

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

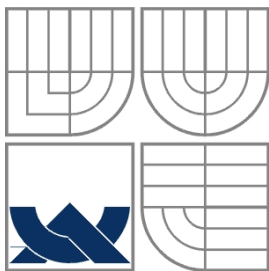
SNÍMAČE PROUDU

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

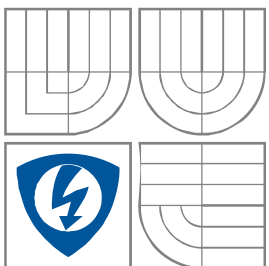
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. VLASTIMIL VACULÍK

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

SNÍMAČE PROUDU

CURRENT SENSORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. VLASTIMIL VACULÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. DR. ING. MIROSLAV PATOČKA

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Vlastimil Vaculík

ID: 78283

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Snímače proudu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Zabývejte se problematikou proudových snímačů s Hallovými sondami, ale bez feromagnetického obvodu. Vyberte Hallovy sondy vhodné pro tento účel a dostupné na trhu.
2. Analyzujte a teoreticky stanovte vlastnosti snímačů s různým počtem sond a s různým geometrickým uspořádáním.
3. Vybraný typ snímače realizujte a jeho vlastnosti experimentálně ověřte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího

Termín zadání: 23.9.2010

Termín odevzdání: 23.5.2011

Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá teoretickým rozbohem známých druhů snímačů proudu, mezi které patří například proudové transformátory, bočníky, a také moderní snímače s použitím Hallovy sondy, nebo Rogowského cívky. Následně se pak práce zajímá o problematiku snímačů proudu s Hallovými sondami, bez použití feromagnetického obvodu. Pro optimální snímání proudu a přesnost, je zde navrženo a vypočítáno několik možných variant, počtů snímacích prvků, a také rozložení snímačů kolem vodiče. Z výpočtů magnetické intenzity, jsou dále pomocí tabulkového programu Excel, vytvořeny 3D grafy, které znázorňují teoretické výpočty rozložení pole kolem vodiče, pro různý počet snímačů.

V poslední části jsou navrženy součástky doporučené k praktické realizaci a je vytvořeno elektrické schéma, podle tohoto schématu je navržena deska plošných spojů. Celý měřič proudu je prakticky realizován a jeho výsledky jsou porovnány s teoretickými předpoklady, které jsou diskutovány v závěru.

Abstract

This diploma thesis deals with the theoretical analysis of the known types of current sensors, including for example, current transformers, shunts, and advanced sensors using Hall sensor or Rogowski coil. Subsequently, the rest of the work deals with the issue of current transducers with Hall sensors, without using a ferromagnetic circuit. For optimal current measure and overall precision, several possible options are designed and calculated. This includes number of sensing elements and distribution of sensors around the wires.

Based on calculation of magnetic intensity, related 3D charts are plotted using Excel software. These charts illustrate the theoretical calculations of field distribution around conductors for various number of sensor.

In the last part, components are designed for practical implementation and scheme of electrical wiring. According to this scheme there is PCB designed as well. Whole current meter is practically built and its results are compared with theoretical assumptions that are discussed in conclusion part of this thesis.

Klíčová slova

Měření stejnosměrného proudu, snímače proudu, Hallova sonda, magnetická indukce

Key words

Measure direct current, current sensors, Hall sensor, magnetic flux

Bibliografická citace mé práce:

VACULÍK, V. *Snímače proudu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 60 s. Vedoucí diplomové práce doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka.

Prohlášení

Prohlašuji, že svojí diplomovou prací na téma Snímače proudu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 23. května 2011

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Dr. Ing. Miroslavu Patočkovi, za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 23. května 2011

.....
podpis autora



OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK.....	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
Úvod.....	12
1 Měření proudu.....	13
1.1 Měření stejnosměrných proudů	13
1.2 Měření střídavých proudů.....	14
1.3 Proudový transformátor	14
1.4 Proudový transformátor s elektronickou korekcí chyby.....	16
1.5 Proudový transformátor se zpětnovazební korekcí chyby.....	17
1.6 Rogowského cívka	18
1.7 Rogowského cívka v nf. oblasti do 5kHz.....	20
1.8 Rogowského cívka v vf. oblasti do 100MHz.....	21
2 Princip funkce Hallovy sondy	22
2.1 Hallův jev	22
2.2 Typy Hallovy sond.....	23
2.2.1 Lineární Hallova sonda	23
2.2.2 Hallova sonda ve spínacím režimu	24
2.3 Použití Hallovy sond	24
3 Snímače proudu bez feromagnetického obvodu	25
3.1 Nalezení funkce magnetické indukce pro libovolný bod v prostoru kružnice 25	
3.2 Rozložení bodů pro snímač se čtyřmi Hallovy sondami.....	27
3.2.1 Zhodnocení výsledků grafické simulace se čtyřmi Hallovy sondami..	27
3.3 Rozložení bodů pro snímač se šesti Hallovy sondami	28
3.3.1 Zhodnocení grafických výsledků snímače se šesti Hallovy sondami ..	29
3.4 Rozložení bodů pro snímač s osmi Hallovy sondami.....	30
3.4.1 Zhodnocení grafických výsledků snímače s osmi Hallovy sondami	31
3.5 Výběr Hallovy sondy.....	32
3.5.1 Hallova sonda Alegro A132x	32
3.5.2 Hallova sonda HAL182x.....	34
3.5.3 Porovnání vlastností Hallovy sond A132x a HAL182x.....	35
4 Konstrukce snímače proudu	36
4.1 Základní předpoklady	36
4.2 Výpočet mechanických a elektrických hodnot.....	36
4.2.1 Shrnutí vypočtených parametrů.....	37
4.3 Navržení elektrického schématu.....	38
4.3.1 Zdrojová část.....	38



4.3.2	Řídící a výstupní část	39
4.3.3	Deska plošného spoje	41
4.4	Experimentální ověřování parametrů snímače	42
4.4.1	Způsob měření.....	42
4.4.2	Výsledky měření	43
	Závěr	45
	Literatura.....	46
	Přílohy.....	47



SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 Náhradní schéma transformátoru proudu.....	15
Obrázek 1.2 Schéma zapojení elektronické kompenzace chyby [1].....	16
Obrázek 1.3 Transformátor se zpětnovazební korekcí chyby [1].....	17
Obrázek 1.4 Rogowského cívka.	18
Obrázek 1.5 Zapojení se zesilovačem a integrátorem pro nf. použití [1].....	20
Obrázek 2.1 Názorné zobrazení funkce Hallovy sondy.	22
Obrázek 2.2 Vnitřní uspořádání lineárního Hallovy sondy.	23
Obrázek 2.3 Vnitřní uspořádání Hallova spínače se Schmittovým klopným obvodem.	24
Obrázek 3.1 Působení magnetické indukce na Hallovu sondu.....	25
Obrázek 3.2 Rozložení čtyř měřících bodů na jednotkové kružnici.....	27
Obrázek 3.3 Rozložení šesti měřících bodů na jednotkové kružnici.	28
Obrázek 3.4 Rozložení osmi měřících bodů na jednotkové kružnici.....	30
Obrázek 3.5 Pouzdra, ve kterých se sonda dodává, a) SOT23, b) TO9UA.	32
Obrázek 3.6 Vnitřní zapojení Hallovy sondy A1322 [3].....	33
Obrázek 3.7 Vnitřní zapojení Hallovy sondy HAL182x [4].....	34
Obrázek 4.1 Vnitřní uspořádání stabilizátoru LE50ABZ [6].	38
Obrázek 4.2 Schéma zapojení stabilizátorem LE50ABZ.	38
Obrázek 4.3 Zapojení vývodů operačního zesilovače TLC271 [5].....	39
Obrázek 4.4 Zapojení operačního zesilovače.....	40
Obrázek 4.5 Schéma zapojení při měření vlastností snímače proudu.....	42
Obrázek 4.6 Polohy (a až e) vodiče okolo snímače proudu při měření vniku rušivého magnetického pole.....	44



SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Katalogové hodnoty pro Hallovy sondy Alegro řady A132x.....	33
Tabulka 2: Katalogové hodnoty pro Hallovy sondy Micronas řady HAL182x.....	34
Tabulka 3: Přehled hodnot vypočtených pro návrh snímače	37
Tabulka 4: Hodnoty měření závislosti výstupního napětí, na velikosti proudu vodičem.	43
Tabulka 5: Měření výstupního napětí v závislosti na poloze vodiče (přímo k Hallově sondě).....	43
Tabulka 6: Měření výstupního napětí v závislosti na poloze vodiče (mezi dvě Hallové sondy).	43
Tabulka 7: Naměřené hodnoty výstupního napětí v různých polohách vodiče.....	44



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

SMD	Surface mount device
DSP	Digital signal processing
BW	Bandwidth
DPS	Deska plošného spoje
OZ	Operační zesilovač
OA	Operational amplifier
3D	Three dimensional
SKO	Schmidtův klopný obvod
Vcc	Common collector Voltage
Vdd	Voltage drain drain
OUT	Out put
GND	Ground
IN	In put



Úvod

Snímače, se dnes vyskytují prakticky ve všech technických systémech, a snímají všechny možné a měřitelné veličiny. Proto není divu, že se jejich uplatnění stále více rozšiřuje, a to nejen proto, že se je člověk naučil používat, ale také proto, že jsou mnohem dostupnější, především cenově.

Jedním z druhů snímačů neelektrických veličin je Hallova sonda, která je schopna převádět velikost intenzity magnetického pole na úroveň elektrického napětí. S tímto druhem snímačů se zabývá tato práce, v návaznosti na semestrální projekt I. a II.. V moderní technice se Hallovy sondy velmi dobře ujaly a stále větší procento přístrojů, je používá při své činnosti, aniž by si to člověk uvědomoval. Významným důvodem, proč jsou Hallovy sondy tak rozšířeny je jejich jednoduchost, a prakticky cyklická nezníitelnost, proto dokáže plně nahradit klasické mechanické spínače a snímače, které svou omezenou životností způsobovaly technické problémy.

V práci je použito několika variant rozložení Hallových sond okolo vodiče, jímž protéká proud. Úkolem práce je najít řešení funkce magnetické indukce, a vykreslit grafy průběhu magnetického pole, které se okolo vodiče vytváří, a na které Hallovy sondy reagují. Teoretické poznatky se porovnají s výsledky měření prakticky vyrobeného snímače. Magnetický obvod není použit, z důvodů co největšího zjednodušení celého přístroje a také finančních úspor, protože především cena a hmotnost hraje ve většině moderních konstrukcí největší roli.

1 Měření proudu

Snímání elektrického proudu patří mezi základní veličiny, které se u měřených obvodů zjišťují.

Měření velikosti proudu má dva základní významy:

- měřící (A-metry, W-metry)
- jistící (ochranné, omezující)

Měření proudu pro použití v ochranné a jistící technice, „nemusí“ být extrémně přesné, protože se jedná o funkční určování velikosti proudu, a chrání nám zařízení před nadproudem, který pokud je jištěn zařízením o přesnosti řádově jednotek procent, je naprosto dostačující.

Naproti tomu, při měření proudu, ve významu skutečného měření a zjišťování přesné hodnoty proudu, je přesnost velmi důležitá. Zde se dá klidně mluvit i o přesnostech 0,1 až 1%, pro laboratoře a 1 až 5% pro orientační přístroje.

Při měření se používají jak analogové tak digitální měřicí přístroje, popřípadě zapisovače, které v čase zaznamenávají trend měřeného proudu.

1.1 Měření stejnosměrných proudů

Při měření stejnosměrných proudů, se dříve ve velké míře používaly bočníky, které představovaly odpor o velmi malé hodnotě, který byl do obvodu vřazen sériově, a při průtoku proudu na tomto odporu vznikl úbytek napětí. Tento úbytek je roven součinu protékajícího proudu a odporu bočníku. Měřicí systém vycházel z Ohmova zákona.

Měření proudu bočníkem, bylo velmi jednoduché a jedinou nevýhodu mělo v malé variabilitě použití. Bočníky byly konstruovány v proudových řadách, a to tak, že k řadě bočníků byl jeden typ analogového/digitálního měřicího přístroje, který měl právě rozsah měření odpovídající výstupnímu napětí bočníku.

Při měření proudu bočníkem, se nejprve musel alespoň orientačně znát proud, který měl být měřený, nebo se postupně bočníky vyměňovaly, až se dosáhlo optimální měřené hodnoty.

Výhodou bočníku je fakt, že pro měření nepotřebují magnetický obvod, naopak nevýhoda je, že galvanicky neoddělují měřicí obvod od obvodu měřeného.

Dalším zástupcem pro měření stejnosměrného proudu je Hallova sonda, která dokáže díky svým fyzikálním principům měřit velikost stejnosměrného proudu. Její použití je ve většině případů s magnetickým obvodem, ale objevují se i konstrukce a zapojení bez magnetického obvodu.

1.2 Měření střídavých proudů

Střídavý proud je nejčastěji měřen proudovým transformátorem, který má pevně daný převodní poměr, podle kterého se střídavý proud z velkého primárního transformuje na malý sekundární.

Převodní proudové transformátory se vyrábí v řadách od proudů desítek ampérů až do několika desítek tisíc ampérů na primární straně. Výstupní sekundární proud je dán převodem transformátoru, většinou se užívá výstupní proud o velikosti 1A, nebo 5A.

Další měřicí přístroje, které umožňují měřit střídavý proud, jsou buď modifikované a elektronicky vybavené proudové transformátory, nebo Rogowského cívky, které neobsahují magnetický obvod.

Nevýhodou měřicích transformátorů je nelinearita magnetického obvodu a také určitá malá vlastní spotřeba energie, která pak vnáší chybu do měřené hodnoty.

Výhodou měřicích transformátorů je fakt, že galvanicky oddělují měřený obvod od měřicích přístrojů.

1.3 Proudový transformátor

Proudový transformátor je elektrický měřicí přístroj, který převádí velký primární proud $i_1(t)$ na malý sekundární proud $i_2(t)$, který se následně vede na analogový, nebo digitální měřicí přístroj, popřípadě na jiné zařízení, které vyhodnocuje velikost proudu.

Proudový transformátor obsahuje primární vinutí N_1 , které je tvořeno vodičem, jímž prochází měřený elektrický proud $i_1(t)$. Obvykle se jedná o jeden či více závitů měřeného vodiče, který je protažen magnetickým jádrem proudového transformátoru.

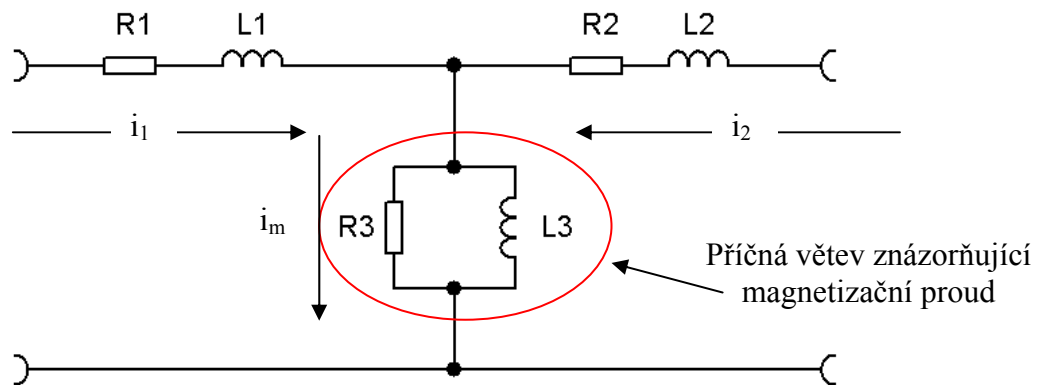
Magnetický obvod je tvořen toroidním jádrem, které je navinuto jako cívka z plochého transformátorového plechu.

Na jádře je navinuto jedno, nebo více různých vinutí N_2 , které jsou z hlediska zapojení vinutími sekundárními.

Při průchodu proudu $i_1(t)$ primárním vodičem, dojde v transformátoru vlivem magnetické indukce B , která je v okolí primárního vodiče, k vybuzení magnetického toku Φ , ve jhu transformátoru. Tento magnetický tok způsobí, že se v cívce N_2 sekundárního vinutí začne indukovat elektrický proud $i_2(t)$.

Transformátor má při měření také jednu nežádoucí a neodstranitelnou chybu. Ta vzniká v magnetickém obvodu, kdy obvod má vlastní magnetizační proud, který je potřeba pro vlastní funkci transformátoru. Tento proud je však z fyzikálního hlediska neodstranitelný, protože transformátor potřebuje vlastní magnetizační proud. Znamená to, že i chyba, která vzniká na transformátoru nelze zcela odstranit, lze ji pouze zmenšit na přijatelnou velikost. Pro zlepšení parametrů transformátorů, se vybírají kvalitní materiály pro výrobu magnetického obvodu, nebo se dbá na kvalitu a provedení (těsnosti) navinutého sekundárního vinutí, popřípadě se pro eliminaci

chyby magnetizačním proudem používá některého modifikovaného zapojení, s přídatnou elektronickou kompenzací chyby.



Obrázek 1.1 Náhradní schéma transformátoru proudu [1].

Z principiálního schématu je vidět, že ztráty na transformátoru proudu, jsou dány příčnou větví. Výstupní proud je nižší o velikost magnetizačního proudu podle vztahu:

$$i_{\mu}(t) = I_{\mu 0} + \frac{1}{L_2} \int u_2(t) d(t) \quad (1.1)$$

Sekundární proud nakrátko je přepočten z proudu primárního podle vztahu:

$$i_{2,K}(t) = k \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} i_1(t) \quad (1.2)$$

Výsledný výstupní proud je pak dán rozdílem proudu nakrátko a magnetizačního proudu podle vztahu:

$$i_2(t) = i_{2,K}(t) - i_{\mu}(t) \quad (1.3)$$

Proudový transformátor je při měření proudu v celém rozsahu charakteristiky poměrně lineární, pouze při větším zatížení se začne jeho linearita zhoršovat. Transformátor proudu pracuje v režimu blízkému chodu na prázdno, proto důležitou roli hraje délka a průřez přívodních vodičů, které způsobují ztráty na vedení a zvyšují nepřesnost při měření.

Důležitá zásada při měření proudovým transformátorem je, že výstupní svorky nesmí nikdy zůstat nepřipojeny k měřicímu přístroji, protože vlivem magnetické indukce by došlo v sekundárním vinutí k naindukování vysokého napětí, které by toto vinutí spolehlivě zničilo. Každý transformátor se musí při zapojení do obvodu zkratovat, nebo připojit k měřicímu přístroji.

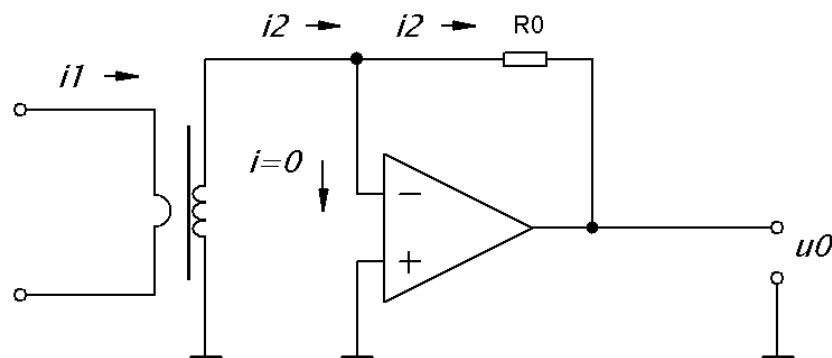
Dnes se transformátor používá převážně k jistění, popřípadě k převodu při měření velkých proudů na rozvodných zařízeních, jak vysokého tak nízkého napětí.

1.4 Proudový transformátor s elektronickou korekcí chyby

Proudový transformátor s elektronickou korekcí chyby principiálně vychází ze základního zapojení proudového transformátoru proudu, pouze sekundární vinutí není připojeno přímo na měřicí přístroj, nebo systém, ale pracuje do virtuálního zkratu, který vytváří operační zesilovač Obrázek 1.2. Operační zesilovač je zapojen neinvertujícím vstupem na zem, a do invertujícího vstupu je přiváděn proud ze sekundární strany transformátoru. Operační zesilovač nastavuje mezi výstupními svorkami transformátoru nulové napětí. Sekundární proud $i_2(t)$ musí být pohlcován (dodáván) výstupem operačního zesilovače. Převod transformátoru musí být proto nastaven tak, aby operační zesilovač nebyl na svém výstupu přetížen v celém proudovém rozsahu.

Proti velkým proudům je možné operační zesilovač chránit dvěma diodami zapojenými antiparalelně mezi invertující a neinvertující vstupy zesilovače. Za normálního režimu bude na diodách nulové napětí, proto jimi nepoteče žádný proud a na činnost zesilovače nebudou mít žádný vliv.

Operační zesilovač slouží jako převodník proudu na napětí ($i_2(t)/u(t)$).



Obrázek 1.2 Schéma zapojení elektronické kompenzace chyby [1].

Převodní vztah je:

$$u_0(t) = -R_0 i_2(t) \quad (1.4)$$

Záporné znaménko pochází z operačního zesilovače, kde signál vstupuje do invertujícího vstupu se záporným znaménkem.

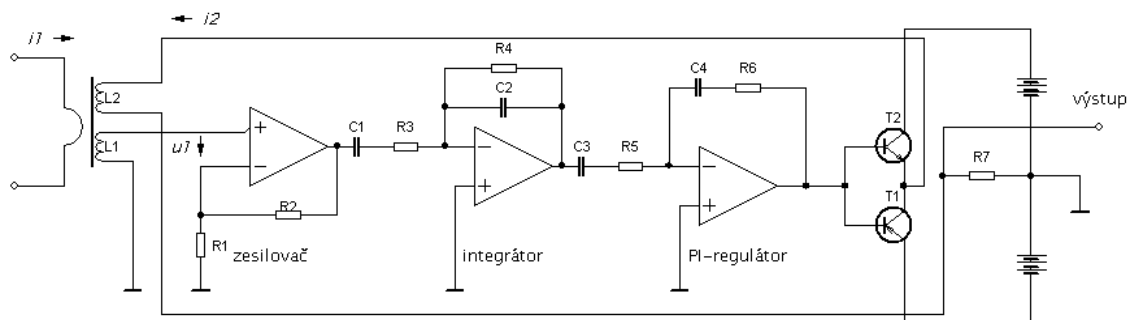
Důvodem takového uspořádání je eliminace vlivu zátěže na dolní mezní kmitočet transformátoru. Ten je pak dán pouze samotnou časovou konstantou sekundárního vinutí podle rovnice :

$$f_d = \frac{1}{2\pi\tau_2} = \frac{R_{cu2}}{2\pi L_2} \quad (1.5)$$

Zapojení je nevýhodné pro měření velkých proudů v energetice, je vhodné pro měření malých střídavých proudů ve výkonové elektronice.

1.5 Proudový transformátor se zpětnovazební korekcí chyby

Principiálně se zapojení transformátoru se zpětnovazební korekcí podobá zapojení s Hallovou sondou a se zpětnovazební kompenzací určené pro měření stejnosměrného proudu. Rozdílem je pouze to, že magnetický tok v jádře nesnímá Hallova sonda, ale je získáván integrací napětí $u_1(t)$ z pomocného snímacího vinutí. Ve skutečnosti se jedná o zpětnovazební regulaci, kdy se nastavuje nulový tok v jádře transformátoru.



Obrázek 1.3 Transformátor se zpětnovazební korekcí chyby [1].

Primárním vinutím teče proud $i_1(t)$. Pomocné snímací vinutí, které vede do zesilovače nesmí být zatíženo proudem. Napětí $u_1(t)$ je proto přivedeno na operační zesilovač v neinvertujícím zapojení, s velkým vstupním odporem čímž se dosáhne nulového zatěžovacího proudu. Napětí $u_2(t)$ je pak přivedeno na vstup integrátoru. Výstupní napětí integrátoru $u_3(t)$ má tedy význam magnetického toku v jádře. Měřený tok pak přichází na vstup PI-regulátoru. Regulátor se snaží pomocí zpětnovazebního proudu $i_2(t)$ udržet v jádře nulový tok.

Dvojitý emitorový sledovač má za úkol pouze proudově posílit výstup PI-regulátoru.

Kondenzátory C_1 , C_3 slouží k odstranění stejnosměrného offsetu na výstupech zesilovače a integrátoru.

Aby integrátor neintegroval vlastní offset, čímž by se mohl jeho vstup dostat do oblasti saturace, je zesílení integrátoru omezeno na nízkých kmitočtech odporem R_4 na velkou hodnotu.

$$K_U = -\frac{R_4}{R_3} \quad (1.6)$$

Tím se pak ale omezí dolní mezní kmitočet celého systému na hodnotu:

$$f_d = \frac{1}{2\pi R_4 C_2} \quad (1.7)$$

Pod tímto kmitočtem soustava nepracuje. Výhodou však je, že dolní mezní kmitočet je určen pouze prvky R_4 , C_2 a není závislý na vlastnostech transformátoru. Tak lze i s relativně malým jádrem velmi nízkého mezního kmitočtu.

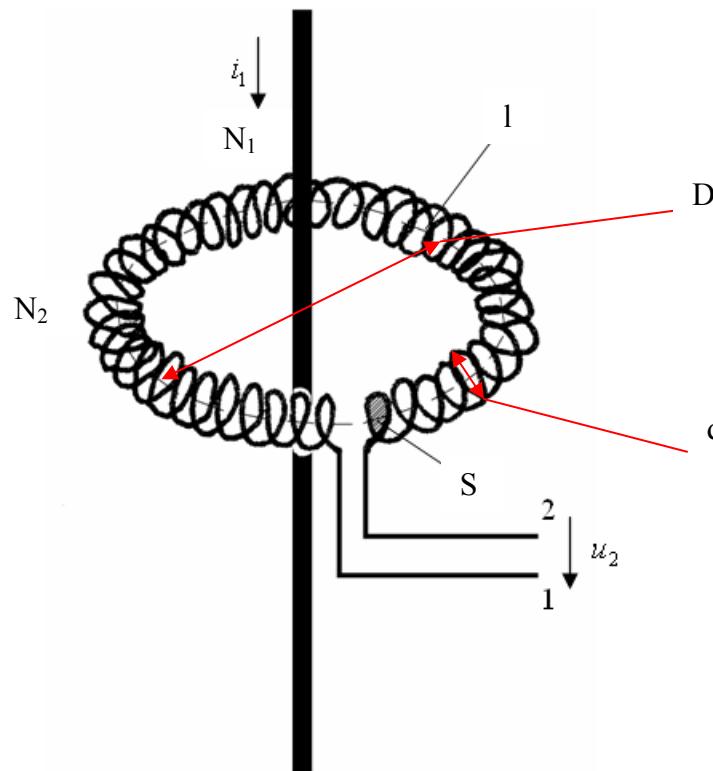
1.6 Rogowského cívka

Rogowského cívka je ve skutečnosti měřicí transformátor proudu, bez feromagnetického obvodu. Měřený proud $i_1(t)$ protéká vodičem, a cívka tento vodič obepíná Obrázek 1.4. Sekundární vinutí je vzduchové, aby nemohlo nijak ovlivnit magnetické pole tvořené primárním vinutím. Měřícím vinutím nesmí protékat žádný proud, cívka pracuje v režimu naprázdno. Cívka má velkou výhodu, že díky absenci magnetického obvodu netrpí dynamickými vlastnostmi jako transformátor proudu. Těmito vlastnostmi se cívka liší od transformátoru proudu.

Matematický popis cívky v režimu naprázdno je dán Ampérovým zákonem:

$$\int_l H \times dl = N_1 \times i_1 \quad (1.8)$$

Rogowského cívka musí být vzhledem ke své délce poměrně štíhlá a musí být splněna nerovnost $d \ll D$. (d =průměr cívky, D =střední průměr cívky).



Obrázek 1.4 Rogowského cívka.

Pokud se sobě d a D nerovnaj, je možné cívku prohlásit za „nekonečně štíhlou“ a topologicky ji ztotožnit s hraniční křivkou l v křivkovém integrálu. Indukované napětí pak nezáleží na tvaru cívky, protože víme, že hodnota křivkového integrálu je nezávislá na tvaru integrační cesty.

Nezávislost indukovaného napětí $u_2(t)$ tvaru cívky je její největší přednost.

Cívka bývá navinuta na gumovou hadici, protože nesmí obsahovat žádné feritové jádro. Protože je citlivost velmi malá, musí být navinuto několik tisíců závitů cívky, velmi tenkým vodičem, tak aby indukované napětí bylo co největší. Na výstup cívky se připojuje zařízení, které má pokud možno co největší vstupní odpor, v ideálním případě nekonečný. Většinou je tento snímací obvod řešen operačním zesilovačem, protože OZ má velmi vysokou impedanci na svém vstupu. Ve skutečnosti je Rogowského cívka pasívní převodník proudu na napětí. Zvětšení citlivosti se dosáhne přidáním primárních závitů, nebo sekundárních závitů cívky.

Cívka je díky funkčnosti Ampérova zákona zcela imunní na rušivé proudy ležící mimo vnitřní prostor cívky.

Převodní vztah cívky, to znamená vztah mezi měřeným vstupním proudem a měřenosným výstupním napětím lze vypočítat z rovnice:

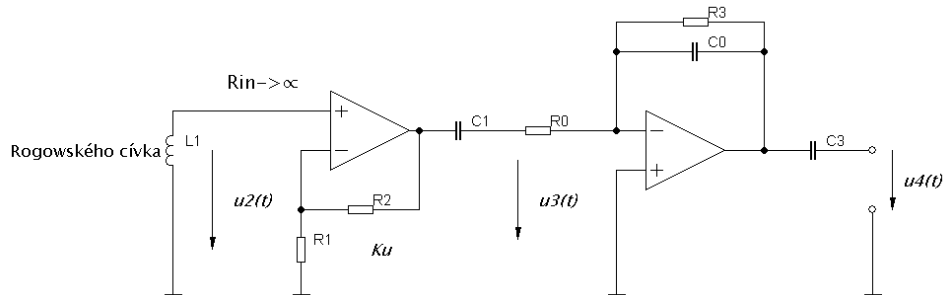
$$i_1(t) = \frac{4l}{\pi N_1 N_2 \mu_0 d^2} \Psi_2 = \frac{4l}{\pi N_1 N_2 \mu_0 d^2} \int u_2(t) dt \quad (1.9)$$

Rogowského cívka je v režimu naprázdno dokonalým snímačem proudu, který není zatížen žádnou systematickou chybou jako u proudového transformátoru.

Při tvarovém deformování dosahuje cívka velmi dobrých vlastností a přesnosti pod 1%. Při měření proudu a přímém převodu na velikost proudu je potřeba výstupní napětí integrovat pomocí integrátoru, tím dosáhneme přímého měření velikosti proudu $i_1(t)$.

1.7 Rogowského cívka v nf. oblasti do 5kHz

Při použití Rogowského cívky je potřeba použít i aktivního integrátoru a zesilovače dle schématu.



Obrázek 1.5 Zapojení se zesilovačem a integrátorem pro nf. použití [1].

První operační zesilovač pracuje v neinvertujícím zapojení, z důvodu co největší vstupní impedance. Pracuje jako impedanční oddělovač. Výsledné zesílení může být větší $K_u > 1$, což zvyšuje citlivost celého snímače. Integrátor je realizován pomocí druhého operačního zesilovače, zapojeného jako invertující. Pomocný rezistor R_3 o velké hodnotě, řádově jednotky $M\Omega$, omezuje na nízkých kmitočtech zesílení. Bez tohoto rezistoru by integrátor na svém výstupu ujížděl do kladné nebo záporné saturace vlivem vlastní napěťové nesymetrie. Kondenzátor C_1 a C_3 stejnosměrně odděluje offset prvního a druhého operačního zesilovače (stejnoseměrný offset by mohl způsobit saturaci integrátoru).

Převodní konstanta snímače je dána vztahem:

$$i_1(t) = \frac{4R_0C_0l}{K_U\pi N_1N_2\mu_0d^2}u_4(t) \quad (1.10)$$

Z této rovnice pak plyne, že přenos snímače definovaný jako přenosová impedance naprázdno je konstantní a nezávislý na kmitočtu v kmitočtovém pásmu od 0Hz do ∞ Hz.

$$\frac{u_4(t)}{i_1(t)} = \frac{K_U\pi N_1N_2\mu_0d^2}{4R_0C_0l} = konst. \quad (1.11)$$

Ve skutečnosti je dolní mezní kmitočet větší než nula, a je omezen odporem R_3 . Dolní mezní kmitočet celého zapojení je dán časovou konstantou R_3C_0 . Pod tímto kmitočtem již integrátor neintegruje.

Kmitočet, pod kterým již není integrátor schopen integrovat, a tím je dán dolní mezní kmitočet, dle vztahu:

$$f_d = \frac{1}{2\pi R_3C_0} \quad (1.12)$$

Na tomto kmitočtu dosahuje amplitudová chyba hodnoty -3dB a fázová +45°. Při dobrém návrhu celého obvodu lze dosáhnout dolního mezního kmitočtu řádově jednotek Hz.

Horní mezní kmitočet je závislý na paralelní mezizávitové kapacitě Rogowského cívky. S ohledem na velké množství závitů N_2 je kapacita C_2 značná, a s indukčností L_2 vytváří paralelní rezonanci na kmitočtu f_0 , nad tímto kmitočtem nelze již cívku použít.

Horní mezní kmitočet má velikost:

$$f_h = f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} \quad (1.13)$$

Cívky používané v energetice mívají horní mezní kmitočet okolo 20kHz.

1.8 Rogowského cívka v vf. oblasti do 100MHz

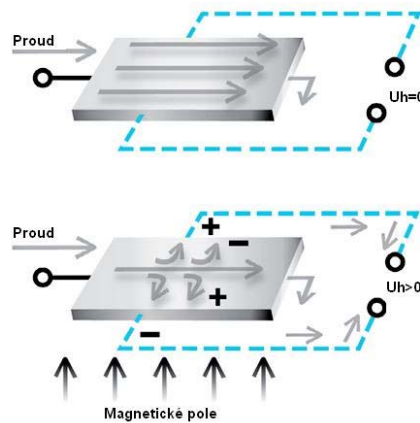
Kromě použití Rogowského cívky v oblasti nízkých frekvencí, lze cívku použít pro měření i v oblasti vysokofrekvenční techniky. Použití má však svá úskalí a také pravidla pro návrh a konstrukci cívky samotné. Především jak již bylo zmíněno, cívka musí mít paralelní mezizávitovou kapacitu C_2 co nejmenší, protože s indukčností L_2 tvoří rezonanční obvod, který výsledný měřený průběh degraduje.

Při měření vysokých kmitočtů se začne snižovat také fázový posuv mezi měřeným proudem $i_1(t)$ a výsledným výstupním napětím $u_2(t)$. Pokud byl fázový posuv mezi měřeným proudem a výsledným napětím v nízkofrekvenční oblasti +45° bude se tento posuv na vysokých kmitočtech postupně snižovat až na nulový. Je to dáno vzájemným působením indukčnosti L_2 a kapacity C_2 , kdy se se vzrůstajícím kmitočtem posuv fáze napětí vyruší a cívka bude mít pouze ohmický charakter.

2 Princip funkce Hallovy sondy

2.1 Hallův jev

Hallův jev vzniká v důsledku Lorenzovy síly, která působí na náboj pohybující se v magnetickém poli. Pokud prochází stejnosměrný elektrický proud plochou destičkou z vodivého materiálu a v kolmém směru na pohybující se částice působí magnetická indukce, jsou tyto částice vychylovány v příčném směru, kde se vlivem hromadění začne vytvářet kladný elektrický potenciál a vzniká takzvané Hallovo napětí U_H . Obrázek 2.1. Destička napařená na nosném materiálu je buď z polovodivého materiálu, nebo dříve z kovu, většinou ze zlata. Musí být velmi tenká, aby byla dosažena co největší citlivost. Také počet volných nosičů náboje musí být co nejmenší. Dobrých vlastností a dobrých parametrů dosahují sondy s použitím tenkých napařených vrstev z polovodivého materiálu.



Obrázek 2.1 Názorné zobrazení funkce Hallovy sondy.

Hallovo napětí U_H je velmi malé, řádově jednotky mV. V praxi pak vzniká problém s odstupem signálu od šumu, kdy se na přívodních vodičích kromě měřeného Hallova napětí superponuje na toto napětí rušivý signál. Ten se dá velmi dobře kompenzovat kroucenými přívodními vodiči, kde se vlivem vzájemné polohy vyruší rušivý signál.

Velikost Hallova napětí vyplývá z rovnice:

$$U_H = -\frac{IB}{nq_e b} = R_H \frac{IB}{b} \quad (2.1)$$

kde konstanta Hallovy sondy je :

$$R_H = \frac{1}{nq_e} \quad (2.2)$$

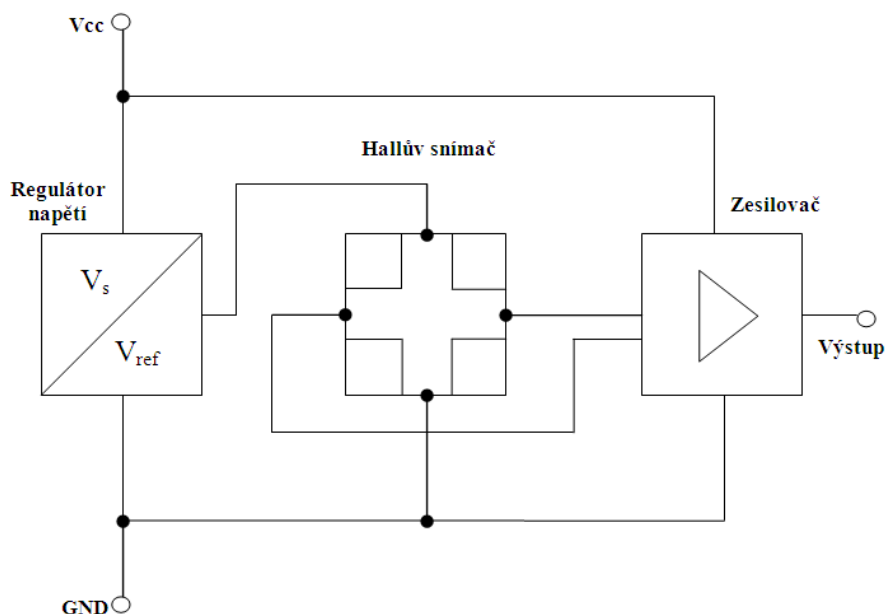
Kvalitní Hallova sonda musí být také teplotně kompenzovaná, protože vlivem teploty se mění koncentrace elektronů a děr, a tím se mění i velikost Hallova napětí. V praxi je teplotní citlivost Hallovy sondy, jeden z nejdůležitějších ukazatelů jakosti Hallovy sondy, protože rozhoduje o přesnosti snímáče.

2.2 Typy Hallových sond

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

2.2.1 Lineární Hallova sonda

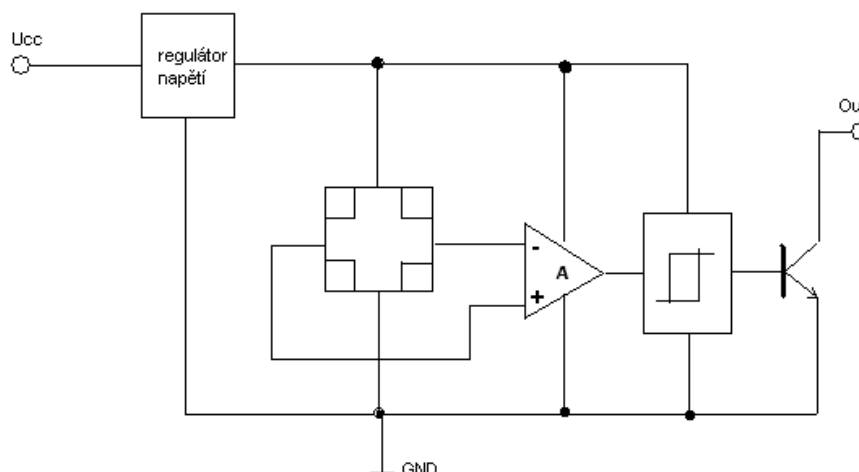
Hallova sonda, která pracuje v lineárním režimu, převádí hustotu magnetického toku na signál (napětí), který je přímo úměrný tomuto poli. Takovým snímačem pak lze vyhodnocovat vzdálenost od zdroje konstantního magnetického toku (většinou permanentní magnet) nebo velikost, který prochází vodičem (elektromagnetem) v konstantní vzdálenosti od sondy. Výstupní napětí samotné Hallové sondy je velmi malé. Pokud je napájecí napětí Hallové sondy příliš zvlněné (obsahuje šum) dochází ke znehodnocení získaného signálu. Toto znehodnocení je úměrné míře zarušení signálu. Proto se Hallové sondy doplňují o další elektronické prvky, které pomáhají zlepšit jeho parametry. Regulátor napětí zajistí dostatečně stabilní napájecí napětí, aby výstup sondy měl konstantní napětí při konstantním magnetickém toku snímačem. Na výstupu z Hallové sondy je i přes to velmi malé Hallovo napětí, které je pro lepší použitelnost zesíleno operačním zesilovačem a vyvedeno na výstupní svorky. Díky zařazení zesilovače na výstup získáme úroveň napětí v rozumné velikosti pro detekce změn hustoty magnetického pole. Tyto tři prvky jsou integrovány do jednoho čipu s několika výstupními vývody, které se používají pro napájení i pro výstup získaného signálu. Vnitřní uspořádání je vidět na Obrázku 2.2 .



Obrázek 2.2 Vnitřní uspořádání lineárního Hallové sondy.

2.2.2 Hallova sonda ve spínacím režimu

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



Obrázek 2.3 Vnitřní uspořádání Hallova spínače se Schmittovým klopným obvodem.

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

2.3 Použití Hallovy sondy

Hallovy sondy se s úspěchem používají v nejrůznějších elektronických a elektrotechnických systémech, které jsou například náročné na údržbu a čistotu prostředí. Magnet se většinou integruje do systému, například zalitím do umělé hmoty, nebo pryskyřice a sonda se rovněž může zalít do některé z umělých hmot, nebo pryskyřic. Takto vytvořený systém je prakticky bezúdržbový, a kromě rušivých magnetických polí, nebo nechtěné změny vzdálenosti v důsledku mechanického poškození systému, nepůsobí na tento snímač žádné jiné vlivy.

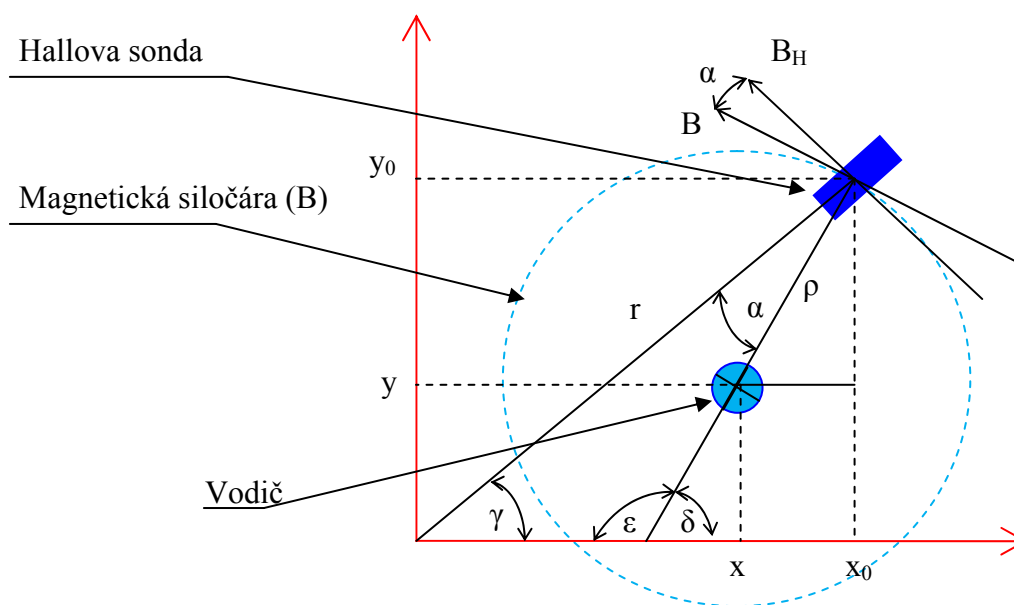
Nejvíce se však používají Hallovy sondy v automobilním průmyslu, a v drobné elektronice, jako jsou například chladicí ventilátory a malé EC motorky. Své uplatnění mají rovněž v měřicí technice, kde mají největší využití při měření stejnosměrných proudů.

3 Snímače proudu bez feromagnetického obvodu

Úkolem je nalézt vztah pro výpočet velikostí dílčích magnetických indukcí, kterou Hallovy sondy cítí, a na kterou reagují. Vodič umístěný mezi Hallovými sondami, se může volně pohybovat, a proto je potřeba dílčí velikosti magnetických indukcí sčítat. Tento součet ve výsledku tvoří charakteristiku magnetické indukce, kterou jsou Hallové sondy ovlivňovány. Pro tento výpočet je potřeba nalézt potřebnou funkci.

3.1 Nalezení funkce magnetické indukce pro libovolný bod v prostoru kružnice

Aby bylo možné vypočítat jednotlivé hodnoty intenzit magnetické indukce v nově nalezených bodech x_0 a y_0 , musíme znát také polohu v prostoru vodiče, kterým protéká proud a také funkci, pomocí které vypočítáme jednotlivé hodnoty. K lepšímu pochopení situace, slouží Obrázek 3.1, na kterém je znázorněn vodič umístěný volně v prostoru, a Hallova sonda v libovolném bodě umístěném na kružnici o poloměru r .



Obrázek 3.1 Působení magnetické indukce na Hallovu sondu.

Vodičem prochází elektrický proud I , a siločáry magnetické indukce B působí na Hallovu sondu. Pokud je osa vodiče kolmá na Hallovu sondu, je výsledná intenzita pole působící na snímač největší a je úměrná poloměru vzdálenosti od vodiče.

Pro tento poloměr v libovolném bodě lze psát:

$$\rho = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (3.1)$$

Poloměr kružnice lze vypočítat podle Pythagorovy věty:

$$r = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \quad (3.2)$$

Magnetická indukce se vypočítá ze vztahu:

$$B = \mu_0 \cdot H = \mu_0 \cdot \frac{I}{2\pi\rho} \quad (3.3)$$

Úhel γ , který svírá poloměr kružnice r s osou x se vypočítá:

$$\gamma = \arctg \frac{y_0}{x_0} = \arcsin \frac{y_0}{r} = \arccos \frac{x_0}{r} \quad (3.4)$$

Hledaný úhel α je pak dán rozdílem úhlů v trojúhelníku s vrcholovými úhly γ a ε :

$$\alpha + \gamma + \varepsilon = 180 \quad (3.5)$$

$$\alpha = 180 - \gamma - \varepsilon = 180 - \gamma - (180 - \delta) \quad (3.6)$$

Kde δ je úhel, který svírá přímka vzdálenosti ρ s osou x a vypočítá se:

$$\delta = \arctg \frac{y_0 - y}{x_0 - x} = \arccos \frac{x_0 - x}{\rho} = \arcsin \frac{y_0 - y}{\rho} \quad (3.7)$$

Výsledný úhel α , obou kolmic B_H a B se vypočítá složením dílčích úhlů γ a δ :

$$\alpha = \arctg \frac{y_0 - y}{x_0 - x} - \arctg \frac{y_0}{x_0} \quad (3.9)$$

Celková indukce B_H , působící na Hallovu sondu, a vyvolávající Hallovo napětí U_H vychází ze vztahu:

$$B_H = B \cdot \cos\alpha = \frac{\mu_0 \cdot I}{\rho} \cdot \cos\alpha \quad (3.10)$$

$$B_H = \frac{\mu_0 \cdot I}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}} \cdot \cos\left(\arctg \frac{y_0 - y}{x_0 - x} - \arctg \frac{y_0}{x_0}\right) \quad (3.11)$$

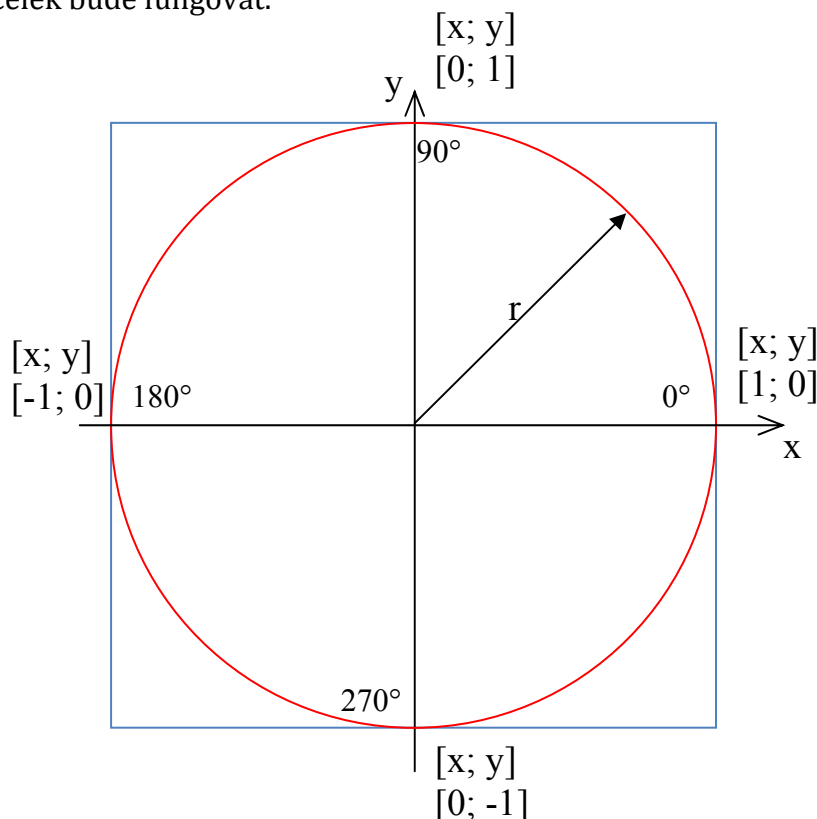
Takto získaný obecný bod, lze pak použít pro výpočet dílčích indukcí okolo vodiče, a mění se pouze souřadnice x_0 a y_0 . Součet takových dílčích výpočtů, vede na funkci $B_H=f(x,y)$.

Celkové B_H se pak vypočítá jako součet všech B_H , které se nachází okolo vodiče.

$$B_H = B_{H1} + B_{H2} + B_{H3} + B_{H4} + B_{H5} + B_{H6} + \dots + B_{Hn} \quad (3.12)$$

3.2 Rozložení bodů pro snímač se čtyřmi Hallovými sondami

První případ, který bylo potřeba vyřešit, byl snímač se čtyřmi Hallovými sondami rozloženými symetricky okolo vodiče. Pro umístění sond, byly zvoleny osy x a y v hodnotách -1 a $+1$. Toto rozložení je nejjednodušší, pro které je reálná šance, že snímač jako celek bude fungovat.



Obrázek 3.2 Rozložení čtyř měřících bodů na jednotkové kružnici.

Poloměr kružnice je $r=1$, a body x a y se posouvají po kružnici vždy o devadesát stupňů. Pro tyto body lze použít výpočtu pomocí funkcí sinus a kosinus, a hodnoty pak jsou:

$$\text{Úhel } 0^\circ \quad x = r \cdot \cos 0 = 1; y = r \cdot \sin 0 = 0 \quad (3.13)$$

$$\text{Úhel } 90^\circ \quad x = r \cdot \cos 90 = 0; y = r \cdot \sin 90 = 1 \quad (3.14)$$

$$\text{Úhel } 180^\circ \quad x = r \cdot \cos 180 = -1; y = r \cdot \sin 180 = 0 \quad (3.15)$$

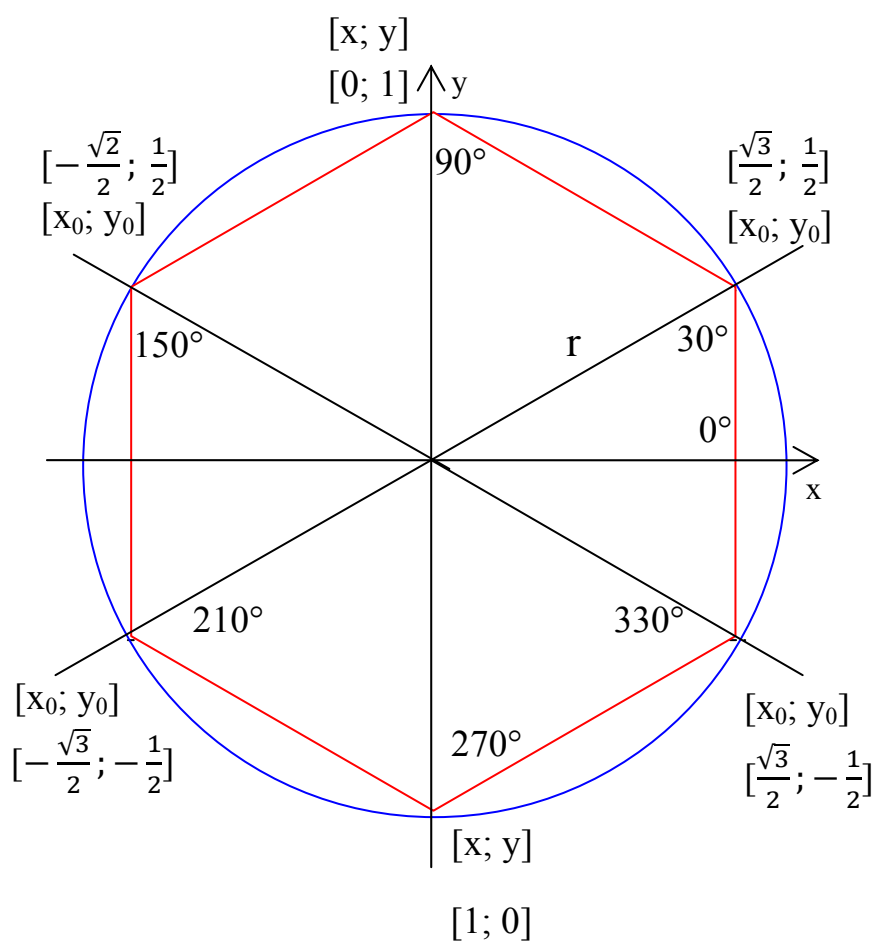
$$\text{Úhel } 270^\circ \quad x = r \cdot \cos 270 = 0; y = r \cdot \sin 270 = -1 \quad (3.16)$$

3.2.1 Zhodnocení výsledků grafické simulace se čtyřmi Hallovými sondami

Snímač a jeho graficky znázorněný průběh (Příloha č. 1,2,3) zobrazuje výslednou velikost magnetického pole, a jeho rozložení. Je vidět, že plocha sedla nemá velký poloměr, kde by hodnota byla konstantní. Základní citlivost je na hodnotě přibližně 0,6. Dá se předpokládat, že s přibývajícím počtem Hallových sond, bude i velikost plochy a citlivost celého snímače stoupat.

3.3 Rozložení bodů pro snímač se šesti Hallovými sondami

Pro řešení výsledné hodnoty snímače se šesti Hallovými sondami, je potřeba nového rozmístění bodů na kružnici. Proto je potřeba najít pro ně na osách x a y nové body, ve kterých budou umístěny Hallové sondy Obrázek 3.3. V případě č.3.2, byly čtyři sondy umístěny na hlavních osách x a y , tak, že nebylo nutné složitě hledat jejich souřadnicové body. Pro rozmístění šesti sond, je však potřeba najít nové souřadnice X_0 a Y_0 , které leží mimo hlavní osy X, Y . Tyto nové souřadnice použijeme při výpočtu.



Obrázek 3.3 Rozložení šesti měřících bodů na jednotkové kružnici.

Poloměr kružnice je $r=1$, a body x_0 a y_0 se posouvají po kružnici vždy o šedesát stupňů. Pro tyto nové body lze výpočtu pomocí funkcí sinus a kosinus, a hodnoty pak jsou:

$$\text{Úhel } 30^\circ \quad x_0 = r \cdot \cos 30 = \frac{\sqrt{3}}{2} ; y_0 = r \cdot \sin 30 = \frac{1}{2} \quad (3.17)$$

$$\text{Úhel } 90^\circ \quad x_0 = r \cdot \cos 90 = 0 ; y_0 = r \cdot \sin 90 = 1 \quad (3.18)$$

$$\text{Úhel } 150^\circ \quad x_0 = r \cdot \cos 150 = -\frac{\sqrt{3}}{2} ; y_0 = r \cdot \sin 150 = \frac{1}{2} \quad (3.19)$$

$$\text{Úhel } 210^\circ \quad x_0 = r \cdot \cos 210 = -\frac{\sqrt{3}}{2} ; y_0 = r \cdot \sin 210 = -\frac{1}{2} \quad (3.20)$$

$$\text{Úhel } 270^\circ \quad x_0 = r \cdot \cos 270 = 0 ; y_0 = r \cdot \sin 270 = -1 \quad (3.21)$$

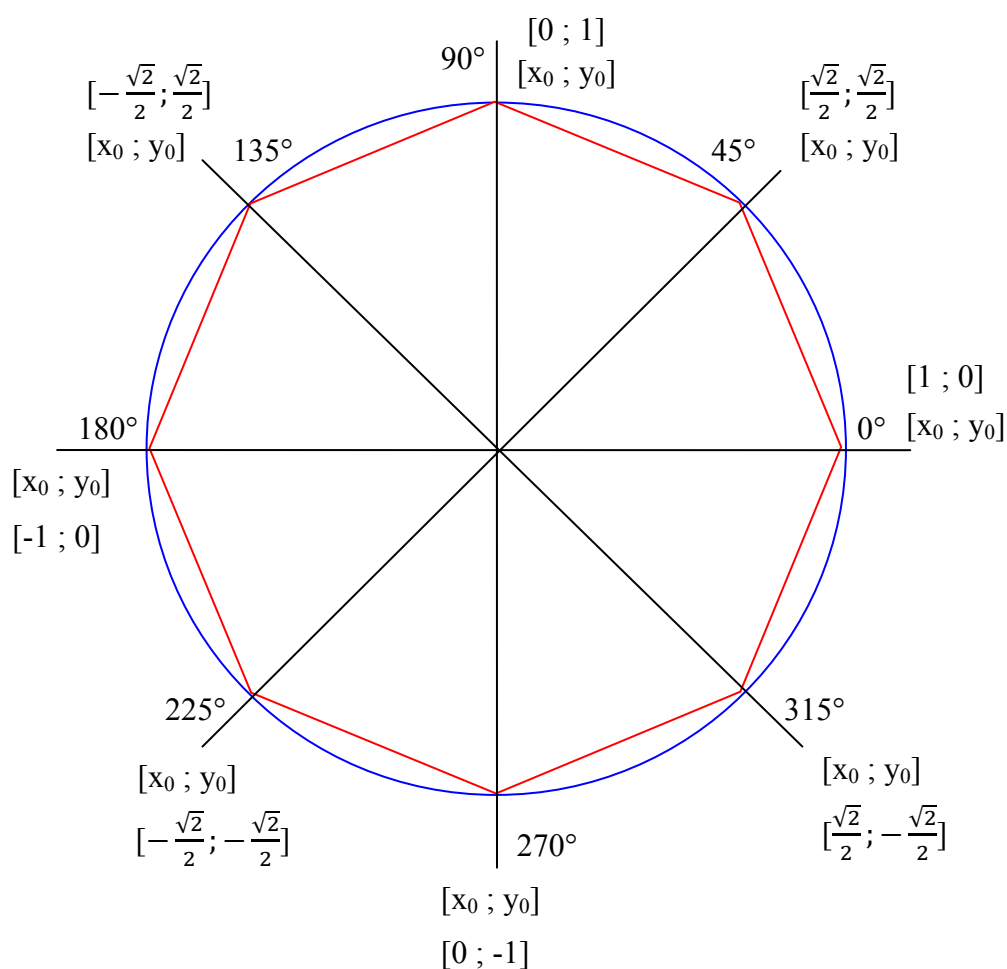
$$\text{Úhel } 330^\circ \quad x_0 = r \cdot \cos 330 = \frac{\sqrt{3}}{2} ; y_0 = r \cdot \sin 330 = -\frac{1}{2} \quad (3.21)$$

3.3.1 Zhodnocení grafických výsledků snímače se šesti Hallovými sondami

Z grafu (Příloha č. 4,5,6) vycházejícího z výpočtů je jasně vidět rozdíl mezi snímačem se čtyřmi a se šesti snímači. Jednak se zvětšila plocha sedla, a také se zvýšila citlivost, tedy sedlo se posunulo směrem nahoru, na hodnotu 1,6. Oproti hodnotě 0,6, kterého dosahoval snímač se čtyřmi sondami, je vidět více než dvojnásobné zvětšení hodnoty sedla, tedy citlivosti celého snímače.

3.4 Rozložení bodů pro snímač s osmi Hallovými sondami

Při použití osmi Hallových sond, rozložených rovnoměrně do tvaru pravidelného osmiúhelníka, bylo za potřeby opět najít nové body x_0 a y_0 , které jsou na kružnici rovnoměrně rozloženy Obrázek 3.4. Při hledání nových bodů se opět vycházelo z jednotkové kružnice. Hledání nových bodů bylo obdobné jako v případě pro šest Hallových sond.



Obrázek 3.4 Rozložení osmi měřících bodů na jednotkové kružnici.

Jednotlivé body jsou rozloženy symetricky po obvodu kružnice, úhel mezi jednotlivými body je 45° . Poloměr kružnice $r=1$. Nové body, jsou použity v rovnici (3.11), pro výpočet křivek uvedených v příloze.

$$\text{Úhel } 0 \quad x_0 = r \cdot \cos 0 = 1 ; y_0 = r \cdot \sin 0 = 0 \quad (3.22)$$

$$\text{Úhel } 45^\circ \quad x_0 = r \cdot \cos 45 = \frac{\sqrt{2}}{2} ; y_0 = r \cdot \sin 45 = \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (3.23)$$

$$\text{Úhel } 90^\circ \quad x_0 = r \cdot \cos 90 = 0 ; y_0 = r \cdot \sin 90 = 1 \quad (3.24)$$

$$\text{Úhel } 135^\circ \quad x_0 = r \cdot \cos 135 = -\frac{\sqrt{2}}{2} ; y_0 = r \cdot \sin 135 = \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (3.24)$$

$$\text{Úhel } 180^\circ \quad x_0 = r \cdot \cos 180 = -1 ; y_0 = r \cdot \sin 180 = 0 \quad (3.26)$$

$$\text{Úhel } 225^\circ \quad x_0 = r \cdot \cos 225 = -\frac{\sqrt{2}}{2} ; y_0 = r \cdot \sin 225 = -\frac{\sqrt{2}}{2} \quad (3.27)$$

$$\text{Úhel } 270^\circ \quad x_0 = r \cdot \cos 270 = 0 ; y_0 = r \cdot \sin 270 = -1 \quad (3.28)$$

$$\text{Úhel } 315^\circ \quad x_0 = r \cdot \cos 315 = \frac{\sqrt{2}}{2} ; y_0 = r \cdot \sin 315 = -\frac{\sqrt{2}}{2} \quad (3.29)$$

3.4.1 Zhodnocení grafických výsledků snímače s osmi Hallovými sondami

Z grafů (Příloha č. 7,8,9) je vidět rozložení výsledného magnetického pole, které působí na Hallovy sondy. Toto rozložení je symetrické a oproti rozložení se čtyřmi sondami má větší poloměr, ve kterém se intenzita magnetického pole nemění. To znamená, že i případný snímač proudu realizovaný s takto rozloženými Hallovými sondami bude několikanásobně odolnější proti pohybu měřeného vodiče. Celková výška sedla se rovněž zvýšila, znamená to tedy, že i celková citlivost snímače vzrostla, a to téměř třikrát. Zde se tedy dá předpokládat dobrých výsledků, kterých může snímač dosahovat.

3.5 Výběr Hallovy sondy

Protože teoretické výsledky vychází nejlépe pro snímač s osmi Hallovými sondami, proto bude tento snímač prakticky vyroben. Důležité je proto věnovat pozornost i výběru Hallových sond

Na světovém trhu, se nalézá velké množství firem, které vyrábí snímače na principu Hallova jevu. Jejich výrobky jsou většinou určeny pro přímého odběratele, kterým může být například automobilový, nebo elektrotechnický průmysl. Pro tyto odběratele jsou přímo navrhovány a konstruovány typy snímačů, které jim vyhovují, proto běžný uživatel má pouze omezený sortiment, ze kterého může vybírat použitelný typ. Velkými výrobci jsou například firma Infineon, LEM, Siemens, Allegro Microsystems, Micronas a jiné.

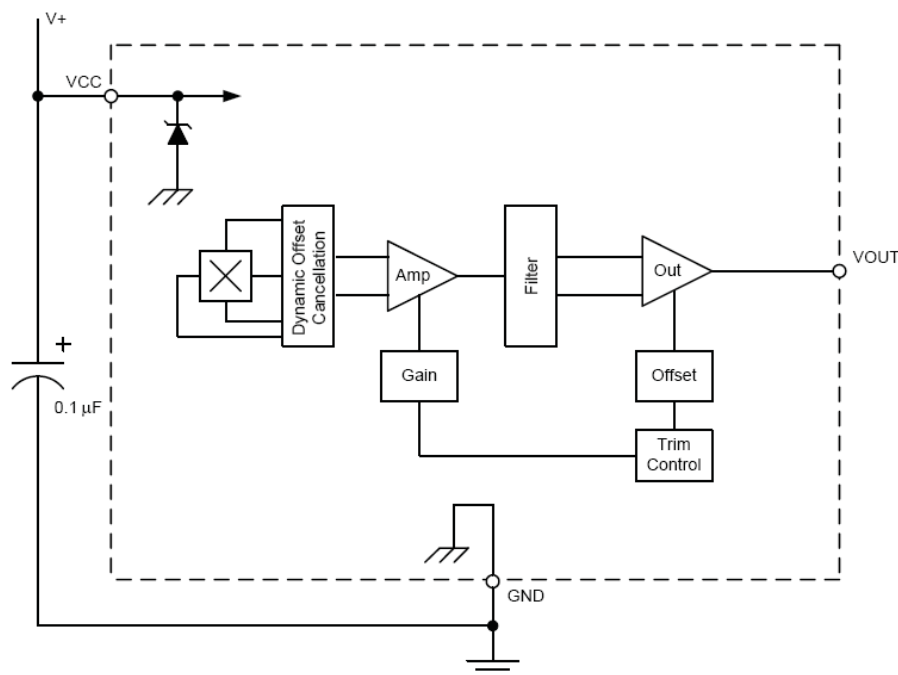
Vyráběné Hallové sondy, jsou všechny založeny na stejném principu, pouze se liší ve vnitřním uspořádání, množstvím elektronických prvků, popřípadě tvarem pouzdra. Na doporučení vedoucího práce, jsem vybíral z lineárních analogových Hallových sond, které ve své vnitřní struktuře nemají zabudován fokusační člen, který je vyroben z magnetického materiálu, a má za úkol soustřeďovat intenzitu magnetického pole z větší plochy směrem k menší ploše čipu, čímž se zvyšuje citlivost. Tento člen, je v našem případě nežádoucí, protože by mohl ovlivňovat výsledek měření a zkreslovat jej, případně způsobovat nelinearitu. Možnost výběru se tím pádem ještě snížila, protože mnoho výrobců vyrábí snímače s fokusátorem, nebo Hallové spínače, které jsou pro tento účel nepoužitelné.

3.5.1 Hallova sonda Allegro A132x

Sonda A1321, A1322, A1323 je lineární analogová třívývodová Hallova sonda, se zabudovaným operačním zesilovačem na výstupu. Jedná se o sondu s dobrou citlivostí a výrobce ho doporučuje pro použití v aplikacích, které snímají pozici, nebo lineární posuvný pohyb, nebo rotační pohyb. Vyrábí se ve dvou provedeních, buď jako SMD v pouzdře SOT23, nebo s pájecími drátovými vývody v pouzdře TO92UA Obrázek 3.5. Výhodou této sondy je její bipolárnost. Tedy je možné jednu sondu použít pro oba směry působení magnetického pole. Umožněno je to díky tomu, že výstupní napětí, je v klidu, bez působení magnetického pole úměrné polovině napětí napájecího, a s působením magnetického pole začne na výstupu napětí lineárně růst, až téměř do hodnoty napájecího napětí, a při změně směru působení pole toto napětí klesá téměř k nule.



Obrázek 3.5 Pouzdra, ve kterých se sonda dodává, a) SOT23, b) TO92UA.



Obrázek 3.6 Vnitřní zapojení Hallovy sondy A1322 [3].

Struktura vnitřního uspořádání A132x je zřejmá z Obrázku 3.6. Obvod obsahuje Hallovu sondu, která je spojena s obvodem dynamického offsetu a rušení (Dynamic Offset, Cancellation) za tímto obvodem následuje operační zesilovač signálu, se zpětnovazebním řízením zesílení, za zesilovačem následuje filtr, který potlačuje rušivé složky v zesíleném signálu. Vyfiltrovaný signál, se zesiluje na finální hodnotu výstupním zesilovačem, který může být zatížen jednotkami mA .

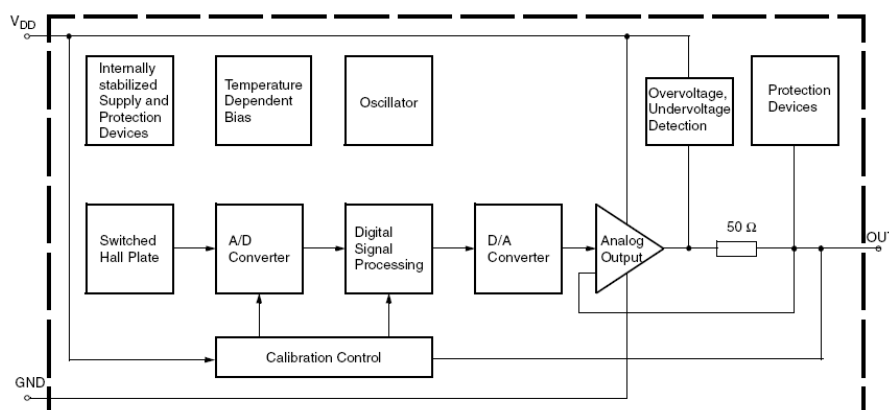
A132x je jednoduchá lineární sonda, která splňuje požadavky pro použití v navrhovaném snímači. Základní výrobcem udávané parametry pro tři typy série A132x jsou uvedeny v tabulce:

Typ	U_{cc}	I_0	Rozsah	Citlivost	Přesnost	BW
-	U[V]	I[mA]	B[mT]	mV/mT	%	f[kHz]
A1321	5,0	5,6	50	50	±1,5	30kHz
A1322			80	31,25		
A1323			100	25		

Tabulka 1: Katalogové hodnoty pro Hallovy sondy Allegro řady A132x.

3.5.2 Hallova sonda HAL182x

Sonda HAL182x firmy Micronas, má na rozdíl od předchozí sondy firmy Allegro, složitější vnitřní strukturu. Kromě samotné Hallovy sondy obsahuje také D/A a A/D převodník, a integrovaný (DSP-Digital Signal Processor) procesor, který zajišťuje optimální řízení celého obvodu, a hlavně zlepšuje parametry jako je offset výstupního napětí, a teplotní kompenzaci. Ve své podstatě, se ale jedná o velmi podobnou sondu jako je A132x, pouze je doplněna o některé zmíněné prvky ve své struktuře, které mohou zlepšovat celkovou spolehlivost a odolnost, proti rušení, případně zlepšit celkové výstupní parametry. Výstupní signál, má opět velikost 50% napájecího napětí, za předpokladu, že na sondu nepůsobí žádné magnetické pole. Při působení kladně nebo záporně orientovaného magnetického pole, opět výstupní napětí mění svou velikost směrem k maximální hodnotě napájecího napětí, a nebo směrem k nule.



Obrázek 3.7 Vnitřní zapojení Hallovy sondy HAL182x [4].

Vnitřní zapojení sondy HAL182x, je na Obrázku 3.7. Hallova sonda je přímo propojena s A/D převodníkem, a tento signál je zpracován signálovým procesorem, a následně opět převeden D/A převodníkem na analogový signál. Tento signál je zesílen operačním zesilovačem. Kromě zmíněných prvků, obsahuje vnitřní struktura podpět'ové/přepět'ové hlídání napětí (OUD-Overvoltage/Undervoltage Detection), integrovaný stabilizátor napětí, oscilátor, a tepelnou kompenzaci.

HAL182x je jednoduchá lineární sonda, která splňuje požadavky pro použití v navrhovaném zařízení. Základní výrobcem udané parametry pro tři typy série HAL182x jsou:

Typ	V_{CC}	I_0	Rozsah	Citlivost	Přesnost	BW
-	U[V]	I[mA]	B[mT]	mV/mT	%	f[kHz]
HAL1821	5,0	7	50	50	±1,5	1kHz
HAL1822			80	31,25		
HAL1823			100	25		

Tabulka 2: Katalogové hodnoty pro Hallovy sondy Micronas řady HAL182x.

3.5.3 Porovnání vlastností Hallových sond A132x a HAL182x

Oba typy Hallových sond, jsou pro naši aplikaci vyhovující, jak svými parametry elektrickými tak mechanickými. Ve své vnitřní struktuře neobsahují fokusační člen, který by do celého snímače mohl vnést chybu měření, popřípadě zkreslit výsledek měření.

Pouze u sondy HAL182x může být nevýhodou skutečnost, že šířka frekvenčního pásma (BW-Bandwidch) je pouze 1kHz. Tento rozsah omezuje použití při měření pulsních proudů, které mají kmitočky několikanásobně vyšší než 1kHz. Sonda A132x má šířku frekvenčního pásma 30kHz, ale ani tento rozsah není zcela dostačující, přesto se dá říci, že je mnohonásobně lepší.

Menší šířku pásma u HAL182x, zřejmě způsobuje digitální převod analogové hodnoty na digitální, a následně po korekci v DSP procesoru opětovný převod z digitální podoby na analogovou.

Obě diskutované sondy, jsou vyráběny a jsou tedy na trhu k dostání, pouze může nastat problém s dodáním určitého počtu kusů. Například HAL1821 lze koupit, ale jen s minimálním množstvím několika desítek kusů, a vzorky vyžádané přímo od výrobce, jež slíbil vzorky dodat, dodány nebyly, proto bylo potřeba od konstrukce s tímto typem upustit. Dalším z vybraných sond byla A1322, který byla k dostání od velkododavatele, který umožnil nákup i kusově. Proto je celá konstrukce postavena právě s použitím Hallový sondy od firmy Alegro typ A1322.

4 Konstrukce snímače proudu

4.1 Základní předpoklady

- měření stejnosměrného proudu
- lineární charakteristika
- rozsah měření proudu do $1000A$ (případně jiný rozsah)
- velká přesnost měření (použití osmi Hallových sond)
- odolná a jednoduchá konstrukce
- odolnost vůči rušení
- napájení malým stejnosměrným napětím

Při konstrukci se vychází z předpokladů, že bude použito osmi Hallových sond, které budou umístěny na DPS (Deska Plošného Spoje) společně s ostatními součástkami. Při použití osmi sond se magnetická indukce B rozdělí rovnoměrně mezi všechny sondy, tedy každá ze sond bude přispívat stejným dílem do společného bodu, kterým bude součtový člen, který přispěvkou napětí od sond sečte, a na jeho výstupu bude napětí uměrné intenzitě magnetického pole.

4.2 Výpočet mechanických a elektrických hodnot

Mechanické a elektrické hodnoty, potřebujeme vypočítat, k tomu abychom mohli snímač realizovat. Ze známých parametrů můžeme vypočítat vzdálenost Hallových sond, za předpokladu, že známe i elektrickou hodnotu požadovaného výstupního napětí za součtovým členem:

- požadovaný proud $I_0=1000A$
- počet sond $n=8$
- výstupní napětí Hallovy sondy $U_H=31,25mT/mT$
- celkové výstupní napětí za součtovým členem $U_{out}=2V$

Výstupní napětí každé Hallovy sondy se v součtovém členu připočítává k ostatním, tedy pokud jsme zvolili maximální výstupní napětí $U_{out} = 2V$, potom výstupní napětí U_H každé Hallovy sondy je:

$$U_{Hmax} = \frac{U_{out}}{n} = \frac{2}{8} = 0,25 V \quad (8.1)$$

z toho pak vychází maximální velikost magnetické indukce, která působí na každou Hallovu sondu:

$$B_{max} = \frac{U_{Hmax}}{U_H} = \frac{0,25}{0,03125} = 8 mT \quad (8.2)$$

Pokud známe velikost magnetické indukce, která působí na každou Hallovu sondu, můžeme vypočítat potřebný poloměr vzdálenosti jednotlivých sond od středu jako:

$$r = \frac{I_0 \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi \cdot B_{max}} = \frac{1000 \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi \cdot 0,008} = 0,025 \text{ m} \quad (8.3)$$

Magnetickou indukci pro jednu sondu zpětně ověříme výpočtem jako:

$$B_{max} = \frac{I_0 \cdot \mu_0}{2\pi r} = \frac{1000 \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi \cdot 0,025} = 8 \text{ mT} \quad (8.4)$$

4.2.1 Shrnutí vypočtených parametrů

Vypočetli jsme základní parametry, které jsou potřebné pro mechanickou a elektrickou konstrukci proudového snímače s Hallovými sondami. Parametry jsou uvedeny v Tabulce 3:

Měřený proud	I_0	1000A
Počet sond	n	8ks
Hallovo napětí	U_H	31,25mV/mT
Výstupní napětí	U_{out}	2V
Poloměr vzdálenosti	r	0,025m
Indukce	B_{max}	8mT

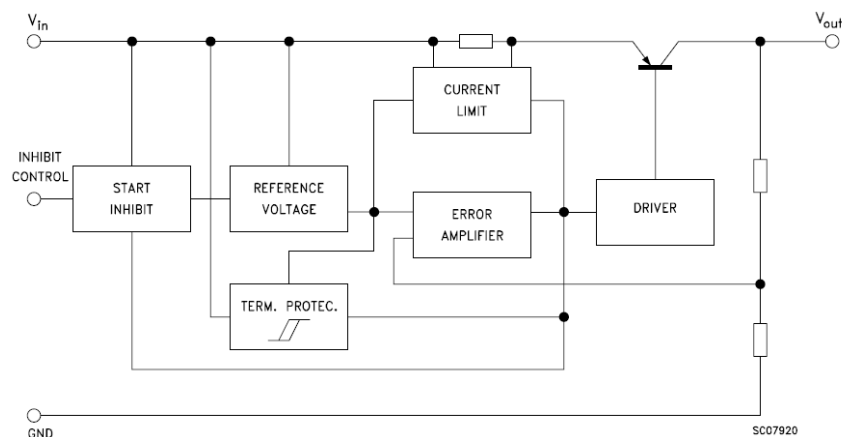
Tabulka 3: Přehled hodnot vypočtených pro návrh snímače.

4.3 Navržení elektrického schématu

K navržení elektrického schématu, bylo použito znalostí z předchozích výpočtů. Schéma a deska plošných spojů, jsou navrhovány v programu Eagle.

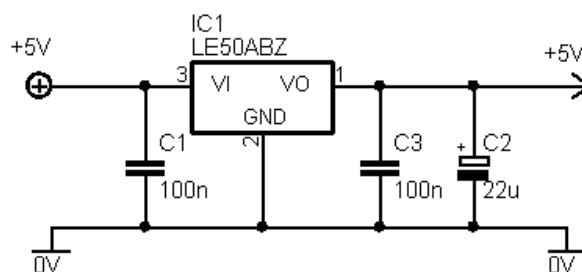
4.3.1 Zdrojová část

Zdój je realizovaný pomocí třísvorkového stabilizátoru LE50ABZ, s pevnou hodnotou výstupního napětí. Toto napětí je 5V, a maximální proudová zatížitelnost 100mA. Jedná se o osvědčený typ stabilizátoru, který má na svém výstupu zaručenou přesnost napětí v rozsahu 1%. Pro celkové zapojení byla taktéž důležitá teplotní stabilita výstupního napětí, která je díky vnitřní teplotní kompenzaci velmi dobrá. Vnitřní zapojení stabilizátoru je na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1 Vnitřní uspořádání stabilizátoru LE50ABZ [6].

Stabilizátor IC1 je zapojen dle doporučení výrobce Obrázek 4.2. Vstupní i výstupní svorky jsou ošetřeny blokovacími kondenzátory C1 a C2, které brání případnému rozkmitání celého stabilizátoru. Výrobce doporučuje tyto kondenzátory umístit co nejbliž ke svorkám stabilizátoru. Na výstupu je umístěn elektrolytický kondenzátor C2, který slouží jako filtrační.



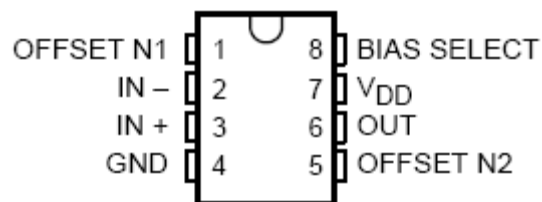
Obrázek 4.2 Schéma zapojení stabilizátorem LE50ABZ.

Základní parametry stabilizátoru jsou:

- napájecí napětí $U_i=18V$
- výstupní napětí $U_o=5V$
- vlastní spotřeba $I_d=0,5mA$
- maximální proud $I_{max}=100mA$
- úbytek napětí $U_d=0,2V$
- tolerance výst. napětí 1%

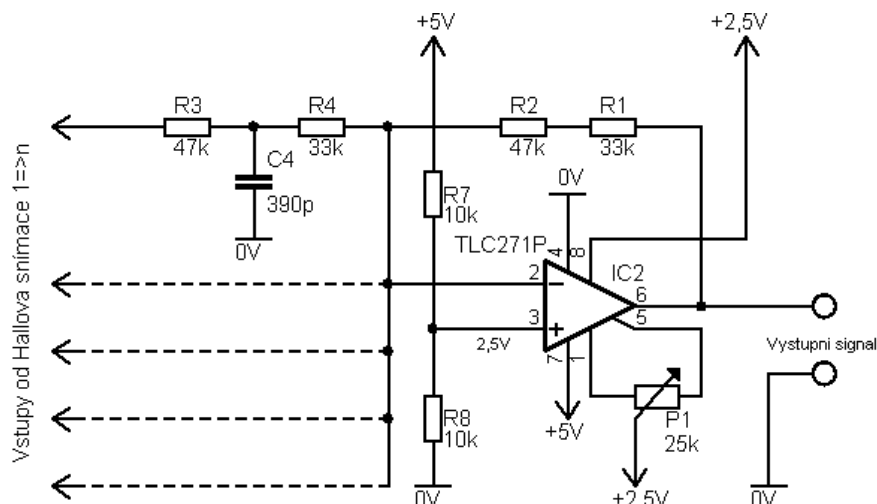
4.3.2 Řídící a výstupní část

Jako operační zesilovač (dále jen OZ) byl pro toto zapojení zvolen TLC271, který je jednoduchý nízkoodběrový OZ. TLC271 je možné napájet symetrickým, ale i nesymetrickým napětím. Při nesymetrickém zapojení, které je použito v našem případě, se chová jako RAIL to RAIL OZ. Na výstupu zesilovače je bez připojeného napětí na vstup, polovina napájecího napětí a funkce RAIL to RAIL, umožňuje výstupnímu napětí se měnit v rozsahu od poloviční hodnoty napájecího napětí směrem nahoru, téměř k velikosti napájecího napětí, a směrem dolů téměř k nulovému napětí. Zapojení vývodů je na obrázku 4.3. OZ má dvě vstupní svorky č.2 a č.3 (IN+, IN-) a jednu výstupní svorku č.6 (OUT). Pro přesně nastavení offsetu výstupního napětí, má dvě svorky, č.1 a č.5 (OFFSET N1, OFFSET N2). Vstup č.8 (BIAS SELECT) pro zvolení výkonu, má možnost tří úrovní, podle potřeb uživatele. Tato funkce ovlivňuje spotřebu samotného OZ, ale také jeho pracovní výkon, a velikost pracovní frekvence. Pro naše účely, byla použita nejnižší úroveň, která naprosto dostačuje požadavkům, přesto je možné úroveň změnit přesunutím propojky (JUMERU) na liště SV1 na jinou pozici.



Obrázek 4.3 Zapojení vývodů operačního zesilovače TLC271 [5].

OZ IC1 je zapojen jako sumátor Obrázek 4.4. Všechny signály od Hallových sond jsou přivedeny přes rezistory na záporný vstup OZ. Mezi rezistory R3 a R4 je vůči zápornému pólu připojen kondenzátor C4. Spolu s rezistory tvoří dolní propust prvního řádu, která je zde kvůli potlačení vlivu rušení.



Obrázek 4.4 Zapojení operačního zesilovače.

Frekvence, kterou tato propust má odfiltrovat, byla zvolena okolo 20kHz, tak aby případné rušení neovlivňovalo výsledky měření. Frekvence této propusti se vypočítá ze vztahu:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \quad (9.1)$$

Velikost odporu známe, a protože ze střídavého hlediska jsou zapojeny paralelně musíme nejprve vypočítat konečnou hodnotu odporu R:

$$R = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} = \frac{47000 \cdot 33000}{47000 + 33000} = 19\,388 \, \Omega \quad (9.2)$$

Pokud známe f_0 a R lze vypočítat velikost kondenzátoru C ze vztahu:

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot R} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 20000 \cdot 19388} = 410 \, pF \quad (9.3)$$

Kapacitu kondenzátoru, volíme nejbližší hodnotou z řady, a to 390pF, frekvence se pro tuto hodnotu změní na hodnotu:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 19388 \cdot 390e-12} = 21,048 \, kHz \quad (9.4)$$

Podmínka přiblížit se hodnotě frekvence 20kHz je splněna. Tímto ošetřením je vstup OZ chráněn před rušivými signály, které mohou proniknout, respektive se indukovat v přívodních cestách plošného spoje.

Vstup OZ č.3 (IN+) je zapojen na napěťový dělič, který tvoří referenční napětí U_{ref} . Dělič tvořený rezistory R7 a R8, který na svém výstupu není zatížen (vstupy OZ mají prakticky nulový odběr) má výstupní napětí:

$$U_{ref} = U_{CC} \cdot \frac{R7}{R7 + R8} = 5 \cdot \frac{10000}{10000 + 10000} = 2,5V \quad (9.5)$$

Vztah, který platí pro výstupní napětí, jednostranně napájeného zesilovače říká (konkrétně pro toto zapojení), že výstupní napětí $U_{výst}$ je:

$$U_{výst} = (U_{ref} - U_{vst}) \cdot \frac{R1 + R2}{R3 + R4} + U_{ref} = (2,5 - 2,5) \cdot \frac{80000}{80000} + 2,5 = 2,5V \quad (9.6)$$

Trimrem P1, který je zapojen mezi vstupy č.1 a č.5 doladuje velikost napěťového offsetu na výstupu OZ. Zapojení je opět přes napěťový dělič a je doporučeno výrobcem. Také vstup č.8 (BIAS) je napájen z děliče, jehož hodnoty doporučuje výrobce, ve svém katalogu.

4.3.3 Deska plošného spoje

Snímač proudu bylo potřeba po navržení schématu a DPS, také prakticky vyrobit. Deska plošného spoje je jednostranná, s kruhovým výřezem o průměru 47mm. Rozměry DPS jsou 100x100mm.

Výroba plošného spoje probíhala fotocestou z předlohy plošného spoje, vytisknutého na pauzovací papír. Protože se jedná o neprofesionálně vyrobenou DPS, nemá nepájivou masku, či další profesionální úpravy. Povrch s měděnými cestami je ošetřen proti oxidaci kalafunovým lakem. Díry pro součástky jsou vrtány různými průměry vrtáků, od průměru 0,5mm po 1,1mm. Součástky jsou osazeny standartním způsobem, ze strany součástek, a použité SMD součástky jsou osazeny ze strany spojů.

Vyrobena a osazená DPS byla nejprve pečlivě zkontrolována, před případným zkratem dvou cest. Kontrola také proběhla při prvním připojení napájecího napětí, bez osazených Hallových sond, a OZ, aby se potvrdila správnost polarit napájecích napětí, a nedošlo ke zničení součástek, především pak Hallových sond. Po základním oživení proběhlo úplné sestavení a plné oživení snímače.

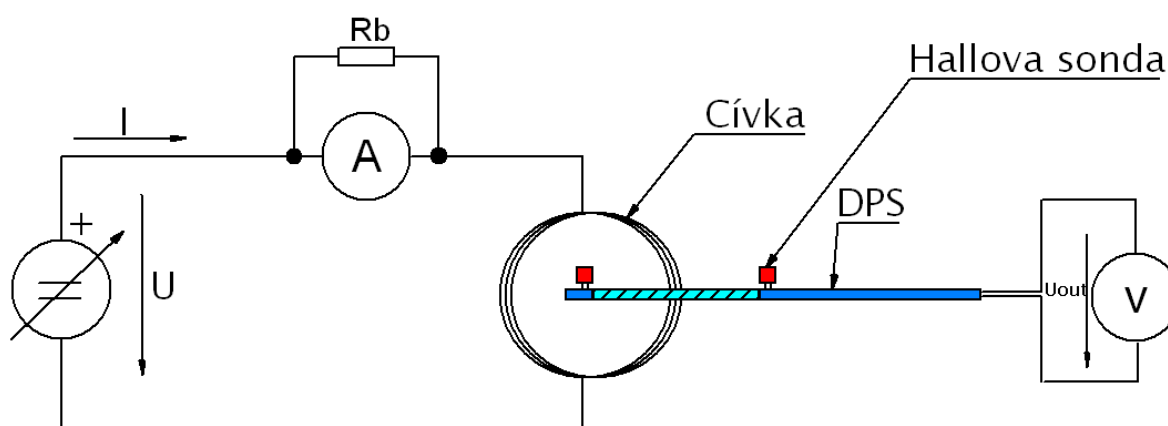
Při měření výstupního napětí bez buzení magnetickým polem, bylo potřeba nastavit trimrem P1 offset výstupního napětí, přesně na hodnotu 2,500V, tedy na základní hodnotu, od které měření vychází. Oživením končí část výroby a je možné přejít k experimentálnímu měření parametrů snímače.

4.4 Experimentální ověřování parametrů snímače

Měřením na zhotoveném snímači, jsme měli ověřit vlastní funkčnost, a také ověřit předpoklady, které jsme získali teoretickým rozbořem. Celkové měření mělo zjistit, jestli je snímač lineární, a jak se projevuje změna polaritý magnetického pole na přesnost měření, popřípadě na linearitě. Dále bylo provedeno polohové měření, při kterém se vodičem pohybovalo ve směru na jednu Hallovy sondy, nebo mezi dvě Hallovy sondy, tak aby se zjistil vliv a chování výstupního napětí snímače. Jako poslední, bylo provedeno měření, kterým se zjišťoval vliv externího magnetického pole na snímač. Toto magnetické pole mělo reprezentovat případné rušivé pole, které může ovlivnit výsledky měření.

4.4.1 Způsob měření

Měření bylo prováděno ve studentské laboratoři, s použitím stejnosměrného zdroje, kterým byla napájena cívka. Použití cívky si vyžádalo zvětšení amperzávitů, protože k dispozici byl pouze zdroj s maximálním výstupním proudem 24A. Pro měření bylo však potřeba mít zdroj, který by byl schopen dodat proud, alespoň 10x větší. Z tohoto důvodu, byla k měření realizována cívka z měděného vodiče o průřezu 0,75mm², která měla 10 závitů. Počet závitů nahradil potřebný proud 300A, tedy bylo možné dosáhnout proudu 240Az. K měření výstupního napětí byl použit přesný digitální multimetr Agilent U1252A. Proud protékající vodičem byl měřen pomocí analogového ampérmetru s bočníkem do 60A. Schématické zapojení měřícího pracoviště je na Obrázku 4.5.



Obrázek 4.5 Schéma zapojení při měření vlastností snímače proudu.

4.4.2 Výsledky měření

Měření se skládalo ze tří částí. V první byl vodič umístěn přesně do středu snímače, mezi Hallové sondy, a proud byl přiveden v jednom a druhém směru.

Ve druhém případě se měřila závislost výstupního napětí na poloze vodiče. Nejprve v kolmém směru na jednu Hallovu sondu, a pak mezi dvěma Hallovými sondami. Nakonec bylo provedeno měření, které mělo ověřit, jak vnější magnetické pole ovlivňuje snímač.

I	I	U ₁	U ₂
[A]	[A/z]	[V]	[V]
0	0	2,5000	2,5000
2,5	25	2,5522	2,4473
5	50	2,6000	2,3999
7,5	75	2,6466	2,3532
10	100	2,6940	2,3056
12,5	125	2,7439	2,2565
15	150	2,7917	2,2084
17,5	175	2,8415	2,1588
20	200	2,8893	2,1104
22,5	225	2,937	2,0624

Tabulka 4: Hodnoty měření závislosti výstupního napětí, na velikosti proudu vodičem.

I	I	Poloha	U _{out}
[A]	[A/z]	-	[V]
20	200	0	2,8889
20	200	0,25	2,8877
20	200	0,5	2,887
20	200	0,75	2,8888
20	200	0,9	2,902

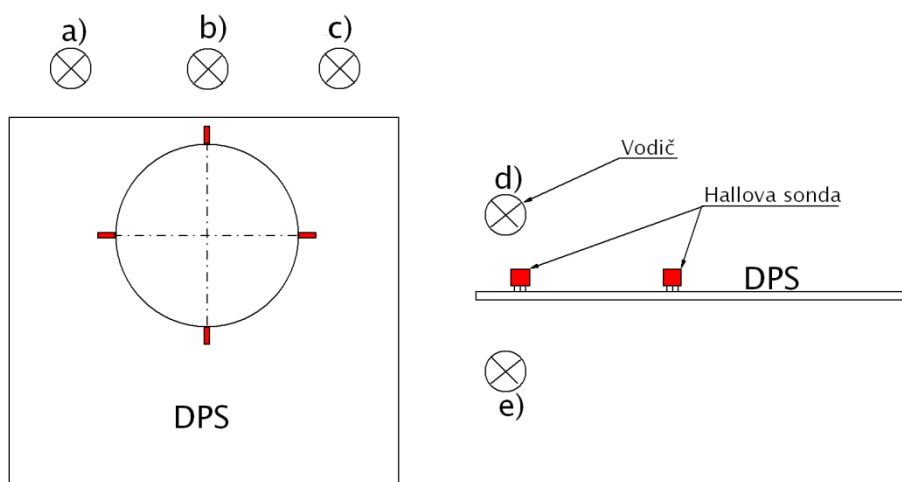
Tabulka 5: Měření výstupního napětí v závislosti na poloze vodiče (přímo k Hallově sondě).

I	I	Poloha	U _{out}
[A]	[A/z]	-	[V]
20	200	0	2,8904
20	200	0,25	2,8914
20	200	0,5	2,8909
20	200	0,75	2,8896
20	200	0,9	2,8769

Tabulka 6: Měření výstupního napětí v závislosti na poloze vodiče (mezi dvě Hallové sondy).

V Tabulce 4,5,6 a 7 jsou uvedeny výsledné hodnoty pro jednotlivá měření. K hodnotám jsou v přílohách uvedeny příslušné grafy (Příloha č.10-15). V Příloze č.10 a 11 je graf znázorňující lineární průběh výstupního napětí, v závislosti na velikosti proudu protékající vodičem. Závislost je vysoce lineární a přírůstek výstupního napětí koresponduje s vypočtenými hodnotami. Příloha č. 12,13,14,15,16 a 17 jsou grafy, zobrazující závislost ($U_{out}=f(x)$) změny výstupního napětí v závislosti na poloze vodiče vzhledem ke středu rozložení sond.

Při měření ovlivnění vnějším polem, byla navinuta druhá cívka stejným způsobem, jako je popisováno v odstavci 4.4.1, pouze byl zvýšen počet závitů, z $10záv.$ na $14záv.$, aby hodnota proudu vzrostla na hodnotu $I=350A/z$. Vytvořenou cívku se pohybovalo vně snímače proudu na pozici dle Obrázku 4.6, a měřilo se výstupní napětí U_{out} . Při proudu $I=350A/z$ snímač reagoval na magnetické pole ze vzdálenosti $l=3cm$. Tento proud odpovídá magnetické indukci $B=2,3mT$.



Obrázek 4.6 Polohy (a až e) vodiče okolo snímače proudu při měření vniku rušivého magnetického pole.

Pozice	U_{out}
-	[V]
a	2,5097
b	2,4912
c	2,5070
d	2,5109
e	4,4867

Tabulka 7: Naměřené hodnoty výstupního napětí v různých polohách vodiče.

Závěr

Cílem této diplomové práce, bylo, zabývat se problematikou snímání elektrického proudu. Na počátku byly probrány jednotlivé druhy snímačů proudu.

Dále se práce podrobně zabývá teoretickým návrhem, výpočty a také simulacemi několika konkrétních variant snímače proudu, který je tvořen lineárními Hallovy sondami. Tyto sondy jsou v různém uspořádání, a tím se dosahuje odlišných vlastností celého snímače proudu.

Nejprve bylo potřeba vyřešit návrh snímače se čtyřmi Hallovy sondami, které jsou umístěny okolo vodiče. Pomocí odvozených rovnic, mohl být prostřednictvím programu Excel vygenerován 3D graf, který detailně přibližuje závislost intenzity magnetického pole, na které sondy reagují v závislosti na poloze vodiče, v prostu mezi sondami.

Podobný model byl sestavován i pro další navrhované rozložení Hallovy sond. Stejným způsobem byly vytvořeny 3D grafy, s rozložením magnetického pole, pro šest a osm Hallovy sond.

Výsledky výpočtů, a simulací, zpracované teoreticky, měly primárně nastínit, jaký skutečný výsledek je možné očekávat od prakticky realizovaného snímače.

Po teoretické části, mohlo být přistoupeno k výběru vhodné Hallovy sondy. Prostudováno bylo několik sond, od různých výrobců, ne všechny splňovaly požadované parametry, a ne všechny parametry splňující, šlo zakoupit. Nakonec po delším výběru, padlo rozhodnutí na sondy od firmy Allegro (A1322), a Micronics (HAL1821). Finální sonda, která je v snímači použita je A1322 firmy Allegro, protože po požádání výrobce Micronics nebyly sondy dodány, i když výrobce se vyjádřil kladně a sondy měly být dodány. Sondy A1322 jsou kvalitní, a některé parametry jsou díky vnitřní konstrukci lepší než u HAL1821.

Před samotnou realizací, proběhlo upřesnění požadovaných parametrů. Z nich se vycházelo při výpočtu mechanických a také elektrických hodnot, potřebných pro návrh schématu elektrického zapojení, i pro samotnou mechanickou konstrukci. Snímač proudu je navržen pro osm Hallovy sond.

Návrh elektrického schématu i DPS je proveden v programu Eagle. K návrhu je připojena i vizualizace DPS, která je vytvořena v programu POV RAY pro Eagle. Navržená DPS, byla vyrobena fotocestou a osazena součástkami. Po úspěšném oživení proběhlo měření.

Měřením se zjišťovala linearita snímače, citlivost na polohu vodiče, a také odolnost proti cizím rušivým polím. Výsledky měření jsou vyneseny jako závislosti do grafů, a jsou přiloženy v příloze. Charakteristiky snímače odpovídají teoretickým předpokladům, a lze říci, že jeho parametry jsou velmi dobré, a pro praxi použitelné.

Výsledky všech dílčích částí, jako jsou simulace, konstrukce, a naměřené průběhy jsou uvedeny v přílohách.



Literatura

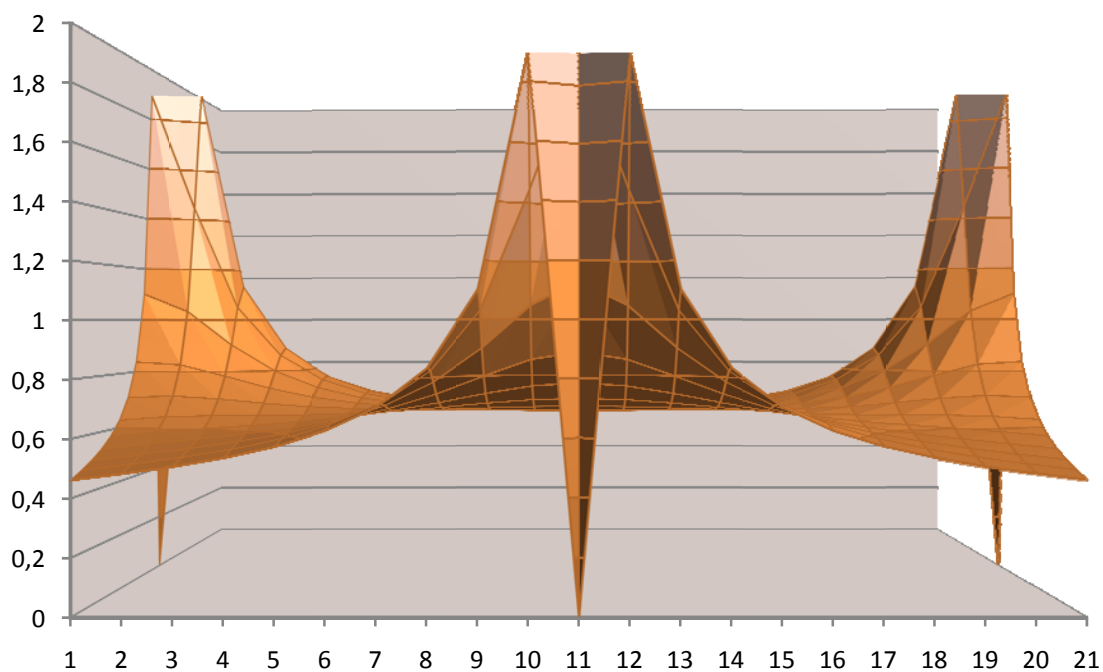
- [1] Patočka, Miroslav. *Magnetické obvody ve výkonové elektronice, pulzní měniče s transformátorem*. Skriptum: Vybrané statě z výkonové elektroniky Svazek IV. FEKT VUT Brno 2008
- [2] Punčochář, Josef. *Operační zesilovače v elektronice*. Praha: BEN – technická literatura, 2002, 5.vydání. 495s. ISBN 80-7300-058-X.
- [3] *Alegro* [online] 2011. A1322 Radiometric Linear Hall Effect Sensor ICs for High-Temperature Operation. Dostupné z WWW: <http://www.allegromicro.com/en/Products/Part_Numbers/1321/1321.pdf>
- [4] *Micronas* [online] 2009. HAL1821 Linear Hall Effect Sensors Fammily. Dostupné z WWW:< <http://igbt-modules.de/data/glyn/media/doc/AI-HAL1821-1822-1823.pdf>>
- [5] *Texas Instrument* [online] 1996. TLC271A LinCMOS Programmable Low-Power Operational Amplifiers. Dostupné z WWW: <<http://www.hep.upenn.edu/SNO/daq/parts/tlc271.pdf>>
- [6] *ST* [online] 2003. LE50ABZ Very Low Drop Voltage Regulators With Inhibit. Dostupné z WWW: <http://i2c2p.twibright.com/datasheet/LE00AB_regulator.pdf>



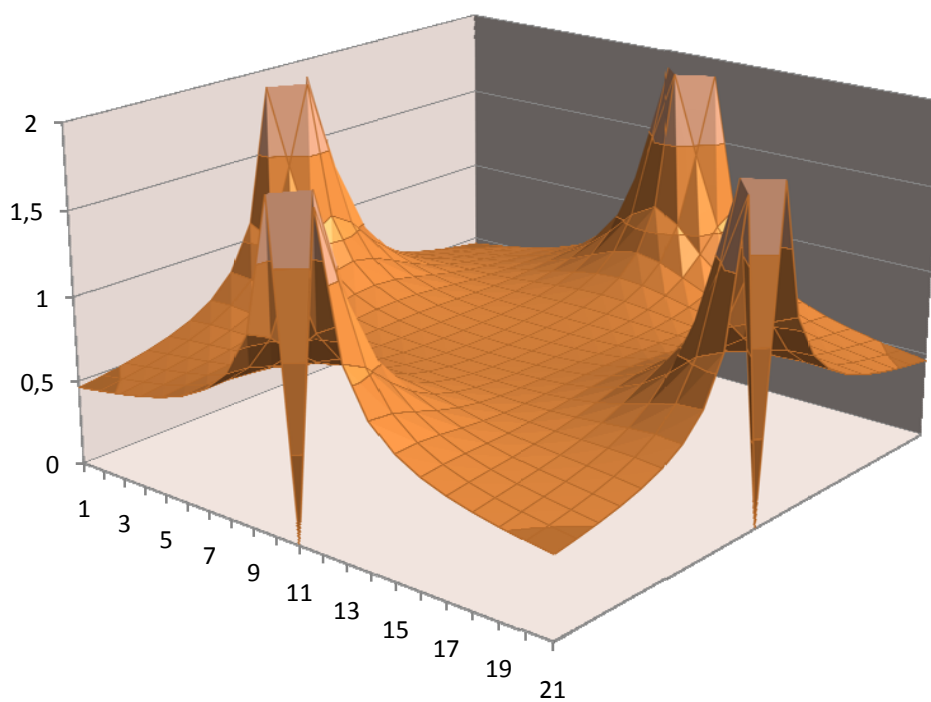
Přílohy

Seznam příloh:

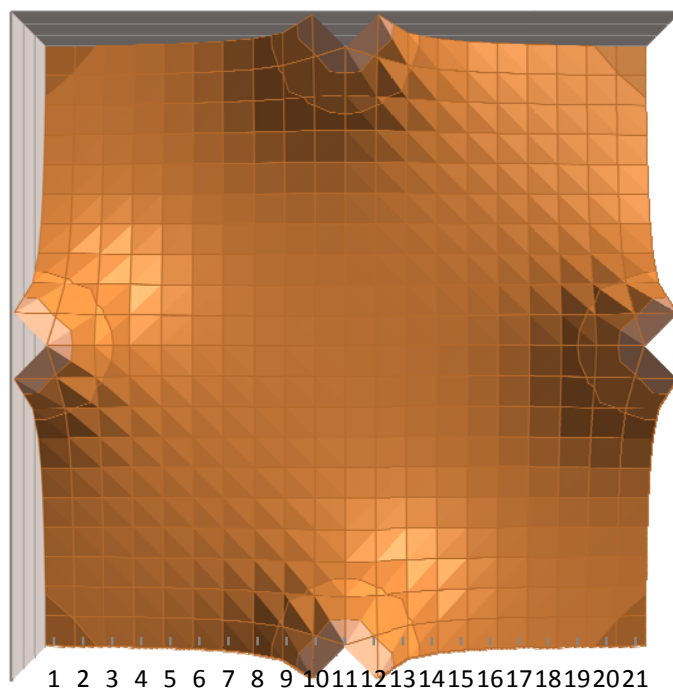
- Příloha č. 1 Graf rozložení pole pro 4 Hallovy snímače, boční pohled.
- Příloha č. 2 Graf rozložení pole pro 4 Hallovy snímače, prostorový pohled.
- Příloha č. 3 Graf rozložení pole pro 4 Hallovy snímače, pohled shora.
- Příloha č. 4 Graf rozložení pole pro 6 Hallových snímačů, boční pohled.
- Příloha č. 5 Graf rozložení pole pro 6 Hallových snímačů, prostorový pohled.
- Příloha č. 6 Graf rozložení pole pro 6 Hallových snímačů, pohled shora.
- Příloha č. 7 Graf rozložení pole pro 8 Hallových snímačů, boční pohled.
- Příloha č. 8 Graf rozložení pole pro 8 Hallových snímačů, prostorový pohled.
- Příloha č. 9 Graf rozložení pole pro 8 Hallových snímačů, pohled shora.
- Příloha č. 10 Graf závislosti $U=f(I)$ (proud v jednom směru).
- Příloha č. 11 Graf závislosti $U=f(I)$ (proud v druhém směru).
- Příloha č. 12 Závislost $U_{out}=f(x)$ na poloze vodiče, směr k sondě.
- Příloha č. 13 Relativní odchylka $\delta_{U_{out}}=f(x)$ závislá na poloze.
- Příloha č. 14 Závislost $U_{out}=f(x)$ na poloze vodiče, směr mezi dvě sondy.
- Příloha č. 15 Relativní odchylka $\delta_{U_{out}}=f(x)$ závislá na poloze.
- Příloha č. 16 Relativní odchylka $\delta_{U_{out}}=f(x)$ závislá na poloze. (detailní pohled)
- Příloha č. 17 Relativní odchylka $\delta_{U_{out}}=f(x)$ závislá na poloze. (detailní pohled)
- Příloha č. 18 Deska plošného spoje (Strana spojů).
- Příloha č. 19 Vizualizovaná deska plošného spoje v programu Eagle POV RAY (Strana spojů).



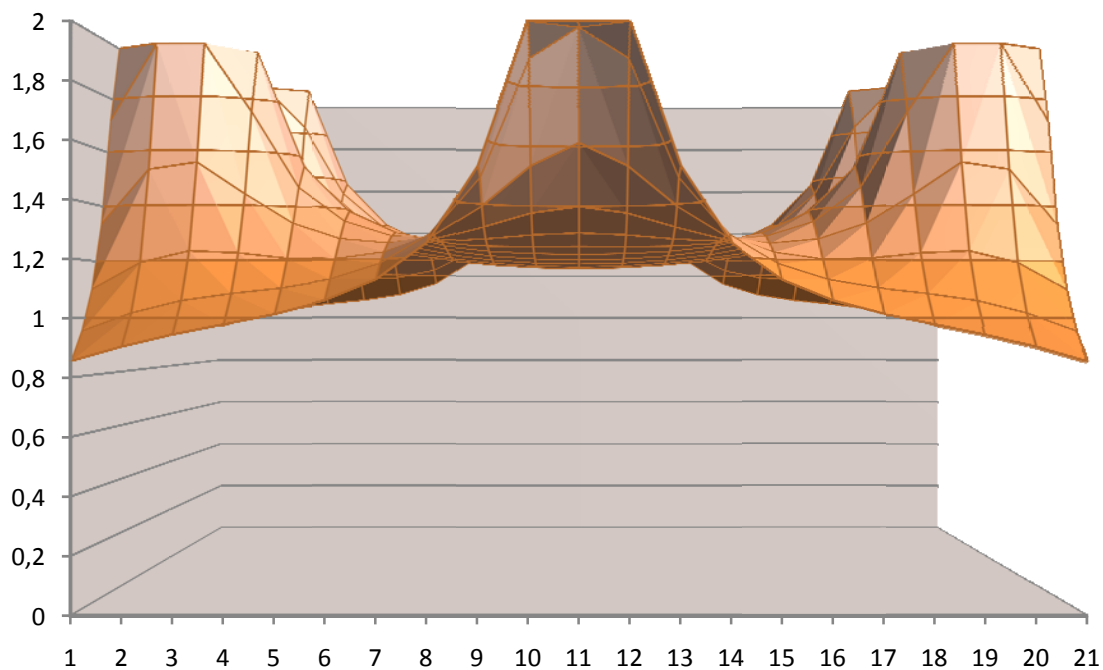
Příloha č. 1 Graf rozložení pole pro 4 Hallovy snímače, boční pohled.



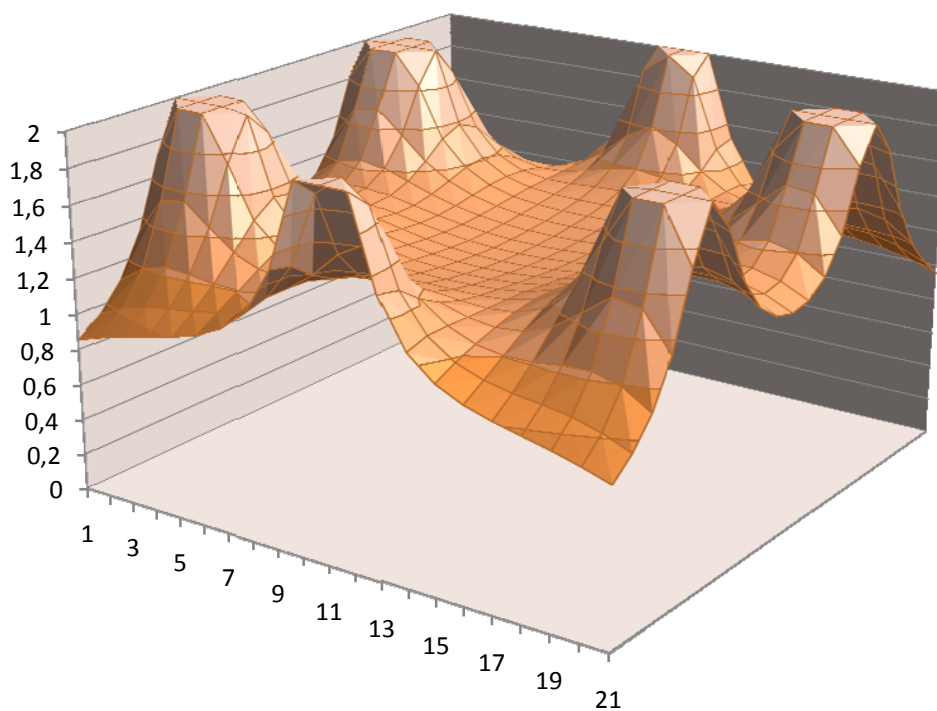
Příloha č. 2 Graf rozložení pole pro 4 Hallovy snímače, prostorový pohled.



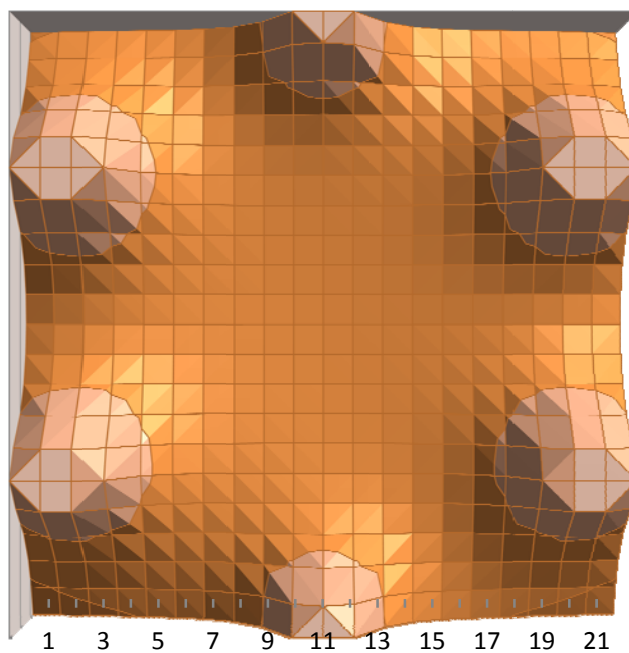
Příloha č. 3 Graf rozložení pole pro 4 Hallovy snímače, pohled seshora.



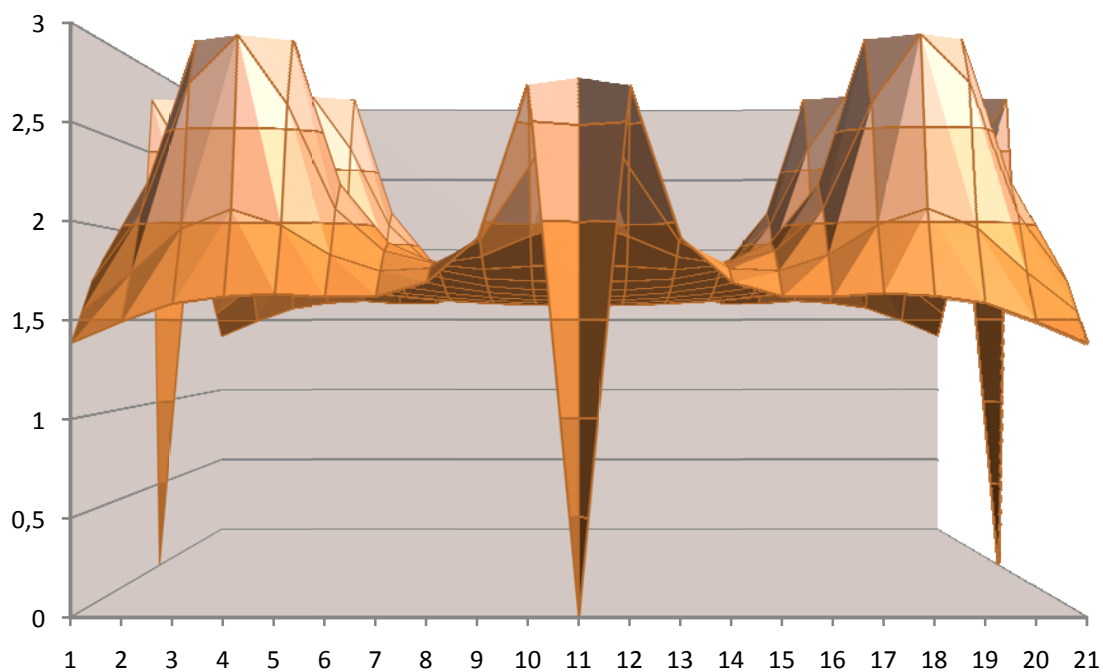
Příloha č. 4 Graf rozložení pole pro 6 Halloových snímačů, boční pohled.



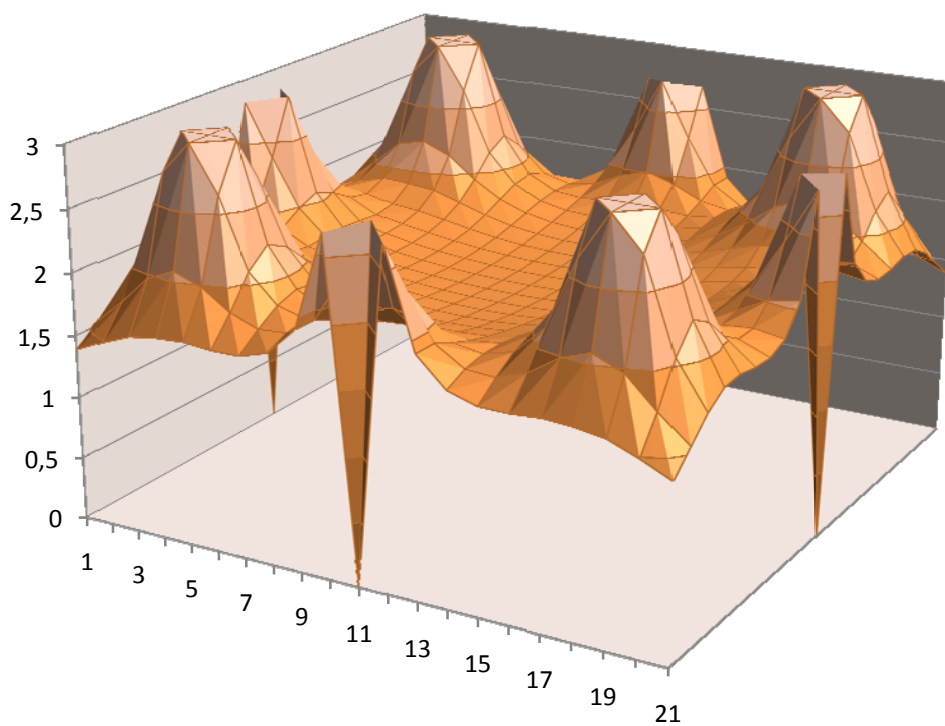
Příloha č. 5 Graf rozložení pole pro 6 Halloových snímačů, prostorový pohled.



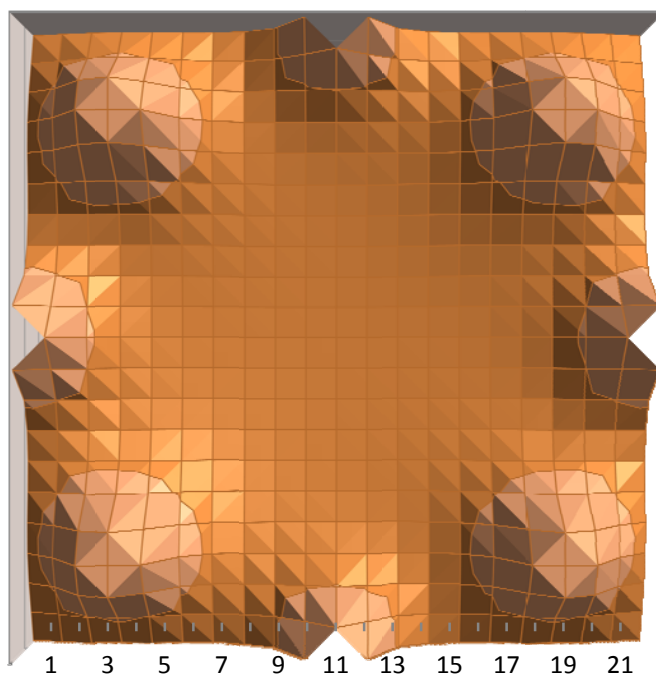
Příloha č. 6 Graf rozložení pole pro 6 Halloových snímačů, pohled shora.



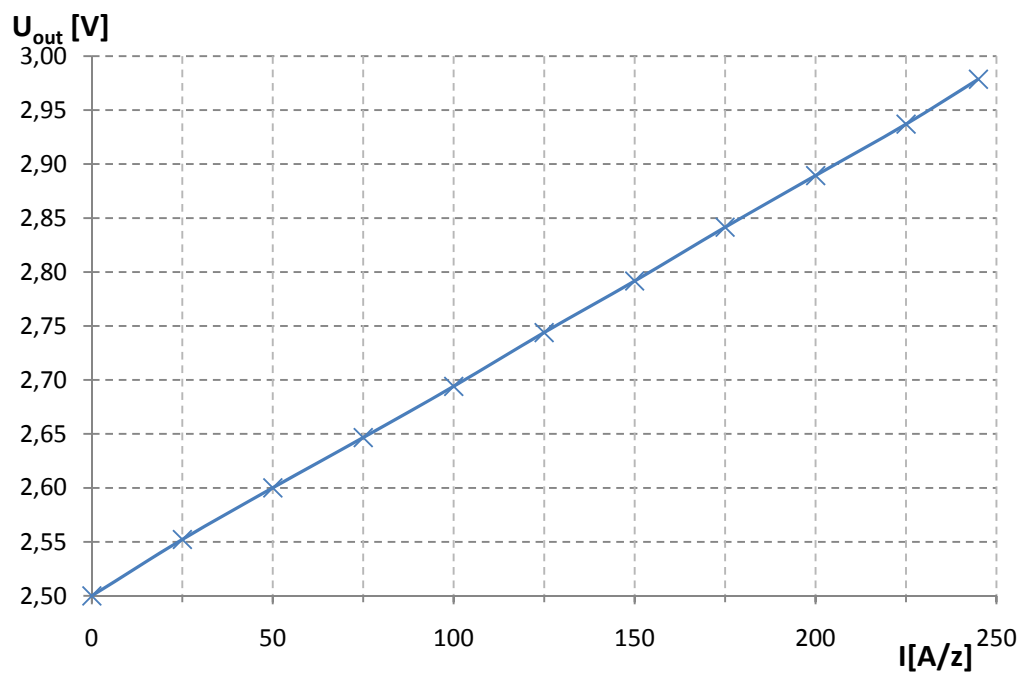
Příloha č. 7 Graf rozložení pole pro 8 Hallových snímačů, boční pohled.



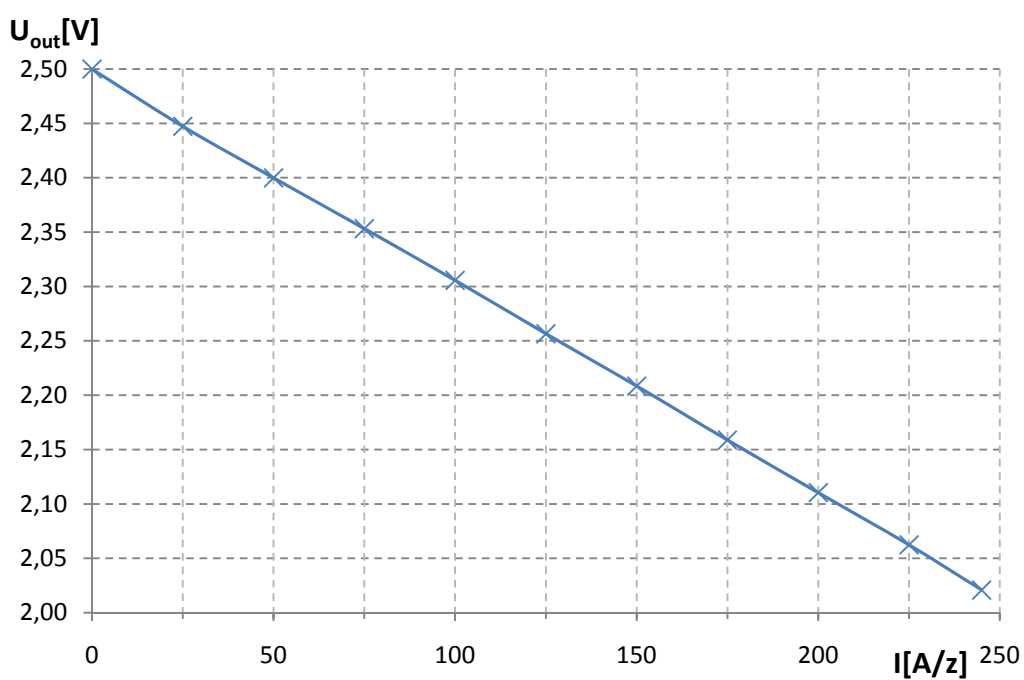
Příloha č. 8 Graf rozložení pole pro 8 Hallových snímačů, prostorový pohled.



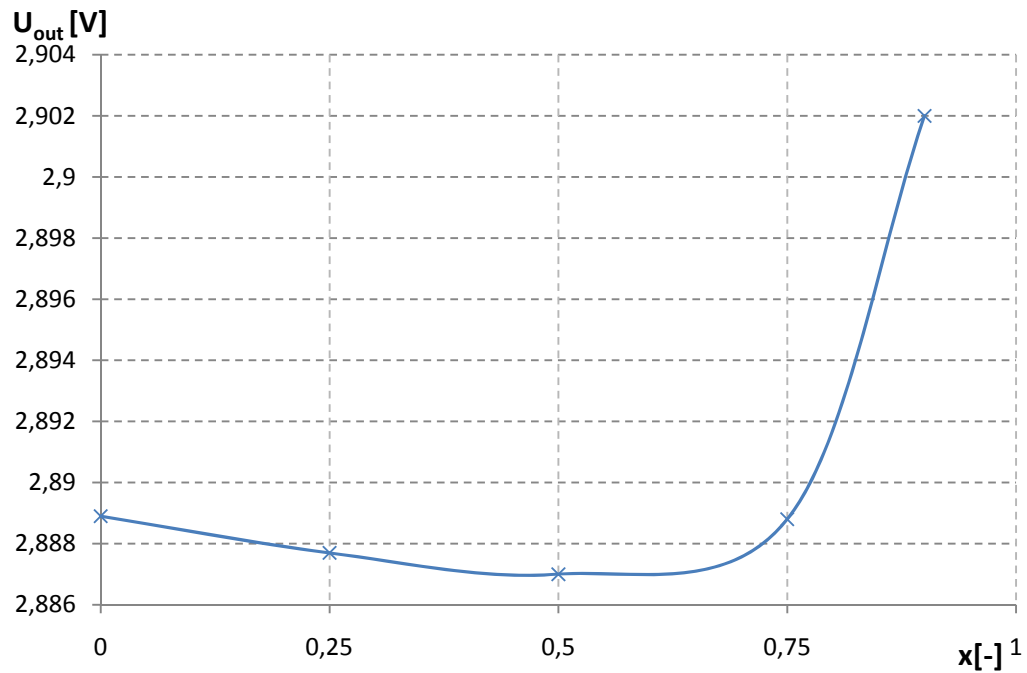
Příloha č. 9 Graf rozložení pole pro 8 Halloových snímačů, pohled shora.



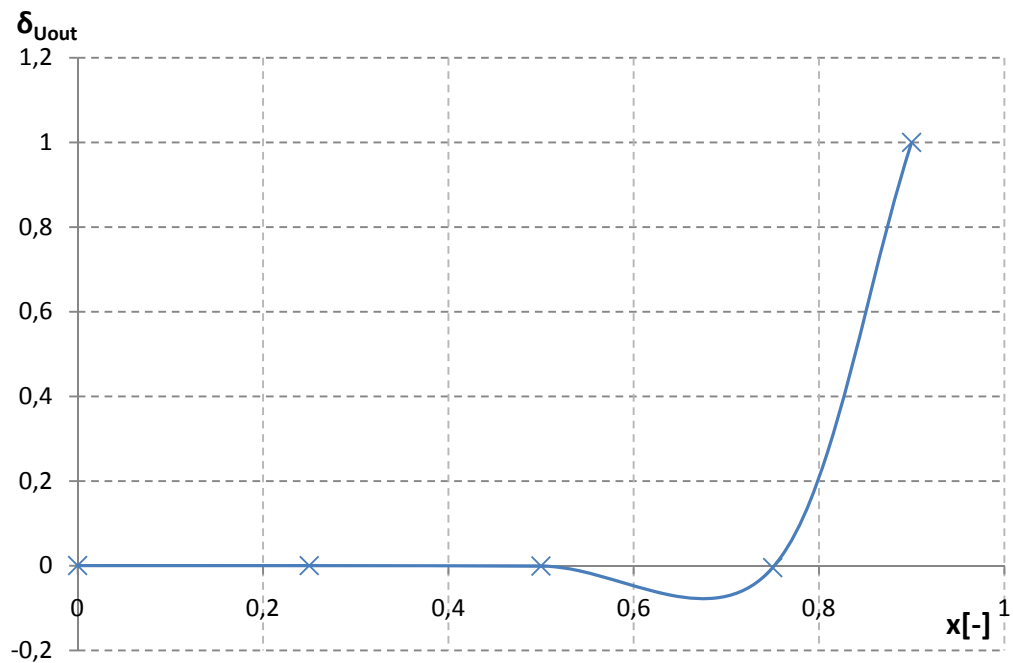
Příloha č. 10 Graf závislosti $U=f(I)$ (proud v jednom směru).



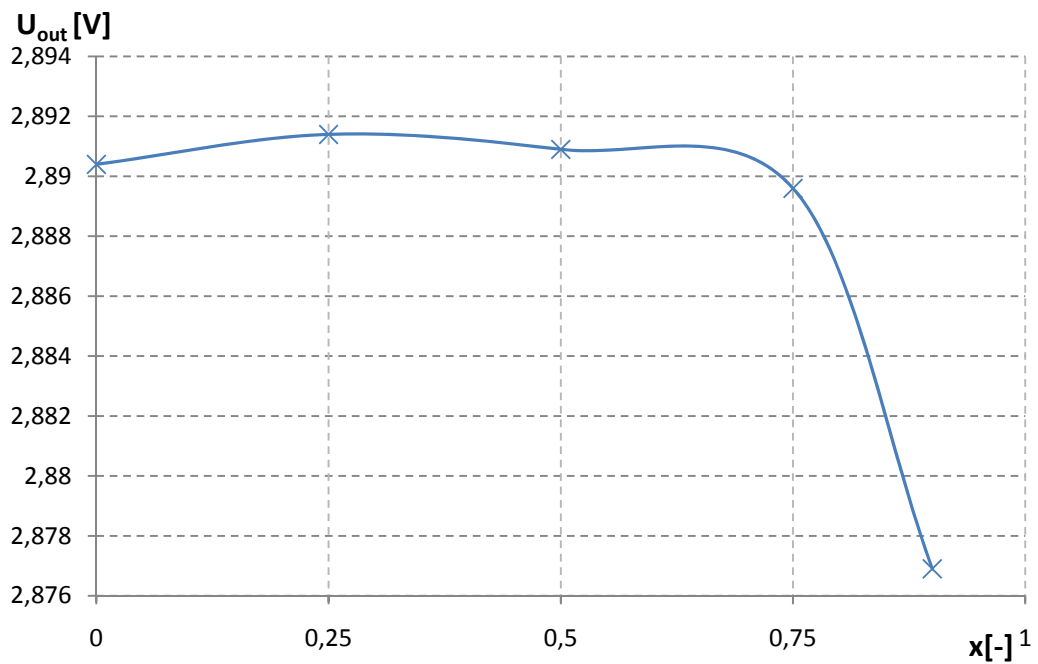
Příloha č. 11 Graf závislosti $U=f(I)$ (proud v druhém směru).



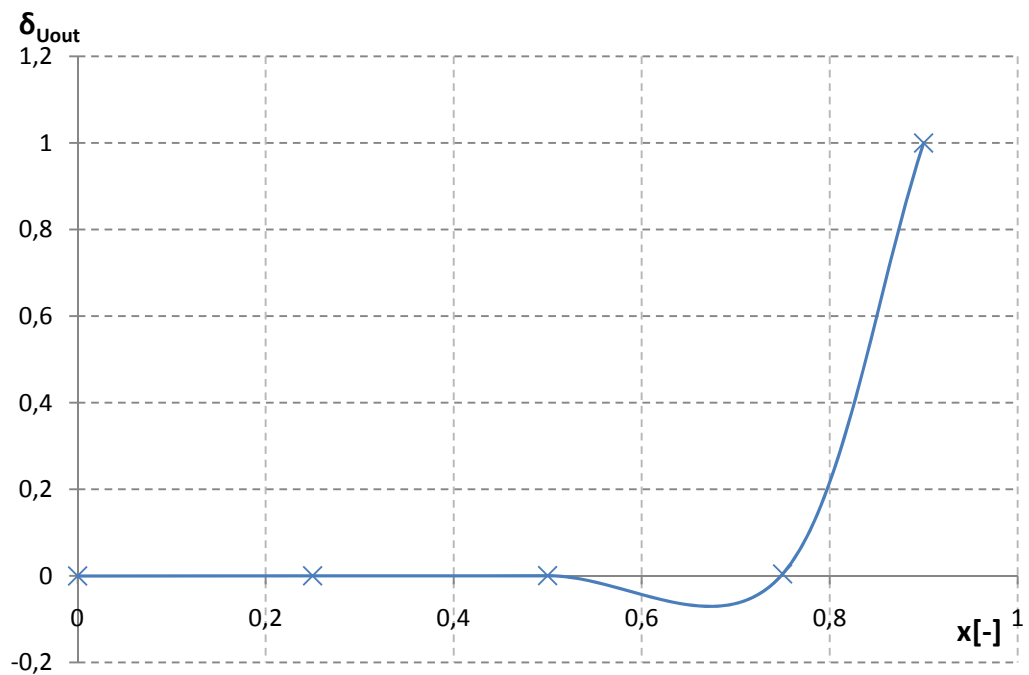
Příloha č. 12 Závislost $U_{out}=f(x)$ na poloze vodiče, směr k sondě.



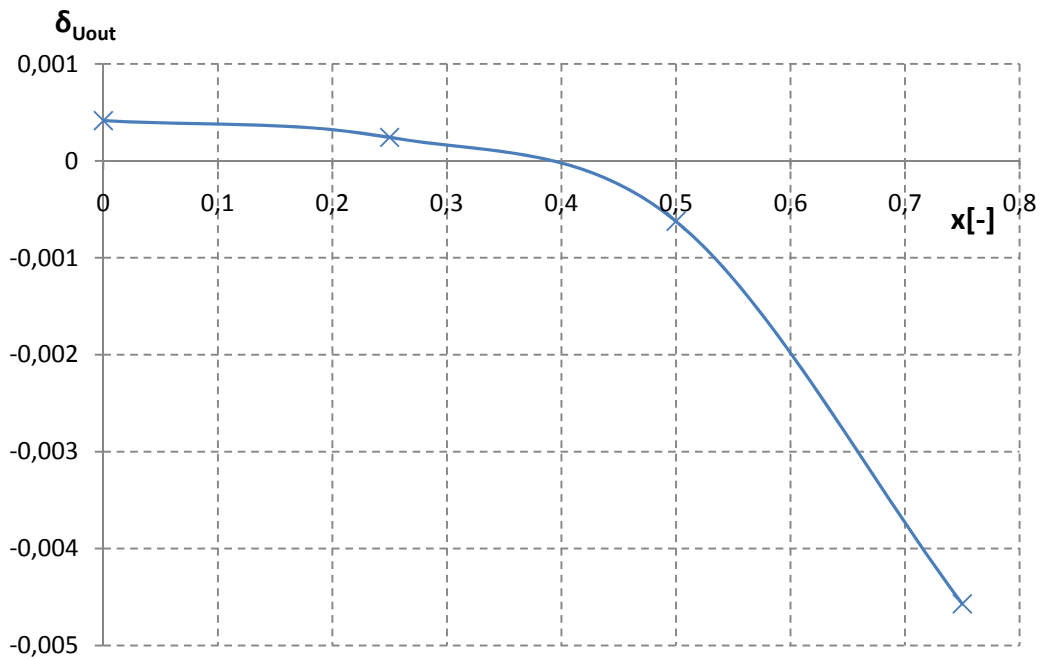
Příloha č. 13 Relativní odchylka $\delta_{Uout}=f(x)$ závislá na poloze.



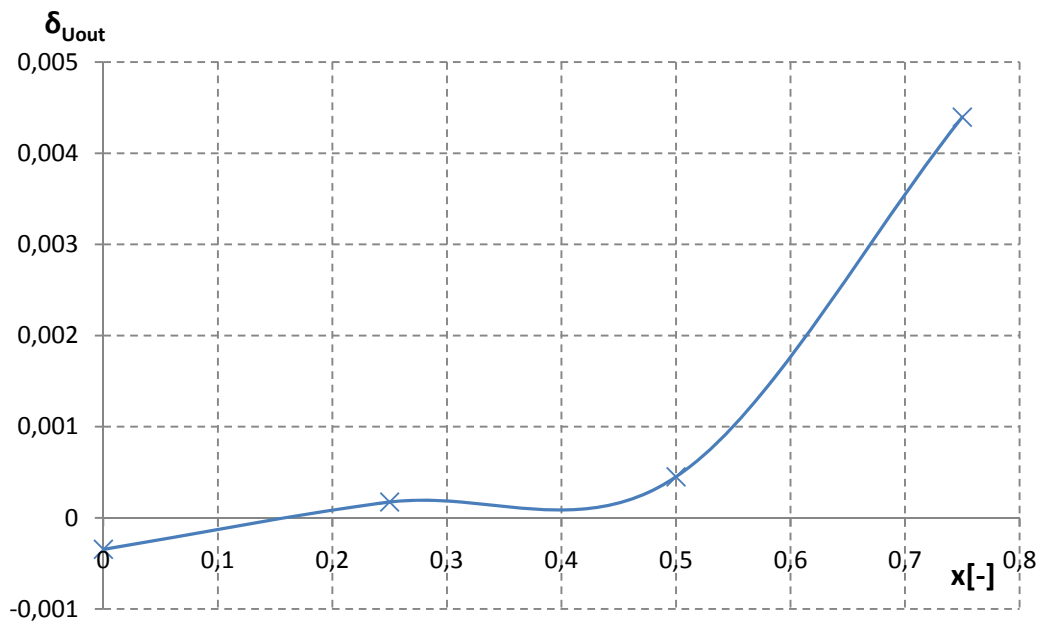
Příloha č. 14 Závislost $U_{out}=f(x)$ na poloze vodiče, směr mezi dvě sondy.



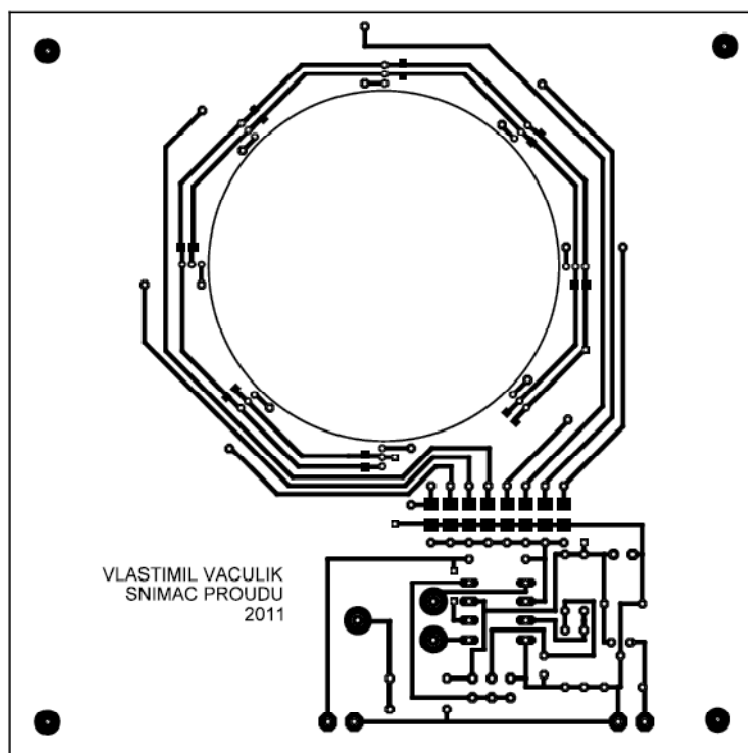
Příloha č. 15 Relativní odchylka $\delta_{U_{out}}=f(x)$ závislá na poloze.



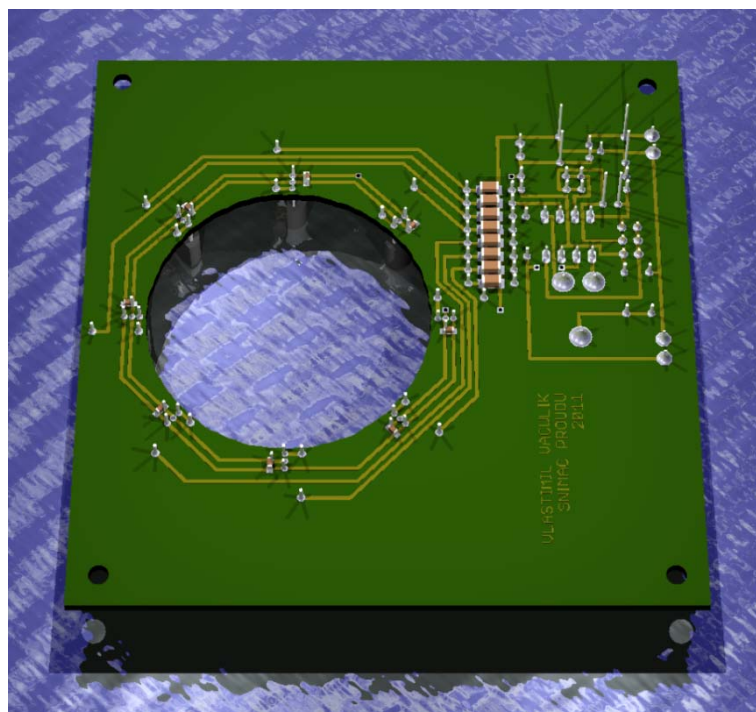
Příloha č. 16 Relativní odchylka $\delta_{U_{out}}=f(x)$ závislá na poloze. (detailní pohled)



Příloha č. 17 Relativní odchylka $\delta_{U_{out}}=f(x)$ závislá na poloze. (detailní pohled)



Příloha č. 18 Deska plošného spoje (Strana spojů).



Příloha č. 19 Vizualizovaná deska plošného spoje v programu Eagle POV RAY (Strana spojů).

**Seznam součástek**

Pozice	Velikost	Hodnota	Počet
R1,R2,R3,R4,R5,R6,R7,R8	0204	47k	8
R9,R10,R11,R12,R13,R14,R15,R16	0204	33k	8
R17,R18,R19,R20,R21	0204	10k	5
R23,R24	0204	1M	2
R22	PT10V	25k	1
C1,C3	CK	100n	2
C2	6,3X11	22u	1
C4,C5,C6,C7,C8,C9,C10,C11	SMD 1206	390p	8
C12,C13,C14,C15,C16,C17,C18,C19	SMD 0603	100n	8
C20	CK	10n	1
U1,U2,U3,U4,U5,U6,U7,U8	TO92UA	A1322	8
IC1	TO92	LE50ABZ	1
IC2	DIL8	TLC271ACP	1
SV1	-	LIŠTA 6 PINŮ	1
JUMPER	-	-	1
SVORKA	AK100/2	-	2



Poznámky