

Sledování proudové zátěže

Martin Gotvald

Bakalářská práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin Gotvald**
Osobní číslo: **A11188**
Studijní program: **B3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Sledování proudové zátěže**

Zásady pro vypracování:

- 1. Zpracujte stručný přehled dostupných metod a snímačů pro měření proudu.**
- 2. Zvolte snímač a další komponenty pro realizaci měřiče proudové zátěže v napájecím vodiči s možností unifikovaného výstupního signálu.**
- 3. Navrhněte zapojení obvodu a realizujte funkční prototyp zařízení.**
- 4. Popište možnosti využití připraveného zařízení v budoucích aplikacích.**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:


1. HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. 1. české vyd., 2. dotisk. Překlad Jan Obdržálek, Bohumila Lencová, Petr Dub. V Brně: Prometheus, 2006, vii, 1034-1198, [30]. ISBN 80-214-1868-0.
2. MIKOLANDA, Tomáš a Aleš RICHTER. Hallův jev, Hallovy senzory a jejich aplikace. Vyd. 1. V Liberci: Technická univerzita, 2006, 34 s. ISBN 80-737-2131-7.
3. DRAXLER, Karel, Petr KAŠPAR a Pavel RIPKA. Magnetické prvky a měření. Vyd. 3. V Praze: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2008, 276 s. ISBN 978-80-01-03970-0.
4. MALINA, Václav. Poznáváme elektroniku. 1. vyd. České Budějovice: KOPP, c1997, 240 s. ISBN 80-858-2887-1.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Viliam Dolinay, Ph.D.**
Ústav automatizace a řídicí techniky

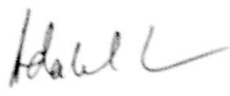
Datum zadání bakalářské práce: **7. března 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10. června 2014**

Ve Zlíně dne 7. března 2014


prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan




doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
ředitel ústavu

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- Že odevzdaná verze diplomové/bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá způsoby měření stejnosměrného a střídavého proudu. Metody měření měřicím proudovým transformátorem, Rogowského cívkou a Hallova sondou už byly dříve popsány a v této práci je každá z těchto uvedených metod podrobně komentována v teoretické části. V úvodní kapitole je zmíněna metoda měření proudu bočníkem, ovšem jenom okrajově, protože práce se primárně věnuje metodám, kdy je měřený vodič galvanicky oddělen od měřicího obvodu.

Praktická část práce se zabývá vyhodnocováním výsledků měření pouze u střídavého proudu. Také jsou zde popisovány jednotlivé části konstrukce obvodu, počínaje výběrem senzoru proudu, napájením navrženého obvodu a konče samotným návrhem obvodu. Pomocí Hallova senzoru je vyhodnocována změna střídavého proudu, který protéká měřeným vodičem, a tento stav je dále zpracováván.

Cílem práce je vytvořit prototyp přístroje, který je schopný indikovat změnu proudu. V závěru jsou zhodnoceny vlastnosti tohoto indikátoru a dále jsou zmíněny možnosti jeho využití do budoucna, např. jako bezpečnostního prvku s možností připojení do poplachového zabezpečovacího systému PZS.

Klíčová slova: Hallův jev, Hallova sonda, měřicí transformátor, Rogowského cívka, střídavý proud, měření, operační zesilovač.

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with methods of measuring DC and AC current. Methods of measurement by measuring current transformer, Rogowski coil and Hall sensor have been described previously. In this thesis, each of the methods mentioned above is described in detail in the theoretical part. In the introductory chapter there is mentioned the method of measuring by current shunt, but only marginally because the thesis is primarily dedicated to methods where the conductor is electrically isolated from the measuring circuit.

The practical part of the thesis deals with the evaluation of the results of measurement only of alternating current. There are also described different parts of the structure of circuit, from the selection of the sensor current, to power supply of the circuit and to a design of the circuit itself. Using Hall sensor we evaluate alternations of the alternating current that flows through the measured conductor and afterwards these alternations are compared.

The aim of this thesis is to create a prototype of a device that is able to indicate a change in current. In conclusion the properties of this indicator are evaluated and furthermore there are also mentioned the possibilities of its use in the future, such as a security element with the ability to be connected to an alarm safety system.

Keywords: Hall effect, the Hall sensor, measuring transformers, Rogowski coil, alternating current, measurement, operational amplifier.

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Viliamovi Dolinay, Ph.D., za pedagogické vedení a odbornou pomoc při vypracování mé bakalářské práce.

V Bedihošti 1. června 2014

.....

podpis autora

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1 MĚŘENÍ PROUDU	12
1.1 MĚŘENÍ STEJNOSMĚRNÉHO PROUDU.....	12
1.2 MĚŘENÍ STRÍDAVÉHO PROUDU	13
2 MĚŘENÍ PROUDU BOČNÍKEM.....	14
3 MĚŘICÍ TRANSFORMÁTORY	15
3.1 VLASTNOSTI MĚŘICÍHO TRANSFORMÁTORU.....	15
3.2 PRINCIP MĚŘENÍ PROUDU	15
3.3 POUŽITÍ MĚŘICÍCH TRANSFORMÁTORŮ PROUDU.....	18
4 ROGOWSKÉHO CÍVKA.....	19
4.1 POPIS ROGOWSKÉHO CÍVKY	19
4.2 LINEARITA	19
4.3.2 Cívka a integrátor	20
4.3.3 Flexibilní Rogowského cívka.....	22
4.4 POUŽITÍ ROGOWSKÉHO CÍVKY	23
5 HALLŮV JEV	24
5.1 HISTORIE	24
5.2 PRINCIP MĚŘENÍ PROUDU	24
5.2.1 Zjednodušený výpočet Hallova napětí.....	27
5.3 ZÁKLADNÍ PARAMETRY	28
5.4 ZPŮSOBY POUŽITÍ HALLOVA SENZORU K MĚŘENÍ PROUDU	28
5.4.1 Měření proudu uzavřenou smyčkou	29
5.4.2 Měření proudu s otevřenou smyčkou	30
5.5 MOŽNOSTI POUŽITÍ.....	31
II PRAKTICKÁ ČÁST	33
6 VÝBĚR METODY MĚŘENÍ	34
6.1 MĚŘICÍ TRANSFORMÁTOR PROUDU	34
6.2 MĚŘENÍ HALLOVÝMI SONDAMI.....	36
6.2.1 Feritové jádro	36
6.2.2 Hallova sonda A1302	37
6.2.3 Hallova sonda ACS712ELCTR-05B-T	39
6.3 POPIS MĚŘENÍ S HALLOVÝMI SENZORY A1302 A ACS712	41
7 NÁVRH OBVODU.....	42
7.1 POPIS ZAPOJENÍ STABILIZÁTORU	42
7.2 ZDROJ STABILIZOVANÉHO NAPĚTÍ PRO OPERAČNÍ ZESILOVAČ.....	44
7.3 POPIS ZAPOJENÍ	44
7.4 POSTUP VÝROBY DESKY PLOŠNÉHO SPOJE	49
8 MOŽNOSTI VYUŽITÍ PŘIPRAVENÉHO ZAŘÍZENÍ V BUDOUCÍCH APLIKACÍCH.....	50

ZÁVĚR	51
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	52
SEZNAM OBRÁZKŮ	59
SEZNAM TABULEK	61
SEZNAM PŘÍLOH P1: NAMĚŘENÉ HODNOTY OSCILOSKOPEM.....	62
SEZNAM PŘÍLOH P2: SEZNAM SOUČÁSTEK	67

ÚVOD

Cílem práce bylo sestavit obvod pro vyhodnocení změny proudu. Základní částí obvodu je senzor, který dokáže indikovat změnu proudu v měřeném vodiči. Pro měření proudu jsou vybrány dvě rozdílné metody. Jako první měřicí metoda je vybrána metoda měření neelektrických veličin pomocí Hallova jevu. Pro potřeby měření je využito Hallova senzoru, kdy při měření proudu vodiče na výstupu Hallova senzoru získáme elektrické napětí. Na našem trhu existuje velká řada různých senzorů, které díky své ceně, jednoduchosti a možnosti použití, nabízí široké uplatnění v automatizaci. Zejména s rozvojem automobilového průmyslu našly senzory své pevné místo v tomto odvětví. Vzhledem ke svým vlastnostem senzorů je téma podrobně popsáno v následujících kapitolách. Jako druhá metoda pro srovnání je použita metoda měření pomocí proudového transformátoru. Proudový transformátor jako takový, je ve velké míře používán v měřicích soustavách pro měření proudů ve velkém proudovém rozsahu např. v energetice. Také se nabízí možnost aplikovat proudový transformátor do navrženého obvodu a stanovit možnosti použití.

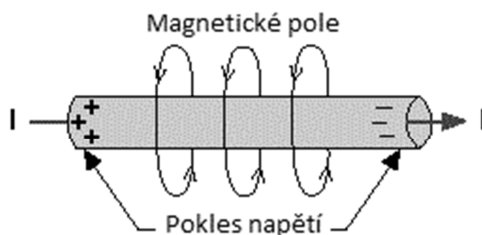
V teoretické části jsou popsány dostupné metody měření proudu. Mezi tyto metody patří: měření proudu měřicím transformátorem, dále Rogowského cívkou a Hallovou sondou. Jedná se o měření, při kterém je měřený vodič galvanicky oddělen od měřicího obvodu, zároveň nedochází k přerušení vodiče. Jednou z dalších metod je měření pomocí bočnicku, ale při tomto měření dochází k přerušení měřeného obvodu, do kterého je vložen bočník. Tato metoda je stručně popsána, ale dále není rozvíjena, protože se práce soustřeďuje na popis bezkontaktních metod měření střídavého proudu.

V praktické části je provedeno měření střídavého proudu procházejícího vodičem a v tabulkách jsou porovnány vybrané parametry těchto senzorů a na základě takto naměřených hodnot je vybrán vhodný snímací prvek. Dále v praktické části je blíže popsán napájecí zdroj, který je jediným napájecím zdrojem pro navržený obvod. Následuje konstrukce obvodu pro zpracování signálu. Základní princip obvodu spočívá v tom, že při průchodu proudu vodičem, je na výstupu získána informace, jestli prochází proud a tento stav bude indikován rozsvícením LED diody. V samotném závěru je krátce zmíněna o možnostech využití navržené konstrukce a její uplatnění v praxi.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 MĚŘENÍ PROUDU

Podle Oerstedova objevu je elektrický proud provázen magnetickým polem. Těchto poznatků využil francouzský fyzik André Marie Ampère (1775 - 1836), který posléze došel k tomu, že na sebe vzájemně působí silami i vodiče, kterými prochází elektrický proud. Na základě těchto zjištění, byla prokázána přítomnost magnetického pole v okolí vodičů s proudem. Jeho příčinou je pohyb nositelů elektrického náboje (elektronů) ve vodiči. [1]



Obr. 1. Vznik magnetického pole při průchodu proudu vodičem [2]

Závislost mezi intenzitou magnetického pole H a proudem I , je popsána 1. Maxwellovou rovnicí. Jedná se o způsob měření proudu protékajícím vodičem, který kolem sebe vytváří magnetické pole, kdy změna velikosti proudu protékajícího vodičem vyvolá okamžitou změnu magnetického pole. Současná definice ampéru vychází z Ampérova zákona na základě vzájemného působení dvou rovnoběžných vodičů. [1]

Proud 1A "je stálý elektrický proud, který při průchodu dvěma přímými rovnoběžnými nekonečně dlouhými vodiči zanedbatelného kruhového průřezu umístěnými ve vakuu ve vzájemné vzdálenosti 1 metr vyvolá mezi nimi stálou sílu $2 \cdot 10^{-7}$ newtonu na 1 metr délky vodiče". [1]

1.1 Měření stejnosměrného proudu

Označení stejnosměrného proudu DC [A].

Stejnoseměrný proud nemění směr. Dohodnutý směr stejnosměrného proudu je od kladného pólu k zápornému. Elektrický proud je tedy vlastní přenos nabitých částic z jednoho místa na jiné (z jednoho pólu zdroje do druhého). [2]

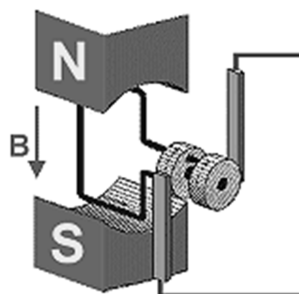
Stejnoseměrný proud vzniká:

- galvanický člunek (zdroj stálého stejnosměrného napětí)
- termočlunek
- fotoelektrický člunek
- dynamo (generátor)
- usměrněním střídavého proudu pomocí usměrňovače (jednocestný, dvoucestný usměrňovač)

1.2 Měření střídavého proudu

Označení střídavého proudu AC [A].

Otáčením závitu v magnetickém poli vzniká v obvodu střídavý napětí. Doba jedné otáčky závitu se nazývá perioda, má značku T a jednotku s (sekunda). Počet period za sekundu se nazývá frekvence (kmitočet), má značku f a jednotku Hz (hertz). [2]



Obr. 2. Vznik střídavého proudu [2]

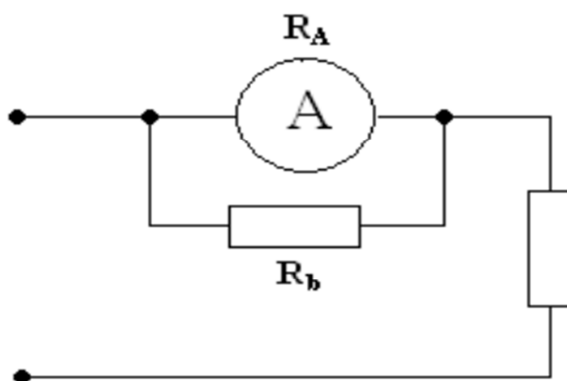
Otáčí-li se zívít v magnetickém poli (Obr. 2), indukuje se na jeho koncích napětí, jeho velikost závisí na úhlu, pod kterým protíná indukční čáry. V uzavřeném elektrickém obvodu začne procházet proud, jehož velikost a směr závisí na velikosti a polaritě indukovaného napětí. Mezi periodou a frekvencí platí jednoduchý vztah:

$$T = \frac{1}{f} \quad (1.1)$$

Během jedné periody projde vodičem elektrický proud jedním a opačným směrem. V elektrické síti (ČR) má střídavé napětí (proud) frekvenci 50Hz. [2]

2 MĚŘENÍ PROUDU BOČNÍKEM

Bočník je zařízení, které slouží ke zvětšení měřicího rozsahu ampérmetrů. Je zhotoven z odporového materiálu s velmi malým teplotním součinitelem odporu. Měří se úbytek napětí na bočníku, aby ztráty na bočníku byly co nejmenší, musí být i odpor tohoto bočníku malý. Bočník je zapojen paralelně s ampérmetrem (Obr. 3) a snižuje odpor Ampérmetru, měřicím přístrojem může zdánlivě protékat větší proud, aniž by hrozilo jeho poškození. U analogových přístrojů se přepínáním několika různých rezistorů-bočnicků mění rozsah ampérmetru. [3]



Obr. 3. Ampérmetr s bočníkem [20]

Porovnáme-li napětí na odporu bočníku R_b a odporu měřicího přístroje R_m , platí $(I - I_m)$ $R_b = I_m R_m$, kde I_m je proud ampérmetrem a I celkový měřený proud.

Z toho plyne následující rovnice:

$$I_m = I \frac{R_b}{R_b + R_m} = I \frac{R_b}{R_m} = \frac{U_b}{R_m} \quad (2.1)$$

kde U_b je napětí na bočníku. Odpor cívky se s teplotou zvyšuje asi o 0,4% na 1°C. Proto se do série s cívkou zapojuje teplotně nezávislý odpor R_p zhotovený z manganinu - zmenšuje teplotní závislost přístroje. Proto zavádíme odpor $R_m' = R_m + R_p$. Pro změnu měřicího rozsahu platí: [3]

$$n = \frac{I}{I_m} = \frac{R_b + R_m}{R_b} \Rightarrow R_b = \frac{R_m}{n - 1} \quad (2.2)$$

3 MĚŘICÍ TRANSFORMÁTORY

Tato kapitola popisuje metody měření proudu pomocí měřicího transformátoru. Je zde popsán princip měření a základní vlastnosti měřicích transformátoru. Pro názorný příklad bude uveden výrobek firmy TELEMA (AC1050). Kapitola je zakončena způsoby a možnostmi použití.

3.1 Vlastnosti měřicího transformátoru

Jedná se o jednu z metod, jak lze měřit proud protékajícím vodičem při změně magnetické pole. Je rozdíl mezi měřicími transformátory proudu a napětí. Měřicí transformátory proudu pracují v blízkosti stavu nakrátko, tj. sekundární vnutí je zatíženo malou impedancí. Proudové transformátory umožňují měřit přesně a zároveň jednoduše střídavý proud. Vzhledem ke galvanickému oddělení lze s nimi bezpečně pracovat při měření.

U měřicích transformátorů proudů jsou udávány parametry:

- Jmenovitý výkon
- Proudový převod
- Třídy přesnosti (0,1-0,2-0,5-1-3%)
- Nadproudové číslo

Nadproudové číslo vyjadřuje násobek jmenovitého proudu (např. $n = 10$), při němž chyba proudu dosáhne 10% při jmenovitém zatížení a účinníku. Tato hodnota je důležitá při použití měřicího transformátoru proudu v rozvodnách, v nichž musí bezpečně pracovat i při značných přetíženích. [4] Vlastnosti měřicích transformátorů jsou při měření proudu a napětí závislé na jejich kmitočtech.

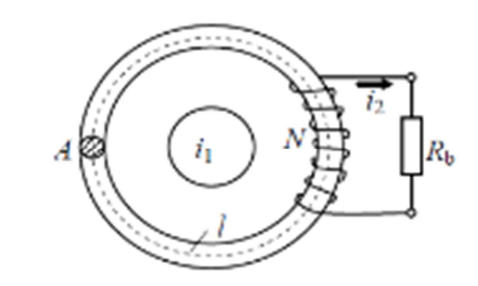
3.2 Princip měření proudu

Střídavé magnetické pole kolem vodiče, které je přímo úměrné proudu protékajícímu vodičem, naindukuje v měřicím transformátoru střídavé napětí. Při vhodné konstrukci a správném zatížení transformátoru je výstupní napětí přímo úměrné proudu v měřeném vodiči.

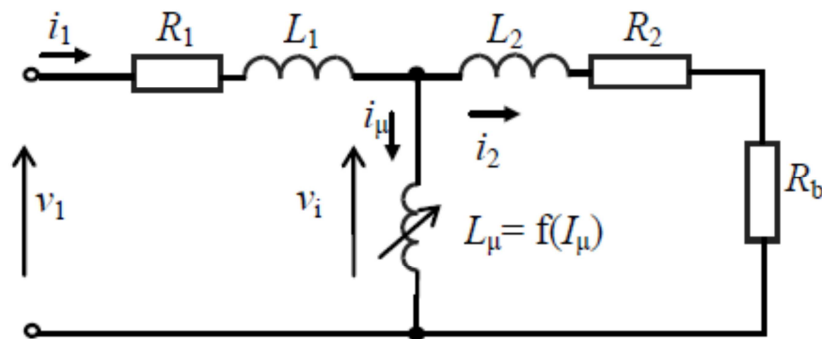
Snad největší výhodou této metody je fakt, že měřicí obvod je galvanicky oddělen od měřeného vodiče a zároveň transformátor neovlivní měřený obvod žádnou přidanou zátěží. Pokud bychom chtěli jít do detailů, transformátor odebírá z měřeného vodiče zanedbatelné

množství energie o velikosti desítek mW/10A, které se ztrácí ve vinutí a zátěži transformátoru. [5]

Na zapojení (Obr. 4) lze pohlížet jako na transformátor, kdy se vodič chová jako primární část a vinutí navinuté na toroidu působí, jako sekundární vinutí. Jmenovitý proud sekundárního vinutí bývá obvykle 1A nebo 5A, převod se udává poměrem jmenovitých proudů např. 50A/10A. Zátěžový odpor R_B je volen v závislosti na citlivosti, která je požadována. Pro lepší výkon jádra transformátoru je nutné, aby měl vysokou propustnost, vysokou odolnost, nízkou hysterezi a nízké ztráty vířivými proudy. [6]



Obr. 4. Obvod proudového transformátoru [6]



Obr. 5. Ekvivalentní obvod proudového transformátoru [6]

Matematický model měřicího transformátoru se skládá z následující rovnice:

$$i_1(t) = i_2(t) + i_\mu(t) \quad (3.1)$$

Indukované napětí v_i je dána rovnicí,

$$v_i(t) = N \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (3.2)$$

kde Φ - magnetický tok, N - poměr závitů transformátoru,

$$N \frac{d\Phi(t)}{dt} = i_2(t)R + L \frac{di_2(t)}{dt} \quad (3.3)$$

$$R = R_2 + R_b \quad (3.4)$$

$$L = L_2 + L_b \quad (3.5)$$

kde L_b je indukčnost zátěže.

Velmi důležitá je otázka vztahu mezi magnetickou indukčností a magnetickým proudem, jejich nelineární závislostí. Obecně platí, že magnetická indukčnost může být vyjádřena,

$$L_\mu = \frac{N^2 A}{l} \cdot \frac{dB}{dH} \quad (3.6)$$

kde A je plocha z feromagnetického jádra transformátoru, l je délka magnetické cesty

(Obr. 5), dB / dH je rozdíl propustnost nebo sklon charakteristiky BH. [6]

Rovnice (3.2) může být přepsána,

$$L_\mu \frac{di_\mu}{dt} = v_i \quad (3.7)$$

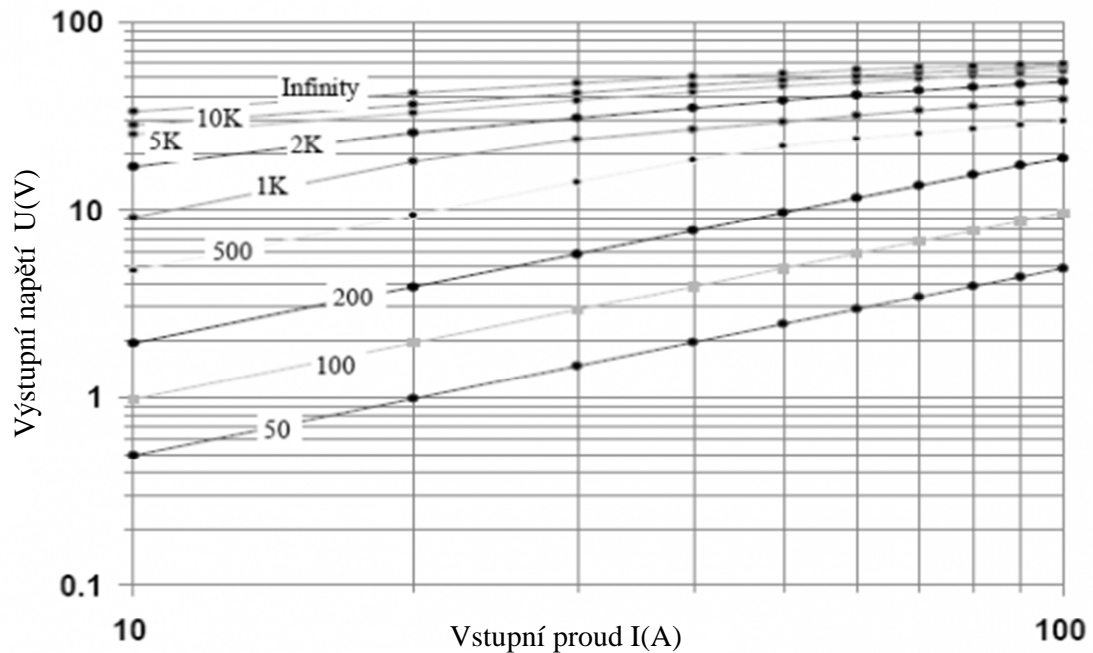
kde $L_\mu = f(I_\mu)$.

Kombinace rovnic (3.1), (3.3) a (3.7) lze získat:

$$\frac{di_\mu(t)}{dt} = \frac{1}{L + L_\mu(i_\mu)} \left[Ri_1 - Ri_\mu(t) + L \frac{di_1(t)}{dt} \right] \quad (3.8)$$

Je-li sekundární proud znám z měření, primárním proud lze vypočítat z rovnice (3.1)

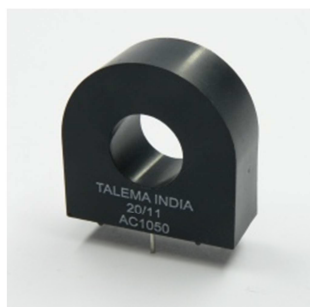
Pro příklad linearity je uvedena voltampérová charakteristika měřicího transformátoru proudu od výrobce TELEMA a to typ AC1050 je to $1000\Omega = 1V$, pak transformační poměr 1000:1 [7]



Obr. 6. VA měřicího transformátoru AC1050 při různých impedancích [7]

3.3 Použití měřicích transformátorů proudu

Použití pro měření velkých proudů a velkých střídavých napětí se převádí naměřené hodnoty na hodnoty měřitelné běžnými měřicími přístroji. Používají se také při konstrukci regulátoru proudu, proudových ochran a jističů. Další možností použití je při měření výkonu, elektrické práce a účinnku. V neposlední době našly své uplatnění u spínaných zdrojů. Ve spínaných zdrojích se používají k měření zvlnění napětí a proudu ve zdroji pro účely regulace a ochrany. Používá se malých toroidních jader, v případě proudů s velkou stejnosměrnou složkou může být použito i jádro se vzduchovou mezerou.



Obr. 7. Měřicí proudový transformátor [7]

4 ROGOWSKÉHO CÍVKA

Další možností jak měřit proud, je způsob, kdy kolem měřeného vodiče je navinuta Rogowského cívka. Jedná se o metodu bezkontaktního měření, kdy měřicí obvod je galvanicky oddělen od měřeného vodiče. Kapitola popisuje metody měření proudu cívky navinuté kolem jádra, zapojení cívky a integrátoru, výpočty pro návrh Rogowského cívky a metody použití.

4.1 Popis Rogowského cívky

Rogowského cívka je přesný lineární senzor proudu pro přesné měření ve velkém rozsahu a patří do skupiny proudových transformátorů s rozsahem od 0,1A do 80A. Prakticky jde o toroidní cívku umístěnou kolem primárního měřeného vodiče stejným způsobem jako sekundární vinutí měřicího proudového transformátoru. Na rozdíl od něj však výstupní signál z Rogowského cívky není proud, ale napětí.

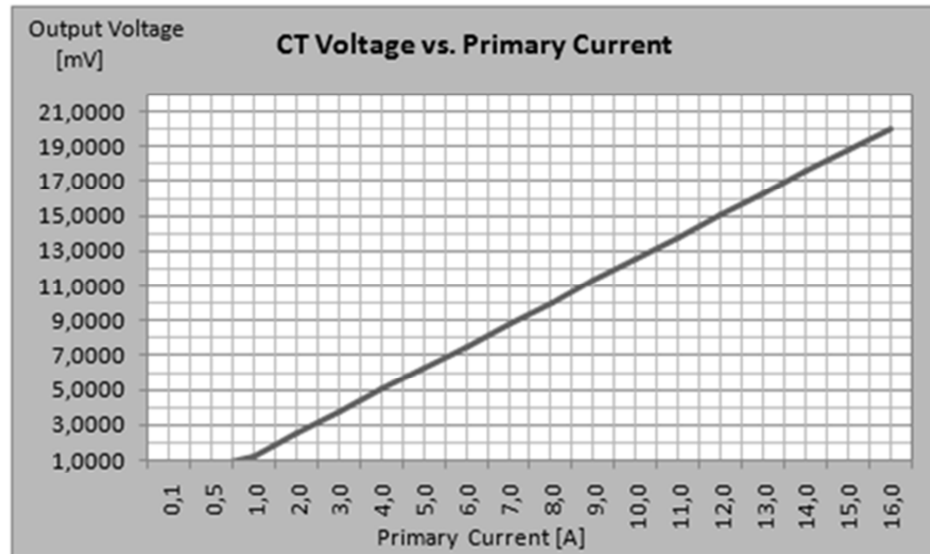
I když magnetizační křivka feromagnetického materiálu jádra umožňuje navrhnout proudový transformátor tak, aby pracoval již při malých proudech protékajících transformátorem, celková charakteristika je ve velkém rozsahu díky nasycení magnetického obvodu výrazně nelineární. Naproti tomu magnetizační charakteristika vzduchového jádra Rogowského cívky je lineární v širokém rozsahu proudů (intenzity magnetického pole H). Výsledný signál, který reprodukuje aktuální časový průběh tvaru vlny primárního proudu, se získá integrací získaného napěťového signálu. [8]

4.2 Linearita

Jednou z nejdůležitějších vlastností Rogowského měřicího cívky, je její linearita. Cívka neobsahuje žádné saturevatelné složky a na výstupu dostáváme lineární změnu v poměru k aktuálnímu operačnímu limitu stanovenou velikostí napětí.

Integrátor je lineární až do doby, než dojde k nasycení. Linearita je u Rogowského cívky snadno nastavitelná, protože snímač může být justován v každé časové úrovni a takto nastavený bude přesnější pro všechny proudy, včetně velmi velkých proudů. Převodníky mají velmi široký dynamický rozsah a vynikající přechodové odezvy. [8]

Na (Obr. 8) je znázorněna závislost výstupního napětí a měřeného proudu při zatížení odporem $R_B = 10 \text{ K}\Omega$.



Obr. 8. Závislost napětí na proudu [8]

4.3 Metody Rogowského cívky

V následujících podkapitolách jsou popsány způsoby zapojení s Rogowského cívkou při bezkontaktním měření proudu.

4.3.1 Rogowského cívka s jádrem

Rogowského cívka je tvořena jádrem, kolem kterého je navinutý vodič o stejném průřezu a velkém počtu závitů. Při průchodu proudu vodičem se vytváří magnetické pole kolem vodiče, které je úměrné rychlosti změny proudu.

Výstup z cívky je dán rovnicí,

$$V_{OUT} = M \frac{di}{dt} \quad (4.1)$$

kde M je vzájemná indukčnost cívky a $\frac{di}{dt}$ je rychlost změny proudu.

4.3.2 Cívka a integrátor

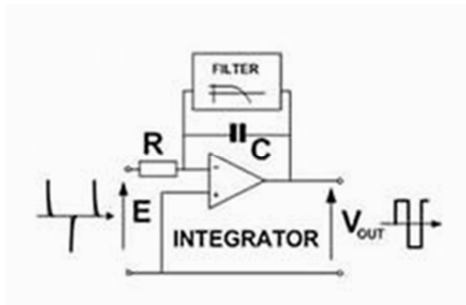
Kombinace cívky a integrátoru poskytuje mimořádně všestranné měření proudu. Je to systém, který může být navržen tak, aby využil široký rozsah frekvencí a velikostí vodičů.

Výstup je nezávislý na frekvenci, má přesnou odezvu a fáze může měřit komplexní aktuální průběhy a změny.

Za předpokladu, že cívka tvoří uzavřenou smyčku, může být prokázáno, že napětí E indukované v cívce je úměrné rychlosti změny proudu I v závislosti na vztahu,

$$E = H_c \frac{dI}{dt} \quad (4.2)$$

kde H_c je citlivost cívky ($\frac{V_s}{A}$).



Obr. 9. Zapojení integrátoru [9]

Chceme-li získat výstupní napětí V_{OUT} úměrné I , je třeba integrovat napětí cívky E , elektronický integrátor slouží k zajištění šířky pásma rozkládajícího se pod 1Hz. [9]

Vstupní odpor R_{SH} a zpětnovazební kondenzátor C tvoří výstup:

$$V_{OUT} = (1/CR) \int E dt \quad (4.3)$$

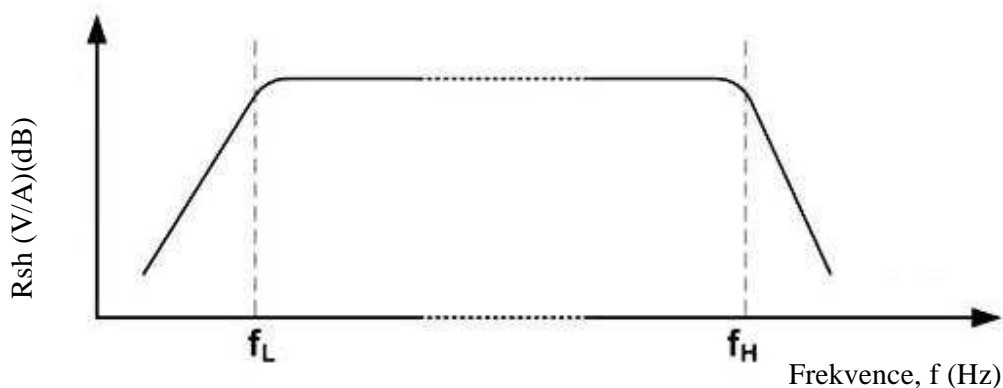
Celkový zisk převodníku je tedy dán,

$$V_{OUT} = R_{SH} I, \quad (4.4)$$

$$R_{SH} = H / CR, \quad (4.5)$$

kde CR je citlivost snímače (V / A).

V_{OUT} je úměrné I a tento vztah je platný v celé šířce pásma převodníku. Šířka pásma je definována jako rozsah kmitočtů od f_L na f_H , pro které může být sinusové proudy měřené v rozmezí 3dB zadaného citlivostí R_{SH} . [9]



Obr. 10. Rogowského cívka a frekvenční integrátor [9]

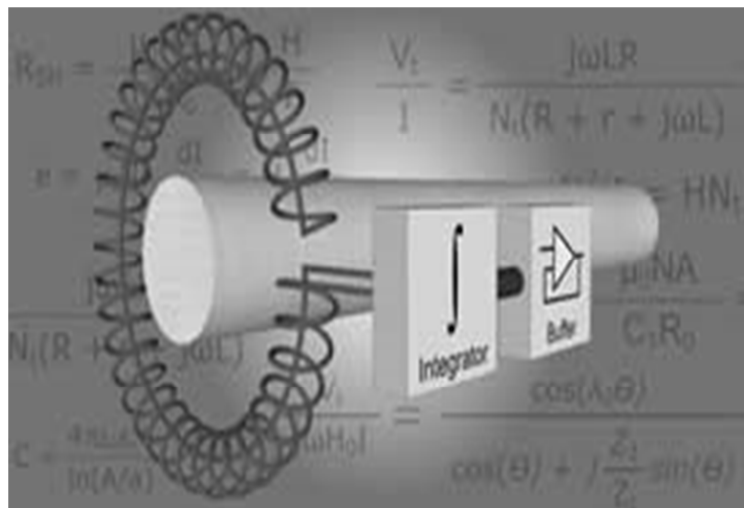
Při nízkých frekvencích integrátoru se zesílení zvyšuje a teoreticky se stane nekonečným, protože se frekvence blíží k nule, proto zisk integrátoru musí být omezen jen na nízké frekvence. Toto omezení je dosaženo tím, že je umístěna dolní propust paralelně s integračním kondenzátorem. Dolní propust nastaví filtr nízkofrekvenčního pásma f_L , obvykle je to méně než 1Hz. Pro vysokofrekvenční pásma f_H (zpravidla 1MHz nebo vyšší), je měřený signál slabý a dochází ke zpoždění fáze. Šířka pásma u elektronického integrátoru a délka kabelu připojeného integrátoru k cívce také ovlivňují tento limit. Na výstupu integrátoru je napětí, které přesně reprodukuje aktuální průběh. [9]

4.3.3 Flexibilní Rogowského cívka

U velkých, rychlých proudových impulzů můžeme použít speciální vinutí a snížit výstupní napětí cívky na přijatelnou úroveň. To také poskytuje lepší vysokofrekvenční odezvu. Při tomto použití není cívka navinuta na jádro, ale je vytvořena z jednoho kusu.

Flexibilní cívky jsou obecně výhodnější než použití pevné cívky, ale jsou méně přesné (1% ve srovnání s 0,1% pro pevné cívky). Jsou vhodnější, k měření vysokých frekvencí. Nejvíce jsou používány ve dvou průměrech, cívky označované "standard" užívá se průměru 7mm a s označením "tenké" cívky jsou navinuty na 3,2mm. Celkový průřez cívky závisí na tloušťce izolace. [10]

Typická je vzájemná indukčnost pro flexibilní cívky 200nH – 300nH . V závislosti na integrátoru. Tyto cívky mohou být použity k měření proudů 1mA – 1A a na frekvencích až do několika stovek kHz. Speciální "nízký výkon" vinutí lze měřit vyšší frekvence.



Obr. 11. Flexibilní Rogowského cívka [10]

4.4 Použití Rogowského cívky

Používá se pro přesné měření proudu ve velkém měřicím rozsahu. Jednou z možností jsou proudové elektronické přístrojové transformátory. Jedná se toroidní cívku bez železného jádra (vzduchovou cívku) nacházející se kolem primárního měřeného vodiče stejným způsobem jako sekundární vinutí měřicího proudového transformátoru. Díky absenci železného jádra nemůže dojít k saturaci.

5 HALLŮV JEV

Hallův jev patří mezi galvanomagnetické jevy. Jedná se o metodu bezkontaktního měření proudu. První podkapitola popisuje historii vniku Hallova jevu. V následujících podkapitolách jsou popsány základní principy a metody měření proudu za pomoci Hallova jevu. Hallův jev se používá nejen pro měření proudu, ale i ke snímání pozice pohyblivých částí strojů. Následně bude Hallův jev popsán z pohledu měření proudu v měřicích přístrojích, nikoliv v automatizaci.

5.1 Historie

Byl objeven v roce 1879 Edwinem Herbertem Hallem (1855-1938), který již jako student na Univerzitě Johnse Hopkinse v Baltimoru dokázal, že je možné pomocí magnetického pole vychylovat vodivostní elektrony. [11]

E. H. Hall měl možnost provádět svá měření pouze při normálních, pokojových teplotách. Teprve od roku 1908, dovedeme zkapalňovat helium, kdy byly fyzikům k dispozici velmi nízké teploty odpovídající několika kelvinům (K). [12]

"Pro měření magnetického pole se používá Hallova sonda, pracující na principu Hallova jevu. Zatímco Hall pracoval s tenkými kovovými fóliemi a velkou koncentrací elektronů, dnešní Hallovy sondy obsahují plátek polovodiče s relativně malou koncentrací nosičů nábojů." [11]

5.2 Princip měření proudu

Proud je měřen především prostřednictvím využití poklesu napětí a generování magnetického pole (Obr. 12). Při průchodu proudu přes materiál se vytváří napětí. Pro vodivé látky, je napětí úměrné proudu v širokém rozsahu podmínek. Tím, že se změní pokles indukovaného napětí, je možné odvodit aktuální stav. Alternativně, lze měřit magnetické pole, které vytváří. Pohybující se nosiče náboje vytvářejí magnetické pole orientované kolmo k jejich pohybu. V prázdném prostoru pole závisí pouze na geometrii proudové dráhy a základní fyzikální veličiny zvané permeability. Propustnost je měřítkem toho, jak dobře materiál nebo nedostatky materiálu v případě vakua, mohou vést magnetické pole. Hlavní výhodou magnetického snímání proudu je izolace – tam kde je nutné galvanické oddělení monitorovaného okruhu. Magnetické pole kolmé na elektrický proud způsobuje zvláštní jev: volné

nosiče elektrického proudu jsou ve vodiči vychylovány z podélného směru a vytlačovány k okraji. Příčinou této odchylky je elektromagnetická Lorentzova síla. Mezi okraji vodiče se tedy vytvoří rozdíl potenciálů, kolmý na směr proudu. Hallův jev vzniká při průchodu proudu I tenkou polovodičovou destičkou (InSb, InAs) s odporem $0,01\Omega$ až 20Ω a tloušťky cca $0,1\text{mm}$, jedná se o kompromis mezi maximem citlivost a mechanické pevnosti obdélníkového tvaru. Při vložení destičky do magnetického pole skrze ni prochází indukční tok a přeskupuje náboje v destičce na jednu stranu. Tak na bočních stěnách destičky vzniká napětí (tzv. Hallovo napětí). [13]

Hallovo napětí je při stálém proudu přímo úměrné velikosti magnetické indukce:

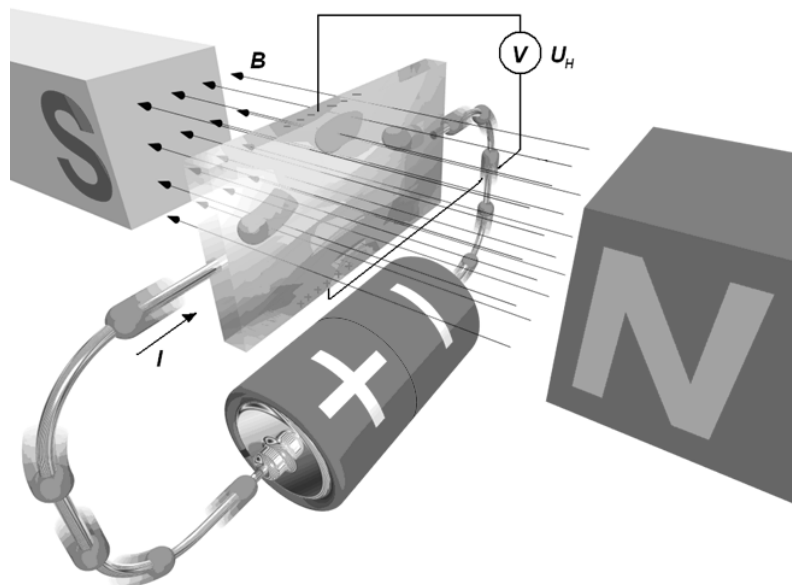
$$U_H = R_H \frac{I \cdot B_y}{d} \quad (5.1)$$

R_H = Hallova konstanta ($1 \text{ m}^3 \text{ A}^{-1} \text{ s}^{-1}$)

I = protékající elektrický proud (A)

B_y = magnetická indukce (T)

d = tloušťka předmětu vloženého do magnetického pole (mm)



Obr. 12. Princip Hallova jevu [13]

Magnetický tok v jádru senzoru je neustále udržován na nule. Množství proudu nutné k vyrovnání nulového toku je míra primárního proud protékající vodičem vynásobené pomě-

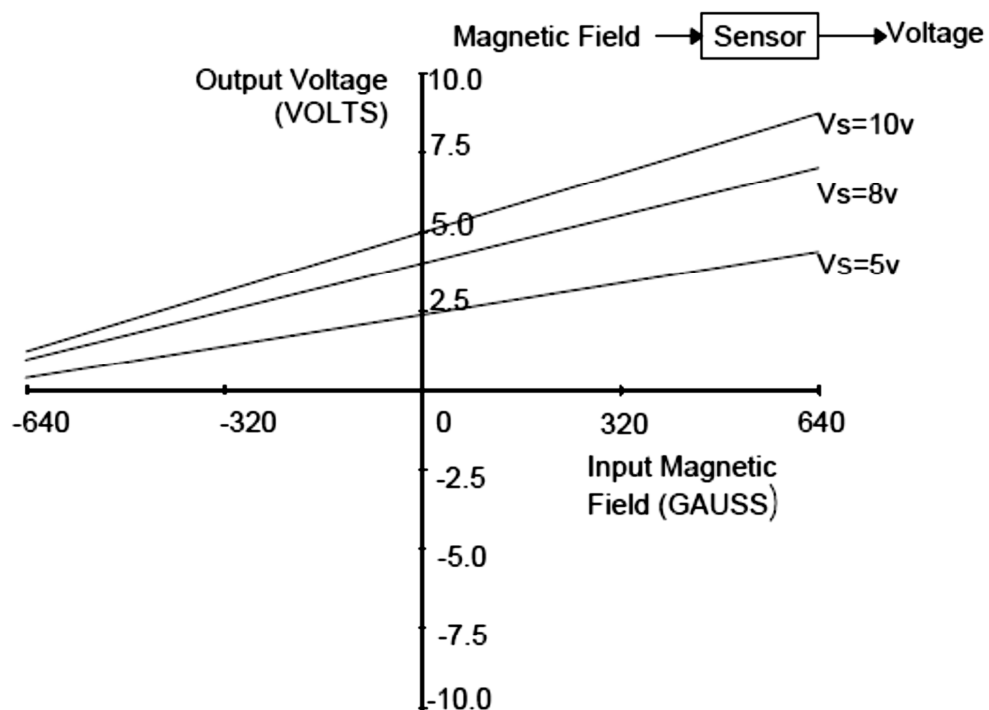
rem primárního na sekundární vinutí. Tato uzavřená smyčka proudu je výstup ze zařízení a představuje obraz primárního proudu snižený o počet sekundárních závitů. Tento proud může být vyjádřen jako napětí průchodem přes odpor. [13]

"Přenosová funkce zařízení popisuje jeho výstup pomocí vstupních veličin. Přenosová funkce může být vyjádřena rovnicí nebo grafem. Pro analogový Hallův senzor je přenosová funkce vyjádřena poměrem mezi vstupním magnetickým polem a výstupním napětím.

$$U_{out} = (6,25 \cdot 10^{-4} \cdot U_s) \cdot B + (0,5 \cdot U_s) \quad (5.2)$$

$$-64 \leq B \text{ (mT)} \leq +64 \quad (5.3)$$

Přenosová funkce je zde charakterizována citlivostí, offsetem v nule a měřicím rozsahem. Citlivost je definována jako odpovídající změna výstupu na danou změnu na vstupu. Směrnice přenosové funkce zobrazené (Obr. 13) odpovídá citlivosti senzoru. Hallovy senzory jsou citlivé také na změny teploty. Prvky signálové elektroniky mohou být integrovány dohromady v Hallově sondě, pro lepší kompenzaci těchto teplotních vlivů." [33]



Obr. 13. Analogový výstup z Hallovy sondy [13]

5.2.1 Zjednodušený výpočet Hallova napětí

Rovnovážná odchylka - rovnováha mezi Lorentzovou silou F_L , která odchylku vyvolává a elektrostatickou silou F_E , která nabitou částici táhne zpátky a je vyvolána příčným elektrickým polem E_{HALL} . Vzhledem k uspořádání měření jsou obě síly F_L a F_E v ose y. [15]

Rovnost je pro zjednodušení sestavena z absolutních hodnot:

$$F_L = F_e \Rightarrow q v_{Dx} B_z = q E_{HALL} \Rightarrow E_{HALL} = v_{Dx} B_z \quad (5.4)$$

$$E_{HALL} = \frac{U_{HALL}}{W} \Rightarrow U_{HALL} = E_{HALL} W = v_{Dx} B_z W \quad (5.5)$$

Elektronová hustota proudu:

$$j_n = env_{Dx} \Rightarrow I_n = j_n \cdot S = j_n W d = env_{Dxn} W d \Rightarrow v_{Dxn} = \frac{I_n}{enWd} \quad (5.6)$$

Děrová hustota proudu a děrový proud:

$$j_p = epv_{Dxp} \Rightarrow I_p = j_p \cdot S = j_p W d = epv_{Dxp} W d \Rightarrow v_{Dxp} = \frac{I_p}{epWd} \quad (5.7)$$

Hallovo napětí elektronů:

$$U_{HALL} = E_{HALL} W = v_{Dx} B_z W = \frac{I_n}{enWd} B_z W = \frac{I_n}{end} B_z \quad (5.8)$$

Hallovo napětí děr:

$$U_{HALL} = E_{HALL} W = v_{Dx} B_z W = \frac{I_p}{epWd} B_z W = \frac{I_p}{epd} B_z \quad (5.9)$$

Obě Hallova napětí U_{HALL} (pro elektrony a pro díry) jsou vzájemně opačně pólované, to vyplývá ze vzájemně opačné orientace příčného elektrického pole E_{HALL} . [15]

Samotný Ohmův zákon neumožňuje rozlišit typ volných nosičů náboje, teprve pomocí jevů (magnetické pole, teplota) při nichž se chování obou typů odlišuje, lze typ nosičů bezpečně určit. [16]

5.3 Základní parametry

Hallové sondy mohou pracovat v širokém rozsahu teplot (omezení je většinou v odolnosti pouzdra přívodu). Frekvenční limit je typicky 1Mhz, nejvíce se používají k měření stejnosměrných polí. Hlavní nevýhodou je teplotní závislost citlivosti (lze částečně kompenzovat), offset a jeho teplotní drift a šum. Výhodou je, že sondy neobsahují feromagnetikum, proto lze s nimi měřit i v těsné blízkosti feromagnetik.

Offset sond je způsoben nehomogenitou polovodičového materiálu, geometrickými chybami a mechanickým napětím materiálu. U dostupných sond dosahuje offset hodnot 2mT až 100mT a mění se s teplotou a časem. Potlačení offsetu lze dosáhnout přepínáním napěťových a proudových kontaktů v symetrické struktuře. [17]

Hallové sondy:

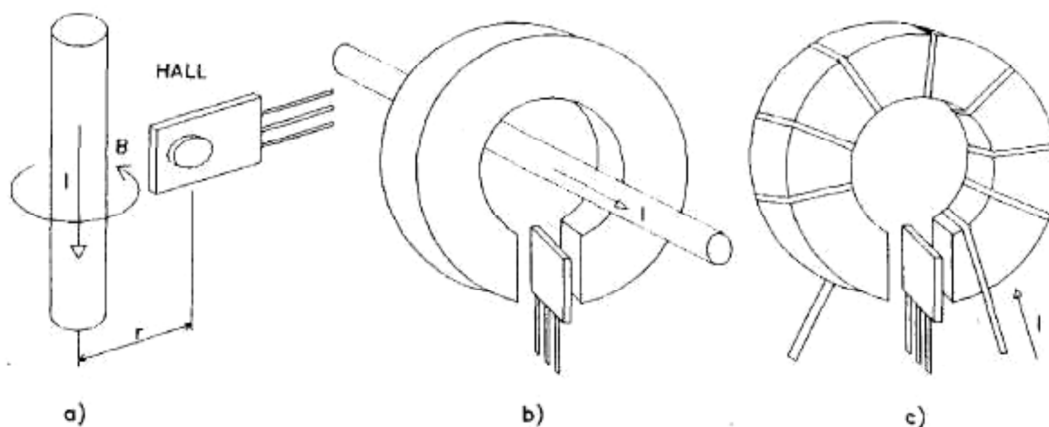
- vysoce stabilní
- dlouhá životnost
- vysoká rychlost – dynamika více než 100kHz
- široký teplotní rozsah
- žádné pohyblivé mechanické části
- vysoká výrobní reprodukovatelnost

5.4 Způsoby použití Hallova senzoru k měření proudu

Magnetická indukce B ve vzdálenosti r od vodiče, protékaného proudem I (Obr. 14a) :

$$B = \frac{\mu \cdot I}{2\pi r} \quad (5.10)$$

Jelikož velikost B závisí na vzdálenosti sondy r , užívá se pro měření proudů uspořádání na (Obr. 14b). Pro nízké proudy (pod 1A) je magnetická indukce přímého vodiče příliš nízká, a proto je nutné ji zvýšit navinutím několika závitů na měřicí jádro (Obr. 14c). Měření proudu pomocí Hallova senzoru (Obr. 14b) probíhá bez přerušování měřicího obvodu, což je velmi výhodné proti jinak běžnému způsobu měření proudu jako úbytku napětí na snímacím rezistoru. [18]

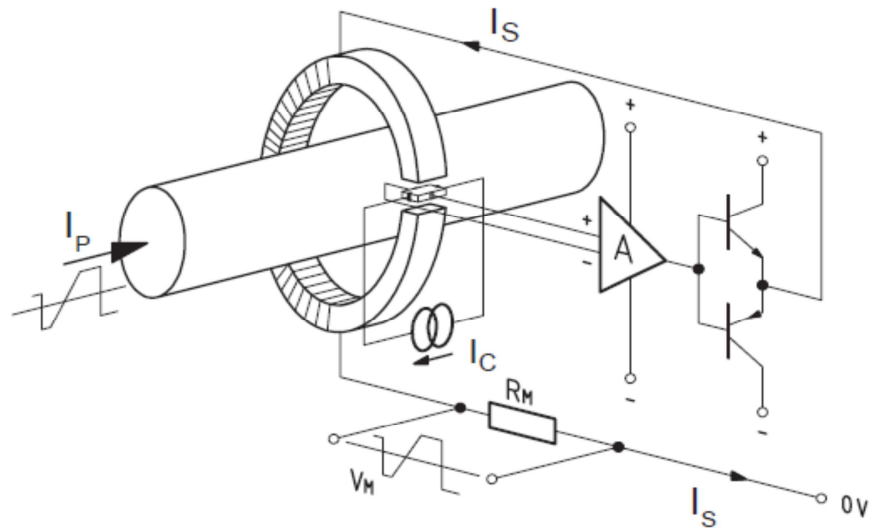


Obr. 14. Měření proudů pomocí Hallovy sondy [18]

5.4.1 Měření proudu uzavřenou smyčkou

Magnetický tok vytvářený primárním proudem je zcela vyrovnáván opačným magnetickým tokem vinutí kolem magnetického obvodu. Každá odchylka od nulového vyvážení vede k Hallovu napětí Hallova generátoru. 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. Při kmitočtech nad 3kHz a 5kHz působení elektroniky postupně slábne. 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 čidla zařízení měřící proud velmi přesně a velmi dynamicky. [19]

Sekundární vinutí generuje proud nezávislý na zatížení. Vložení vnějšího výkonového odporu umožňuje získat výstupní napětí širokého rozsahu. [19]



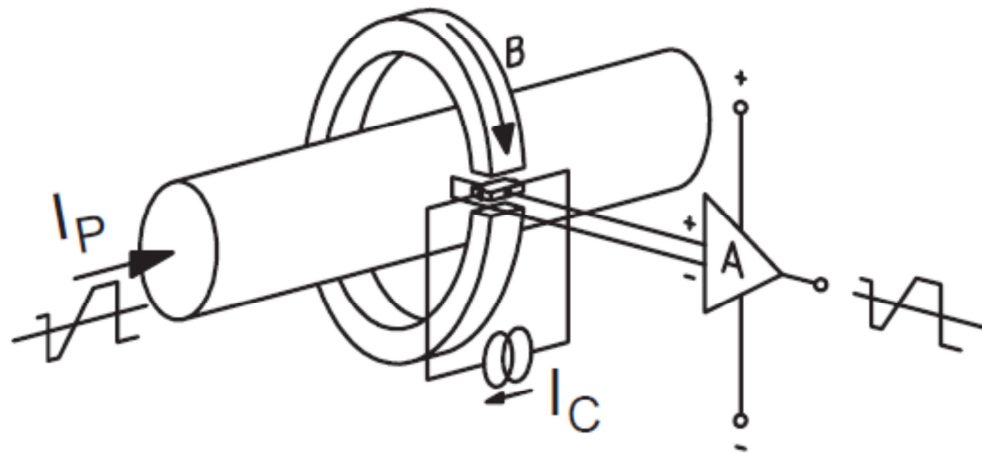
Obr. 15. Měření proudu Hallovou sondou v uzavřené smyčce [20]

Výhody uzavřené smyčky:

- vysoká přesnost,
- velká šířka pásma,
- velmi rychlá odezva,
- výborná linearita,
- vysoká přetížitelnost. [19]

5.4.2 Měření proudu s otevřenou smyčkou

Pro toto zapojení je důležité, aby Hallův generátor poskytoval lineární závislost mezi magnetickým tokem a Halloovým napětím. Obvod je složen z integrovaného Hallova generátoru a tří odporů na keramickém podkladu. Citlivost a teplotní kompenzace se seřizuje úpravou dvou z těchto odporů laserem. V čidle je integrován i regulátor napětí a teplotní kompenzovaný měřicí zesilovač. Výstupní napětí U_A proudového čidla je úměrné primárnímu proudu I_p Hallova generátoru. [20]



Obr. 16. Měření proudu Halloým senzorem v otevřené smyčce [20]

Výhody:

- nízká proudová spotřeba nezávislá na měřené hodnotě,
- velmi kompaktní konstrukce bez sekundárního vinutí,
- vysoká odolnost vůči přepětí zdroj. [19]

5.5 Možnosti použití

Jsou tři typické obory použití, měření proudu, elektrického výkonu a intenzity magnetického pole.

Pro měření magnetického pole se používá Hallova sonda, pracující na principu Hallova jevu. Zatímco Hall pracoval s tenkými kovovými foliemi a velkou koncentrací elektronů, dnešní Hallovy sondy obsahují plátek polovodiče s relativně malou koncentrací nosičů nábojů.

Při měření výkonu pracují Hallovy sondy jako elektrické násobičky. Přitom se využívá toho, že Hallovo napětí je úměrné součinu proudu a magnetické indukce B .

Měření proudu s Halloým generátorem se používá u klešťových ampérmetrů, kde můžeme měřit proud od 1mA až 1000A, u některých můžeme využít připojení k osciloskopu, kde můžeme zobrazit průběh signálu.

Hallové senzory našli své místo i v číslicové technice, jako snímací prvek polohy pohyblivých částí strojů, řízení otáček motorů, každá disketová mechanika obsahovala tři Hallové sondy, regulace otáček u ventilátorů a mnoho dalších použití.

Je velké množství výrobců Hallových senzorů, mezi přední výrobce patří Honeywell, LEM components nebo výrobce Hallových sond Allegro MicroSystems, LLC.



Obr. 17. Snímač proudu s Hallovým senzorem od společnosti Honeywell [19]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 VÝBĚR METODY MĚŘENÍ

Tradiční metody měření proudů pomocí bočníků nebo proudových transformátorů se vyznačují řadou nevýhod:

- ztráta výkonu v měřeném obvodu,
- ovlivňování měřeného obvodu,
- galvanické spojení vyžaduje zvláštní izolační zesilovač,
- omezená šířka frekvenčního pásma.

Bočníky = přímé měření úbytku napětí na snímacím rezistoru.

Proudové transformátory = nepřímé měření na snímacím rezistoru na sekundárním vinutí proudového transformátoru.

Senzory s Hallovou sondou = měření proudem generovaného magnetické pole Hallovým senzorem.

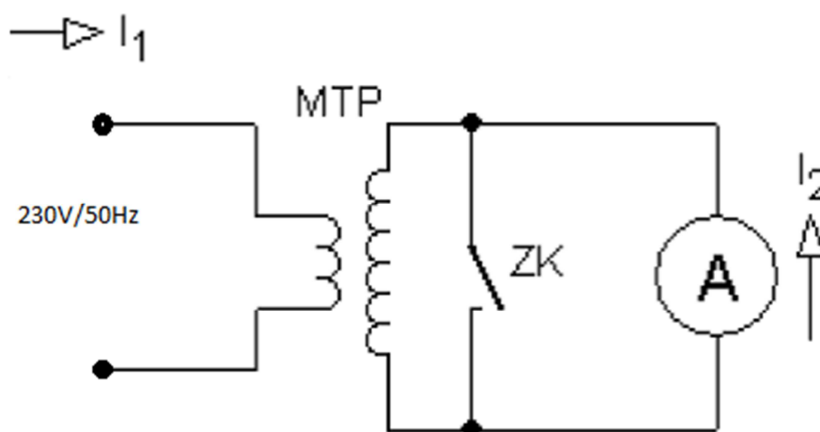
6.1 Měřicí transformátor proudu

Pro testování je vybrán měřicí transformátor série AS - 100 výrobce TALEMA, který má z řady AS nejmenší transformační poměr. Při průchodu proudem primárním vinutím je na sekundárním vinutí naměřena hodnota proudu, která je dána transformačním poměrem P_D uveden v (Tab. 1).

Tab. 1. Vybrané hodnoty AS - 100 [7]

AS – 100	
Poměr P_D prim. /sec.	1:50
$I_{sec.}$ max.	300mA
Pracovní teplota	40°C – 120°C

Při používání měřicího transformátoru proudu (MTP) je podmínka, že sekundární obvod nesmí nikdy zůstat nezapojen (např. zatížen měřicím přístrojem), proto je na Obr. 18) pod označením ZK zapojen zkratovací obvod, pro případ odpojení ampérmetru.



Obr. 18. Měření proudu měřicího transformátoru [36]

Transformační poměr P_D u tohoto transformátoru je 1:50. Tento údaj udává poměr proudu procházejícího primárním vinutím proti sekundárnímu vinutí, po dosazení naměřených hodnot do transformačního poměru (Tab. 2), je vypočtena hodnota proudu sekundárním vinutím. Při různých teplotách je nutné měnit hodnotu zakončovacího odporu, důležitou pro přesnost měření. Hodnota proudu I_1 , je efektivní hodnota proudu oběhového čerpadla naměřena multimetrem (Mastech MY68).

Tab. 2. Naměřené hodnoty proudu I_1 a I_2

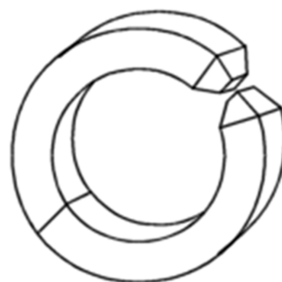
Proud I_1 (mA) primární vinutí	Proud I_2 (mA) sekundární vinutí $I_2 = \frac{I_1}{P_D}$
56mA	1,12mA
84mA	1,68mA
126mA	2,52mA

6.2 Měření Hallovými sondami

Při měření lze dosáhnout přesnosti 1% a je možné měřit proud do kmitočtu 25KHz. Měření jsou provedena na dvou vybraných Hallových sondách A1302 a ACS712. Při výběru je důležité najít takový senzor, který by pracoval s největší citlivostí při průchodu proudu vodičem od 50mA. Zapojení s otevřenou nebo uzavřenou smyčkou je možné použít pro měření jak střídavého, tak i stejnosměrného proudu. Hallova sonda A1302 je měřena v zapojení s otevřenou smyčkou.

6.2.1 Feritové jádro

Měření jsou prováděna s feritovým jádrem, určené pro kabel kruhového průřezu průměru 11,5mm. Jádro je dvoudílné a bylo upraveno broušením (Obr. 19), aby bylo možné do jádra vložit Hallův senzor. Zabroušením konců dosáhneme větší citlivosti magnetického pole na přechodu feritové jádro/Hallova sonda.

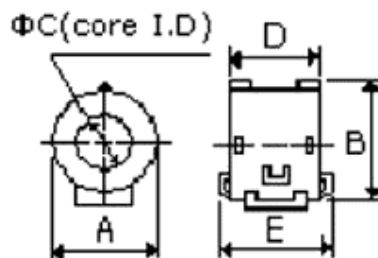


Obr. 19. Feritové jádro

Jádro je vyrobeno z feromagnetika Ni-Zn a materiál použitý na těleso je polyamid. Impedance při 25MHz je 35Ω a impedance při 100MHz je 100Ω . [27]

Tab. 3. Rozměry feritového jádra [27]

Rozměr A	Rozměr B	Rozměr C	Rozměr D	Rozměr E
28,0mm	32,0mm	11,5mm	18,0mm	24,0mm



Obr. 20. Technický popis feritového jádra [27]

6.2.2 Hallova sonda A1302

Hallova sonda A1302KUA-T (dále jen "A1302") je zapojena v otevřené smyčce, sonda je napájena z +9V baterie, je nutné stabilizovat na hodnotu +5V, vycházíme s tabulky (Tab. 4), kde je uvedené rozmezí napájení. Pokud je použit síťový napájecí zdroj, je nutné dokonalé odrušení síťového rušení z důvodu zkreslení měřeného signálu.

Tab. 4. Vybrané hodnoty Hallova senzoru A1302 [27]

	U _{cc}		Magnetická citlivost při T _A =25°C			I _{cc}	Linearita
	Min.	Max.	Min.	Typ.	Max.	Max.	
A1302	4,6V	6V	2mV/G	2,5mV/G	3mV/G	11mA	2,5%

Napájecí napětí Hallové sondy U_{CC} +5V, výstupní napětí U_{OUT} určíme:

$$U_{OUT} = \frac{U_{CC}}{2} = \frac{5}{2} = 2,5V \quad (6.1)$$

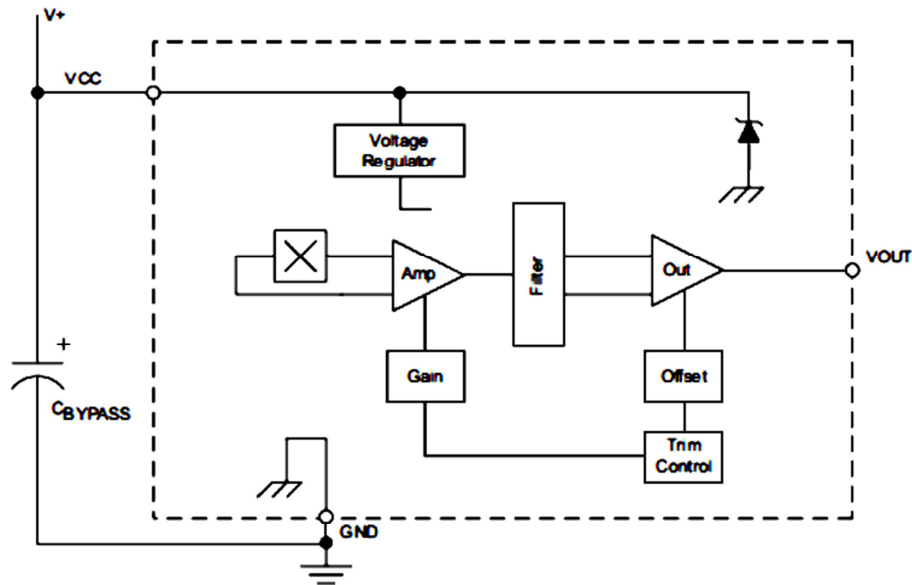
Velikost magnetické indukce, působící na Hallovu sondu určíme:

$$B_{max} = \frac{U_{Hmax}}{U_H} = \frac{2,5}{0,0025} = 1000mT \quad (6.2)$$

Výpočet ztrátového výkonu P_d, při teplotě T_A=25°C :

$$P_D = V_{CC} \cdot I_{CC} = 5 \cdot 3,6 \cdot 10^{-3} = 55mW \quad (6.3)$$

Z vnitřního zapojení senzoru (Obr. 21) je patrné, že obsahuje Hallův snímací prvek, lineární zesilovač CMOS, regulaci napětí, filtr rušivého signálu a rozdílový zesilovač. Integrace Hall snímacího prvku a zesilovače na jediném čipu minimalizuje mnoho problémů obvykle spojených s nízkým napětím analogového signálu.



Obr. 21. Blokové schéma Hallový sondy A1302 [22]

Podle doporučení výrobce je A1302 velmi vhodná pro průmyslové aplikace pracující v širokém rozsahu teplot (-40°C až 125°C). Vyrábí se ve dvou provedeních pouzder, SMD provedení LH (SOT23W) a s drátovými vývody UA (SIP). Provedení UA je určeno pro povrchovou montáž plošných spojů. [22]



Obr. 22. Zapojení pouzder LH a UA [22]

Tab. 5. Popis vývodů Hallovy sondy A1302 [22]

Název	Popis	Pouzdro LH	Pouzdro UA
V_{CC}	Napájecí napětí [V]	1	1
V_{out}	Výstupní napětí [V]	2	3
GND	GND	3	2

6.2.3 Hallova sonda ACS712ELCTR-05B-T

Jedná se o Hallův senzor, u kterého je měřený vodič připojen na piny obvodu a proud prochází přímo pouzdem senzoru. Izolace pinů 1-4 od pinů 5-8 měřeného obvodu je RSM = 2,1kV. Svorky vodivé cesty jsou galvanicky odděleny od vodičů senzoru (piny 5 až 8), to umožňuje, aby ACS712ELCTR-05B-T (dále jen "ACS712") proudový snímač byl použit v aplikacích, které vyžadují elektrickou izolaci bez použití optoizolačních prvků nebo jiných nákladných izolačních technik. [23]

Tab. 6. Vybrané hodnot ACS712 [23]

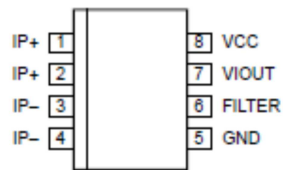
	Ucc		Magnetická citlivost			Icc
	Min.	Max.	Min.	Typ.	Max.	Max.
ACS712	4,5V	5,5V	178mV/A	Neuvedeno	193mV/A	11mA

Přes vývody 1-4 je možné měřit stejnosměrný i střídavý proud. Při měření stejnosměrného proudu je nutné dodržet polarizaci na vývodech 1-2 a 3-4. Vzhledem k tomu, že měřený proud prochází Hallovým senzorem, je citlivost na magnetické pole největší v porovnání s Hallovým senzorem A1302. Je uváděno, že optimální použití je pro proud kolem 5A, z dokumentace výrobce vyplývá, že pro hodnotu 5A odpovídá citlivost 185mV. Výstup z

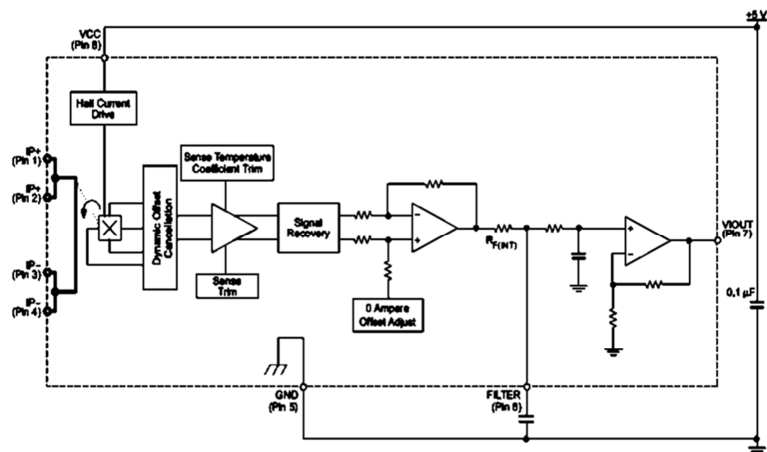
Hallový sondy je citlivý na teplotu, proto by při náhlých změnách teploty mohlo dojít k nežádoucímu ovlivnění výsledných hodnot. [23]

Tab. 7. Popis vývodů Hallové sondy ACS712 [23]

Svorky	Označení	Popis vývodů ACS712
1 a 2	+IP	Vývody pro připojení měřeného vodiče
3 a 4	-IP	Vývody pro připojení měřeného vodiče
5	GND	Vývod země
6	Filter	Vývod pro externí kondenzátor, který stanoví šířku pásma
7	VIout	Výstup analogového signálu
8	Vcc	Napájení



Obr. 23. Popis vývodů ACS712 [22]



Obr. 24. Blokové schéma ACS712 [22]

6.3 Popis měření s Hallovyými senzory A1302 a ACS712

Měření Hallovyých sond probíhalo na čerpadle Grundfos UPS 25-40, toto čerpadlo má tři rychlosti čerpání, pro účely měření jsou označeny R_{C1} , R_{C2} , R_{C3} . U každé z těchto rychlostí bylo provedeno měření odběru proudu multimetrem (Mastech MY68) a zapsány do tabulky (Tab. 8). Průběhy napětí na výstupech z Hallovyých sond byly měřeny osciloskopem (OWON MSO8102T) a jsou zobrazeny v PŘÍLOZE P1. Velikost U_{RC} odpovídá hodnotě zobrazené na osciloskopu "CYC RMS", jedná se o střední hodnotu. Měření probíhala při teplotě 21°C. Hallovy sondy jsou napájené z baterie 9V, napětí je stabilizováno na 5V, není potřebný žádný filtr k potlačení rušivých signálů.

Tab. 8. Porovnání naměřených hodnot Hallovyých senzorů A1302, ACS712

	Hallův senzor A1302				Hallův senzor ACS712			
	R_{C0}	R_{C1}	R_{C2}	R_{C3}	R_{C0}	R_{C1}	R_{C2}	R_{C3}
I_{RC}	0	56mA	84mA	126mA	0	56mA	84mA	126mA
U_{RC}	0,88mV	1,20mV	1,79mV	4,2mV	7,64mV	19,84mV	26mV	32mV

R_{C0} odpovídá stavu, kdy je čerpadlo vypnuto, I_{RC} proud procházejí přívodními vodiči k čerpadlu (jedná se o efektivní hodnotu), U_{RC} je napětí na výstupu Hallova senzoru.



Obr. 25. Čerpadlo Grundfos UPS 25-40

7 NÁVRH OBVODU

V této kapitole je popsán stabilizovaný zdroj pro napájení celého obvodu, následuje popis navrženého obvodu, funkce zapojeného obvodu jsou rozděleny do čtyř základních částí:

- Senzor proudu
- Dolní propust
- Zesílení signálu
- Spínací část

7.1 Popis zapojení stabilizátoru

Při použití zdroje napájeného ze sítě 230V, dochází k rušení, proto je v zapojení použito dolní propusti, která potlačí vysoké kmitočty. Při napájení z baterie se rušení podstatně eliminuje, bohužel po určité době klesá napětí baterie a to může ovlivnit správnou funkci zapojení (baterie přestane dodávat proud). V zapojení je použit stabilizátor napětí na 5V (78L05), jedná se o součástku, která stabilizuje vstupní napájecí napětí na požadovanou hodnotu 5V, při změně zatěžovacího proudu se napětí nemění. Správnou funkci stabilizátoru zajišťují vnitřní součástky stabilizátoru. Jednou z podmínek je, aby vstupní napětí bylo větší než výstupní stabilizované.

Na vstupu stabilizátoru proti zemi je připojen kondenzátor CZ1, který filtruje kladné půlvlny. Na výstupu je zapojen kondenzátor CZ2, který v případě rychlé změny zatěžovacího proudu, vybíjí a uvolňuje energii. Než na tuto změnu zareaguje zdroj, kondenzátory se vybíjí a částečně kompenzují krátké snížení napětí. Kondenzátor CZ3 je druhý blokovací kondenzátor. Kondenzátor CZ4 slouží pro jemnou filtraci napětí, pro správnou funkci stabilizátoru však není nutný, ale napětí na výstupu je pak lépe vyhlazené. [29]

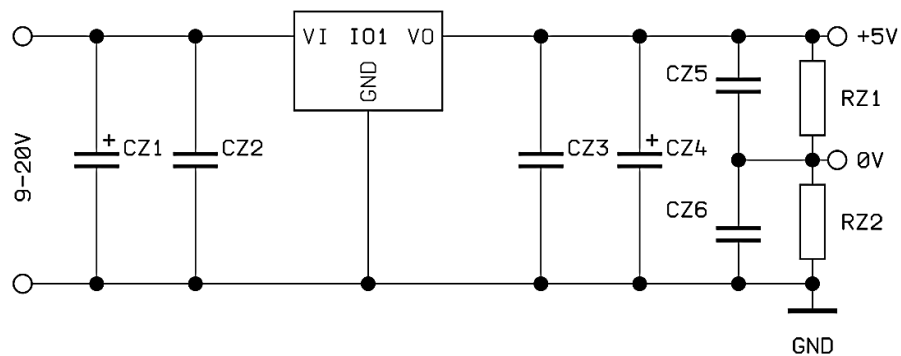
Hodnoty kondenzátoru CZ3 = 100nF a CZ4 = 10 μ F/16V jsou doporučeny výrobcem. Základem zapojení je integrovaný obvod 78L05, první dvojčíslí určuje polaritu stabilizovaného napětí (78 - kladné), třetí hodnota určuje velikost proudu, který může procházet stabilizátorem (L = 100mA), poslední číslo určuje hodnotu výstupního stabilizovaného napětí (5V = 05). [24]

Tab. 9. Základní parametry stabilizátoru 78L05

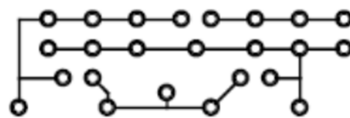
Parametr 78L05	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Jednotka	Teplota
Vstupní napětí	V_{in}			35	V	$T_j = 25^\circ\text{C}$
Výstupní napětí	V_{out}	4,8	5,0	5,2	V	$T_j = 25^\circ\text{C}$
Ztrátový výkon	P_{tot}			800	mW	$T_j = 25^\circ\text{C}$
Výstupní proud	I_{out}			150	mA	$T_j = 25^\circ\text{C}$



Obr. 26. Zapojení vývodů, pouzdro
T092, 1. výstup, 2. zem, 3. vstup [24]



Obr. 27. Zapojení symetrického zdroje a referenčního děliče [24]



Obr. 28. Obráz plošného
spoje zdroje

7.2 Zdroj stabilizovaného napětí pro operační zesilovač

Protože je obvod napájen nesymetricky, je nutné použít napět'ového děliče U_{ref} .

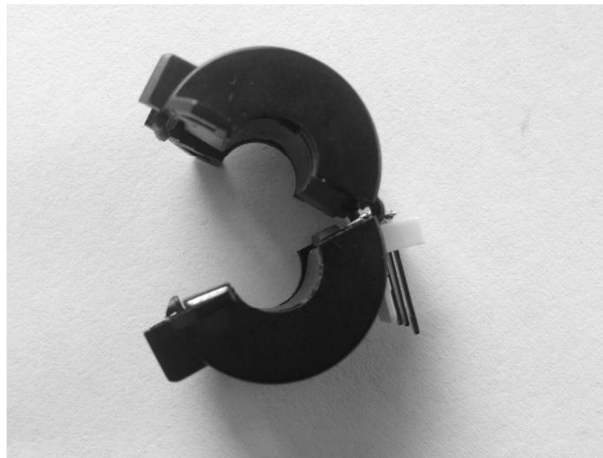
Referenční dělič (Obr. 27) U_{ref} :

$$U_{ref} = U_{CC} \cdot \frac{RZ_1}{RZ_1 + RZ_2} = 5 \cdot \frac{47000}{47000 + 47000} = 2,5V \quad \text{za podmínky } I_p = 0 \quad (7.1)$$

Operační zesilovač je napájen $+2,5/-2,5V$, za pomoci děliče je vytvořena referenční zem.

7.3 Popis zapojení

První část je tvořena snímacím prvkem, jako základ zapojení je použita Hallova sonda A1302. Výstup (vývod č. 2) je zapojen do série s kondenzátor C3, který oddělí stejnosměrnou složku a propustí pouze žádanou střídavou hodnotu.



Obr. 29. Hallova sonda A1302 ve feritovém jádru

Druhá část obvodu funguje jako dolní propust, zde dochází k odfiltrování rušivých signálů, které zkreslují výsledný signál na výstupu z Hallovy sondy. Tato aktivní struktura (Obr. 30) obsahuje neinvertující zesilovač, který je možné realizovat pomocí operačního zesilovače s napět'ovou zpětnou vazbou – VFA a operační zesilovač s proudovou zpětnou vazbou – CFA. Použití operačního zesilovače se zpětnou vazbou je omezeno tím, že nelze zapojit kapacitor do zpětné vazby – z jeho výstupu přímo na invertující vstup. Výběr

vhodného testovacího obvodu je tak omezen. Pro realizaci aktivní dolní propusti 2. řádu je sice vhodnější struktura s vícenásobnou zpětnou vazbou (MFB – multiple feedback) díky menším citlivostem. Nelze ji však použít právě kvůli uvedenému omezení pro aplikaci CFA. [25] V zapojení je použit nízkopříkonový JFET operační zesilovač TL071.

Tab. 10. Vybrané parametry OZ TL071 [31]

TL071	Napájení	Strmost	U_{in} ofset	Počet obvodů	Pouzdro	P_{TOT}
	+/- 18V	16V/ μ s	3000 μ V	1	DIP8	680mW

Při nízkých frekvencích působí C1 a C2 jako otevřené okruhy a signál je přiveden na vstup operačního zesilovače a potom zesílen. Rezistory R3 a R4 jsou vybrány tak, aby vznikl požadovaný zisk. Při vysokých frekvencích působí C1 a C2 jako zkrat a signál je potlačen. [26]

Z rovnice (7.2) vypočteme činitel jakosti Q_0 , který ukazuje stabilitu kmitočtového filtru.

$$Q_0 = \frac{1}{\sqrt{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2} \left(\frac{1}{C_1 \cdot R_1} - \frac{R_4}{C_1 \cdot R_1 \cdot R_3} + \frac{1}{C_1 \cdot R_2} \right)} = \frac{1}{\sqrt{1,5 \cdot 10^{-9} \cdot 15 \cdot 10^{-9} \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 10^6} \left(\frac{1}{1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 22 \cdot 10^3} - \frac{270 \cdot 10^3}{1,5 \cdot 10^{-9} \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 120 \cdot 10^3} + \frac{1}{1,5 \cdot 10^{-9} \cdot 1,6 \cdot 10^6} \right)} = 0,5264 \quad (7.2)$$

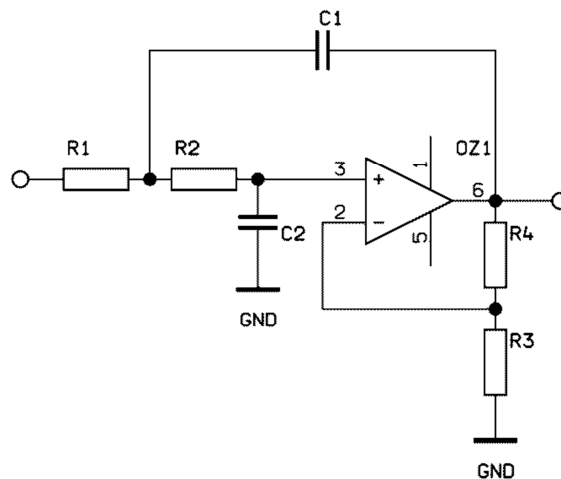
Stanovení mezního kmitočtu na hodnotu $f_0 = 200\text{Hz}$, je ověřeno výpočtem, že vypočítaná hodnota odpovídá stanovené:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{22 \cdot 10^3 \cdot 15 \cdot 10^{-9} \cdot 1,6 \cdot 10^6 \cdot 1,5 \cdot 10^{-9}}} = 178,8371\text{Hz} \quad (7.3)$$

Získaná hodnota mezního kmitočtu $f_0 = 178,8371\text{Hz}$. Dolní propust propustí všechny kmitočty do vypočtené hodnoty, podle rovnice (7.3), ostatní frekvence budou potlačeny.

Výpočet zesílení (Obr. 30) neinvertujícího operačního zesilovače OZ1:

$$G = \frac{R_3 + R_4}{R_3} = \frac{120 \cdot 10^3 + 270 \cdot 10^3}{270 \cdot 10^3} = 3,25 \text{ dB} \quad (7.4)$$



Obr. 30. Schéma zapojení aktivní dolní propusti Sallen-Key [26]

Třetí část obvodu je zapojení invertujícího operačního zesilovače. Zesílení zesilovače udává poměr zpětnovazebního rezistoru a předřadného rezistoru. Čím větší je zpětnovazební rezistor, tím větší musí být napětí na vstupu OZ, aby na invertujícím vstupu vyrobil stejný kompenzační proud. Rezistory R3 a R4 (Obr. 30) stanovují zesílení a zároveň velikost přenosu celého filtru a Q (činitel jakosti). [27]

Napájení operačních zesilovačů je $\pm 2,5\text{V}$, proto je max. zesílení vstupního napětí rovno napájecímu napětí, při větším zesílení dochází k přebuzení operačního zesilovače. V zapojení je použit operační zesilovač UA741 (OZ2). Operační zesilovač OZ2, je zapojený jako invertující, objeví se na jeho výstupu záporné napětí (proti GND), je-li na jeho vstupu kladné (otáčí fázi signálu o 180°).

Zesílení zesilovače OZ2:

$$G = -\frac{R_6}{R_5} = \frac{4,7 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^3} = 470 \text{ dB} \quad (7.5)$$

Výpočet velikosti výstupního signálu operačního zesilovače OZ2 podle (Tab. 8):

$$U_{out} = \frac{R_6}{R_5} \cdot U_{RC1} = \frac{4,7 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^3} \cdot 0,0012 = 0,5640V \quad (7.6)$$

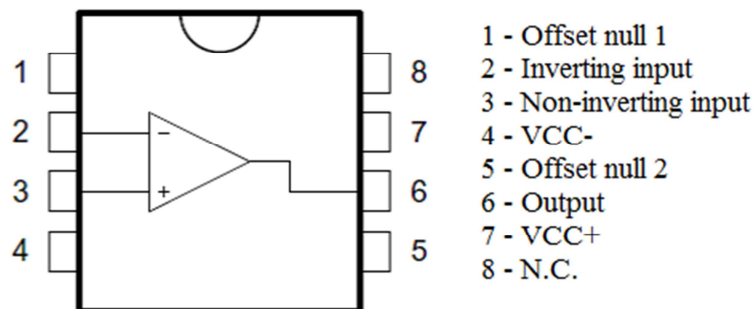
$$U_{out} = \frac{R_6}{R_5} \cdot U_{RC2} = \frac{4,7 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^3} \cdot 0,00179 = 0,8413V \quad (7.7)$$

$$U_{out} = \frac{R_6}{R_5} \cdot U_{RC3} = \frac{4,7 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^3} \cdot 0,0042 = 1,9740V \quad (7.8)$$

Vzhledem k velkému zesílení OZ2 ($G = 470$), výpočet z rovnice (7.5), musí být umístěny v různých pouzdrech, aby nedocházelo samovolnému rozkmitání obvodu. Pro zapojení jsou použity dva typy operačních zesilovačů bipolární univerzální operační zesilovač UA741C, který plně vyhovuje pro kmitočtový rozsah 10Hz až 200Hz a nízkopříkonový TL071.

Tab. 11. Vybrané parametry OZ2 UA741C [28]

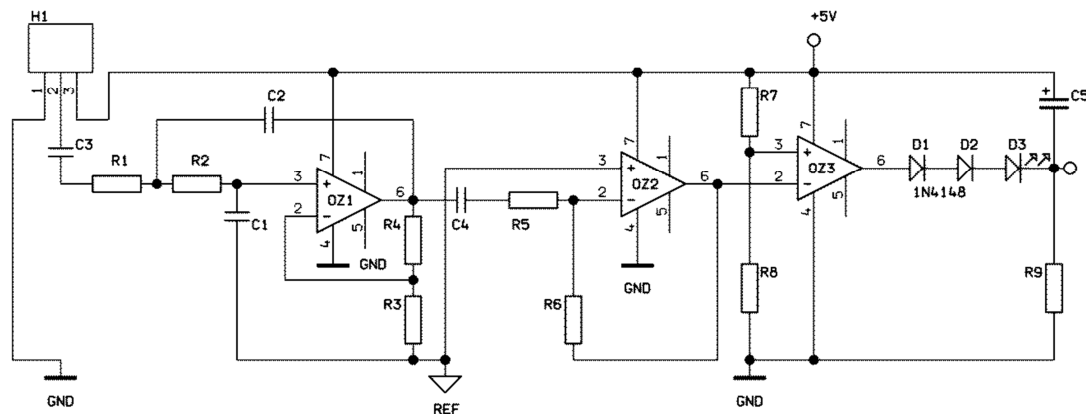
UA	Napájení	Strmost	U_{in} offset	Mezní kmitočet	Pouzdro	P_{TOT}
741C	+/- 18(36)V	0,5V/ μs	2000 μV	1,5Mhz	DIP8	500mW



Obr. 31. Zapojení vývodů TL071 a UA741 [28]

Vývody 1 a 5 slouží k nastavení offsetu (nulové napětí na výstupu OZ), u UA741 lze upravit trimrem napětí na výstupu v rozmezí 1mV a u TL071 je to 3mV.

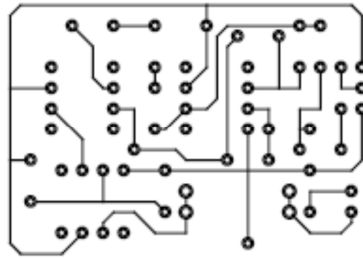
Čtvrtá část obvodu tvoří Schmittův klopný obvod (komparátor s hysterezí), který upraví průběh střídavého signálu na signál obdélníkový. Obvod má dva stabilní stavy, které se skokem mění při průchodu vstupního signálu nastavenou napěťovou úrovní. Tak je získán z analogového signálu, signál logický. [29] Hystereze obvodu je nastavena na 0,58V – 1,5V. LED dioda indikuje stav obvodu a rezistor R9 omezí proud procházející diodou.



Obr. 32. Navržený obvod

Parametry navrženého obvodu:

- Napájecí napětí (stejnoseměrné napájení) +9V až +20V
- Odběr (klid, LED nesvítí) 9,86mA
- Odběr (při indikaci průchodu proudem) 11,52mA
- Velikost (výška x šířka x délka) 30mm x 96mm x 47mm



Obr. 33. Obraz plošného spoje

7.4 Postup výroby desky plošného spoje

Vytvořené schéma a návrh plošného spoje byly navrženy v programu Formica 4.40 Schematic. Kreslení obvodu probíhalo na jednostrannou desku (kuprexit) a bylo kresleno perem s hrotem o průměru 0,3mm, následovala leptání plošného spoje za pomoci leptacím roztokem na plošné spoje (Elchemo). Otvory pro součástky byly vrtány vrtákem o průměru 0,6mm a 1mm. Osazování součástek obvodu probíhalo pájením, protože zapojení bylo připravováno na nepájivém kontaktním poli, po osazení součástek vše fungovalo na první zapojení.



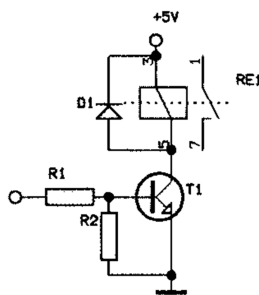
Obr. 34. Prototyp výrobku

8 MOŽNOSTI VYUŽITÍ PŘIPRAVENÉHO ZAŘÍZENÍ V BUDOUCÍCH APLIKACÍCH

Navržený obvod slouží pro indikaci změny proudu od 40mA až po několik ampér, vhodnými úpravou je i možno měřit větší proudy, naopak pro menší proudy je lepší zvolit bočník. Jako další vhodná úprava pro měření menších proudů, se nabízí výměna Hallova senzoru A1302 za senzor ACS712. Při této úpravě je nutné rozpojit při měření 230V pracovní vodič. Pracovní vodič připojíme na vývody ACS712. Touto úpravou se zvýší citlivost na procházející proud, protože prochází přímo pouzdrem Hallova senzoru. Při manipulaci je nutné odpojit obvod od síťového napětí 230V.

Obvod byl testován na topném systému, kde byly měřeny čerpadla Grundfos UPS 25-40 (Obr. 25). Tyto čerpadla mají tři stupně rychlosti čerpání vody a tím je dána i spotřeba těchto čerpadel – výrobce udávána (80 - 120 - 180mA). Při konstrukci topných systémů, do kterých je zapojena krbová vložka s teplovodním výměníkem, je nutné věnovat pozornost oběhovému čerpadlu, neboť je potřebné zamezit přehřátí krbové vložky. Funkce čerpadla je zajištěna proti výpadku elektrického napětí 230V záložním zdrojem, ale nikoliv proti mechanickému poškození, či poškození elektroniky čerpadla. Pokud dojde k některé z těchto uvedených poruch při běhu čerpadla, dochází k přehřívání topného média, jehož teplota značně stoupne, a v činnosti se uvedou přetlakové ventily. Toto riziko je tedy možné eliminovat použitím zapojení, které je navrženo v této bakalářské práci. Nabízí se možnost tento obvod zapojit do systému PZS, kde by byl zapojen do hlídací zóny. Pro připojení k PZS, je nutné upravit výstupní signál z OZ3:

- Připojením tranzistoru zapojeného jako spínač (Obr. 35)
- Připojení přes optočlen s tranzistorem



Obr. 35. Zapojení tranzistoru jako spínače [30]

ZÁVĚR

Při porovnání možnosti použití Hallova senzoru a proudového měřicího transformátoru, byla vybrána metoda s Hallovým senzorem. Proudový měřicí transformátor je vhodnější pro použití u měření větších proudů a to od jednotek ampér až po stovky ampér.

Pro správnou funkci Hallova senzoru A1302 a zvýšení citlivosti měření, je senzor vložen do feritového jádra. Feritové jádro je v místě vložení senzoru zabroušené (Obr. 19) podle velikosti pouzdra senzoru, tak aby magnetické pole procházelo přímo přes pouzdro senzoru, a touto úpravou je dosaženo větší citlivosti a na výstupu senzoru je měřitelné napětí od 1,20mV do 4,2mV (Tab. 8).

Záměrem při konstrukci obvodu není měřit proudy a stanovit chyby měření, ale indikovat okamžik, kdy dochází ke změně velikosti proudu procházejícím vodičem. Jedná se o dva stavy signalizující zapnuto (oběhové čerpadlo je funkční) nebo vypnuto (oběhové čerpadlo z nějakého důvodu nefunguje), v případě spuštění čerpadla svítí LED dioda. Obvod indikuje změny proudu. Veškerá testování probíhala pouze s měřením střídavého proudu. Citlivost obvodu, je nastavena na měření proudu od 40mA. Jedná se o efektivní hodnotu naměřenou multimetrem, neboť měření probíhala na čerpadle Grundfos UPS 25-40 a nejmenší naměřená efektivní hodnota proudu byla 54mA.

Konstrukce obvodu je rozdělena do čtyř základních celků: Hallův senzor, dolní propust, zesílení, indikace stavu. Návrh plošného spoje respektuje směr postupu signálu od Hallova senzoru ke konečné indikaci. Návrh vychází se stejných principů jako např. konstrukce nízkofrekvenčních zesilovačů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] CEZ.CZ. Kolem elektrického proudu [online]. 2003 [cit. 2014-04-21]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/zaj4.htm>
- [2] CEZ.CZ. Střídavý proud [online]. 2003 [cit. 2014-04-21]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/3-2.htm>
- [3] JJOHNYK.SWEB.CZ. Měření magnetoelektrickými přístroji [online]. [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://jjohnyk.sweb.cz/elektrotechnika/18.htm>
- [4] R. j. Hora Oldřich, Měření elektrických a magnetických veličin v automatizaci, Praha1: SNTL, 1970.
- [5] Hw.cz. HW SERVER S.R.O. Přesné a cenově výhodné měření střídavého proudu [online]. Rastislav Talarovic. 2012 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/soucastky/analogove-systemy/presne-a-cenove-vyhodne-mereni-stridaveho-proudu.html>
- [6] ELECTRONICS AND ELECTRICAL ENGINEERING: The Current Transformer Parameters Investigation and Simulations. 2010. ISSN 1392 – 1215. Dostupné z: http://www.ktu.edu/lt/mokslas/zurnalai/elektros_z/z100/07__ISSN_1392-1215_The%20Current%20Transformer%20Parameters%20Investigation%20and%20Simulations.pdf
- [7] NUVOTEM TALEMA, Units W & X. AC Series Current Transformer Quick Reference Guide [online]. [cit. 2014-02-18]. Dostupné <http://www.talema-nuvotem.com/en/products/pdf/AC%20QRG%20Jun-06.pdf>
- [8] Hw.cz. HW SERVER S.R.O. Přesné měření střídavých proudů s převodníky sigma delta [online]. Rastislav Talarovic. 2012 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/soucastky/analogove-systemy/presne-a-cenove-vyhodne-mereni-stridaveho-proudu.html>
- [9] POWER ELECTRONIC MEASUREMENTS LTD. 2013. What is a Rogowski Coil? [online]. [cit. 2014-02-17]. Dostupné z: <http://www.pemuk.com/how-it-works.aspx>
- [10] ROCOIL ROGOWSKI COILS LIMITED. How Do Rogowski Coils Work? [online]. [cit. 2014-02-17]. Dostupné z: <http://homepage.ntlworld.com/rocoil/principle.htm>

- [11] FYZMATIK. Hallův jev [online]. 2014. vyd. [cit. 2014-02-20]. Dostupné z: <http://fyzmatik.pise.cz/401-halluv-jev.html>
- [12] HAASZ, Vladimír. Elektrická měření: přístroje a metody. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005, 337 s. ISBN 80-010-2731-7
- [13] ŠTEIGL, Roman. Hallův jev v kovu a polovodiči [online]. 2002 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: www.vernier.cz/experimenty/pazdera/7.14/7.14_halluv_jev__pracovni_listy.doc
- [14] MESSERSCHMIDT, Leopold. Die Hettiter. Leipzig: J.C. Hinrichs'sche Buch-handlung, 1902. ISSN 2250-3153.
- [15] ŠTEIGL, Roman. 17 Hallův jev. Hallův jev v kovu a polovodiči [online]. 2002 [cit. 2014-03-04]. Dostupné z: <http://ozeas.sdb.cz/panska/2A/kazi/17%20%20Hall%F9v%20jev.doc>
- [16] PUNČOCHÁŘ, Josef. Operační zesilovače v elektronice. 4., dopl. vyd. Praha: BEN, 1999, 494 s. ISBN 80-860-5637-6.
- [17] DRAXLER, Karel, Petr KAŠPAR a Pavel RIPKA. Magnetické prvky a měření. Vyd. 2. Praha: ČVUT, Elektrotechnická fakulta, 1999, 276 s. ISBN 80-010-1909-8.
- [18] MICRO.FELD.CVUT.CZ. 9. Snímání polohy a otáček pomocí Hallova senzoru [online]. [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34SES/cviceni/Navody%20na%20cviceni/05.Hall.pdf>
- [19] HONEYWELL INTERNATIONAL INC. Snímače elektrického proudu s Hallovou sondou [online]. 2014. vyd. [cit. 2014-03-19]. Dostupné z: <http://honeywell.sk/?com=documents&id=91>
- [20] LEM COMPONENTS. Isolated currentIs and voltage transducers [online]. 2014. vyd. [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: http://www.lem.com/images/stories/files/Products/1-3_applications/CH24101.pdf
- [21] NUVOTEM TALEMA, Units W & X. AC Series • Current Transformer Quick Reference Guide [online]. [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.talemanuvo-tem.com/en/products/pdf/AC%20QRG%20Jun-06.pdf>

- [22] ALLEGRO MICROSYSTEMS, LLC. A1301-2-Datasheet.pdf: Continuous-Time Ratiometric Linear Hall Effect Sensor ICs [online]. [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/A1301-2-Datasheet.ashx>
- [23] ALLEGRO MICROSYSTEMS, LLC. ACS712 [online]. 2013 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/ACS712-Datasheet.ashx>
- [24] SEMTECH ELECTRONICS LTD. *ST 78L05* [online]. 2006 [cit. 2014-03-22]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/330/121/78l05-semt-datasheet-1.pdf>
- [25] ING. VOCHYÁN, Josef. Porovnání vlastností aktivní dolní propusti s VFA a s CFA. [online]. 13.12.2004 [cit. 2014-03-22]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/04063/index.html>
- [26] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2009, 271 s. ISBN 978-80-7300-240-4.
- [27] BASIC ELECTRONICS TUTORIALS. Active Low Pass Filter [online]. 9.5.2014 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: http://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_5.html
- [28] STMICROELECTRONICS. *UA741: General-purpose single operational amplifier* [online]. 2009 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00001252.pdf>
- [29] DIEDRICH, Kurt. *Elektronika tajemství zbavená: objevovat, experimentovat, porozumět*. 1. čes. vyd. Překlad Miroslav Hrdina. Ostrava: HEL, 2004, 207 s. ISBN 80-861-6724-0.
- [30] FROHN, M. *Elektronika: polovodičové součástky a základní zapojení*. 1. české vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 479 s. ISBN 80-730-0123-3.
- [31] STMICROELECTRONICS. *TL071: LOW NOISE J-FET SINGLE OPERATIONAL AMPLIFIERS* [online]. 2001 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/stmicroelectronics/2296.pdf>
- [32] KOJOVIC, Ljubomir a Martin BISHOP. COOPER POWER SYSTEMS. Differential protection Rogowsky coil [online]. 2007 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: http://www.pacw.org/fileadmin/doc/AutumnIssue07/prot_rogowski_autumn07.pdf

- [33] MIKOLANDA, Tomáš a Aleš RICHTER. Hallův jev, Hallovy senzory a jejich aplikace. Vyd. 1. V Liberci: Technická univerzita, 2006, s. 7-30. ISBN 80-7372-131
- [34] DOLEČEK, Jaroslav. DOLEČEK. Moderní učebnice elektroniky. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 206 s. ISBN 80-730-0161-6.
- [35] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. 1. české vyd., 2. dotisk. Překlad Jan Obdržálek, Bohumila Lencová, Petr Dub. V Brně: Prometheus, 2006, 1034-1198, [30]. ISBN 80-214-1868-0.
- [36] MALINA, Václav. Poznáváme elektroniku. 1. vyd. České Budějovice: KOPP, c1997. ISBN 80-858-2887-1.
- [37] GRUNDFOS S.R.O. *TECHNICKÝ KATALOG GRUNDFOS: Série 100* [online]. 2008. vyd. 2008 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.gcpartner.cz/files/143936/Technick%C3%BD%20katalog.pdf>

Seznam použitých symbolů a zkratk

Φ	Magnetický tok	(Wb)
A	Plocha z feromagnetického jádra transformátoru	(m^2)
As	Arsen	
\vec{B}_Y	Magnetická indukce	(T)
CFA	Proudová zpětná vazba	
CR	Citlivost snímače	($V \cdot A^{-1}$)
d	Tloušťka předmětu vloženého do magnetického pole	(m)
E	Napětí cívky integrátoru	(V)
E_{HALL}	Intenzita elektrického pole	($V \cdot m^{-1}$)
f	Frekvence	(Hz)
f_H	Vysokofrekvenční pásmo Rogowského cívky	(Hz)
f_L	Nízkofrekvenční pásmo Rogowského cívky	(Hz)
F_L	Lorentzova síla	(N)
G	Zesílení	(dB)
F_E	Elektrostatická síla	($A \cdot m^{-1}$)
\vec{H}	Intenzita magnetického pole	($A \cdot m^{-1}$)
H_C	Citlivost cívky	($V_s \cdot A^{-1}$)
I	Proud	(A)
L_b	Indukčnost zátěže	(H)
I_{RC}	Proud procházející měřeným obvodem	(A)
I_m	Proud měřicím přístrojem	(A)
In	Indium	

I_p	Proud primárním vodičem	(A)
I_s	Proud potřebný ke kompenzaci magnetického pole	(A)
\vec{M}	Vzájemná indukčnost cívky	(H)
MFB	Vícenásobná zpětná vazba	
MTP	Měřicí transformátor proudu	
N	Počet závitů transformátoru	
Ni	Nikl	
OZ	Operační zesilovač	
P_D	Transformační poměr	
P_{TOT}	Energetické ztráty	(W)
PZS	Poplachové a zabezpečovací systémy	
R_b	Odpor bočnicku	(Ω)
$R_{C0}, R_{C1}, R_{C2}, R_{C3}$	Rychlosti oběhového čerpadla	
R_m	Odpor měřicího přístroje	(Ω)
R_H	Hallova konstanta	($m^3 \cdot A^{-1} \cdot s^{-1}$)
RMS	Efektivní hodnota	
Sb	Antimon	
T	Perioda	(s)
U_A	Výstupní napětí proudového čidla	(V)
U_b	Napětí na bočnicku	(V)
U_{CC}	Napájecí napětí	(V)
$U_{H \max}$	Napájecí napětí Hallovy sondy	(V)
U_{OUT}	Výstupní napětí	(V)
U_{RC}	Hodnota napětí na výstupu Hallova senzoru	(V)

U_{ref}	Referenční napětí	(V)
VA	Voltampérová charakteristika	
VFA	Napěťová zpětná vazba	
ZK	Zkratovací obvod	
Zn	Zinek	

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Vznik magnetického pole při průchodu proudu vodičem [2]	12
Obr. 2. Vznik střídavého proudu [2]	13
Obr. 3. Ampérmetr s bočníkem [20]	14
Obr. 4. Obvod proudového transformátoru [6]	16
Obr. 5. Ekvivalentní obvod proudového transformátoru [6]	16
Obr. 6. VA měřicího transformátoru AC1050 při různých impedancích [7]	18
Obr. 7. Měřicí proudový transformátor [7]	18
Obr. 8. Závislost napětí na proudu [8]	20
Obr. 9. Zapojení integrátoru [9]	21
Obr. 10. Rogowského cívka a frekvenční integrátor [9]	22
Obr. 11. Flexibilní Rogowského cívka [10]	23
Obr. 12. Princip Hallova jevu [13]	25
Obr. 13. Analogový výstup z Hallovy sondy [13]	26
Obr. 14. Měření proudů pomocí Hallovy sondy [18]	29
Obr. 15. Měření proudu Hallovou sondou v uzavřené smyčce [20]	30
Obr. 16. Měření proudu Hallovým senzorem v otevřené smyčce [20]	31
Obr. 17. Snímač proudu s Hallovým senzorem od společnosti Honeywell [19]	32
Obr. 18. Měření proudu měřicího transformátoru [36]	35
Obr. 19. Feritové jádro	36
Obr. 20. Technický popis feritového jádra [27]	37
Obr. 21. Blokové schéma Hallovy sondy A1302 [22]	38
Obr. 22. Zapojení pouzder LH a UA [22]	38
Obr. 23. Popis vývodů ACS712 [22]	40
Obr. 24. Blokové schéma ACS712 [22]	40
Obr. 25. Čerpadlo Grundfos UPS 25-40	41
Obr. 26. Zapojení vývodů, pouzdro T092, 1. výstup, 2. zem, 3. vstup [24]	43
Obr. 27. Zapojení symetrického zdroje a referenčního děliče [24]	43
Obr. 28. Obraz plošného spoje zdroje	43
Obr. 29. Hallova sonda A1302 ve feritovém jádru	44
Obr. 30. Schéma zapojení aktivní dolní propusti Sallen-Key [26]	46
Obr. 31. Zapojení vývodů TL071 a UA741 [28]	47
Obr. 32. Navržený obvod	48

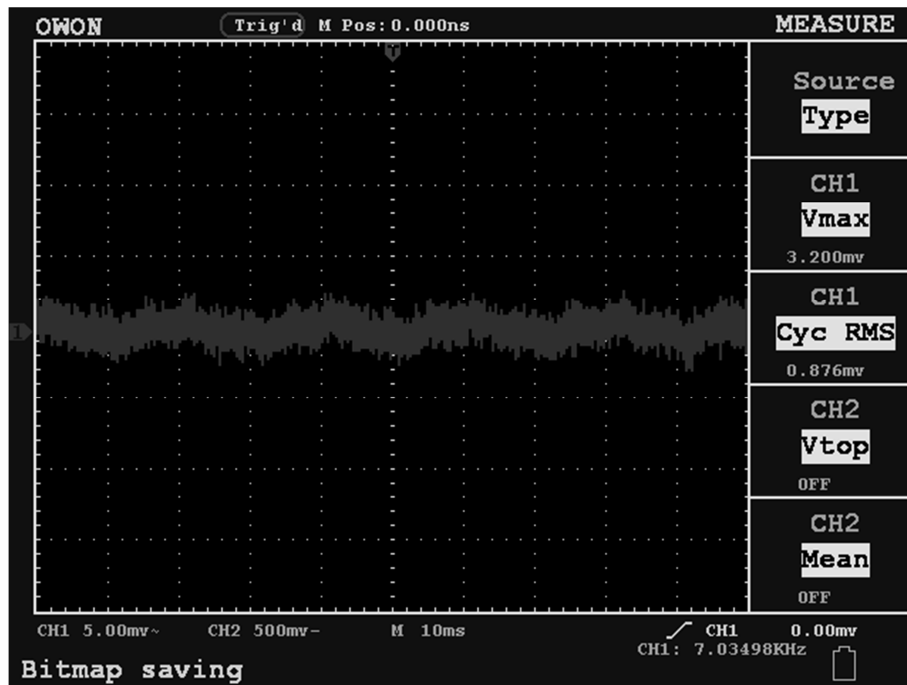
Obr. 33. Obraz plošného spoje.....	49
Obr. 34. Prototyp výrobku	49
Obr. 35. Zapojení tranzistoru jako spínače [30]	50

SEZNAM TABULEK

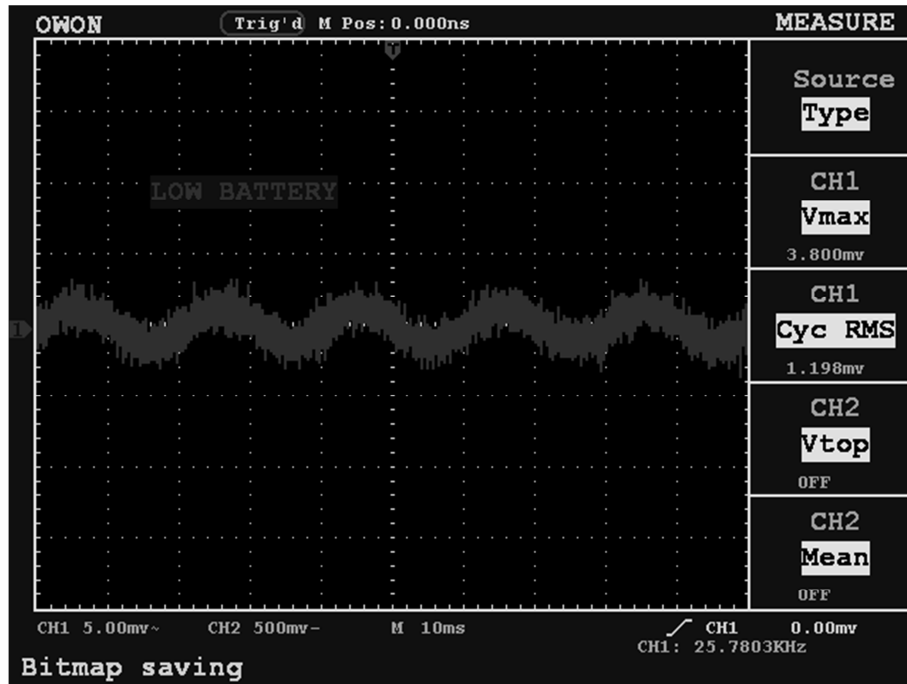
Tab. 1. Vybrané hodnoty AS - 100 [7].....	34
Tab. 2. Naměřené hodnoty proudu I_1 a I_2	35
Tab. 3. Rozměry feritového jádra [27]	36
Tab. 4. Vybrané hodnoty Hallova senzoru A1302 [27]	37
Tab. 5. Popis vývodů Hallový sondy A1302 [22].....	39
Tab. 6. Vybrané hodnot ACS712 [23]	39
Tab. 7. Popis vývodů Hallový sondy ACS712 [23].....	40
Tab. 8. Porovnání naměřených hodnot Hallových senzorů A1302, ACS712	41
Tab. 9. Základní parametry stabilizátoru 78L05.....	43
Tab. 10. Vybrané parametry OZ TL071 [31]	45
Tab. 11. Vybrané parametry OZ2 UA741C [28].....	47

SEZNAM PŘÍLOH P1: NAMĚŘENÉ HODNOTY OSCILOSKOPEM

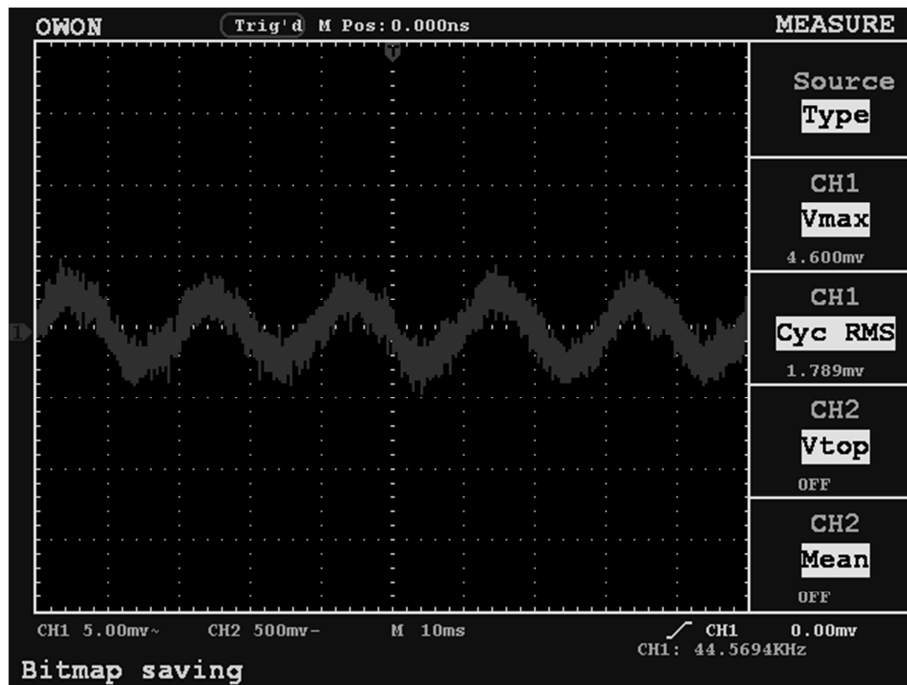
Příloha P1. 1. Hallova sonda A1302 – RC0	62
Příloha P1. 2. Hallova sonda A1302 – RC1	63
Příloha P1. 3. Hallova sonda A1302 – RC2	63
Příloha P1. 4. Hallova sonda A1302 – RC3	64
Příloha P1. 5. Hallova sonda ACS712 – RC0.....	64
Příloha P1. 6. Hallova sonda ACS712 – RC2.....	65
Příloha P1. 7. Hallova sonda ACS712 – RC2.....	65
Příloha P1. 8. Hallova sonda ACS712 – RC3.....	66



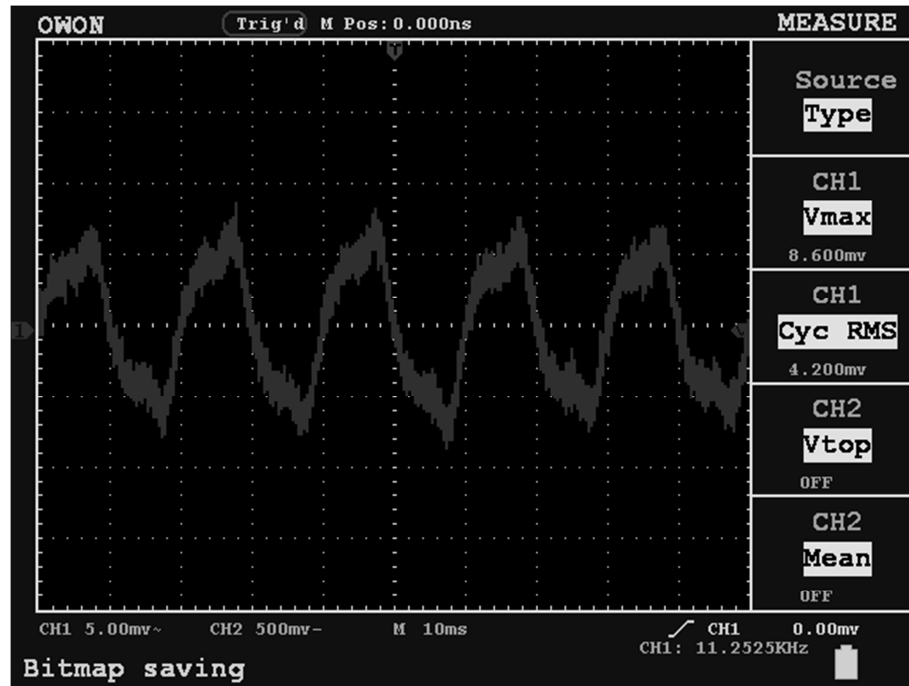
Příloha P1. 1. Hallova sonda A1302 – RC0



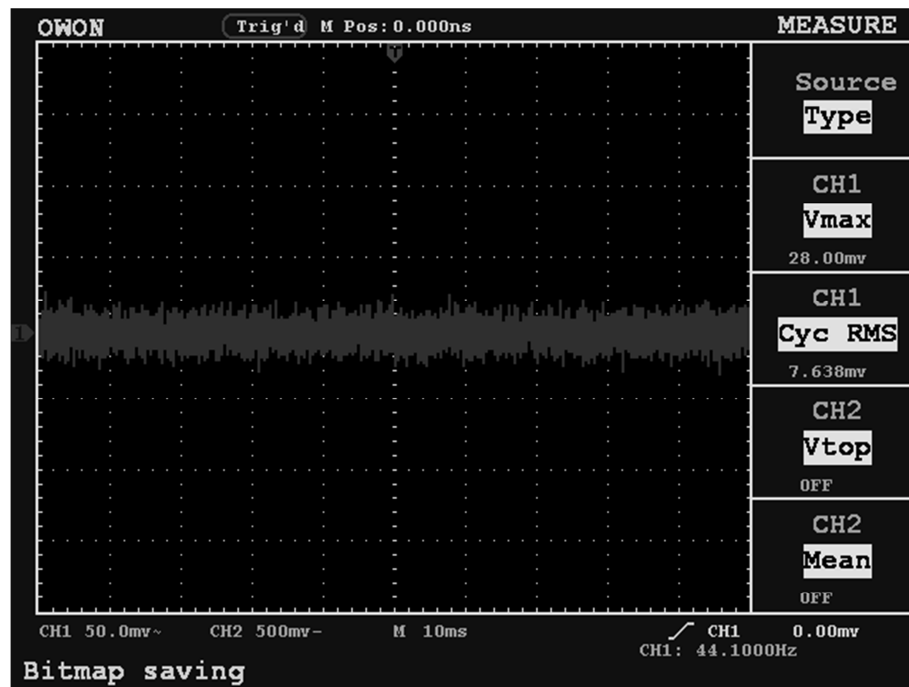
Příloha P1. 2. Hallova sonda A1302 – RC1



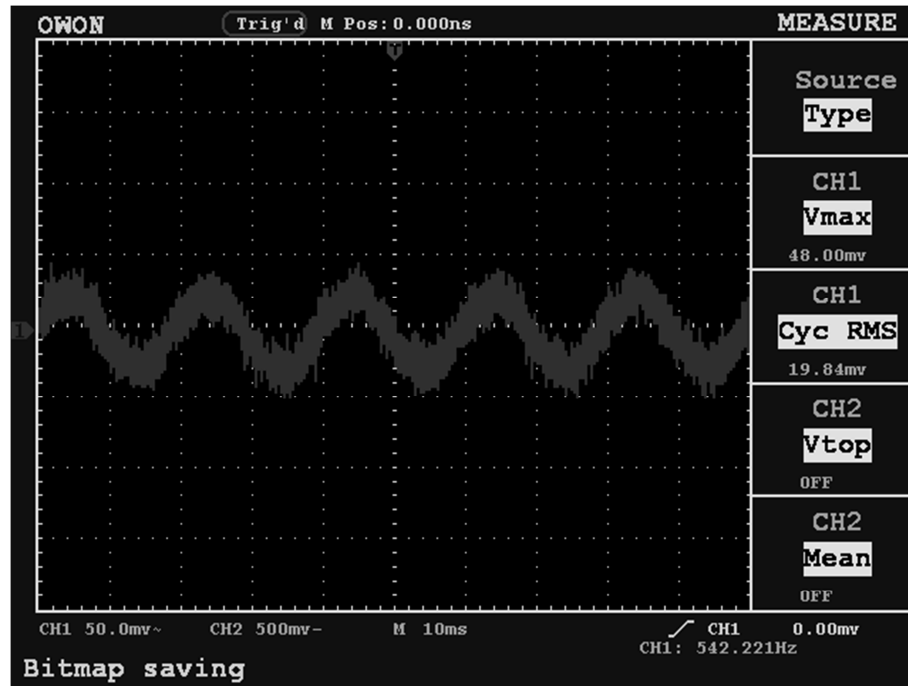
Příloha P1. 3. Hallova sonda A1302 – RC2



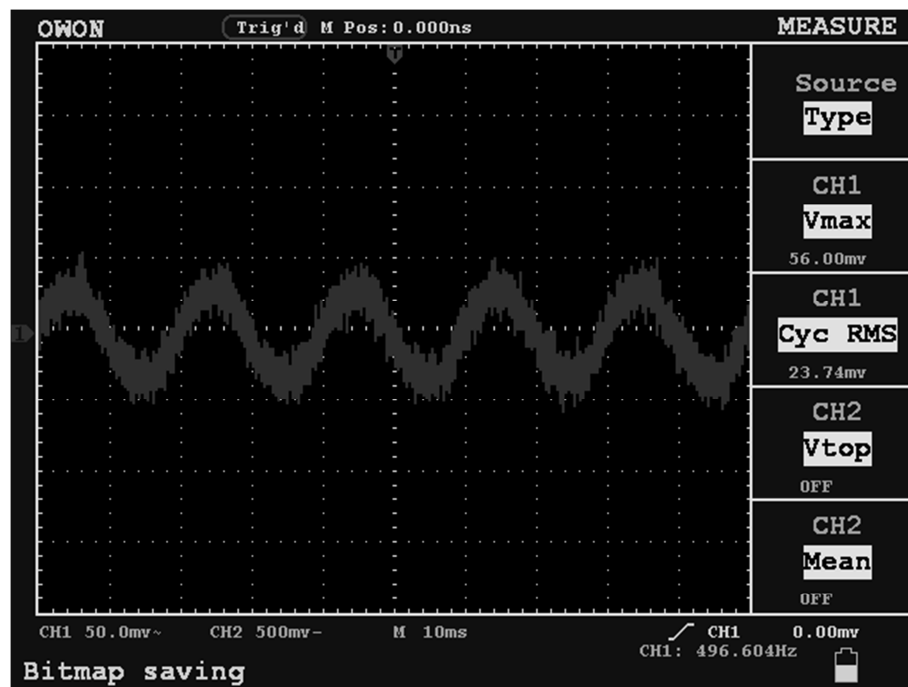
Příloha P1. 4. Hallova sonda A1302 – RC3



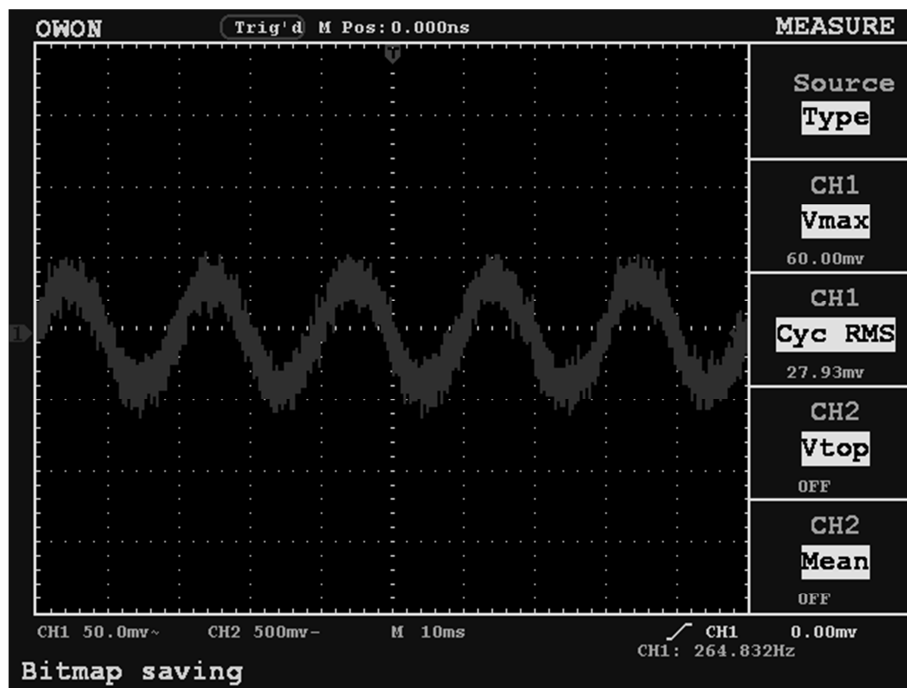
Příloha P1. 5. Hallova sonda ACS712 – RC0



Příloha P1. 6. Hallova sonda ACS712 – RC2



Příloha P1. 7. Hallova sonda ACS712 – RC2



Příloha P1. 8. Hallova sonda ACS712 – RC3

SEZNAM PŘÍLOH P2: SEZNAM SOUČÁSTEK

Příloha P2. 1. Seznam součástek navrženého obvodu.....	67
Příloha P2. 2. Seznam součástek zdroje	68

Příloha P2. 1. Seznam součástek navrženého obvodu

Počet (Ks)	Označení	Hodnota	Pouzdro	Přesnost
1	C1	1,5nF	NPO	10%
1	C2	15nF	NPO	10%
2	C3, C4	100nF	NPO	10%
1	C5	10 μ F/25V	RAD, HT	10%
2	D1, D2	1N4148	DO 35, sklo	
1	H1	A1302KUA-T	UA	
2	OZ1, OZ2	TL071	DIL8	
1	OZ3	UA741	DIL8	
1	R1	22K Ω	0204	1%
1	R2	1,6M Ω	0204	1%
1	R3	120K Ω	0204	1%
1	R4	270K Ω	0204	1%
1	R5	10K Ω	0204	1%
1	R6	4,7M Ω	0204	1%
1	R7	68K Ω	0204	1%
1	R8	18K Ω	0204	1%
1	R9	470 Ω	0204	1%
1	Feritové jádro, rozměry: Tab. 3			
1	Napájecí souosý konektor do panelu, 5,5/2,1mm vidlice			

1	Krabička, rozměry: 30mm x 66mm x 47mm
---	---------------------------------------

Příloha P2. 2. Seznam součástek zdroje

1	CZ1	100 μ F/25V	RAD, HT	5%
2	CZ2, CZ3	100nF	NPO	5%
1	CZ4	10 μ F/25V	RAD, HT	5%
1	IO1	78L05	TO92	
2	RZ1, RZ2	47K Ω	0204	1%