

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA KYBERNETIKY



Bezkontaktní měřič proudu s fluxgate senzory

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Autor: Vladimír Bareš
Vedoucí práce: Ing. Pavel Mlejnek, Ph.D.
Studijní program: Kybernetika a robotika
Studijní obor: Robotika
Praha, květen 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bareš** Jméno: **Vladimír** Osobní číslo: **344463**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra kybernetiky**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Studijní obor: **Robotika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Bezkontaktní měřič proudu s fluxgate senzory

Název bakalářské práce anglicky:

Contactless Current Sensor with Fluxgate Sensors

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte bezkontaktní ampérmetr založený na principu měření magnetického pole kolem vodiče protékajícího elektrickým proudem.

1. Využijte dodaných magnetických senzorů fluxgate, DRV425.
2. Ampérmetr bude mít rozsah ± 100 A s rozlišovací schopností minimálně 50 mA.
3. Zvolte vhodnou konfiguraci senzorů magnetického pole a ze změřeného pole určete elektrický proud procházející vodičem.
4. Změřený elektrický proud zobrazte na LCD displeji.
5. Realizujte možnost připojení přístroje přes USB a RS232 k počítači.
6. Stanovte přesnost navrženého měřicího přístroje a otestujte vliv pozice měřeného proudu včetně vlivu vnějších proudů.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Ripka, P.; Hauser, H.; Tondra, M.; Popovic, R.S.; Schott, Ch.; Shibasaki, I.; Didosyan, Y.; Primdahl, F. et al. - Magnetic Sensors and Magnetometers - Boston: ARTECH HOUSE, 2001. ISBN 1-58053-057-5.
- [2] Ripka Pavel - Electric current sensors: a review - Measurement Science and Technology, Vol 21, Nr 11, IOP Publishing Ltd, 2010.
- [3] Mlejnek Pavel - Průvlekový měřič proudu s anizotropními magnetořistory - DP ČVUT, Praha, 2005.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Mlejnek, Ph.D., katedra měření FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **11.01.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Pavel Mlejnek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Tomáš Svoboda, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení autora práce

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 25.5.2018

.....
Vladimír Bareš

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Mlejnкови, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky, vstřícnost a trpělivost při konzultacích.

Poděkování patří také mé rodině a přátelům za motivaci a podporu při studiu.

Abstrakt

Cílem mé bakalářské práce bylo navrhnout bezkontaktní ampérmetr založený na principu měření magnetického pole kolem vodiče protékaného elektrickým proudem. V implementaci byly použity fluxgate magnetické senzory a ověřena použitelnost těchto senzorů i pro měření magnetických účinků elektrického proudu. Vzhledem k velmi dobrým vlastnostem senzorů byla snaha využít jejich plný potenciál a zároveň eliminovat parametry, které nejsou pro danou problematiku přínosem. Fluxgate senzor DRV425 lze velmi jednoduše použít v libovolné aplikaci díky tomu, že nezbytné periferní obvody má integrovány přímo v pouzdře. Pro konstrukci ampérmetru s rozsahem ± 100 A DC s rozlišením přibližně 10 mA byl použit maximální rozsah fluxgate senzoru ± 2 mT. V práci je popsána konstrukce a princip celého přístroje od sběru dat ze senzorů přes jejich zpracování mikrokontrolerem až po zobrazení měřeného elektrického proudu na LCD displeji.

Klíčová slova

Fluxgate, bezkontaktní ampérmetr, magnetické senzory, elektrický proud, magnetické pole, měření, měřicí přístroj

Abstract

The goal of this bachelor thesis is to design a contactless ammeter based on the principle of a measurement of a magnetic field surrounding a conductor under electric current. Fluxgate sensors were used in the implementation. The usability of these sensors for the measurement of a magnetic field created by an electric current has been confirmed. Thanks to the good performance of the sensors, the pursuit to use the full potential was followed and at the same time the suppression of parameters not useful for this problematics has been made. The fluxgate sensor DRV425 is easy-to-use sensor in any application thanks to the implementation of the necessary peripheral circuits already in its case. The maximum range of ± 2 mT of the fluxgate sensor was used for the construction of the ± 100 A DC ammeter with sensitivity of approximately 10 mA. The paper explains the principle and construction of the device from the data collection from the sensors through its processing by the microcontroller to the visualisation of the electric current measurement on an LCD display.

Key words

Fluxgate, contactless ammeter, magnetic sensors, electrical current, magnetic field, measurement, meter

1. Obsah

Zadání.....	1
Poděkování	3
Abstrakt.....	4
1. Obsah	5
2. Úvod.....	7
3. Teorie.....	8
3.1. Maxwellovy rovnice	8
3.2. Ampérův zákon	9
3.3. Definice jednotky ampér	10
3.4. Klasické ampérmetry	11
3.5. Bezkontaktní ampérmetry	12
4. Návrh obvodu ampérmetru	16
4.1. Blokové schéma	16
4.2. Integrovaný fluxgate senzor DRV425.....	16
4.3. Měřicí rozsah	17
4.4. Šířka pásma	19
4.5. Napěťová reference	20
4.6. Indikace OVERRANGE a ERROR FLAG.....	21
4.7. AD převodník	21
4.8. Mikrokontroler.....	22
4.9. Napájecí zdroj	23
5. Návrh, výroba a osazení DPS	24
5.1. Technologie výroby DPS.....	24
5.2. Osazení.....	25
5.3. Oživení.....	26
5.4. Dodatečné propojky.....	27
5.5. Programování.....	27
6. Popis funkce	28
7. Parametry přístroje.....	29
8. Shrnutí řešení.....	33
9. Literatura.....	34
10. Seznam příloh.....	35

Seznam tabulek

- Tabulka 1: Magnetická susceptibilita vybraných látek [1], [2]
Tabulka 2: Základní parametry DRV425 [21]
Tabulka 3: Konfigurace šířky pásma DRV425 při $R_{SHUNT} = 22 \Omega$
Tabulka 4: Konfigurace napěťové reference
Tabulka 5: Indikace přetečení a saturace senzoru DRV425 při $VDD = 5 V$ a $R_{SHUNT} = 22 \Omega$
Tabulka 6: Reprezentace digitalizovaného vstupu v ADS1256
Tabulka 7: Základní parametry realizovaného ampérmetru

Seznam obrázků

- Obrázek 1: Logo SI [7]
Obrázek 2: Principiální schéma měření proudu ampérmetrem
Obrázek 3: Principiální schéma fluxgate senzoru s jedním jádrem
Obrázek 4: Principiální schéma fluxgate senzoru s dvěma jádry
Obrázek 5: Principiální schéma fluxgate senzoru s toroidním jádrem (upraveno z [18])
Obrázek 6: Blokové schéma navrženého bezkontaktního ampérmetru
Obrázek 7: Blokové schéma čipu DRV425 [21]
Obrázek 8: Rozměry průvleku ampérmetru. Všechny rozměry jsou v [mm]
Obrázek 9: RC filtr na vstupu AD převodníku ADS1256 (převzato a upraveno z [5])
Obrázek 10: Obvod sledovače napěťové reference
Obrázek 11: Funkce otevřeného kolektoru (upraveno z [22])
Obrázek 12: Blokové schéma AD převodníku ADS1256 [23]
Obrázek 13: Obvod napájecího zdroje ampérmetru
Obrázek 14: Detail výsledné DPS
Obrázek 15: Usazené pouzdro QFN-20 na kalafunovém žele
Obrázek 16: Připájené pouzdro QFN-20
Obrázek 17: Připájené pouzdro QFN-20
Obrázek 18: Připájené pouzdro SSOP-28
Obrázek 19: Patice na součástky QFN-20
Obrázek 20: Popis jednotlivých částí realizovaného přístroje
Obrázek 21: Závislost skutečného proudu vodičem na změřené hodnotě realizovaným ampérmetrem
Obrázek 22: Závislost skutečného proudu vodičem na změřené hodnotě realizovaným ampérmetrem po aplikaci korekce multiplikativní chyby
Obrázek 23: Naškálování průvleku ampérmetru po úhlu $22,5^\circ$
Obrázek 24: Závislost proudu na poloze vodiče v průvleku pohybujícího se po kružnici se středem ve středu průvleku

2. Úvod

Měření elektrického proudu mělo vedle měření elektrického napětí vždy jednu zásadní nevýhodu, a to nutnost rozpojení měřeného obvodu. V průběhu času vývoj klešťových ampérmetrů s měřicím transformátorem proudu tuto nutnost při měření střídavého proudu odstranil. S rozvojem polovodičů se později dokázalo bezkontaktně měřit i proud stejnosměrný. V počátcích byla tato technologie drahá a přesností se ani zdaleka nevyrovnala klasickým kontaktním ampérmetrům. Měla však výhodu v tom, že měřený obvod nebyl vodivě spojen s měřicím přístrojem. Klešťové ampérmetry našly své uplatnění především v silnoproudé technice. Bylo možné rychle a bezpečně změřit velmi vysoké proudy v řádu i stovek A.

V dnešní době s vývojem různých typů detektorů magnetického pole se stále zvyšuje citlivost bezkontaktních ampérmetrů. Hallovy sondy reagují na magnetické pole v řádu desítek μT až jednotek T, magnetorezistory nebo fluxgate senzory změří i pole v řádu jednotek nT. Jelikož jsou tyto senzory takto vysoce citlivé, používají se nejen na měření magnetického pole Země, ale lze je použít i k přesnému bezkontaktnímu měření proudu.

3. Teorie

3.1. Maxwellovy rovnice

Elektromagnetické jevy lze chápat ze dvou pohledů, jednak jako výsledek interakcí mezi nabitými částicemi, nebo naopak, že interakce mezi náboji jsou zprostředkovány elektromagnetickým polem. První přístup používal ve své studii André Marie Ampère (1775-1836). Ampère vysvětloval vzájemné působení proudů z ryze elektrodynamického hlediska a na magnetické účinky pohlížel jako na projev silové interakce mezi elektrickými proudy. Jednotlivé zákony elektromagnetismu byly takto přímo odvozovány abstrakcí z mnoha pokusů. Naopak James Clerk Maxwell (1831 – 1879) se pokusil vyjádřit tyto jednotlivé zákonitosti elektřiny a magnetismu soustavou rovnic elektromagnetického pole (3.1) – (3.4). Současně zavedl pojem posuvného proudu. Tato formulace se stala jedním z pilířů teoretické fyziky a mimo jiné i základem rozvoje elektrotechniky. Nejen že se ze sestavených rovnic dala předpovědět existence elektromagnetických vln, ale jejich význam je i v tom, že jsou kovariantní vůči změně vztažné soustavy. Rovnice se dají vyjádřit pro různé oblasti jevů zanedbáním příslušných členů.

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \iint_S \left(\mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S} \quad (3.1)$$

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \iint_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \quad (3.2)$$

$$\oiint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \iiint_V \rho_0 dV \quad (3.3)$$

$$\oiint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (3.4)$$

Veličina \mathbf{H} [A.m⁻¹] představuje intenzitu magnetického pole, \mathbf{B} [T] je magnetická indukce, \mathbf{D} [C.m⁻²] elektrická indukce, \mathbf{E} [V.m⁻¹] elektrická intenzita a \mathbf{j} [A.m⁻²] je proudová hustota. S představuje orientovanou plochu s elementem $d\mathbf{S}$, C představuje uzavřenou orientovanou křivku s elementem $d\mathbf{l}$ a V je objem s elementem dV . Uvedené čtyři Maxwellovy rovnice zapsané v integrálním tvaru se označují jako hlavní. Rovnice (3.1) představuje Ampérův zákon, nebo také, že vírové magnetické pole doprovází elektrický proud ve vodiči a proměnné elektrické pole (posuvný proud), rovnice (3.2) popisuje Faradayovu elektromagnetickou indukci, nebo také, že vírové elektrické pole doprovází proměnné magnetické pole, rovnice (3.3) představuje Gaussův zákon, nebo také, že elektrické pole je zřídlové a rovnice (3.4) vyjadřuje neexistenci „magnetických nábojů“, je to alternativa Gaussova zákona pro magnetické pole, nebo také, že magnetické pole je nezřídlové. Další dvě rovnice platí pouze pro hmotné prostředí v klidu

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \varepsilon_0 \kappa \mathbf{E} = \varepsilon_0 (1 + \kappa) \mathbf{E} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{J} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \kappa_m \mathbf{B} \Rightarrow \mathbf{B} = \mu_0 (1 + \kappa_m) \mathbf{H} \quad (3.6)$$

kde $\varepsilon_0 = 8,854\,787 \dots \cdot 10^{-12} \text{F}\cdot\text{m}^{-1}$ je elektrická konstanta (permitivita vakua), κ [-] je elektrická susceptibilita, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H}\cdot\text{m}^{-1}$ je magnetická konstanta (permeabilita vakua), κ_m [-] je magnetická susceptibilita, \mathbf{P} [$\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$] je elektrická polarizace, \mathbf{M} [$\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$] je magnetizace a \mathbf{J} [T] je magnetická polarizace. Hodnoty elektrické susceptibility jsou vždy kladné, avšak magnetická susceptibilita může být i záporná, viz tabulka 1.

Tabulka 1: Magnetická susceptibilita vybraných látek [1], [2]

Látka	Magnetická susceptibilita	Poznámka
Diamagnetická	$\sim -10^{-6}$	Susceptibilita je nezávislá na teplotě a intenzitě vnějšího magnetického pole
Měď	$-8,9 \cdot 10^{-6}$	
Uhlík	$-0,22 \cdot 10^{-6}$	
Stříbro	$-26 \cdot 10^{-6}$	
Zlato	$-37 \cdot 10^{-6}$	
Etanol	$-7,9 \cdot 10^{-6}$	
Diamagnetická anomální	$\sim -10^{-4}$	Susceptibilita je závislá na teplotě
Paramagnetická	$\sim 10^{-2}$	Susceptibilita je nezávislá na intenzitě vnějšího magnetického pole, ale závislá na teplotě
Kyslík	$+1,85 \cdot 10^{-6}$	
Platina	$+280 \cdot 10^{-6}$	
Hliník	$+22 \cdot 10^{-6}$	
Feromagnetická	$\sim 10^3 - 10^5$	Susceptibilita je závislá jak na intenzitě vnějšího magnetického pole, tak i na teplotě
Nikl Železo		

A další tři rovnice platí pro dielektricky a magneticky měkká izotropní prostředí v klidu.

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (3.7)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3.8)$$

$$\mathbf{j} = \gamma \mathbf{E} \quad (3.9)$$

kde $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ je permitivita, ε_r je relativní permitivita, $\mu = \mu_0 \mu_r$ je permeabilita, μ_r je relativní permeabilita a γ [$\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$] je konduktivita.[1], [3], [4], [2], [5]

3.2. Ampérův zákon

Hans Christian Oersted (1777 - 1851) zkoumal souvislosti mezi elektřinou a magnetismem. Svým pokusem, který publikoval v roce 1820, objevil magnetické účinky elektrického proudu na magnetickou střelku. O matematický popis se pak postarali Jean Baptiste Biot (1774 - 1862) a Félix Savart (1791 - 1841) ve formě známého Biotova - Savartova - Laplaceova zákona (3.10)

$$d\mathbf{H} = I \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}^0}{4\pi r^2}, \quad (3.10)$$

který vyjadřuje magnetické pole reprezentované elementem magnetické intenzity $d\mathbf{H}$ prvku $d\mathbf{l}$ ustáleného lineárního proudu I . O zobecněnou formu zákona se postaral Pierre Simon Laplace (1749 – 1827).

Celá myšlenka měření elektrického proudu I bezkontaktně vychází právě z první Maxwellovy rovnice (3.1), která popisuje Ampérův zákon, nebo zákon celkového proudu

$$\oint_C \mathbf{H} d\mathbf{l} = \sum I + \frac{d\Psi}{dt}. \quad (3.11)$$

Rovnice (1.11) říká, že magnetomotorické napětí U_m po libovolné uzavřené orientované křivce C je rovno celkovému elektrickému proudu $\sum I$ orientovanou plochou S , kterou křivka C obepíná. V nestacionárním poli se k celkovému elektrickému proudu přičte ještě Maxwellův posuvný proud, který je co do vodivosti stejný jako běžný indukční proud. Jinými slovy lze říci, protéká-li vodičem elektrický proud, pak v okolí vodiče vzniká magnetické pole. Dosadíme-li rovnici (3.6) do rovnice (3.11) a budeme-li předpokládat stacionární elektrické pole a křivku C ve tvaru kružnice, pak dostaneme velmi jednoduchý vztah (3.12) mezi elektrickým proudem I a magnetickou indukcí \mathbf{B} .

$$I = \frac{2\pi r}{\mu} B \quad (3.12)$$

Vztah (3.12), kde r je poloměr kružnice ležící v rovině kolmé k elektrickému vodiči a $\mu = \mu_0\mu_r$ je permeabilita, vlastně popisuje příspěvek vodiče, kterým protéká elektrický proud I k magnetické indukcii \mathbf{B} popisující vzniklé magnetické pole. [6],[3],[1]

3.3. Definice jednotky ampér

První zmínka o *International System of Units* známém jako soustava jednotek SI se datuje do roku 1799. 20. 5. 1875 byla uzavřena metrická konvence a vznikl nejvyšší orgán *Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM)*, tedy Generální konference pro míry a váhy. Zasedání této konference probíhají ve čtyřletých periodách. A právě na 11. zasedání v roce 1960 byl



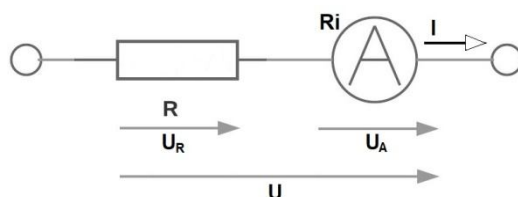
Obrázek 1: Logo SI [7]

přijat název *International System of Units* se zkratkou SI. Na 14. zasedání v roce 1971 byl systém doplněn o sedmou základní jednotku *mol*, a tak setrval dodnes. Česká republika (tehdejší Československo) přistoupila k této konvenci 24. 11. 1922. Dnes povinnost používat soustavu SI nařizuje zákon 505/1990 Sb. „Zákon o metrologii“, více v [8].

Jednou ze základních jednotek je právě Ampér [A]. Jeho definice¹ je dle [9] nebo [6] následující: „Ampér (A) je proud, který při stálém průtoku dvěma rovnoběžnými přímými nekonečně dlouhými vodiči zanedbatelného kruhového průřezu, umístěnými ve vakuu ve vzdálenosti 1 metru, vyvolá mezi vodiči sílu $2 \cdot 10^{-7}$ newtonu na 1 metr délky.“

3.4. Klasické ampérmetry

Elektrický proud se měří ampérmetrem. Téměř vždy je potřeba elektrický obvod rozpojit v místě, kde chceme elektrický proud měřit. Ampérmetr se zapojuje do série s prvkem, kterým protéká měřený proud. Ampérmetr svou přítomností v obvodu negativně ovlivní parametry sledovaného obvodu. Základní zapojení můžeme vidět na obrázku 2. Na ampérmetru vzniká úbytek napětí U_A . Tento úbytek je tím větší, čím má ampérmetr větší vnitřní odpor R_i . Z tohoto důvodu se u ampérmetrů požaduje co nejnižší vnitřní odpor. Vnitřní odpor ručkových ampérmetrů se pohybuje od setin ohmu u vyšších rozsahů až po stovky i tisíce ohmů u rozsahů v řádech mikroampérů. Tuto hodnotu nalezneme obvykle v dokumentaci daného přístroje. V případě potřeby je možné vnitřní odpor ručkového ampérmetru změřit standardně ohmovou metodou. [10]



Obrázek 2: Principiální schéma měření proudu ampérmetrem

Ampérmetry můžeme rozdělit do 3 skupin: analogové ampérmetry, číslicové ampérmetry a klešťové (bezkontaktní) ampérmetry.

Analogové přístroje mají vedle digitálních stále své místo. K výhodám analogových ampérmetrů patří zejména nezávislost na zdroji napájení, což je i s rozvojem „low power consumption“ aplikací stále velmi podstatnou výhodou. Další výhodou je pak přítomnost ručky, která přehledně zobrazuje i výkyvy měřeného proudu. U některých digitálních přístrojů se nepřítomnost ručky nahrazuje stupnicí s kurzorem zobrazovanou na LCD displeji. Pro měření proudu se používají zejména magnetoelektrické měřicí přístroje. Jedná se o přístroje s otočnou cívku, která je namotána na magnetickém jádře a protéká jí měřený elektrický proud. Cívka je umístěna ve válcové mezeře mezi pólovými nástavci permanentního magnetu. Na cívku působí síly vyvolané protékáním proudem, které způsobují pohybový moment. K ustálení ručky přístroje pak dochází vlivem direktivního momentu, o který se postarají pružiny, na kterých je cívka upevněna a přivádí se jimi do

¹ Ustanoveno na 9. zasedání CGPM

cívky měřený proud. Podle vztahu (3.13) lze určit pohybový moment M_d [N.m], který odpovídá měřenému elektrickému proudu.

$$M_d = 2NBilr, \quad (3.13)$$

kde N [-] je počet závitů cívky, B [T] je magnetická indukce vnějšího pole, I [A] je měřený proud, l [m] je délka aktivní části závitů a r [m] je poloměr otáčení cívky. V závislosti na směru elektrického proudu se mění i směr momentu, díky čemuž může být nula umístěna uprostřed stupnice přístroje. Magnetoelektrické přístroje se mimo jiné vyznačují nízkým vnitřním odporem, velkou přesností, citlivostí a díky vlastnímu magnetickému poli i nízkou citlivostí na vnější pole. [10], [11], [12], [13]

Digitální přístroje obvykle fungují na principu integračního AD převodníku doplněného předzesilovačem. Ať už se jedná o AD převodník s dvoutaktní integrací [14], AD převodník se Σ - Δ modulátorem nebo i nějakou jejich modifikací, všechny za určitých podmínek potlačují sériové rušení. Podle [15] AD převodník se Σ - Δ modulátorem kromě integrátoru, komparátoru a klopného obvodu obsahuje ještě FIR (Finite Impulse Response) filtr. Řád modulátoru je pak určen počtem integrátorů. Na vstupu modulátoru je analogový signál, který se v sumátoru sečte s referenčním signálem a díky tomu, že referenční signál je střídavě kladný nebo záporný, vzniká na výstupu integrátoru pilovitý průběh, který je komparací s referenční hodnotou, obvykle (GND) převáděn na obdélníkový průběh s proměnnou střídou. Na výstupu klopného obvodu je obdobný signál, avšak synchronizovaný vzorkovacím kmitočtem. Ze znalosti referenčního signálu a střídy lze pak určit hodnotu analogového signálu. Filtr na výstupu pak slouží k filtraci sériového vzorkovacího signálu. Mimo tyto součásti mívají sériově vyráběné AD převodníky integrovány vstupní zesilovače, u vícekanálových AD převodníků vstupní multiplexor, obvody pro komunikaci s okolím SPI, I2C a další.

Jak u číslicových, tak i u analogových ampérmetrů se změna rozsahu realizuje tzv. bočníkem, rezistorem se známou hodnotou. Proud se pak určí z úbytku napětí na tomto rezistoru. U analogových přístrojů připadá v úvahu i změna počtu závitů měřící cívky. Detailněji je pojednáno o různých typech přístrojů v [10] a [11], o analogových přístrojích je více v [16] a [17].

3.5. Bezkontaktní ampérmetry

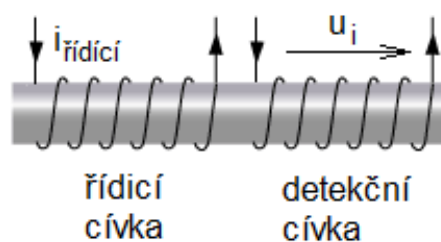
Speciální skupinou ampérmetrů jsou bezkontaktní ampérmetry. Výhodou těchto ampérmetrů je fakt, že měřený proud přístrojem neprotéká. Díky tomu je možné měřit poměrně vysoké proudy (kA) a zároveň není třeba měřený obvod rozpojovat. Princip přístroje je založen na měření magnetického pole v okolí vodiče a jeho přepočtu na

elektrický proud, který vodičem prochází. V moderních přístrojích se používají různé senzory magnetického pole, v těch starších se jednalo spíše o měřicí transformátor proudu. Přístroje založené na principu měřícího transformátoru proudu měří pouze střídavý elektrický proud. Stejnoseměrný proud je možné měřit klešťovými ampérmetry vybavenými například Hallova sondou.

Hallova sonda je tenká polovodičová² destička obvykle z materiálu InAs nebo InSb. Protéká-li vlivem vnějšího elektrického pole o intenzitě E [V.m⁻¹] vzorkem polovodiče elektrický proud, a zároveň je tento vzorek vystaven vnějšímu magnetickému poli o indukci B [T], kolmé ke směru intenzity E [V.m⁻¹], vznikne ve vzorku vlivem Lorentzovy síly, která působí na náboje pohybující se v materiálu, nové elektrické pole E_H [V.m⁻¹]. Toto pole je kolmé k rovině, ve které leží E [V.m⁻¹] a B [T]. Tento jev popsal Edwin Herbert Hall (1855 – 1938). Na protilehlých stěnách vzorku pak vzniká elektrické napětí U_H , které je úměrné vnějšímu magnetickému poli. Více a detailněji popsáno v [6] a [4].

Vedle Hallových senzorů, které jsou asi nejznámějšími a nejpoužívanějšími senzory magnetického pole, se používají různé druhy magnetorezistorů, AMR (anisotropic magnetoresistance), GMR (giant magnetoresistance), TMR (tunnel magnetoresistance) nebo také MEMS (microelectromechanical) magnetické senzory.

V dnešní době se do popředí dostávají také fluxgate senzory, které se vyrábí v CMOS i MEMS technologii. Tyto senzory vynikají především vysokým rozlišením až 100 pT, nízkým šumem, vysokou přesností a zároveň pracují při pokojové teplotě. Detekce magnetického pole je ve fluxgate senzoru založena na modulaci magnetického pole řízeně generovaného ve feromagnetickém jádře cívky vnějším magnetickým polem. Fluxgate může být realizován různým uspořádáním cívek.



Obrázek 3: Principiální schéma fluxgate senzoru s jedním jádrem

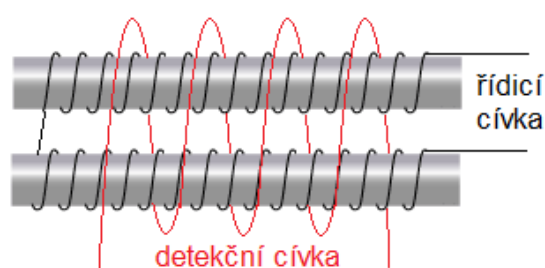
Základní model ukazuje obrázek 3. Na jednom feromagnetickém jádře je navinuta řídicí a detekční cívka. Střídavý proud i [A] na vstupu řídicí cívky generuje v jádře střídavý

² Hallův jev je obecně pozorován na libovolném polovodiči, například na CdTe, viz [29]

magnetický tok Φ [Wb]. Díky Faradayově elektromagnetické indukci, rovnice (3.2), se na svorkách vinutí detekční cívky indukuje elektrické napětí

$$u_i = -\frac{\partial\Phi}{\partial t} = -\iint_S \frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}, \quad (3.14)$$

které je úměrné magnetickému poli o magnetickém toku Φ [Wb]. Příspěvek vnějšího magnetického pole je pak na tomto střídavém magnetickém toku superponován. Napětí úměrné vnějšímu magnetickému poli se získá demodulací snímaného pole detekční cívkou.



Obrázek 4: Principiální schéma fluxgate senzoru s dvěma jádry



Obrázek 5: Principiální schéma fluxgate senzoru s toroidním jádrem (upraveno z [18])

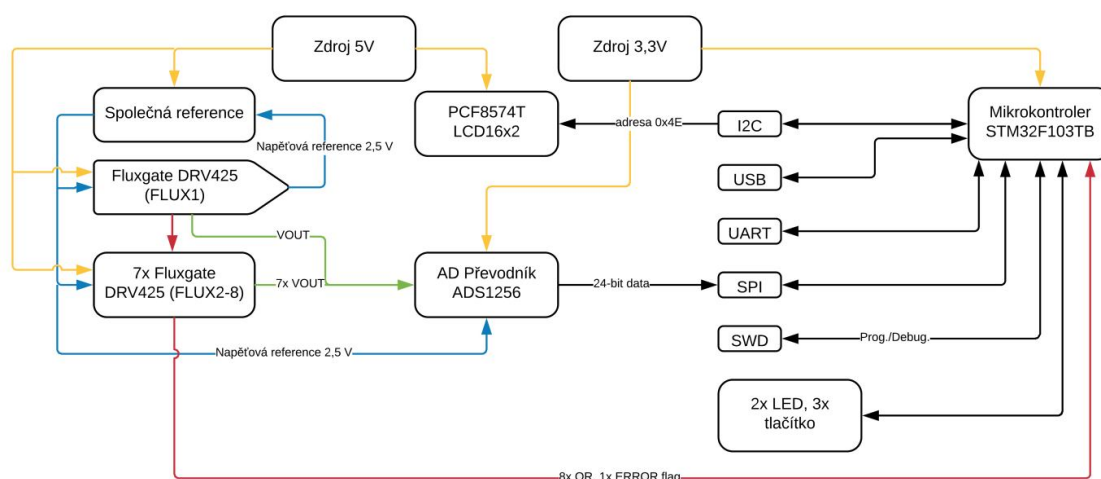
Aby na detekční cívce vznikalo pouze napětí úměrné vnějšímu magnetickému poli, je třeba zvolit uspořádání dle obrázku 4. Řídicí cívka je navinuta rovnoměrně na obou jádrech, a to v opačném směru. Tím se v prvním jádře vytváří magnetický tok Φ_1 [Wb], který je opačný než tok Φ_2 [Wb] ve druhém jádře. Pokud soustava není vystavena vnějšímu magnetickému poli, pak indukované napětí na svorkách detekční cívky je nulové, jelikož se magnetický tok v jejím jádře vyruší. V přítomnosti vnějšího magnetického pole se pak na svorkách detekční cívky již detekuje napětí úměrné právě vnějšímu magnetickému poli. Uvedený princip může být různě modifikován. Běžně se dvojice jader nahrazuje jedním toroidním jádrem, viz obrázek 5. V případě použitých integrovaných senzorů DRV425 je soustava cívek doplněna ještě jednou cívkou, navinutou na společném jádře s cívkou detekční. V obrázku 7 označena jako kompenzační cívka. Cívka zde souží ke kompenzaci, vynulování magnetického toku v jádře detekční cívky. Kompenzační magnetický tok je generován elektrickým proudem, který prochází kompenzačním obvodem s bočником R_{SHUNT} [Ω]. Výstupní napětí integrovaného senzoru DRV425, které je úměrné měřenému magnetickému poli B , je rovno úbytku napětí na bočníku. Na rozdíl od zmiňovaných Hallových senzorů, fluxgate senzory detekují magnetické pole již v řádu jednotek nT až po jednotky mT. Bezkontaktní ampérmetry s fluxgate senzory jsou kvůli tomu náchylné na

vnější rušivá magnetická pole. Hlavním zdrojem rušivého pole je magnetické pole Země, které se pohybuje v rozmezí 10 – 60 μT . Mimoto je potřeba počítat s magnetickými poli od permanentních magnetů nebo i okolních vodičů. [19], [20]

4. Návrh obvodu ampérmetru

4.1. Blokové schéma

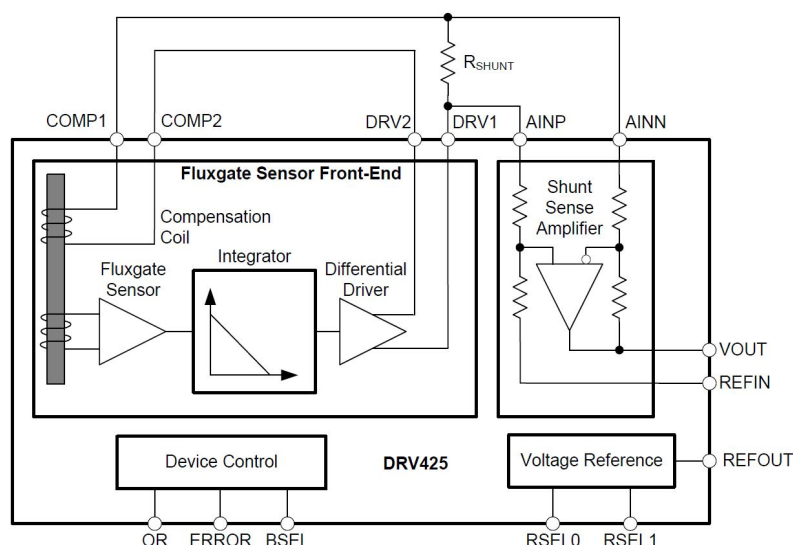
Hlavním bodem této práce bylo navrhnout bezkontaktní ampérmetr založený na principu měření magnetického pole kolem vodiče protékajícího proudem. Blokové schéma navrženého přístroje je vidět na obrázku 6. Mimo nezbytné součásti pro požadovanou funkci přístroje návrh obsahuje i obvody pro budoucí rozšíření. Jsou to například detekce indikačních signálů z DRV425 čipů, konektivita přes USB nebo I2C sběrnici.



Obrázek 6: Blokové schéma navrženého bezkontaktního ampérmetru

4.2. Integrovaný fluxgate senzor DRV425

Aktivní část navrženého ampérmetru tvoří 8 symetricky uspořádaných fluxgate senzorů DRV425 [21].



Obrázek 7: Blokové schéma čipu DRV425 [21]

DRV425 je okamžitě použitelný senzor, který převádí magnetické pole reprezentované magnetickou indukci B [T] přímou úměrou na elektrické napětí U [V] na výstupním pinu

senzoru. Vybrané parametry DRV425 shrnuje tabulka 2. Všechny nutné podpůrné obvody tvoří s fluxgate senzorem jeden komplet a jsou už integrovány do samotného čipu DRV425. V blokovém schématu na obrázku 6 je zakreslen fluxgate senzor, kompenzační cívka, integrátor, diferenciální zesilovač, které se starají o vnitřní kompenzaci fluxgate senzoru. Na výstupu je diferenciální zesilovač s konstantním zesílením 4x, který převádí úbytek napětí vzniklý na externím „shunt“ rezistoru na výstupní pin 6 čipu VOUT. Vztah mezi magnetickou indukcí B [T] a výstupním napětím U_{VOUT} [V] čipu DRV425 je dán rovnicí (4.1)

$$U_{VOUT} = B \cdot R_{SHUNT} \cdot 12,2 \cdot 4, \quad (4.1)$$

kde R_{SHUNT} [Ω] je odpor externího rezistoru, hodnota 12,2 [A/T] představuje poměr kompenzačního proudu ku vnějšímu magnetickému poli a hodnota 4 je již zmiňované zesílení výstupního diferenciálního zesilovače.

4.3. Měřicí rozsah

Vedle napájení senzoru i hodnota externího rezistoru R_{SHUNT} [Ω] určuje měřicí rozsah senzoru. Dle [5] se hodnota odporu určí z rovnice (4.2). Je to alternativa rovnice (4.1), která zohledňuje použitou referenci senzoru.

$$R_{SHUNT} \leq \frac{U_{VOUTMAX} - U_{REFIN}}{B_{MAX} \cdot 12,2 \cdot 4}, \quad (4.2)$$

kde $U_{VOUTMAX}$ [V] vyjadřuje požadované maximální výstupní napětí na pinu VOUT, U_{REFIN} [V] je hodnota reference senzoru a B_{MAX} [T] je maximální hodnota měřené magnetické indukce. Dle [21] je při napájecím napětí $V_{DD} = 5$ V maximální rozsah senzoru ± 2 mT.

$$R_{SHUNT} \leq \frac{(5 - 0,085) - 2,5}{2 \cdot 10^{-3} \cdot 12,2 \cdot 4} = \underline{24,74 \Omega} \quad (4.3)$$

Jak ukazuje (3.3) navržený externí rezistor $R_{SHUNT} = 22 \Omega$ splňuje podmínku (4.2) při požadovaném $U_{VOUTMAX} = 5$ V a $U_{REFIN} = 2,5$ V, zohledňuje nejbližší hodnotu v odporové řadě E12 (přesnost 5%) a také napěťový úbytek na senzoru ve výši 0,085 V. Výsledkem tohoto nastavení je tedy lineární převod magnetické indukce B v rozsahu ± 2 mT na napětí U_{VOUT} v rozsahu 0 ÷ 5 V, který formálně popisuje vztah (4.4)

$$U_{VOUT} = \alpha \cdot B, \quad (4.4)$$

kde

$$\alpha = R_{SHUNT} \cdot 12,2 \cdot 4 = 22 \cdot 12,2 \cdot 4 = \underline{1073,6 \text{ V} \cdot \text{T}^{-1}} \quad (4.5)$$

Tabulka 2: Základní parametry DRV425 [21]

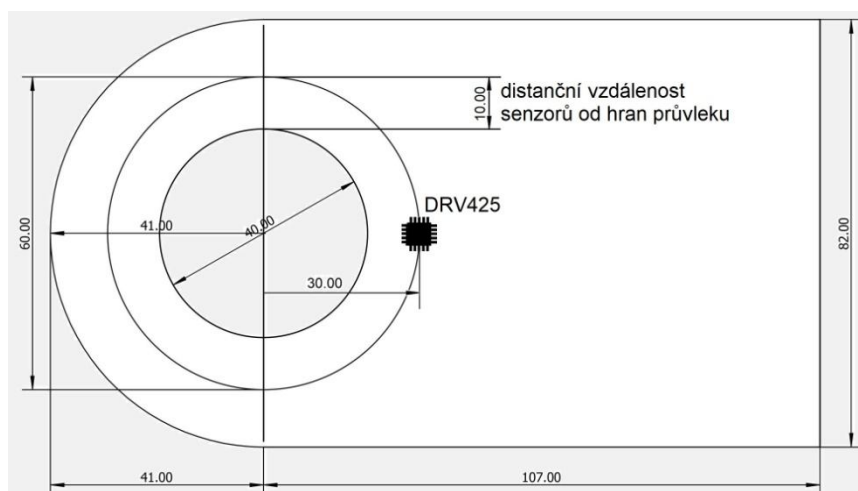
Parametr	Poznámka	Min	Typicky	Max	Jednotka
Napájecí napětí		3,0	5	5,5	V
Teplota prostředí		-40		125	°C
Offset	Při nulovém magnetickém poli	-8	±2	8	μT
Rozsah		-2		2	mT
Šířka pásma	zvolená		32		kHz
Zkratový proud	VDD = 5 V		250		mA
Výstupní reference	zvolená	2,45	2,5	2,55	V
Proudový odběr			7	10	mA
Šum			1,5 nT/√Hz		

Měřicí rozsah ampérmetru závisí na měřicím rozsahu senzorů nepřímo dle vztahu (3.12). Ve vztahu vystupuje r [m] jako radiální vzdálenost místa měření magnetické indukce B [T] od vodiče, kterým protéká měřený proud. Ampérmetr je navržen jako průvlekový a je vyžadováno, aby vzdálenost r [m] provlečeného vodiče byla od všech senzorů stejná. K rámcovému dodržení této podmínky je vhodné použít distanční kroužek. Rozměry ukazuje obrázek 8. Maximální hodnota proudu, kterou je schopen přístroj změřit je stanovena z upravené rovnice (3.12) na

$$I_{MAX\ VALUE} = \frac{2\pi r}{\mu_0 \mu_r} B_{MAX} = \pm \frac{2\pi \cdot 3 \cdot 10^{-2}}{4\pi \cdot 10^{-7}} 2 \cdot 10^{-3} = \pm 300\ A. \quad (4.6)$$

Maximální rozsah přístroje je třeba stanovit s ohledem na možné vychýlení provlečeného vodiče až k hraně průvleku. Maximální rozsah přístroje je třeba omezit na

$$I_{MAX} = \frac{2\pi r}{\mu_0 \mu_r} B_{MAX} = \pm \frac{2\pi \cdot 1 \cdot 10^{-2}}{4\pi \cdot 10^{-7}} 2 \cdot 10^{-3} = \pm 100\ A. \quad (4.7)$$



Obrázek 8: Rozměry průvleku ampérmetru. Všechny rozměry jsou v [mm]

4.4. Šířka pásma

Šířku pásma ampérmetru definuje šířka pásma senzoru DRV425, RC filtr na vstupu AD převodníku, šířka pásma samotného AD převodníku a použitý způsob sběru a vyhodnocení dat. V rámci realizované implementace jsem uvažoval pouze měření stejnosměrného proudu. I přesto zde zmíním možnosti přístroje, které budu realizovat v budoucnu.

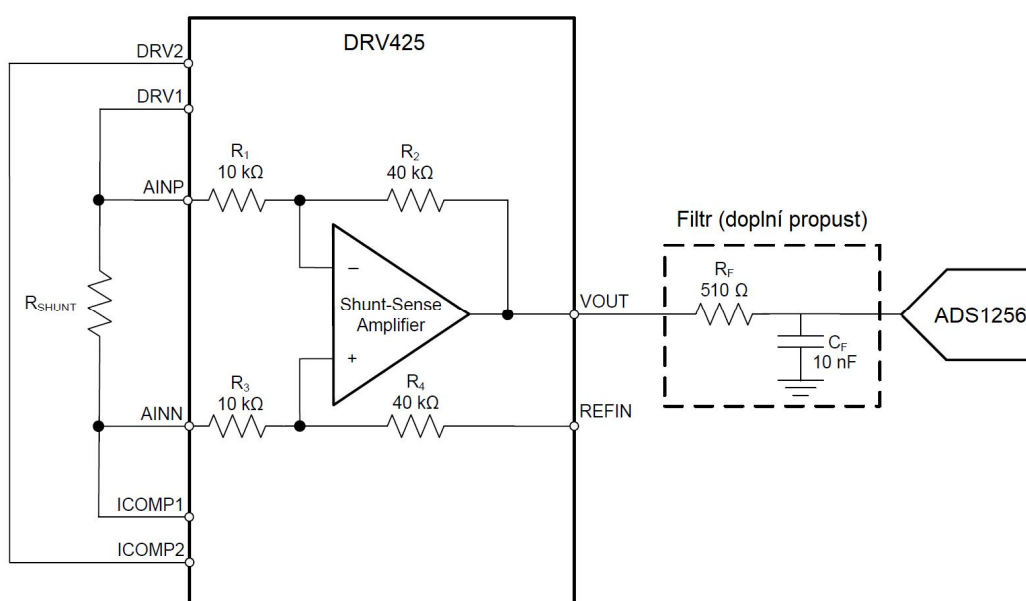
Šířku pásma DRV425 určuje integrátor umístěný za samotným fluxgate senzorem, viz obrázek 9. Integrátor je dimenzován tak, aby kompenzační smyčka vykazovala stabilní odezvu. Při volbě $R_{SHUNT} = 22 \Omega$ a BSEL = 0 je šířka pásma DRV425 $BW = 32 \text{ kHz}$. Šířku pásma lze ovlivnit na pinu 1 BSEL. Lze ji také redukovat volbou externího rezistoru podle rovnice (4.8)

Tabulka 3: Konfigurace šířky pásma DRV425 při $R_{SHUNT} = 22 \Omega$

Šířka pásma BW	Konfigurace
32 kHz	BSEL = 0
47 kHz	BSEL = 1

$$BW = \frac{122 \Omega}{100 \Omega + R_{SHUNT}} BW_{22\Omega}, \quad (4.8)$$

kde $BW_{22\Omega}$ představuje šířku pásma dle tabulky 3. Důležité je zmínit, že efektivní šířka pásma klesá s rostoucím magnetickým polem. Například pro rozkmit 2 mT je šířka pásma pouze $BW = 10 \text{ kHz}$.



Obrázek 9: RC filtr na vstupu AD převodníku ADS1256 (převzato a upraveno z [5])

Výstupní napětí senzorů DRV425 je filtrováno dolní propustí na obrázku 10 s mezní frekvencí

$$f_m = \frac{1}{2\pi R_F C_F} = \frac{1}{2\pi \cdot 510 \cdot 10 \cdot 10^{-9}} \doteq \underline{31,2 \text{ kHz.}} \quad (4.9)$$

Filtr slouží nejen pro omezení šumu, ale odděluje i vysokofrekvenční vzorkovací šum z AD převodníku. AD převodník AD1256 má při nastavené vzorkovací frekvenci 30 kSPS šířku pásma 6,106 kHz. Mimo uvedené, výslednou šířku pásma přístroje určuje také rychlost sběru dat ze všech senzorů, která je řízena mikrokontrolerem. Mikrokontroler provede sběr dat ze všech 8-mi senzorů jednou za 4,8 ms. K aktualizaci hodnoty proudu na LCD displeji dojde jednou za 300 ms. V budoucnu uvažuji o rozšíření frekvenčního rozsahu ze stejnosměrných proudů i na střídavé průběhy do 100 Hz.

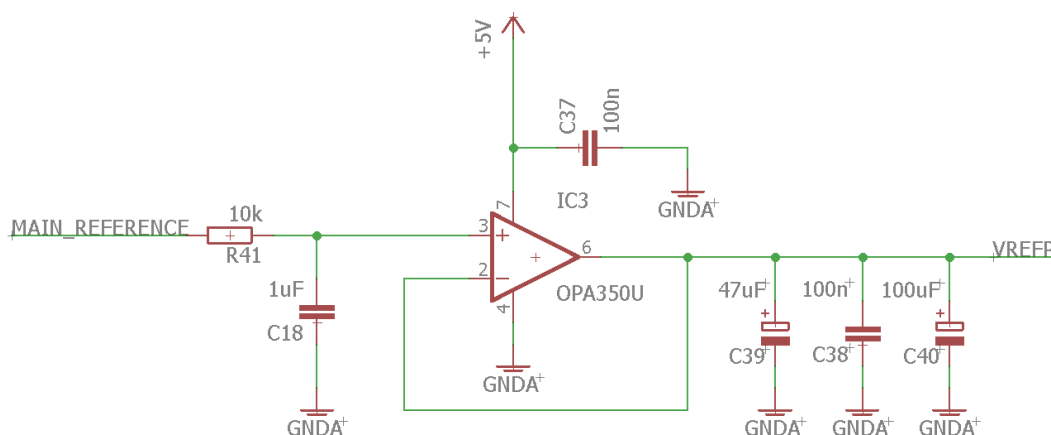
4.5. Napěťová reference

Čip DRV425 v sobě obsahuje integrovanou napěťovou referenci. Díky tomu se redukuje počet externích součástek opravdu na minimum. Referenci lze ovlivnit na pinech 2 RSEL1 a 3 RSEL0.

Tabulka 4: Konfigurace napěťové reference

Reference	RSEL1	RSEL0	Poznámka
$U_{REFOUT} = 2,5 \text{ V}$	0	0	Platí pro napájecí napětí $V_{DD} = 5 \text{ V}$
Radiometrický výstup	1	X ³	$U_{REFOUT} = V_{DD}/2$

Ve finálním provedení je vhodné, aby všechny čipy DRV425 měly společnou napěťovou referenci. Jinými slovy, na pin 5 REFIN je třeba přivést stejnou napěťovou referenci u všech čipů. Pro zlepšení vlastností napěťové reference je použit operační zesilovač OPA350 jako sledovač, viz obrázek 10.



Obrázek 10: Obvod sledovače napěťové reference

³ Hodnota „don't care“

Obdobně se stejná reference použije i pro AD převodník. Zde je velmi důležité si ujasnit, jak AD převodník zapojit a nastavit pseudodiferenciální vstup, kdy na kladný vstup AD převodníku je připojen výstup VOUT a na záporný vstup je připojena společná napěťová reference.

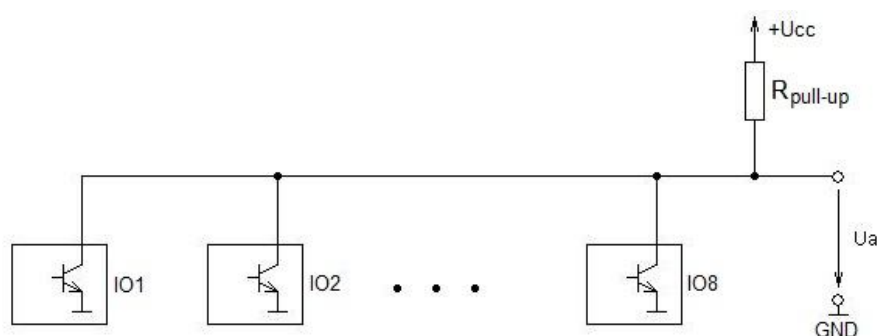
4.6. Indikace OVERRANGE a ERROR FLAG

Jak již bylo zmíněno několikrát, efektivní měřicí rozsah DRV425 je stanoven na $\pm 2\text{mT}$. Čip DRV425 je vybaven ještě dvěma digitálními piny 15 OR a 19 ERROR, které podávají informaci o přetečení a saturaci senzoru magnetického pole.

Tabulka 5: Indikace přetečení a saturace senzoru DRV425 při $VDD = 5\text{ V}$ a $R_{SHUNT} = 22\ \Omega$

OR	ERROR	Poznámka
0	0	Saturace senzoru: $B > 3,6\text{ mT}$
0	1	Přetečení: $2\text{ mT} < B \leq 3,6\text{ mT}$
1	1	Operační rozsah $-2\text{ mT} \leq B \leq 2\text{ mT}$
0	1	Přetečení: $-3,6\text{ mT} \leq B < -2\text{ mT}$
0	0	Saturace senzoru: $B < -3,6\text{ mT}$

Fluxgate senzor v DRV425 funguje tak, že vnější magnetické pole je kompenzováno tak, aby pole na senzoru bylo nulové. Přítomnost nenulového pole je způsobena nedostatečnou kompenzací a zároveň to znamená, že výstupní hodnota napětí U_{VOUT} není správná. Na čipu je indikována tak, jak ukazuje tabulka 5. Oba digitální výstupy jsou výstupy s otevřeným kolektorem, u kterých se vyžaduje nastavení klidové hodnoty pomocí externího pull-up rezistoru. Výstupy je možné pospojovat a použít pouze jeden pull-up rezistor. Potom každá jedna změna signálu do nuly indikuje změnu na společné lince (wired OR), jak názorně ukazuje obrázek 11.

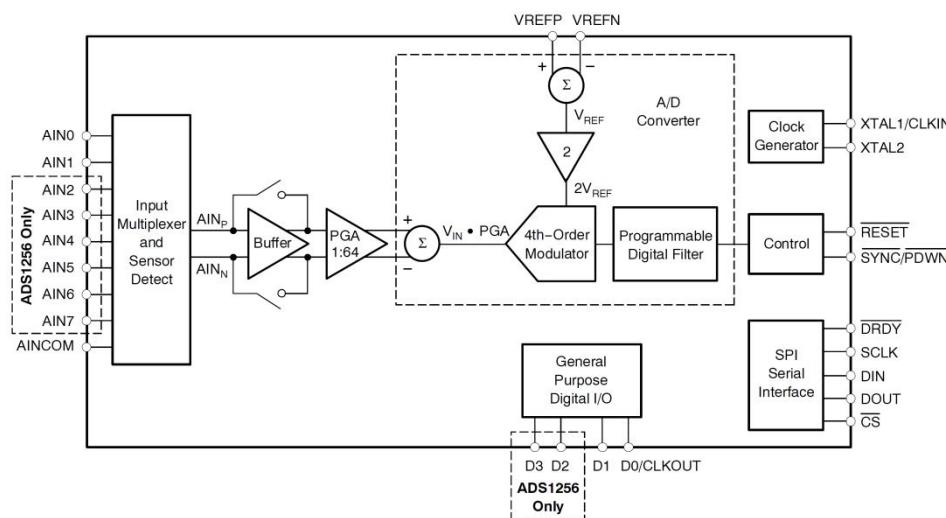


Obrázek 11: Funkce otevřeného kolektoru (upraveno z [22])

4.7. AD převodník

O digitalizaci napěťových signálů ze senzorů DRV425 se stará 8mi kanálový 24-bitový AD převodník ADS1256 [23]. Jedná se o integrační převodník se Σ - Δ modulátorem čtvrtého řádu ve spojení s programovatelným digitálním filtrem. Na blokovém diagramu (obrázek

12) je vidět vstupní multiplexor, buffer, předzesilovač a také obvody pro sériovou komunikaci SPI.



Obrázek 12: Blokové schéma AD převodníku ADS1256 [23]

Přes rozhraní SPI lze nastavovat 11 vnitřních registrů AD převodníku, a tím měnit například zesílení, vzorkovací kmitočet nebo funkci vstupního multiplexoru. Obvod AD převodníku ukazuje obrázek 13. Ve schématu je červeně naznačena drátová propojka, které byla dodatečně na prototypu realizována. Po této úpravě v ideálním případě odpovídá výstupní binární číslo vstupnímu signálu dle tabulky 6, avšak za předpokladu, že na předzesilovači je nastaveno zesílení 2x.

Tabulka 6: Repräsentace digitalizovaného vstupu v ADS1256

Vstupní signál	Výstupní binární hodnota
0 V	0x800000
(0 V ÷ 2,5 V)	0x800001 ÷ 0xFFFFF
2,5 V	0x000000
(2,5 V ÷ 5 V)	0x000001 ÷ 0x7FFFFE
5 V	0x7FFFFF

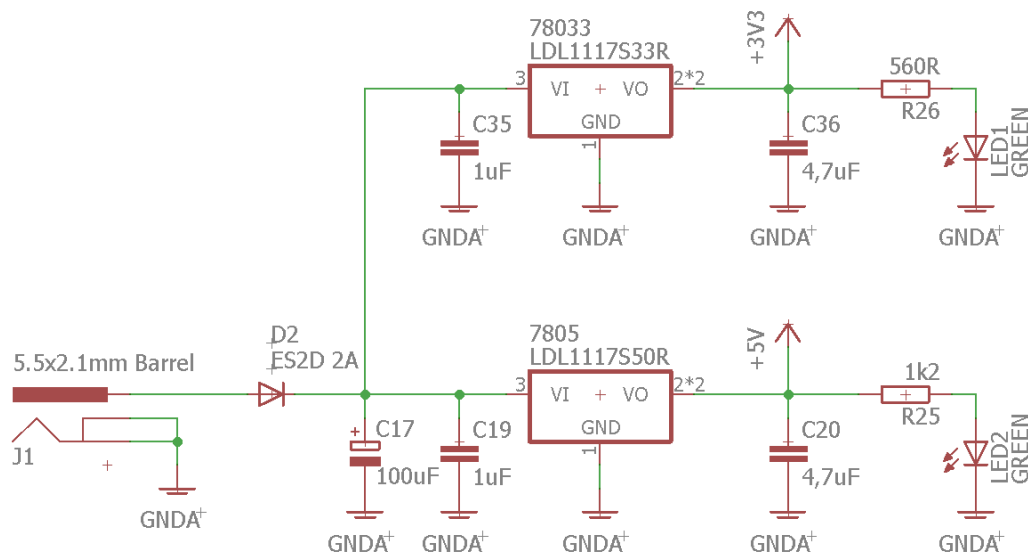
4.8. Mikrokontroler

Funkci ampérmetru řídí mikrokontroler STM32F103TB. Jedná se o 32-bitový ARM procesor s jádrem Cortex-M3 vybaveným komunikačními rozhraními SPI, I2C, UART, USB a dalšími. Procesor podporuje programování a zároveň debugování přes rozhraní SWD (serial wire debug). Mikrokontroler komunikuje s AD převodníkem přes SPI rozhraní. Touto komunikací lze nastavovat parametry AD převodníku a také vyčíst digitalizovaná data. LCD displej 16x2 je připojen na I2C sběrnici přes expandér PCF8574. Rozhraní UART je určeno pouze pro servisní potřeby a USB rozhraní je připraveno pro budoucí připojení k počítači. K ovládání přístroje slouží dvě uživatelská tlačítka a tlačítko RESET. Pro případnou indikaci

jsou pak k dispozici dvě LED diody (červená a oranžová), které sdílí jeden pin, a díky třístavové logice je možné rozsvítit jednu, druhou, obě nebo žádnou z diod. [24]

4.9. Napájecí zdroj

Přístroj je dodáván se síťovým napájecím adaptérem 7,5V/2400mA se souosým konektorem 5,5/2,1 mm. Pro stabilizaci napájecího napětí jsou využity třísvorkové low-drop stabilizátory LDL1117 se sériovou diodou jako ochranou proti přepólování. Napětí na výstupu stabilizátorů indikují zelené LED diody. Viz obrázek 13. [25]



Obrázek 13: Obvod napájecího zdroje ampérmetru

Hodnota síťového napájecího zdroje zohledňuje součet nejvyššího požadovaného napájecího napětí $V_{CC} = 5\text{ V}$ a úbytků napětí na stabilizátorech a předřadné diodě, viz [26] a [25], podle vztahu (4.10)

$$U_{CC} = V_{CC} + U_{F(ES2D)} + U_{drop(LDL1117)} = 5 + 0,9 + 0,35 = \underline{6,25\text{ V}}. \quad (4.10)$$

Alternativně lze k napájení přístroje použít USB konektor. Zde je však třeba zaručit dostatečný napájecí proud, který například samotný USB port počítače nemusí být schopen poskytnout.

5. Návrh, výroba a osazení DPS

5.1. Technologie výroby DPS

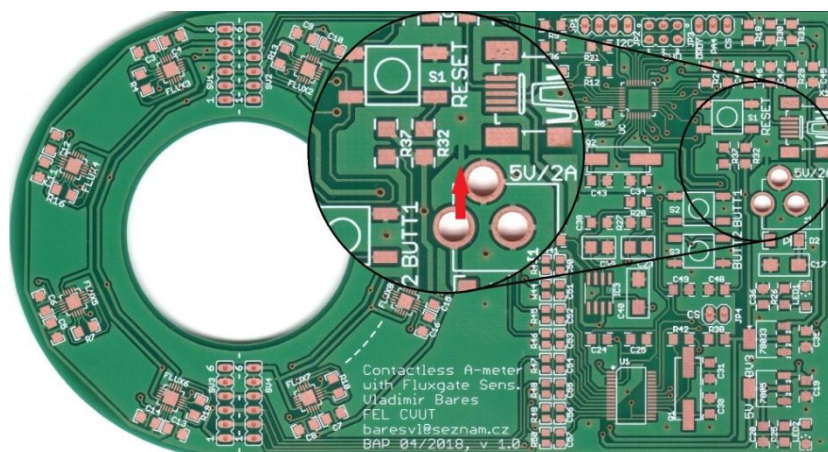
Elektronický obvod přístroje je realizován na dvouvrstevném plošném spoji. Jedná se o klasický materiál FR4 (tkanina ze skelných vláken sycená epoxidovou pryskyřicí) tloušťky 1,55 mm s Cu plátováním 35/35 μm . Plošný spoj je navržen v návrhovém programu EAGLE, je proveden převážně pro povrchovou montáž SMT a respektuje, až na několik výjimek, třídu přesnosti 4. Třída přesnosti vymezuje především minimální šířku spojů (12 mil)⁴, izolační vzdálenost (12 mil) nebo průměry vrtaných děr (28 mil) nebo padů [27]. U footprintů pouzder WQFN-20, VFQFPN-36 a SSOP-28 je třída přesnosti překročena, jelikož izolační vzdálenost padů dosahuje i méně než 8 mil. Výrobce desek plošných spojů (zkr. DPS) PRINTED s.r.o. však garantuje bezproblémovou výrobu pro šířku spojů i izolačních mezer od 0,2 mm. Pro funkci navrhovaného přístroje bylo podstatné především rozmístění a pozicování součástek na DPS a její povrchová úprava. Data pro výrobu jsou uvedena v části 11. přílohy a gerber-file jsou uloženy na přiloženém DVD.

Pájka Sn63/Pb byla zakázána a pájení bezolovnatou pájkou není tak pohodlné, například má vyšší teplotu tavení. Z tohoto důvodu se povrchová úprava plošek DPS odklonila od klasického halování (pocínování, v dnešní době např. pájkou Cn100C) i k jiným technologiím. Velmi detailně postup technologie popisuje výrobce DPS v [28]. Alternativou k halování je například galvanické zlacení kontaktů nebo technologie OSP, tzv. pasivovaná měď.

Výrobce senzorů Texas Instruments v [21] nedoporučuje používat Ni-Au povrchovou úpravu kontaktů z důvodu potenciální možnosti zmagnetování. Obdobně nedoporučuje v blízkosti senzorů umísťovat větší počet prokůvů. V tabulce 1. je zlato (Au) řazeno do skupiny diamagnetických látek, avšak nikl (Ni) je látka feromagnetická. Z důvodu dobré „pájivosti“ je však nikl důležitou složkou této povrchové úpravy. Výrobce PRINTED s.r.o. je schopen povrchovou úpravu udělat i pouze pozlacením, ale dobré zkušenosti s tím nemají. Ni-Au povrchová úprava se však vyznačuje velmi rovnými pájecími plochami a mimo jiné i odolností při opakovaném pájení.

Na realizované DPS je použita technologie pasivované mědi (OSP). Přesněji se jedná o organický povlak MEC SEAL 5018, který zabraňuje oxidaci čerstvě oleptané mědi. Díky této metodě nevznikají na pájecích ploškách nerovnosti jako u halování, avšak doba skladování je cca 6 měsíců. Na výsledné desce je pak nanášena zelená nepájivá maska, která je pro pájení zmiňovaných pouzder nezbytná, a bílý servisní potisk.

⁴ 1 mil = 0,001 inch = 0,0254 mm

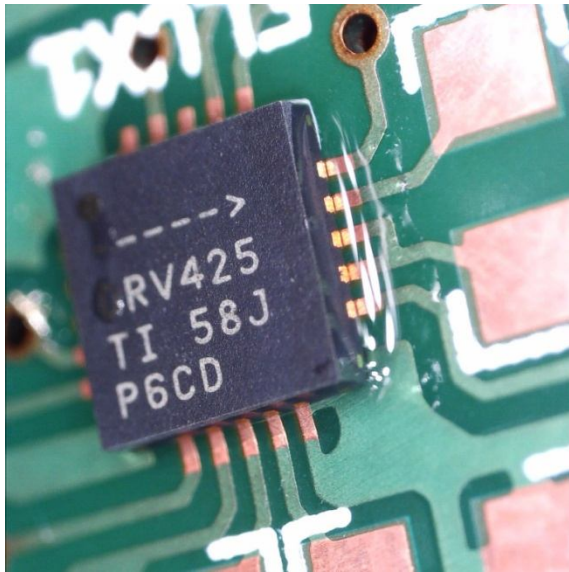


Obrázek 14: Detail výsledné DPS

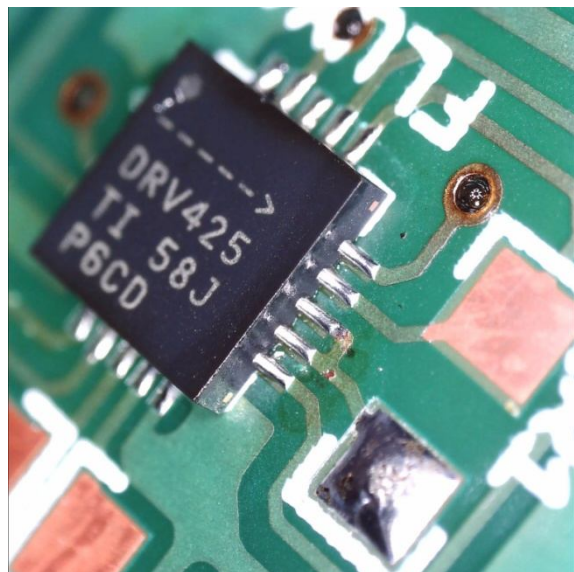
Přesné rozmístění součástek bylo důležité zejména v sensorické části. Bylo třeba respektovat rozměry stanovené v 4.3. Pro snížení vlivu vnějšího magnetického pole bylo třeba co nejvíce oddělit zbývající součástky od sensorické části. Aby se snížilo rušení mezi analogovou a digitální částí obvodu, jsou analogová a digitální zem odděleny, a jejich spojení je realizováno v jednom bodě, viz obrázek 14. Jelikož se jedná o prototyp přístroje, byl zvolen rozměr SMD součástek větší velikosti 1206 nebo 0805, aby bylo možné lépe realizovat dodatečné úpravy.

5.2. Osazení

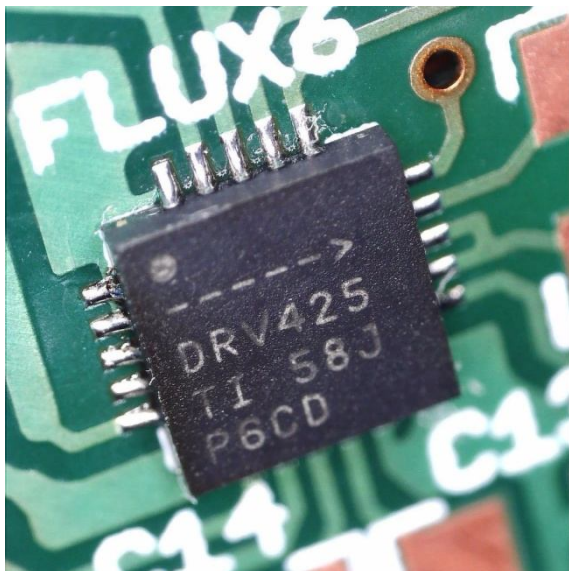
Elektronické součástky byly pájeny cínovou pájkou Sn99,3Cu0,7 s bodem tavení 227°C pomocí hrotové mikropáječky. Jako tavidlo byla většinou použita klasická kalafuna, u které je bod tavení cca 80°C. U pouzder, kde je důležité přesně kontrolovat pozici součástky, jsem použil jako tavidlo kalafunové želé. Díky jeho lepkavé konzistenci bylo možné součástku přesně umístit a zároveň poté kontrolovat její umístění pod mikroskopem ze všech úhlů, aniž by se součástka uvolnila ze své pozice. Po nahřátí hrotu na cca 300°C bylo možné nanést cín na pájecí plošky a kontakty pouhým prohřátím místa pájení a díky nepájivé masce se cín rozlil. Dodatečné úpravy už bylo možné provést pájením s klasickou kalafunou. Několik detailů ukazují obrázky 15 – 18. Pájecí plošky je před pájením vhodné očistit izopropylalkoholem. Kapalina slouží pro odmašťování pájecích plošek a zároveň jako čisticí prostředek pro odstranění zbytků kalafuny z osazeného spoje.



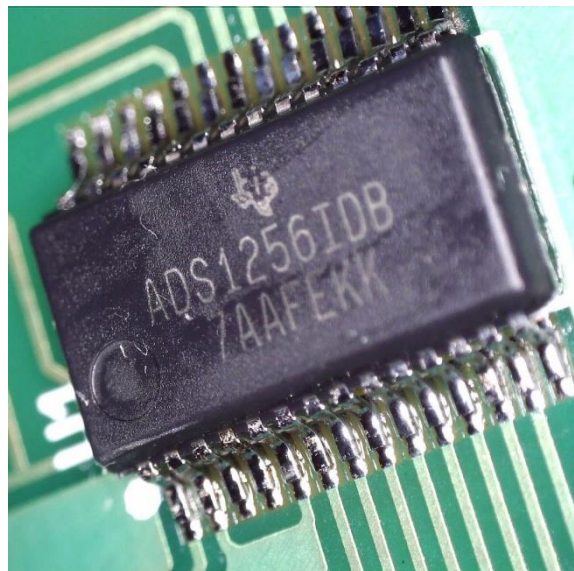
Obrázek 15: Usazené pouzdro QFN-20 na kalafunovém žele



Obrázek 16: Připájené pouzdro QFN-20



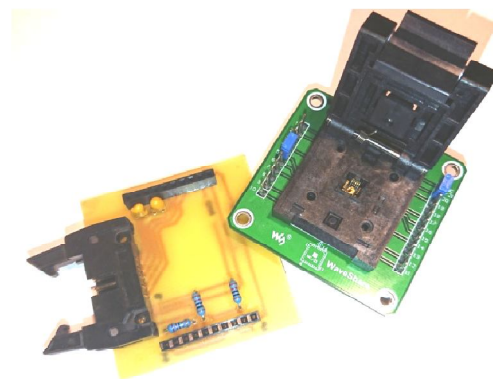
Obrázek 17: Připájené pouzdro QFN-20



Obrázek 18: Připájené pouzdro SSOP-28

5.3. Oživení

Pro sestavení přístroje jsem měl k dispozici 8 fluxgate senzorů DR425, a všech 8 senzorů bylo třeba v přístroji použít. Abych předešel případným chybám, testoval jsem základní obvod senzoru ještě před osazením DPS. Využil jsem externí patici na pouzdra QFN-20, na obrázku 19, doplněnou o desku s nejn nutnějšími součástkami, kterou jsem sestavil jako násuvný shield s konektorem. Funkci senzoru bylo možné ověřit voltmetrem. Výstupní napětí senzoru se měnilo v závislosti na magnetickém poli Země, což jsem ověřil kompasem. Alternativně bylo možné použít i tyčový magnet. Jelikož ale samotná patice není z diamagnetického materiálu, nebylo vhodné permanentním magnetem patici zmagnetovat.



Obrázek 19: Patice na součástky QFN-20

Při ožiování přístroje jsem využil indikačních LED diod a také tlačítek. Oba stabilizátory jsou vybaveny zelenou indikační LED diodou. Obdobně na jednom pinu mikrokontroleru jsou k dispozici LED diody například právě pro oživení nebo debugování programu.

5.4. Dodatečné propojky

V prototypu bylo třeba dodatečně udělat tři úpravy. První se týkala konektoru miniUSB, bylo třeba dodatečně prohodit datový pin D- a pin ID. Druhá úprava byla provedena na LCD panelu, a to propojením GND pro nepřetržitě podsvícení. A v poslední řadě byl common pin AINCOM AD převodníku ADS1256 [23] přiveden na společnou referenci 2,5 V. Poslední úprava byla významná především pro zpracování symetrického signálu s umělou zemí v 2,5 V z fluxgate senzoru v AD převodníku, který v single-ended režimu vyžaduje nastavení common pinu právě do společné umělé země.

5.5. Programování

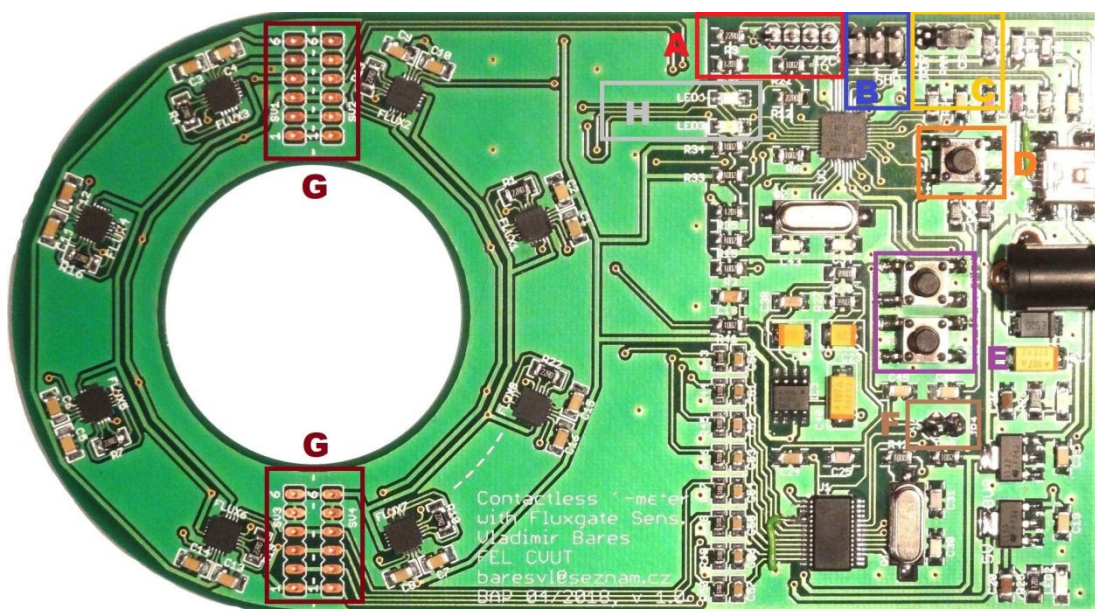
Programování mikrokontroleru probíhalo přes SWD interface, který umožňuje pomocí tří signálů naprogramovat mikroprocesor zabudovaný v cílové aplikaci a program také debugovat.

Program v mikrokontroleru je velmi jednoduchý. Pracuje ve třech smyčkách, mezi kterými lze přecházet stiskem příslušného tlačítka. První smyčka je klasická měřící smyčka, dochází v ní ke sběru dat ze sensorů, jejich úpravě a zobrazení na LCD displeji. Druhou smyčku nazývám debugovací, jelikož přes UART posílá hodnoty registrů AD převodníku a další hodnoty, které slouží k lepšímu sepisování přístroje. Poslední smyčkou je smyčka kalibrační, která slouží k eliminaci offsetu přístroje.

V rámci programu, který byl psán ve vývojovém prostředí KEIL μ Vision 4, jsem implementoval knihovnu pro komunikaci s AD převodníkem ADS1256 a knihovnu pro komunikaci s LCD displejem pomocí I2C sběrnice. Pro zjednodušení programování jsem základní nastavení mikrokontroleru vygeneroval v programu CubeMX od společnosti ST Microelectronics a používal při implementaci programu HAL knihovny.

6. Popis funkce

Navržený bezkontaktní ampérmetr se spustí bezprostředně po připojení napájecího napětí. Poté doporučuji stisk tlačítka RESET (D), aby došlo k řádnému nastavení nejen mikrokontroleru, ale i AD převodníku nebo LCD displeje. Než započne smyčka programu, dojde k nastavení těchto periférií. Programová smyčka započne ihned po nastavení periférií. Od této doby již dochází k pravidelnému sběru dat a zobrazování příslušné hodnoty proudu na LCD displeji. LCD displej se k přístroji připojuje pomocí 4 vodičů GND, VCC, SDA a SCL na headeru (A). Aby bylo měření korektní, je třeba před provlečením vodiče provést kalibraci přístroje. Kalibrace proběhne po stisku uživatelského tlačítka 1 (E). Tímto se koriguje offset přístroje. Nyní je možné provléci měřícím otvorem vodič a měřit protékající proud. Kalibraci je možné vyvolat kdykoliv podle potřeby.



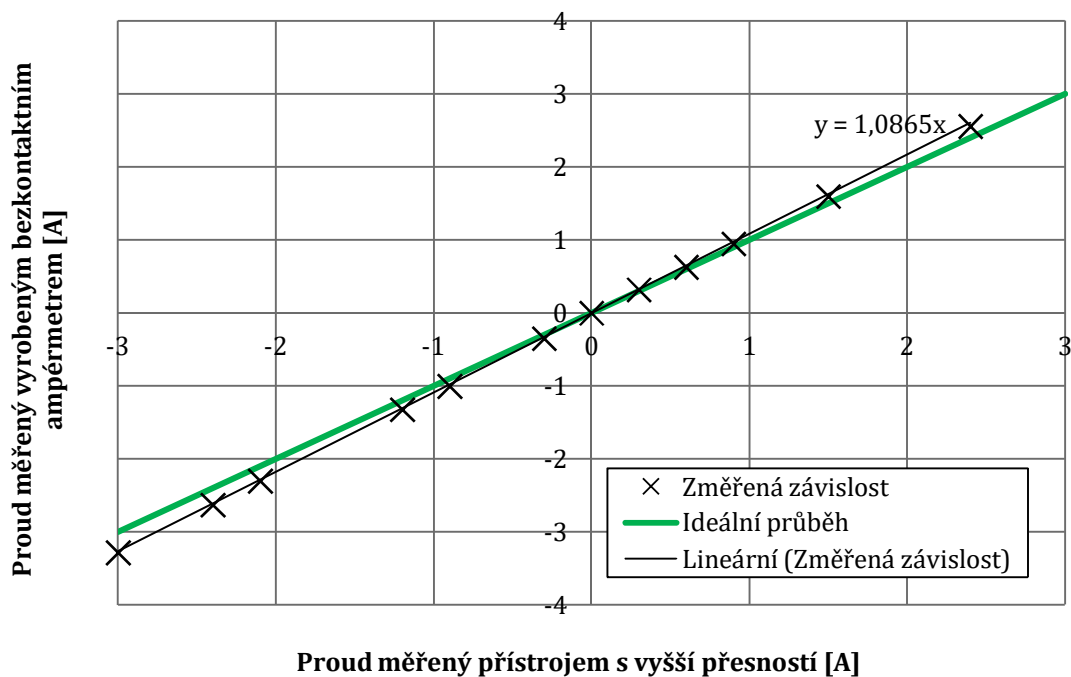
Obrázek 20: Popis jednotlivých částí realizovaného přístroje

Uživatelské tlačítko 2 (E) slouží k výpisu servisních parametrů přes UART a uplatní se především při debugování. Header (B) slouží pro programování a debugování mikrokontroleru přes SWD rozhraní. Header (C) umožňuje jumperem nastavit jeden ze signálů DRDY nebo CS pro zpracování na GPIO (General-Purpose Input/Output) pinu procesoru. Header (F) lze využít v případě komunikace přes rozhraní SPI výhradně s AD převodníkem – pak musí být osazen jumperem.

Často může být problém vodič protékající proudem provléknout otvorem ampérmetru. Z tohoto důvodu je připravena možnost průvlek ampérmetru otevřít. Pak se pady (G) osadí vhodným konektorem.

7. Parametry přístroje

Ampérmetr vykazuje aditivní chybu, která je vidět hned po spuštění přístroje – na displeji se nezobrazí nula, ale i chybu multiplikativní. Multiplikativní chybu lze určit měřením elektrického proudu ve vymezeném rozsahu a jeho porovnáním s měřením téhož proudu přesnějším přístrojem *METEX ME-32* (rozsah 20 A, přesnost $\pm 2\% \pm 5$ digits, rozlišení 10 mA). Čím větší je proměřovaný rozsah, tím přesnější je určení chyby. Směrnice změřené lineární závislosti pak odpovídá multiplikativní chybě. Obrázek 21 ukazuje tuto závislost na ještě nezkompenzovaném přístroji.

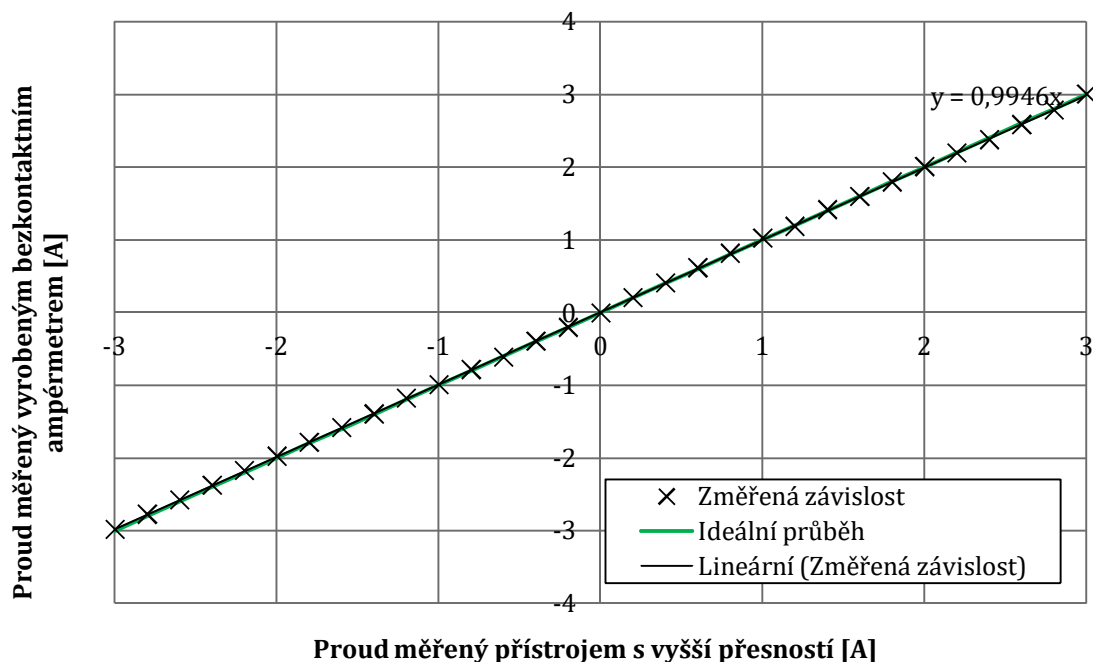


Obrázek 21: Závislost skutečného proudu vodičem na změřené hodnotě realizovaným ampérmetrem

Změřené hodnoty jsem proložil lineárním fitem a multiplikativní chybu stanovil ze směrnice fitu. Následně jsem v programu implementoval korekci dle rovnice (3.12) následovně

$$I = \left(\frac{1}{\kappa}\right) \cdot \frac{2\pi r}{\mu} B = (0,92039) \cdot \frac{2\pi r}{\mu} B, \quad (8.1)$$

kde κ [-] je směrnice lineárního fitu. Na obrázku 22 je tatáž závislost po korekci.



Obrázek 22: Závislost skutečného proudu vodičem na změřené hodnotě realizovaným ampérmetrem po aplikaci korekce multiplikativní chyby

Použitý rozsah při měření ± 3 A je velmi malý. Byl však takto zvolen s ohledem na možnosti použitého zdroje proudu RXN-303D 0-30V/3A.

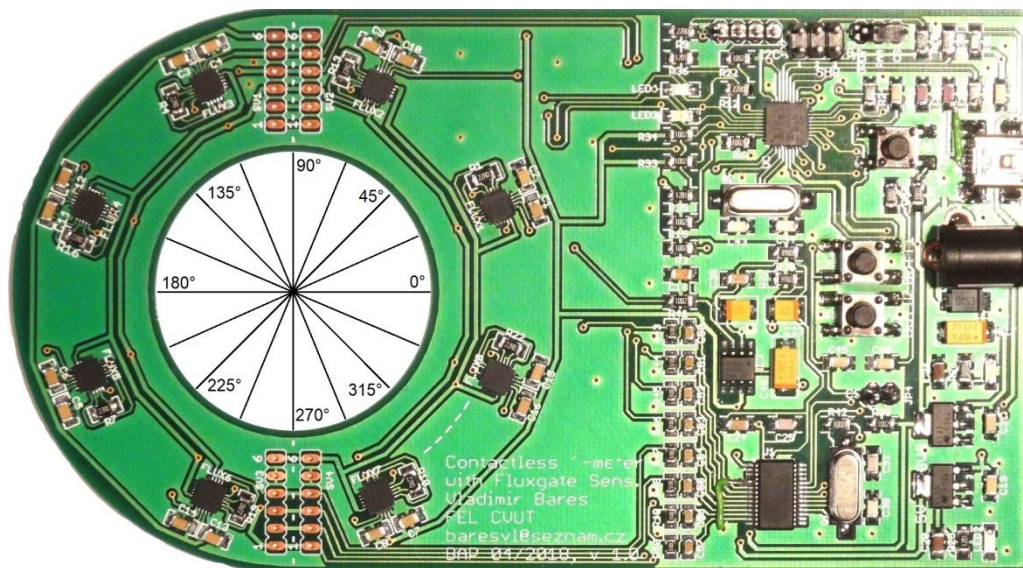
K eliminaci aditivní chyby slouží kalibrace přístroje, která se spustí po stisku uživatelského tlačítka 1. Kalibrace je založena na průměrování většího počtu měření při nulovém proudu tekoucím provlečeným vodičem. Tato hodnota je pak odečtena od původně zobrazované hodnoty.

Multiplikativní chybu do měření vnáší pravděpodobně AD převodník. Aditivní chyba je způsobena v největší míře offsetem DRV425 senzorů, viz tabulka 2. Offset senzoru se pohybuje v rozmezí ± 2 μ T, což odpovídá dle vztahu (3.12) offsetu proudu

$$I_{OFF} = \frac{2\pi r}{\mu_0 \mu_r} B_{OFF} = \pm \frac{2\pi \cdot 3 \cdot 10^{-2}}{4\pi \cdot 10^{-7}} 2 \cdot 10^{-6} = \pm 0,3 \text{ A.} \quad (8.2)$$

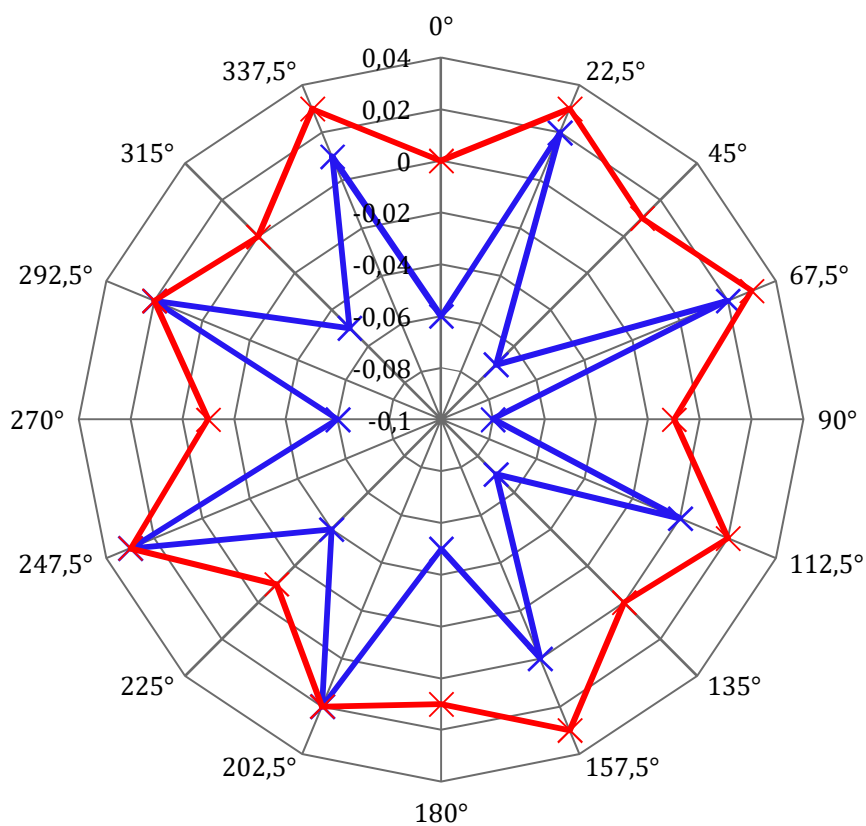
Díky symetrickému uspořádání senzorů je okolní homogenní magnetické pole, například zemské pole, prakticky bezzbytku eliminováno. Na jednom senzoru se příspěvek pole přičte a na protilehlém senzoru se naopak příspěvek vnějšího pole odečte. Příspěvky magnetického pole blízkých vodičů už tak dokonale eliminovány nejsou.

Další chyba při měření proudu nastává po vychýlení vodiče ze středu průvleku. Abych tuto chybu vizualizoval, rozdělil jsem si kruhový průvlek na 16 dílů, jak je ukázáno na obrázku 23.



Obrázek 23: Naškálování průvleku ampérmetru po úhlu 22,5°

Obrázek 24 ukazuje průběhy změřeného proudu průvlekovým ampérmetrem v příslušné vzdálenosti od středu průvleku. Z grafu je vidět, že s rostoucí vzdáleností od středu průvleku chyba měření roste.



- × Rozdíl naměřené hodnoty bezkontaktním ampérmetrem a nominální hodnoty proudu 1,5 A procházející provlečeným vodičem ve vzdálenosti 20 mm od středu průvleku [A]
- × Rozdíl naměřené hodnoty bezkontaktním ampérmetrem a nominální hodnoty proudu 1,5 A procházející provlečeným vodičem ve vzdálenosti 15 mm od středu průvleku [A]

Obrázek 24: Závislost proudu na poloze vodiče v průvleku (úhlu ve smyslu obrázku 23) pohybujícího se po kružnici se středem ve středu průvleku

Základní parametry realizovaného ampérmetru přehledně shrnuje tabulka 7.

Tabulka 7: Základní parametry realizovaného ampérmetru

Rozlišovací schopnost	0,01 A
Maximální rozsah	±300 A
Relativní chyba	5,3%

8. Shrnutí řešení

Hlavním cílem práce bylo navrhnout bezkontaktní ampérmetr založený na principu měření magnetického pole kolem vodiče protékaného elektrickým proudem. Tohoto cíle bylo dosaženo pomocí magnetických senzorů fluxgate DRV425. Na základě předchozích zkušeností s touto problematikou, viz [30], byla zvolena vhodná konfigurace těchto senzorů – 8 symetricky uspořádaných senzorů kolem otvoru na vodiči. Je to jistý kompromis mezi důslednou implementací integrálu z rovnice (3.11) a složitostí návrhu vlastního přístroje. Po sestavení přístroje podle blokového schématu na obrázku 6 byl mikrokontrolerem vypočten elektrický proud procházející provlečeným vodičem pouhou implementací rovnic (3.12) a (4.4). Vyššího rozlišení a nižší chybovosti bylo dosaženo naprogramováním kalibrační smyčky, po jejímž proběhnutí již přístroj zobrazuje hodnotu elektrického proudu s požadovanou rozlišovací schopností minimálně 50 mA. Ampérmetr má rozsah ± 300 A, a s chybou 5,3% měří proud i mimo střed průvleku. Hodnota elektrického proudu se zobrazuje na LCD displeji. Přístroj má připraven interface pro komunikaci s počítačem přes port USB. Alternativně lze využít i komunikaci přes UART, která slouží pro servisní účely. Přes UART se posílají některých registrů, které programátorovi podávají detailní informaci co se uvnitř systému děje. Největší úsilí bylo věnováno návrhu vlastního obvodu přístroje tak, aby byl co nejkompaktnější a bylo možné v budoucnu využít všech jeho funkcionalit. Jedná se například o indikaci saturace nebo přetečení magnetických senzorů pomocí flagů, které generuje přímo integrovaný DRV425 senzor. Dalším poměrně důležitým úkolem je měření i střídavého proudu o frekvenci alespoň 50 nebo i 100 Hz. Kromě těchto základních úkolů je třeba také navrhnout aplikaci do počítače, která umožní záznam měřených dat a jejich další zpracování.

Závěrem bych chtěl dodat, že fluxgate senzory magnetického pole integrované do čipu DRV425 se osvědčili v problematice bezkontaktního měření proudu. Tyto integrované obvody jsou velmi jednoduše použitelné, což zjednodušuje celou konstrukci, čímž se snižují i náklady na výrobu.

9. Literatura

- [1] V. Šanderová, J. Kracík, Fyzika, Praha: SNTL, 1989, ISBN 80-03-00170-6
- [2] J. Brož, V. Roskovec, M. Valouch, Fyzikální a matematické tabulky, Praha: SNTL, 1980
- [3] L. Haňka, Teorie elektromagnetického pole, Praha: SNTL, 1975
- [4] Z. Horák, F. Krupka, Fyzika, Praha: SNTL, 1981
- [5] E. Mechlová, K. Košťál za kol., Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurz, Praha: PROMETHEUS, 2001, ISBN 80-7196-151-5
- [6] B. Sedlák, I Štoll, Elektřina a magnetismus, Praha: ACADEMIA, 2002, ISBN 80-200-1004-1
- [7] „BIPM,“ 2. 5. 2018. [Online]. <https://www.bipm.org/en/si-download-area/>
- [8] „ÚNMZ,“ 2. 5. 2018. [Online]. <http://www.unmz.cz/urad/unmz>
- [9] „BIPM,“ 2. 5. 2018. [Online]. <https://www.bipm.org/metrology/electricity-magnetism/units.html>
- [10] V. Srovnal, Elektrotechnická měření, Praha: BEN, 2003, ISBN 80-7300-022-9
- [11] V. Haasz, J. Novák, Měření na číslicových obvodech, Praha: ČVUT, 2006
- [12] K. Tkotz, Příručka pro Elektrotechnika, Praha: Europa-Sabotáles, 2002, ISBN 80-86706-00-1
- [13] J. Přibyslavský a kol., Příručka silnoproudé elektrotechniky, Praha: SNTL, 1961
- [14] V. Bareš, „ČVUT MMP2017: Voltmetr s dvojsklonnou integrací řízeny STM32L100RC,“ Praha, 2017
- [15] J. Vedral, J. Fischer, Elektronické obvody pro měřící techniku, Praha: ČVUT, 2004, ISBN 80-01-02966-2
- [16] V. Fajt, J. Hrabák, M. Jakl, Elektrická měření, Praha: ČVUT, 1986
- [17] J. Brož a kol., Základy fyzikálních měření (I), Praha: SPN, 1983
- [18] 24. 5. 2018. [Online]. <https://semresearch.files.wordpress.com/2011/08/fluxgate1.png>
- [19] Evans, K., „Fluxgate Magnetometer Explained,“ INVASENS, Cheltenham, 2006
- [20] CH. Lu, J. Huang, P-K. Chiu, S-L. Chiu, J-T. Jeng, „High-Sensitivity Low-Noise Miniature Fluxgate Magnetometers Using a Flip Chip Conceptual Design,“ *Sensors*, sv. 14, pp 13815-13829, 2014, ISSN 1424-8220

- [21] Texas Instruments, „Datasheet DRV425 Fluxgate Magnetic-Field Sensor,“ 2016
[Online]. <http://www.ti.com/>
- [22] „Wikimedia Commons,“ 24. 5. 2018. [Online].
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c7/Open-Collector-Prinzip.JPG>
- [23] T. Instruments, „Datasheet ADS1256 Very Low Noise, 24-Bit AD Converter,“ 2013
- [24] ST Microelectronics, „Datasheet STM32F106TB ARM-based 32-bit MCU,“ 2015
[Online]. <http://www.st.com/>
- [25] ST Microelectronics, „Datasheet LDL1117 linear voltage regulator,“ 2017
[Online]. <http://www.st.com/>
- [26] VISHAY, „Datasheet ES2D ultrafast plastic rectifier,“ 2017
- [27] V. Záhlava, OrCAD pro Windows, Praha: GRADA, 1999, ISBN 80-7169-876-8
- [28] PRINTED s.r.o., „printed.cz,“ 11. 4. 2018. [Online]. <http://www.printed.cz/rs/osp-947>
- [29] Š. Uxa, E. Belas, R. Grill, P. Praus, J. Franc, V. Dědič, R. B. James, L. Šedivý, J. Pekárek, V. Bareš, „Poster - Determination of Electric Field Profile in CdTe and (CdZn)Te Detectors Using Transient-Current Technique,“ IEEE Nuclear Science Symposium, 2011
- [30] P. Mlejnek, Průvlekový měřič proudu s anizotropními magnetorezistory, DP ČVUT, Praha, 2005

10. Seznam příloh

Příloha 1: Pohled na navržený ampérmetr

Příloha 2: Elektrické schéma navrženého ampérmetru

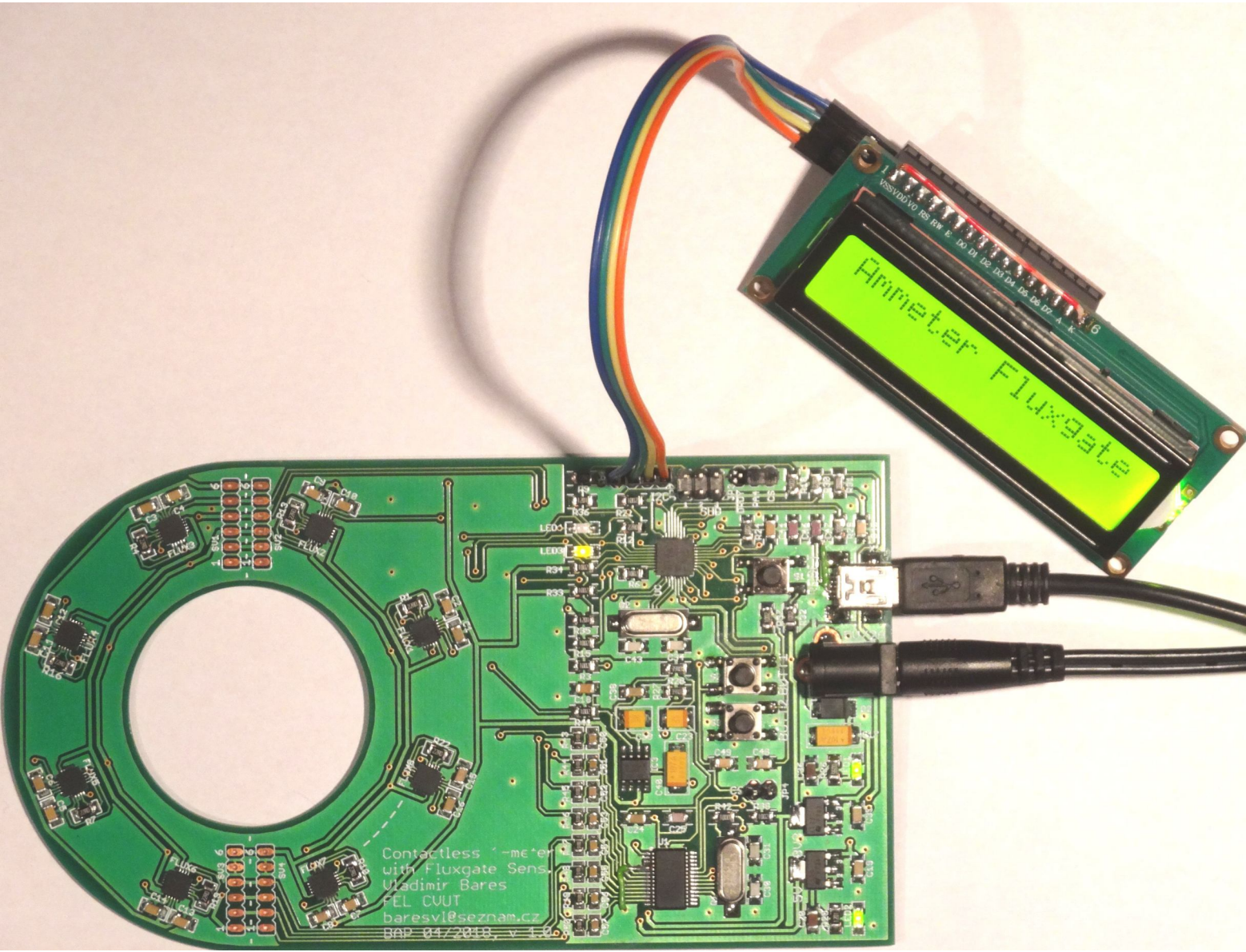
Příloha 3: Deska plošných spojů – Layer TOP

Příloha 4: Deska plošných spojů – Layer BOTTOM

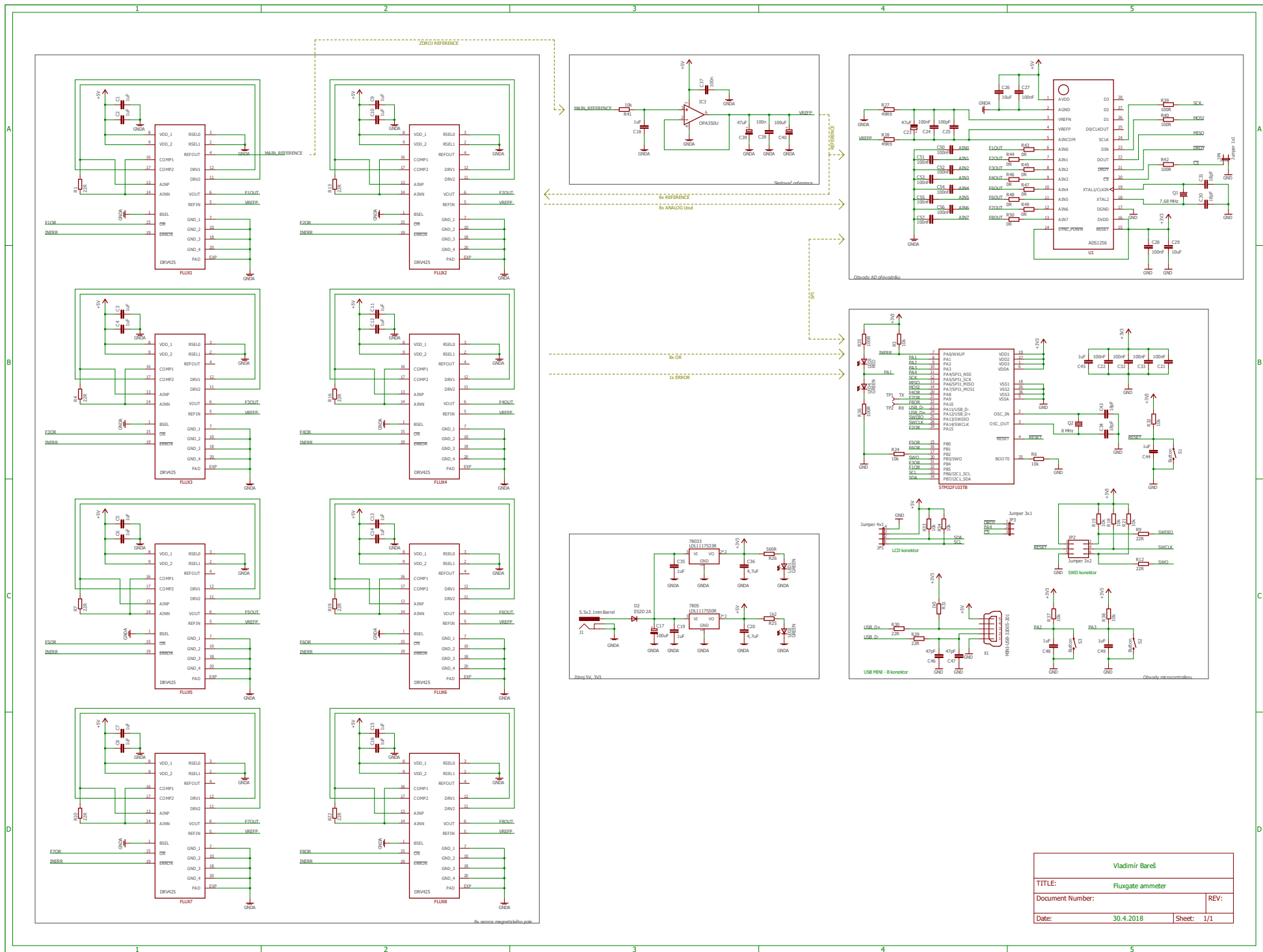
Příloha 5: Deska plošných spojů – Silkscreen TOP

Příloha 6: Deska plošných spojů – Silkscreen BOTTOM

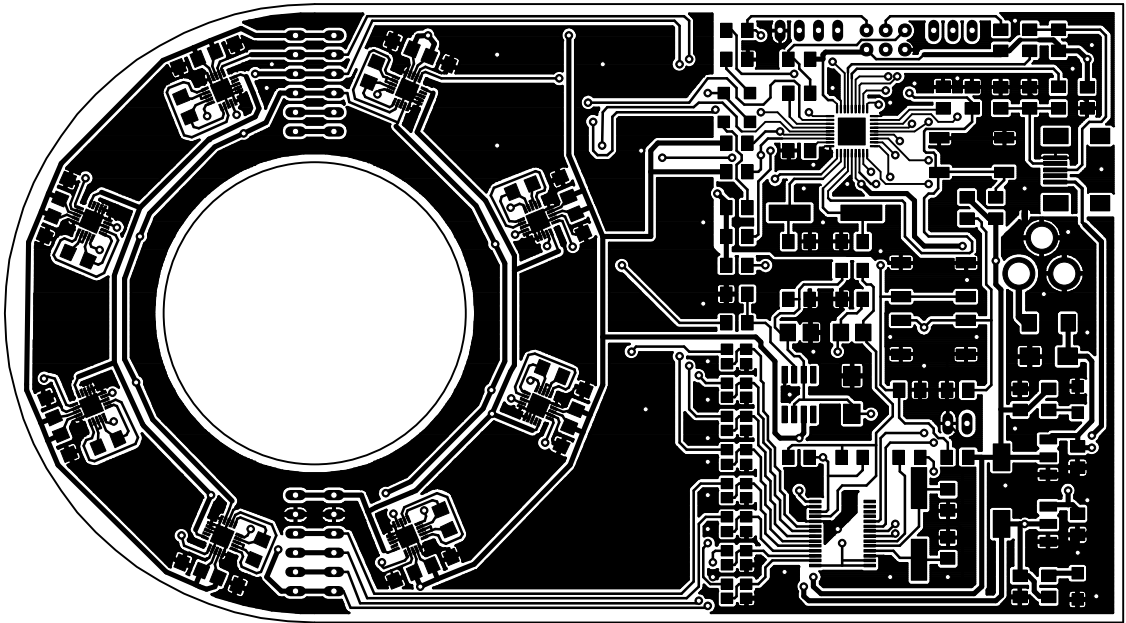
Příloha 7: Deska plošných spojů – Bill of Materials (BOM)

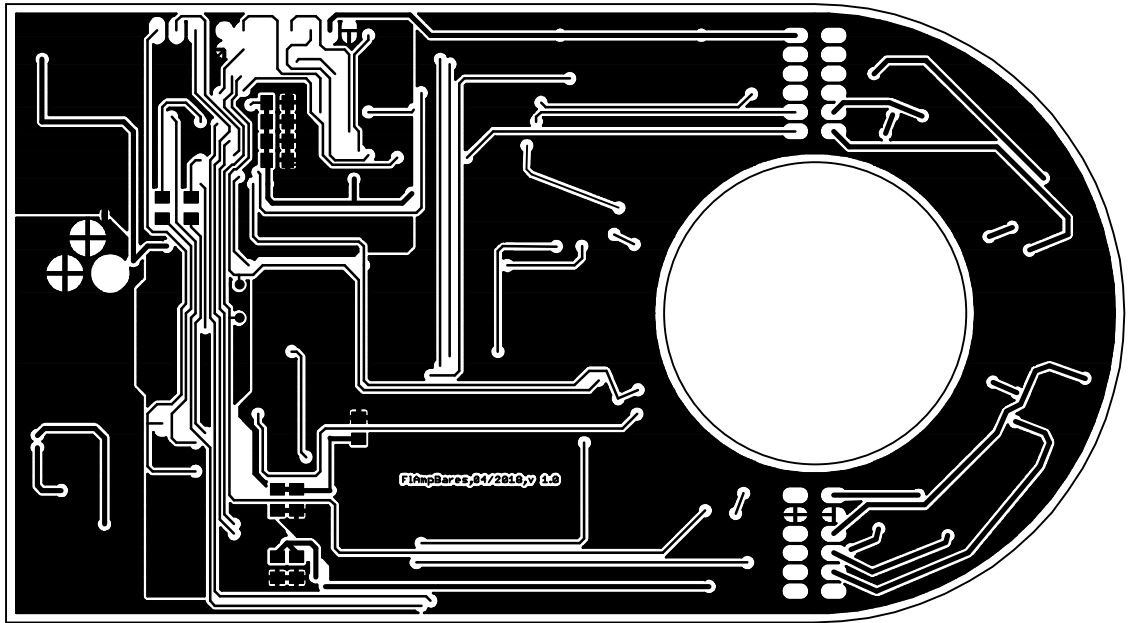


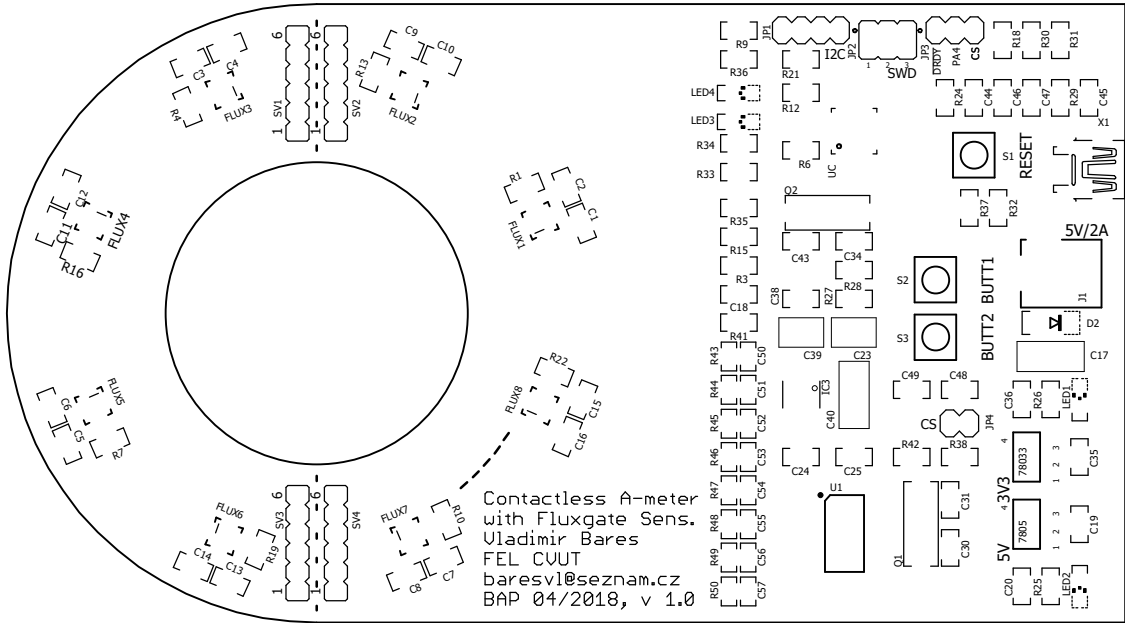
Contactless 1-meter
with Fluxgate Sens
Uladimir Bares
FEL CVUT
baresvi@seznam.cz
BRP 04/2018, v 1.0



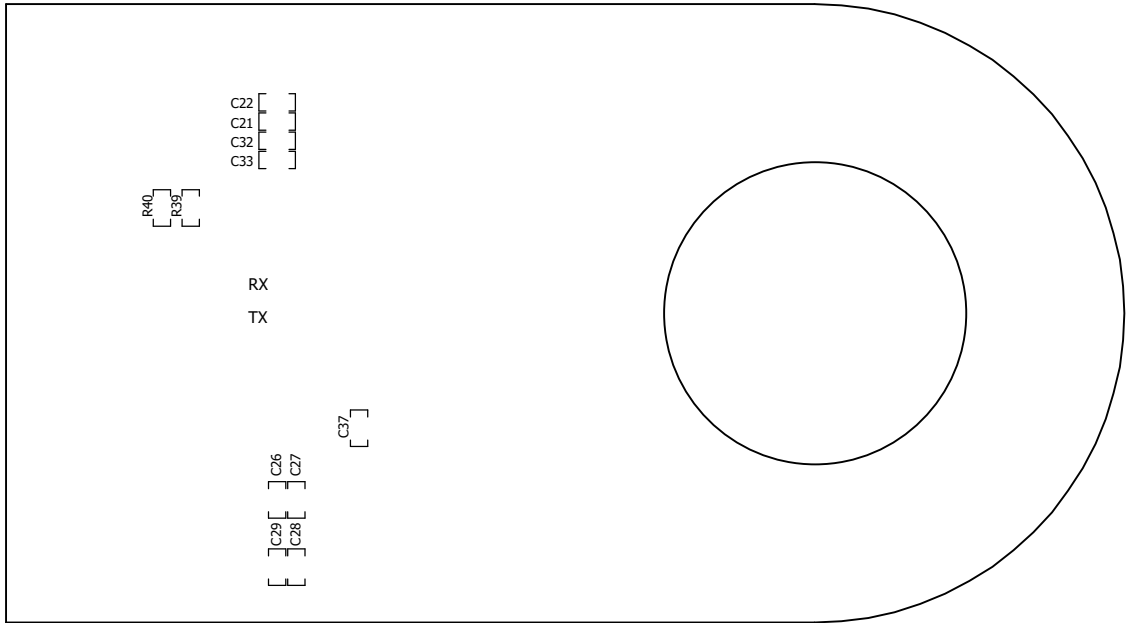
Vladimir Barš	
TITLE:	Fluxgate ammeter
Document Number:	REV:
Date:	30.4.2018 Sheet: 1/1







Contactless A-meter
 with Fluxgate Sens.
 Vladimir Bares
 FEL CVUT
 baresvl@seznam.cz
 BAP 04/2018, v 1.0



Qty	Value	Device	Package	Parts	Description
8	510R	R-EU_R0805	R0805	R43, R44, R45, R46, R47, R48, R49, R50	RESISTOR, European symbol
5	100R	R-EU_R1206	R1206	R35, R36, R39, R40, R42	RESISTOR, European symbol
2	100nF	C-EUC1206	C1206	C37, C38	CAPACITOR, European symbol
8	10nF	C-EUC0805	C0805	C50, C51, C52, C53, C54, C55, C56, C57	CAPACITOR, European symbol
7	100nF	C-EUC1206	C1206	C21, C22, C24, C27, C28, C32, C33	CAPACITOR, European symbol
1	100pF	C-EUC1206	C1206	C25	CAPACITOR, European symbol
2	100uF/16V	CPOL-EUCT6032	CT6032	C17, C40	POLARIZED CAPACITOR
12	10k	R-EU_R1206	R1206	R3, R6, R15, R18, R21, R24, R32, R33, R34, R37, R38, R41	RESISTOR, European symbol
2	10uF	C-EUC1206	C1206	C26, C29	CAPACITOR, European symbol
4	18pF	C-EUC1206	C1206	C30, C31, C34, C43	CAPACITOR, European symbol
1	1k5	R-EU_R1206	R1206	R31	RESISTOR, European symbol
1	1k2	R-EU_R1206	R1206	R25	RESISTOR, European symbol
23	1uF	C-EUC1206	C1206	C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9, C10, C11, C12, C13, C14, C15, C16, C18, C19, C35, C44, C45, C48, C49	CAPACITOR, European symbol
12	22R	R-EU_R1206	R1206	R1, R4, R7, R9, R10, R12, R13, R16, R19, R22, R29, R30	RESISTOR, European symbol
2	4,7uF	C-EUC1206	C1206	C20, C36	CAPACITOR, European symbol
2	47pF	C-EUC1206	C1206	C46, C47	CAPACITOR, European symbol
2	47uF	CPOL-EUCT3528	CT3528	C23, C39	POLARIZED CAPACITOR
2	49R9	R-EU_R1206	R1206	R27, R28	RESISTOR, European symbol
1	5.5x2.1mm Barrel	POWER_JACKPTH	POWER_JACK_PTH	J1	Power Jack
1	7.68 MHz	CSM-7X-DU	CSM-7X-DU	Q1	SMD CRYSTAL
1	560R	R-EU_R1206	R1206	R26	RESISTOR, European symbol
1	8 MHz	CSM-7X-DU	CSM-7X-DU	Q2	SMD CRYSTAL
1	ADS1256	ADS1256	SSOP28-0.65-10.2X5.2MM	U1	AD Converter
3	Button	SWITCH-MOMENTARY-2SMD-4	TACTILE_SWITCH_TALL	S1, S2, S3	Various pushbuttons
8	DRV425	DRV425	QFN20	FLUX1, FLUX2, FLUX3, FLUX4, FLUX5, FLUX6, FLUX7, FLUX8	Fluxgate sensor
1	ES2D 2A	DIODE-DO214AA	DO214AA	D2	DIODE
3	GREEN/ORANGE	LEDCHIPLD_1206	CHIPLD_1206	LED1, LED2, LED4	LED
1	Jumper 1x1	JP1E	JP1	JP4	JUMPER
1	Jumper 3x1	JP2E	JP2	JP3	JUMPER
1	Jumper 3x2	JP3Q	JP3Q	JP2	JUMPER
1	Jumper 4x1	JP4E	JP4	JP1	JUMPER
1	LDL1117S33R	LDL11173.3	SOT223	78033	STM (LDL1117)
1	LDL1117S50R	LDL11175	SOT223	7805	STM (LDL1117)
1	MINI-USB-32005-201	MINI-USB-32005-201	32005-201	X1	MINI USB-B Conector
1	OPA350U	OPA350U	SO08	IC3	Rail-to-Rail OpAmp
1	RED	LEDCHIPLD_1206	CHIPLD_1206	LED3	LED
1	STM32F103TB	STM32F103TB	VFQFPN36	UC	32-bit ARM Cortex_M3 MCU