

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA MĚŘENÍ



Bakalářská práce

Zobrazovací modul pro vektorový magnetometr

Tomáš Břinčil

Vedoucí práce: Ing. Vojtěch Petrucha

17. června 2014



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Tomáš Břinčil**

Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Obor: **Senzory a přístrojová technika**

Název tématu česky: **Zobrazovací modul pro vektorový magnetometr**

Název tématu anglicky: **Display Module for Vector Magnetometer**

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s funkcí a zapojením vektorových magnetometrů s analogovým výstupem. Navrhněte univerzální zobrazovací modul s unifikovaným rozhraním, které umožní jeho připojení k více typům vektorových magnetometrů s analogovým výstupem. Modul by měl simultánně měřit tři výstupní napětí z magnetometru pomocí AČ převodníků s vysokým rozlišením (24 bitů) a zobrazit naměřené hodnoty na displeji v textové a grafické formě. Zařízení bude napájeno z baterie nebo akumulátoru. Modul sestavte a otestujte s dostupnými magnetometry TFM100, TFM65 a FL3-100.


Seznam odborné literatury:

- [1] Ripka, P. (ed.): Magnetic Sensors and Magnetometers; Artech House Remote Sensing Library, ISBN-13: 978-1580530576
- [2] Joseph Yi; Definitive Guide To The ARM Cortex M3, Newnes ISBN: 978-0-7506-8534-4
- [3] Ted Van Sickle; Programming Microcontrollers in C, Second Edition, LLH-Publishing

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Vojtěch Petrucha

Datum zadání bakalářské práce: 21. listopadu 2013

Platnost zadání do¹: 31. ledna 2015


Prof. Ing. Vladimír Haasz, CSc.
vedoucí katedry




Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 21.11.2013

¹ Platnost zadání je omezena na dobu dvou následujících semestrů.

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Vojtěchu Petruchovi, Ph.D. za nekonečnou trpělivost, cenné rady a připomínky během naší spolupráce. Dále bych rád poděkoval své rodině, přátelům a expřítelkyni za morální podporu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona, ve znění pozdějších předpisů, zejména skutečnost, že České vysoké učení technické v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

V Praze dne 17. června 2014

.....

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

© 2014 Tomáš Břinčil. Všechna práva vyhrazena.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě elektrotechnické. Práce je chráněna právními předpisy a mezinárodními úmluvami o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským. K jejímu užití, s výjimkou bezúplatných zákonných licencí, je nezbytný souhlas autora.

Odkaz na tuto práci

Břinčil, Tomáš. *Zobrazovací modul pro vektorový magnetometr*. Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2014.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je seznámení s funkcí a zapojením vektorových magnetometrů s analogovým výstupem a návržení univerzálního modulu, který umožní připojení magnetometru, včetně zajištění jeho napájení ze šesti AA akumulátorů. Modul simultánně měří tři výstupní napětí z magnetometru pomocí AČ převodníku s rozlišením 24bitů a zobrazuje v reálném čase měřené hodnoty v textové i grafické formě na OLED displeji.

Klíčová slova Fluxgate, magnetometr, magnetické pole, mikrokontrolér, analogově-digitální převodník, DC-DC měnič, lineární regulátor, ATSAM3X8EA, napěťová reference, Stefan Mayer FL3-100, TFM100

Abstract

The goal of this thesis is to get in touch with functionality and interfacing vector magnetometers with analogue output and design universal module which can be connected to magnetometers including power supply circuits from six AA cells. Module can simultaneously measure three output voltages from magnetometer using AD converter with 24bit accuracy and can display real-time values in text and graphic form on OLED display.

Keywords Fluxgate, magnetometer, magnetic field, microcontroller, analog-to-digital converter, DC-DC converter, linear regulator, ATSAM3X8EA, voltage reference, Stefan Mayer FL3-100, TFM100

Obsah

Úvod	1
Měřicí přístroj	1
1 Teorie	3
1.1 Magnetické pole	3
1.2 Hallova sonda	3
1.3 AMR	5
1.4 Fluxgate	6
1.5 BA&D - TFM100G2	7
1.6 Stefan Mayer FL3-100	7
2 Analýza	9
2.1 FLUXMASTER	9
2.2 FVM 400	11
2.3 DX-330	12
2.4 Porovnání produktů na trhu	13
3 Návrh měřicího přístroje	15
4 Návrh analogové části přístroje	17
4.1 Zdroj napájení pro integrované obvody - TPS7A4901	17
4.2 Zdroj napájení pro externí senzory - Traco Power 2N-0522	19
4.3 Zdroj referenčního napětí - REF5050, LT1677	20
4.4 Operační zesilovač INA159	22
4.5 Analogově-digitální převodník ADS1225	23
5 Návrh digitální části přístroje	29
5.1 Mikrokontrolér ATSAM3X8EA	29
5.2 OLED displej NHD-2.7-12864UCY3	31
5.3 Zdroj napájení - TPS54060	32

6	Programové vybavení	35
6.1	Vyčítání dat z převodníků pomocí přerušení	35
6.2	Komunikace s SD kartou	36
6.3	Komunikace s OLED displejem	36
7	Realizace přístroje	39
8	Testování a měření	41
	Závěr	45
	Literatura	47
A	Schéma zapojení a DPS	49
B	Seznam použitých zkratek	55
C	Obsah příloženého CD	57

Seznam obrázků

1.1	Princip Hallovy sondy, zdroj: Tomáš Břinčil	4
1.2	Princip AMR senzoru, zdroj: Tomáš Břinčil	5
1.3	Princip fluxgate senzoru, zdroj: Tomáš Břinčil	6
1.4	Fluxgate senzor TFM100S od výrobce BA&D, zdroj: [1]	7
1.5	Fluxgate senzor FL3-100 od výrobce Stefan Mayer, zdroj: [2]	8
2.1	Fluxgate magnetometr od výrobce Stefan Mayer, zdroj: [2]	10
2.2	FVM 400 měřicí přístroj od výrobce MEDA, zdroj: [3]	11
2.3	DX-330 měřicí přístroj od výrobce Dexing Magnet Tech Co., Ltd	13
4.1	Blokový diagram integrovaného obvodu TPS7A4901, zdroj: [4]	18
4.2	Aplikační diagram integrovaného obvodu TPS7A4901, zdroj: [4]	18
4.3	Schéma s integrovaným obvodem TPS7A4901, zdroj: Tomáš Břinčil	19
4.4	Obrázek Traco Power 2N-0522, zdroj: [5]	20
4.5	Blokový diagram integrovaného obvodu REF5050, zdroj: [6]	21
4.6	Schéma s integrovaným obvodem REF5050, zdroj: Tomáš Břinčil	21
4.7	Blokový diagram integrovaného obvodu INA159, zdroj: [7]	22
4.8	Schéma s integrovaným obvodem INA159, zdroj: Tomáš Břinčil	23
4.9	Blokový diagram integrovaného obvodu ADS12225, zdroj: [8]	24
4.10	Časový průběh vyčítání dat z převodníku ADS1225, zdroj: Tomáš Břinčil	25
4.11	Inicializační úsek převodníku ADS1225, zdroj: Tomáš Břinčil	25
4.12	Průběh signálů při kalibraci ADS1225, zdroj: Tomáš Břinčil	26
4.13	Čekání na vyčítání dat z převodníku ADS1225, zdroj: Tomáš Břinčil	27
4.14	Detail vyčítání dat z převodníku ADS1225, zdroj: Tomáš Břinčil	28
5.1	Blokové schéma mikrokontroléru ATSAM3X8EA, zdroj: [6]	30
5.2	Obrázek OLED displeje, zdroj: [9]	31
5.3	Blokový diagram komunikace s OLED displejem, zdroj: [9]	32
5.4	Blokový diagram integrovaného obvodu TPS54060, zdroj: [10]	33
5.5	Schéma s integrovaným obvodem TPS54060, zdroj: Tomáš Břinčil	33

7.1	Měřicí přístroj s vysunutými deskami a OLED displejem, zdroj: Tomáš Břinčil	39
7.2	Náhled obrazovky měřícího přístroje, zdroj: Tomáš Břinčil	40
8.1	Schéma měřícího obvodu pro testování měřícího přístroje, zdroj: Tomáš Břinčil	41
8.2	Linearizovaná přímka měřených hodnot vůči referenčnímu napětí, zdroj: Tomáš Břinčil	42
8.3	Chyba linearity, zdroj: Tomáš Břinčil	43
8.4	Vlastní šum měřícího zařízení, zdroj: Tomáš Břinčil	43
A.1	Schéma ADC části přístroje.	50
A.2	Plošný spoj ADC části přístroje.	51
A.3	Schéma MCU části přístroje.	52
A.4	Plošný spoj MCU části přístroje.	53

Úvod

Výsledkem práce by mělo být usnadnění práce s magnetickými fluxgate senzory TFM100G2 a Stefan Mayer FL3-100 na katedře měření i mimo ni.

V současné době je měření v laboratoři, ale zejména v terénu prováděno pomocí sestavy několika přístrojů – ADC (Analogově digitální převodník z angl. Analog Digital Convertor, dále jen ADC) převodníky, napájecí baterie, přenosný počítač s obslužným software, což s sebou přináší značné komplikace s přepravou citlivých laboratorních přístrojů a jejich provozu v nehostinných podmínkách.

Pokud by byl k dispozici ruční měřicí přístroj řešící i napájení fluxgate magnetických senzorů usnadnilo by to manipulaci s magnetometry během měření a urychlilo samotné měření.

Měřicí přístroj

Přístroj by měl plnit funkci jednoduchého zobrazovače měřených hodnot s možností ukládání měřených dat ze tří analogových vstupů s rozsahem $\pm 10V$ s relativními časovými známkami na SD kartu, tak aby bylo možné data analyzovat mimo přístroj a nebylo nutné provádět měření s připojeným počítačem. Data by měl ukládat ideálně ve formátu vhodném pro import do tabulkových procesorů.

Měřicímu přístroji by mělo stačit k napájení šest kusů dobíjecích akumulátorů nebo alkalických baterií, měl by zobrazovat jejich aktuální napětí a dopočtem eventuelně relativní procentuální stav akumulátorů. Při poklesu napětí ke kritické hodnotě pro Ni-MH články na tuto skutečnost upozorní.

Požadavky na měřicí přístroj:

- Mechanická odolnost pro práci v terénu.
- Provoz na baterie s minimální výdrží 5 hod.

ÚVOD

- Dostatečná přesnost pro měření s danými senzory.
- Jednoduché ovládání a uživatelská přívětivost nevyžadující studování návodu.
- Dobrá čitelnost měřených hodnot za zhoršených světelných podmínek.

Teorie

1.1 Magnetické pole

Magnetické pole vzniká důsledkem pohybu elektricky nabitých částic/nábojů nebo důsledkem vázaných elektrických proudů kolem takzvaných permanentních magnetů.

Pro popis magnetického pole používáme vektorovou fyzikální veličinu, magnetickou indukci:

$$B[T]$$

Doporučená a běžně používaná značka je B , odvozená jednotka v soustavě SI potom T jako Tesla.

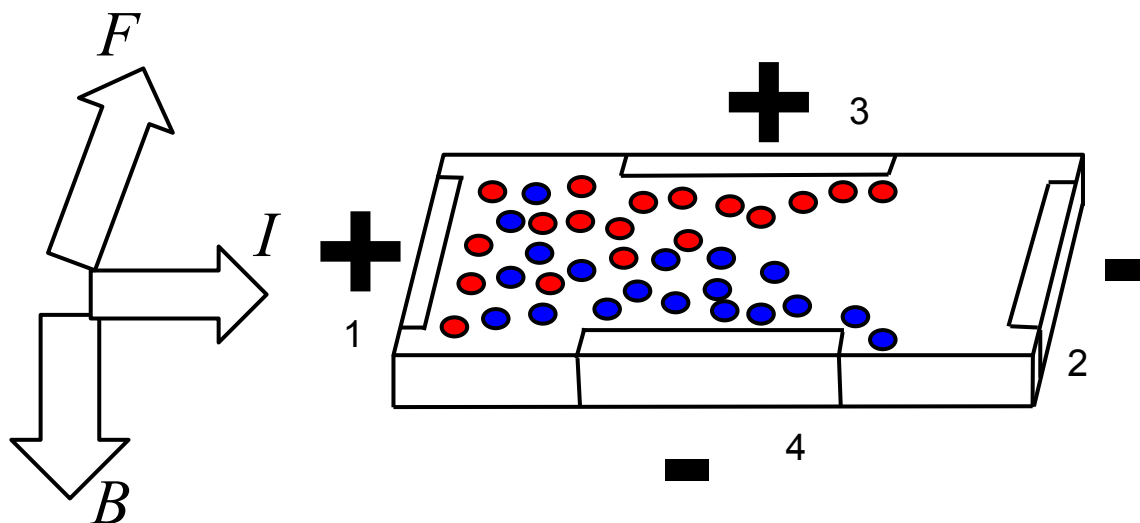
Pro měření magnetického pole o amplitudě odpovídající magnetickému poli Země používáme například tyto vektorové senzory.

1.2 Hallova sonda

Na částici, která se nachází v elektrickém a magnetickém poli působí tzv. Lorentzova síla.

$$F_m = q(v \times B)$$

Působením Lorentzovy síly jsou částice vychylovány na jeden pól předmětu (podle jejich náboje). Opačná síla k Lorentzově síle je vyvolávána Hallovým polem. Odtud potom definujeme Hallův jev, kdy za současného působení elektrického i magnetického pole vzniká elektrické pole jako rozdíl dvou potenciálů nahromaděných opačně nabitých částic na opačných stranách předmětů. Toto měřitelné elektrické pole - Hallovo elektrické pole je základním principem fungování Hallova magnetického senzoru.



Obrázek 1.1: Princip Hallovy sondy, zdroj: Tomáš Břinčil

Hallova sonda je tenká destička polovodiče (InSb, InAs) obdélníkového tvaru podobně vyobrazená na obrázku 4.14. Kontakty a držák destičky polovodiče nesmí být z feromagnetického materiálu kvůli ovlivnění jevů. Kontakty jsou v páru. Pár pro přívod referenčního proudu $[I]$ (1,2) a pár pro měření Hallova napětí (3,4).

Nepůsobí-li na destičku polovodiče žádné magnetické pole $[B]$, na kontaktech 3,4 neměříme žádné napětí a nosiče proudu (kladné - červené, záporné - modré) jsou rozprostřeny rovnoměrně. V magnetickém poli $[B]$ působí magnetická indukce na nosiče proudu silou $[F]$ kolmou k jejich pohybu a posouvá nosiče proudu dle jejich orientace na okraje destičky.

V důsledku posunutí shodných proudových nosičů k jedné straně a opačně nabitých proudových nosičů k druhé straně měříme na kontaktech 3,4 napětí, kterému říkáme Hallovo.

Hallovy sondy se díky primitivní konstrukci většinou používají jako levný a robustní detektor vektoru magnetického pole, zřídka jako senzor k měření jeho intenzity. Proto je najdeme ve funkci senzorů polohy a senzorů rychlosti nebo v levných mobilních telefonech, kde plní funkci kompasu, pro určení magnetického severního pólu země.

Pro příklad byl vybrán Hallův senzor A1301:

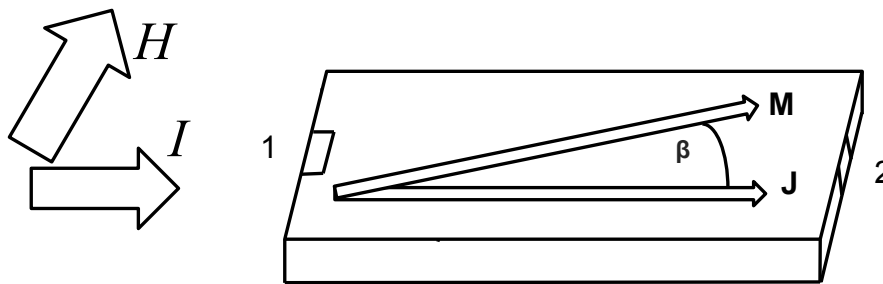
1.2.1 Typické parametry Hallova senzoru A1301

- Citlivost $2,5\text{mV/G} = 25\text{V/T}$

- Proporciálně lineární výstup odpovídající intenzitě magnetického pole
- Napájecí napětí 5V, odběr proudu 11mA, výstupní napětí při 0T 2,5V
- Cena 40.-Kč

1.3 AMR

Elektrický proud ve směru magnetizace je vyšší než ve směru kolmém, tomuto efektu říkáme anizotropní magnetorezistence, zkráceně AMR. Elektrický odpor se mění v řádech jednotek procent, mluvíme-li o dokonalejších slitinách, jako materiálech v senzorech s mimořádně vysokými hodnotami magnetorezistence, zkracujeme výraz “Giant Magneto Resistance” jako GMR, eventuelně CMR z anglického “Collosal Magneto Resistance”.



Obrázek 1.2: Princip AMR senzoru, zdroj: Tomáš Břinčil

Jevu magnetorezistence umíme využít pro měření magnetického pole. Na tenkou destičku křemíkového substrátu je napařena vrstva permalloy (magneticky měkká slitina niklu a železa, která dosahuje velmi vysoké permeability). Permanentní magnetizace magnetorezistoru leží ve směru proudu [I]. Působením magnetického pole [H] dochází ke změně magnetizace a v důsledky toho i rezistence v řádech jednotek procent. Zvýšení citlivosti se dá dosáhnout změnou struktury destičky na proužkovou strukturu (anglicky Barber-pole). Mezi významné výrobce magnetorezistorů patří Honeywell a Phillips.

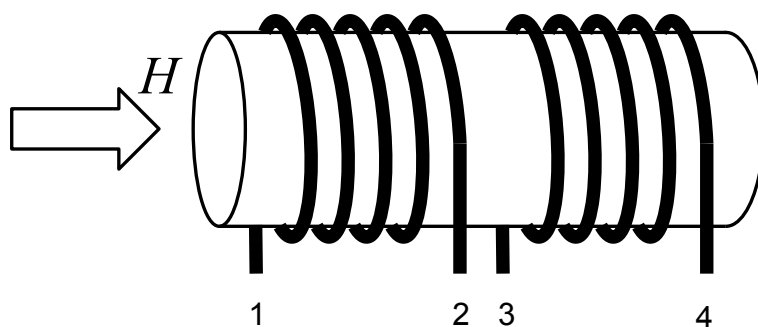
1.3.1 Typické parametry AMR senzoru:

- Citlivější než senzory využívající Hallova jevu.

- Typické použití pro intenzity magnetického pole $1\mu\text{T}$ až 10mT .
- Ve speciální úpravě pro vyšší intenzity 100mT až 2T .
- Netypická pouzdra.
- Cena 100-500.-Kč.

1.4 Fluxgate

Pro měření velmi slabých intenzit magnetických polí můžeme použít fluxgate magnetometry. Zpravidla se skládá z dvou cívek - budící a snímací, navinutých na feromagnetickém jádře s vysokou magnetickou permeabilitou.



Obrázek 1.3: Princip fluxgate senzoru, zdroj: Tomáš Břincil

Budící cívka (1,2) se střídavě uvádí do saturace v obou polaritách. Na snímací cívkě (3,4) se indukují napětí, vlivem vnějších podmínek s posunutou amplitudou, případně fází. Rozdíl amplitud dvojnásobné frekvence (první harmonická) snímací cívkou oproti amplitudě budící cívky odpovídá působení vnějšího magnetického pole.

1.4.1 Typické parametry fluxgate senzoru:

- Citlivost 100pT - $200\mu\text{T}$.
- Netypická pouzdra, větší a náročnější na provozní podmínky.
- Náročnější na preciznost během výroby.
- Cena 1000 - ? .-Kč.

1.5 BA&D - TFM100G2

Miniaturní tříosý fluxgate magnetometr určený pro běžné měření v laboratoři nebo v terénu. Tento přístroj je navrhován pro bezproblémový provoz v náročnějších podmínkách, neobsahuje žádné pohyblivé části, pojistky ani potenciometry nebo přepínače pro nastavení.



Obrázek 1.4: Fluxgate senzor TFM100S od výrobce BA&D, zdroj: [1]

1.5.1 Typické parametry fluxgate magnetometru TFM100G2:

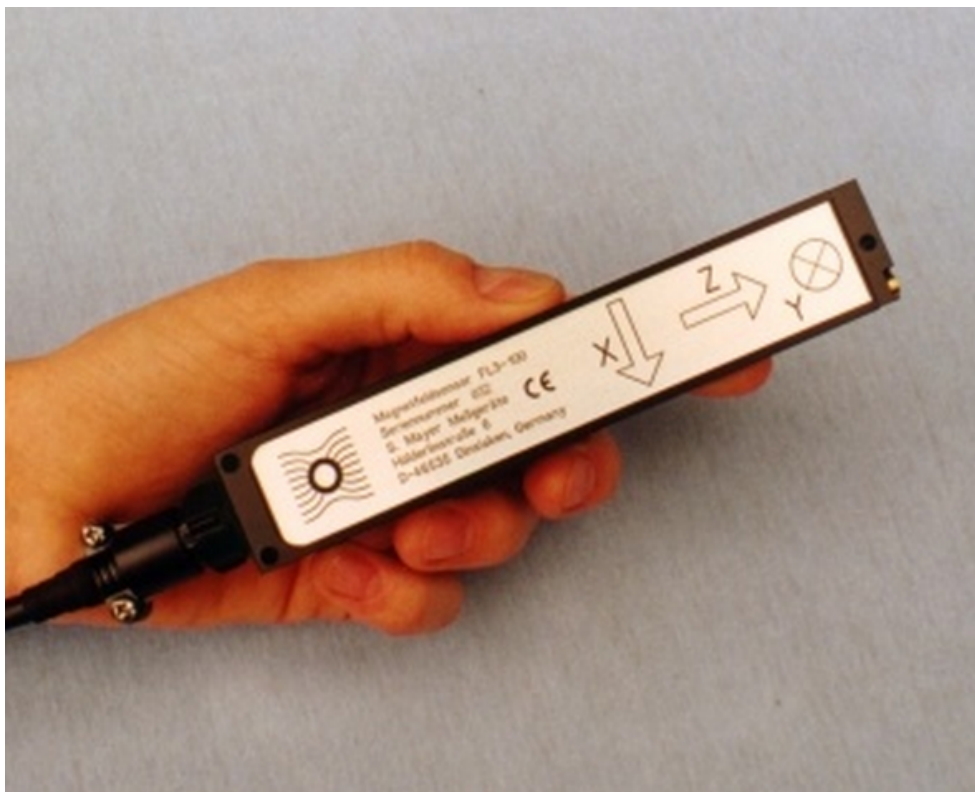
Ortogonalita	$\pm 1^\circ$
Vstupní napětí, proud (SS):	15-34 V, 25 mA
Rozsah:	$\pm 100 \mu\text{T} = \pm 10 \text{ V}$
Přesnost:	$\pm 0,75 \%$
Linearita:	$\pm 0,015 \%$
Citlivost:	$100 \mu\text{V/nT}$
Teplotní stabilita:	$\pm 0,6 \text{ nT/C}$
Výstupní impedance:	332Ω
Rozsah pracovní teploty:	$-55^\circ \text{ až } 85^\circ\text{C}$
Maximální přetížení:	60G
Rozměry:	8,26cm x 3,51cm x 3,23cm
Hmotnost:	100g
Datové rozhraní:	D-Sub, 9pin, zdířka

1.6 Stefan Mayer FL3-100

Velmi přesný tříosý fluxgate magnetický senzor pro přesné měření slabých magnetických polí v rozsahu $0,1\text{nT}$ až $100\mu\text{T}$. Dokáže měřit jak stacionární magnetické pole, tak nestacionární se změnou amplitudy s frekvencí do 2kHz. Typické použití je vektorové měření magnetického pole země, měření magnetických stop, detekce střídavého elektromagnetického pole z vedení elek-

1. TEORIE

trického proudu - elektrosmog a paleomagnetické účely za účelem zkoumání magnetických vlastností nerostů.



Obrázek 1.5: Fluxgate senzor FL3-100 od výrobce Stefan Mayer, zdroj: [2]

1.6.1 Typické parametry fluxgate magnetometru FL3-100:

Směrová přesnost:	$< 0,5^\circ$
Vstupní napětí, proud (SS):	$\pm 12-16 \text{ V}$, $+25 \text{ mA}$, -15 mA
Rozsah:	$\pm 100 \mu\text{T} = \pm 10 \text{ V}$
Přesnost:	$\pm 0,5\%$
Citlivost:	$0,1 \text{ V}/\mu\text{T}$
Teplotní stabilita:	$< 0,1 \text{ nT}/^\circ\text{C}$
Výstupní impedance:	$< 1 \Omega$
Rozsah pracovní teploty:	$-20^\circ - 75^\circ\text{C}$
Rozměry:	$14 \text{ cm} \times 2,6 \text{ cm} \times 2,6 \text{ cm}$
Hmotnost:	115g
Datové rozhraní:	IP 65, 7pin, male

Analýza

Aby měl vývoj měřicího přístroje smysl a byl přínosem je potřeba také analyzovat trh produktů se shodnými funkcemi. V roce 2014 se na trhu objevuje několik zařízení běžně dostupných pro měření v terénu s podobnými funkcemi a parametry.

Jako parametry při porovnávání přístrojů jsou zvoleny pochopitelně parametry, které jsou klíčové pro zadání bakalářské práce. Proto budeme dbát na následující kritéria:

- Počet analogových vstupů.
- Jednoduchá manipulace a odolnost v terénu.
- Jednoduchá obsluha a náročnost provozu.
- Přehlednost měřených dat.
- Možnost záznamu dat.

Následující zařízení byla vybrána bez zaujatosti a jakékoliv návaznosti na výrobce kteréhokoliv přístroje. Zařízení byla vybírána stejným způsobem jako kdyby měla být pořízena pro účely měření, tedy na základě osobního doporučení, hledání v katalogu případně vyhledávání na webu.

2.1 FLUXMASTER

Ruční měřicí přístroj FLUXMASTER od společnosti Stefan Mayer je napájený devítivoltovou baterií typu PP3, udávaná výdrž provozu je kolem 20 hodin, což je dostatečné pro běžné experimentální měření mimo laboratoř.



Obrázek 2.1: Fluxgate magnetometr od výrobce Stefan Mayer, zdroj: [2]

Přístroj je dodáván s vlastní sondou přímo od výrobce. Sonda měří magnetické pole pouze v jednom směru a je spojena s měřícím přístrojem 1,5 m dlouhým kabelem.

Přístroj disponuje analogovým výstupem, který je možné použít pro aplikace reálného času jako kompenzace magnetického rušení pro protonové mikroskopy, výsledkem je mnohem ostřejší obraz.

2.1.1 Doporučené aplikace měření Fluxmaster magnetometrem:

- Anomálie magnetického pole Země.
- Zbloudilá pole okolo vedení elektrického proudu.
- Paleomagnetický výzkum - měření slabých magnetických polí v nerostech
- Experimenty s Helmholtzovými cívkami.

2.1.2 Typické parametry Fluxmaster magnetometru:

Napájení, doba provozu:	9 V PP3 Alkalická, 20 hodin.
Rozsah:	$\pm 2 \mu\text{T}$, $\pm 20 \mu\text{T}$, $\pm 200 \mu\text{T}$,
Přesnost:	$\pm 0,5 \%$, $\pm 5 \text{ nT}$, $\pm 1 \text{ znak}$
Citlivost:	$0,1 \text{ V}/\mu\text{T}$
Teplotní stabilita:	$< 0,1 \text{ nT}/^\circ\text{C}$
Rozsah pracovní teploty:	$-20^\circ - 75^\circ\text{C}$
Rozměry přístroje:	15,1 cm x 8,2 cm x 3,3 cm
Rozměry sondy:	průměr 1cm x délka 3cm
Hmotnost:	380g
Datové rozhraní:	IP 65, 7pin, zdířka

2.2 FVM 400

Ruční měřicí přístroj FVM 400 od výrobce MEDA je vybaven čtyřřádkovým displejem po šestnácti znacích pro zobrazování měřených dat v reálném čase ve třech osách. Pro připojení magnetometru používá telefonní konektor RJ-11, doporučená maximální délka kabelu je 30 metrů.



Obrázek 2.2: FVM 400 měřicí přístroj od výrobce MEDA, zdroj: [3]

Data na displeji dokáže měřicí přístroj zobrazovat ve dvou režimech. První je složkový režim, kdy jsou data zobrazována jako tři hodnoty intenzity mag-

2. ANALÝZA

netického pole pro tři směry. V druhém - polárním režimu je zobrazována výsledná intenzita a směr vektoru magnetického pole.

K přístroji je dodávána sada podpůrného software:

- FM300 Front Panel - pomocí RS232 rozhraní je možné spojit měřící přístroj s osobním počítačem a zobrazovat data z interní paměti přístroje a ukládat je v textovém souboru pro pozdější zpracování v tabulkovém procesoru, vykreslit grafy měřených hodnot v reálném čase a stahovat data z FM300 Network Serveru.
- FM300 Network Server - dokáže zpřístupnit funkce FM300 Front Panelu prostřednictvím počítačové sítě. Je určen pro kontinuální měření a ukládání měřených hodnot.
- MagGPSce Data Logging Program - S pomocí chytrého telefonu s GPS přijímačem dokáže Data Logging program ukládat data společně s údaji o aktuální pozici, to je přínosné zvláště pro měření v terénu.

2.2.1 Typické parametry měřícího přístroje FVM 400

Napájení, doba provozu:	2ks 9V PP3 Alkalická, 4 hodiny
Rozsah:	$\pm 100\,000\text{nT}$,
Přesnost:	$\pm 0,25\%$
Citlivost:	1nT
Rozsah pracovní teploty:	0°- 50°C
Rozměry přístroje:	10 cm x 44 cm x 19,3 cm
Hmotnost:	400g
Datové rozhraní:	RS232
Paměť:	7.5s - 69.5 vzorků/s, nebo 30s -17.4 vzorků/s

2.3 DX-330

DX-330 magnetometr je stolní měřící přístroj od společnosti Dexing Magnet Tech Co., Ltd. Disponuje grafickým displejem o rozlišení 480x320 obrazových bodů a kromě aktuálně měřených dat pro každý kanál dokáže zobrazovat i maximální a minimální naměřené hodnoty. Na displeji se v běžném měřícím režimu zobrazuje datum, čas a teplota pro protokolová měření.



Obrázek 2.3: DX-330 měřicí přístroj od výrobce Dexing Magnet Tech Co., Ltd

Přístroj disponuje také digitálním a analogovým výstupem signálu ze senzoru. Ovládat lze pomocí 14 funkčních kláves přímo na panelu přístroje. Z přístroje lze vyčítat měřené hodnoty přes rozhraní RS232.

2.3.1 Typické parametry měřicího přístroje DX-330, zdroj: [11]

Napájení:	220V, 50-60Hz
Rozsah:	0-100 000nT,
Přesnost:	$\pm 0,5 \%$
Citlivost:	1nT
Teplotní stabilita:	$\pm 0,03\%/^{\circ}\text{C}$
Rozsah pracovní teploty:	15°- 35°C
Rozměry přístroje:	52 cm x 38,7 cm x 14 cm
Hmotnost:	6kg
Datové rozhraní:	9pin (DB9), zdířka

2.4 Porovnání produktů na trhu

Produkty FLUXMASTER, FVM 400 i DX-330 není úplně jednoduché porovnat, každý z přístrojů dokáže měřit intenzitu magnetického pole. FLUXMASTER měří intenzitu jen v jedné ose a neumí ukládat měřená data, ale plní požadavky na jednoduché ovládní a odolnost v terénu. FVM400 zase disponuje velkým počtem podpůrného software, který usnadní práci s naměřenými daty, má ale nižší odolnosti v terénu, jeho používání potřebuje určité znalosti měřicího přístroje a má malou paměť pro ukládání dat. DX-330 dokáže měřit ve třech osách a má mnoho užitečných funkcí, včetně propojení s osobním počítačem, ale je primárně určen jako stolní měřicí přístroj.

Návrh měřicího přístroje

Řešení zadané bakalářské práce je rozdělené na dvě samostatné úlohy. Důvodem je jednodušší hledání možných problémů, vzájemné odrušení analogové a digitální části a také konstrukční a prostorové důvody.

Proces výroby desky plošných spojů obou desek se dá rozdělit na tři postupné procesy:

- Výběr vhodných součástek, návrh zapojení a jeho zakreslení do vhodného vývojového programu, v našem případě software EAGLE. Je třeba dbát na přehledné tažení drátů, protože schéma nám zároveň slouží jako dokumentace k projektu a během osazování a oživování se ke schématu budeme ještě vracet.
- Vytvoření samotné předlohy pro výrobu desky plošných spojů ze schématu nakresleného v předchozím kroku. Je třeba dbát obecných zásad při vytváření signálových cest a doporučení výrobce jednotlivých součástek. V případě analogových součástek mohou mít cesty na desce plošných spojů výrazný vliv na parametry součástek a mohou ovlivnit samotné měření.
- Vygenerování Gerber souborů, výroba desky a následné osazení desky. Většina dnešních součástek je v pouzdrech určených pro pájení přímo na desku - SMT. Proto se dá lehce využít obou stran desky pro tažení signálových cest, eventuálně umístění součástek z obou stran. Zbylou plochu je vhodné propojit s nulovým, společným potenciálem přístroje kvůli odrušení. Osazování probíhá od nejmenších a časově nejnáročnějších součástek, QFNP pouzdra a pouzdra s malou roztečí pájecích ploch. Pak pokračujeme přes diskrétní součástky jako rezistory a kapacitory až ke konstrukčním prvkům jako konektory a spínané zdroje větších pouzdech.

Návrh analogové části přístroje

Analogová (dále ADC) deska je velmi náročná na konstrukci kvůli rušení a výsledné přesnosti měření. Smyslem obvodů na ADC desce je převod tří vstupních signálů v rozsahu $\pm 10\text{V}$ na binární slova o délce 24bitů a napájení fluxgate senzorů.

Kromě operačních zesilovačů a analogově-digitálních převodníků jsou na ADC desce také tři integrované obvody sloužící jako napájecí zdroje. Je potřeba symetrickým napětím $\pm 12\text{V}$ napájet fluxgate senzor, dále je potřeba napájet integrované obvody a ještě je potřeba pro přesné měření vytvořit referenční napětí 5V .

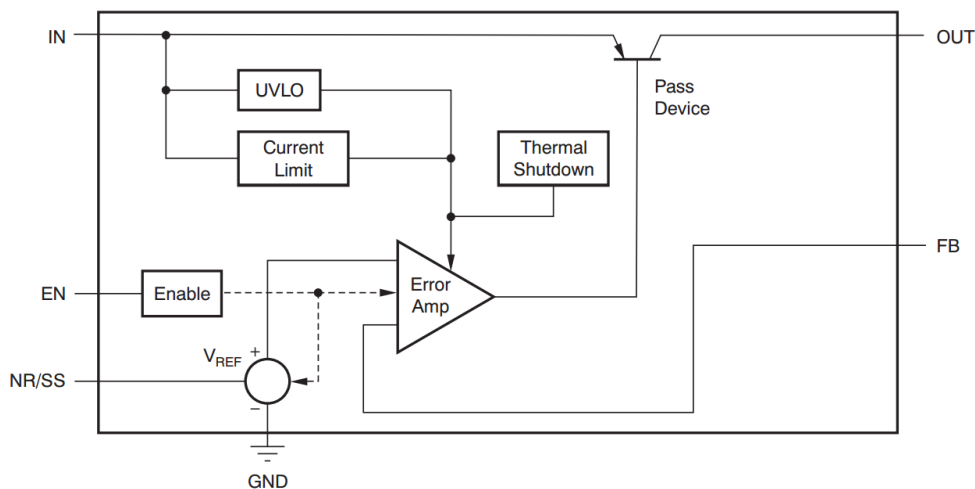
4.1 Zdroj napájení pro integrované obvody - TPS7A4901

Jedná se o lineární napěťový zdroj s nízkým výstupním šumem. Vstupní napětí může dosahovat hodnot $3\text{-}36\text{V}$, což s dostatečnou rezervou pokryje pracovní rozsah napětí na šesti NiMH akumulátorech. Tento integrovaný obvod je přímo výrobcem doporučen pro použití v kritických aplikacích jako je napájení operačních zesilovačů a analogově-digitálních převodníků.

Obvod obsahuje ochrany proti přetížení výstupu (odebíráním nadměrného proudu) a proti přehřátí, v obou případech je důsledkem odstavení obvodu, podobně jako přes vstup EN (o vstupu EN více dále v textu). Rozsah pracovních teplot obvodu je -40°C až $+125^\circ\text{C}$.

Na blokovém schématu jsou vidět základní funkční bloky lineárního zdroje. Na vstup IN přivádíme neregulované napětí z baterií. Vstupem EN můžeme řídit vnitřní logiku a obvod vnějším signálem zapnout a vypnout. Vstup NR/SS slouží k zapnutí funkce k potlačení šumu na výstupu a pro funkci soft-start, která omezí napěťové špičky při připojení napájení. Na výstupu OUT máme regulované napětí v rozsahu $1,194\text{V}$ až 33V , můžeme odebírat až 150mA . Vstupem FB z napěťového děliče určujeme výstupní napětí podle vzorce:

4. NÁVRH ANALOGOVÉ ČÁSTI PŘÍSTROJE

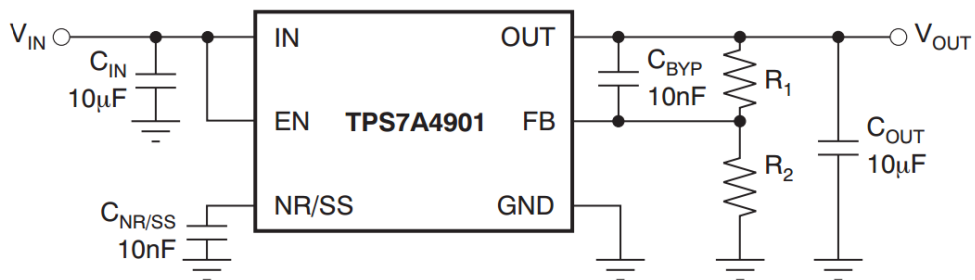


Obrázek 4.1: Blokový diagram integrovaného obvodu TPS7A4901, zdroj: [4]

$$R_1 = R_2 \left(\frac{V_{out}}{V_{ref}} - 1 \right)$$

za podmínky:

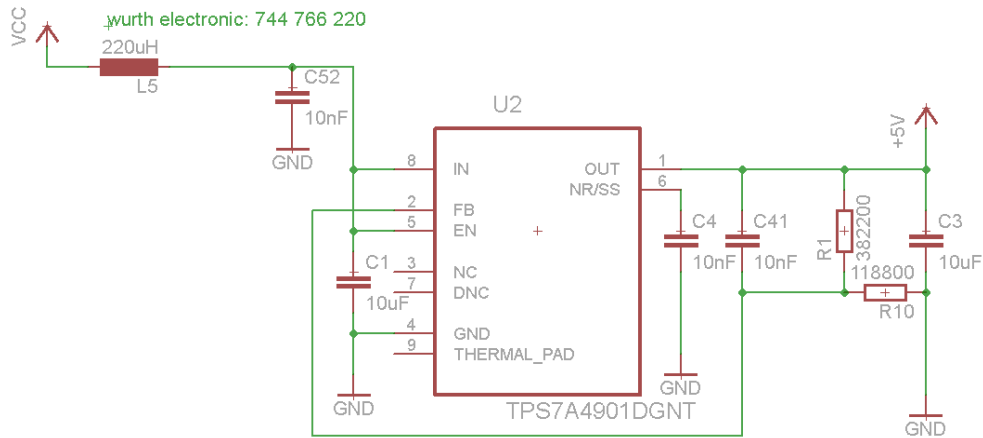
$$\frac{V_{out}}{R_1 + R_2} \geq 5\mu A$$



Obrázek 4.2: Aplikační diagram integrovaného obvodu TPS7A4901, zdroj: [4]

Výsledkem spočítaných rovnic a respektování doporučení výrobce a obecných zásad je schéma, které můžeme použít v obvodu ADC desky jako zdroj napětí 5V pro napájení ostatních obvodů. Schéma je doplněné o odrušovací LC člen na vstupu IN - obecná zásada.

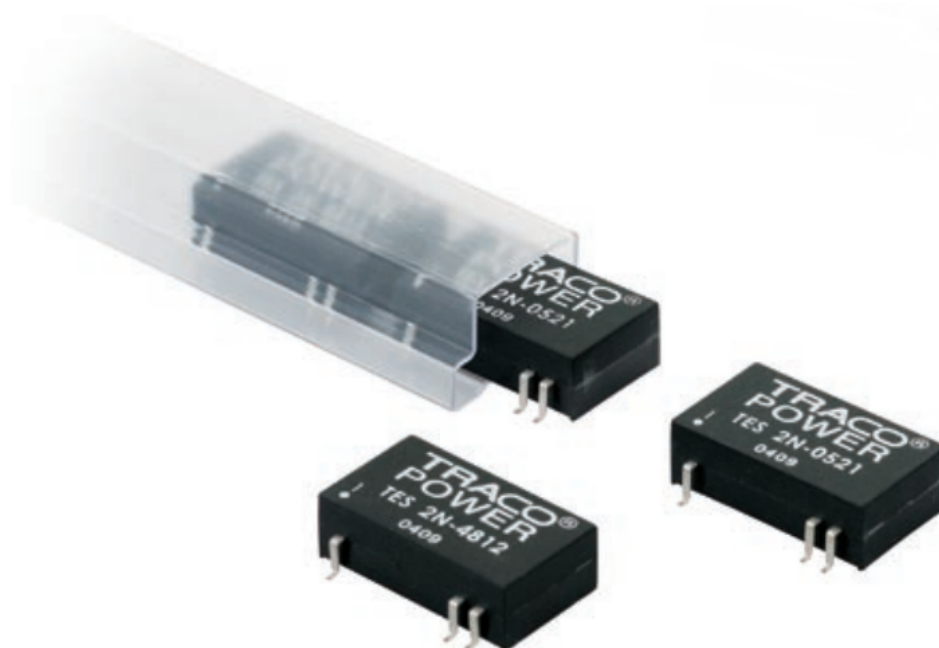
4.2. Zdroj napájení pro externí senzory - Traco Power 2N-0522



Obrázek 4.3: Schéma s integrovaným obvodem TPS7A4901, zdroj: Tomáš Břinčil

4.2 Zdroj napájení pro externí senzory - Traco Power 2N-0522

Fluxgate magnetické senzory TFM100G2 a Stefan Mayer fl3-100 vyžadují pro přesné měření symetrické napájení v rozsahu $\pm 10-15V$, protože není z praktického hlediska vhodné umísťovat do měřicího zařízení velké množství akumulátorů, je použita součástka s označením 2N-0522 od výrobce Traco Power, která dokáže samostatně fungovat jako velmi kvalitní DC-DC měnič.



Obrázek 4.4: Obrázek Traco Power 2N-0522, zdroj: [5]

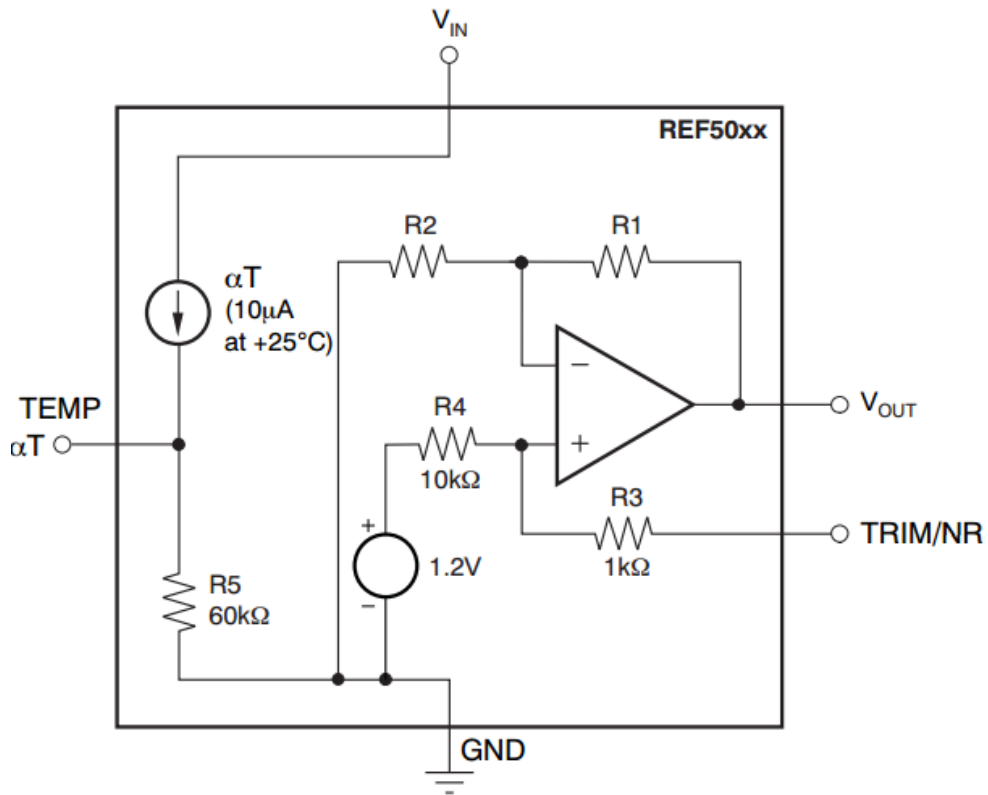
4.2.1 Typické parametry měniče Traco Power 2N-0522

Rozsah vstupního napětí:	4,5 - 9,0V (max 11V po dobu 100ms)
Výstupní napětí:	$\pm 12V$, $\pm 2\%$
Maximální vstupní proud při plném zatížení:	220mA
Maximální výstupní proud:	$\pm 85mA$
Typická účinnost:	69%
Rozsah pracovní teploty:	-40°C až 85°C
Maximální kapacita na výstupu:	100 μ F
Izolační napětí mezi vstupem a výstupem:	1 500V
Pracovní frekvence měniče:	300kHz

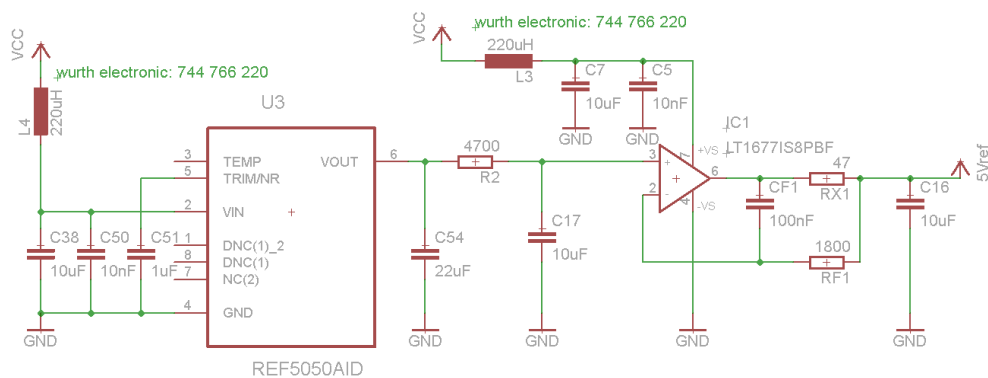
4.3 Zdroj referenčního napětí - REF5050, LT1677

Pro přesné měření vstupního signálu a jeho digitalizaci potřebujeme přesné referenční napětí, které bude v ideálním případě teplotně a časově nezávislé. Integrovaný obvod REF5050 je přímo určen jako napěťová reference do přístrojů pro přesné měření. Abychom dosáhli ještě větší napěťové stability, je za referenci připojen operační zesilovač zapojený jako napěťový sledovač (zesílení $A=1$), jehož zpětnovazební zapojení umožňuje použití velké kapacity pro filtraci signálu.

4.3. Zdroj referenčního napětí - REF5050, LT1677



Obrázek 4.5: Blokový diagram integrovaného obvodu REF5050, zdroj: [6]

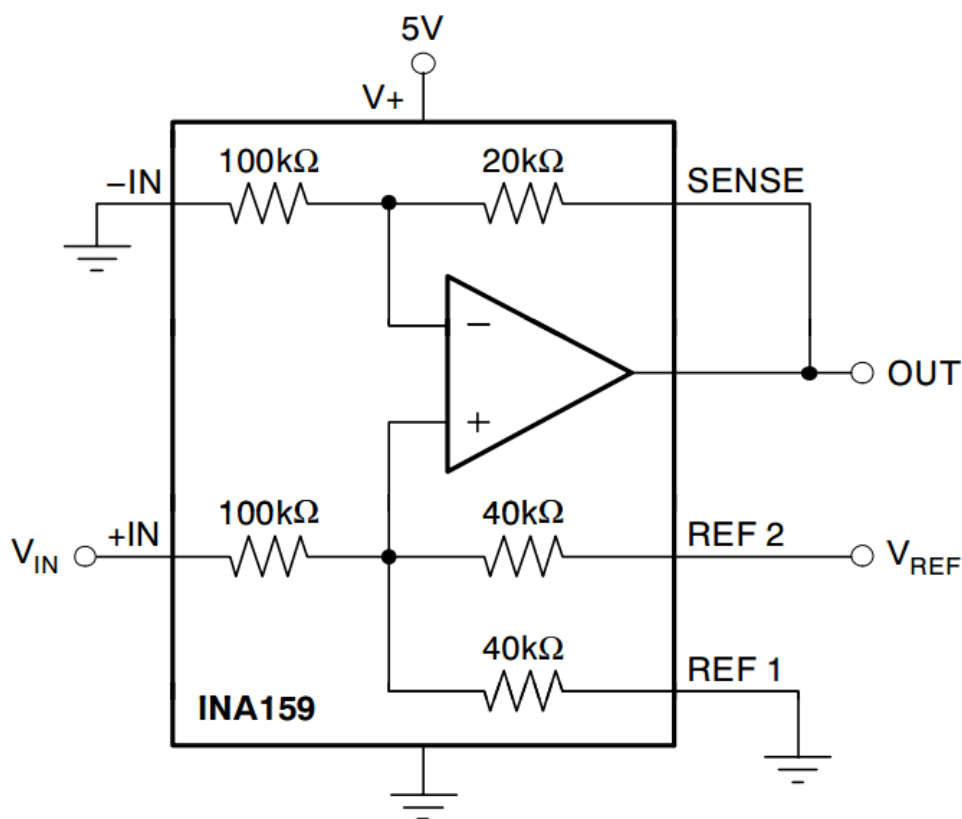


Obrázek 4.6: Schéma s integrovaným obvodem REF5050, zdroj: Tomáš Brinčil

4.4 Operační zesilovač INA159

INA159 je integrovaný obvod obsahující precizní operační zesilovač s přesnými rezistory, který pětinašobně zeslabuje. Výrobce je přímo určen k aplikaci, kterou plní v obvodu ADC desky, tedy zeslabení vstupního analogového signálu $\pm 10\text{V}$ z magnetometru do rozsahu $0\text{--}5\text{V}$, který je přiváděn přímo na vstup AČ převodníku ADS1225. Jeho funkce je tedy přizpůsobení napěťových úrovní z magnetometru pro převodník.

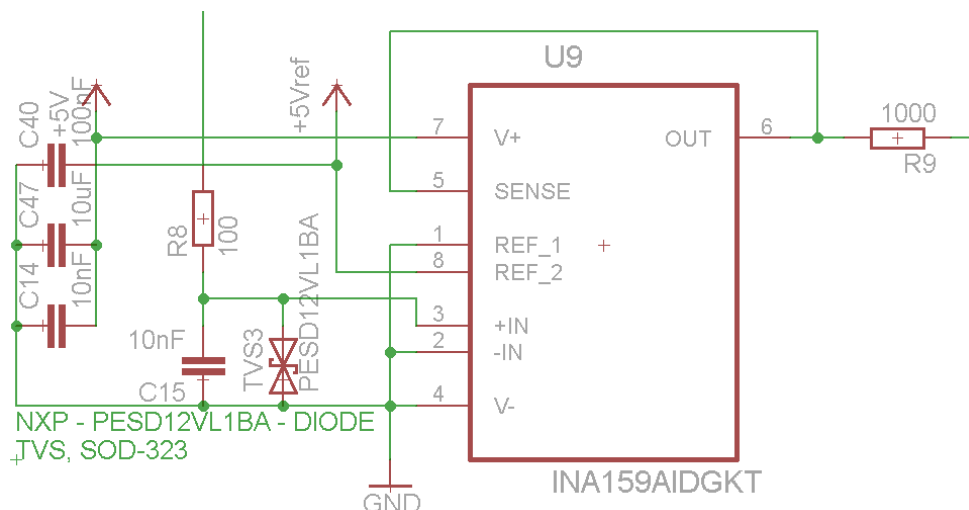
Obvod se vyznačuje velmi vysokou napěťovou stabilitou a nízkým offsetovým napětím na výstupu.



Obrázek 4.7: Blokový diagram integrovaného obvodu INA159, zdroj: [7]

Ve schématu desky je navíc doplněn prvek TVS jako ochrana proti statické elektřině, která by se mohla objevit na konektoru vlivem manipulace s kabelem od magnetometru. Zabraňuje poškození vstupu operačního zesilovače při navýšení vstupního napětí se zvýší svodový proud do země - zkrat. Při běžných provozních podmínkách (do 12V) je proud zanedbatelný (2nA) při zvýšení vstupního napětí na 15V dojde k navýšení svodového proudu na 5mA a dále

při zvyšujícím se napětí proud exponenciálně roste. Dojde k otevření diody a zkratování vstupu kanálu.



Obrázek 4.8: Schéma s integrovaným obvodem INA159, zdroj: Tomáš Břinčil

4.5 Analogově-digitální převodník ADS1225

Integrovaný obvod ADS1225 je analogově-digitální 24bitový sigma-delta převodník. Jde o výkonnou součástku dodávanou v malém pouzdře 4x4mm QFN pro povrchovou montáž na desku plošných spojů.

Převodník zahajuje svou činnost čtením logické úrovně 1 na vyhrazeném vstupním signále START. Po odměření a připravení na vyčítání dat změní výstupní signál na DRDY/DOUT z logické úrovně 1 na logickou úroveň 0, zároveň se uvede do stand-by režimu s minimálním odběrem. Dokáže operovat ve dvou pracovních režimech, podle vstupního signálu MODE.

Pokud přivedeme logickou hodnotu 0 na vstup MODE, převodník bude schopen provádět odměr s frekvencí 16Hz a střední hodnotou šumu $4\mu\text{V}$. Pokud na vstup přivedeme logickou hodnotu 1, převodník je schopen provést 100 odměrů za sekundu, ale se zvýšeným šumem $15\mu\text{V}$ - což se pro aplikaci kvůli získání maximální přesnosti nehodí, proto je zvolen režim s nižší rychlostí odměřování ale lepšími parametry šumu.

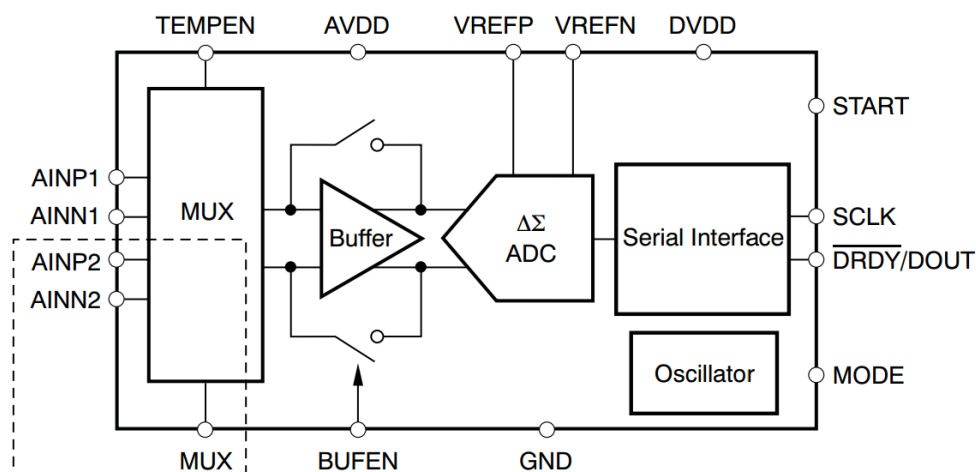
Pro vyčítání hodnot a běžnou operaci je zapotřebí generovat tři signály:

- SCLK - Pokud je převodník připraven k posílání dat - výstupní signál DRDY/DOUT je v logické úrovni 0, můžeme začít vyčítání periodickými změnami logické úrovně na vstupu SCLK. Převodník je citlivý na počet periodických změn logické úrovně, pokud jich převodníku generujeme 24,

4. NÁVRH ANALOGOVÉ ČÁSTI PŘÍSTROJE

jedná se o běžný režim vyčítání, ale zasláním 26 změn spolu se signálem START v logické úrovni 1 zapneme kalibraci převodníku..

- DRDY/DOUT - Výstupní signál převodníku, po čas odměřování a přípravy převodníku k vyčítání hodnot je v logické úrovni 1. V momentě, kdy je připraven k vyčítání hodnot se změní výstupní signál na logickou úroveň 0 a s první náběžnou hranou na vstupu SCLK začíná vysílat jednotlivé bity. První bit je bit s nejvyšší vahou celého 24bitového slova.
- START - Vstupní signál převodníku, kterým se spouští proces odměřování. V inicializační fázi společně se signálem SCLK slouží k signalizaci kalibrace vnitřních obvodů převodníku.



Obrázek 4.9: Blokový diagram integrovaného obvodu ADS12225, zdroj: [8]

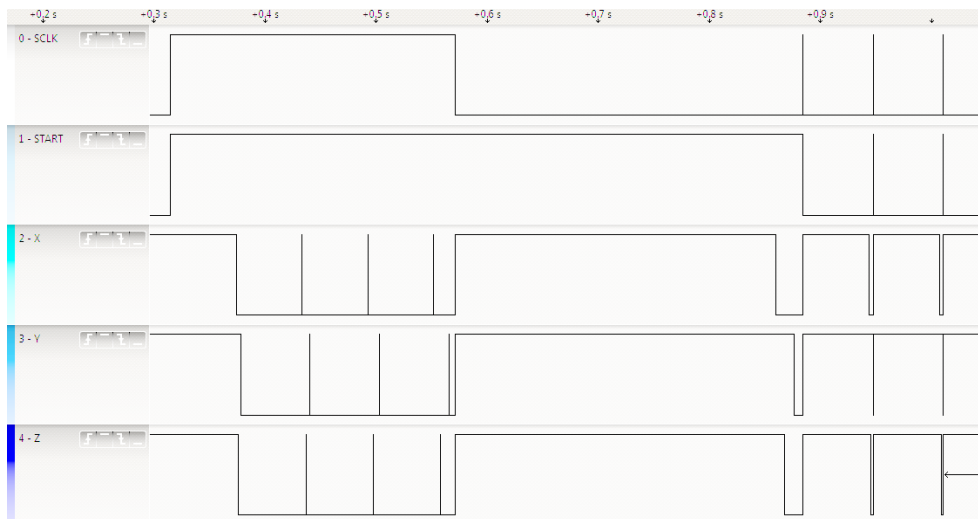
Blokové schéma ukazuje vnitřní zapojení integrovaného obvodu. Kromě tří signálů pro vyčítání hodnot jsou zde další vstupy, kterými se nastavuje pracovní režim převodníku. Převodník má celkem tři vstupy pro tři různá napájení. První AVDD slouží k napájení analogové části obvodu, sigma-delta převodník a operační zesilovače. DVDD slouží k napájení digitální části, zejména posuvného registru, z kterého se po odměření vyčítají data. Napětovou úroveň na vstupu DVDD dokážeme nastavit integrovaný obvod pro správnou funkci jak v obvodech s logickou úrovní TTL 5V, tak v obvodech s logickou úrovní 3,3V. VREFP slouží jako reference k porovnání vstupního signálu AINP1.

4.5. Analogově-digitální převodník ADS1225



Obrázek 4.10: Časový průběh vyčítání dat z převodníku ADS1225, zdroj: Tomáš Břinčil

Na obrázku 4.10 z logického analyzátoru je vidět časový průběh jednotlivých signálů v závislosti na čase. Pro názornou ukázkou, aby byly vidět periodicky se opakující děje, je graf s časovou základnu 0,8s. Frekvence vyčítání dat se dát určit přímo z grafu, přibližně 16Hz.

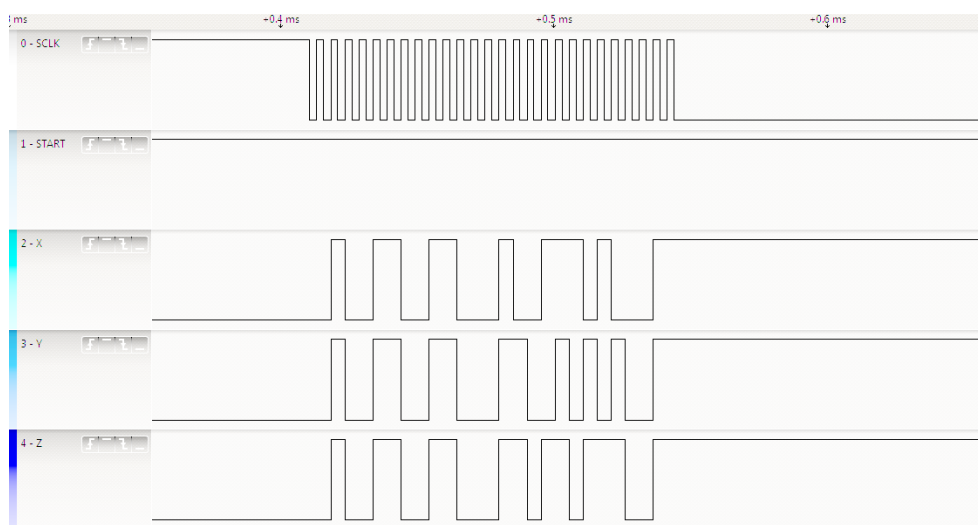


Obrázek 4.11: Inicializační úsek převodníku ADS1225, zdroj: Tomáš Břinčil

Na obrázku 4.11 je vidět průběh signálů při připojení napájení. Až teprve

4. NÁVRH ANALOGOVÉ ČÁSTI PŘÍSTROJE

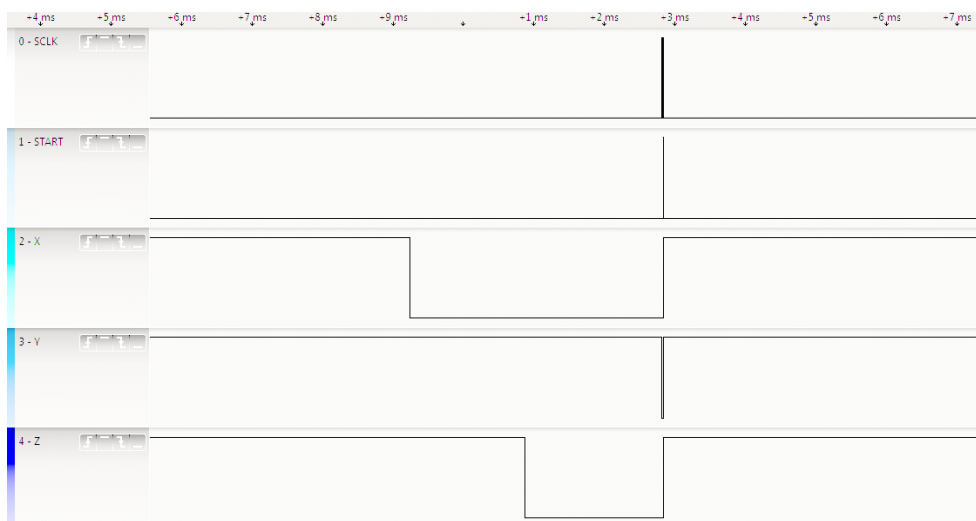
v čase 0,9s jsou převodníky a mikrokontrolér připraveny k vyčítání měřených hodnot, do té doby nejsou ustálené řídicí signály z mikrokontroléru a převodníky nejsou připravené k měření - to je způsobeno kontrolou a kalibrací vnitřních částí integrovaného obvodu.



Obrázek 4.12: Průběh signálů při kalibraci ADS1225, zdroj: Tomáš Břinčil

Kalibrační proces na obrázku 4.12 zobrazuje 26 změn logických úrovní na vstupním signálu SCLK a vstupní signál START v logické úrovni 1, to má za následek kalibraci převodníku. Při kalibraci se odpojí vstupní signál AINP1 a integrovaný obvod si provede vnitřní proces kalibrace - v materiálech od výrobce blíže nespecifikováno.

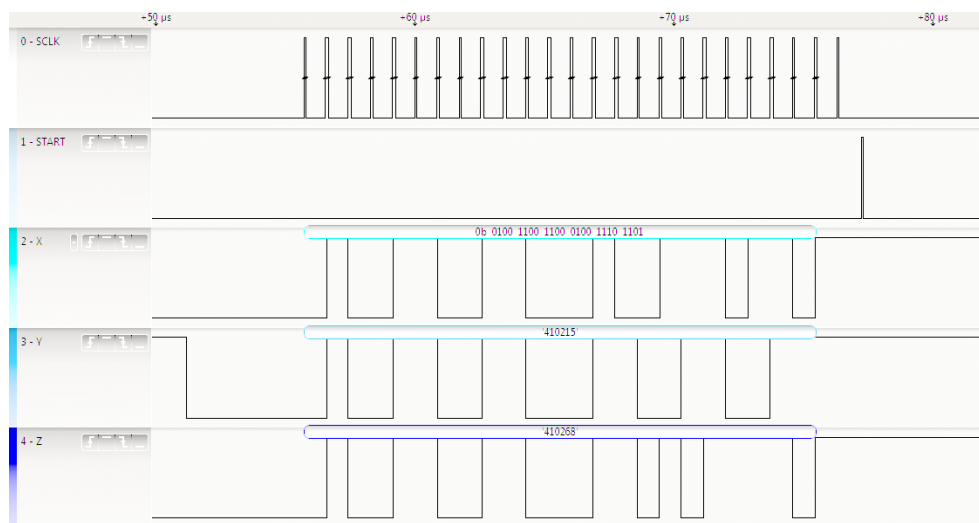
4.5. Analogově-digitální převodník ADS1225



Obrázek 4.13: Čekání na vyčítání dat z převodníku ADS1225, zdroj: Tomáš Břinčil

Převodník potřebuje určitý čas pro převod analogového vstupu na digitální 24bitové slovo. Bohužel výrobním procesem není zaručeno, že data budou převedena vždy za stejnou jednotku času a každá vyrobená součástka může mít dobu převodu různou, to je patrné z obrázku 4.13 u signálů DRDY/DOUT na osách X,Y a Z z logického analyzátoru. Aby bylo možné provádět měření vždy ve stejný okamžik, musí se s vyčítáním dat počkat na okamžik, kdy budou všechny logické signály X,Y a Z, respektive signály DRDY/DOUT každého převodníku v logické úrovni 0. V kapitole programové vybavení je podrobněji popsáno řešení identifikace tohoto okamžiku.

4. NÁVRH ANALOGOVÉ ČÁSTI PŘÍSTROJE



Obrázek 4.14: Detail vyčítání dat z převodníku ADS1225, zdroj: Tomáš Břinčil

Vyčítání 24bitového slova probíhá paralelně ze všech tří kanálů, respektive převodníků. Na obrázku 4.14 je vidět jeden konkrétní příklad, včetně vložené grafiky logického analyzátoru, který umožňuje dle nastavených parametrů SPI přenosu dekódovat digitální signál.

Návrh digitální části přístroje

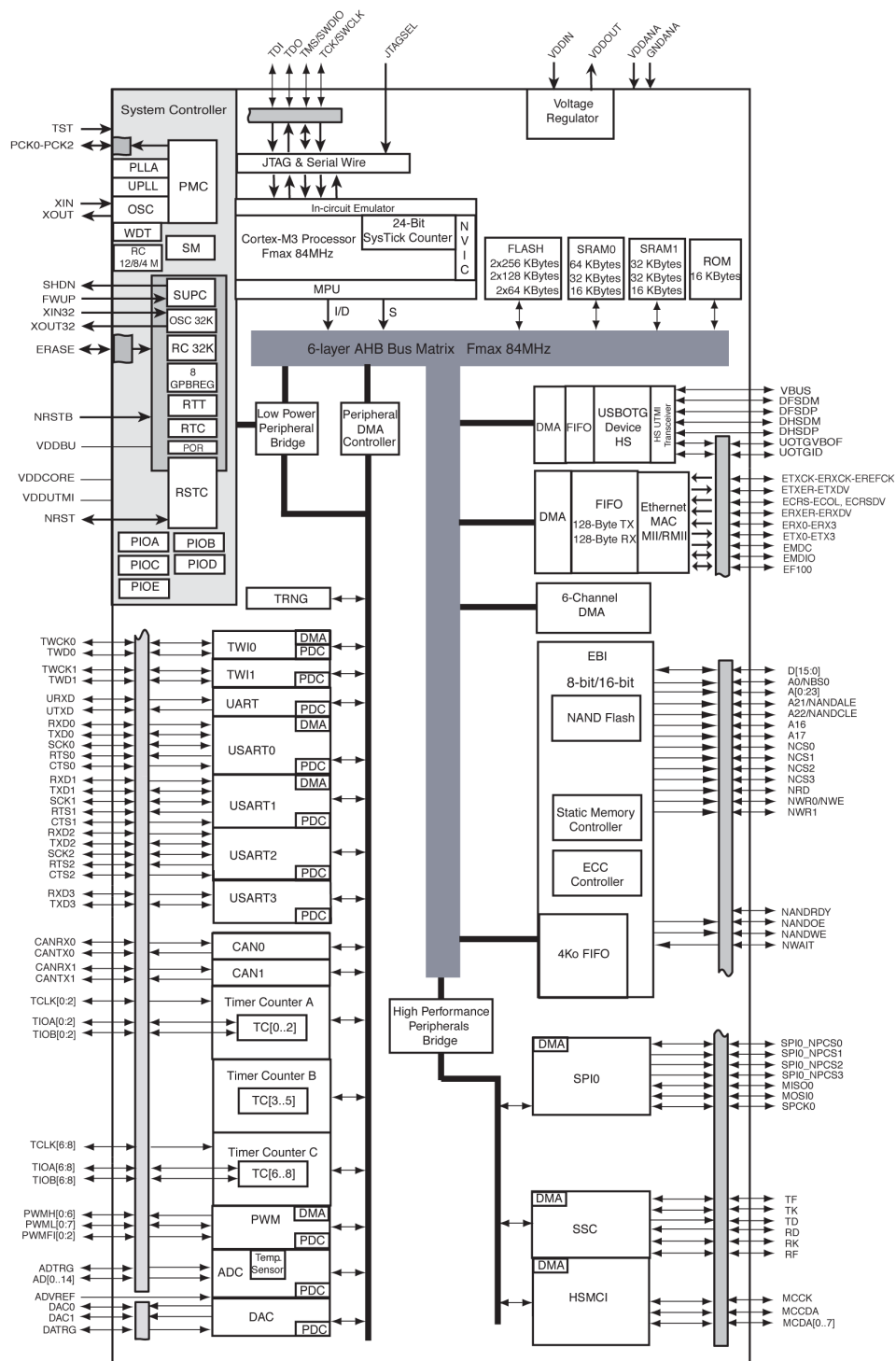
5.1 Mikrokontrolér ATSAM3X8EA

Jako mikrokontrolér pro ovládání periferní integrovaných obvodů a výpočetní operace byl zvolen procesor ATSAM3X8EA z ARMové řady výrobce ATMEL s jádrem Cortex-M3. Autor práce měl předchozí zkušenosti s AVR mikrokontroléry a vedoucí práce viděl přínos v poznávání ARMové architektury. Navíc je naplno využito 32bitové architektury při práci s datovými typy int, které mají velikost 32bitů, je tedy dostatečná rezerva při vyčítání 24bitových hodnot z Analogově-digitálních převodníků, pokud by byl použit pouze 8bitový mikrokontrolér, bylo by potřeba řešit aritmetiku počítání na softwarové úrovni a ne na úrovni instrukcí, což výrazně šetří procesorový čas.

Procesor je také vybaven integrovanými funkcemi, kterými nižší řady mikrokontroléru nedisponují:

- 12bitový AČ převodník, oproti běžným 10bitům.
- Integrovaná podpora USB sběrnice.
- SPI interface pro komunikaci s paměťovým médiem (SD karta)
- Interní 32kHz oscilátor s možností RTC (obvod reálného času)

5. NÁVRH DIGITÁLNÍ ČÁSTI PŘÍSTROJE



Obrázek 5.1: Blokové schéma mikrokontroléru ATSAM3X8EA, zdroj: [6]

5.2 OLED displej NHD-2.7-12864UCY3

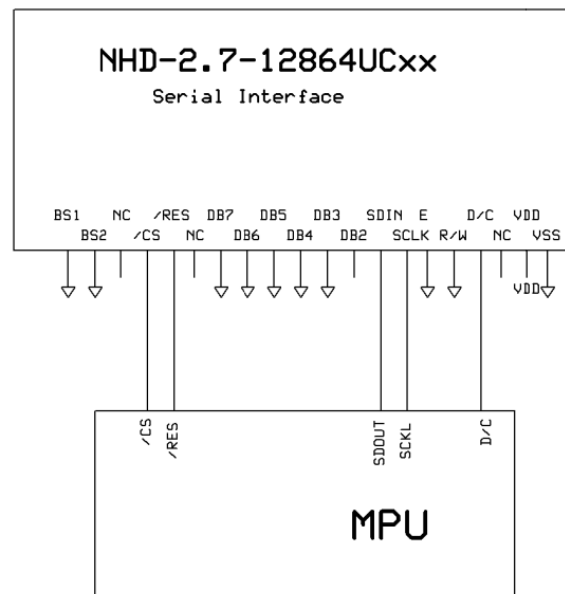
Pro zobrazování měřených údajů byl zvolen OLED displej od americké společnosti Newhaven Display, která má bohaté zkušenosti s vývojem zobrazovacích modulů a velké portfolio vyráběných produktů.

Jde o vysoce kontrastní grafický displej s rozlišením 128x64 pixelů emitujících žlutou barvu. Každému jednotlivému bodu lze nastavit relativní světelnou úroveň vzhledem k celkové maximální světelné úrovni a to až v 16ti krocích. Data k zobrazení se posílají po bytech a to vždy jako pár čtyř bitů pro dva pixely. Dle konfigurace pro dva horizontální pixely vedle sebe nebo vertikální nad sebou.



Obrázek 5.2: Obrázek OLED displeje, zdroj: [9]

Displej je dobře viditelný i za zhoršených světelných podmínek a disponuje dostatečným prostorem pro zobrazení všech informací na jedné obrazovce. Displej disponuje grafickým řadičem SSD1325 a rozšiřujícím integrovaným obvodem s funkcí generování fontů.



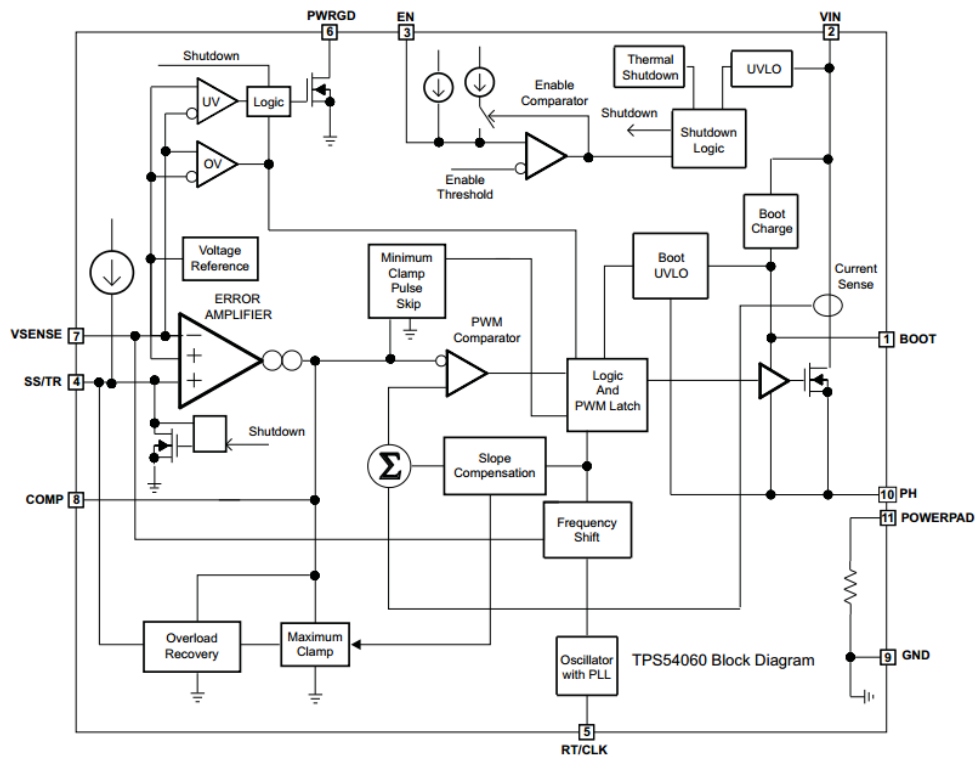
Obrázek 5.3: Blokový diagram komunikace s OLED displejem, zdroj: [9]

Displej je napájen z desky MCU. Pro komunikaci s mikrokontrolérem se využívá SPI datové sběrnice, kromě SPI podporuje řadič displeje také paralelní komunikaci se šířkou slova 8 bitů.

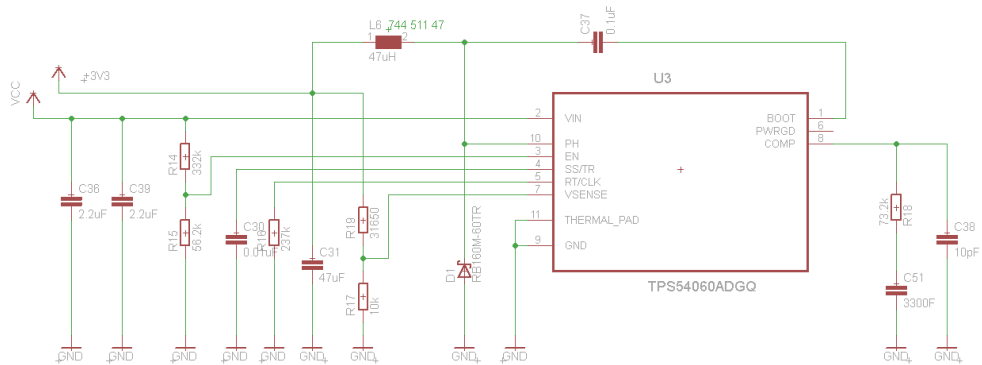
5.3 Zdroj napájení - TPS54060

TPS54060 je takzvaný step-down konvertor, který funguje na principu spínaného zdroje a za pomoci externí indukčnosti a několika diskretních součástek dokáže s vysokou účinností z libovolného vstupního napětí v rozsahu 3-36V stabilizovat nastavené výstupní napětí. Oproti lineárním stabilizátorům má minimální tepelné ztráty. V obvodu digitální desky je zvolen ze dvou důvodů, jednak na digitální části nejsou kladeny velké nároky na odrušení kmitajícími obvody jako je spínaný zdroj a druhak je potřeba kvůli OLED displeji větší napájecí proud.

5.3. Zdroj napájení - TPS54060



Obrázek 5.4: Blokový diagram integrovaného obvodu TPS54060, zdroj: [10]



Obrázek 5.5: Schéma s integrovaným obvodem TPS54060, zdroj: Tomáš Břinčil

Programové vybavení

Pro potřeby psaní programu a ovládání periférií bylo zvoleno vývojové prostředí Arduino. Jde o propracovaný ekosystém knihoven, bootloader pro AVR a ARM ATMEL a komunitu vývojářů a uživatelů zprostředkovávajících podporu.

Velkou výhodou je na první pohled vysokoúrovňové psaní kódu bez potřebné znalosti nízkoúrovňových operací a velká spousta knihoven funkcí, která řeší komunikaci po všech běžně používaných sběrnicích s velkým spektrem periférií. Knihovny vývojového prostředí jsou dobře dokumentované, není tedy problém použité funkce optimalizovat pro maximální výkon.

6.1 Vyčítání dat z převodníků pomocí přerušení

U mikrokontroléru je využito pokročilých možností přerušení. Přerušení, jak už samotný název procesu napovídá, přeruší běžný běh programu mikrokontroléru v návaznosti na definovanou akci.

Po detekování této akce dojde k přeskočení v paměti programu do oblasti, kde je spuštěna funkce přerušení, a poté se program vrátí na místo, kde došlo k přerušení, a pokračuje v běžné činnosti.

Přerušení je vyvoláno sestupnou hranou výstupního signálu DRDY/DOUT převodníku ADS1225 v momentě, kdy je připraven pro vyčítání dat.

Přerušení nastaví stavovou proměnnou pro každý z převodníků. Pokud je vyvoláno přerušení potřetí a všechny stavové proměnné jsou nastaveny do stavu informujícím o připravenosti převodníků, spustí se funkce odměřování.

Funkce vyčítání dat z převodníků je primitivní cyklus. Při každém ze čtyřadvaceti opakování cyklu se nastaví vstupní signál převodníku SCLK periodicky do logické úrovně 1 a po přečtení všech tří výstupních signálů DRDY/DOUT se nastaví zpět na logickou úroveň 0. Jednotlivé signály z převodníku DRDY/DOUT jsou zaznamenávány a po ukončení vyčítací cyklu tvoří 24bitové slovo nesoucí informaci o vstupním napětí jednotlivých kanálů.

Kvůli optimalizaci kódu, v tomto případě konkrétně kvůli ušetření procesorového času, byly přepsány funkce pro ovládání digitálních výstupů procesoru do formy, kterou kompilátor programu dále překládá na minimální počet operací mikrokontroléru. V důsledku toho je vyčítání měřených dat velmi rychlé.

6.2 Komunikace s SD kartou

Pro komunikaci s SD kartou je využito knihovny SDFat, využívá hardwarové SPI sběrnice mikrokontroléru. Po zapnutí nahrávání tlačítkem REC dojde k zobrazení této skutečnosti na OLED displeji a periodickému zápisu dat na SD kartu v měřicím přístroji.

Je využíváno celkem čtyř signálů. Tři signály hardwarové sběrnice SPI a jeden signál z mikrokontroléru:

- MOSI - Master Output Slave Input - signál slouží pro jednocestnou komunikaci od MCU k SD kartě.
- MISO - Master Input Slave Output - signál pro jednocestnou komunikaci od SD karty k MCU
- SCLK - Hodinový signál, slouží k udávání taktu toku datových signálů.
- CS - Chip Select - V tomto případě zbytečný signál, slouží k aktivování slave zařízení na SPI sběrnici, pokud nejde jen o komunikaci mezi dvěma zařízeními.

6.3 Komunikace s OLED displejem

Pro komunikaci s OLED displejem, respektive jeho řadičem SSD1325 je použito funkcí z knihovny u8glib ve verzi pro ARMovou architekturu. V této části programového kódu došlo k největším změnám a celá část knihovny kritická pro komunikaci s displejem byla přepsána kvůli zrychlení komunikace. Protože je hardwarová SPI sběrnice použita pro komunikaci s paměťovou kartou, je pro komunikaci s displejem využito softwarové emulace SPI sběrnice.

Displej využívá celkem pěti signálů:

- D/C - Data/Command - Signál slouží k rozeznání typu komunikace na signálu MOSI, pokud je nastavena logická úroveň 1 jde o data sloužící přímo k vykreslení na displeji, pokud je signál D/C v logické úrovni 0 displej manipuluje s daty jako řežijními informacemi.
- SCLK - Hodinový signál, slouží k udávání taktu toku datových signálů.
- MOSI - Master Input Slave Output - signál pro jednocestnou komunikaci od SD karty k MCU.

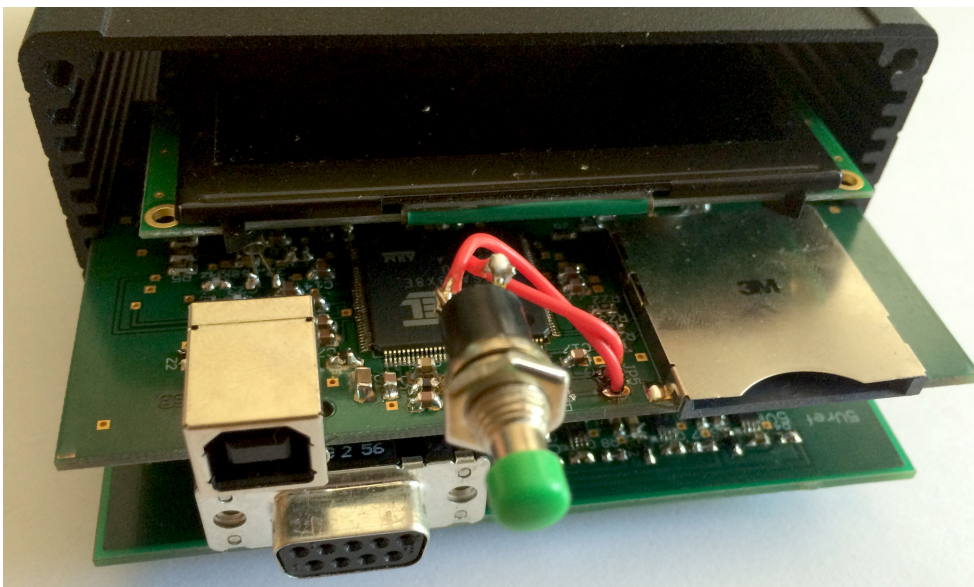
6.3. Komunikace s OLED displejem

- RES - Reset - Slouží ke spuštění integrovaného obvodu v displeji, v běžném provozu displeje je nastaven na logickou úroveň 1, při startu je nastavena po dobu inicializace logická úroveň 0
- CS - Chip Select - V tomto případě zbytečný signál, slouží k aktivování slave zařízení na SPI sběrnici, pokud nejde jen o komunikaci mezi dvěma zařízeními.

Realizace přístroje

Jednotlivé desky jsou konstruovány s pevnou šířkou 100mm tak, aby se daly zasunout do profilu konstrukční krabičky.

Konektor pro připojení fluxgate senzoru, tlačítko pro spuštění nahrávání měřených dat na paměťové médium a slot pro paměťové médium jsou orientovány na horní víčko krabičky. Konektor pro připojení fluxgate senzoru je přišroubován šrouby M3 do víčka krabičky a slouží zároveň jako spojovací člen desek s obvody k víčku krabičky.

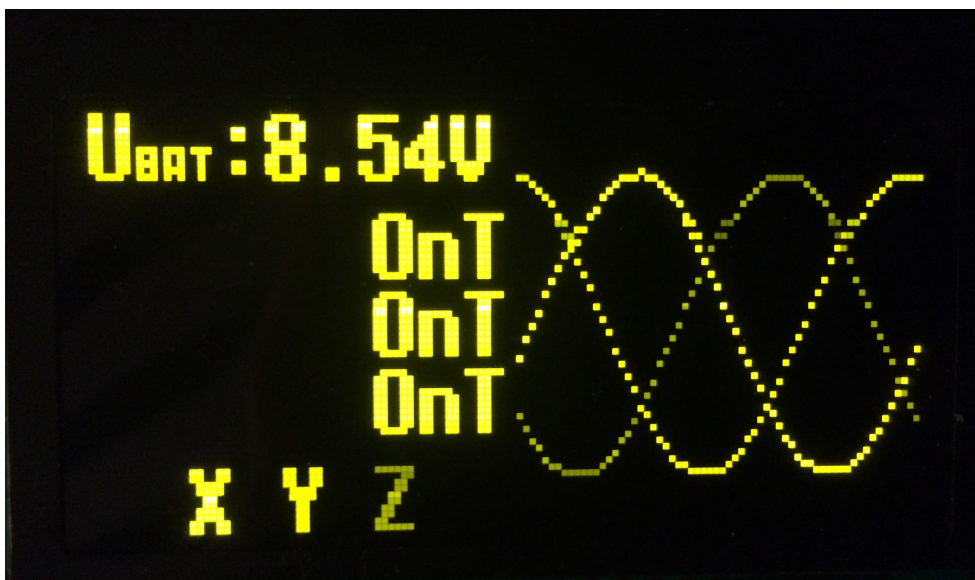


Obrázek 7.1: Měřicí přístroj s vysunutými deskami a OLED displejem, zdroj: Tomáš Břinčil

Napájení přístroje je řešené šesti kusy akumulátorů velikost AA (“tužková

7. REALIZACE PŘÍSTROJE

baterie”) s nominálním napětím 1,2V. Toto řešení je zvolené z důvodů rychlé výměny akumulátoru v případě vybití a nutnosti pokračovat v měření.



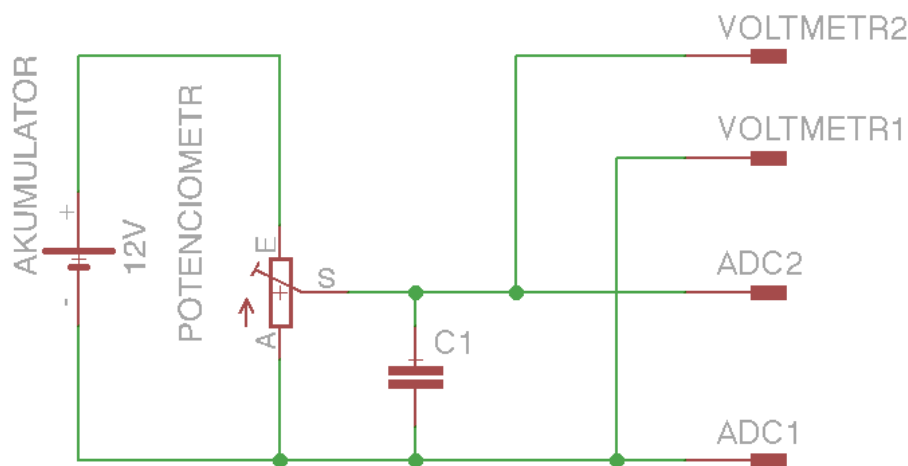
Obrázek 7.2: Náhled obrazovky měřícího přístroje, zdroj: Tomáš Břinčil

Zobrazování je prováděno pomocí vysoce kontrastního displeje, aby se daly měřené hodnoty přesně odečítat i na přímém slunečním světle. Displej je zvolen grafický, monochromatický, žluté barvy. Na obrázku 7.2 je náhled funkční obrazovky, kromě aktuálně měřených hodnot se zobrazuje také graf s historií měření. Graf zobrazující závislost tří měřených (vertikální osa) hodnot na čase (horizontální osa). Na displeji je také vidět napětí baterie a informace o stavu nahrávání na SD kartu.

Testování a měření

Pro správné převádění vstupního napětí z magnetometrů do digitální podoby je potřeba aproximovat převodní charakteristiku lineární křivkou. Postupným odměřením převodní charakteristiky v rozsahu pracovního bodu $\pm 10V$ získáme data pro linearizaci. Spočítané polynomy prvního řádu jsou zapsány v paměti programu a slouží pro správnou interpretaci převedených digitálních slov z převodníků na zobrazené jednotky nT na OLED displeji.

Jako model pro testování přístroje byl zvolen postup odměřování vstupního napětí, zprůměrování hodnot, následná linearizace přímky z měřených bodů a spočítání odchylek od linearity. Tímto bylo určena přesnost přístroje.



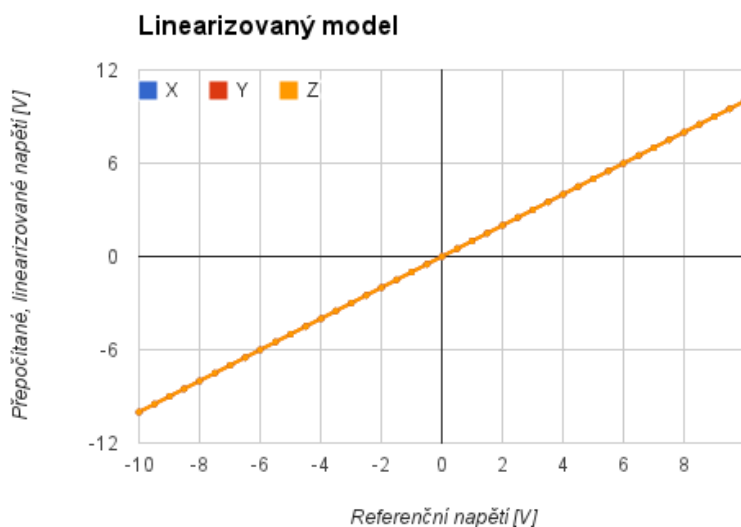
Obrázek 8.1: Schéma měřícího obvodu pro testování měřícího přístroje, zdroj: Tomáš Břinčil

Pro měření referenčního napětí z děliče napětí dle obrázku 8.1 byl zvo-

8. TESTOVÁNÍ A MĚŘENÍ

len multimetr Agilent 34401A. Jako zdroj byl použit 12V Pb akumulátor pro zaručení napěťové stability. Dělič napětí s odporem $10\text{k}\Omega$ byl doplněn o kondenzátor $C1=100\text{nF}$. Zdvojené výstupní svorky slouží pro připojení vstupu ADC převodníků a zároveň pro připojení multimetru.

Napěťovým děličem bylo nastaveno postupně napětí na multimetru z rozsahu $\pm 10\text{V}$ s krokem $0,5\text{V}$ a poté bylo provedeno 128 měření, která byla zprůměrována a zaznamenána.

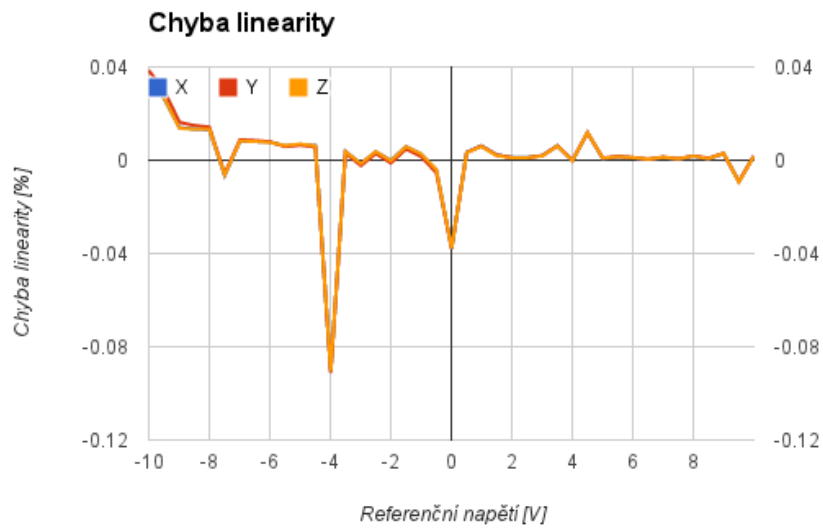


Obrázek 8.2: Linearizovaná přímka měřených hodnot vůči referenčnímu napětí, zdroj: Tomáš Břinčil

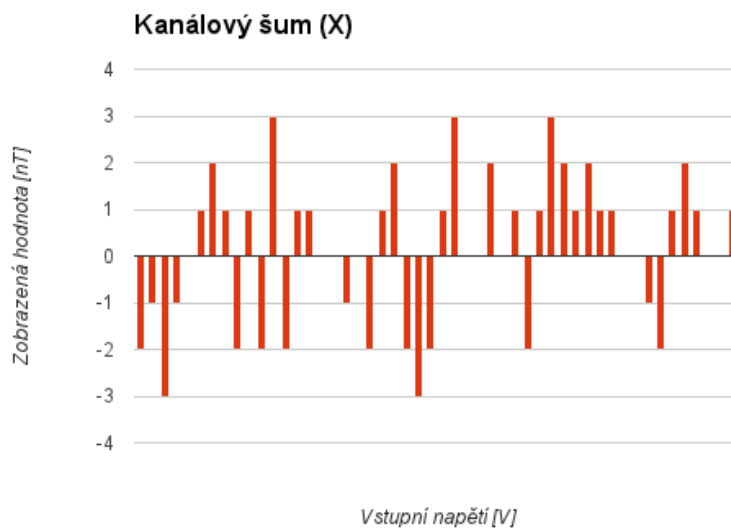
Měřené hodnoty pro každý kanál společně s lineariozvanou přímkou v pracovním bodě $\pm 10\text{V}$ byly vyneseny do grafu 8.2.

Chyba linearity byla spočítána jako podíl referenčního a přepočítaného napětí dle linearizovaných rovnic a vynesena do grafu zvláště pro každý kanál viz 8.3.

Vlastní šum zařízení byl měřen při zkratovaných vstupech s nulovým potenciálem, bylo provedeno 100 odměrů a měřené hodnoty byly vyneseny do grafu 8.4. Ačkoliv vnitřní aritmetika přepočtu bitového slova na zobrazované hodnoty dokáže počítat s větší přesností než jednotky nT, není to potřeba kvůli šumovému rušení a dostatečné přenosti v jednotkách nT. Pokud by bylo potřeba zobrazovat menší jednotky než nT, stačí upravit zobrazování část kódu, kde se provádí konečné zaokrouhlování.



Obrázek 8.3: Chyba linearity, zdroj: Tomáš Břinčil



Obrázek 8.4: Vlastní šum měřícího zařízení, zdroj: Tomáš Břinčil

Závěr

Cíle práce byly splněny. Byl navrhnut, sestaven a otestován měřicí přístroj, který se dá použít společně s fluxgate magnetometry v terénu pro měření magnetického pole. Během jednotlivých fází konstrukce měřicího přístroje byly osvojeny nové postupy a byly prohloubeny nebo nabyty nové znalosti z oboru metrologie, elektroniky a fyziky. Základní parametry předčily očekávání, výdrž na baterie je více než 10 h, zaznamenávání na SD kartu se ukázalo jako dimenzované řešení i pro dlouhodobé odměry. Díky kovové krabičce je měřicí přístroj odolný vůči nešetrnému zacházení. Ovládání zařízení je natolik primitivní, že nevyžaduje žádný manuál nebo instruktážní návod. Na OLED displeji jsou přehledně zobrazeny všechny informace potřebné pro měření a provoz měřicího přístroje. Pokud by měl pokračovat vývoj další verze měřicího přístroje nebo jiného přístroje s podobnými funkcemi, bylo by vhodnější místo monochromatického OLED displeje použít displej emitující více barev - minimálně tři, zobrazování grafů a rozlišování jednotlivých os pomocí rozdílného jasu se ukázalo jako nedostačující pro rychlé odměry a vyžaduje určité soustředění. Dalším možným vylepšením by mohlo být zvolení menší krabičky, uvnitř stávajícího měřicího přístroje je zbytečně mnoho prostoru. Pokud by měl zůstat nevyužit daly, by se použít větší akumulátory pro napájení nebo použít menší konstrukční krabičku.

Literatura

- [1] GmbH, C. C. M. T.: BAaD-TFM100G2. Dostupné z: <http://www.cmt-gmbh.de/Produkte/Magnetometer/TFM100G2.html>
- [2] GmbH, S. M.: Stefan Mayer FL3-100. Dostupné z: <http://web.archive.org/web/20060104204137/http://www.stefan-mayer.com/FL3.htm>
- [3] MEDA: FVM400. Dostupné z: <http://www.meda.com/FVM400.htm>
- [4] Inc., T. I.: TPS7A4901. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps7a4901.pdf>
- [5] GmbH, T. P.: TRACO POWER TES-2N. Dostupné z: http://www.tracopower.com/datasheet_g/tes2n-d.pdf
- [6] Inc., T. I.: REF5050. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ref5050.pdf>
- [7] Inc., T. I.: INA159. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina159.pdf>
- [8] Inc., T. I.: ADS1225. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1225.pdf>
- [9] International, N. D.: OLED NHD-2.7-12864UCY3. Dostupné z: <http://www.newhavendisplay.com/specs/NHD-2.7-12864UCY3.pdf>
- [10] Inc., T. I.: TPS54060. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps54060.pdf>
- [11] Dexing Magnet Tech. Co., L.: DX-330. Dostupné z: <http://www.magnetic-instrument.com/vector-magnetometer.htm>

LITERATURA

- [12] Ripka, P.: *Magnetic Sensors and Magnetometers*. Artech House Remote Sensing Library, 2001, ISBN 978-1580530576.
- [13] Yi, J.: *Definitve Guide To The ARM Cortex M3*. Elsevier Inc., 2007, ISBN 978-0-7506-8534-4.
- [14] Sickle, T. V.: *Programming Microcontrollers in C, Second Edition*. LLH-Publishing.
- [15] Vladimír Haasz, M. S.: *Elektrická měření - přístroje a metody*. Nakladatelství ČVUT, 1996.
- [16] a kol., P. R.: *Senzory a převodníky*. Nakladatelství ČVUT.
- [17] International, N. D.: SSD1325. Dostupné z: http://www.newhavendisplay.com/app_notes/SSD1325.pdf

Schéma zapojení a DPS

Seznam použitých zkratk

ADC Analogově-digitální převod z angl. Analogue to Digital Conversion.

MCU Hlavní řídicí jednotka z angl. Master Control Unit.

TTL Transistor-to-transistor, standard definující logické úrovně pro digitální komunikaci.

SMT Technologie montáže součástek na desku plošných spojů z angl. Surface Mount Technology

Obsah přiloženého CD

2014-05-22-brinctom-BP-README.txt	.....	stručný popis obsahu CD
2014-05-22-brinctom-BP.txt	.....	text práce v textovém formátu
2014-05-22-brinctom-BP.pdf	.....	text práce ve formátu PDF
adc		
| 2014-05-22-brinctom-bp-adc.brd		zdrojové soubory pro desku ADC
| 2014-05-22-brinctom-bp-adc.sch	.....	schéma ADC
| 2014-05-22-brinctom-bp-adc-brd.pdf	.....	deska ADC v PDF
| 2014-05-22-brinctom-bp-adc-sch.pdf	.....	schéma ADC v PDF
mcu		
| 2014-05-22-brinctom-bp-mcu.brd		zdrojové soubory pro desku MCU
| 2014-05-22-brinctom-bp-mcu.sch	.....	schéma MCU
| 2014-05-22-brinctom-bp-mcu-brd.pdf	.....	deska MCU v PDF
| 2014-05-22-brinctom-bp-mcu-sch.pdf	.....	schéma MCU v PDF
bin		
| 2014-05-22-brinctom-bp.hex	.....	binární soubor programu
code		
| ino	.....	projekt programu pro prostředí Arduino
| latex	.....	zdrojová forma práce ve formátu L ^A T _E X