nýbrž pouze svou velikost, budou vektory $\mathbf{E}(t)$ ležet v rovině kolmé k ose z a budou mít v každém bodě směr tečny ke kružnici se středem na ose z a procházející tímto bodem. Orientace vektorů $\mathbf{E}(t)$ je patrná z (obr. 2.13a) a vzhledem k časové změně toku $d\phi/dt$ se určí podle pravidla levé ruky viz [2], [7], [8].

Umístíme-li do tohoto pole vodič ve tvaru přerušené smyčky, kterou neprotéká proud, objeví se na jeho koncích indukované elektromotorické napětí (elektromotorická síla resp. oběhové napětí), pro jehož velikost platí **Faradayův indukční zákon**:

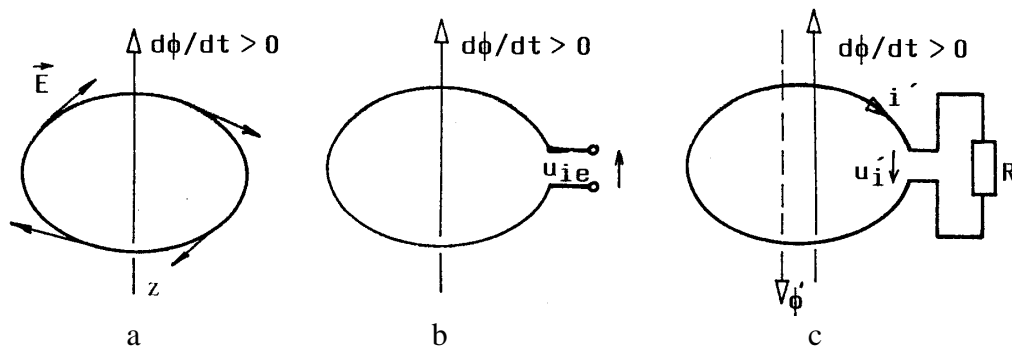
"Indukované napětí na koncích nezatíženého vodiče se rovná časové změně indukčního toku procházejícího plochou omezenou vodičem. Jeho polarita je opačná než polarita napětí zdroje, který by při zdrojové orientaci dodával proud vyvolávající časovou změnu toku (obr. 2.13b)" dle [7] :

$$u_{ie} = -\frac{d\phi}{dt}, \quad (2.34)$$

kde u_{ie} je indukované elektromotorické napětí, $d\phi/dt$ je časová změna magnetického indukčního toku.

Je-li vodič uzavřen, protéká jím indukovaný proud, pro jehož směr platí **Lenzovo pravidlo**:

"Indukovaný proud má vždy takový směr, že magnetické pole jím vytvořené působí proti změně, která jej vyvolala."



Obr. 2.13 K Faradayovu indukčnímu zákonu - převzato a upraveno z [7]

Situace je patrná z (obr. 2.13c), kde proudová smyčka je zatížena odporem R : pro $d\phi/dt > 0$ se určí skutečný směr indukovaného proudu $i'(t)$ vyvolávajícího reakční tok ϕ' podle pravidla pravé ruky. Velikost indukovaného proudu závisí nejen na indukovaném napětí a ohmickém odporu smyčky, ale i na konkrétním tvaru vodiče. Ze základní rovnice (2.34) nelze tedy $i'(t)$ v obecném případě určit: důvodem je skutečnost, že reakční magnetické pole vyvolané indukovaným proudem i' a zeslabující tok ϕ' tokem ϕ' je obecně nehomogenní. Ze stejného důvodu bude svorkové napětí $u_{i'}$ vždy menší než napětí indukované naprázdno (elektromotorická síla), tj. při zvolené orientaci bude vždy $u_{i'} < -u_{ie}$.

Indukční zákon zobecnil Maxwell do vztahu dle [7]

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}; \quad \oint \vec{E}d\vec{l} = -\frac{d\phi}{dt}, \quad (2.35)$$

kde $d\vec{B}/dt$ je časová změna magnetické indukce, $d\phi/dt$ je časová změna magnetického indukčního toku.

Z hlediska vnějších obvodů připojených na zdroj, který závit představuje, je výhodné zavést pojem *svorkové napětí* u_i pro něž bude podle obr. 2.13c platit dle [7]

$$u_i = \frac{d\phi}{dt}. \quad (2.36)$$

Napětí indukované pohybem vodiče v magnetickém poli

Definice magnetické indukce B vychází podle vztahu (2.1) ze silového působení na vodič s proudem nacházející se v magnetickém poli viz [2], [7], [8]. Elektrický náboj dQ , pohybující se rychlostí v úsekem $d\vec{l}$, je ekvivalentní elementu proudu $i = dQ/dt$, neboť dle [7]

$$vdQ = \frac{d\vec{l}}{dt}dQ = \frac{dQ}{dt}d\vec{l} = id\vec{l}. \quad (2.37)$$

V magnetickém poli působí na pohybující se náboj dQ síla dle [7]

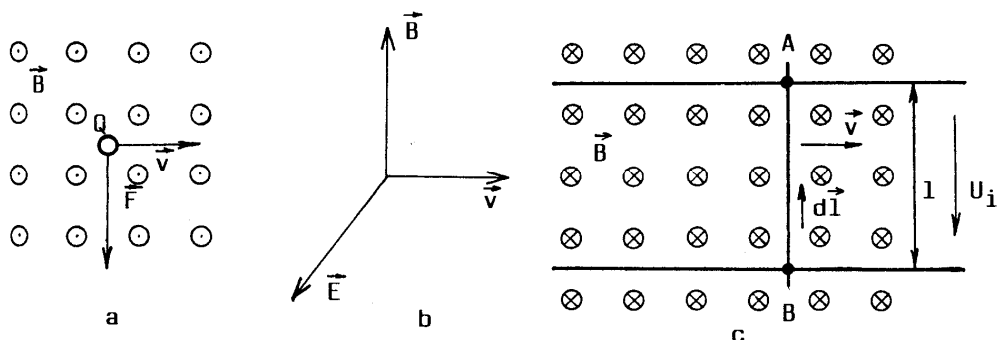
$$d\vec{F} = i[d\vec{l} \times \vec{B}] = dQ[\vec{v} \times \vec{B}] \quad (2.38)$$

a na náboj Q působí síla (viz obr. 2.14a) dle [7]

$$\vec{F} = Q[\vec{v} \times \vec{B}]. \quad (2.39)$$

Pohybuje-li se pozorovatel v magnetickém poli současně s nábojem, jeví se mu síla (2.39) jako síla vyvolaná elektrickým polem $\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$. Srovnáním s (2.39) má toto elektrické pole \vec{E} intenzitu dle [7]

$$\vec{E} = [\vec{v} \times \vec{B}]. \quad (2.40)$$



Obr. 2.14 K napětí induk. pohybem vodiče v mag. poli - převzato a upraveno z [7]

přiřazení jednotlivých vektorů je podle obr. 2.14b. Pohybuje-li se v magnetickém poli o indukcii \vec{B} vodič o délce l rychlostí \vec{v} tak, že koncovými body A, B klouže po nehybných vodivých spojkách (viz obr. 2.14c), vznikne na jeho koncích napětí, pro jehož velikost platí dle [7]

$$U_{BA} = u_i = -\int_B^A \vec{E} d\vec{l} = \int_A^B \vec{E} d\vec{l} = \int_A^B [\vec{v} \times \vec{B}] d\vec{l} = \vec{B} l \vec{v}. \quad (2.41)$$

Smysl jednotlivých veličin je patrný z obr. 2.14c

Feromagnetikum v magnetickém poli, demagnetizační faktor

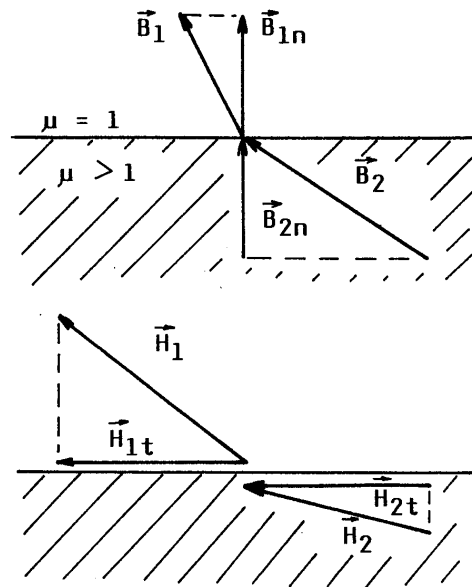
Podle magnetických vlastností můžeme látky viz [2], [4], [7], [8] rozdělit na:

- 1.) paramagnetické, u nichž permeabilita $\mu > 1$ a susceptibilita $\kappa > 0$; μ i κ jsou nezávislé na \vec{H} ;

- 2.) diamagnetické, kde $\mu < 1$, $\kappa < 0$; μ i κ jsou nezávislé na \mathbf{H} , v obou případech se μ jenom nepatrně liší od 1;
- 3.) feromagnetické, kde $\mu \ll 1$, $\kappa > 0$; $\mu = f(\mathbf{H})$, $\kappa = f(\mathbf{H})$.

Vložíme-li do magnetického pole ve vzduchu feromagnetické těleso, dojde ke změně rozložení pole a změně jeho intenzity \mathbf{H} i indukce \mathbf{B} . Na rozhraní dvou prostředí s různými permeabilitami, např. feromagnetikum - vzduch viz (obr. 2.15), platí: Normálové složky indukce a tečné složky intenzity pole musí být dle [7] stejné:

$$\vec{B}_{1n} = \vec{B}_{2n}, \quad \vec{H}_{1t} = \vec{H}_{2t}. \quad (2.42)$$



Obr. 2.15 K feromagnetiku v magnetickém poli - převzato a upraveno z [7]

Všimněme si několika typických příkladů:

- 1.) Tenká rozlehlá deska z feromagnetika o permeabilitě $\mu \gg 1$ je vložena do homogenního pole ve vzduchu kolmo ke směru \mathbf{B}_v , \mathbf{H}_v viz (obr. 2.16a). Protože indukce má jenom složku kolmou k rozhraní, musí podle (2.42) být $\mathbf{B}_v = \mathbf{B}_{1n}$, $\mathbf{B}_z = \mathbf{B}_{2n} \Rightarrow \mathbf{B}_v = \mathbf{B}_z$.

Pro intenzity pole ve vzduchu \mathbf{H}_v a v železe \mathbf{H}_z platí dle [7]:

$$\vec{H}_v = \frac{\vec{B}_v}{\mu_0}; \quad \vec{H}_z = \frac{\vec{B}_z}{\mu\mu_0} = \frac{\vec{B}_v}{\mu\mu_0} = \frac{\vec{H}_v}{\mu}. \quad (2.43)$$

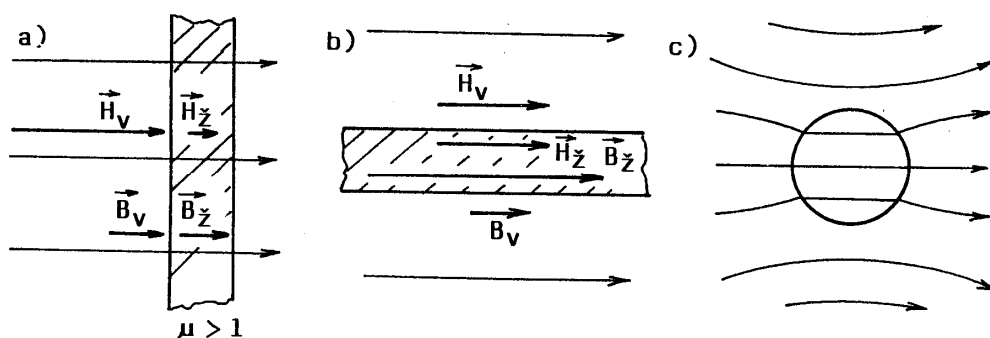
Pokles intenzity \mathbf{H}_z oproti \mathbf{H}_v lze vysvětlit demagnetizačním polem desky jehož intenzita \mathbf{H}_d je dle [7]

$$\vec{H}_d = \vec{H}_v - \vec{H}_z = (\mu - 1)\vec{H}_z = \frac{\vec{J}_z}{\mu_0}, \quad (2.44)$$

kde $\mathbf{J}_z = \kappa \cdot \mu_0 \cdot \mathbf{H}_z = (\mu - 1) \cdot \mu_0 \cdot \mathbf{H}_z$,
 \mathbf{J}_z je magnetická polarizace desky,
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ je magnetická konstanta (permeabilita vakua),
 μ je relativní permeabilita.

Intenzita pole ve feromagnetiku desky je dle [7]

$$\vec{H}_z = \vec{H}_v - \frac{\vec{J}_z}{\mu_0}. \quad (2.45)$$



Obr. 2.16 K feromagnetiku v magnetickém poli - převzato a upraveno z [5]

- 2.) Vloží-li se do homogenního pole ve vzduchu velmi dlouhý feromagnetický válec ($\mu \gg 1$) rovnoběžně se siločarami (obr. 2.16b), opět se polarizuje a na jeho koncích vzniknou póly demagnetizačního pole \mathbf{H}_d , působícího proti \mathbf{H}_v . Tyto póly vzniknou složením elementárních dipólů feromagnetika, orientovaných antiparalelně s vnějším polem. Ve střední oblasti, tj. daleko od pólů, je intenzita \mathbf{H} zanedbatelná, takže podle (2.42) platí

$$\vec{H}_v = \vec{H}_{1f}, \vec{H}_z = \vec{H}_{2f}, \vec{H}_v = \vec{H}_z. \quad (2.46)$$

Indukce ve feromagnetiku je větší než ve vzduchu

$$\vec{B}_v = \mu_0 \vec{H}_v, \vec{B}_z = \mu \mu_0 \vec{H}_z = \mu \mu_0 \vec{H}_v = \mu \vec{B}_v. \quad (2.47)$$

- 3.) Feromagnetická koule ($\mu \gg 1$) vložená do homogenního pole (viz obr. 2.16c). V tomto případě dochází k homogenní polarizaci. \mathbf{J}_z je v celém objemu stejná co do velikosti i směru. Pro tento případ lze odvodit

$$\vec{H}_z = \vec{H}_v - \frac{\vec{J}_z}{3\mu_0}. \quad (2.48)$$

Porovnáním vztahů (2.45), (2.46) a (2.48) lze obecně vyjádřit intenzitu pole uvnitř feromagnetického tělesa vloženého do magnetického pole \mathbf{H}_z :

$$\vec{H}_z = \vec{H}_0 - \frac{D\vec{J}_z}{\mu_0}, \quad (2.49)$$

kde \mathbf{H}_0 je intenzita pole před vložením vzorku,

D je demagnetizační činitel daný tvarem tělesa a jeho polohou vzhledem ke směru pole, demagnetizační činitel viz [7] je bezrozměrné číslo v rozmezí 0 až 1,

\mathbf{J}_z je magnetická polarizace tělesa.

Vztah (2.49) platí pouze pro tělesa s homogenní magnetickou polarizací, což je vedle koule splněno jen pro rotační elipsoid. U jiných tvarů vzorku není rovnice (2.49) přesně splněna, z průměrné hodnoty \mathbf{H}_z a \mathbf{B}_z lze definovat činitel D, který je však závislý na permeabilitě vzorku. (Kromě závislosti D na rozměrech je potřeba počítat také s jeho závislostí na permeabilitě vzorku).

2.2 Magnetická měření, metody, senzory

Podle účelu a podmínek měření je pro měření magnetického pole vyvinuto velké množství senzorů pracujících na různých principech.

Účel měření může být velmi různorodý, od prostého měření intenzity nebo indukce magnetického pole po diagnostické metody, geologické prospektivní metody a mnohé další viz následující text [5], [6]:

- **Biomagnetická měření**

Magnetické „trackery“ (zařízení, která měří pozici a relativní orientaci měřeného objektu) se používají k zjištění pozice lékařských nástrojů uvnitř těla (endoskopu, kolonoskopu, pitevních jehel apod.), k sledování biomechanických pohybů (očních víček, artikulačních pohybů), k měření žaludečního vyprazdňování, velikosti žaludku.

Magnetopneumografie je magnetická metoda schopná detekovat magnetický prach usazený v plicích.

- **Navigaci**

„Fluxgate“ kompasů jsou populární zařízení používaná v letadlech, autech a na lodích. Mají výhodu oproti klasickým kompasům používajícím otáčivou jehlu zejména v tom, že senzor může být oddělen od displeje, lze provádět automatické korekce čtených hodnot, senzor nemá pohybující se části, senzor není náchylný na vibrace.

Senzory polohy - autonomní navigace mobilních robotů.

- **Armádu a bezpečnost**

Hledání nevybuchlé munice, zbraní, min.

Detekce a stopování cílů - detekce a lokalizace dopravních prostředků, detekce autonomních raket a inteligentní munice, detekce ponorek.

Protikrádežové systémy – zboží v obchodech a knihy v knihovnách mohou být opatřeny malými protikrádežovými nálepkami, které lze detekovat u východu.

- **Identifikaci a autorizaci, ukládání informací**

Magnetické kreditní karty, klíče, magnetické pásky, pevné disky, magnetické zaznamenávací a čtecí hlavy, označování magnetickým inkoustem, magnetické čárové kódy, magnetoelastické nálepky, magnetické označování ocelových provazů, trubek, kolejnic atd.

- **Automobilový průmysl**

Hlavními aplikacemi v automobilovém průmyslu vedle velkého množství senzorů zajišťujících chod vozidel:

Detekce pozice - kompasů v navigačních systémech.

Řízení a monitorování dopravy – směr, přítomnost a rychlost vozidel, detekce typů vozidel.

- **Nedestruktivní testování**

Magnetické metody nedestruktivního testování mohou být použity ke zjištění materiálového stavu a vlastností (reziduálních napětí, defektů).

Magnetické zobrazování – MFM (*Magnetic Force Microscopy*) a SSFM (*Scanning Superconducting QUantum Interference Device(SQUID) Force Microscopy*).

- **Geomagnetická měření**

Magnetické vyhledávání uhlí, vody, minerálů, zlata, ropy, plynu, magnetické mapování a měření magnetických vlastností skal.

Geofyzikální metody jsou také používány k nalezení potrubí, vedení nebo ocelových výplní betonových základů ve stavebnictví, k nalezení zakopaných barelů s toxickým materiálem v ekologii, k nalezení základů starých budov a zasypaných studní, pohřbišť, starých cest, pecí, výhní, smetišť, příkopů, cest, truhlic s drahocenným obsahem, starých, člověkem vyrobených předmětů v archeologii.

- Vesmírný výzkum

Hlubokovesmírná a planetární magnetometrie – měření magnetosfér planet a meziplanetárního prostoru.

Měření magnetických polí na palubách kosmických lodí.

Měření magnetických polí

V této kapitole jsou popsány metody a přístroje používané pro měření magnetického pole v dostatečné vzdálenosti od feromagnetických předmětů [4], [6], [7]. V takovém případě platí jednoznačný vztah mezi intenzitou a indukcí magnetického pole $\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mathbf{H}$; obvykle se používá jednotek magnetické indukce a často se (ne zcela korektně) mluví pouze o velikosti magnetického pole v jednotkách Tesla (T). Zejména v anglicky mluvících zemích se často ještě setkáme s jednotkou Gauss ($1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$). Přístroje pro měření magnetického pole viz (obr. 2.31) se označují jako teslametry, někdy též jako magnetometry (angl. Magnetometers). Termínem "gaussmetr" se pak obvykle označují přístroje pracující s Hallovými sondami a používané k měření intenzity magnetického pole i v těsné blízkosti feromagnetik.

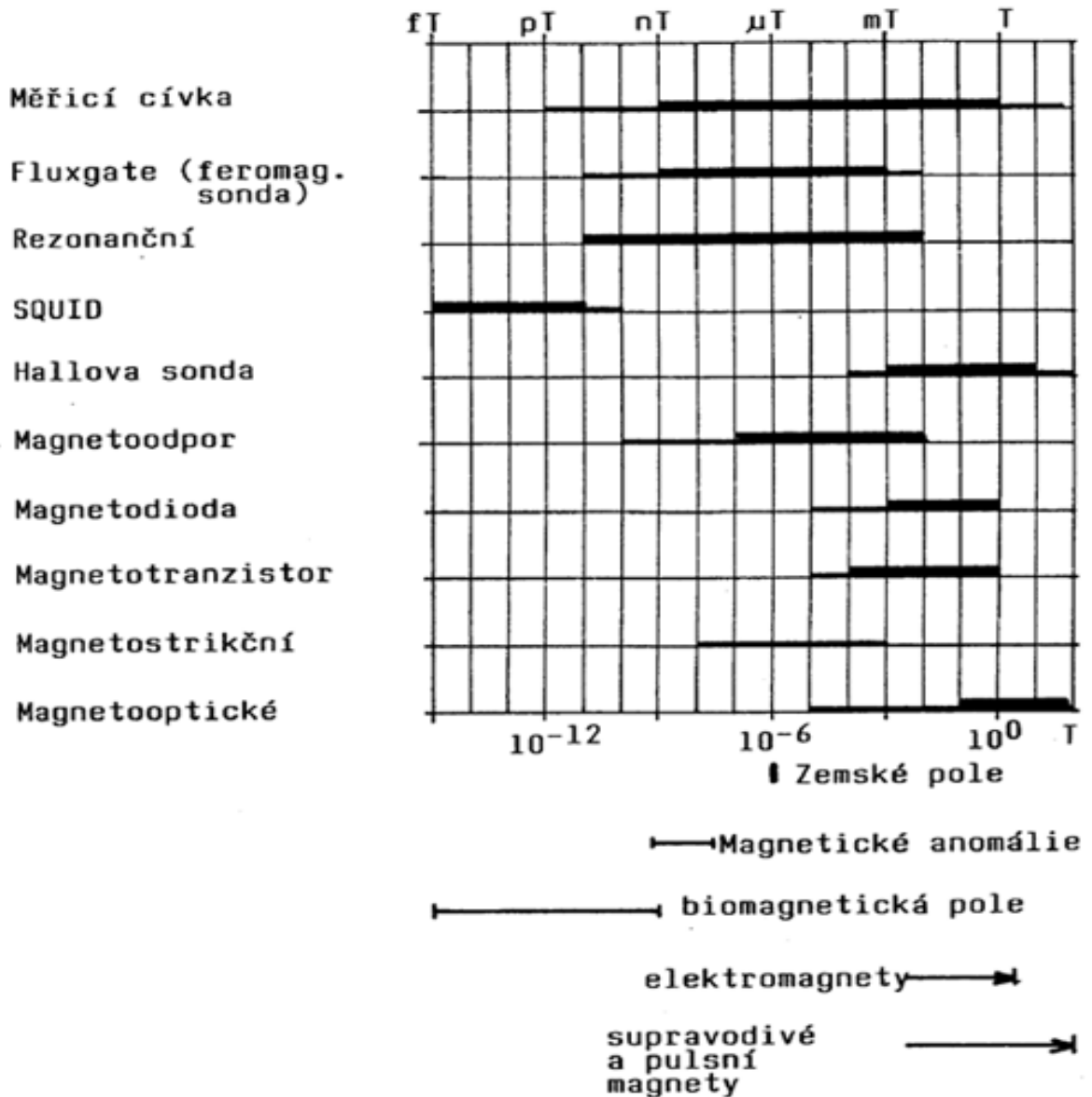
K měření magnetických polí se používá čidel založených na desítkách různých fyzikálních principů. Při volbě vhodné metody je nutno přihlížet zejména k těmto hlediskům:

- rozsah velikostí měřeného pole
- rychlost jeho změn
- zda se požaduje určení směru měřeného pole.

Diagram na (obr. 2.17) porovnává rozsah citlivostí základních skupin senzorů magnetického pole. Na vodorovné ose jsou vyneseny rozsahy velikosti polí: od desítek T (pole supravodivých magnetů nebo impulsních cívek) přes pole dosahovaná v konvenčních magnetických obvodech (kolem 1 T), magnetické pole Země ($25 \div 60$) μT , jeho variace a anomálie (desítky nT) až po biomagnetická pole (řádu pT v případě lidského srdce, fT u mozku). U jednotlivých metod je vyznačen přibližný rozsah polí měřitelných prodávanými přístroji (tlustá čára) i publikované hodnoty dosažené u laboratorních přístrojů (tenká čára).

Zásadním problémem magnetických senzorů používaných při měření bývá neurčitost nuly, její chod s časem a teplotní drift. Dalšími důležitými parametry magnetických senzorů jsou spolehlivost, energetická náročnost, cena, odolnost proti vlivům prostředí (teplota, vlhkost, vibrace, přetížení extrémně silnými poli) a stálost konstanty. Rozlišovací schopnost bývá omezena vlastním šumem. Většina metod dále uvedených měří velikost pole v daném směru. K určení úplné informace jsou pak nutná tři ortogonální čidla; některé konstrukce umožňují s jedním sdruženým senzorem zároveň měřit velikost pole ve dvou (výjimečně i ve třech) směrech. Rezonanční metody jsou zpravidla skalární, měří tedy jen celkovou velikost pole. I s těmito přístroji lze však určit směr měřeného pole výpočtem z několika měření s použitím pomocného pole

známé velikosti a různých směrů; k tomu je však potřeba nejméně dvou pomocných cívek a početního zpracování naměřených hodnot. V praxi dosažitelná přesnost určení směru pole nebývá dostatečná.



Obr. 2.17 Porovnání rozsahů citlivostí základních skupin senzorů magnetického pole - převzato a upraveno z [7]

Indukční metody měření

Tato skupina přístrojů viz [6], [7], [9], [10] je založena na Faradayově indukčním zákonu dle [7]

$$u_i = -\frac{d\phi}{dt} = -N \frac{d}{dt} (\mu\mu_0 \vec{H}_0 \vec{S}), \quad (2.50)$$

kde u_i je indukované napětí [V],
 ϕ_c cívkový tok [Wb],
 S střední plocha cívky [m²],
 N počet závitů snímacího vinutí,
 μ permeabilita prostředí (ve vzduchu lze klást $\mu = 1$),
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ permeabilita vakua,
 H_0 intenzita měřeného pole [A/m].

Rozepsáním naznačené derivace dostáváme dle [7] základní vztahy pro jednotlivé typy indukčních čidel:

$$u_i = N\bar{S}\mu_0\mu \frac{d}{dt}\bar{H}_0 + N\mu_0\mu\bar{H}_0 \frac{d}{dt}\bar{S} + N\bar{S}\bar{H}_0\mu_0 \frac{d}{dt}\mu. \quad (2.51)$$

Příspěvek od: Indukční cívka + rotační cívka + „fluxgate“ sonda.

Indukční měřicí cívka

- vzduchová měřicí cívka

V obecném případě časově proměnného pole platí vztah dle [7]

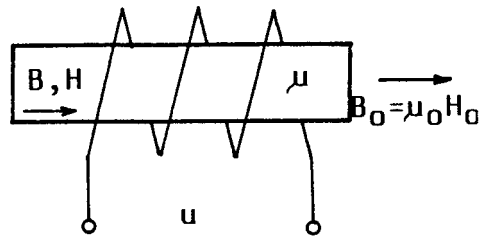
$$\Delta\bar{B} = \frac{\Delta\phi_c}{\bar{S}_c N} = k_c \Delta\phi_c = k_c \int_{t_1}^{t_2} u_i dt, \quad (2.52)$$

kde $\Delta\mathbf{B} = \mathbf{B}(t_2) - \mathbf{B}(t_1)$ [T],
 $\Delta\phi_c = \phi(t_2) - \phi(t_1)$ [Wb],
 $k_c = 1/S_c N$ je cívková konstanta [m²],
 N počet závitů cívky,
 u_i indukované napětí [V].

Pro periodické průběhy pak platí dle [7]

$$\bar{B}_m = \frac{U_s}{4f\bar{S}_c N}, \quad (2.53)$$

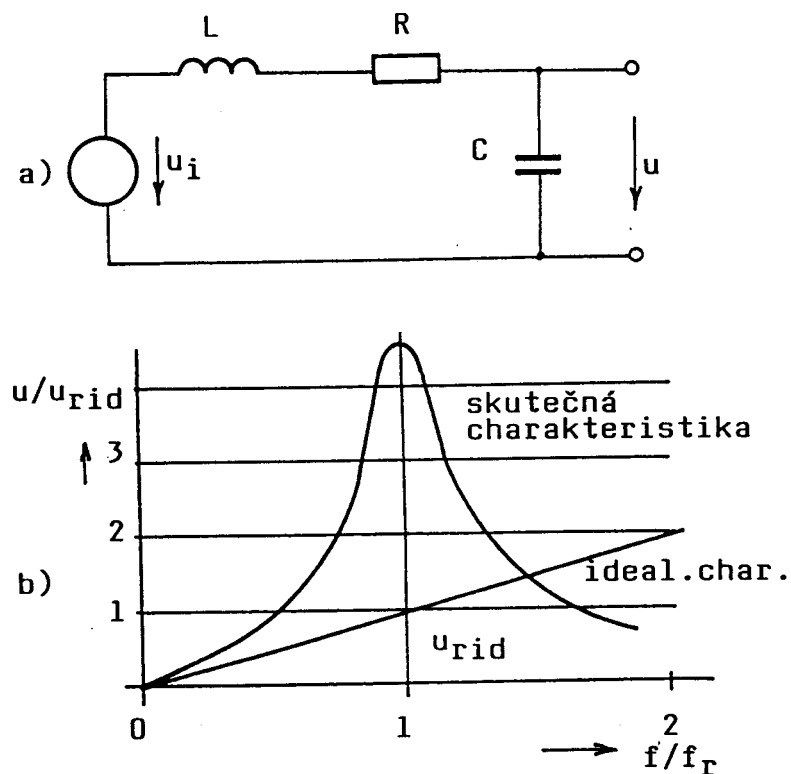
kde B_m je maximální hodnota indukce [T],
 U_s střední hodnota indukovaného napětí [V],
 f je kmitočet měřeného pole [Hz].



Obr. 2.18 K indukční měřicí cívce - převzato a upraveno z [7]

Citlivost indukční metody roste s kmitočtem měřeného pole f , počtem závitů měřicí cívky N a s cívkovou plochou S_c . Cívková plocha bývá omezena konstrukčními požadavky na celkový rozměr čidla i předpokládanou homogenitou měřeného pole. Nejčastěji používaným typem je vícevrstvá válcová cívka, která v případě nehomogenního pole měří přibližně průměrnou hodnotu magnetické indukce ve svém objemu. Pro případ nehomogenních polí je teoreticky nejvhodnější kulová cívka, která měří bodovou hodnotu pole ve svém středu. Kulová cívka je v praxi obtížně realizovatelná, proto se někdy aproximuje soustavou několika úzkých válcových cívek. Stejně konfigurace se používá pro vytváření homogenního magnetického pole.

Při zvyšování počtu závitů roste odpor cívky a její parazitní kapacita. Odpor cívky závisí dále i na průměru použitého drátu (ten je omezen celkovou hmotností a rozměry cívky); odpor cívky podstatně ovlivňuje šumové parametry připojených elektronických obvodů, v některých případech může být významný i vlastní ohmický šum. Parazitní mezizávitová kapacita může ovlivnit použitelnost cívky na vyšších kmitočtech. Ke snížení této kapacity se používá křížově vinutých cívek, cívek vinutých v několika sekcích nebo alespoň vinutí "nadivoko".



Obr. 2.19 K indukční měřicí cívce - převzato a upraveno z [5]

Střední průřez válcové cívky vinuté v tenké vrstvě na velkém poloměru lze odhadnout dle přibližného vztahu $S_c = \pi r_s^2$, kde r_s je střední poloměr cívky. Přesný výpočet musí respektovat geometrii vinutí a je možný jen u jednoduchých cívek vinutých přesně definovaným způsobem (např. do drážky, jako je tomu u etalonů indukce). Skutečnou konstantu cívek s mnoha závitů je však vhodnější určit měřením ve známém poli. Indukční cívku lze považovat (při napěťovém výstupu) za lineární jen pro kmitočty menší, než je nejnižší vlastní rezonanční kmitočet (jen pak totiž platí (2.52)). Náhradní schéma indukční měřicí cívky je na (obr. 2.19a). Ve skutečnosti se jedná o obvod s rozprostřenými parametry. Existuje několik rezonančních kmitočtů, parametry náhradního schématu jsou proto frekvenčně závislé. Typická kmitočtová závislost citlivosti indukční cívky v okolí nejnižšího rezonančního kmitočtu je na (obr. 2.19b) pro napěťový výstup. V případě, že měřené pole nemá sinusový charakter, je k jeho rekonstrukci nutno indukované napětí integrovat. Citlivé indukční cívky je často výhodnější používat v režimu "nakrátko", kdy vstupní obvody vyhodnocovací elektroniky pracují jako převodník proud-napětí (obr. 2.20). Parazitní kapacita v idealizovaném náhradním schématu je pak zkratována a lze ji v oblasti nízkých kmitočtů zanedbat. Pro výstupní napětí I/U převodníku dle (obr. 2.20) platí:

$$u_2 = \frac{R_2}{j2\pi fL + R} u_i = \frac{R2}{j2\pi fL + R} N\vec{S}2\pi f\vec{B}(t). \quad (2.54)$$

Pro $2.\pi.f.L \gg R$ pak bude citlivost cívky kmitočtově nezávislá dle [7]:

$$u_2 = \frac{R_2}{L} N\vec{S}\vec{B}(t). \quad (2.55)$$

Zjednodušená kmitočtová charakteristika indukčního teslametru s proudovým zesilovačem je na (obr. 2.20b). Ve skutečnosti dochází k poklesu citlivosti na vyšších kmitočtech, což je způsobeno tím, že přestává platit zjednodušené náhradní schéma z (obr. 2.19a), a kmitočtovou charakteristikou použitého zesilovače. Pro dosažení co největší indukčnosti při daném počtu závitů bývají indukční cívky s proudovým výstupem velmi krátké.

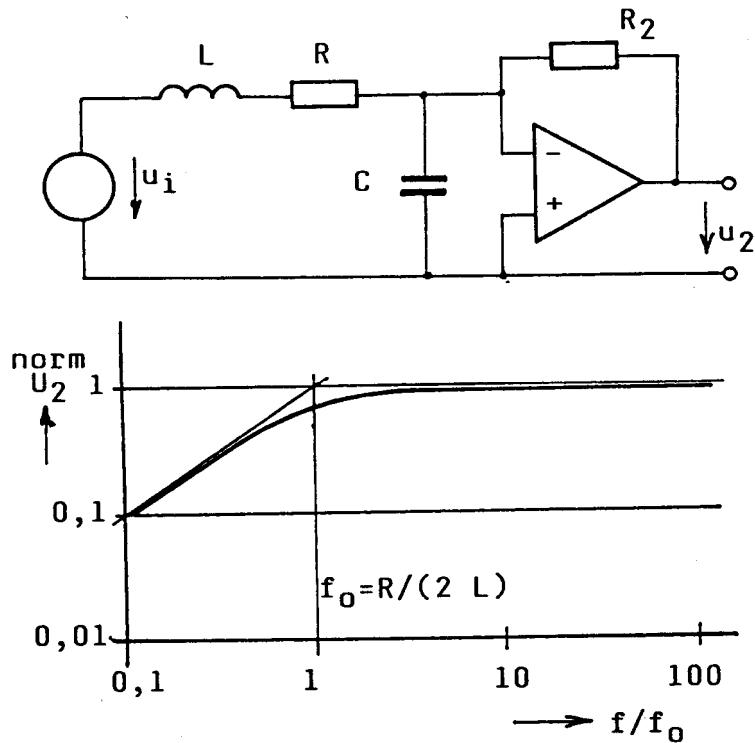
- měřicí cívka s jádrem

Feromagnetických jader se používá ke zvýšení citlivosti: u velmi štíhlých jader lze zanedbat demagnetizaci a platí pak $\mathbf{B} = \mu\mathbf{B}_0$, v obecném případě platí

$$\vec{B} = \frac{\mu}{1 + (\mu - 1)D} \vec{B}_0, \quad (2.56)$$

kde D je demagnetizační činitel ($0 \leq D \leq 1$),
 μ je relativní permeabilita jádra.

Použití feromagnetického jádra však vede ke vzniku nelinearit a zhoršení teplotní i kmitočtové závislosti parametrů měřicí cívky. Uchylujeme se k němu tedy jen při měření velmi slabých polí na nízkých kmitočtech, kdy napětí indukované do vzduchové cívky by bylo neměřitelně malé.

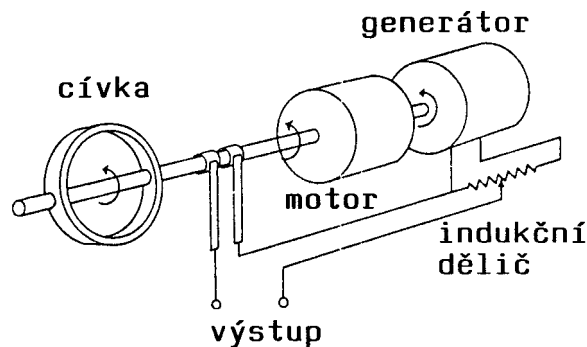


Obr. 2.20 K indukční měřicí cívce - převzato a upraveno z [7]

Rotační a vibrační měřicí cívky

Magnetometry s rotační cívkou (*Rotating Coil Magnetometers*) viz [4], [6], [7] mají vynikající dlouhodobou stabilitu. Základní nevýhodou jejich principu je nízká spolehlivost (pohyblivé díly, kartáče) a vysoká spotřeba energie – nevhodné pro bateriové napájení. Schéma viz obr. 2.21.

Magnetometry s rotující cívkou mohou měřit průměrnou hodnotu značně nehomogenních polí, ve kterých již metoda NMR selhává.

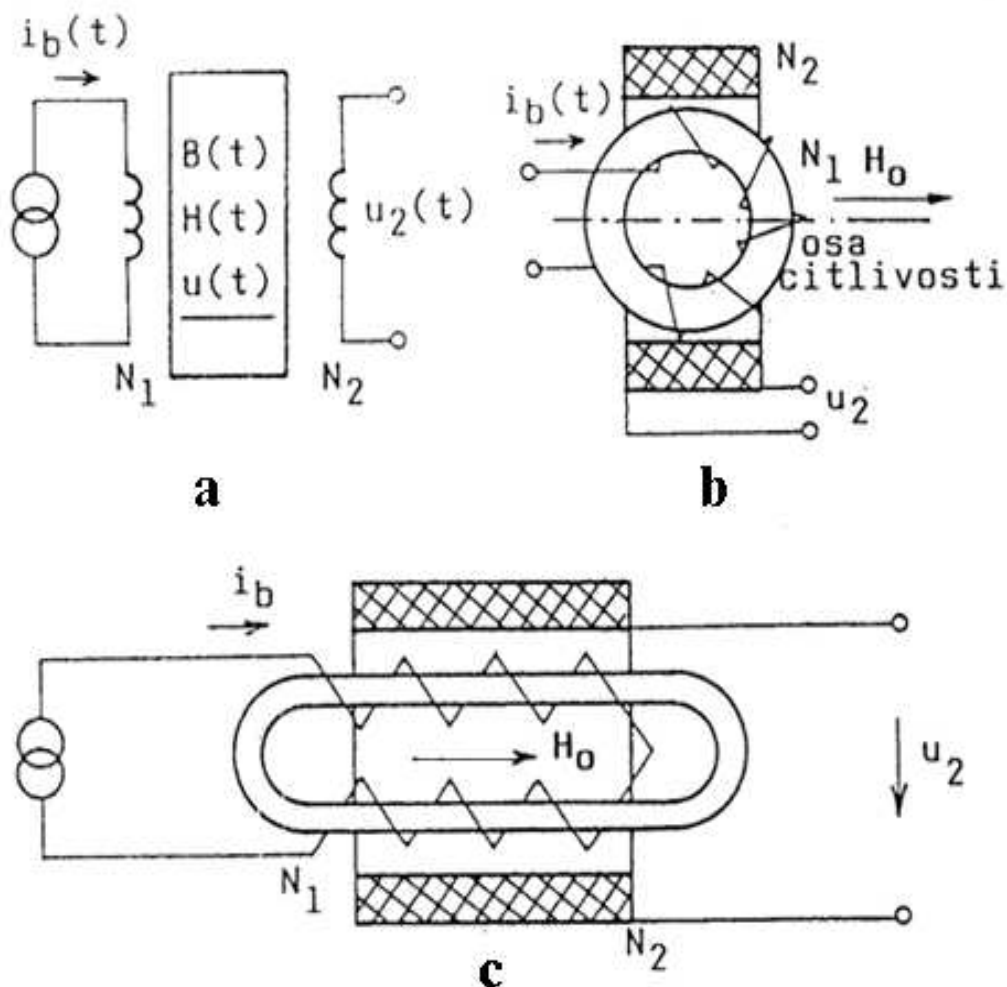


Obr. 2.21 Schéma magnetometru s rotační cívkou - převzato a upraveno z [7]

Magnetometry s vibrační cívkou (*Vibrating Coil Magnetometers*) viz [6], [7] měří převážně gradient pole (podle způsobu vibrace cívky); lineární periodický pohyb cívky se vyvolává např. piezoelektrickým měničem. Tyto magnetometry se používaly pro měření magnetických vlastností vzorků; dnes je obvyklejší metoda vibrujícího vzorku viz dále.

Feromagnetické sondy (v anglosaské literatuře nazývané jako „fluxgate“)

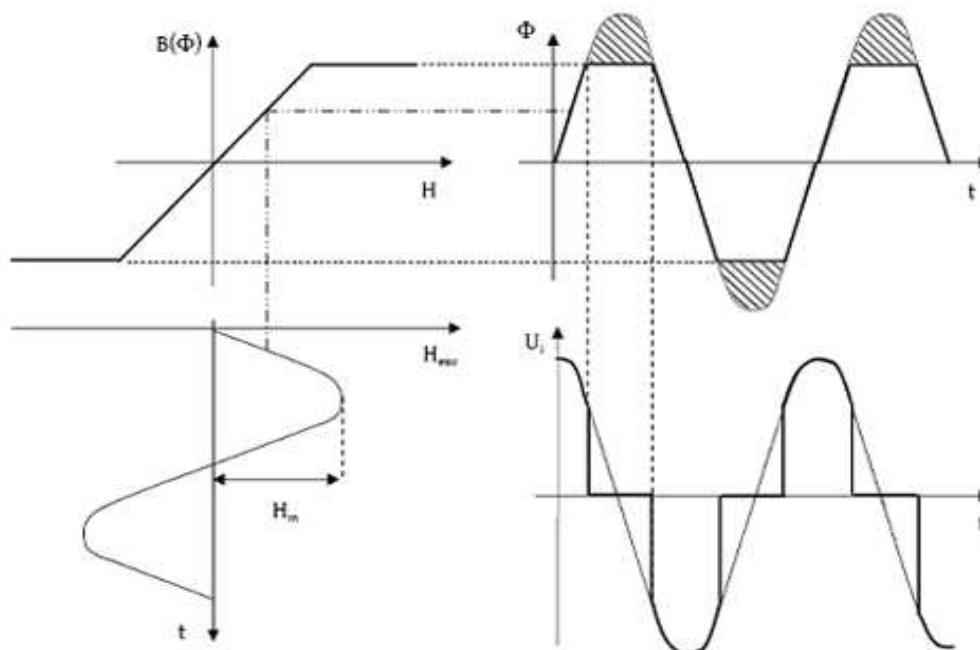
Základní princip viz [4, 5, 6, 7] nebo [9, 10, 11, 12] vychází z pravé části rovnice (2.51) a (obr. 2.22a). Praktické uspořádání feromagnetické sondy je na (obr. 2.22b a c).



Obr. 2.22 K feromagnetické sondě - převzato a upraveno z [7]

Jádro ve tvaru toroidu, resp. oválu je buzeno periodickým proudem $i_b(t)$ velké amplitudy: Jeho permeabilita je proto modulována s dvojnásobnou frekvencí (jelikož permeabilita je sudou funkcí intenzity budícího pole). Jinak vyjádřeno: základní idea „fluxgate“ sondy je založena na tom, že střídavý proud nasycuje jádro budící cívky stejným způsobem pro pozitivní i negativní hodnoty. Proto je napětí indukované ve snímací cívce symetrické (obr. 2.23) a obsahuje pouze liché harmonické, avšak pokud je v prostoru, kde se nachází „fluxgate“ sonda, konstantní magnetické pole, bude

celkové pole dáno součtem externího pole s polem generovaným budicí cívkou. Výsledné pole poté nebude symetrické, jelikož je k němu přidána stejnosměrná složka.



Obr. 2.23 Indukované napětí na snímací cívce bez přítomnosti externího pole - převzato a upraveno z [11]

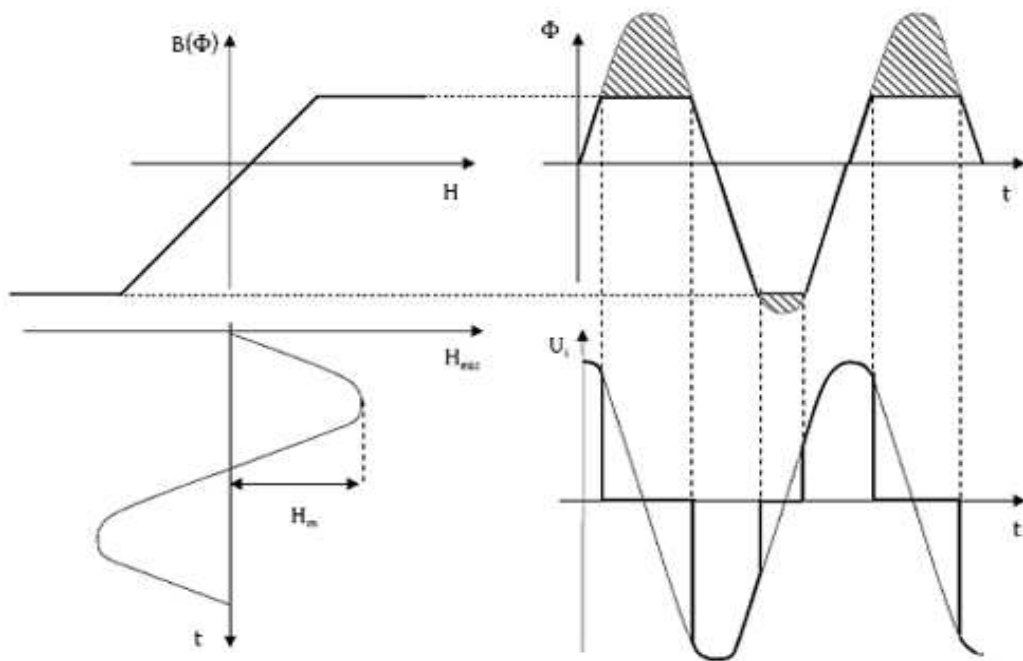
Výsledkem je, že magnetické jádro nebude nasycováno stejným způsobem pro pozitivní a negativní hodnoty, ale saturace bude na jedné straně větší a na druhé menší. Proto indukované napětí také nebude symetrické na rozdíl od případu bez externího pole, ale bude asymetrické. V přítomnosti stejnosměrného měřeného externího pole (obr. 2.24) \mathbf{H}_0 se bude do snímací cívky indukovat napětí o frekvenci $2f$ (a dalších sudých harmonických) podle rovnice (2.51). Starší typ sondy používaný do sedmdesátých let měl jádro ve tvaru dvou dlouhých rovnoběžných drátů nebo pásků s oddělenými budicími vinutími a společným vinutím snímacím. Sondy této konstrukce se doposud používají v defektoskopii.

Základní rovnice „fluxgate“ sondy s napěťovým výstupem je dle [7]

$$u_2(t) = N_2 \vec{S} \mu_0 \frac{d\mu(t)}{dt} \vec{H} . \quad (2.57)$$

Protože jádro toroidní sondy není dosti štíhlé ve směru vnějšího pole, nelze zanedbat demagnetizaci a velikost pole \mathbf{H} uvnitř feromagnetika bude odlišná od měřeného pole \mathbf{H}_0 . Pro indukci v jádře platí vztah (2.56); pro indukované napětí musíme psát dle [7]

$$u_2(t) = N_2 \vec{S} \frac{d\vec{B}}{dt} = N_2 \vec{S} \mu_0 \frac{d}{dt} \frac{\mu}{1 + (\mu - 1)D} \vec{H}_0 = N_2 \vec{S} \mu_0 \vec{H}_0 \frac{1 - D}{[1 + D(\mu(t) - 1)]^2} \frac{d\mu(t)}{dt} . \quad (2.58)$$



Obr. 2.24 Indukované napětí na snímací cívce s přítomností externího pole -převzato a upraveno z [11].

Teslametr s feromagnetickou sondou (*Fluxgate Magnetometer*)

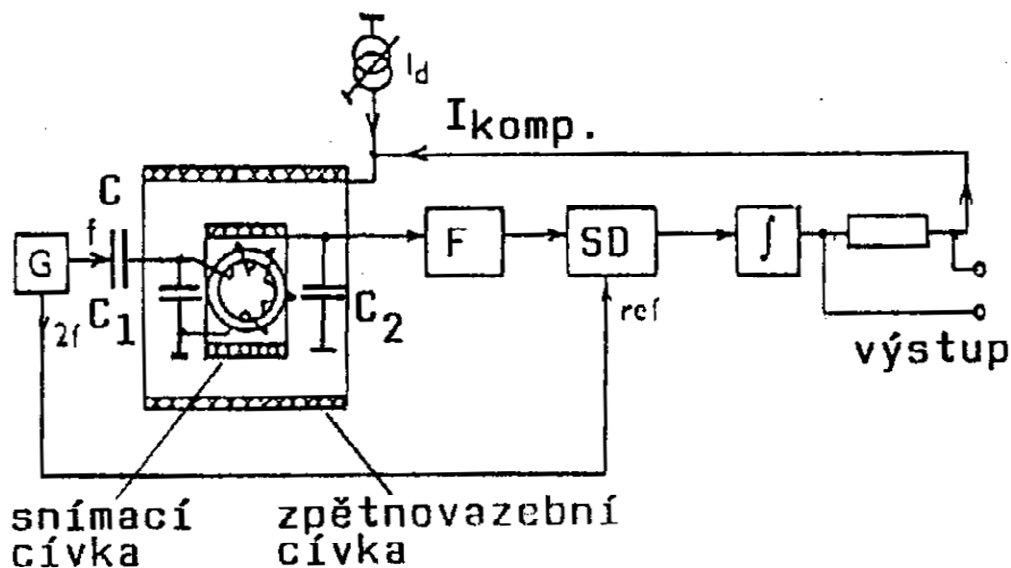
Blokové schéma „fluxgate“ teslametru viz [4], [6], [7], [9], [10], [11], [12] je na (obr. 2.25). Krystalem řízený generátor G je zdrojem budicího kmitočtu f a referenčního kmitočtu $2f$ pro řízení synchronního detektoru; číslicově se realizuje i požadovaný fázový posuv mezi těmito průběhy. Výkonový zesilovač napájí budicí vinutí sondy přes oddělovací kondenzátor C (případná stejnosměrná složka budicího proudu by totiž způsobila posuv nuly sondy). Budicí obvody by měly dosáhnout hluboké saturace magnetického materiálu jádra, aby se co nejvíce potlačil vliv remanence těch mikroskopických částí materiálu, které jsou (většinou vlivem poruch jeho struktury) obtížněji magnetovatelné. Obvykle se požaduje maximální hodnota budicího pole deset až stokrát větší, než odpovídá obvyklému "technickému nasycení"; omezením je u přenosných přístrojů potřebný výkon k buzení, jinak ohřívání jádra a budicího vinutí. Obsah druhé harmonické ve spektru budicího proudu by měl být co nejmenší (obvykle se požaduje potlačení vůči základnímu kmitočtu min. o 80 dB). Kondenzátor C_1 spolu s indukčností budicího vinutí může tvořit rezonanční obvod [13] naladěný na budicí kmitočet. Výsledkem je zvýšení špiček budicího proudu při stejné efektivní hodnotě.

Měřicí vinutí sondy může být paralelním kondenzátorem C_2 naladěno na druhou harmonickou výstupního napětí. Vyhodnocovací obvody se skládají ze selektivního zesilovače [14], [15], [16] a synchronního detektoru. Teslametr pracuje ve zpětnovazebním zapojení: proud kompenzačního vinutí I_k vyvolává pole, které kompenzuje pole měřené. Výstupem teslametru je pak proud do kompenzační cívky (měřený jako úbytek napětí na zpětnovazebním odporu R). Integrátor filtruje střídavou složku výstupního napětí synchronního detektoru a zároveň zajišťuje dostatečné zesílení

zpětnovazební smyčky. Vlastní sonda pracuje v tomto zapojení pouze jako nulový indikátor; její nelinearita nebo změny citlivosti jsou tedy účinně potlačeny, konstanta teslametru je určena pouze konstantou zpětnovazební cívky. Stabilita nuly teslametru je však nadále závislá na offsetu sondy. Frekvenční charakteristika sondy závisí na použitém materiálu jádra, vyhodnocovacích obvodech a budícím kmitočtu. Běžné sondy s buzením 5 až 15 kHz mohou měřit od stejnosměrného pole až do cca 1 kHz. Střídavá pole s kmitočtem nad jednotky Hz je však vhodnější měřit přímo indukční cívkou.

Sonda měří vždy pole v ose snímací cívky. Toroidní sonda může být vybavena dvěma navzájem kolnými snímacími cívkami a měřit tak současně velikost pole ve dvou směrech: toto uspořádání se používá u kompasů. Třísložkové teslametry pro geofyziku nebo kosmický výzkum pracují však většinou s třemi samostatnými jednoosými senzory. V tomto případě je výhodnější sondy umístit do středu trojice větších kompenzačních cívek, než kompenzovat každou sondu samostatně: sondy tak nejsou vystaveny velkým polím kolmo k jejich měřicí ose, která by mohla ovlivnit jejich parametry a degradovat dlouhodobou stabilitu.

Podobně jako indukční cívky mohou být feromagnetické sondy provozovány v režimu "nakrátko", tj. s proudovým výstupem [6], [7]. Převodník proud/napětí na vstupu vyhodnocovací elektroniky musí být v tomto případě řešen dostatečně rychlým obvodem. Citlivost sond s proudovým výstupem je nepřímo úměrná počtu závitů snímacího vinutí. Toto vinutí by mělo obemykat jádro sondy co nejtěsněji.



Obr. 2.25 Blokové schéma „fluxgate“ magnetometru - převzato a upraveno z [7]

kde G je generátor signálu f a $2f$ pro synchronní detektor,
 F – pásmová propust' a zesilovač,
 SD – synchronní detektor,
 ∫ – integrátor.

Magnetogalvanická čidla

Jsou to senzory založené na působení magnetického pole na nosiče proudu v polovodiči.

Hallova sonda

Hallovo napětí U_H [V] o velikosti

$$U_H = R \frac{I}{d} \vec{B}, \quad (2.59)$$

kde d je tloušťka vzorku [m],

R Hallova konstanta [$\Omega \cdot \text{m/T}$],

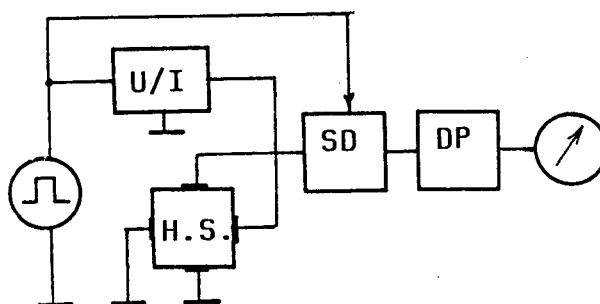
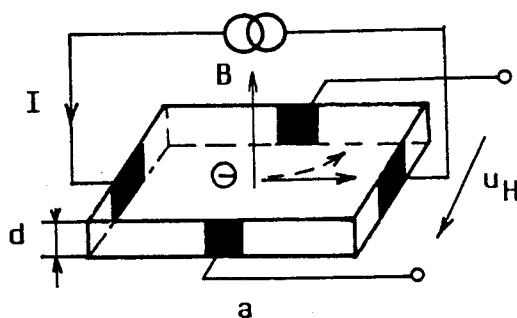
I pomocný proud [A],

B indukce měřeného pole [T],

se objeví na kontaktech ve směru kolmém k proudu i působícímu poli (obr. 2.26). Příčinou tohoto jevu je deformace proudových čar vlivem Lorenzovy síly a následný vznik elektrického pole. Hallova konstanta je nepřímo úměrná hustotě nosičů proudu, je tedy u polovodičů značně vyšší než u vodičů: při stejné velikosti proudu se totiž musí nosiče proudu pohybovat rychleji u materiálu s nižší hustotou nosičů, Lorenzova síla pak je větší.

Křemíkové senzory jsou použitelné pro měření polí v rozsahu asi od 1 mT do 1 T. Pro měření polí slabších (od 100 nT) se hodí čidla z antimonidu india. Velikost aktivní plochy sahá od 0,5 x 1 mm u bodových čidel až po několik mm² u sond pro měření slabých polí.

Hallovy sondy mohou pracovat v širokém rozsahu teplot (omezením je většinou odolnost pouzdra a přívodů). Frekvenční limit je typicky 1 MHz; nejvíce se ovšem používají k měření polí stejnosměrných. Hlavní nevýhodou je teplotní závislost citlivosti (tu lze částečně kompenzovat), offset a jeho teplotní drift a šum. Výhodou je, že sondy neobsahují feromagnetikum, lze s nimi měřit i v těsné blízkosti feromagnetik. Viz [6], [7], [9], [10].



Obr. 2.26 K Hallově sondě - převzato a upraveno z [7]

Magnetodioda

Při napájení konstantním proudem je citlivost magnetodiody až o řád vyšší než citlivost Hallové sondy stejných rozměrů, podstatnou nevýhodou je však malá linearita. U nových přístrojů se však pro své nevýhody již nepoužívají. Viz [7].

Magnetotranzistor

Struktura magnetotranzistoru obsahuje dvojitý kolektor. Měřené pole ohýbá dráhu nosičů směrem k jednomu kolektoru, proudová symetrie je porušena. Výstupní veličinou je rozdíl kolektorových proudů.

Magnetotranzistory se v praxi v současné době již nepoužívají. Viz [7].

Magnetoodpor

Využívá zvýšení odporu nedotovaného polovodiče při působení magnetického pole (tzv. izotropní magnetorezistivní jev). Viz [6], [7], [9]. Magnetorezistivní jev byl objeven Thomsonem v roce 1857 [6], ale pouze poslední tři dekády výzkumu a vývoje umožnily jeho aplikaci v průmyslových senzorech a čtecích hlavách magnetických záznamových zařízení. Magnetorezistivní senzory jsou vhodné pro středně silná pole např. systémy pro navigaci a měření pozice pomocí Zemského magnetického pole.

Tento druh čidla je na ústupu: nevýhodou je malá citlivost a kvadratický tvar charakteristiky. Částečné linearizace je možno dosáhnout polarizací pomocným polem (např. permanentního magnetu). Pracovní bod se tak posune do části parabolické

charakteristiky s větší linearitou a citlivostí a je pak možno určit znaménko měřeného pole.

Feromagnetická magnetorezistivní čidla

Na rozdíl od klasického polovodičového magnetoodporu jsou magneto-rezistivní čidla vyrobena z magnetických materiálů (většinou z permalloye). Využívají anizotropního magnetorezistivního jevu: měrný odpor feromagnetického materiálu ve směru vektoru magnetizace (ρ_{\parallel}) je poněkud nižší než měrný odpor ve směru kolmém (ρ_{\perp}). Relativní změna odporu

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \frac{\rho_{\perp} - \rho_{\parallel}}{\rho_{\parallel} + \rho_{\perp}}, \quad (2.60)$$

kde ρ_{\parallel} je měrný odpor ve směru vektoru magnetizace [Ωm],

ρ_{\perp} měrný odpor ve směru kolmém [Ωm],

$\rho_0 = (\rho_{\perp} + \rho_{\parallel})/2$ je průměrná hodnota měrného odporu [Ωm],

$\Delta\rho = \rho_{\perp} - \rho_{\parallel}$ je rozdíl mezi měrným odporem ve směru vektoru magnetizace a měrným odporem ve směru kolmém k magnetizaci [Ωm],

má hodnotu několik procent (4.2 % u Py82). Tento jev je způsoben závislostí rozptylu elektronů na magnetickém stavu látky. Citlivost feromagnetických magnetorezistivních čidel je asi 50x vyšší než citlivost Hallovy sond, kmitočtový rozsah sahá až do MHz. Na tomto principu pracují i magnetorezistivní čtecí hlavy pro magnetické paměti. Proužek tenké vrstvy permalloye je vytvořen napařením ve vakuu. Během tohoto procesu působí zároveň v rovině vrstvy magnetické pole: tím se ve vzniklé vrstvě vytvoří jednoosá anizotropie se snadným směrem ve směru pole. Tento proužek je trvale zmagnetován polem H_0 (typická velikost tohoto anizotropního pole je 300 A/m). Působí-li zároveň měřené pole H v rovině tenké vrstvy a kolmo ke směru pásku, je vektor magnetizace stočen o úhel ϕ , pro který platí $\sin\phi = H/H_0$. Zde tedy předpokládáme ryze rotační proces, při kterém nedochází k pohybu doménových stěn, ale pouze ke změně směru jejich vektoru magnetizace.

Magnetorezistivní feromagnetická čidla jsou perspektivní pro měření středně silných polí (v rozsahu cca od 1 μT do 10 mT). Používají se v senzorech polohy a pro bezkontaktní měření malých stejnosměrných proudů. S použitím tenkovrstvých koncentrátorů pole bylo dosaženo rozlišení 100 pT. Viz [6], [7], [9].

Vláknové a magnetooptické senzory

Moderní senzory využívající techniky **optických vláken** jsou založeny na magnetostričním jevu: prodloužení optického vlákna pokrytého napařenou vrstvou magnetického materiálu se měří tzv. Mach-Zenderovým interferometrem. Zdrojem světla pro obě ramena (měřicí i referenční) je laserová dioda. Interferenční proužky vzniklé na sčítacím uzlu jsou indikovány fotodetektory; tak je teoreticky možno detekovat prodloužení měřicího ramene až o 10^{-13} m, což odpovídá citlivosti 10 pT. Ve skutečnosti je tento druh magnetometru extrémně citlivý na otřesy a teplotní změny: skutečná citlivost je asi 1 nT. Tento druh senzorů není v praxi rozšířen [6].

Magnetooptická čidla

Jsou založena na Faradayově jevu: stáčení polarizační roviny světla prostupujícího některými materiály závisí na působícím magnetickém poli. Vzhledem k nízké citlivosti se tento jev používá jen k měření silných polí; výhodou je velmi malá doba odezvy - tímto způsobem je možno detekovat i pole řádu GHz. Tohoto jevu se používá i v některých magnetooptických záznamových systémech. Příbuzný je Kerrův jev: stáčení polarizační roviny odraženého světla od magnetického stavu povrchové vrstvy. Magnetooptická čidla se v současné době prakticky používají jen v záznamové technice. Viz [6], [7].

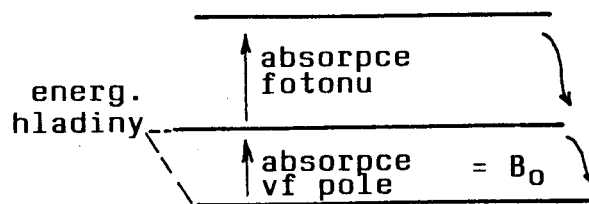
Rezonanční teslametry (*Resonance Magnetometers*)

Tyto přístroje jsou z principu skalárního typu: výstup závisí pouze na velikosti měřeného pole. Směr pole lze určit nepřímými metodami, obvykle se však k tomu používá čidel pracujících na jiném principu (převážně „fluxgate“). [6]

Opticky buzený magnetometr (*Optically Pumped Magnetometer*)

(též nazývaný rubidiový nebo cesiový magnetometr) viz [4], [6], [7], [9] je založen na Zeemanově jevu: spektrální čáry se působením stejnosměrného magnetického pole štěpí, rozdíl energií nově vzniklých jemných čar je úměrný velikosti pole. Valenční elektron cesiového atomu se v přítomnosti vnějšího magnetického pole může nacházet ve třech energetických hladinách (obr. 2.27): dvě s nižší energií jsou blízko sebe, přechodu mezi nimi odpovídá radiofrekvenční spektrální čára. Rozdíl mezi energiemi a tedy i odpovídající vlnová délka je úměrný měřenému magnetickému poli. Třetí stav je charakterizován mnohem větší energií: přechodu na jednu z nižších hladin odpovídá spektrální čára na optickém kmitočtu. Cesiové páry v sondě magnetometru jsou buzeny monochromatickým světlem, jeho absorpce je měřena fotodetektořem. Zároveň je vzorek buzen vysokofrekvenčním elektromagnetickým polem s proměnným kmitočtem. Při absorpci fotonu může přejít na vyšší energetickou hladinu pouze elektron nacházející se na prostřední energetické hladině, přechod z nejnižší hladiny na hladinu prostřední je vyvolán absorpcí vlnového pole. Přechod elektronů na nižší energetické hladiny je samovolný. Bez působení vlnového pole by po určité době elektrony skončily na nejnižší hladině, kde nemohou být světlem excitovány; absorpce světla by byla velmi malá. Maxima optické absorpce je dosaženo, odpovídá-li vlnová délka rozdílu energií nižších hladin; rezonance je velmi ostrá. V teslametru je kmitočet vlnového oscilátoru nastavován ve zpětnovazební smyčce tak, aby absorpce světla byla maximální. Tento kmitočet je pak velmi přesnou (skalární) mírou měřeného pole.

Nejčastěji používaná cesiová sonda má konstantu 7 MHz/mT, rubidiová sonda 28 MHz/mT. Rozsah měřitelných polí je 1 pT až 1 mT, měří se pouze velikost pole, nikoli jeho směr. Nevýhodou jsou značné rozměry sondy, složitost a energetická náročnost (příkon několik W). Hlavní výhodou je vysoká absolutní přesnost, šum je nejnižší z čidel pracujících při pokojové teplotě; sonda je zcela nemagnetická, používá se proto např. pro vyhledávání min ve vodě.

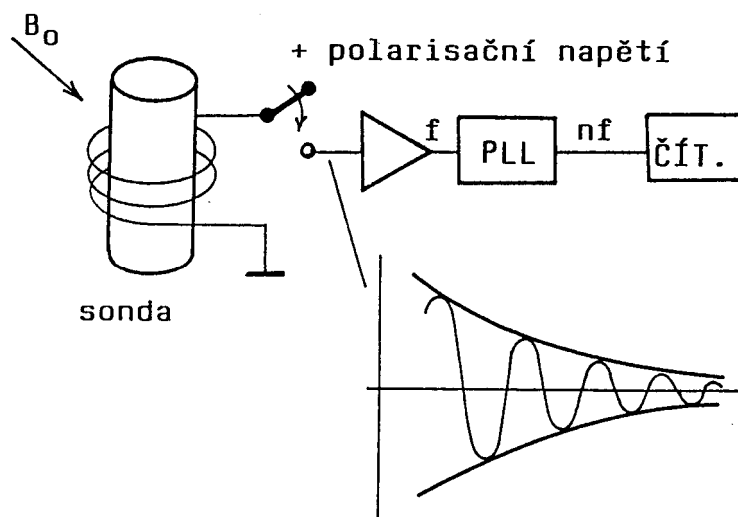


Obr. 2.27 K opticky buzenému magnetometru - převzato a upraveno z [7]

Protonový magnetometr (*Proton-Precession Magnetometer*)

je založen na jevu nukleární magnetické rezonance viz [4], [5], [6], [7], [9]. Protože protony v atomovém jádře mají elektrický náboj, je s jejich rotací kolem vlastní osy spojena existence malého magnetického pole. V případě, že osa rotace není totožná se směrem vnějšího stejnosměrného pole, dochází k precesi podobně jako u gyroskopu. Sonda protonového magnetometru obsahuje několik cm^3 kapaliny (obvykle benzen). Nejprve jsou všechny osy rotace protonů orientovány do směru budícího stejnosměrného pole vyvolaného válcovou cívku kolem vzorku (obr. 2.28). Po rychlém vypnutí budícího pole konají protony precesní pohyb kolem osy ve směru pole měřeného. Precesní frekvence je úměrná měřenému poli podle vztahu (2.61), kde gyromagnetický poměr γ je materiálová konstanta měrné kapaliny (pro proton jádra vodíku je $\gamma/2\pi = 42.57 \text{ MHz/T}$), \mathbf{B} je magnetická indukce.

$$f = \frac{\gamma_P}{2\pi} B \quad (2.61)$$



Obr. 2.28 Schéma protonového magnetometru - převzato a upraveno z [7]

Střídavé pole vyvolané precesním pohybem protonů se detekuje z napětí indukovaného do stejné cívky. Po zesílení se měřený kmitočet násobí pomocí obvodu PLL; jednak se zvýší rozlišovací schopnost přístroje, jednak se využije filtrační schopnosti PLL smyčky k potlačení šumu. Amplituda precesního signálu detekovaného měřicí cívku se rychle zmenšuje, osy rotace protonů se orientují do směru měřeného pole. Kmitočet je proto nutné určit z několika prvních period, používají se vzorkovací

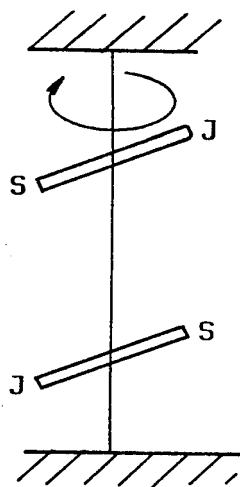
techniky. Protonové magnetometry mohou měřit pole od jednotek nT až do 1 mT, rozlišovací schopnost je u špičkových přístrojů 10 pT. I tento rezonanční teslametr měří skalárně, vyniká dlouhodobou stabilitou. Základní nevýhodou je požadavek na homogenitu měřeného pole (jinak je rezonance málo výrazná). Nejčastěji se používá v geofyzice (i v přenosném provedení); pro určení směru pole se často doplňuje trojicí feromagnetických sond.

Supravodivé magnetometry (SQUID)

SQUID (*Superconducting Quantum Interference Device*) je nejcitlivější metodou měření magnetického pole viz [6], [7], [9]. Přístroj je založen na Josephsonově jevu. SQUID magnetometr ve skutečnosti měří tok snímací "anténou" - supravodivou cívku o ploše několika cm^2 . Rozsah měřitelných polí je asi 10 fT až 10 nT; v praxi se SQUID používá vždy se soustavou rozdílových cívek jako gradiometru (často vyšších řádů). Základní nevýhodou je potřeba kapalného helia; SQUID s vysokoteplotními supravodiči nejsou za tím v praxi použitelné, protože mají nadměrně vysoký šum. SQUID magnetometry se používají pro měření slabě magnetických látek a v biomagnetických měřeních.

Metody založené na silových účincích

Citlivější přístroje této skupiny jsou založeny na magnetce zavěšené na křemenném vlákně viz [4], [7]. Společnou nevýhodou je značná teplotní závislost a zejména extrémní citlivost na vibrace: Přístroje musí být proto pevně připojeny k pilíři o velké seismické hmotnosti. Teslametry s magnetkami byly používány pro registraci variací magnetického pole Země v tzv. variačních stanicích, dnes jsou už prakticky vytlačeny automatickými variačními stanicemi založenými na protonovém rezonančním teslametru a trojici feromagnetických („fluxgate“) sond. Doposud jsou vyráběny tzv. **astatické magnetometry**: Jsou to měřiče gradientu se dvěma magnetkami na společném vlákně nastavenými tak, že celá soustava je necitlivá na homogenní pole (tj. přístroj je "astatizován") - viz obr. 2.29. Astatické magnetometry se stále hojně používají k měření magnetizace vzorků (např. slabě magnetických hornin).



Obr. 2.29 Schéma astatického magnetometru - převzato a upraveno z [7]

Měření slabě magnetických látek

Relativní permeabilita slabě magnetických látek dosahuje hodnot velmi blízkých jedničce, používáme u nich proto místo permeability výhradně magnetickou susceptibilitu κ . Pro slabě magnetické látky (až na vzácné výjimky) platí přesně rovnice pro magnetizaci \vec{M} :

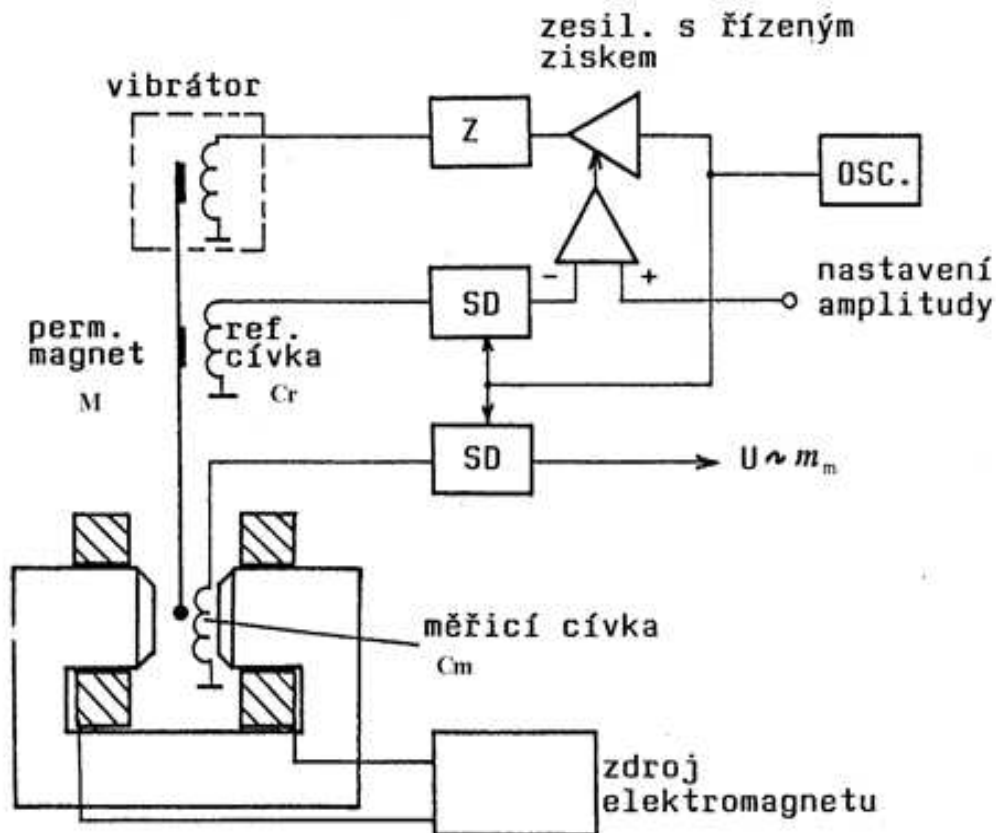
$$\vec{M} = \kappa \vec{H}. \quad (2.62)$$

Při měření slabě magnetických vzorků není díky nízkým hodnotám susceptibility většinou nutno uvažovat demagnetizaci. Pro obvyklé tvary vzorků totiž demagnetizační činitel D nenabývá příliš velkých hodnot (např. pro kouli $D = 1/3$), je možno psát $D\kappa \ll 1$ a platí:

$$\vec{H} = \frac{\vec{H}_0}{1 + D\kappa} \equiv \vec{H}_0. \quad (2.63)$$

Magnetometr s vibrujícím vzorkem (*Vibrating Sample Magnetometer*)

Typické uspořádání magnetometru s vibrujícím vzorkem je na obr. 2.30.



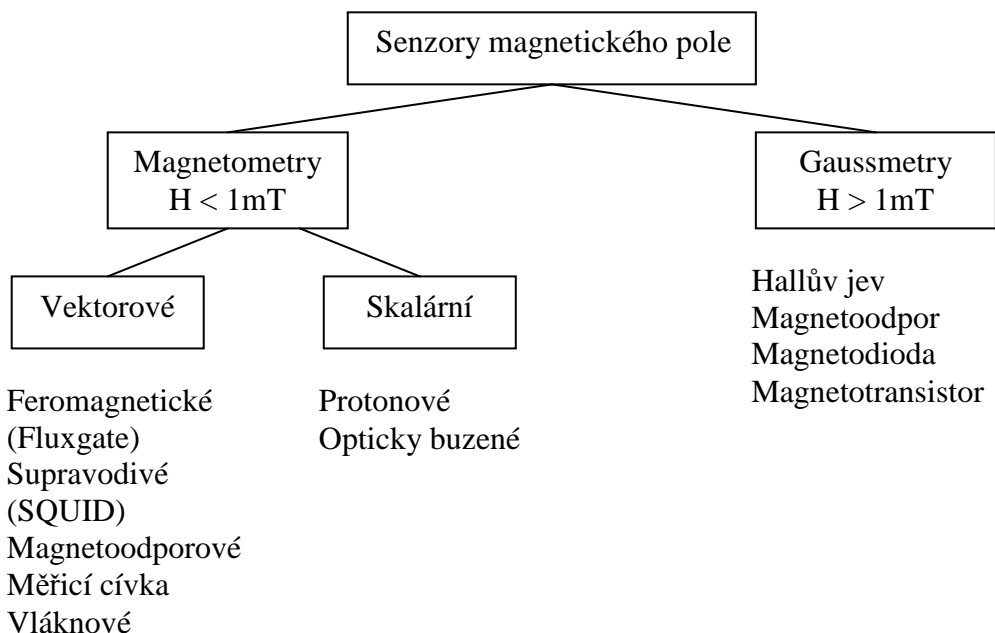
Obr. 2.30 Magnetometr s vibrujícím vzorkem - převzato a upraveno z [7]

Měřený vzorek je umístěn mezi pólovými nástavci elektromagnetu. Do měřicí cívky C_m s vertikální osou se při vibraci vzorku ve směru osy z indukují střídavé napětí. Frekvence vibrací je obvykle kolem 800 Hz, indukované napětí se zpracovává synchronním detektorem. Amplituda vibrací se měří pomocí napětí indukovaného do referenční cívky C_r pohybem permanentního magnetu M pevně spřaženého s měřeným vzorkem. Napětí referenční cívky je usměrněno druhým synchronním detektorem a slouží pro regulaci amplitudy kmitů ve zpětnovazební smyčce tvořené chybovým zesilovačem, zesilovačem s řízeným ziskem (analogová násobička), výkonovým budičem a elektromagnetickým vibrátorem. Měřicí cívka musí mít osu kolmou ke směru pole elektromagnetu proto, aby se neuplatnilo kolísání tohoto pole, které by jinak způsobilo signál zcela překrývající měřenou veličinu.

Vibrační magnetometry viz [4], [6] jsou univerzální přístroje, které umožňují i měření parametrů velmi malých vzorků feromagnetických materiálů (snímání magnetizačních charakteristik, měření Curieova bodu atp.).

3 Výběr vhodné metody

Senzory magnetického pole lze rozdělit do dvou kategorií dle síly pole a měřicího rozsahu, z čehož lze při výběru vhodné měřicí metody mimo jiné vycházet viz obr. 2.31.



Obr. 2.31 Rozdělení senzorů magnetického pole - převzato a upraveno z [9]

V současné době existuje několik typů přenosných magnetometrů fungujících na různých fyzikálních principech viz předchozí kapitoly, z čehož při výrobě v domácích podmínkách přicházejí v úvahu následující přístroje na měření magnetického pole:

- Přístroje založené na magneto-resistivních senzorech a senzorech založených na Hallově jevu viz [6], [7], [9], [10], které se ale v praxi nepoužívají pro měření magnetického pole Země, i když jsou citlivé až do hodnot intenzity magnetického pole Země. Používají se v průmyslu k detekování ferromagnetických objektů na krátké vzdálenosti, nebo k měření větších magnetických polí.
- „Fluxgate“ magnetometr (ferosonda) viz [4, 6, 7, 9], nebo [10, 11, 12] - má speciální magnetické jádro s velkou permeabilitou, které je syceno magnetickým polem a měří v jedné ose tohoto pole. Nejčastěji se používá systém s detekcí druhé harmonické. Výstup senzoru je amplitudově modulován měřeným polem a je potom demodulován pomocí synchronního detektoru zpět na DC nebo frekvenci blízkou nule. Protože sensor má lineární rozsah limitován do $1\mu\text{T}$, musí být větší pole kompensováno. Výstupní proměnnou je potom proud kompenzační cívky. Když je sensor orientován k měření horizontálního vektoru Zemského pole slouží jako magnetometr, když je orientován k měření horizontálního vektoru, slouží jako kompas. Typická citlivost těchto sensorů je 1Hz/nT . V praxi s nimi lze detekovat gradienty pole přibližně kolem 10nT .

- Protonový magnetometr viz [4], [5], [6], [7], [9] - ve stručnosti funguje tak, že zmagnetujeme protonově bohatou kapalinu, čímž se její protony srovnají do stejného směru a ustane jejich přirozený pohyb, po skončení magnetizace se obnoví jejich přirozený pohyb ve fázi a do snímací cívky se naindukuje napětí, které má frekvenci úměrnou okolnímu magnetickému poli. Tyto typy magnetometrů mohou měřit s citlivostí větší než 1 nT s relativně nízkou vzorkovací frekvencí jednoho měření za jednu až tři sekundy.

Vzhledem k velikosti měřicího rozsahu, ceně součástek, velikosti přístroje a spotřebě elektrické energie (možnost bateriového napájení), byl zvolen jako vhodný a technicky realizovatelný princip magnetometru typu „fluxgate“.

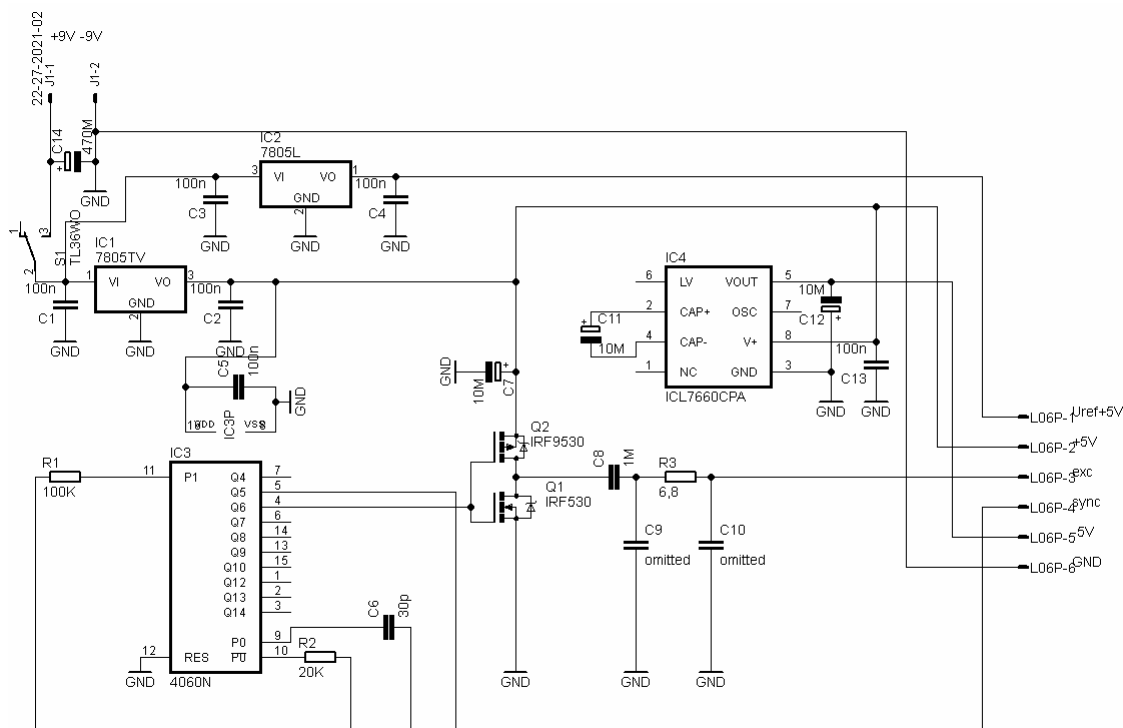
4 Realizace měřicího systému

Měřicí systém je sestaven z těchto částí: Napájecí zdroj a generátor budicího signálu, měřicí „fluxgate“ sonda, modul synchronního detektoru a převodníku signálu z měřicí sondy na napětí, které je úměrné velikosti magnetického pole a panelového měřidla, případně digitálního multimetru.

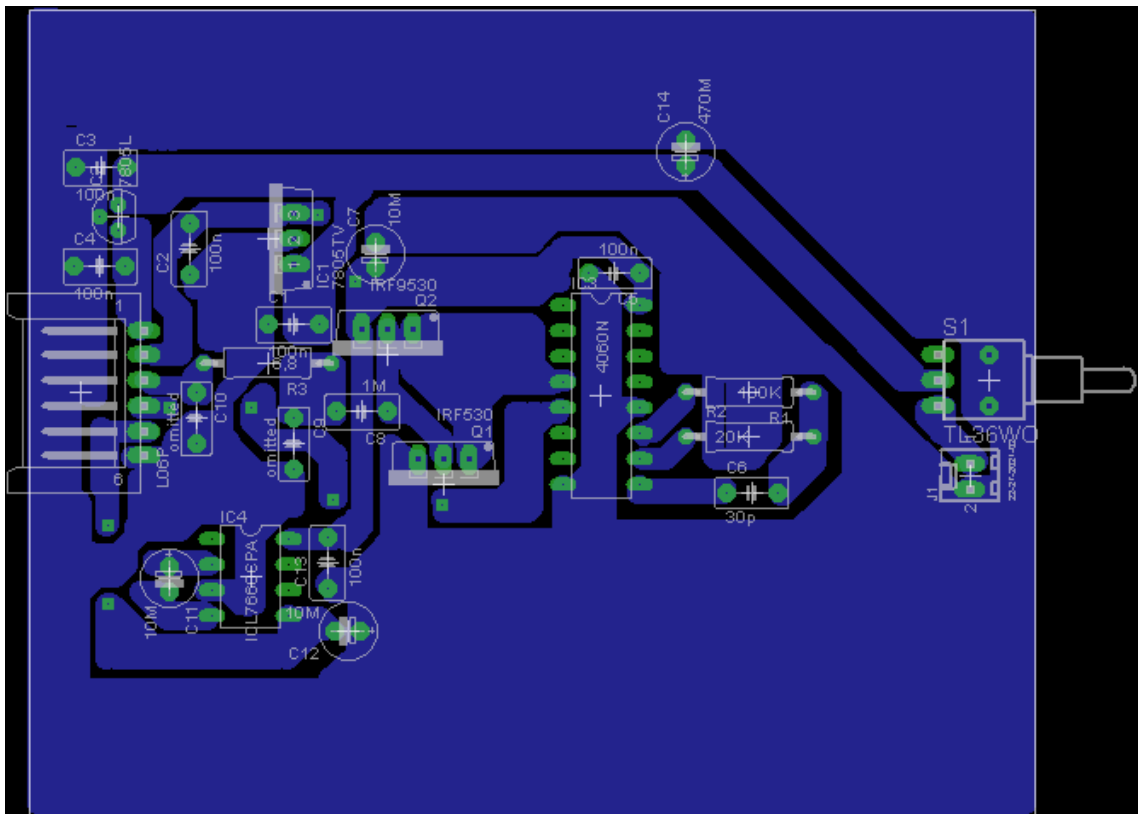
Měřicí systém byl rozdělen na dvě desky plošných spojů o velikosti 10x8cm, kvůli omezení volně použitelné verze softwaru pro návrh plošných spojů Eagle Layout Editoru 5.2.0, manuál viz [17], který se zdál uživatelsky přívětivější než druhý zkušební software Formica 4.4.0, který měl ve volně použitelné verzi omezení na počet součástek (40) a vývodů (150). Zapojení součástek viz schémata níže, katalogové listy použitých součástek viz [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26].

Napájecí zdroj a generátor budicího signálu

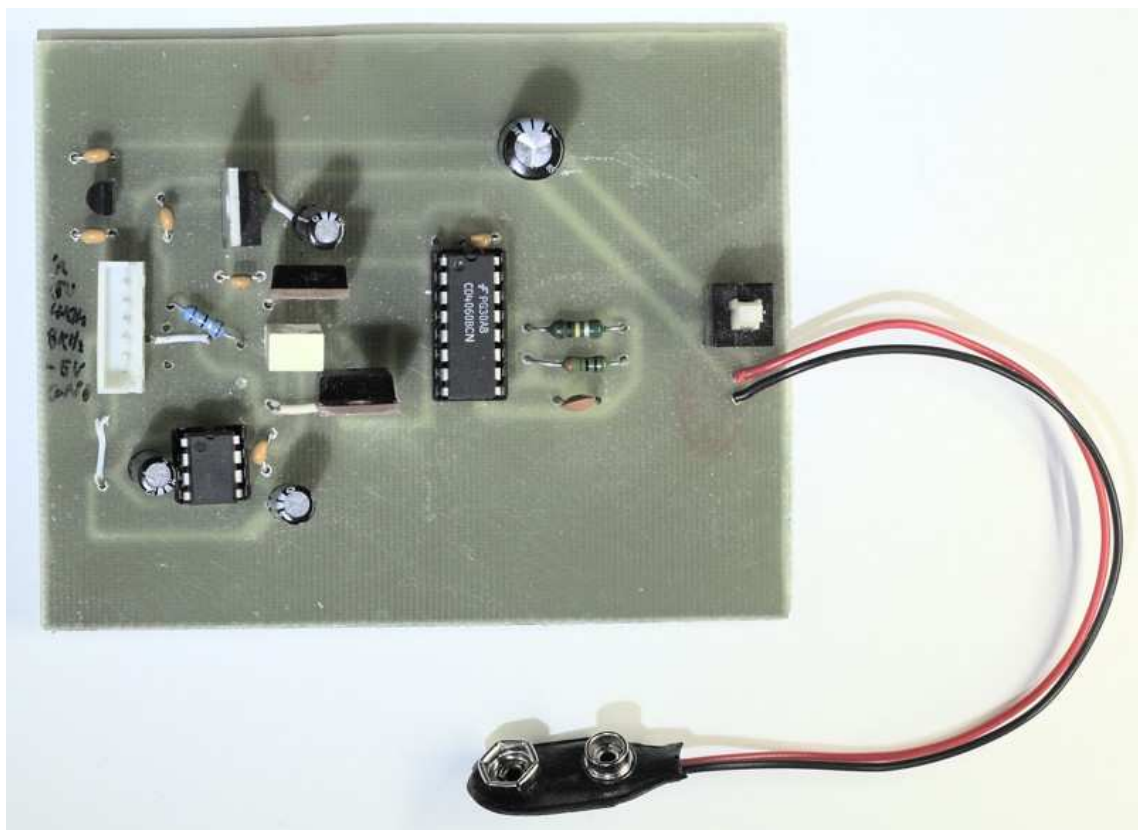
Vstupní napájecí napětí zdroje je bipolární: +9V, -9V
Výstupem napájecího zdroje je stabilizované napětí: +5V, -5V, referenční napětí +5V sloužící pro nastavení úrovně výstupního napětí (0), tvarový signál o frekvenci 4,25 kHz, který slouží pro napájení budicí cívky, signál o frekvenci 8,5 kHz, který slouží jako referenční signál pro synchronní detektor. Schéma napájecího zdroje a generátoru budicího signálu je uvedeno na obr. 4.1 převzaté a upravené z [27]. Osazovací schéma tohoto modulu se nachází na obr. 4.2. Osazená deska napájecího zdroje a generátoru budicího signálu je dokumentována na obr. 4.3.



Obr. 4.1 Schéma napájecího zdroje a generátoru budicího signálu



Obr. 4.2 Osazovací schéma napájecího zdroje a generátoru budicího signálu



Obr. 4.3 Osazená deska napájecího zdroje a generátoru budicího signálu

Popis funkce napájecího zdroje a generátoru budicího signálu

Napájecí napětí +5V pro napájení budicí cívky a dalších obvodů vytváří stabilizátor 7805 [20]. Referenční napětí pro nulování výstupního zesilovače zajišťuje stabilizátor 78L05 [26]. Jako zdroj záporného napájecího napětí byl použit měnič ICL7660 [21]. Jako generátor budicího a synchronizačního signálu slouží obvod CMOS 4060 [22]. Tento signál je pak pro účely buzení měřicí cívky zesílen pomocí dvojice komplementárních spínacích tranzistorů IRF9530 a IRF530 [18], [19]. Tento zesílený budicí signál přibližně obdélníkového tvaru, je pomocí oddělovacího kondenzátoru a pasivního filtru typu dolní propust převeden na bipolární střídavý signál, kterým je buzena měřicí cívka „fluxgate“.

Modul synchronního detektoru a převodníku signálu z měřicí sondy na napětí

Schéma modulu synchronního detektoru a převodníku signálu z měřicí sondy je uvedeno na obr. 4.4 převzaté a upravené z [27]. Osazovací schéma tohoto modulu se nachází na obr. 4.5. Osazená deska modulu synchronního detektoru a převodníku signálu z měřicí sondy je dokumentována na obr. 4.6.

Popis funkce modulu synchronního detektoru a převodníku signálu z měřicí sondy na napětí

Modul synchronního detektoru a převodníku signálu z měřicí sondy na napětí je napájen z napájecího zdroje +5V, -5V. Tímto napětím jsou napájeny použité operační zesilovače a analogový multiplexer CMOS 4052.

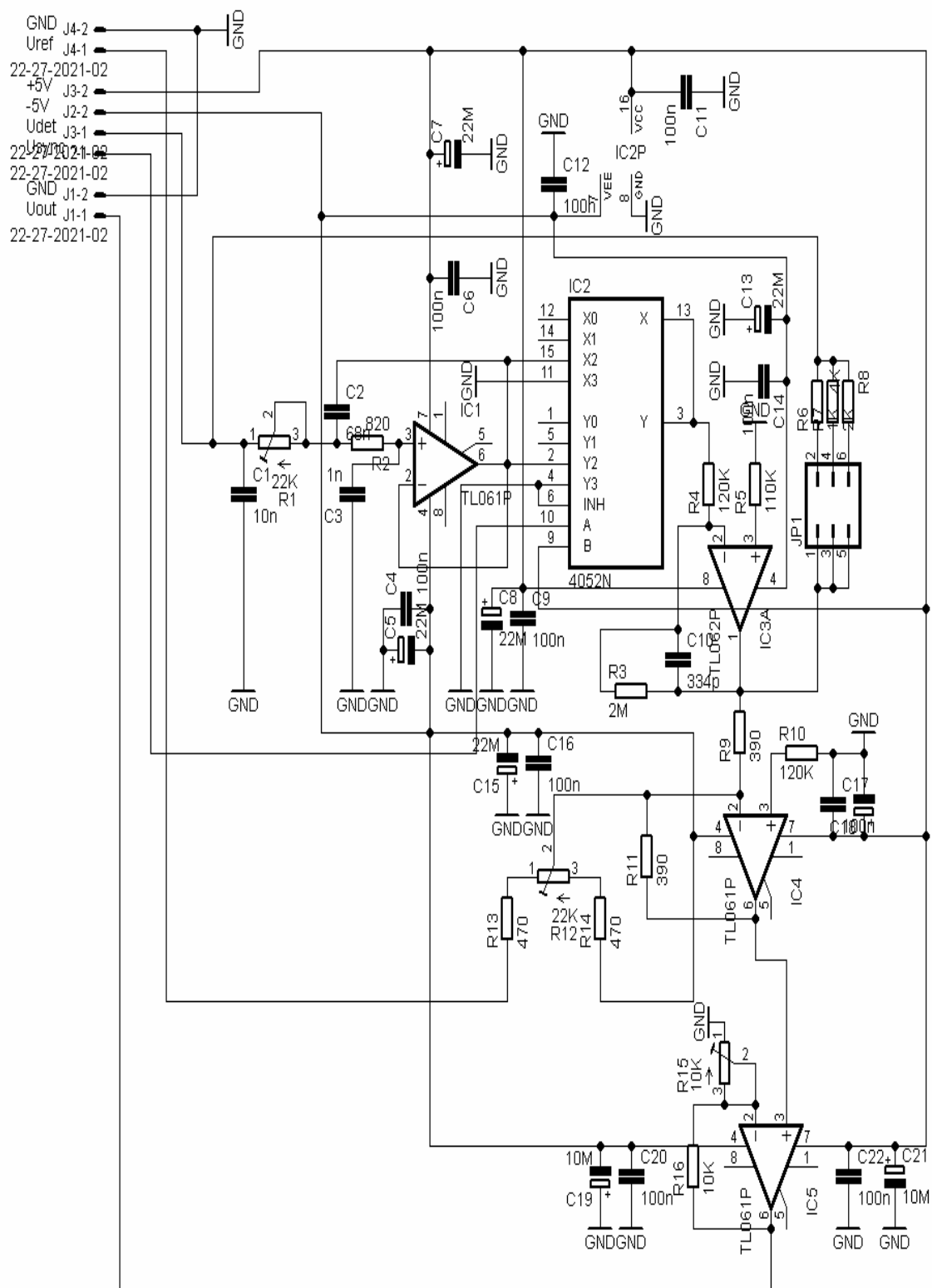
Referenční napětí +5V je přivedeno k nulovacímu obvodu u operačního zesilovače IC4. Budicí cívka „fluxgate“ senzoru je napájena ze zdroje budicího signálu o frekvenci 4,25 kHz.

Snímací cívka „fluxgate“ senzoru, respektive její výstupní signál je přes pásmovou propust přibližně 8,5 kHz přivedena na vstupy multiplexeru CMOS 4052, jehož výstup je hradlován synchronizačním signálem o kmitočtu $2f$ (8,5 kHz) z generátoru s obvodem CMOS 4060.

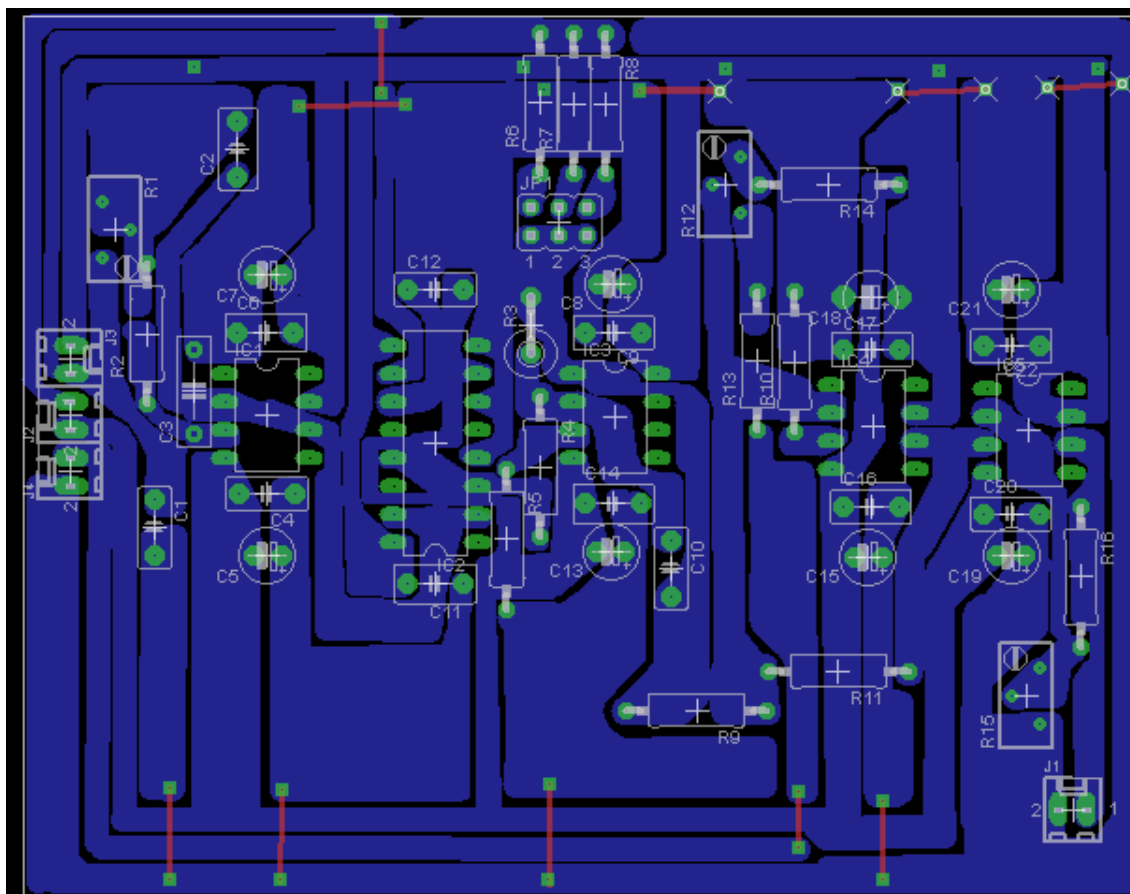
Výstup multiplexeru CMOS 4052 je přiveden na integrátor s operačním zesilovačem TL062 (využita je pouze jedna polovina obvodu), který synchronně hradlovaný signál ze sondy integruje a převádí jeho střední hodnotu na stejnosměrné napětí, které je úměrné intenzitě měřeného magnetického pole.

Další operační zesilovač IC4 slouží k nastavení nulové úrovně výstupního signálu (např. v závislosti na intenzitě magnetického pole pozadí) a operační zesilovač IC5 slouží jako výstupní zesilovač, který umožňuje nastavit svým zesílením nezávisle úroveň výstupního napětí.

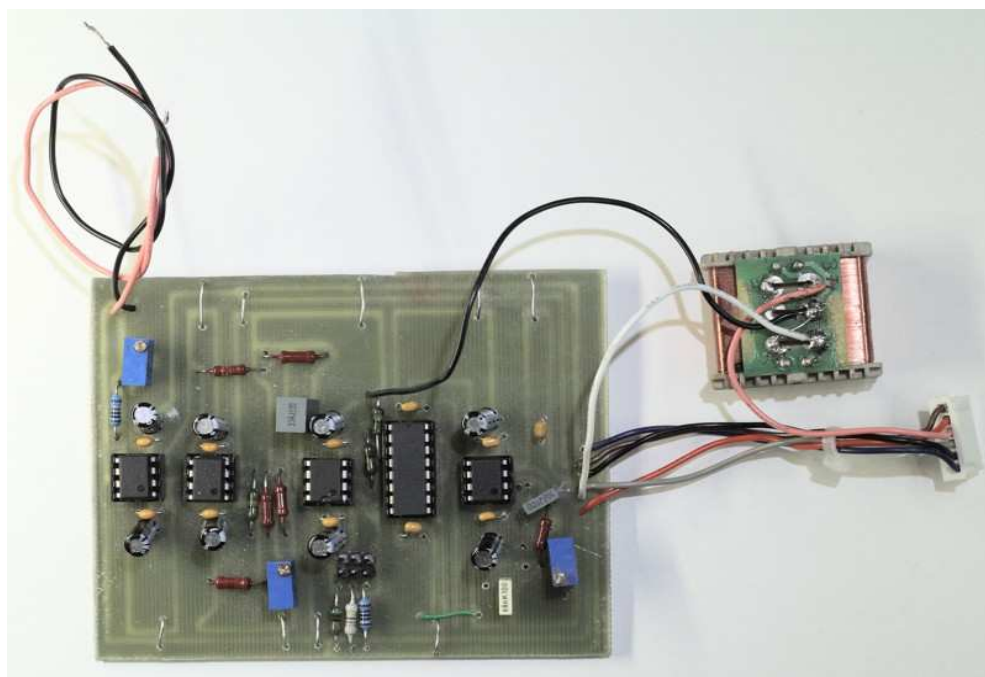
Výstupem posledního operačního zesilovače IC5 je stejnosměrné napětí, které je přímo úměrné velikosti intenzity nebo indukce měřeného magnetického pole.



Obr. 4.4 Schéma zapojení modulu synchronního detektoru a převodníku signálu z měřicí sondy na napětí



Obr. 4.5 Osazovací schéma modulu synchronního detektoru a převodníku signálu z měřicí sondy na napětí



Obr. 4.6 Osazená deska modulu synchronního detektoru a převodníku signálu z měřicí sondy na napětí

5 Naměřené hodnoty

Při testovacím měření byl experiment uspořádán viz obr. 5.1 tak, že zdroj magnetického pole tvořila smyčka přibližně čtvercového tvaru o rozměru 1,5 m x 1,5 m, napájená stabilizovaným zdrojem napětí Z, který ve spojení s reostatem R o hodnotě 100 ohmů tvořil regulovatelný zdroj konstantního proudu. Vzhledem k tomu, že vzdálenost d „fluxgate“ sondy FGS od „nekonečně dlouhého přímého vodiče“ l je v poměru k délce strany smyčky nepatrná, můžeme považovat intenzitu vypočtenou ve vzdálenosti 15 mm a 50 mm za minimálně ovlivněnou příspěvkem magnetického pole, který vytváří celá smyčka. „Fluxgate“ sonda FGS byla připojena k vyvinutému detektoru Det, který převáděl měřenou intenzitu magnetického pole respektive magnetickou indukci na napětí úměrné jejich velikosti, které bylo měřeno číslicovým multimetrem.

Bylo provedeno měření pro dvě vzdálenosti pro každou s 22 respektive 20 hodnotami nastaveného proudu obou polarit (směrů). Při každém jednotlivém měření bylo zaznamenáno pozadí magnetického pole při vypnutém zdroji proudu, tato hodnota a hodnota naměřená při zapnutém zdroji proudu byla zaznamenána. Z hodnot proudů byly vypočteny hodnoty magnetické indukce B_i dle (2.6), magnetické konstanty k dle (5.1), rozdíly magnetických konstant od průměrné magnetické konstanty Δk a provedena korekce výstupního napětí v závislosti na úrovni pozadí magnetického pole viz tab. 5.1 až 5.4. Grafické závislosti výstupního napětí detektoru na nastavovaném proudu, respektive hodnotě měřené magnetické indukce jsou zobrazeny na obrázcích 5.2, 5.3, 5.4 a 5.5.

Magnetickou konstantu k lze vypočíst z

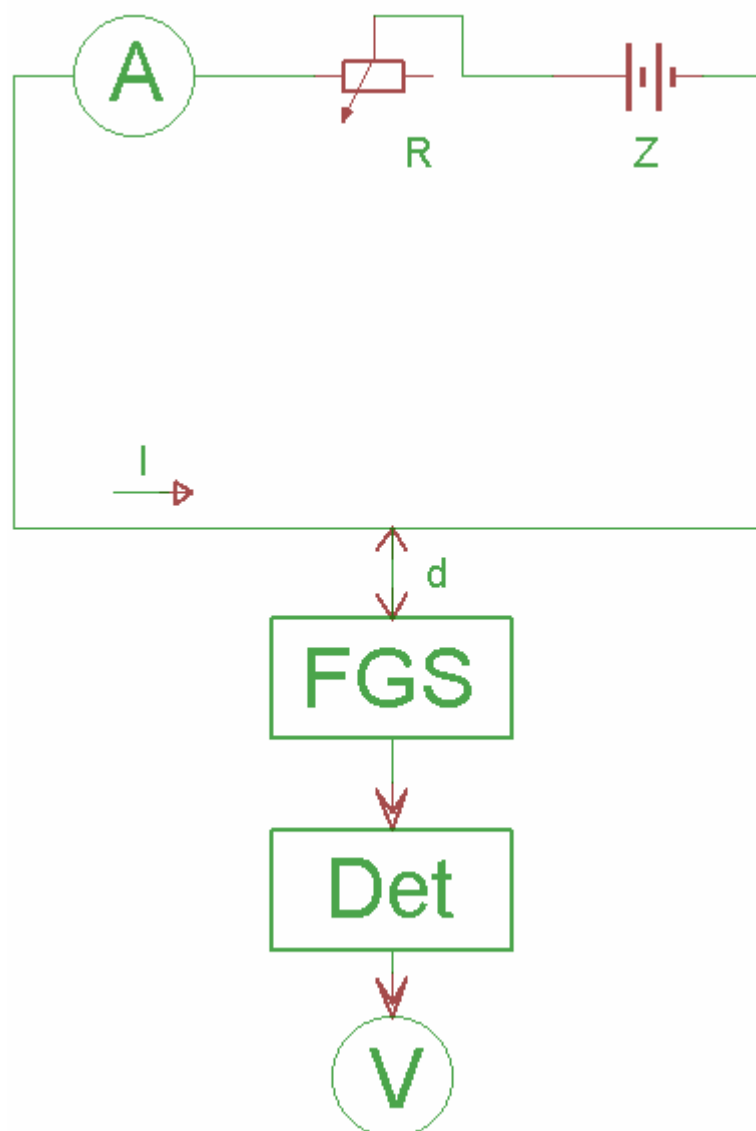
$$U_0 = U_{00} + k(B_i), \quad (5.1)$$

kde U_0 je napětí naměřené na výstupu detektoru,
 U_{00} je napětí naměřené na výstupu detektoru odpovídající pozadí,
 k je magnetická konstanta,
 B_i je vypočtená hodnota magnetické indukce.

Pravděpodobnou chybu aritmetického průměru ϑ lze vypočíst dle [28] z

$$\vartheta = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\sum (\Delta x_i)^2}{n(n-1)}}, \quad (5.2)$$

kde Δx_i je naměřená hodnota odečtená od průměru naměřených hodnot,
 n je počet měření.

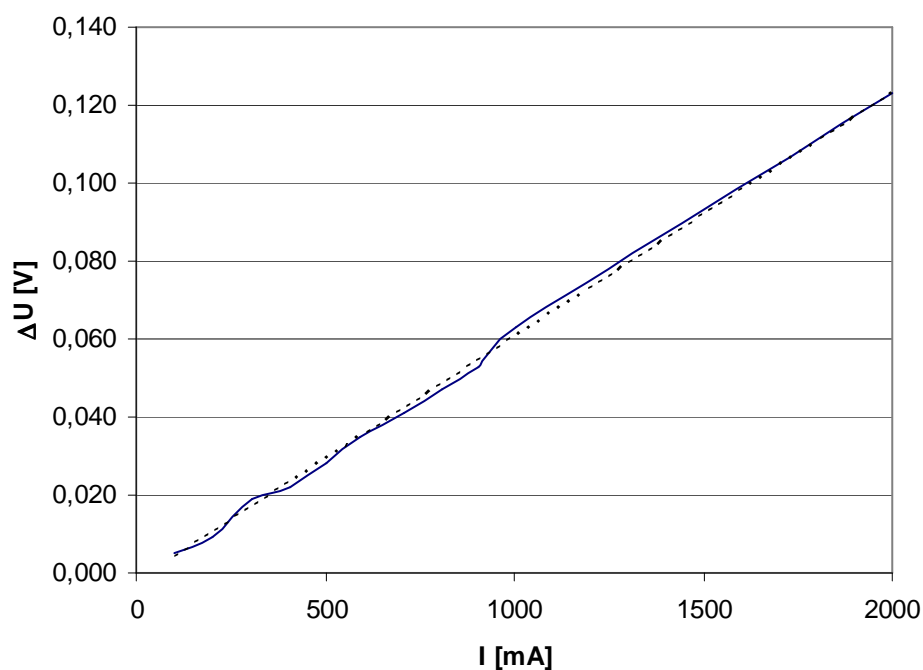


Obr. 5.1 Uspořádání testovacího měření

Kde I je testovací vodič délky $1,5 \text{ m} \gg d$,
 d je vzdálenost vodiče od sondy FGS,
 FGS je „fluxgate“ sonda,
 A je ampérmetr HP34401A,
 V je voltmetr PROTEK D620,
 R je proměnný odpor 100Ω , 100W ,
 Z je zdroj BS554,
 Det je „fluxgate“ detektor.

Tab. 5.1 Tabulka naměřených hodnot výstupního napětí z detektoru a vypočtených hodnot magnetické indukce, orientace I+, vzdálenost vodiče od sondy 50mm

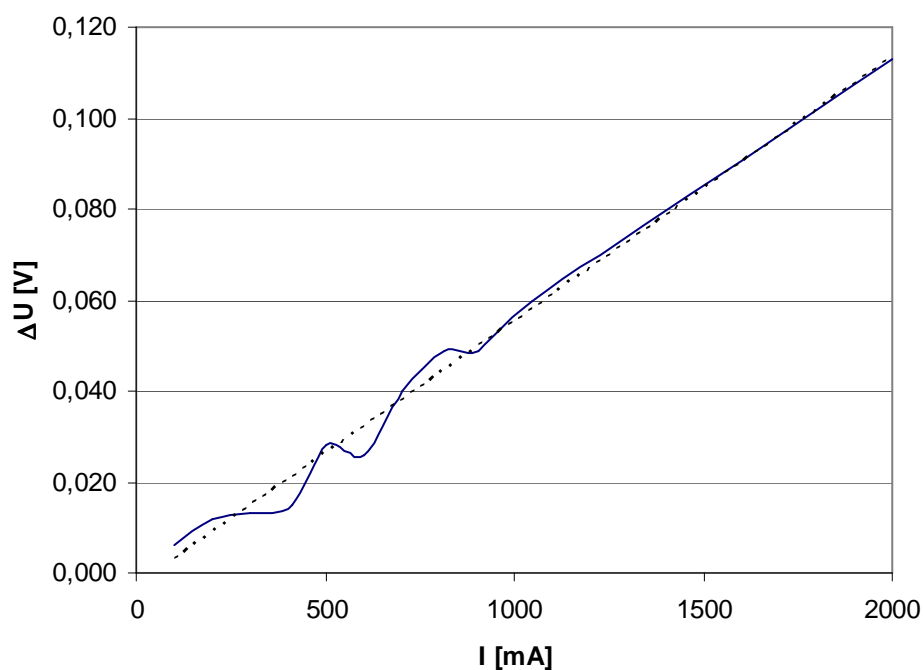
I+	U_{00} [V]	I_+ [mA]	U_0 [V]	ΔU [V]	B_i [μ T]	k [mV/ μ T]	Δk [-]
1	-0,085	103	-0,090	0,005	0,413	12,097	-2,035
2	-0,095	201	-0,104	0,009	0,807	11,158	-2,974
3	-0,095	305	-0,114	0,019	1,224	15,524	1,392
4	-0,096	405	-0,118	0,022	1,625	13,537	-0,595
5	-0,095	500	-0,123	0,028	2,006	13,956	-0,177
6	-0,083	595	-0,118	0,035	2,388	14,659	0,527
7	-0,084	707	-0,125	0,041	2,837	14,452	0,319
8	-0,085	807	-0,132	0,047	3,238	14,514	0,381
9	-0,085	903	-0,138	0,053	3,624	14,627	0,494
10	-0,081	1006	-0,144	0,063	4,037	15,606	1,474
11	-0,083	2000	-0,206	0,123	8,025	15,326	1,194



Obr. 5.2 Závislost výstupního napětí detektoru na proudu, pro směr proudu I+, vzdálenost vodiče od sondy 50mm, přerušovanou čarou je zobrazena lineární spojnice trendu

Tab. 5.2 Tabulka naměřených hodnot výstupního napětí detektoru a vypočtených hodnot magnetické indukce, orientace I-, vzdálenost vodiče od sondy 50mm

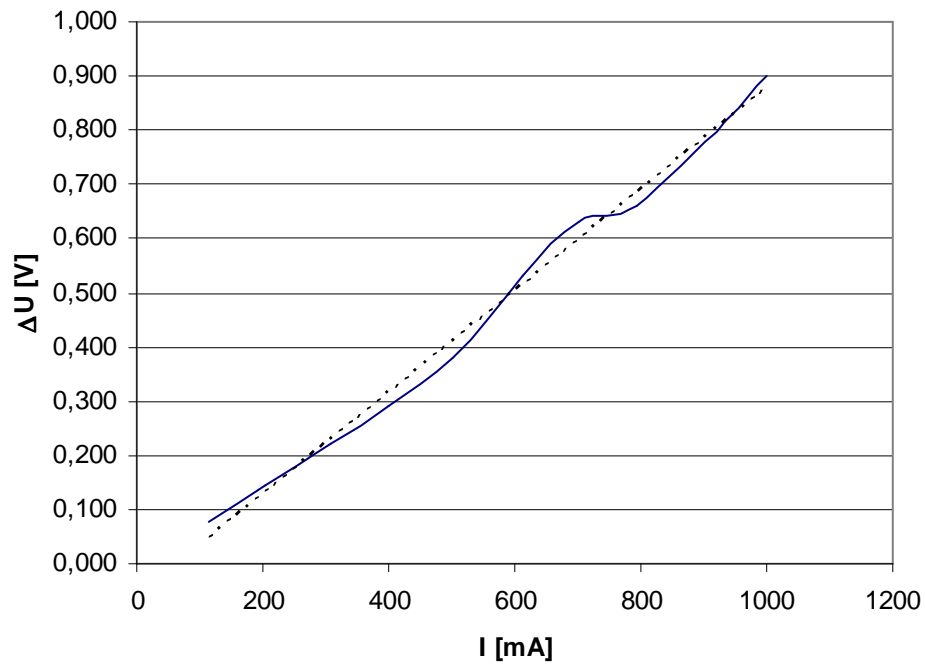
I-	U_{00} [V]	I. [mA]	U_0 [V]	ΔU [V]	B_i [μ T]	k [mV/ μ T]	Δk [-]
1	-0,078	103	-0,072	0,006	0,413	14,517	1,349
2	-0,078	200	-0,066	0,012	0,803	14,952	1,785
3	-0,077	304	-0,064	0,013	1,220	10,657	-2,511
4	-0,076	411	-0,061	0,015	1,649	9,095	-4,072
5	-0,078	500	-0,050	0,028	2,006	13,956	0,788
6	-0,075	603	-0,049	0,026	2,420	10,745	-2,422
7	-0,088	704	-0,048	0,040	2,825	14,159	0,992
8	-0,088	817	-0,039	0,049	3,278	14,946	1,779
9	-0,084	905	-0,035	0,049	3,632	13,493	0,326
10	-0,080	1050	-0,020	0,060	4,213	14,240	1,073
11	-0,082	2000	0,031	0,113	8,025	14,080	0,913



Obr. 5.3 Závislost výstupního napětí detektoru na proudu, pro směr proudu I-, vzdálenost vodiče od sondy 50mm, přerušovanou čarou je zobrazena lineární spojnice trendu

Tab. 5.3 Tabulka naměřených hodnot výstupního napětí detektoru a vypočtených hodnot magnetické indukce, orientace I+, vzdálenost vodiče od sondy 15mm

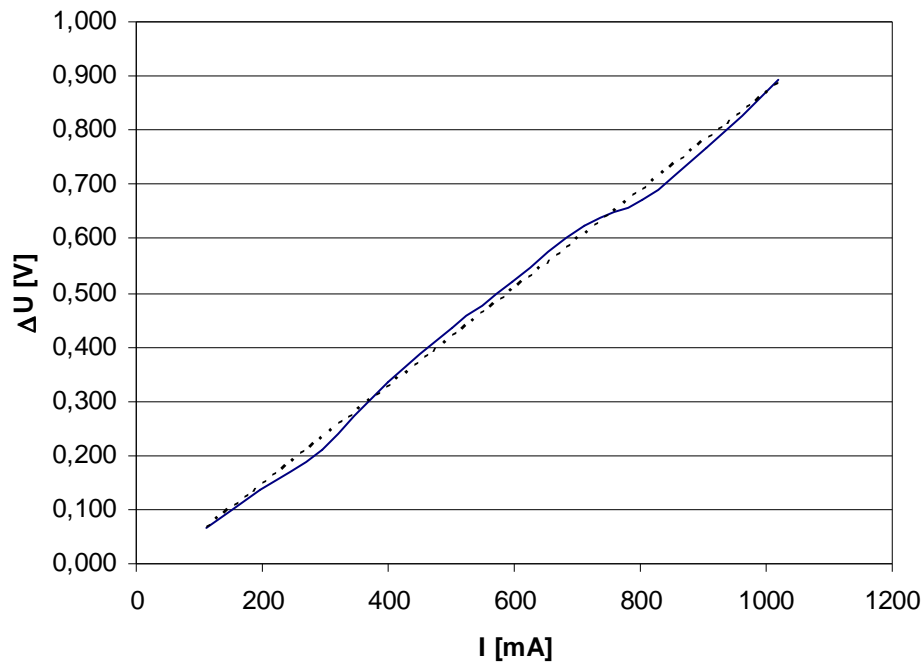
I+	U_{00} [V]	I_+ [mA]	U_0 [V]	ΔU [V]	B_i [μ T]	k [mV/ μ T]	Δk [-]
1	-0,128	113	-0,205	0,077	1,511	50,944	-8,478
2	-0,144	203	-0,287	0,143	2,715	52,665	-6,757
3	-0,145	309	-0,365	0,220	4,133	53,229	-6,193
4	-0,145	399	-0,436	0,291	5,337	54,526	-4,896
5	-0,146	502	-0,525	0,379	6,715	56,444	-2,978
6	-0,114	613	-0,644	0,530	8,199	64,639	5,217
7	-0,116	703	-0,746	0,630	9,403	66,999	7,577
8	-0,121	794	-0,780	0,659	10,620	62,050	2,629
9	-0,124	932	-0,938	0,814	12,466	65,296	5,874
10	-0,128	999	-1,029	0,901	13,362	67,428	8,006



Obr. 5.4 Závislost výstupního napětí detektoru na proudu, pro směr proudu I+, vzdálenost vodiče od sondy 15mm, přerušovanou čarou je zobrazena lineární spojnice trendu

Tab. 5.4 Tabulka naměřených hodnot výstupního napětí detektoru a vypočtených hodnot magnetické indukce, orientace I-, vzdálenost vodiče od sondy 15mm

I-	U_{00} [V]	I [mA]	U_0 [V]	ΔU [V]	B_i [μ T]	k [mV/ μ T]	Δk [-]
1	-0,133	110	-0,066	0,067	1,471	45,537	-14,595
2	-0,133	196	0,005	0,138	2,622	52,638	-7,493
3	-0,135	296	0,075	0,210	3,959	53,041	-7,091
4	-0,134	399	0,202	0,336	5,337	62,957	2,825
5	-0,134	502	0,301	0,435	6,715	64,784	4,652
6	-0,134	596	0,388	0,522	7,972	65,479	5,347
7	-0,134	710	0,489	0,623	9,497	65,601	5,469
8	-0,134	804	0,536	0,670	10,754	62,302	2,170
9	-0,136	905	0,633	0,769	12,105	63,527	3,395
10	-0,145	1020	0,748	0,893	13,643	65,453	5,321



Obr. 5.5 Závislost výstupního napětí detektoru na proudu, pro směr proudu I-, vzdálenost vodiče od sondy 15mm, přerušovanou čarou je zobrazena lineární spojnice trendu

6 Závěr

V této práci jsou prezentovány základní zákony magnetismu, dále jsou vysvětleny vybrané fyzikální principy měření magnetického pole. Po analýze problému byl zvolen vhodný, technicky realizovatelný princip měření magnetického pole, což je princip nazývaný v anglosaské literatuře „fluxgate“ neboli teslametr s ferosondou [4, 6, 7, 9].

Hlavní částí práce je návrh a realizace měřidla magnetického pole - magnetometru, schopného měřit pole stacionární i proměnné v čase. Zařízení se skládá ze tří částí a to:

- Z obvodu zajišťujícího napájení a generování signálu budicího a synchronizačního.
- Sondy typu „fluxgate“.
- Z obvodu zajišťujícího zpracování signálu ze snímací cívky, respektive převodu magnetického pole na napětí.
- Zobrazovací jednotky - multimetru.

Součástí práce je též zpracovaná technická dokumentace.

Jak vyplývá z testovacích měření, přenos respektive převod magnetická indukce napětí je lineární. Výrazné nelinearity přenosu zobrazené na obr. 5.2 jsou způsobeny výrazným kolísáním pozadí magnetického pole, pravděpodobně industriálního původu. Toto měření probíhalo v době dopravní špičky a bludné proudy napájení ss trolejové sítě se s velkou pravděpodobností podílely na výrazném kolísání pozadí. Naměřené a vypočtené převodní konstanty dle (5.1) viz tab 5.1 až 5.4.

Průměrné hodnoty magnetických konstant (5.1) a pravděpodobné chyby aritmetických průměrů (5.2) pro tab. 5.1 až 5.4 jsou:

$$k_{5,1} = 14,132 \pm 0,282 [\mu\text{V}/\mu\text{T}],$$

$$k_{5,2} = 13,167 \pm 0,405 [\mu\text{V}/\mu\text{T}],$$

$$k_{5,3} = 59,422 \pm 1,237 [\mu\text{V}/\mu\text{T}],$$

$$k_{5,4} = 60,132 \pm 1,356 [\mu\text{V}/\mu\text{T}].$$

Realizovaný měřicí systém lze použít, případně dále rozšířit:

- k měření slabých i silnějších magnetických polí, například geomagnetického pole.
- připojit k počítači a kontinuálně zaznamenávat naměřené hodnoty.
- po rozšíření o druhou sondu lze systém použít jako gradiometr tzn. po zapojení dvou sond do můstku a přidání obvodu zajišťujícího zesílení diferenčního signálu z obou sond a kalibraci, lze měřicí systém použít jako detektor feromagnetických objektů.

Seznam použité literatury

- [1] Internetová encyklopedie Wikipedie. [online], [2008], [cit. 2008-05-10].
Dostupná z WWW: <<http://cs.wikipedia.org>>.
- [2] SLÁDKOVÁ, J., UHDEOVÁ, N. : Elektřina a magnetismus. Brno, VUT, 1999
- [3] Magnetic Fields Health and Safety Guide [online],[1989], [cit. 2009-04-04].
Dostupné z WWW:<<http://www.inchem.org/documents/hsg/hsg/hsg027.htm#SubSectionNumber:1.1.1>>.
- [4] MAREŠ, J. a kol. : Úvod do užitě geofyziky. Praha, Academia, 1989.
- [5] Practical Guidelines for building a Magnetometer for by Hobbyists. [online], [2005], [cit. 2008-05-10].
Dostupné z WWW:<<http://perso.infonie.be/j.g.delannoy/BAT/IntroductiontoMagnetometerTechnology.pdf>>.
- [6] RIPKA, P. : Magnetic Sensors and Magnetometers. Boston, Artech House, 2001.
- [7] DRAXLER, K., KAŠPAR, P., RIPKA, P. : Magnetické prvky a měření. Praha, ČVUT, 1994.
- [8] ZÁHEJSKÝ, J. : Elektřina a magnetismus. Olomouc, UP, 2002.
- [9] WEBSTER, J. : Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook. CRC Press LLC, 1999.
- [10] ĎAĎO, S., KREIDL, M. : Senzory a měřicí obvody. Praha, ČVUT, 1996
- [11] An Innovative Algorithm for Noise Reduction in a Fluxgate Output Signal. [online],[2005], [cit. 2008-05-10].
Dostupné z WWW:<<http://www.butta.org/extra/thesis.pdf>>.
- [12] Fluxgate senzory pro měření mag. polí. [online], [2006], [cit. 2008-05-10].
Dostupné z WWW: < <http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART265-fluxgate-senzory-pro-mereni-mag-poli--1-cast-princip.html>>.
- [13] MALINA, J. :Poznáváme elektroniku V. České Budějovice, KOPP, 2001.
- [14] THEDE, L. :Practical Analog and Digital Filter Design. Artech House, 2004.
- [15] TERRELL, D. : OP AMPS Design, Application and Troubleshooting. USA, Elsevier Science, 1996.
- [16] Analog Filter Design. [online], [cit. 2008-05-10].
Dostupné z WWW:
<http://www.analog.com/en/design-tools/dt-adisim-design-sim-tool/design-center/dt-adisim-design-sim-tool/Filter_Wizard/resources/fca.html>.
- [17] Eagle Editor Tutorial. [online], [cit. 2008-05-10].
<http://web.mit.edu/eaglecad_v5.0.0/tutorial_en.pdf>.
- [18] IRF530 Datasheet. [online], [cit. 2008-05-10].
Dostupné z WWW:
<http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/I/R/F/5/IRF530.shtml>.
- [19] IRF9520 Datasheet. [online], [2002], [cit. 2008-05-10].
Dostupné z WWW:
<http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/I/R/F/5/IRF9520.shtml>.
- [20] TS7805 Datasheet. [online], [cit. 2008-05-10].
Dostupné z WWW:
<http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/T/S/7/8/TS7805CZ.shtml>.
- [21] LMC7660 Datasheet. [online], [2005], [cit. 2008-05-10].
Dostupné z WWW:
<http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/L/M/C/7/LMC7660.shtml>.

- [22] CD4060 Datasheet. [online], [1999], [cit. 2008-05-10].
Dostupné z WWW:
<http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/C/D/4/0/CD4060.shtml>.
- [23] TL061 Datasheet. [online], [cit. 2008-05-10].
Dostupné z WWW:
<http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/T/L/0/6/TL061.shtml>.
- [24] CD4052 Datasheet. [online], [cit. 2008-05-10].
Dostupné z WWW:
<http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/C/D/4/0/CD4052.shtml>.
- [25] TL062 Datasheet. [online], [cit. 2008-05-10].
Dostupné z WWW:
<http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/T/L/0/6/TL062.shtml>.
- [26] 78L05 Datasheet. [online], [cit. 2008-05-10].
Dostupné z WWW:
<http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/7/8/L/0/78L05.shtml>.
- [27] Osobní sdělení. [16.6.2008].
- [28] PROCHÁZKOVÁ, E. : Úvod do teorie a praxe fyzikálního měření I. České Budějovice, Pedagogická fakulta ČB, 1989.

Přílohy

Seznam součástek modulu synchronního detektoru a převodníku signálu z měřicí sondy na napětí

C1	10n	kondenzátor keramický
C2	68n	kondenzátor keramický
C3	1n	kondenzátor keramický
C4	100n	kondenzátor keramický
C5	22M	kondenzátor elektrolytický
C6	100n	kondenzátor keramický
C7	22M	kondenzátor elektrolytický
C8	22M	kondenzátor elektrolytický
C9	100n	kondenzátor keramický
C10	334p	kondenzátor nízkoindukční
C11	100n	kondenzátor keramický
C12	100n	kondenzátor keramický
C13	22M	kondenzátor elektrolytický
C14	100n	kondenzátor keramický
C15	22M	kondenzátor elektrolytický
C16	100n	kondenzátor keramický
C17	100n	kondenzátor keramický
C18	22M	kondenzátor elektrolytický
C19	10M	kondenzátor elektrolytický
C20	100n	kondenzátor keramický
C21	10M	kondenzátor elektrolytický
C22	100n	kondenzátor keramický
IC1	TL061	operační zesilovač
IC2	4052	analogový multiplexer
IC3	TL062	operační zesilovač
IC4	TL061	operační zesilovač
IC5	TL061	operační zesilovač
J1-J4		konektory
JP1		jumper
R1	22K	odporový trimr cermetový
R2	820	metalizovaný rezistor miniaturní 0,25W
R3	2M	metalizovaný rezistor miniaturní 0,25W
R4	120K	metalizovaný rezistor miniaturní 0,25W
R5	110K	metalizovaný rezistor miniaturní 0,25W
R6	1K	metalizovaný rezistor miniaturní 0,25W
R7	2K	metalizovaný rezistor miniaturní 0,25W
R8	4K	metalizovaný rezistor miniaturní 0,25W
R9	390	metalizovaný rezistor miniaturní 0,25W
R10	120K	metalizovaný rezistor miniaturní 0,25W
R11	390	metalizovaný rezistor miniaturní 0,25W
R12	22K	odporový trimr cermetový
R13	470	metalizovaný rezistor miniaturní 0,25W
R14	470	metalizovaný rezistor miniaturní 0,25W
R15	10K	odporový trimr cermetový

R16	10K	metalizovaný rezistor miniaturní 0,25W
-----	-----	--

Seznam součástek napájecího zdroje a generátoru budicího signálu

C1	100n	keramický kondenzátor
C2	100n	keramický kondenzátor
C3	100n	keramický kondenzátor
C4	100n	keramický kondenzátor
C5	100n	keramický kondenzátor
C6	30p	keramický kondenzátor
C7	10M	elektrolytický kondenzátor
C8	1M	nízkoindukční kondenzátor
C9	-	vynechán
C10	-	vynechán
C11	10M	elektrolytický kondenzátor
C12	10M	elektrolytický kondenzátor
C13	100n	keramický kondenzátor
IC1	7805	napěťový regulátor výkonový
IC2	78L05	napěťový regulátor
IC3	CD4060	frekvenční dělič, oscilátor
J1		konektor napájení
R1	100K	metalizovaný rezistor miniaturní 0,25W
R2	20K	metalizovaný rezistor miniaturní 0,25W
R3	6,8	rezistor výkonový
S1		vypínač