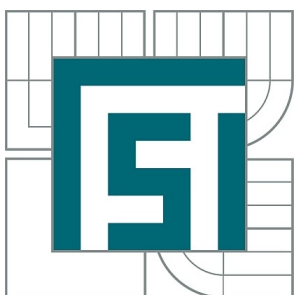


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

OVĚŘOVÁNÍ VLASTNOSTÍ ABSOLUTNÍCH SNÍMAČŮ POLOHY S HALLOVÝMI PRVKY

VERIFICATIONS OF PROPERTIES OF THE ABSOLUTE POSITION SENSORS WITH HALL
ELEMENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PATRIK MUCHA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PAVEL HOUŠKA, Ph.D.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Patrik Mucha

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906R001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Ověřování vlastností absolutních snímačů polohy s Hallovy prvky

v anglickém jazyce:

Verifications of properties of the absolute position sensors with Hall elements

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Snímače využívající Hallův jev patří mezi velmi rychle se rozvíjející skupinu snímačů, protože jsou levné, malé, dostatečně přesné a spolehlivé. Cílem této práce je ověřit vlastnosti několika typů absolutních snímačů polohy využívajících integrované lineární Hallovy prvky.

Cíle bakalářské práce:

1. Seznamte se s problematikou Hallova jevu a možnostmi jeho využití v senzorce;
2. S použitím literatury zpracujte výčet faktorů ovlivňujících přesnost snímačů využívajících Hallova jevu;
3. Proveďte proměření vlastností absolutních snímačů polohy dostupných v laboratoři a výsledky analyzujte;
4. Navrhněte metodiku kalibrace těchto snímačů a doporučení pro jejich použití.

Seznam odborné literatury:

- [1] Ďaďo S., Kreidl M.: Senzory a měřicí obvody, Skriptum ČVUT, 1999
- [2] Noskievič, P.: Modelování a identifikace systémů, Montanex a.s., Ostrava 1999, ISBN 80-7225-030-2
- [3] Hall Effect Sensing and Application, Honeywell Inc., dostupné z URL:<<http://www.honeywell.com/sensing>>
- [4] National Instruments: LabVIEW Control Design User Manual[online], June 2009, 371057G-01, dostupné z URL:<<http://www.ni.com>>
- [5] National Instruments: LabVIEW Fundamentals, August 2005, 374029C-01, dostupné z URL:<<http://www.ni.com>>

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Houška, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 18.11.2009

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá vlastnostmi a použitím snímačů využívajících Hallova jevu a jejich vnitřním uspořádáním. Tyto snímače se používají především pro měření magnetického pole, elektrického proudu a vzdálenosti. V práci jsou popsány jednotlivé faktory, které ovlivňují přesnost těchto snímačů, některé faktory jsou společné, některé faktory jsou vázány na konkrétní aplikace. Dále jsou zde uvedeny výsledky experimentálního ověření vlastností konkrétního typu snímače A1301KLHLT-T.

Abstract

Nowadays sensors using Hall effect belong to a group of quickly evolving sensors because they are small, reliable and accurate. The goal of this bachelor's thesis is to verify the specification of several types of absolute location sensors using integrated linear Hall effect elements.

Klíčová slova

snímač proudu, magnetické pole, snímač s Hallovým jevem, napětí, integrovaný obvod

Keywords

current sensor, magnetic field, Hall effect sensors, voltage, integrated circuit

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu této bakalářské práce Ing. Pavlu Houškovi, Ph.D. za jeho odborné rady, ochotu a trpělivost při vypracování této bakalářské práce

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a pod vedením vedoucího BP.

Patrik Mucha, Brno 2010

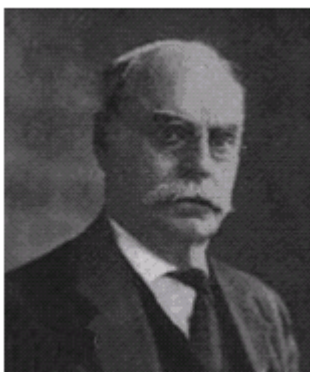
MUCHA, P. *Ověřování vlastností absolutních snímačů polohy s Hallovými prvky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 35 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Houška, Ph.D.

Obsah

1	ÚVOD	9
1.1	Edwin Herbert Hall (1855-1938)	9
1.2	Hallův pokus	9
1.3	TEORIE HALLOVA JEVU	10
2	Použití Hallova jevu v senzorce	13
2.1	Základní schémata Hallových snímačů	13
2.2	Vlastnosti Hallova snímače	13
2.3	Měření mag. pole	14
2.4	Měření proudu	15
2.4.1	Princip otevřené smyčky	16
2.4.2	Princip uzavřené smyčky	16
2.5	Měření vzdálenosti	18
3	Výčet faktorů ovlivňujících přesnost snímačů využívajících hallova jevu	20
3.1	Převodní charakteristika	20
3.2	Magnetizační křivka	20
3.3	Závislost magnetické indukce na vzdálenosti	21
3.4	Závislost magnetické indukce na teplotě	23
4	Proměření vlastností absolutního snímače polohy	25
4.1	Přípava experimentů	25
4.1.1	Katalogové vlastnosti snímače A1301	25
4.1.2	Katalogové vlastnosti magnetu N35	26
4.1.3	Konfigurace experimentu	27
4.1.1	Popis měřicího programu	28
4.2	Postup měření	29
4.3	Zpracování experimentů	30
4.4	Ověření lineární části	32
4.5	Vyhodnocení experimentů	33
5	Závěr	34
6	Seznam použité literatury:	35

1 ÚVOD

1.1 Edwin Herbert Hall (1855-1938)



Hallův jev je znám už více než sto let. Byl objeven Dr. Edwinem Herbertem Hallem v roce 1879, když studoval na Johns Hopkins University v Baltimore doktorské studium. Dr. Hall se pokoušel ověřit teorii toku elektronů, která již byla navržena o několik desítek let dříve Kelvinem. Objevil, že pokud se umístí magnet tak, aby jeho pole bylo kolmé k jedné stěně tenkého plátku zlata, kterým procházel proud, tak na jeho opačných koncích se objevil rozdíl potenciálů. Zjistil, že toto napětí je úměrné proudu procházejícímu vodičem a toku magnetického pole nebo magnetické indukci kolmé na vodič. Ačkoliv byly Hallovy pokusy úspěšné, tak se pro tento jev nenašlo více jak 70 žádné uplatnění v praxi.[1]

Obr. 1.1 dr. Hall Edwin Herbert [6]

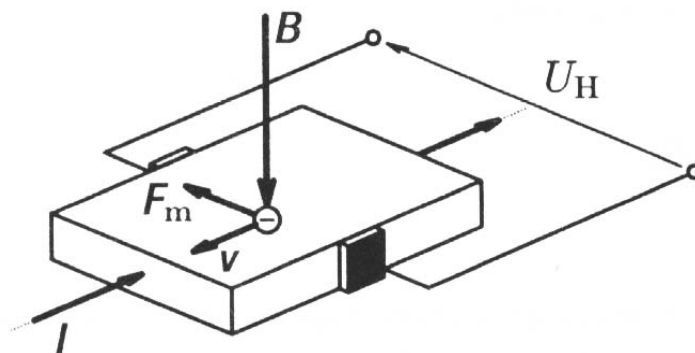
Konečně první využití Hallova jevu (mimo laboratorní experimenty) se uskutečnilo v padesátých letech jako mikrovlnný snímač. S rozvojem polovodičových materiálů v padesátých letech se Hallův jev dočkal prvních využití v praxi, ovšem rozsáhlost využití tohoto jevu bylo stále omezeno cenou. Až v roce 1965, se Everest Vorthmann a Joe Maupin, vývojový inženýři z MICRO SWITCH Sensing and Control rozhodli najít praktický a levný senzor v pevné fázi. Prozkoumali mnoho různých koncepcí, ale vybrali si snímač s Halloovým jevem z jednoho důvodu: může být zcela integrován do jediného křemíkového čipu. Tento průlom znamenal první levné a hromadné využití Hallova jevu, klávesnic v pevné fázi. a způsobil revoluci ve výrobě klávesnic v roce 1968 představením první klávesnice v pevné fázi využívající Hallův jev. Vůbec poprvé byl snímající Hallův jev a jeho elektronika zkombinovány v jediném integrovaném obvodu. Nyní už je vyrobeno téměř miliarda součástek založených na Hallově jevu. Dnes jsou součástky založené na Hallově jevu zahrnuty v mnoha produktech, od počítačů k šicím strojům, od aut k letadlům a od náradí k lékařskému vybavení. [1]

1.2 Hallův pokus

Dr. Hall provedl tento pokus: Na obou bočních okrajích, vodivého pásku, který se nazývá „Hallův prvek“, tloušťky d a šířky b , připevnil kontakty tak, aby mohl měřit příčné elektrické napětí U mezi jeho okraji, když Halloovým prvkem procházel rovnoběžně s okrajem proud I . Pozoroval, že mezi oběma okraji vzniklo napětí, jestliže Hallův prvek umístil do magnetického pole tak, aby magnetické pole působilo kolmo na Hallův prvek.[6]

Jestliže do homogenního magnetického pole umístíme Hallův prvek, dojde k přemístění volných částic s nábojem působením magnetické síly k jedné boční stěně Hallova prvku. To se projeví vznikem malého Hallova napětí mezi bočními stěnami Hallova prvku. Toto napětí U je přímo úměrné proudu I , magnetické indukci B a nepřímo úměrné tloušťce Hallova prvku d [6]:

$$U = \tilde{R} \frac{I \cdot B}{d} \quad (1.1)$$

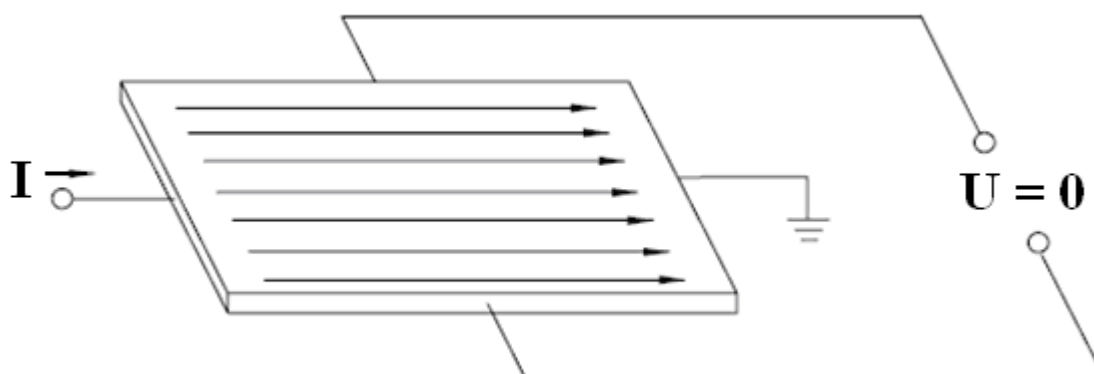


Obr. 1.2: Hallův pokus

Hallova konstanta \tilde{R} má pro některé vodiče kladnou, pro jiné zápornou hodnotu. Z teorie vyplývá, že Hallova konstanta je nepřímo úměrná hustotě nositelů proudu a proto je Hallův jev při stejném magnetickém poli a stejné hustotě proudu mnohem silnější u polovodičů než u kovů. Proto se Hallova jevu užívá zvláště u polovodičů, a to jak ke studiu jejich vlastnosti, tak k praktickým aplikacím.[6]

1.3 TEORIE HALLOVA JEVU

Pokud vodič, kterým prochází proud, umístíme do magnetického pole, vytvoří se napětí kolmé jak na proud, tak na pole. Tento jev je znám jako Hallův jev. Obrázek 1 znázorňuje základní princip Hallova jevu. Je na něm Hallův prvek polovodičového materiálu, kterým prochází proud. Výstupní spoje jsou kolmé na směr proudu. Pokud na Hallův prvek nepůsobí magnetické pole (obr. 1.3), rozdělení proudu je homogenní a na výstupu není naměřeno žádné napětí.



Obr. 1.3: Princip Hallova jevu bez magnetického pole [1]

Pokud ovšem na Hallův prvek působí magnetické pole jako na obrázku 1.4, tak na proud působí Lorentzova síla.

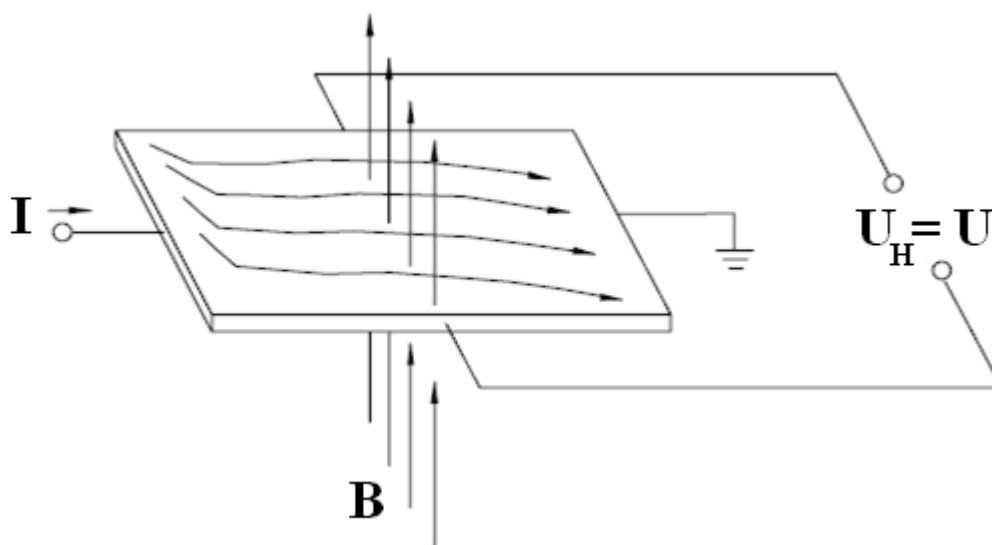
Tato síla F_B , působí na nabitou částici a je rovna součinu jejího náboje Q pohybující se rychlostí v v magnetickém poli B a je vždy kolmá na oba vektory (v, B) , viz. rovnice 1.1. [3]

$$F_B = Qv \times B \quad (1.1)$$

Jestliže se tedy částice s nábojem pohybuje současně v elektrickém a magnetickém poli, působí na ni jak síla elektrická F_e , tak síla magnetická F_m . Výslednice obou sil je Lorentzova síla. [4]

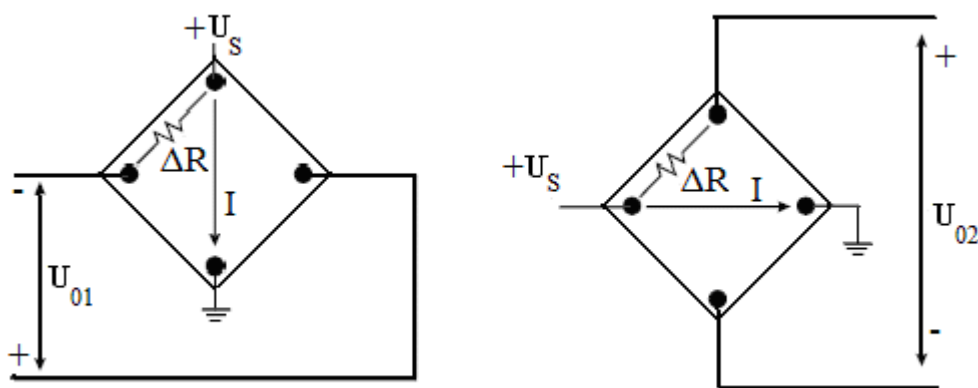
Tato síla narušuje rozdělení proudu. Výsledkem je rozdíl potenciálů (napětí) na výstupu. Toto napětí se nazývá Hallovo napětí (U_H) a je úměrné vektorovému součinu proudu (I) a magnetickému poli (B). Vzájemné působení magnetického pole a proudu je vyjádřeno rovnicí 1.2.

$$U_H = I \times B \quad (1.2)$$



Obr. 1.4: Princip Hallova jevu v magnetickém poli [1]

Protože výstupní Hallovo napětí je velmi malé (μV), je tedy nutné ho zesílit dodatečnou elektronikou k dosažení běžných úrovní napětí. Hallovo napětí je v řádu $7 \mu V/V_S/G$ v křemíku a proto k praktickému použití vyžaduje již zmiňované zesílení. Křemík vykazuje piezodporový jev, změnu elektrického odporu s napnutím. Je nutné v Hallově snímači tento jev minimalizovat. Toho můžeme dosáhnout, pokud použijeme více Hallových prvků. Na obrázku (1.5) jsou dva Hallové prvky umístěné v těsné blízkosti v integrovaném obvodu.



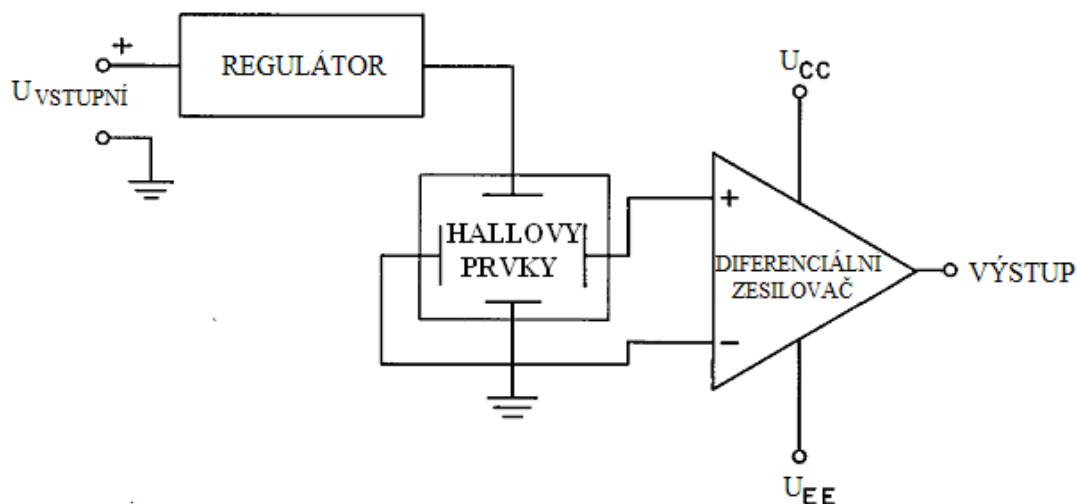
Obr. 1.5: Orientace Hallových prvků

Hallovy prvky jsou umístěny takto, aby byly oba vystaveny stejné zátěži, představovanému ΔR . Sečtením dvou výstupů se tento jev minimalizuje. Integrované obvody používají dva nebo čtyři Hallovy prvky. Pokud Hallův prvek zkombinujeme s elektronikou, stává se z něj Hallův snímač. Základem všech snímačů využívající Hallův jev je integrovaný obvod obsahující Hallův prvek a elektroniku k upravování signálu. [1]

2 POUŽITÍ HALLOVA JEVU V SENZORICE

2.1 Základní schémata Hallových snímačů

Hallův snímač (obr. 2.1) je složen z jednoho nebo několika Hallových prvků, integrovaného proudového napájecího zdroje (regulátoru) a zesilovače. V případě, že výstupem Hallova snímače má být pouze logická hodnota 0/1, je v snímači integrován komparátor pro převedení spojitého (analogového) výstupu na logickou hodnotu.



Obr. 2.1: Základní schéma Hallových snímačů [1]

Hallové prvky jsou napájeny z proudového zdroje. Aby měření bylo co možno nejpresnější, je potřeba konstantního proudu. Když je Hallovo napětí měřeno bez přítomnosti magnetického pole, je výstup nulový. Pokud ale napětí měříme na každém výstupním terminálu vzhledem k zemi, naměříme nenulové napětí (obvykle polovina napájecího, resp. nulový offset). Toto napětí je stejné na všech terminálech. Rozdíl potenciálů je nulový. Zesilovač na obrázku 2.1 musí být diferenciální zesilovač, aby zesiloval pouze rozdíl potenciálů Hallovo napětí.[1]

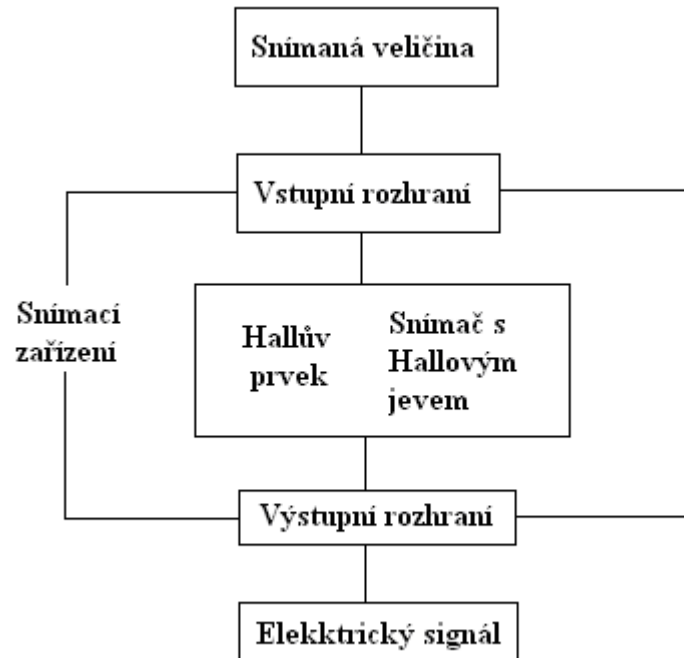
Hallové napětí je nízkoúrovňový signál v řádu $30 \mu\text{V}$ při působení magnetického pole o velikosti 10^{-4} T . Tento nízkoúrovňový výstup vyžaduje zesilovač s nízkým šumem, velkou vstupní impedancí a středním zesílením. Diferenciální zesilovač s těmito vlastnostmi může být snadno integrován s Hallovým prvkem, užitím standardní technologie bipolárního tranzistoru. [1]

Jak bylo ukázáno v rovnici 1.1, Hallovo napětí je funkcí vstupního proudu. Účel regulátoru na obrázku 2.1 je udržení konstantního proudu tak, aby výstup snímače vyjadřoval pouze intenzitu magnetického pole. Protože mnoho systémů má k dispozici regulovaný zdroj, proto některé Hallové snímače nemusí obsahovat vnitřní regulátor.

2.2 Vlastnosti Hallova snímače

Hallův snímač je citlivý na intenzitu magnetického pole. Této vlastnosti je možné využít v mnoha oblastech senzorky. Využívá se především pro bezkontaktní snímání elektrického proudu, detekci přítomnosti magnetických materiálů a pro měření vzdálenosti magnetu od snímače.

Hallové snímače mohou být použity v mnoha typech snímacích zařízení. Jestliže veličina (proud, teplota, tlak, poloha, atd.), kterou chceme snímat, lze snímat jako intenzitu magnetického pole, můžeme k tomuto využít snímač s Hallovým jevem. Na obrázku 2.2 je blokové schéma snímače s Hallovým jevem.



Obr. 2.2: Blokové schéma snímače s Hallovým jevem

V tomto obecném snímacím zařízení Hallův snímač snímá intenzitu magnetického pole přes vstupní rozhraní. Výstupní rozhraní převádí intenzitu magnetické pole na elektrický signál.

Důvody používání určité technologie nebo snímače se liší podle jejich použití. Důležité faktory při výběru snímačů jsou: citlivost, vlastnosti, cena. Vlastnosti a výhody dané technologie jsou faktory, které by měly být při rozhodování zváženy spolu s konkrétními požadavky jejího využití.

Vlastnosti a výhody snímače s Hallovým jevem jsou:

- bezdotykové měření
- výstup s nízkým šumem
- rychle reagující (citlivý)
- teplotní rozsah -40 až $+150$ °C
- malé rozměry
- nízká cena

2.3 Měření mag. pole

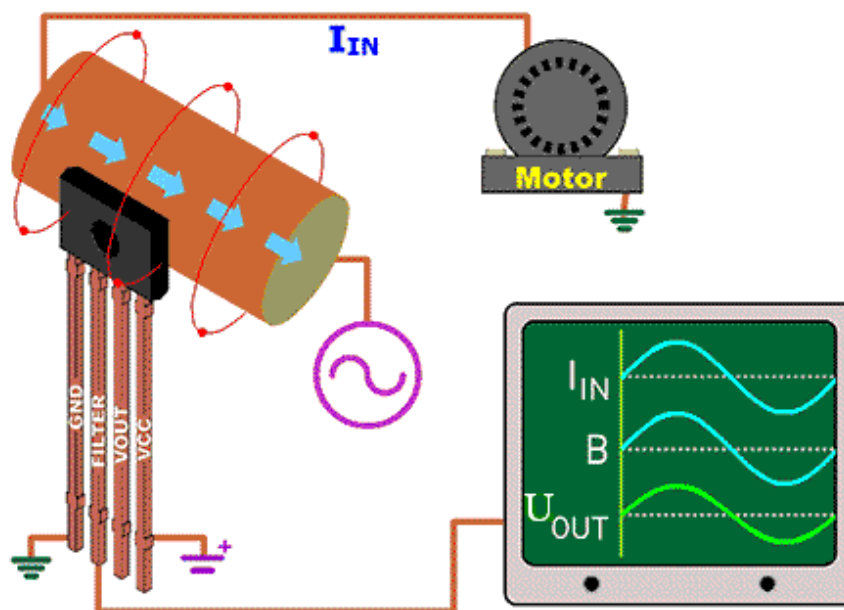
Hallův snímač se nejčastěji používá pro měření intenzity magnetického pole. Je to základní součást měřících přístrojů Gaussmetr/Teslametr

Měření intenzity, resp. indukce magnetického pole, jehož rozložení v prostoru (tvar) neznáme, je problematické vzhledem k nutnosti určení směru siločar v daném místě.

V současné době je běžně používán k snímání intenzity magnetického pole Hallův snímač, který se chová jako směrově závislý snímač. Výhodou tohoto snímače je možnost měření, jak stejnosměrného, tak nízkofrekvenčního proměnného magnetického pole. Při měření je magnetická indukce převáděna na výstupní napětí, které obvykle dosahuje 0-5 V. Při žádném signálu na vstupu, klidový stav sondy ($B=0$), by v tomto případě odpovídalo výstupní napětí 2,5 V. Při měření magnetického pole neznámého tvaru Hallovým snímačem je třeba vždy natočit rovinu snímače do směru kolmého k siločarám magnetického pole. Při správném natočení snímače získáme údaj o amplitudě indukce v daném bodě. Úhel natočení snímače vůči souřadnému systému nám udává směr vektoru indukce magnetického pole. Vzhledem k nutnosti natáčení snímače a hledání maxima se tato metoda nehodí pro rychlé či automatické měření. [8]

2.4 Měření proudu

Hallova jevu lze využít pro bezkontaktní snímání proudu protékajícího vodičem. Proud protékající vodičem vytváří magnetické pole. Intenzitu tohoto vytvořeného magnetického pole, které je přímo úměrné velikosti protékajícího proudu, snímá Hallův snímač. Tento princip je zobrazen na obrázku 2.3.



Obr. 2.3: Měření proudu Hallovým snímačem [10]

V dnešní době se používají dva principy analogového měření proudu:

- princip otevřené smyčky
- princip uzavřené smyčky, která kompenzuje magnetické pole

Oba principy jsou ideálně vhodné pro galvanicky oddělené měření všech průběhů proudu včetně stejnosměrného proudu. Základní funkční princip, detekce proudu, je založen na měření magnetického pole, které se vytváří kolem vodiče, jímž protéká proud. Je-li vodič veden otvorem v magnetickém obvodu proudového snímače, magnetický tok je soustředěn do vzduchové mezery, v níž je umístěn Hallův prvek. Výstupní signál U_H Hallova prvku tedy závisí na proudu vodičem. [9]

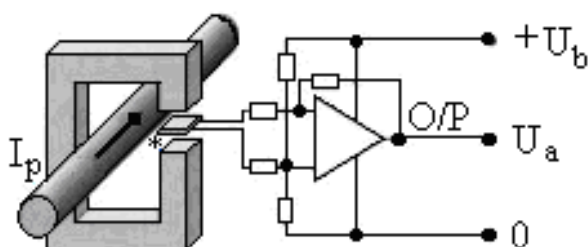
2.4.1 Princip otevřené smyčky

Na obrázku 2.4 je znázorněný proudový snímač s otevřenou smyčkou. Pro tento proudový snímač je důležité, aby Hallův prvek poskytoval lineární závislost mezi magnetickým tokem a Hallovým napětím. Lineární Hallův prvek LOHET (Linear Output Hall Effect Transducer / převodník s Hallovou sondou a lineárním výstupem) tento požadavek splňuje. LOHET sestává z integrovaného Hallova prvku a tří odporů na keramickém podkladu. Citlivost a teplotní kompenzace se seřizuje úpravou dvou těchto odporů laserem. V snímači je integrován i regulátor napětí a teplotně kompenzovaný měřicí zesilovač. Výstupní napětí U_a proudového snímače je úměrné primárnímu proudu I_p . [9]

Primární proud I_p je nulový, když výstupní napětí U_a je polovina U_b .

Výhody otevřené smyčky:

- nízká proudová spotřeba nezávislá na měřené hodnotě
- velmi kompaktní konstrukce bez sekundárního vinutí
- vysoká odolnost vůči přetížení



* Hallův prvek

Obrázek 2.4: Princip otevřené smyčky

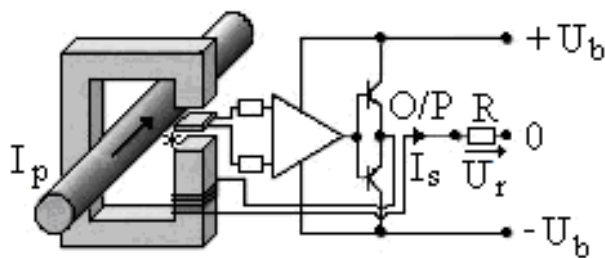
2.4.2 Princip uzavřené smyčky

Na obrázku 2.5 je znázorněný proudový snímač s uzavřenou smyčkou. Magnetický tok vytvářený primárním proudem je zcela vyrovnáván opačným magnetickým tokem vinutí kolem magnetického obvodu. Každá odchylka od nulového vyvážení vede ke vzniku Hallova napětí na Hallově prvku. Elektronický obvod ihned dodá sekundární proud I_s potřebný ke kompenzaci magnetického pole. Tento proud dělený počtem závitů kolem magnetického obvodu představuje skutečný obraz primárního proudu. Na vyšších kmitočtech nebo při rychlých změnách proudu se proud přenáší na principu transformátoru jako v konvenčním proudovém transformátoru. Superpozice těchto dvou účinků činí z tohoto snímače zařízení měřící proud velmi přesně a dynamicky. [9]

Sekundár vytváří proud nezávislý na zatížení. Vložení vnějšího výkonového odporu umožňuje získat výstupní napětí širokého rozsahu.

Výhody uzavřené smyčky:

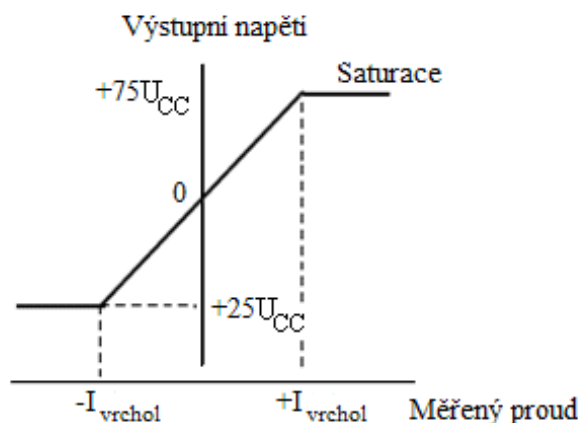
- vysoká přesnost
- velká šířka pásma
- velmi rychlá odezva
- výborná linearita
- vysoká přetížitelnost



* Hallův prvek

Obrázek 2.5: Princip uzavřené smyčky

Snímač Hallova jevu měří veličiny poměrně. Výstupní napětí snímače bude rovné polovině napájecího napětí (U_{CC}), bude-li v měřeném vodiči nulový proud. Rozsah výstupního napětí je 25% až 75% napájecího napětí. Při průtoku proudu v kladném smyslu vzroste výstupní napětí z nulové hodnoty směrem k $0,75 U_{CC}$. Pro příklad výstup lineárního snímače proudu viz obrázek 2.6. [1]



Obrázek 2.6: Rozsah výstupního napětí [1]

Při průtoku opačným směrem poklesne výstupní napětí z nulové hodnoty směrem k $0,25 U_{CC}$. Jelikož je měření poměrné, je citlivost také funkcí U_{CC} . Proudové snímače je nejvhodnější použít pro měření v oblasti blízké maximu měřitelného rozsahu. To pomáhá redukovat šum. Pro zvýšení měřeného proudu na úroveň blízkou maximu lze zvýšit počet přechodů vodiče přes jádro. Například snímač s vrcholem 50 A lze použít pro měření vodiče s vrcholem v 10 A, povedeme-li vodič otvorem snímače pětkrát. Počet průchodů měřte jako počet překřížení vodičů otvorem jádra. Umístění vodiče v jádře není velkým faktorem pro chybu měření. Citlivost snímače také narůstá s počtem provedení vodiče otvorem. Stejně jako snímače Hallova jevu jsou i proudové snímače náchylné na posun hodnot vlivem změny teploty. Lineární snímače proudu mohou s teplotou měnit své nulové hodnoty a citlivost. Citlivost se typicky mění o $\pm 0,03\%/^{\circ}\text{C}$.

Kolektor magnetického toku je běžně feritové nebo křemičito-ocelové jádro. Látka jádra je zvolena na základě saturace a remanence. V určitém okamžiku není látka jádra schopna pohlcovat další magnetický tok a označujeme ji za saturovanou. Pokud k tomu dojde, snímač přestane zvyšovat výstupní napětí v závislosti na zvyšující se intenzitě magnetického pole vodiče. Remanence určuje zbytkový magnetický tok, který se v jádru nachází po excitaci

proudového snímače. Remanence způsobuje posun v nulové hodnotě napětí. Vzduchová mezera v jádře má také vliv na bod saturace. Změnami šířky mezery je ovlivňována úroveň proudu, který produkuje magnetickou indukci nezbytnou k saturaci snímače. [1]

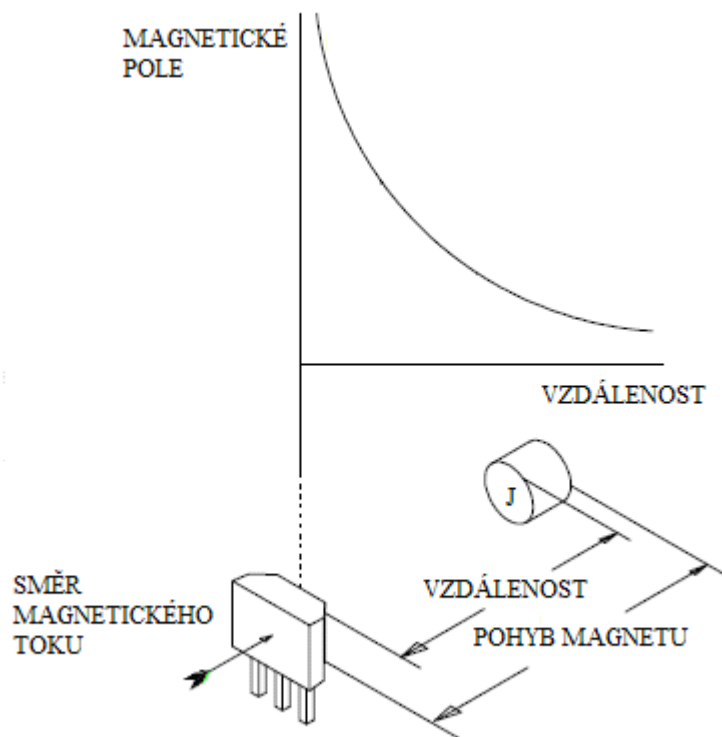
U těchto snímačů je důležité uvážit: tepelný rozptyl cívky a zařazovací ztrátu je nutné posoudit při volbě velikosti vodiče a počtu závitů. U možnosti vysokých výkyvů proudu nad povolenou mez může být nutné posílit vzdušnou mezeru nemagnetickým materiálem, aby se zamezilo kolapsu mezery a porušení jádra. Může být nutné využít upravování výstupního signálu, např. odstranění posunu v napětí, zesílení, filtrování atd. Vířivé proudy jsou dalším zdrojem rušení u snímačů měřících střídavý proud nebo stejnosměrný proud s rychlými změnami úrovní proudu. Vířivé proudy vznikají se změnou magnetické indukce na čase a samy vytvářejí magnetické pole opačné polaritě. Tím je snížena celková magnetická indukce. Chyby vzniklé vířivými proudy se projevují jako řádové chyby, časové (fázové) prodlevy a zahřívání. Pro minimalizaci vířivých proudů je nutné pečlivě zvolit materiál a návrh jádra. [1]

2.5 Měření vzdálenosti

Snímače s Hallovým jevem můžeme také využít pro snímání vzdálenosti. Tyto snímače detekují přítomnost magnetického pole a snímají jeho intenzitu. Velikost intenzity magnetického pole závisí na vzdálenosti mezi snímačem a magnetem a na rozsahu pohybu magnetu. Čím blíže je magnet k snímači, tím je intenzita magnetického pole větší a naopak. Tato závislost je ukázána na obrázku 2.7.

Na tomto obrázku je znázorněn čelní unipolární mód s Hallovým jevem. Název „čelní“ (head-on) označuje způsob pohybu magnetu jako relativní k referenčnímu bodu snímače. V tomto případě je směr pohybu magnetu přímo směrem k snímači a přímo od něj, kdy magnetické siločáry procházejí referenčním bodem snímače. Magnet a snímač jsou umístěny tak, aby se jižní pól magnetu přibližoval k snímané straně snímače. [1]

Magnetické siločáry jsou vektorová veličina s daným směrem (od severního k jižnímu pólu magnetu). Magnetická indukce má kladnou polaritu, je-li ve shodném směru s referenčním směrem snímače. Tento směr znázorňuje šipka v obrázku 2.7. Ve znázorněném módu jsou detekovány pouze siločáry v referenčním (pozitivním) směru. Důsledkem toho je tento mód nazýván unipolární. Vzdálenost je měřena od čela snímače k jižnímu pólu magnetu, ve směru pohybu.



Obr. 2.7: Čelní unipolární mód

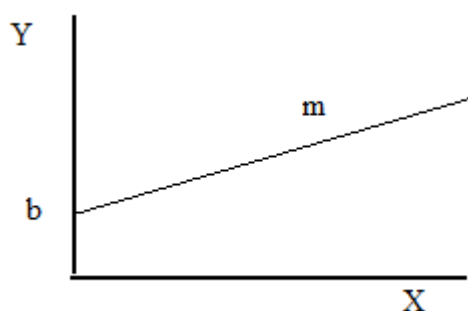
3 VÝČET FAKTORŮ OVLIŇUJÍCÍCH PŘESNOST SNÍMAČŮ VYUŽÍVAJÍCÍCH HALLOVA JEVU

3.1 Převodní charakteristika

Převodní charakteristika lineárního senzoru popisuje závislost výstupu (napětí) na vstupu (magnetické pole). Tato charakteristika může být vyjádřena rovnicí (3.1), nebo grafem (3.1). Na obrázku 3.1 představuje osa X vstup a osa Y výstup. Protože je přenosová funkce lineární, je popsána sklonem (m) a průsečíkem osy Y (b). Můžeme ji tedy vyjádřit rovnicí:

$$Y = mX + B ; X_{\min} \leq X_{\max} \quad (3.1)$$

Kde X odpovídá vzdálenosti [mm], Y odpovídá výstupnímu napětí (V), sklon m odpovídá citlivosti a odchylka b odpovídá nulovému bodu. Rozsah určuje rozmezí výstupních hodnot Hallova snímače. Tato hodnota je velmi důležitá, protože mimo tento rozsah se snímač nasytí a přestane být lineární.



Obr. 3.1: Lineární převodní charakteristika

3.2 Magnetizační křivka

Nejdůležitější hledisko pro vybrání správného magnetu je magnetizační křivka (obr.3.1). Tato křivka popisuje charakteristiku magnetické látky, kde svislá osa odpovídá magnetické indukci (B) a vodorovná osa odpovídá intenzitě magnetického pole (H).

Je to graf závislosti vnějšího magnetického pole H na magnetické indukci B ve feromagnetické látce při magnetováním stejnosměrným proudem. Magnetická indukce (B) vyjadřuje, jak silné magnetické pole ve feromagnetické látce vzniklo a H čím magnetujeme feromagnetickou látku. Pro každý materiál se tato magnetizační křivka získá měřením. [2]

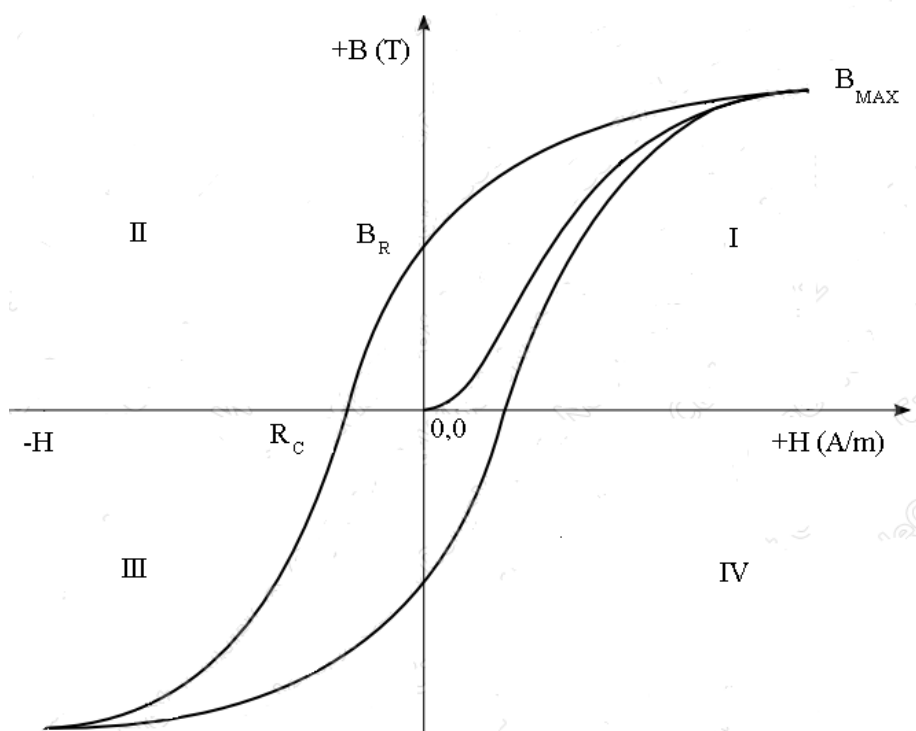
První kvadrant křivky zobrazuje charakteristiku látky během magnetování. Je-li nemagnetizovaná látka ($B=0, H=0$) vystavena postupně se zvyšující intenzitě magnetického pole, zvyšuje se magnetická indukce látky z 0 na B_{\max} . V tomto bodě je látka magneticky nasycena a nelze ji už dále magnetizovat.

Klesá-li intenzita magnetického pole postupně na 0, nevrací se magnetická indukce látky po stejné křivce, ale klesá do bodu tzv. remanence (B_R).

Je-li obrácen směr magnetického pole a zvýšena jeho intenzita, je magnetická indukce látky dále snižována. Nulové hodnoty dosáhneme tehdy, kdy intenzita magnetického pole dosáhne hodnoty H_C , tzv. koercivní síly (koercivity).

Z této magnetické křivky nás nejvíce zajímá druhý kvadrant, tzv. demagnetizační křivka, na které dále vzniká křivka energetického součinu. Body na křivce energetického součinu

udávají množství vnější energie vydané na jednotku objemu. Tato vnější energie dosahuje vrcholu při tzv. maximálním energetickém součinu ($B_D H_{D(MAX)}$). Maximální energetický součin se používá jako kritérium pro srovnání různých magnetických látek. [1]

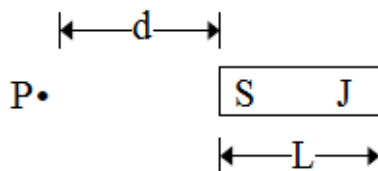


Obr. 3.1: Magnetizační křivka [5]

Magnetická indukce, kterou vytváří magnet v daném bodě v prostoru je ovlivněna mnoha různými faktory. Mezi ně patří délka magnetu, obsah průřezu, tvar a materiál magnetu, Pro určitou látku existuje odpovídající demagnetizační křivka. B_R (bod remanence) udává maximální magnetickou indukci této látky. Pro magnet daných rozměrů bude magnetická indukce nižší než B_R a bude záviset na poměru B/H , tzv. permeanci.

3.3 Závislost magnetické indukce na vzdálenosti

Magnetická indukce v bodě P ve vzdálenosti d od severního pólu magnet (Obr. 3.2) je nepřímo úměrná druhé mocnině vzdálenosti (3.3). Toto pole je redukováno vlivem jižního pólu ve vzdálenější části (3.4).



Obr. 3.2: Mag. indukce v bodě P ve vzdálenosti d [1]

$$B_N = \frac{1}{d^2} \quad (3.3)$$

$$B_s = \frac{1}{(d+L)^2} \quad (3.4)$$

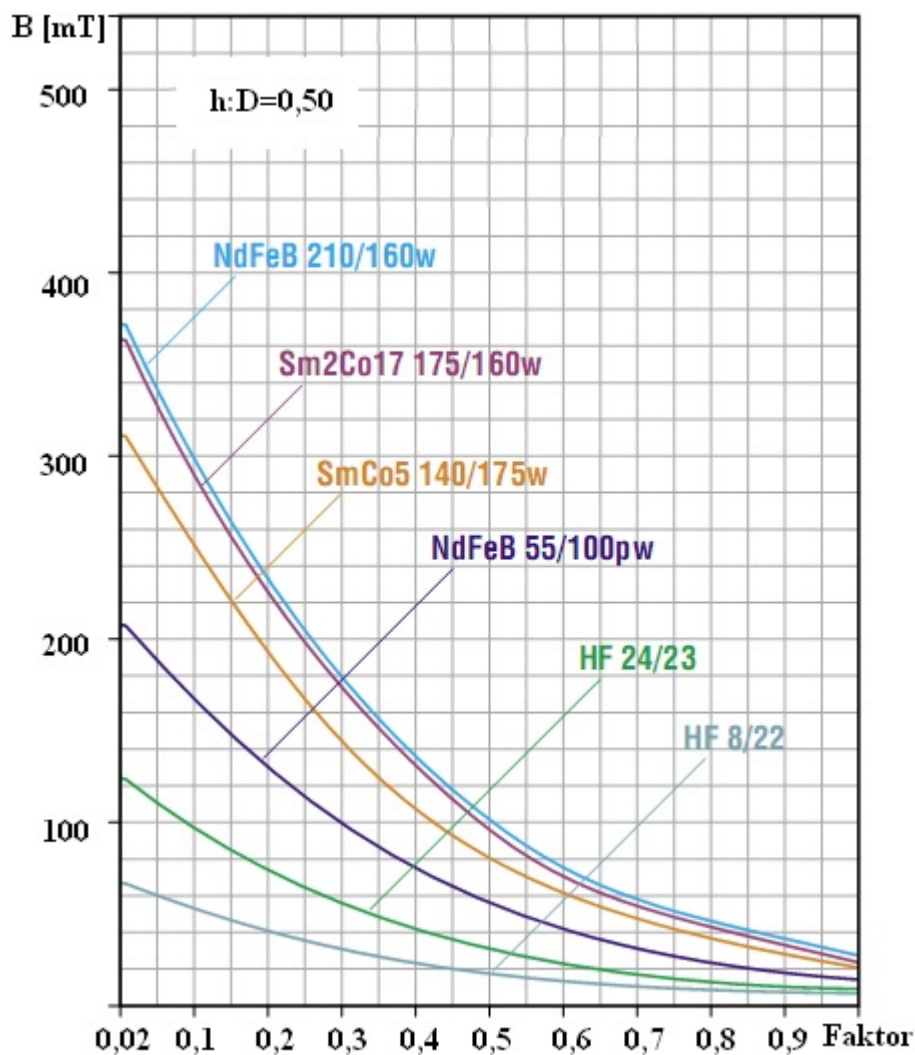
Z těchto rovnic je jasné, že magnetická detekce je účinná pouze na krátké vzdálenosti. Dále plyne, že magnet s daným obsahem pólové stěny vykazuje zesilující magnetickou indukci s větší délkou dle výše uvedeného vztahu. Indukce v bodě P je také zhruba úměrná obsahu pólové stěny. [1]

Při stanovení hodnoty magnetické indukce (hustoty magnetického toku) permanentních magnetů různých rozměrů a vyrobených z různých materiálů, je důležité hledisko poměru výšky h a průměr D daného trvalého magnetu. Tomuto poměru odpovídá pracovní bod, tzn. bod na demagnetizační křivce, který představuje magnetickou indukci B a intenzitu (sílu) magnetického pole H v pracovním režimu trvalého magnetu. Obecně platí, že čím delší je permanentní magnet ve směru magnetizace, tím více se pracovní bod přibližuje hodnotě remanentní magnetické indukce B_r . Při použití uzavřeného magnetického obvodu prakticky splývá pracovní bod permanentního magnetu s hodnotou remanentní magnetické indukce B_r . Empiricky zjištěné poměry $h:D$ bývají uváděny v příslušných demagnetizačních křivkách feromagnetických materiálů. Tyto demagnetizační křivky jsou 4 a to pro hodnoty $h:D=0,25; 0,5; 0,75; 1$. Při odlišných hodnotách se zaokrouhlují na nejbližší hodnotu. Na obrázku 3.3 je graf závislosti magnetické indukce na faktoru f pro magnety vyrobené z různých materiálů a pro poměr $h:D=0,5$. Na velikosti magnetické indukce má zásadní vliv také poměr mezi velikostí vzduchové mezery s (vzdálenost od povrchu magnetu) a průměr permanentního magnetu D , vyjádřený tzv. geometrickým faktorem f a rovnicí 3.5. [12]

$$f = s / D \quad (3.5)$$

Tab. 3.1: Přehled nejčastěji využívaných magnetických látek

Třída látky	Relativní B_R	Relativní H_C	$B_D H_{D(MAX)}$	Relativní cena	Stabilita	B_R TC(%/°C)
Alnico	vysoká	nízká	střední	vysoká	střední	-0,02
Indox	nízká	vysoká	nízká až střední	nízká	vysoká	-0,2
Ferit	střední	střední	střední	nízká	vysoká	-0,04
Kovy vzácných zemin	vysoká	nejvyšší	nejvyšší	nejvyšší	vysoká	-0,12
NdFeB	vysoká	vysoká	vysoká	střední	vysoká	-0,12

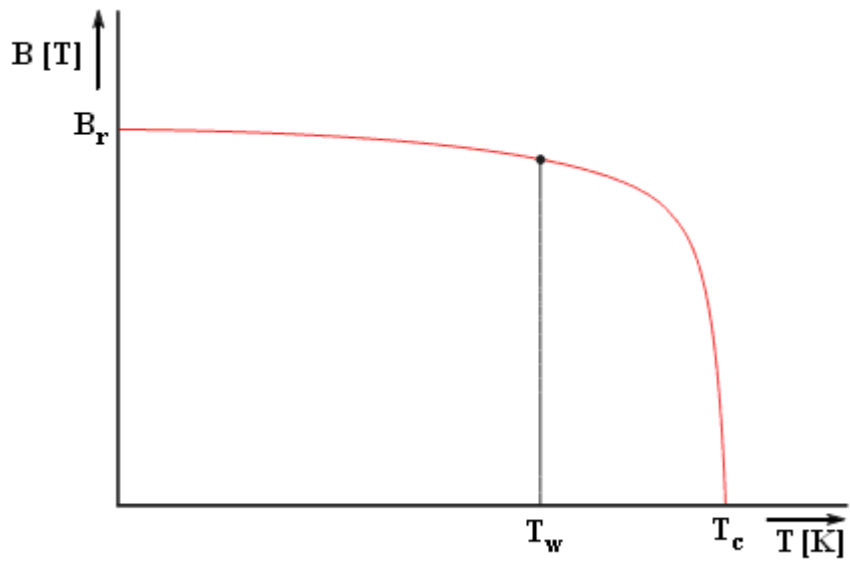


Obr. 3.3: Závislost magnetické indukce f faktoru [12]

3.4 Závislost magnetické indukce na teplotě

Na obrázku 3.4 je graf, který zobrazuje závislost magnetické indukce na teplotě. Z tohoto grafu je patrné, že teplota, dokud nepřesáhne hodnotu T_w (maximální pracovní teplota), nijak neovlivňuje velikost magnetické indukce (remanence B_r). Po překročení maximální pracovní teploty se nacházíme v oblasti Curieovy teploty T_C .

Tato teplota definuje teplotní mez, po jejímž překročení ztrácejí feritové materiály své magnetické vlastnosti, stávají se paramagnetickými, přičemž tento proces probíhá velmi rychle a je vratný. Při ochlazení vzorku pod Curieovu teplotu nabývá materiál původní magnetické vlastnosti. Poloha Curieovy teploty na teplotní stupnici se mění s obsahem cizích příměsí ve feritovém materiálu. Vzhledem k tomu, že přítomnost cizích příměsí působí snížení Curieovy teploty, je nutné definovat pro jednotlivé typy feritových materiálů jejich maximální pracovní teplotu. [11]



Obr. 3.4: Závislost magnetické indukce na teplotě

Curieova teplota pro různé látky:

- Železo (Fe): 768°C
- Kobalt (Co): 1150°C
- Nikl (Ni): 360°C
- Fe₂O₃ (oxid železitý): 622°C [13]

4 PROMĚŘENÍ VLASTNOSTÍ ABSOLUTNÍHO SNÍMAČE POLOHY

4.1 Přípava experimentů

V předchozích kapitolách byly popsány vlastnosti a využití snímačů s Hallovým jevem. Tato kapitola se zabývá praktickým ověřením vlastností snímačů s Hallovým jevem. Měřením má být zjištěno:

- závislost výstupu snímače na vzdálenosti od magnetu
- přesnost (opakovaní měření)
- ověření lineární části v oblasti nulového offsetu

Proměření bude provedeno na Hallových snímačích typu A1301KLHLT-T [10], umístěné na jednom plošném spoji ve vzdálenosti 4 mm od sebe. Umístění snímačů je znázorněné obr. 4.5. K měření je použit diskový magnet z materiálu N35 (obr. 4.3). Vzdálenost snímače na ose y je určována vložením dvou malých plíšků pro jednotlivá měření. Jejich tloušťka bude měřena digitálním posuvným měřítkem s přesností 0,01mm. Poloha magnetu bude kontrolována digitálním úchytkoměru s přesností 0,003mm.

4.1.1 Katalogové vlastnosti snímače A1301

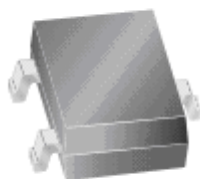
A1301 je poměrný, lineární Hallův snímač. Jeho výstup (napětí) je přímo úměrný aktuálnímu magnetickému poli na jeho vstupu. Výstupní napětí snímače A1301 při magnetickém poli 0G odpovídá 50% napájecího napětí. Snímač je vyroben CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) výrobním procesem, obsahuje Hallův prvek, napájecí zdroj pro Hallův prvek a lineární zesilovač. Integrací Hallova prvku a zesilovače na jediném čipu minimalizujeme četné problémy s nízkou úrovní analogových signálů na výstupu snímače. Teplotní rozsah je -40 až 125°C. Díky těmto vlastnostem je A1301 vhodný pro snímání polohy a to jak pro posuvný pohyb, tak pro rotační pohyb. [10]

Tab. 4.1: Katalogové vlastnosti snímače A1301

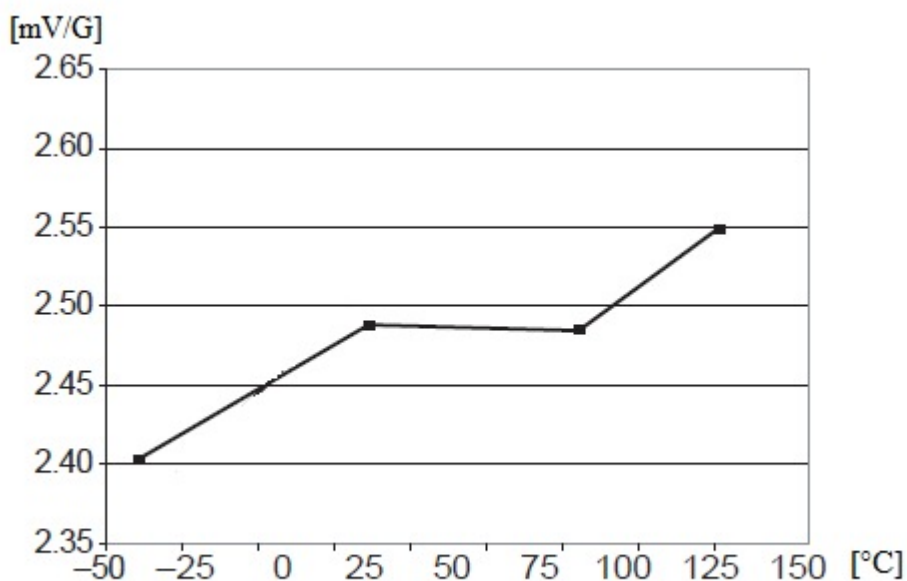
Vlastnosti	Podmínky	Min.	Typ.	Max.	Jednotka
Elektrické					
Napájecí napětí	$T_J < 165\text{ °C}$	4,5	-	6	V
Napájecí proud	otevřený výstup	-	-	11	mA
Výstupní					
Linearita	$T_A = 25\text{ °C}$	-	-	$\pm 2,5$	%
Symetrie	$T_A = 25\text{ °C}$	-	-	± 3	%
Magnetické					
klidové výstupní napětí	$B = 0\text{ T}; T_A = 25\text{ °C}$	2,4	2,5	2,6	V
klidové výstupní napětí	$B = 0\text{ T}; T_A \neq 25\text{ °C}$	2,2	-	2,8	V
magnetická citlivost	$T_A = 25\text{ °C}$	2	2,5	3	mV/G
magnetická citlivost	$T_A \neq 25\text{ °C}$	1,8	-	3,2	mv/G

T_A - teplota okolí

T_J - maximální teplota spojení



Obr. 4.1: Snímač A1301 LH



Obr. 4.2: Závislost citlivosti snímače A1301 LH na teplotě

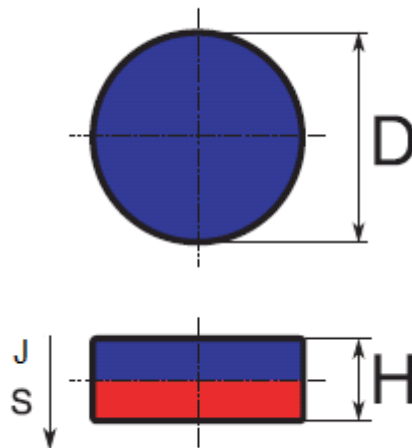
4.1.2 Katalogové vlastnosti magnetu N35

Neodymové magnety (NdFeB- neodym, železo, bór) jsou mají výborné magnetické vlastnostmi, jako je remanence a energetická hustota. Vyrábí se lisováním v magnetickém poli a následným slinováním. Při vysoké vlhkosti vzduchu oxidují, a proto se v závěrečné fázi výroby galvanizují - nejčastěji zinkem nebo niklem. Neodymové magnety jsou tvrdé, křehké a obtížně obrobitelné. Opracování se nejčastěji vykonává broušením za pomoci diamantových nástrojů. K měření byl použit magnet o rozměrech 5x3mm (DxH). [11]

Katalogové vlastnosti jsou:

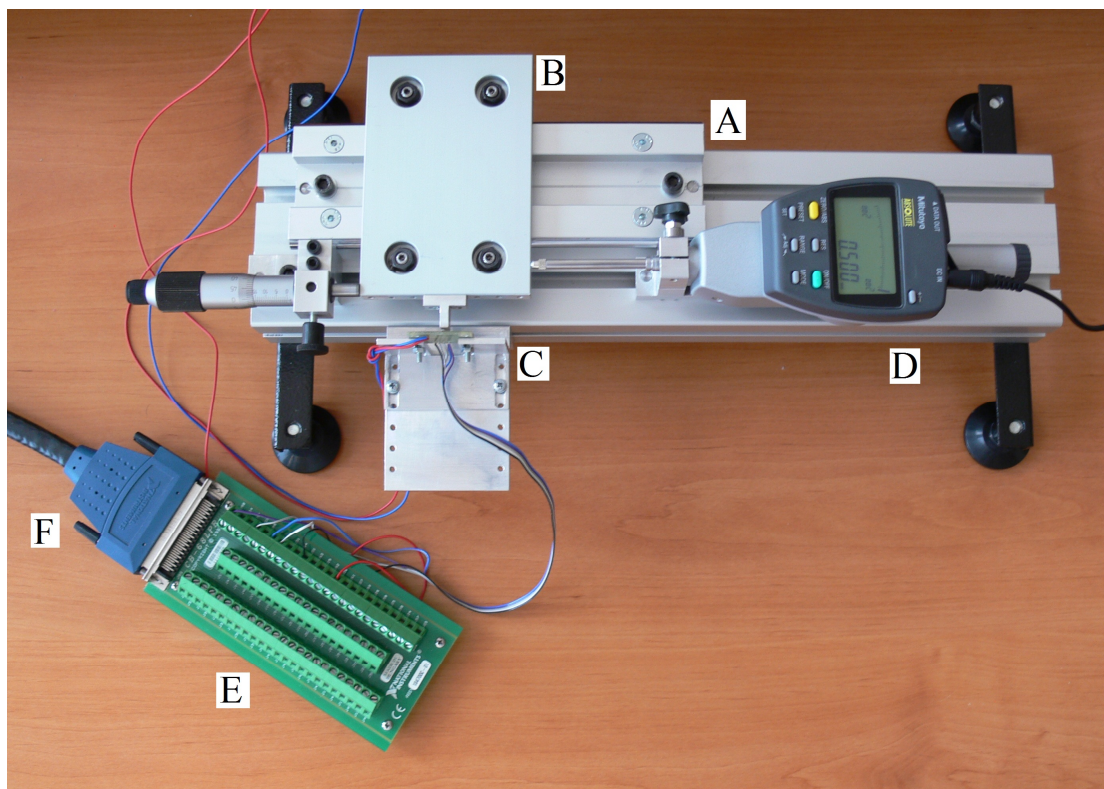
- remanence (B_R): 1170 -1220 mT
- normální koercitivita (H_{CB}): 868-876 kA/m
- vnitřní koercitivita (H_{CI}): 955-2388 kA/m
- maximální energetický součin $(B \times H)_{MAX}$: 263-287 kJ/m³
- maximální pracovní teplota (T_W): 80 °C
- hustota: 7,5 g/cm³

- magnetizační pole pro odmagnetování: 2400 kA/m



Obr. 4.3: Rozměry magnetu

4.1.3 Konfigurace experimentu



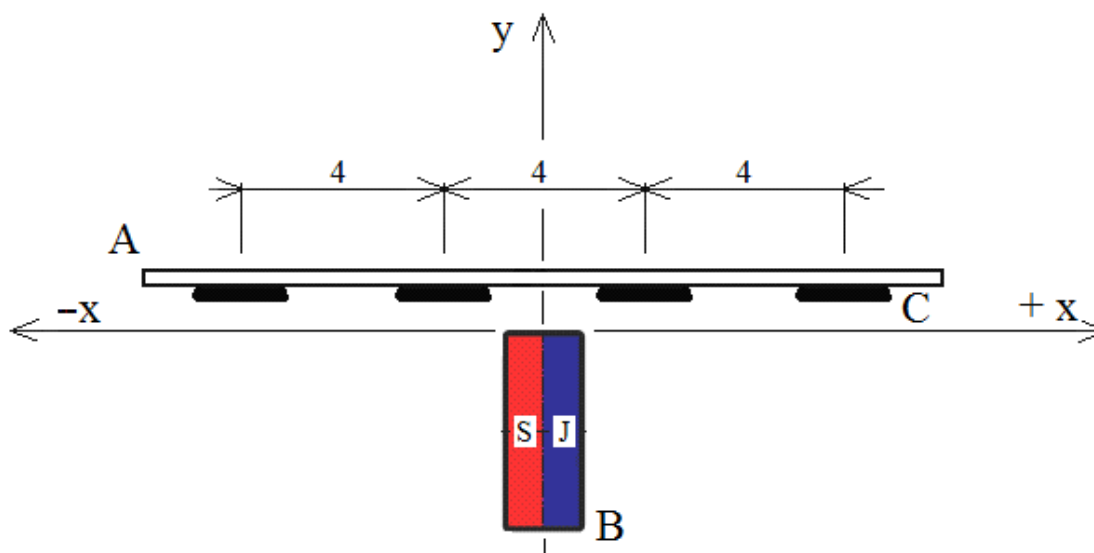
Obr. 4.4: Konfigurace experimentu

- A- přípravek s přesným lineárním vedením
- B- vozík s držákem magnetu
- C- pevný držák se snímači
- D- digitální úchylkoměr: Mitutoyo ID-F150H

E- multifunkční DAQ karta NI PCIe-6251

F- svorkovnice: CB-68LPR

Experimentální zařízení je realizováno na přípravku s přesným lineárním vedením. Po vedení se pohybuje vozík, ke kterému je připevněn držák s permanentním magnetem. Polohování vozíku je řešeno pomocí mikrometrického šroubu a kontrolováno digitálním úchylkoměrem s rozlišením 0,001mm a přesností $\pm 0,003\text{mm}$ na celém rozsahu. Snímače jsou připevněné k přípravku pevným držákem.



Obr. 4.5: Uspořádání měření

A- plošný spoj s Hallovými snímači

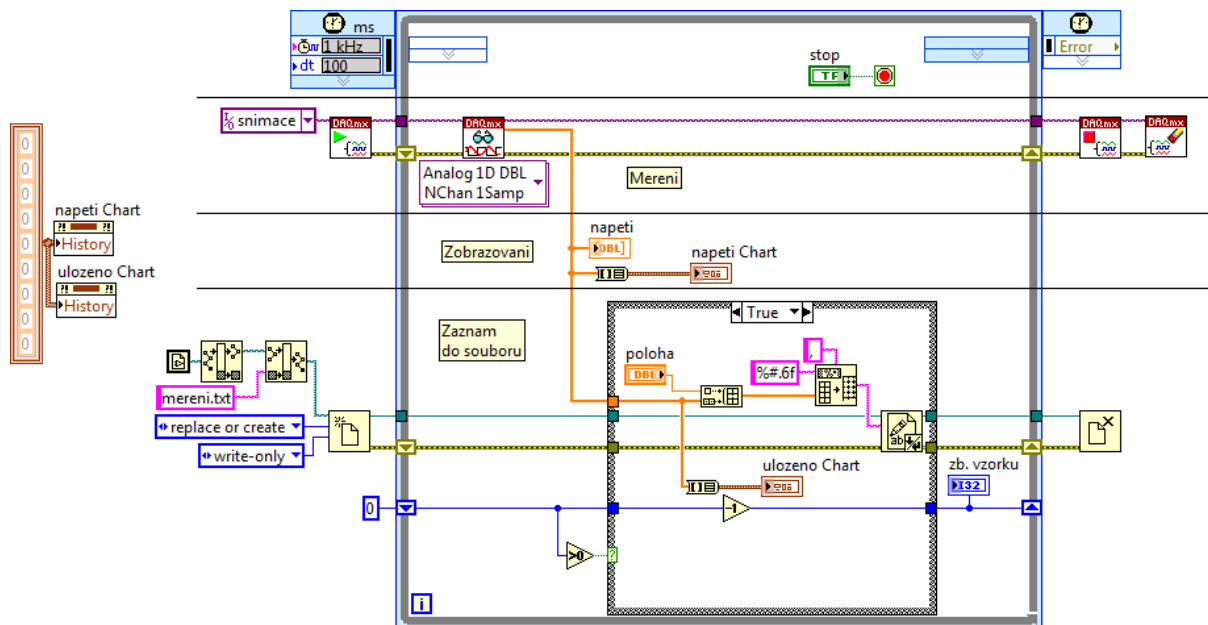
B- neodymový magnet

C- Hallův snímač

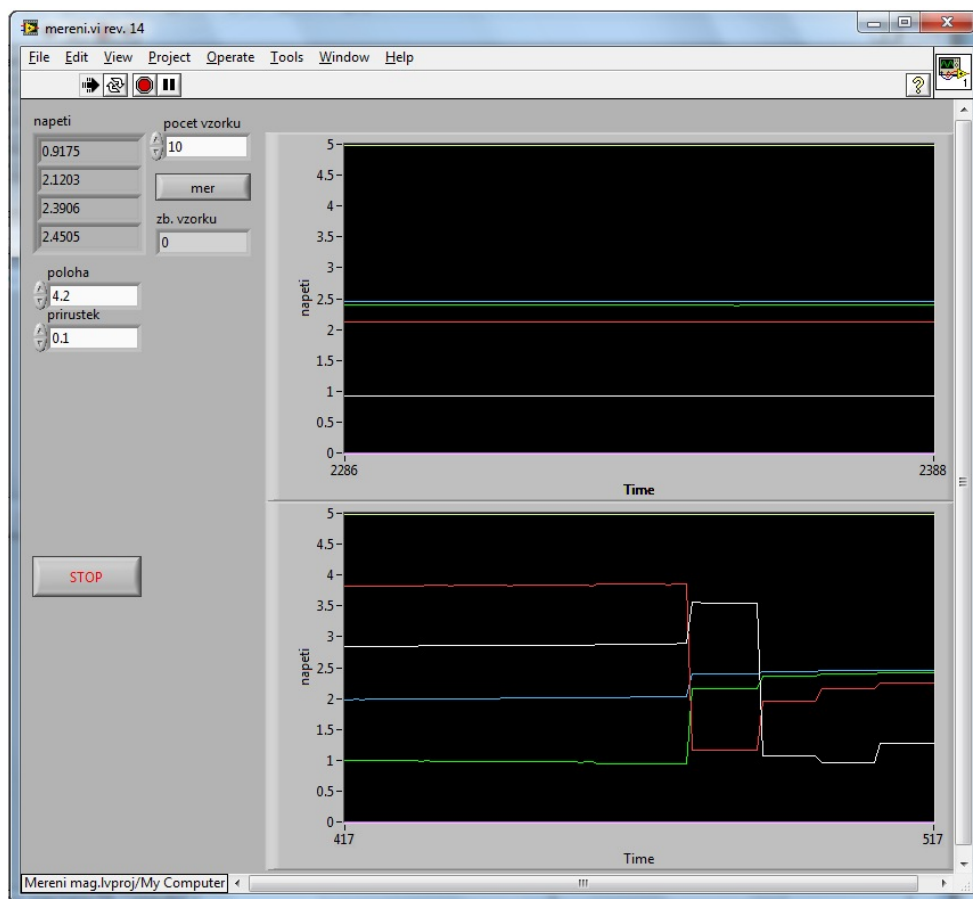
4.1.1 Popis měřícího programu

Program pro měření byl realizován v grafickém vývojovém prostředí NI LabVIEW. Program provádí měření napětí na všech snímačích a napájecího napětí, zobrazování naměřených hodnot a záznam žádaných částí měření.

Blokový diagram programu (obr. 4.6) tvoří tři logické části – měření, zobrazování a záznam do souboru. V měřící části je provedena inicializace a spuštění měření, následuje opakovaně prováděné měření a při ukončení programu se provede korektní ukončení práce s měřící kartou. V zobrazovací části jsou zobrazovány aktuální naměřené hodnoty jak číselně, tak v chartu, pro vizuální kontrolu průběhu experimentu. Část záznamu do souboru provádí záznam požadovaného množství vzorků z každého snímače do textového souboru. Záznam se spouští stiskem tlačítka měř (obr. 4.7) a zaznamená se počet vzorků odpovídající prvku „počet vzorku“ na čelním panelu (obr. 4.7).



Obr. 4.6: Blokový diagram měřícího programu



Obr. 4.7: Čelní panel měřícího programu

4.2 Postup měření

Snímač jsem umístil na polohy 1,8mm na ose y (pro druhé měření 2,12mm). Po sestavení blokového diagramu VI v LabVIEW jsem zapojil měření podle obrázku 4.6. Přivedl napájecí napětí (5 V) na snímač a začal měřit. Magnetem jsem pohyboval na ose x ve vzdálenosti

$\pm 8,4\text{mm}$ po $0,1\text{mm}$. Na každou aktuální polohu se zapsalo 10 hodnot pro jednotlivé snímače. Toto měření se opakovalo pětkrát pro dvě vzdálenosti v ose y ($1,8$ a $2,12\text{mm}$). Z těchto měření jsem získal hodnoty pro porovnání následujících charakteristik:

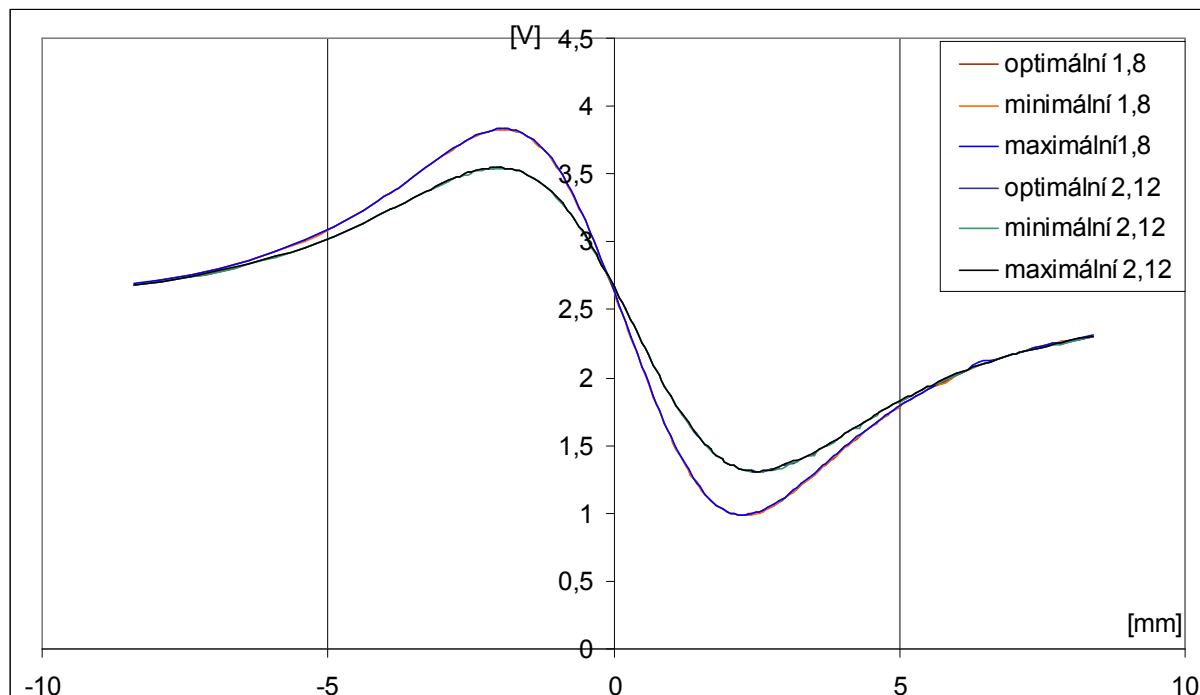
- optimální (průměrná)
- minimální
- maximální

Měření probíhalo při teplotě $26\text{ }^\circ\text{C}$.

4.3 Zpracování experimentů

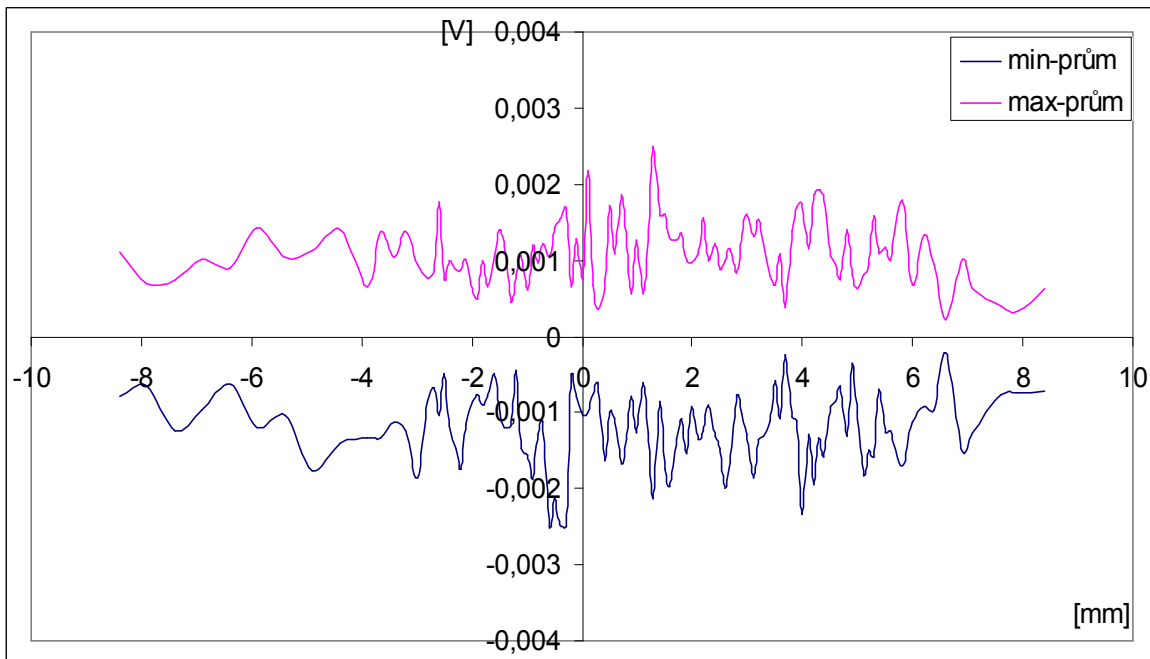
Na obrázku 4.8 jsou graficky znázorněné naměřené hodnoty (křivky). Měřením byla ověřena teorie popsaná v předešlých kapitolách.

- Před vložením magnetu do pohyblivého držáku jsem na snímači naměřil napětí $2,5114\text{V} \pm 0,03\text{V}$ (nulový offset).
- Jižní pól magnetu vnímá snímač jako kladnou magnetickou indukci.
- Severní pól magnetu vnímá snímač jako zápornou magnetickou indukci.
- V okamžiku kdy se začne projevovat přítomnost druhého (severního) pólu magnetu, dojde k lineárnímu snižování napětí na snímači, přes nulový offset. Když snímač detekuje pouze severní pól, zápornou magnetickou indukci, naměříme na snímači malé napětí (nižší než nulový offset)
- Lineární oblast v okolí offsetu ověřená v podkapitole 4.4.



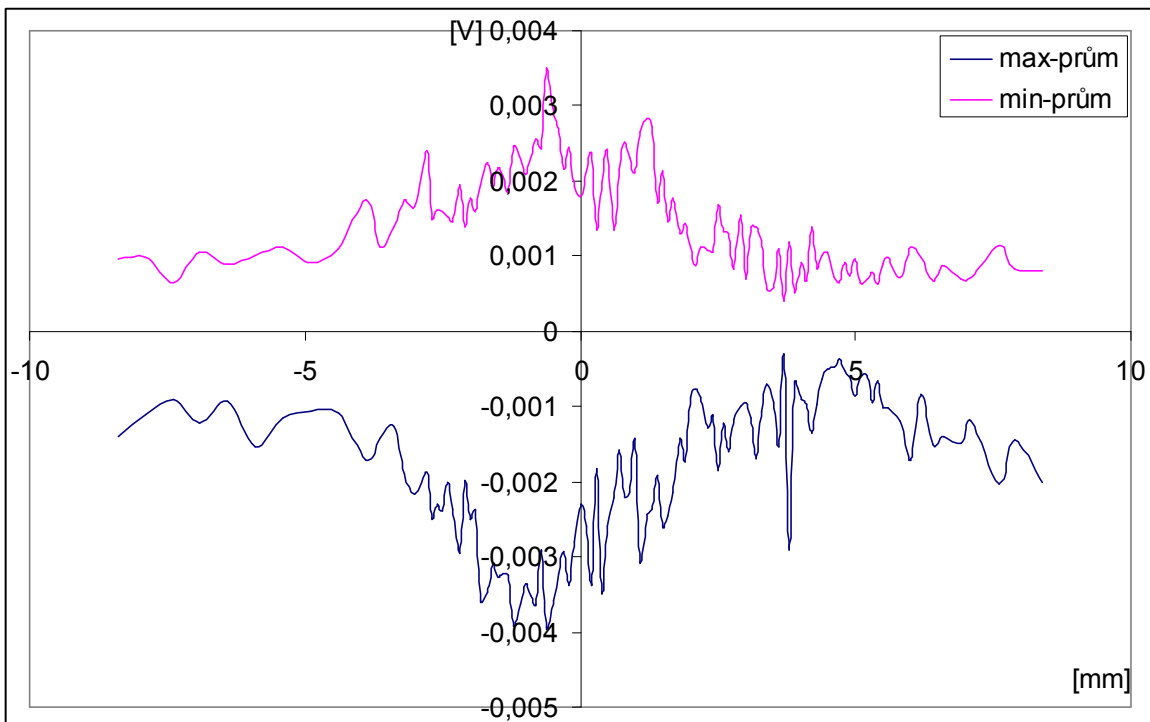
Obr. 4.8: Porovnání naměřených závislostí na vzdálenosti magnetu

Na obrázku 4.9 je grafické znázornění rozptylu naměřených hodnot pro polohu snímače na ose y $1,8\text{mm}$. Největší rozdíly hodnot jsou v oblasti $5,5$ až $6,6\text{mm}$. A procentuelně odpovídají hodnotě $\pm 0,18\%$



Obr. 4.9: Rozptyl hodnot pro polohu snímače na ose y 1,8mm

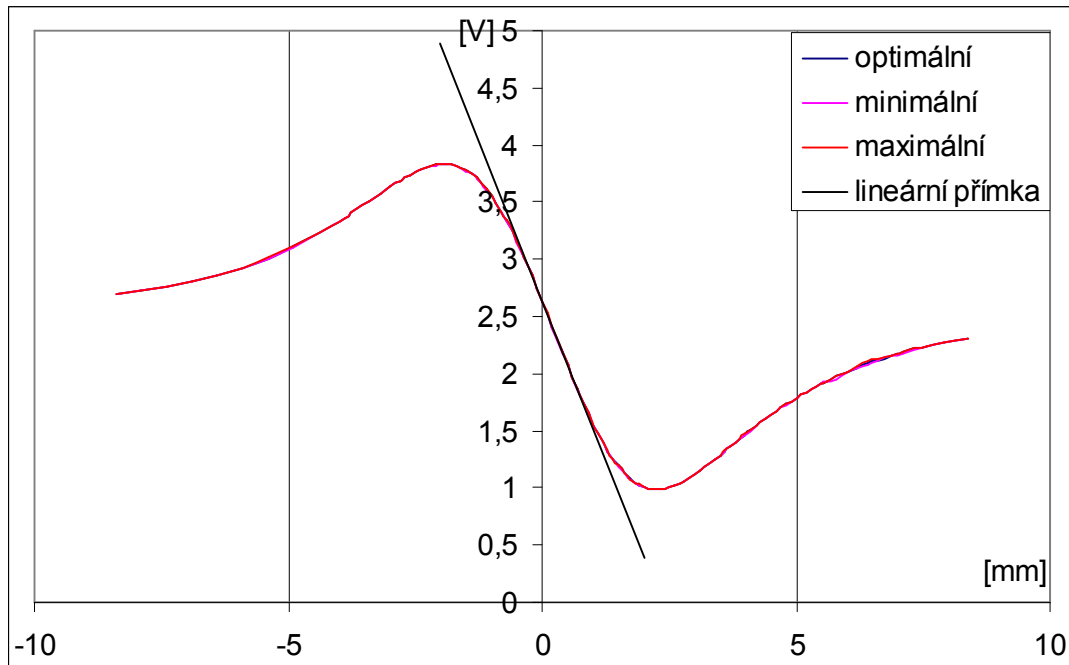
Na obrázku 4.10 je grafické znázornění rozptylu naměřených hodnot pro polohu snímače na ose y 2,12mm. Největší rozdíly hodnot jsou v oblasti 2,4 až 4,5mm. A procentuelně odpovídají hodnotě $\pm 0,26\%$



Obr. 4.10: Rozptyl hodnot pro polohu snímače na ose y 2,12mm

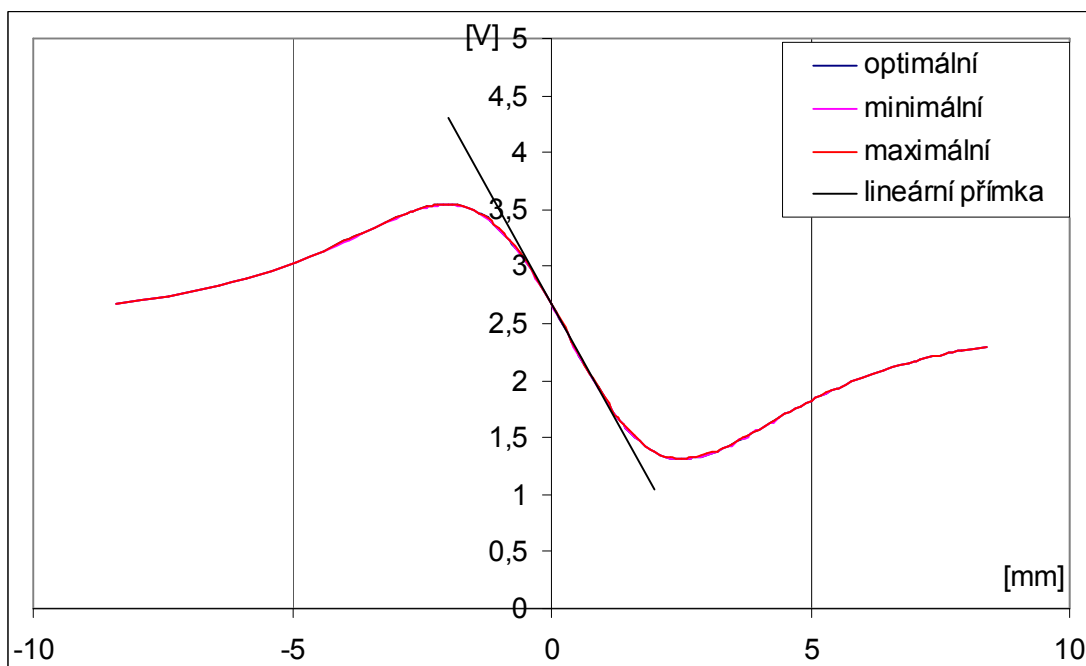
4.4 Ověření lineární části

Na obrázku 4.11 je zobrazena závislost napětí na vzdálenosti pro polohu snímače na ose y 1,8mm. Výstupní napětí dosahuje větších maximální hodnot (3,83 a 0,98V) než na obr. 4.11, což je způsobeno bližší polohou magnetu. Charakteristikou je proložena lineární přímka.



Obr. 4.11: Závislost napětí na vzdálenosti pro polohu snímače na ose y 1,8mm

Na obrázku 4.12 je zobrazena závislost napětí na vzdálenosti magnetu, pro polohu snímače na ose y 2,12mm. Výstupní napětí dosahuje menších maximální hodnot (3,54 a 1,31 V) než na obr. 4.10 což je způsobeno vzdálenější polohou magnetu. Charakteristikou je proložena lineární přímka.



Obr. 4.12: Závislost napětí na vzdálenosti pro polohu snímače v ose y 2,12mm

Rovnice přenosové funkce jsou popsány v podkapitole 3.1. Pro rovnici (4.3) a (4.5) jsou body volené náhodě (pro polohu snímače v ose y 1,8mm) nacházející se v lineární oblasti. V rovnici (4.6) jsou body mimo lineární oblast.

$$Y_1 = mX_1 + b \quad (4.1)$$

$$Y_2 = mX_2 + b \quad (4.2)$$

po úpravě:

$$m = \frac{Y_1 - Y_2}{X_1 - X_2} \quad (4.3)$$

$$\text{pro: } X_1 = -0,1\text{mm} \quad Y_1 = 2,746927\text{V}$$

$$X_2 = 0\text{mm} \quad Y_2 = 2,636036\text{V}$$

$$m = \frac{2,746927 - 2,636036}{-0,1 - 0} = -1,10891 \quad (4.4)$$

$$\text{pro: } X_1 = 0\text{mm} \quad Y_1 = 2,636036 \text{ V}$$

$$X_2 = 0,1\text{mm} \quad Y_2 = 2,523927\text{V}$$

$$m = \frac{2,636036 - 2,523927}{0 - 0,2} = -1,12109 \quad (4.5)$$

$$\text{pro: } X_1 = 1,9\text{mm} \quad Y_1 = 1,030345\text{V}$$

$$X_2 = 3\text{mm} \quad Y_2 = 1,116\text{V}$$

$$m = \frac{1,030345 - 1,116}{-1,9 - 3} = 0,0174 \quad (4.6)$$

Do rovnic (4.4) a (4.5) jsou dosazené body, které se nacházejí v lineární oblasti ($m = -1,121213 \pm 2,5\%$). V rovnici (4.6) jsou dosazené body, které se nenacházejí v lineární oblasti, což je ověřené i výsledkem ($m \neq -1,121213 \pm 2,5\%$).

4.5 Vyhodnocení experimentů

Linearita udávaná výrobcem snímače je $\pm 2,5\%$. Tuto katalogovou hodnotu splňovaly snímače pro polohu magnetu na ose x -0,1 až 0,6mm $\pm 0,1$ mm

Před vložením magnetu do držáku bylo na snímačích napětí $2,5114\text{V} \pm 0,03\text{V}$. Tento stav popisuje výrobce jako $B = 0\text{G}$ a rozsah udává 2,4-2,6V. Toto kritérium je splněno.

Vysoce přesná opakovatelnost. Pro polohu snímače:

- $y = 1,8\text{mm}$ je $\pm 0,12\%$
- $y = 2,12\text{mm}$ je $\pm 0,26\%$

5 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá ověřením vlastností absolutních snímačů polohy s Hallovým jevem, které patří mezi velmi rychle se rozvíjející skupinu snímačů, protože jsou malé, levné, přesné a spolehlivé.

V úvodních kapitolách je popsán vlastní Hallův jev. Další kapitoly se zabývají aplikací snímačů s Hallovým jevem v senzorce a jejich vnitřním uspořádáním. Snímače na principu Hallova jevu se především používají pro měření magnetického pole, elektrického proudu a vzdálenosti. Používají se v provedení s analogovým výstupem nebo jako spínače 0/1. Následuje popis faktorů, které ovlivňují přesnost těchto snímačů, některé faktory jsou společné, některé faktory jsou vázány na konkrétní aplikace. Poslední částí práce jsou výsledky experimentálního ověření vlastností snímače A1301KLHLT-T.

V této práci byla věnována zvýšená pozornost snímači A1301KLHLT-T, který je vhodný pro použití ve snímačích polohy. Experimentálně byly prověřeny jeho vlastnosti, důležité pro správnou funkci snímačů polohy a byla zjištěna o rád vyšší opakovatelná přesnost měření tohoto snímače oproti katalogovým hodnotám. Dalšími výhodami tohoto snímače jsou malé rozměry a nízká cena, jeho nevýhodou je vyšší proudový odběr, který může být problémem při použití více těchto snímačů najednou.

V dalších pracích doporučuji provést proměření statisticky významnějšího množství snímačů z různých výrobních sérií. Provést přesnější proměření vlastností snímače v prostoru a při různých pracovních teplotách.

6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:

- [1] Micro switch sensing and control. Hall effect sensing and application. [pdf dokument]. [cit. 16. 2. 2010]. Dostupný z: <http://sensing.honeywell.com/index.cfm/ci_id/141060/la_id/1/document/1/re_id/0>.
- [2] Svět elektrotechniky [online]. [cit. 3. 4. 2010]. Dostupné z: <<http://www.svetelektrotechniky.ic.cz/magnetizacni%20krivka%20feromagneticke%20latky.html>>.
- [3] BUREŠ, Jiří. conVerter [online]. 2002 [cit. 18. 3. 2010]. Dostupné z: <<http://www.converter.cz/fyzici/lorentz.htm>>.
- [4] Resnik, R; Walker, J. Fyzika : Elektřina a magnetismus. vyd. Brno: Vitium, 2000. 888 s. ISBN 80-214-1868-0.
- [5] [cit. 20. 4. 2010]. Dostupný z: <<http://www.cojeco.cz/obrazek.php?cesta=http://www.cojeco.cz/attach/image/max/1f/70e3/1f70e3d113c019ab09f2ad2def03207a.gif>>.
- [6] Kmoch, Ondřej. Měření magnetické indukce permanentních magnetů. [HTML dokument]. Červený Kostelec, březen 2002 [cit. 25. 1. 2010]. Dostupný z: <<http://fyzika.gymnachod.cz/sem/kmoch/magpole.doc>>.
- [7] Allegro[online]. 2010 [cit. 3. 2. 2010]. Dostupný z: <http://www.allegromicro.com/en/Products/Part_Numbers/1301/index.asp>.
- [8] Kuba, J. Hrzina, P. Měření magnetického pole aplikátorů magnetoterapeutických přístrojů. [pdf dokument]. [cit. 27. 2. 2010]. Dostupný z : <<http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce1/51.pdf>>.
- [9] Snímače elektrického proudu s Halloovou sondou. [pdf dokument]. 2005 [cit. 16. 4. 2010]. Dostupný z: <www.honeywell.sk/?com=documents&id=91>.
- [10] Allegro [online]. 2010 [cit. 5. 3. 2010]. Dostupný z: <http://www.allegromicro.com/en/Products/Design/current_sensors/index.asp>.
- [11] Teplotní závislost permeability magnetů. [pdf dokument]. [cit. 8. 2. 2010]. Dostupný z: <<http://www.turecek.info/fel/MTE/2%20-%20Ferity.pdf>>.
- [12] Permanentní magnety. [pdf dokument]. [cit. 20. 4. 2010]. Dostupný z: <http://www.sinomag.cz/data/sinomag/downloads/Permanentni_magnety.pdf>.