



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta elektrotechnická  
Katedra měření**

**Zařízení pro sběr dat z vektorových magnetometrů**

**Data Acquisition System for vector magnetometers**

Diplomová práce

Studijní program: Kybernetika a robotika  
Studijní obor: Senzory a přístrojová technika

Vedoucí práce: Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D.

**Bc. Jakub Tesař**

---

**Praha 2014**



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Jakub Tesař**

Program: **Kybernetika a robotika**  
Obor: **Senzory a přístrojová technika**

Název tématu česky: **Zařízení pro sběr dat z vektorových magnetometrů**

Název tématu anglicky: **Data Acquisition System for Vector Magnetometers**

### Pokyny pro vypracování:

Navrhněte koncepci zařízení pro dlouhodobý bezobslužný sběr dat z vektorových magnetometrů s analogovým ( $\pm 10$  V) i digitálním (RS232) výstupem. Pro realizaci použijte jednočipový mikrokontrolér s tím, že naměřená data budou zobrazována na displeji a ukládána na vhodné paměťové médium (např. SD karta). Navržené zařízení realizujte formou funkčního otestovaného modulu.


### Seznam odborné literatury:

- [1] Ripka, P., Típek, A. (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] Záhlava, V.: Návrh a konstrukce desek plošných spojů - Principy a pravidla praktického návrhu, BEN-Technická literatura.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce: **11. listopadu 2013**

Platnost zadání do<sup>1</sup>: **31. srpna 2015**

  
Prof. Ing. Vladimír Haasz, CSc.  
vedoucí katedry



  
Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 11. 11. 2013

<sup>1</sup> Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

## Čestné 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 6.5.2014.....

  
.....

Podpis autora práce

## **Poděkování**

Chtěl bych tímto poděkovat všem, kteří se podíleli na realizaci této diplomové práce a především pak Ing. Vojtěchu Petruchovi, Ph.D. za odborné vedení, věcné připomínky, finanční podporu a vstřícnost během konzultací. Chtěl bych rovněž poděkovat svým rodičům, přítelkyni a nejbližším přátelům za jejich podporu a motivaci.

## **Abstrakt**

Cílem této diplomové práce je návrh a realizace přenosného zařízení provádějící dlouhodobý a bezobslužný sběr dat z vektorových magnetometrů pro měření magnetických polí v rozmezí velikostí vektorů magnetické indukce  $\pm 100 \mu\text{T}$ , které by tato data zobrazovalo a ukládalo na paměťové médium. Úvodem jsou specifikovány požadavky na takové zařízení a poskytnut náhled do problematiky měření magnetických polí. Hlavní část práce tvoří popis návrhu elektroniky záznamníku a jeho programovému vybavení. Závěrem jsou diskutovány výsledky funkčních testů.

## **Klíčová slova:**

Datalogger, Fluxgate, Magnetické pole, Mikrokontrolér, Sběr dat, Vektorový magnetometr, Záznam dat

## **Abstract**

The objective of this thesis is design and realization of a portable device operating in automatic mode and providing unattended and long-term data acquisition from vector magnetometers. The device measures magnetic fields in the range  $\pm 100 \mu\text{T}$ . Measured data of magnetic induction vectors are displayed and stored in the device memory. Introduction of the thesis defines requirements for such a device and gives readers an insight into problems of the measurement of magnetic fields in outline. The main part of the work describes design of electronic circuitries of the portable device including programming itself. Conclusion of the thesis interprets measured values and discusses results of functional tests.

## **Key words:**

Data Acquisition, Datalogger, Data Logging, Fluxgate, Magnetic Field, Microcontroller, Vector Magnetometer

# Obsah

Úvod.....	2
1 Teoretický rozbor.....	3
1.1 Měření magnetického pole.....	5
1.2 Magnetický senzor fluxgate.....	7
1.3 Srovnání existujících zařízení.....	9
2 Hardwarová realizace.....	12
2.1 Struktura hardware.....	12
2.2 Hlavní DPS (DPS MCU).....	13
2.2.1 Mikrokontrolér STM32F407VGT6.....	13
2.2.2 Programátor.....	17
2.2.3 Displej.....	19
2.2.4 Napájecí obvody.....	21
2.2.5 Rozhraní USART.....	23
2.2.6 Rozhraní SDIO.....	25
2.2.7 Ostatní komponenty.....	26
2.3 DPS A/D převodníku.....	31
2.3.1 A/D převodník.....	31
2.3.2 Obvody úpravy vstupního signálu.....	34
2.3.3 Napěťová reference.....	37
2.3.4 Napájecí obvody A/D převodníku.....	38
2.3.5 Napájecí obvody magnetometru.....	39
2.4 Tlačítková DPS.....	40
2.5 Ochranný kryt.....	41
3 Softwarová realizace.....	43
3.1 Vývojové nástroje a programovací jazyk.....	43
3.2 Struktura software.....	45
3.3 Softwarové knihovny.....	47
3.4 Textové uživatelské rozhraní - menu.....	55
4 Testování.....	60
Závěr.....	64
Literatura.....	65
Slovník použitých termínů a zkratk.....	67
Seznam obrázků.....	68
Seznam grafů.....	71
Seznam tabulek.....	72
Obsah příloženého CD.....	73

# Úvod

Magnetismu je využíváno v mnoha oborech lidské činnosti. Jeho důležitost v technice, vědecké metodice, v lékařství, ale především v navigaci má počátky již na konci 12. století, rozšířením magnetické stříelky a kompasu do Evropy [4].

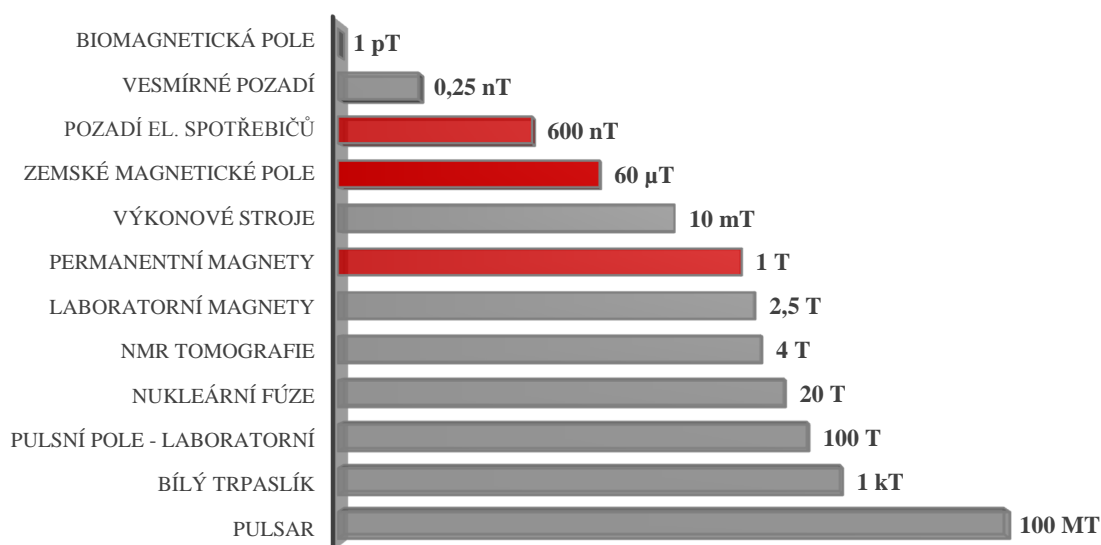
S rozvojem magnetizmu roste ruku v ruce i význam magnetometru, zařízení měřící magnetické pole. Magnetometr se skládá z jednotlivých magnetických senzorů měřících vektor magnetické indukce  $\mathbf{B}$  [T] vyjadřující hustotu indukčních siločar tohoto pole v každém bodu prostoru. Magnetometr postupem času nalezl uplatnění v mnoha oborech jako je mapování zemského magnetického pole, navigace a určování vzdálenosti a polohy při podzemním, horizontálním i vertikálním vrtání, kde nelze použít jiných navigačních prostředků, detekce magnetických cílů, jako jsou například miny či ponorky, defektoskopie, měření elektrického proudu, hledání hlubokých feromagnetických předmětů při archeologickém průzkumu nebo v lékařství při magnetopneumografii či měření objemu žaludku [9]. Při některých z těchto aplikací je nezbytné operovat ve venkovním prostředí. Toto ovšem klade množství nároků jak na samotné měřící zařízení, magnetometr, tak na zařízení provádějící zobrazení a záznam naměřených dat, datalogger. Obvykle se pro tento účel používá notebooků, které ovšem ne vždy vyhovují požadavkům dané aplikace. Jen namátkou lze zmínit výdrž na baterie, kompaktnost, odolnost vůči povětrnostním vlivům, možnost napájení magnetometru či existenci společného komunikačního rozhraní.

Cílem této diplomové práce se stal návrh a realizace právě takového zařízení, které by splňovalo všechna kritéria pro dlouhodobý bezobslužný sběr dat z vektorových magnetometrů zmíněná výše. Náplní tohoto textu je pak především detailní popis celého návrhu a funkčních parametrů dataloggeru. Úvod textu se rovněž věnuje rozboru možných aplikací záznamníku a stručnému ozřejmění problematiky měření magnetických polí. Závěrem jsou zhodnoceny parametry funkčního otestovaného modulu a poskytnuty podněty pro jeho další rozvoj.

# 1 Teoretický rozbor

Jak bylo řečeno na Úvod, magnetické měřicí soustavy, magnetometry, slouží mnoha aplikacím. Rozsah velikostí modulů vektorů magnetických polí pokrývá přes 20 řádů – od biomagnetických polí a polí na subatomární úrovni až po magnetická pole generovaná vesmírnými tělesy [3].

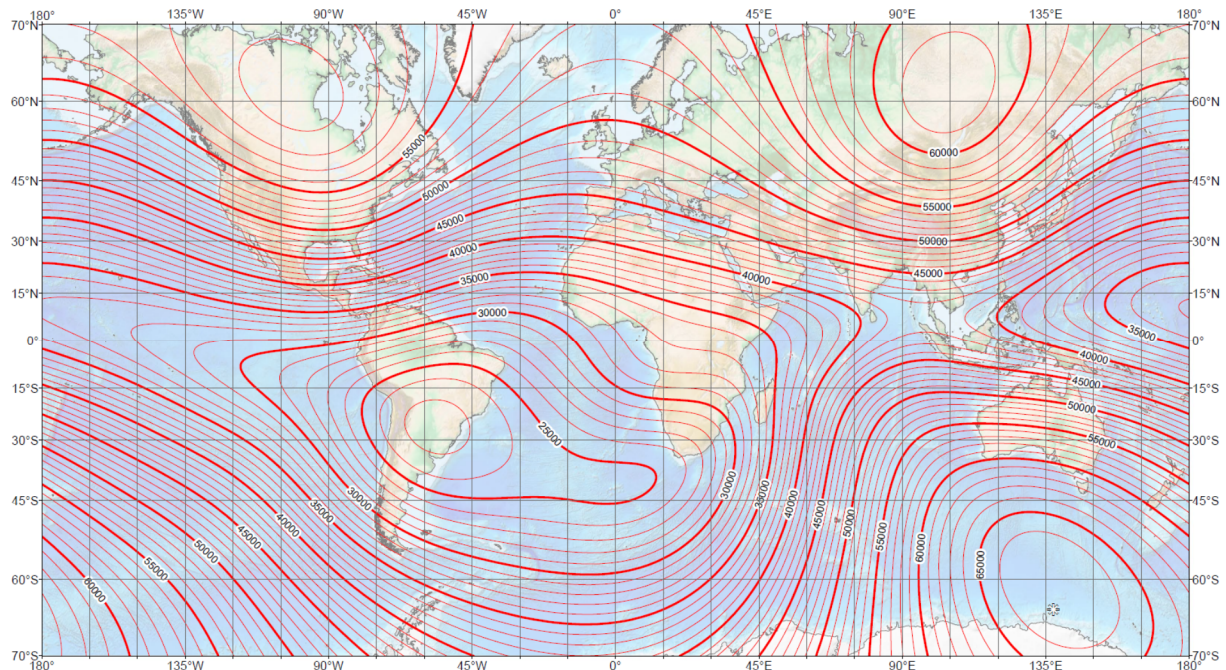
Tato práce se nicméně soustředí na aplikaci měření magnetických polí v rozmezí velikostí vektorů magnetické indukce od 100 pT do 100  $\mu$ T. V tomto rozsahu se krom mnoha dalších magnetických polí pohybuje například velikost zemského magnetického pole, elektromagnetické pole obklopujícího elektrická zařízení nebo pole permanentních magnetů, viz Graf 1.



Graf 1 - Dynamický rozsah magnetických polí, Zdroj: [3]

Podle posledního měření magnetického pole země organizací *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*, viz [6] z ledna 2010 se toto pole pohybuje v rozmezí cca 25-65  $\mu$ T. V České republice je to cca 48,9  $\mu$ T. Z Isodynamické mapy, viz Obr. 1 je dále patrné, že velikost zemského magnetického pole klesá ve směru od pólů k rovníku. Maximální velikosti je dosaženo v severní části Kanady, na Sibiři a na pobřeží Antarktidy a jižní Austrálie. Naopak minimální velikost pole se nachází v Jižní Americe.





Obr. 1 - Mapa rozložení velikosti modulu vektoru pole v závislosti na geografické poloze,

Zdroj: <http://www.ngdc.noaa.gov/>

Tab. 1, která je součástí studie vydané Federálním úřadem pro jadernou bezpečnost Německé spolkové republiky v roce 1999, uvádí orientační hodnoty velikostí několika radiofrekvenčních polí, se kterými je možno se setkat v běžném prostředí. Jak je vidět, magnetická pole v blízkosti vlaku/tramvaje či elektrické sítě jsou svou velikostí srovnatelná s magnetickým polem země. Tato pole mohou v mnoha aplikacích představovat zdroj magnetického rušení a zcela nebo přinejmenším částečně vyrušit pole měřená. Příkladem lze uvést detekci nevybuchlé munice (UXO), kterou reprezentuje letecká puma v hloubce 6 m (1 až 5 nT) a projektil 155 mm v hloubce 1,5 m (10 až 50 nT) [8].

Zařízení	Magnetická indukce ( $\mu\text{T}$ )	Komentář
Elektrická síť 400 kV	8-40	Vzdálenost 25 m
Tramvaj/vlak (maximum)	50	Uvnitř
Amplituda magnetických disturbancí	0,01-1	Kdekoli v budově

Tab. 1 - Typická velikost radiofrekvenčních polí, Zdroj: [2]

## 1.1 Měření magnetického pole

Nejstarším principem měření magnetického pole je kompas. Kompas využívá přitažlivé, respektive odpudivé síly opačných pólů magnetických dipólů. Až rozvoj studia elektromagnetismu v 19. století umožnil kvantifikaci měřeného magnetického pole. Měronosnými veličinami se tak staly především veličiny elektrické [3].

Současné magnetometry lze z aplikačního hlediska rozdělit na skalární a vektorové. Většina senzorů jsou senzory vektorové, které měří složku magnetického pole v daném směru. Skalární senzory naproti tomu měří pouze absolutní velikost měřeného magnetického pole bez ohledu na jeho směr [8]. Často se jich využívá jako reference pro vektorová měření, jelikož typicky dosahují vyšší přesnosti i rozlišení měření. Skalární velikost pole získáme jako geometrický průměr velikostí jednotlivých vektorových složek, viz (1) [3].

$$B_T(t) = \sqrt{B_x(t)^2 + B_y(t)^2 + B_z(t)^2} \quad (1)$$

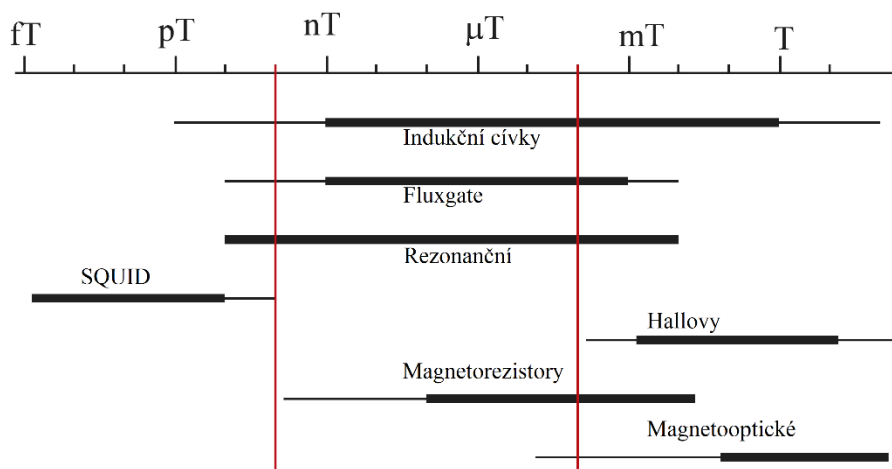
Podle [10] a [3] lze dále magnetické senzory dle principu jejich funkce rozdělit do těchto charakteristických skupin:

1. Indukční na principu Faradayova indukčního zákona (fluxgate , indukční cívky)
2. Magneto-galvanické na principu Lorentzovy síly (Hallový, polovodičové)
3. Magneto-rezistivní na principu magnetorezistivního jevu ve feromagnetických materiálech (AMR- Anizotropní magnetorezistory, GMR, TMR)
4. Kvantové na principu Josephsonova jevu (SQUID)
5. Magneto-impedanční na principu změny impedance materiálu (GMI)
6. Rezonanční na principu precesního pohybu nukleárních částic (protonový, Overhauserův)
7. Ostatní (strunový, rezonátory SAW, ...)

Z výše zmíněných skupin lze mezi skalární zařadit senzory rezonanční. Senzory ze skupin 1-5 se řadí mezi vektorové. Obr. 2 znázorňuje typické rozsahy několika z výše zmíněných typů senzorů. O vhodnosti použití daného senzoru nicméně rozhoduje velké množství kritérií.

Mimo běžných parametrů senzorů jako rozsah, linearita či hystereze mají magnetické senzory několik specifických parametrů, které je nutno sledovat. Teplotní závislost citlivosti se velmi často snižuje použitím zpětnovazební cívky, tak je tomu např. u fluxgate. Offset, jeho teplotní závislost a

časová stabilita se u flipovaných AMR magnetorezistorů pohybuje kolem 10 nT/K. U fluxgate je to typicky 0,1 až 0,5 nT/K. U senzorů obsahujících feromagnetické materiály, např. GMR magnetorezistory, dochází k „permingu“, změně offsetu po vystavení senzoru silnému magnetickému poli. Crossfield chyba, což je nelineární závislost na pole kolmé k poli měřenému je u fluxgate senzorů parazitním parametrem, který se dá snížit vhodnou konstrukcí. U AMR magnetorezistorů je tato citlivost ovšem dána samotným principem a je třeba s ním počítat. Posledním důležitým parametrem je šum. Ten má u magnetických senzorů většinou charakter 1/f a vyjadřuje se výkonovou spektrální hustotou PSD(f) na 1 Hz.<sup>1</sup> Mezi ostatní parametry patří cena, odolnost proti vnějším vlivům a další kritéria [8].



Obr. 2 - Rozsahy vybraných typů magnetických senzorů,<sup>2</sup> Zdroj: [9]

Pro skalární magnetometry se nejčastěji používají rezonanční senzory a to především v provedení protonových magnetometrů precesního typu, Overhauserových magnetometrů a magnetometrů opticky buzených. Dosahované rozlišení je typicky 0,1 nT při rychlosti 1 měření za sekundu a omezeném rozsahu (např. 20 000 až 100 000 nT) [8]. Absolutní přesnost bývá 0.2 nT.<sup>3</sup> Obecně se ovšem mnohem více užívá magnetometrů vektorových, viz dále.

Z feromagnetických magnetorezistorů se nejvíce používají anizotropní magnetorezistory (AMR). Používá se jich např. pro měření polohy a rychlosti otáčení v automobilovém průmyslu a pro méně přesné kompas do hodinek a mobilních telefonů. Ve srovnání s Hallovými senzory mají

<sup>1</sup> Pro 1/f šum platí  $PSD(f) = PSD(1)/f \text{ v } nT/\sqrt{Hz}$

<sup>2</sup> Vynesená stupnice je v logaritmickém měřítku

<sup>3</sup> Overhauser Magnetometer / Gradiometer / VLF – Standard Mode (0.2 Sec Cycling). In: *GEM Systems - Advanced Magnetometers* [online]. 2012 [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://www.gem-sys.ca/technology/gem-product-catalogue/>

vyšší citlivost a mnohem stabilnější offset. Vysoké hodnoty crossfield citlivosti u AMR senzorů lze potlačovat kompenzací měřeného magnetického pole pomocí integrované zpětnovazební cívky. Nejlepší AMR senzory dosahují šumu  $200 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$  [8].

Nejcitlivějšími magnetickými senzory jsou senzory SQUID. Tyto senzory ovšem měří jen změny pole. V praxi se používají jen jako gradiometry, většinou vyšších řádů. Vysokoteplotní SQUID pracují při teplotě kapalného dusíku, mají ale vysoký šum [8].

Vektorové magnetometry Billingsley<sup>4</sup> použité pro účely této práce se skládají ze tří senzorů fluxgate měřící jednotlivé složky - X, Y a Z, viz (1). Tyto indukční senzory jsou doposud nejpřesnějšími vektorovými magnetickými senzory. Více o nich v kapitole Magnetický senzor fluxgate.

## 1.2 Magnetický senzor fluxgate

Fluxgate senzory jsou nejcitlivějšími senzory pro práci při pokojové teplotě. První patenty se začaly objevovat již ve 30. letech 20. století. Pro jejich citlivost a stabilitu se během 2. světové války využívaly pro detekci ponorek a později se rozšířily i do dalších oblastí jako je geofyzikální průzkum, letecké mapování nebo vesmírné aplikace. Díky miniaturizaci je nyní jejich uplatnění ještě mnohem rozsáhlejší [10].



Fluxgate senzory jsou nejvhodnější volbou pro aplikace, kde je požadováno rozlišení v jednotkách nT při současném velkém dynamickém rozsahu. Tyto senzory běžně měří velikost a směr stejnosměrného nebo nízkofrekvenčního střídavého magnetického pole v rozsahu 100 pT až 100  $\mu\text{T}$ . Mohou dosáhnout rozlišení až 10 pT s dlouhodobou stabilitou 1 nT. Běžné parametry jsou však 100 pT a 10 nT, v uvedeném pořadí. Běžně používané snímače mají mezní frekvenci v desítkách Hz (speciální přístroje jednotky kHz). Fluxgate jsou teplotně velmi stabilní. Drift offsetu je okolo 0,1 nT/°C. Teplotní závislost se pohybuje kolem 30 ppm/°C. Při kompenzování lze dosáhnout až na 1 ppm/°C. Většina přístrojů pracuje ve zpětnovazebním režimu, díky čemuž dosahují linearity < 30 ppm [10].

$$V_{ind} = \frac{d\Phi_c}{dt} = N \frac{d}{dt} (S \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot H_0) \quad (2)$$

$$V_{ind} = N \cdot S \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \frac{dH_0}{dt} + N \cdot S \cdot H_0 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{d\mu}{dt} \quad (3)$$

<sup>4</sup> Magnetometers. *BILLINGSLEY: AEROSPACE & DEFENSE* [online]. 2014 [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://magnetometer.com/products/fluxgate-magnetometers/>

Princip fluxgate vychází z Faradayova zákona elektromagnetické indukce, viz rovnice (2), kde  $V_{Ind}$  je naindukované napětí na detekční (snímací) cívce (V),  $\Phi_c$  magnetický indukční tok cívkou (Wb),  $S$  střední plocha cívky ( $m^2$ ),  $N$  počet závitů snímacího vinutí (-),  $\mu$  permeabilita jádra ( $Hm^{-1}$ ),  $\mu_r$  relativní permeabilita prostředí (pro vzduch  $\approx 1$ ),  $\mu_0$  permeabilita vakua ( $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} Hm^{-1}$ ) a  $H_0$  intenzita měřeného pole ( $Am^{-1}$ ). První člen pravé strany (3) zohledňuje proměnné magnetické pole [5].

Parametr	TFM100	DFM28
Výstup	Analogový ( $\pm 10$ V)	Digitální (RS-232C, RS-485)
Měřicí rozsah	$\pm 100 \mu T$	$\pm 65 \mu T$ (jiné na požádání)
Přesnost	$\pm 0,5\%$ z celého rozsahu	$\pm 0,02\%$ z celého rozsahu
Linearita	$0,015\%$ z celého rozsahu	$\pm 0,015\%$ z celého rozsahu
Citlivost	$100 \mu V/nT$	28 Bit
Teplotní činitel nuly	$< 1,0 nT/^{\circ}C$	$< \pm 1,0$ z celého rozsahu $^{\circ}C$
Teplotní činitel	$0,0075\%$ celého rozsahu $^{\circ}C$	$\leq 0,002\%$ z celého rozsahu $^{\circ}C$
Šum	$100 pT$	$< 8 pT RMS/\sqrt{Hz}$ @ 1Hz
Výstupní impedance	$332 \Omega \pm 5\%$	N/A
Napájení	Galvanicky izolovaný měnič (+14 na +48 VDC nebo +40 na +125 VDC)	Nízko šumový spínaný regulátor (15V na 34V @ 750mW)
Teplotní rozsah	$-40^{\circ}$ až $+85^{\circ}C$	$-10$ až $40^{\circ}C$
Váha	200 g	909 g
Rozměry	3,66 cm x 3,58 cm x 15,44 cm	30,5 cm L x 7,8 cm D
Rozhraní	NON-MAGNETIC 9 PIN MALE "D"	BRANTNER XSEE-12-BCR
Obrázek	 <p>Obr. 3 - TFM100, Zdroj: <a href="http://magnetometer.com/">http://magnetometer.com/</a></p>	 <p>Obr. 4 - DFM28, Zdroj: <a href="http://www.cmt-gmbh.de/">http://www.cmt-gmbh.de/</a></p>

Tab. 2 - Porovnání magnetometrů fluxgate, Zdroj: <http://magnetometer.com/>

Pro ilustraci magnetometrů použitých pro potřeby této práce jsou v Tab. 2 uvedeny dva tříosé magnetometry fluxgate od firmy Billingsley s analogovým<sup>5</sup> a s digitálním<sup>6</sup> výstupem. Přístroj s analogovým výstupem slouží pouze, jako nízkopříkonový magnetometr s výstupem  $\pm 10$  V. Digitální

<sup>5</sup> TFM 100S. In: *BILLINGSLEY: AEROSPACE & DEFENSE* [online]. 2014 [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://magnetometer.com/wp-content/uploads/TFM100S-Spec-Sheet-February-2008.pdf>

<sup>6</sup> DFM28G. In: *BILLINGSLEY: AEROSPACE & DEFENSE* [online]. 2008 [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://magnetometer.com/wp-content/uploads/DFM28G-Spec-Sheet-February-2008.pdf>

magnetometr poskytuje více funkcí a umožňuje i automatické softwarové odrušení zemského magnetického pole. Pro komunikaci využívá sériové rozhraní RS-232C nebo RS-485.

### 1.3 Srovnání existujících zařízení

Záznamník dat, pracující se senzory uvedenými v Tab. 2, se dá obecně označit jako datalogger. Typicky se jedná o kompaktní, bateriově napájený přístroj vybavený mikrokontrolerem, paměťovým médiem a vstupním rozhraním. Specifikum magnetických měření ve venkovním prostředí ovšem klade dodatečné nároky, které nejsou komerčně vyráběné přístroje schopny stoprocentně naplnit.




Mnoho dataloggerů je určeno pro laboratorní měření. Nesplňují tedy požadavek na kompaktnost či bateriové napájení s dostatečnou výdrží. U mnoha zařízení je nevýhodou chybějící displej, který je potřebný pro jeho nastavení a zobrazení měřených dat. S tím je spojen převod naměřených hodnot do požadovaného tvaru – např. jednotky nT. U zařízení bez externího záznamového média je častým nedostatkem nevyhovující kapacita datového úložiště. Vzhledem k udržení dostatečné přesnosti měření, je potřeba dostatečně rychlé vyčítání a zpracování vstupních dat. K tomu je potřeba dostatečně výkonný, nízkopříkonový mikrokontrolér a A/D převodník s vysokým rozlišením. Posledním požadavkem, který mnoho zařízení nespĺňuje je současná vybavenost digitálním (RS-232) i analogovým vstupním rozhraním s dostatečným rozsahem a možností napájet magnetické snímače.

Tab. 3 slouží k seznámení s obvyklými parametry běžně dostupných dataloggerů s ohledem na kritéria sepsaná v předchozím odstavci a použitelných pro magnetometry popsané v Tab. 2. Lze je tak snadno srovnat s parametry navrženého zařízení. Detailní popis jeho konstrukce a funkce je pak poskytnut v kapitolách Hardwarová realizace a Softwarová realizace.

Prvním z uvedených dataloggerů je DataBridge Serial Data Recorder,<sup>7</sup> který disponuje pouze digitálním vstupem. Není jej proto možno připojit ke snímačům s analogovým výstupem. Jeho výhodou je použití externího paměťového média s dostatečnou kapacitou a kompaktní provedení. Nevýhodou je chybějící displej, uživatelské rozhraní a chybějící bateriové napájení. Tento záznamník by bylo možné použít v laboratorních podmínkách a magnetometry s digitálním výstupem. Data z dataloggeru by ovšem bylo nutné před vyhodnocením nejprve zpracovat do požadovaného tvaru.

---

<sup>7</sup> DataBridge SDR2-CF Serial Data Recorder. In: *Acumen Instruments Corporation* [online]. 2014 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <https://www.acumeninstruments.com/Products/SDR2-CF/SDR2-CF.shtml>

Zařízení	DataBridge Serial Data Recorder	20 Channel Midi Data Logger	Navržený datalogger
Vstup	1x digitální (RS-232)	20x analogový 0-24 V (rozšířitelný na 200)	1x digitální (RS-232), 3x analogový $\pm 10$ V
Výstup	N/A	4x Alarm, USB, Ethernet	Napájecí $\pm 12$ V
Vzorkování vstupu	N/A	100 vzorků/s	$\geq 3000$ vzorků/s
Displej	N/A	VGA 320 x 240 pixelů	128 x 64 pixelů
Datové uložení	Externí CF karta až 64 GB	Interní 2 GB, Externí USB paměťové zařízení	Externí SD karta > 2 GB <sup>8</sup>
Napájení	Síťové 3 až 30 VDC @ 350 mW	2 x AA baterie, síťové 8.5 až 24 VDC	6 x AA baterie, síťové 10 VDC
Váha	241 g	900 g	868 g
Rozměry	124 x 85,7 x 31,2 mm	232 mm x 152 mm x 50 mm	160 x 165 x 51,5 mm
Možnost rozšíření	N/A	N/A	USB 2.0 výstupní rozhraní, snímač osvětlení
Cena	470 USD (9.350 CZK)	2.295 USD (45.659 CZK)	---
Obrázek	 <p>Obr. 5 - DataBridge Serial Data Recorder, Zdroj: <a href="http://www.microdaq.com/">http://www.microdaq.com/</a></p>	 <p>Obr. 6 - 20 Channel Midi Data Logger, Zdroj: <a href="http://www.microdaq.com/">http://www.microdaq.com/</a></p>	 <p>Obr. 7 - Navržený datalogger, Zdroj: autor</p>

Tab. 3 - Porovnání parametrů záznamníků dat, Zdroj: autor

Záznamník dat 20 Channel Midi Data Logger<sup>9</sup> dává oproti předešlému zařízení k dispozici 20 analogových kanálů s dostatečným rozsahem. Tyto kanály nicméně nejsou bipolární a není proto možné přímo měřit záporné hodnoty magnetometrů,<sup>10</sup> jejichž výstup je  $\pm 10$  V. Velkou výhodou je grafický displej, možnost práce na baterie a ukládání dat na externí zařízení skrze USB port. K dispozici je nižší vzorkovací rychlost 100 vzorků/s, která je ovšem pro některé aplikace stále dostačující. Nevýhodou je taktéž chybějící rozhraní pro sériovou linku.

<sup>8</sup> Více, viz popis SDIO rozhraní v kapitole Softwarové knihovny

<sup>9</sup> 20 Channel Midi Data Logger Expandable to 200 Channels. In: *MicroDAQ.com: The DataLogger Store* [online]. 2014 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://www.microdaq.com/graphtec/gl820-midi-data-logger.php>

<sup>10</sup> Viz Tab. 2

Z výše uvedeného plyne, že ze všech nalezených záznamníků dat, které jsou zde zastoupeny dvěma příklady, viz Tab. 3, odpovídá navržený datalogger nejlépe požadavkům daných magnetických měření. Disponuje jak digitálním, tak analogovým vstupem s odpovídajícím rozsahem a možností napájení senzorů. Vysoce funkční je rovněž OLED displej s rozlišením 128 x 64 pixelů, který slouží k zobrazení naměřených dat a jako uživatelské rozhraní. Taktéž kapacita datového úložiště a bateriové napájení dovolují dlouhodobé bezobslužné měření. Velkým plusem je vysoká vzorkovací frekvence a úprava dat do požadovaného tvaru ještě před jejich uložením. Data tak mohou být ihned po uložení zpracována.

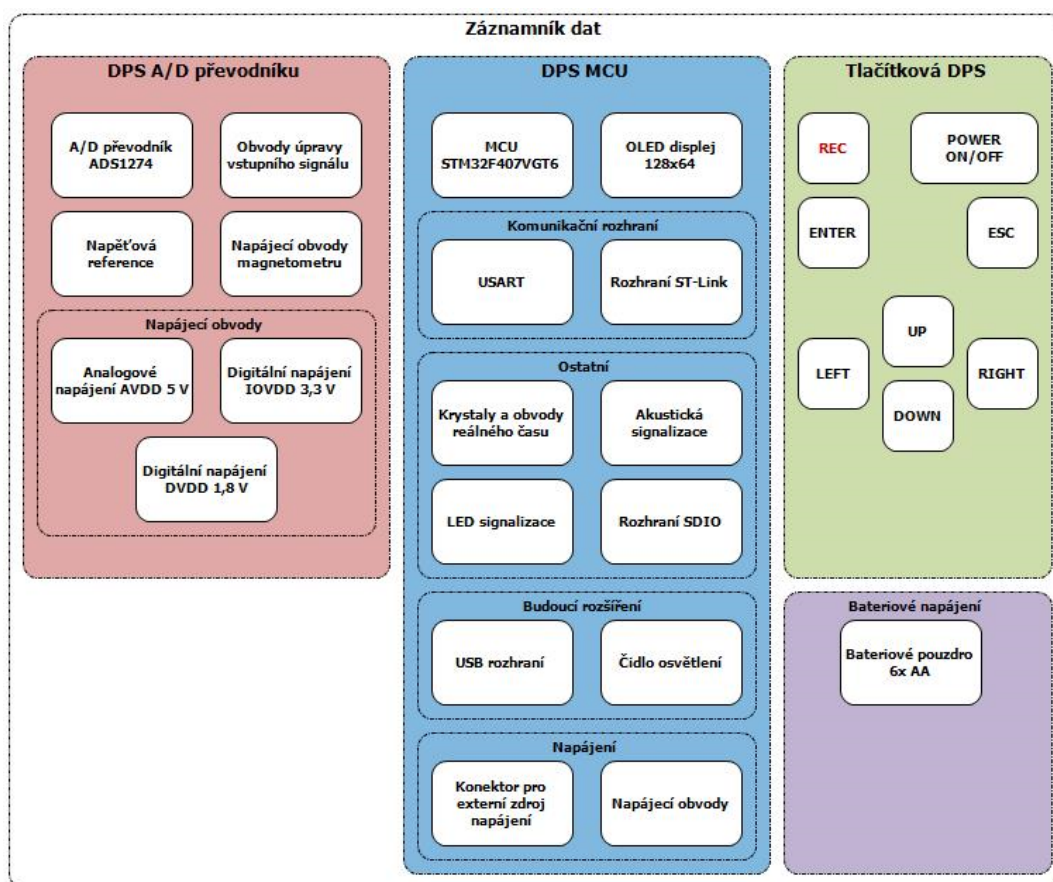
Následující kapitoly se detailně věnují popisu navrženého záznamníku a charakteristice jeho parametrů. Předposlední kapitola, Testování, pak shrnuje výsledky testování sestaveného modulu.



## 2 Hardwarová realizace

### 2.1 Struktura hardware

Zařízení je rozděleno do tří funkčních celků, viz Obr. 8. Návrh jednotlivých desek plošných spojů<sup>11</sup> se řídil jednak funkčními požadavky a jednak prostorovými možnostmi ochranného krytu, v němž je celé zařízení uloženo.<sup>12</sup> Hlavní DPS s mikrokontrolerem (DPS MCU) zajišťuje zpracování, ukládání a zobrazení dat, řízení periférií a slouží také jako vstup pro digitální magnetometr. DPS s A/D převodníkem a tlačítková DPS slouží jako interface pro analogový magnetometr s digitálním výstupem, respektive jako uživatelské ovládací rozhraní. Součástí dataloggeru je i napájecí konektor a bateriové pouzdro, které je uloženo v jeho těle a zajišťuje mobilitu celého zařízení.



Obr. 8 - Blokové schéma dataloggeru, Zdroj: autor

<sup>11</sup> Dále pouze DPS

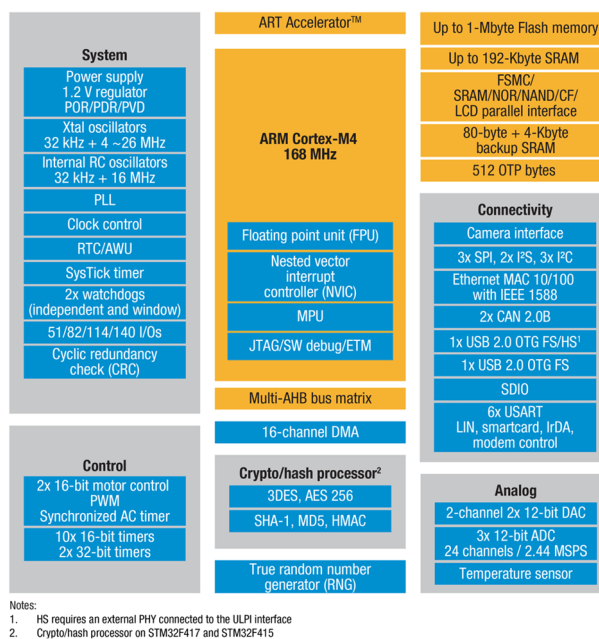
<sup>12</sup> Extruded Aluminum Enclosures: 1455T1601BK. In: *Hammond Manufacturing* [online]. 2013 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://www.hammondmfg.com/pdf/1455T1601.pdf>

## 2.2 Hlavní DPS (DPS MCU)

Tato DPS je řídicím centrem celého dataloggeru. Je zde umístěn především mikrokontrolér s obvody reálného času, 2,7“ OLED displej a SDIO konektor. DPS řídí ostatní části zařízení, poskytuje jim napájení, zpracovává naměřená data a interaguje s uživatelem od něž přijímá podněty skrze tlačítkovou DPS. Je zde rovněž integrován programovací interface a rozhraní USART pro digitální magnetometr.

### 2.2.1 Mikrokontrolér STM32F407VGT6

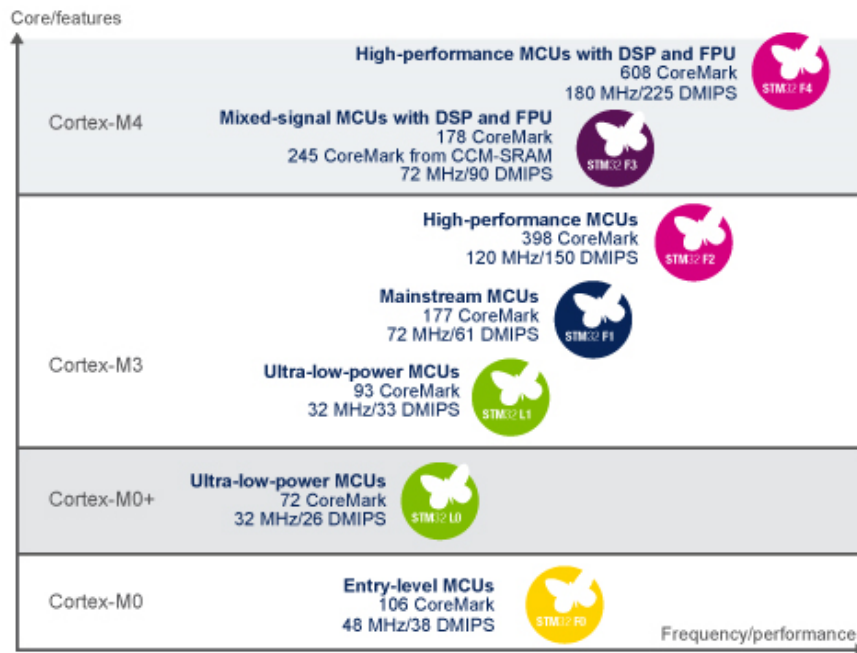
Pro realizaci dataloggeru byl zvolen mikrokontrolér od firmy STMicroelectronics s jádrem ARM Cortex™-M4. Pro jeho použití rozhodla nízká energetická náročnost, vysoký výkon, architektura, primárně určená k digitálnímu zpracování signálů a nízká cena vývojového kitu, který byl osazen všemi požadovanými funkcionalitami. Využitím STM32F4 Discovery vývojového kitu bylo možné ověřit vhodnost tohoto mikrokontroléru ještě před započítím samotné realizace a otestovat si tak všechny požadované funkce.



Obr. 9 - Mikrokontrolery STM32F4, Zdroj: <http://www.embedded.com/>

Architektura mikrokontroléru, Cortex™-M RISC, integruje několik úrovní klidových režimů, což umožňuje poskytnutí vysokého výkonu za současných nízkých energetických nároků. Optimalizaci výkonu a velikosti kódu dovoluje SIMD Thumb®-2 instrukční set, který podporuje jak 32-

bitové, tak 16-bitové instrukce včetně hardwarového dělení, násobení v jediném cyklu a manipulaci na jednobitové úrovni. Cortex-M4 Nested Vectored Interrupt Controller zajišťuje vysokou míru přizpůsobení při správě až 240 systémových přerušení přiřazením individuálních priorit, dynamickou změnou priorit přerušení a integrováním systémových hodin. Efektivní zpracování naměřených dat dovoluje jednotka pro 32-bitové operace s čísly s plovoucí řádovou čárkou (FPU) [1].

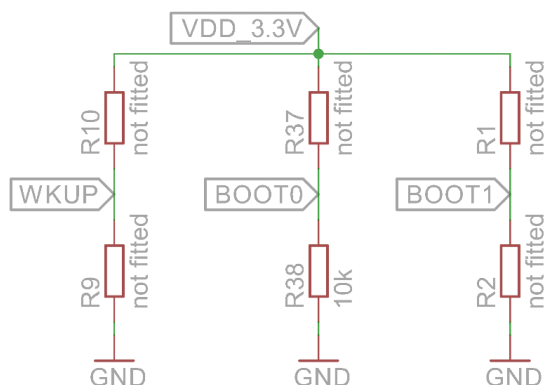


Obr. 10 – Řada mikrokontrolerů STM32, Zdroj: <http://www.st.com/>

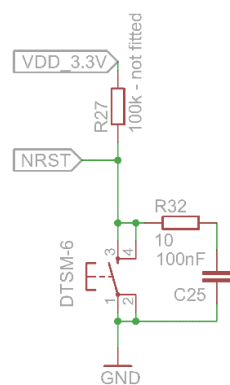
STM32F407VGT6 se řadí do nejvyšší třídy mikrokontrolerů STMicroelectronics STM32F4 s jádrem Cortex™-M4, viz Obr. 10. Lze jej taktovat až na 168 MHz, je vybaven 1 MB Flash programovou/datovou pamětí, obvody reálného času doplněné o externí krystal a SPI sériovými sběrnými pro komunikaci s OLED displejem a A/D převodníkem. Mikrokontrolér je dále vybaven UART/USART porty sloužícími pro komunikaci s digitálním magnetometrem, SDIO rozhraním dedikovaným pro připojení paměťové karty a portem USB B připraveným pro pozdější připojení dataloggeru k PC přes rozhraní USB 2.0. PWM modulátor s 12-bitovým D/A převodníkem poskytuje hodinový signál DPS A/D převodníku, čímž odpadá potřeba použití externího krystalového oscilátoru. PWM modulátor je zdrojem signálu také pro piezoelektrický měnič, který slouží akustické signalizaci. Díky přímému přístupu do paměti prostřednictvím DMA kontroléru daného PWM kanálu tato funkce nijak nezatěžuje mikrokontrolér. Pro dohled nad úrovní napájecího napětí je využita



implementuje mikroprocesor speciální mechanismus, který je nastaven pomocí dvou zaváděcích pinů, viz Tab. 4 a Obr. 12 [11].



Obr. 12 - Zapojení zaváděcích pinů, Zdroj: autor



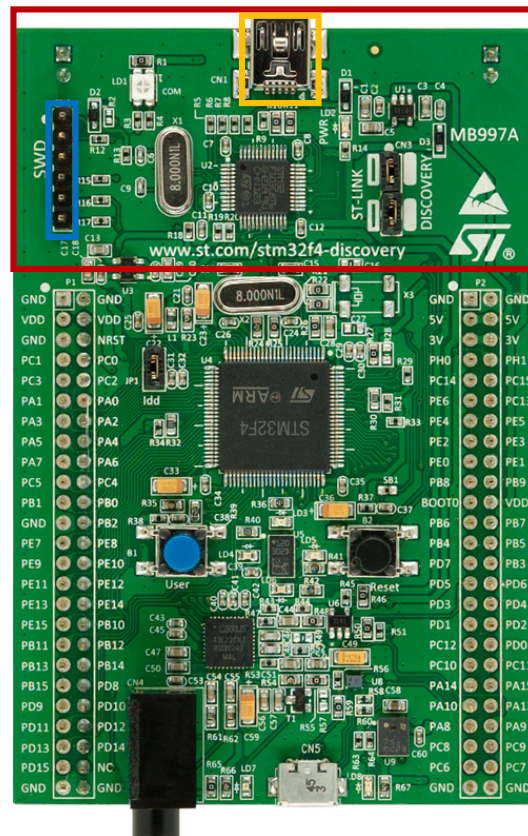
Obr. 13 - Reset mikrokontroleru, Zdroj: autor

Se zaváděním programu a jeho laděním je úzce spojen také reset mikroprocesoru (NRST, pin PB4), který je automaticky resetován programátorem při zavádění skrze programovací rozhraní ST-Link a nebo kdykoli uživatelem pomocí resetovacího tlačítka, viz Obr. 13. Více o programovacím rozhraní ST-Link v kapitole Programátor. K resetu může rovněž sloužit pin PA0 – WKUP.

Zaváděcí piny		Zaváděcí paměť
BOOT1 (PB2)	BOOT0	
x	0	Flash paměť
0	1	Systémová paměť
1	1	Datová paměť SRAM

Tab. 4 - Zaváděcí režimy mikrokontroleru, Zdroj: [11]

## 2.2.2 Programátor

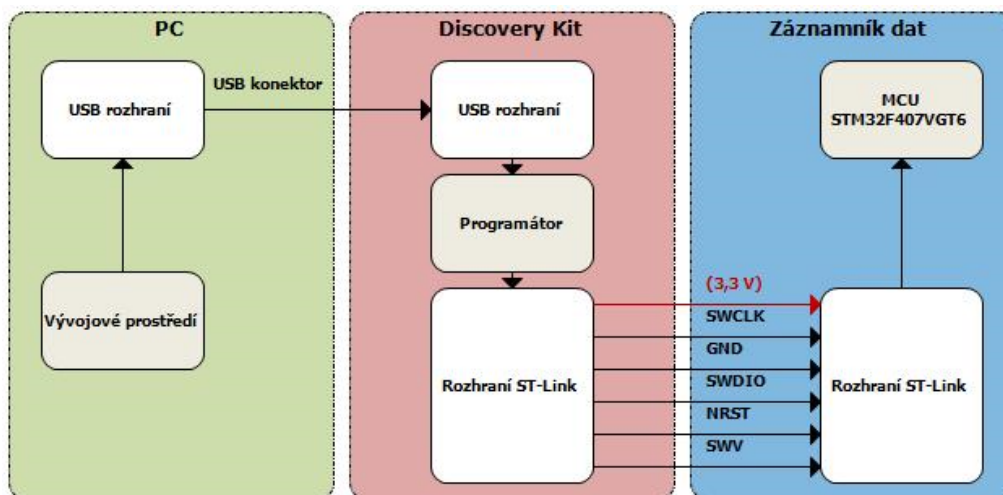


Obr. 14 - STM32F4 Discovery, Zdroj: <http://www.st.com/>

Pro programování a ladění dataloggeru byl použit vývojový kit STM32F4 Discovery, který zároveň sloužil jako vývojová platforma, na které byly ještě před samotnou fyzickou realizací záznamníku dat odzkoušeny všechny požadované funkcionality. Discovery kit se dělí na dvě části. První část s programovacím a ladicím rozhraním ST-Link V2, která je na Obr. 14 vyznačena červeně a druhou, evaluační vybavenou mikroprocesorem STM32F407VGT6 a několika testovacími periferiemi.

Pin MCU	Označení	Funkce	Pin STM32F4 Discovery
3,3V	3,3V	Napájení	3,3V
PA14	SWCLK	Hodinový signál	PA14
GND	GND	Zem	GND
PA13	SWDIO	Datový signál	PA13
PB4	NRST	Reset	PB4
PB3	SWV	Sledování a úprava registrů	PB3

Tab. 5 - Programovací rozhraní, Zdroj: autor



Obr. 15 - Programování dataloggeru, Zdroj: autor

ST-Link V2 pracuje s rozhraním SWD, které je dvou vodičovou, sériovou alternativou pro standardní rozhraní JTAG. SWD nahrazuje klasický JTAG interface dvěma signály, z nichž první je hodinový, synchronizační signál SWCLK a druhý obousměrný, datový signál SWDIO poskytující všechny běžné programovací a ladící funkcionality rozhraní JTAG.<sup>16</sup> Tyto dva programovací piny jsou dále doplněny o napájecí pin 3,3V,<sup>17</sup> zemnicí pin GND, resetovací pin NRST a SWV pin umožňující - čtení a zápis dat do registrů, sledování vyjímek, programového čítače a časových značek.<sup>18</sup> Programovací rozhraní je zvýrazněno na Obr. 14 modrou barvou, USB konektor pro připojení PC oranžovou. Diagram na Obr. 15 znázorňuje celý programovací řetězec. Rozhraní ST-Link umístěné na DPS MCU lze pro potřeby programování snadno připojit k programátoru. Na konektor jsou připojeny vodiče, jenž mohou být po odkrytí pravé bočnice lehce vyvedeny z krytu. K ladění je možné použít tlačítko reset na programátoru. Číslování pinů je popsáno v Tab. 5.

<sup>16</sup> Serial Wire Debug. In: *ARM* [online]. 2014 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://www.arm.com/products/system-ip/debug-trace/coresight-soc-components/serial-wire-debug.php>

<sup>17</sup> Tímto pinem lze kvůli značnému proudovému odběru napájet pouze DPS MCU

<sup>18</sup> STMicroelectronics: Cortex™-M4 Training STM32F407. In: *Keil Embedded Development Tools* [online]. 2013 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: [http://www.keil.com/appnotes/files/apnt\\_230.pdf](http://www.keil.com/appnotes/files/apnt_230.pdf)

### 2.2.3 Displej

Zařízení je osazeno 2,7“ OLED displejem NHD-2.7-12864UMY3<sup>19</sup> společnosti Newhaven Display s rozlišením 128x64 pixelů, viz Obr. 16. Tento displej byl vybrán pro svůj nízký napájecí proud 18,2 mA, kterého lze dosáhnout při nastavení minimálního proudového odběru a kontrastu a napětí 3 V, jenž může být dodáváno stejně jako pro mikrokontrolér z jednoho regulátoru a není proto potřeba osazovat DPS dodatečnými napájecími obvody. Dalšími podmínkami požadovanými pro komfortní venkovní provoz byl dostatečný jas displeje, který má hodnotu 100 cd/m<sup>2</sup>, kontrast 2000:1 a provozní teplota, jenž se pohybuje v rozmezí od -20 °C až +70 °C.



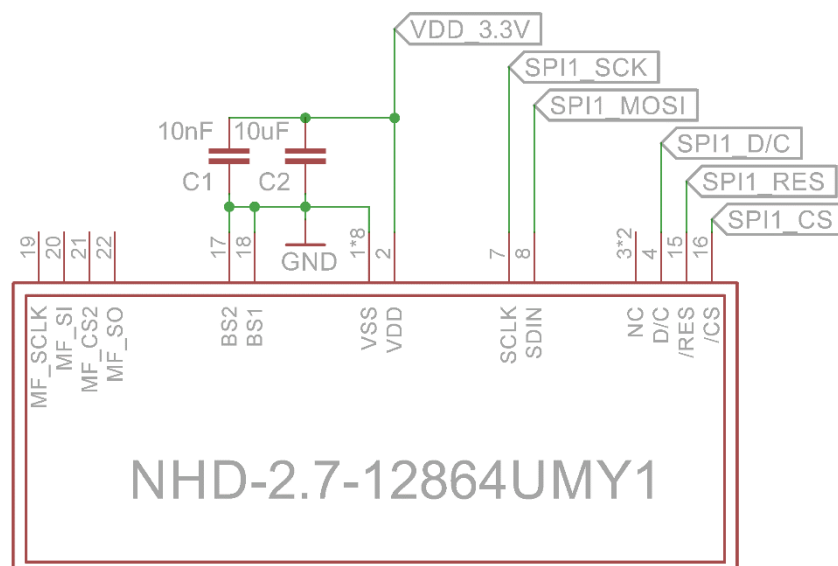
Obr. 16 – Displej - NHD-2.7-12864UMY3, Zdroj: <http://www.newhavendisplay.com/>

Komunikaci s displejem zprostředkovává kontrolér SSD1325.<sup>20</sup> Ten zobrazuje data přímo ze své interní paměti. Data/řídící příkazy může přijímat přes paralelní 8-bitová rozhraní 6800 a 8080 nebo přes sériové rozhraní SPI. Vzhledem k rychlosti sériové komunikace a minimalizaci počtu přenosových cest, bylo pro realizaci zvoleno rozhraní SPI s přenosovou rychlostí 30 MHz. Ze stejného důvodu nebylo využito zabudované databanky fontů. Ta byla nahrazena softwarovou knihovnou, jež obsahuje všechny potřebné znaky a urychluje vzájemnou komunikaci, viz kapitola Softwarové knihovny. Rozhraní displeje je popsáno v Tab. 6 a jeho blokové schéma je na Obr. 17.

<sup>19</sup> NHD-2.7-12864UMY3: OLED Display Module. In: *Newhaven Display International* [online]. 2014 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://www.newhavendisplay.com/specs/NHD-2.7-12864UMY3.pdf>

<sup>20</sup> SSD1325: 128 x 80, 16 Gray Scale Dot Matrix OLED/PLED Segment/Common Driver with Controller. In: *Newhaven Display International* [online]. 2014 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: [http://www.newhavendisplay.com/app\\_notes/SSD1325.pdf](http://www.newhavendisplay.com/app_notes/SSD1325.pdf)



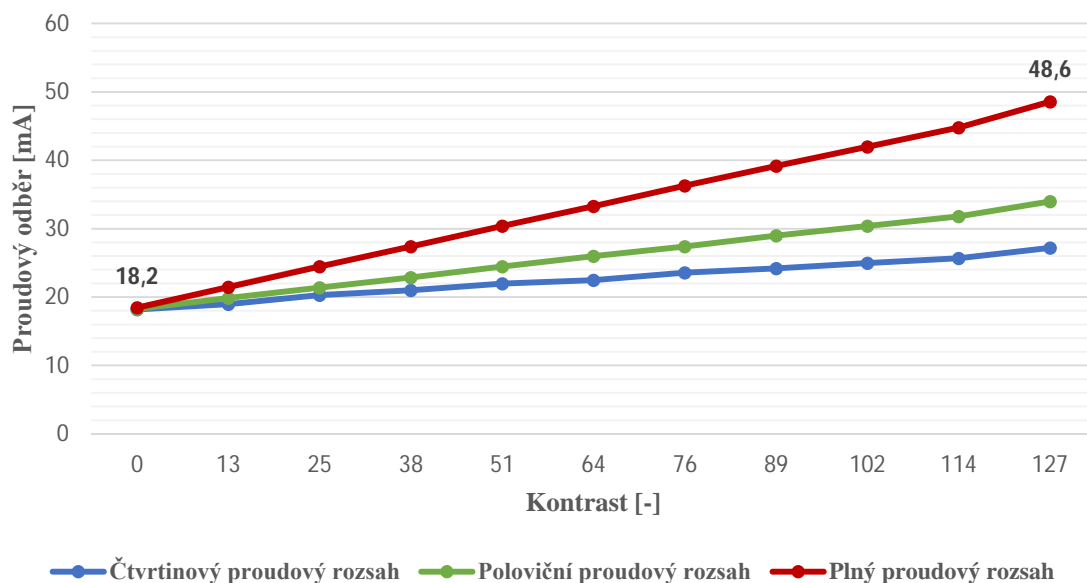


Obr. 17 - Rozhraní displeje, Zdroj: autor

Kontrolérem lze nastavit kontrast ve 128 úrovních a třech napájecích proudových režimech. To dovoluje nastavit displej podle aktuálních požadavků na spotřebu a světelné podmínky. Při nastavení minimalizujícím spotřebu byl naměřen odběr 18,2 mA. Při maximálním kontrastu to bylo 48,6 mA. Závislosti napájecího proudu na nastavení kontrastu a nastaveném proudovém rozsahu je vynesena v Graf 2. Zobrazená závislost byla otestována v běžném provozním režimu zobrazujícím datum, čas a naměřená data. V klidovém režimu má displej odběr 1,6 mA.

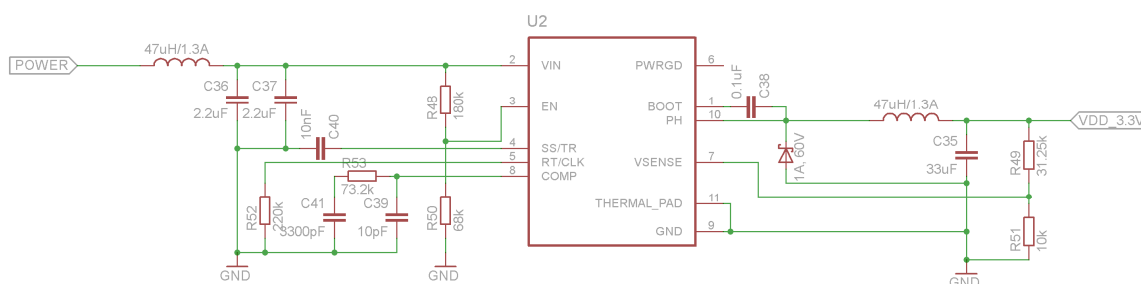
Pin	Pin Displeje	Označení	Pin MCU	Popis funkce
1	VSS	GND	GND	Zem
2	VDD	VDD_3,3V	3,3V	Napájení pro displej a řídicí logiku
4	D/C	SPI1_D/C	PA6	Signál volby registrů, 0: Řídicí příkaz, 1: Data
5-6	VSS	GND	GND	Zem
7	SCLK	SPI1_SCK	PA5	Hodinový signál sériové komunikace
8	SDIN	SPI1_MOSI	PA7	Datový signál sériové komunikace
10-14	VSS	GND	GND	Zem
15	/RES	SPI1_RES	PA3	Resetovací signál aktivní při log. 0
16	/CS	SPI1_CS	PA4	Povolovací signál čipu aktivní při log. 0
17	BS1	GND	GND	Signál pro volbu rozhraní MCU
18	BS2	GND	GND	Signál pro volbu rozhraní MCU

Tab. 6 - Sériové rozhraní SSD1325, Zdroj: autor



Graf 2 - Závislost proudového odběru na nastaveném kontrastu, Zdroj: autor

## 2.2.4 Napájecí obvody



Obr. 18 - Step-down regulátor TPS54060, Zdroj: autor

Pro napájení DPS MCU byl použit step-down regulátor napětí s vysokou účinností TPS54060<sup>21</sup> od firmy Texas Instruments, který může do zátěže kontinuálně dodávat proud až 0,5 A při vstupním napětí 3,5 až 60 V. Regulátor implementuje proudové řízení na konstantní frekvenci, což zlepšuje chování při proměnlivém vstupním napětí a zátěži a také umožňuje snížit hodnotu kapacity výstupního kondenzátoru a zjednodušuje návrh externí frekvenční kompenzace. Ta je nastavena kondenzátory C<sub>39</sub>, C<sub>41</sub> a rezistorem R<sub>53</sub> připojenými na kompenzační pin (COMP). Volbou jejich hodnot se nastavuje napětí na tomto pinu a dochází k nastavení limitů pro řízení proudu. S tím

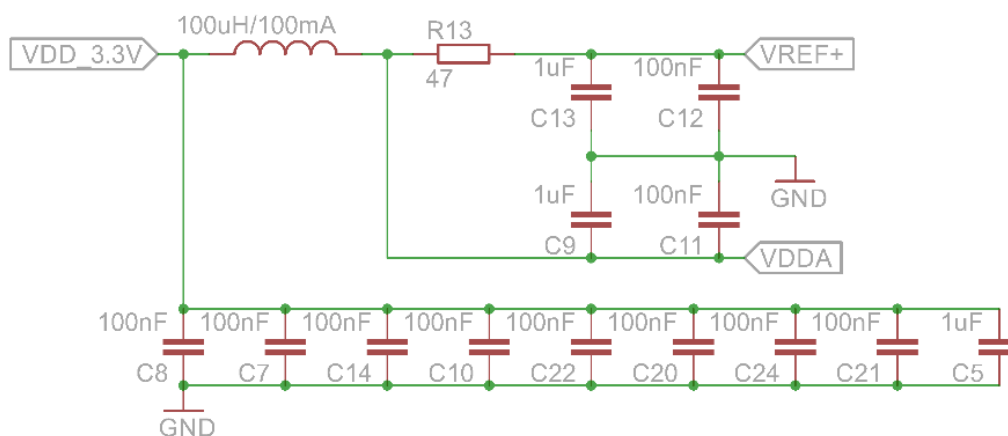
<sup>21</sup> TPS54060: 3.5V to 60V Input, 0.5A Step-Down Converter with Eco-Mode. In: *Texas Instruments* [online]. 2014 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps54060.pdf>

jak se mění výstupní proud, mění se i napětí na kompenzačním pinu a dochází k regulaci. Spínací frekvence je rezistorem  $R_{52}$  nastavena na cca 700 kHz. Tato hodnota je odvozena ze závislosti spínací frekvence na rezistoru  $R_{52}$ , viz obvodové zapojení na Obr. 18.

$$R_{48} = \frac{V_{START} - V_{STOP}}{I_{HYS}} \quad (4)$$

$$R_{50} = \frac{V_{ENA}}{\frac{V_{START} - V_{ENA}}{R_{48}} + I_1} \quad (5)$$

Rezistory  $R_{48}$  a  $R_{50}$  nastavují podpěťovou ochranu (UVLO), jenž regulátor při poklesu vstupního napětí vypne. Vztahy jsou uvedeny v (4) a (5), kde  $V_{START}$  a  $V_{STOP}$  představují vstupní spínací respektive rozpínací napětí (V),  $I_{HYS}$  vnitřní proudovou hysterezi zdroje ( $\mu\text{A}$ ),  $V_{ENA}$  napěťový práh (V) a  $I_1$  vnitřní pull-up zdroj proudu ( $\mu\text{A}$ ). Obvod UVLO zároveň monitoruje napětí na kondenzátoru  $C_{BOOT}$  a při jeho poklesu pod nastavený práh vypíná výstupní napětí regulátoru.



Obr. 19 - Zapojení napájecích pinů MCU, Zdroj: autor

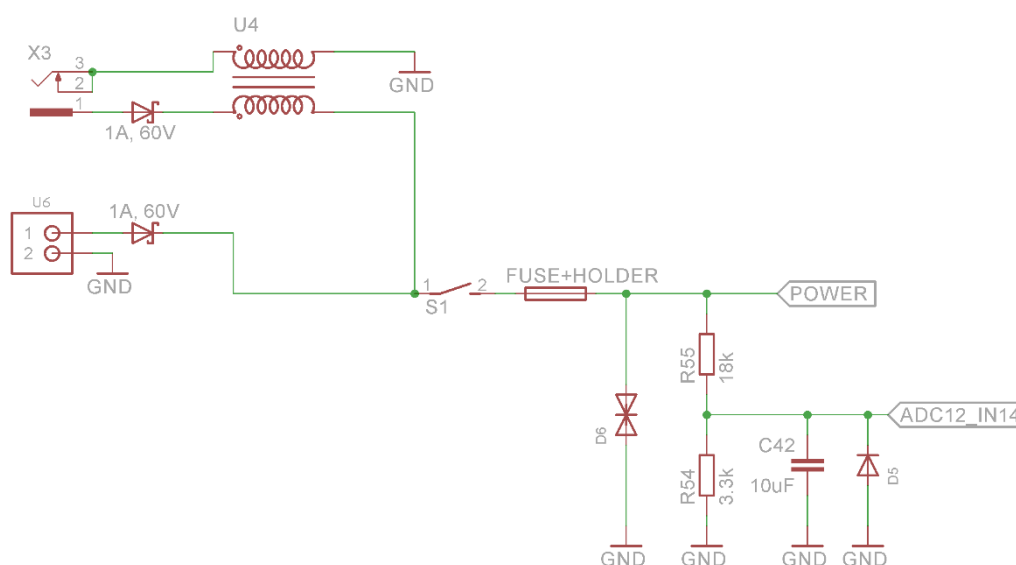
Na vstupu regulátoru slouží k potlačení šumu dvojice kondenzátorů  $C_{36}$ ,  $C_{37}$  a vstupní induktor  $47\mu\text{H}/1,3\text{A}$ . Ke stejnému účelu slouží rovněž kondenzátory umístěné přímo na napájecích pinech mikrokontroleru, viz Obr. 19.

Pin SS/TR minimalizuje nárazový spínací proud a umožňuje plynulý start regulátoru. Kondenzátor  $C_{40}$  připojený na tento pin zajišťuje restart zařízení v případě selhání, přetížení či přehřátí. Proti přehřátí je regulátor chráněn integrovaným systémem, který odpojí výstup při dosažení teploty  $182^\circ\text{C}$ , přičemž připájení „thermal padu“ k DPS pomáhá rozptýlit vznikající teplo v zemnicí vrstvě.

Výstupní napětí regulátoru je nastaveno dle (6) dvojicí rezistorů  $R_{49}$  a  $R_{51}$  na 3,3 V.

$$R_1 = R_2 \cdot \left( \frac{V_{OUT} - 0,8V}{0,8V} \right) \quad (6)$$

Napájení je na regulátor přivedeno buďto z konektoru X3, který slouží k připojení externího zdroje nebo z bateriového pouzdra připojeného přes konektor U6, viz Obr. 20. Oba zdroje jsou odděleny diodami, které zabraňují jejich přepólování a nežádoucímu nabíjení baterií ze sítě. Napájení je spínáno spínačem, který je umístěn u tlačítkové DPS. Za spínačem je pro ochranu integrovaných obvodů proti nadproudu umístěna tavná pojistka. Napájení z konektoru X3 je navíc připojeno přes proudově kompenzovanou tlumivku U4. Ta slouží k ochraně před souhlasnými rušivými proudy, které se mohou uzavřít datovým vodičem či přes kryt dataloggeru.



Obr. 20 - Napájení dataloggeru, Zdroj: autor

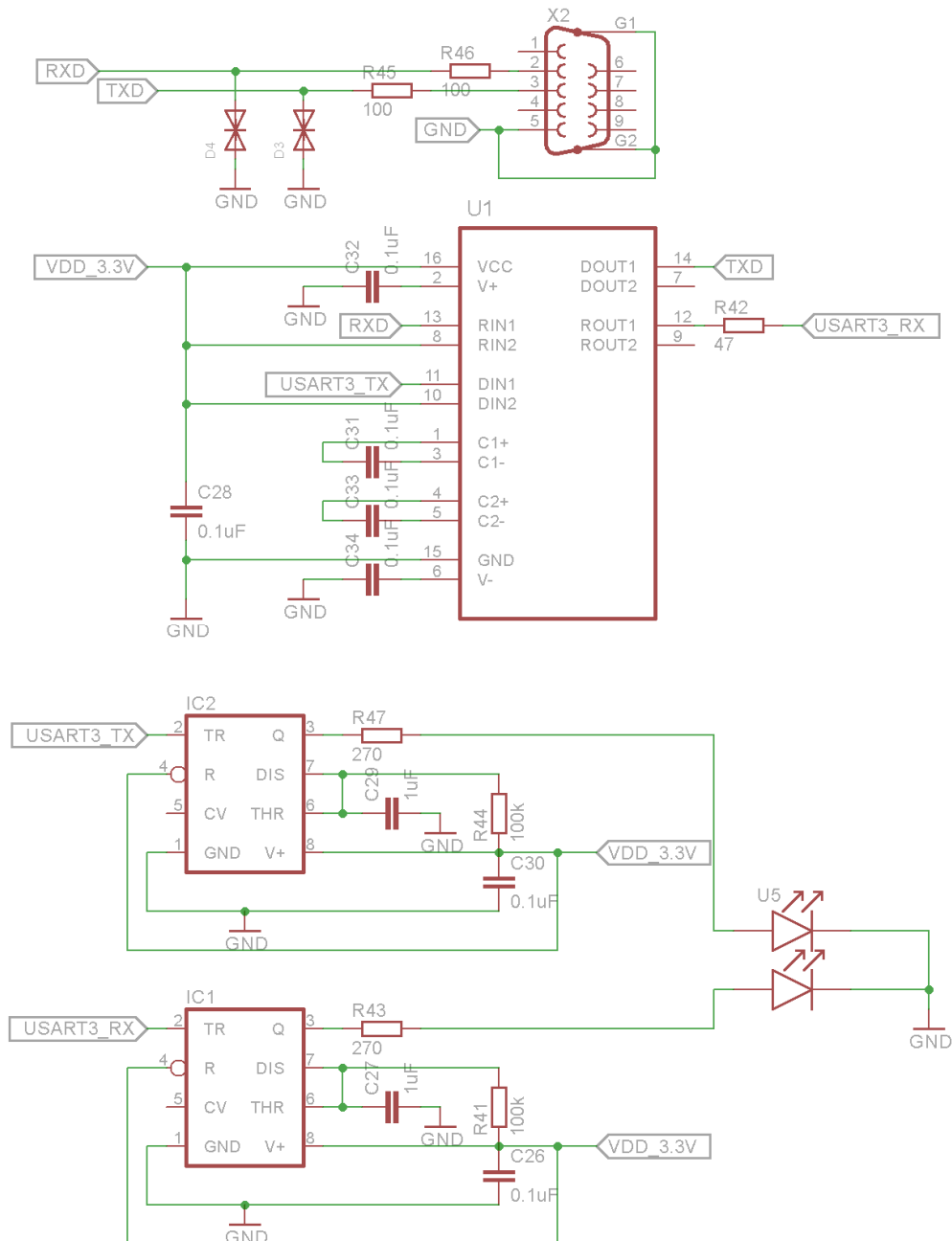
Napájecí napětí je přivedeno rovněž na vstupní pin integrovaného 12-bitového A/D převodníku mikrokontroléru. Díky tomu je možné kontrolovat hladinu napájecího napětí a v případě jeho poklesu pod nastavenou hranici např. informovat uživatele.

## 2.2.5 Rozhraní USART

Rozhraní USART slouží ke komunikaci s magnetometrem s digitálním interface<sup>22</sup> přes sériovou linku RS-232 v asynchronním režimu. Mikrokontrolér využívá k přenosu porty dedikované pro

<sup>22</sup> Viz magnetometr DFM28, Tab. 2

USART3. Jelikož signály z mikrokontroléru používají logické úrovně TTL 3,3 V je pro převod na úrovně RS-232 na DPS integrován obvod MAX3232CDB.<sup>23</sup> Ten společně s TVS diodami na jeho vstupu/výstupu (RXD/TXD) chrání mikrokontrolér před elektrostatickým výbojem (ESD).



Obr. 21 - Obvodové schéma rozhraní USART, Zdroj: autor

<sup>23</sup> Zapojeno dle doporučené konfigurace, viz MAX3232: 3-V to 5.5-V Multichannel RS-232 Line Driver/Receiv. In: *Texas Instruments* [online]. 2014 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/max3232.pdf>

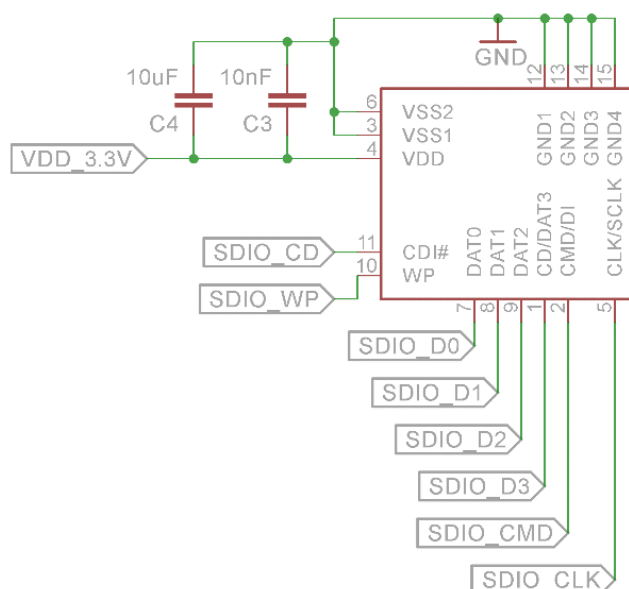
$$t_H = 1,1 \cdot R_A \cdot C \quad (7)$$

Signály z mikrokontroléru (USART\_TX a USART\_RX) jsou přivedeny rovněž na vstup dvou<sup>24</sup> časovačů LMC555<sup>25</sup> v monostabilním režimu. Ty prostřednictvím dvou signalizačních LED diod zprostředkovávají signalizaci komunikace po sériové lince uživateli. Perioda byla podle vzorce (7) nastavena na 200 ms. Číslování pinů mikrokontroleru poskytuje Tab. 7.

Pin MAX 3232	Pin LMC 555	Označení	Pin MCU
11 (DIN1)	IC2 – 2 (TR)	USART3 TX	PD8
12 (ROUT1)	IC1 - 2 (TR)	USART3 RX	PD9

Tab. 7 - Rozhraní USART, Zdroj: autor

## 2.2.6 Rozhraní SDIO



Obr. 22 - Rozhraní SDIO, Zdroj: autor

Pro ukládání naměřených dat slouží rozhraní SDIO (Secure Digital I/O) kompatibilní s paměťovými kartami SD, viz Obr. 22.<sup>26,27</sup> Tyto karty poskytují miniaturní, vysokorychlostní datové úložiště s dostatečnou kapacitou a nízkou spotřebou. Pracovní napětí 3,3 V je dodávané stejně jako napájení

<sup>24</sup> IC1 pro příjem a IC2 pro vysílání

<sup>25</sup> LMC555: CMOS Timer. In: *Texas Instruments* [online]. 2013 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmc555.pdf>

<sup>26</sup> SD Input/Output (SDIO) Card Specification. In: *SD Association* [online]. 2001 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: [https://www.sdcard.org/downloads/pls/simplified\\_specs/archive/partE1\\_100.pdf](https://www.sdcard.org/downloads/pls/simplified_specs/archive/partE1_100.pdf)

<sup>27</sup> Typ standard SD, mini SD, micro SD

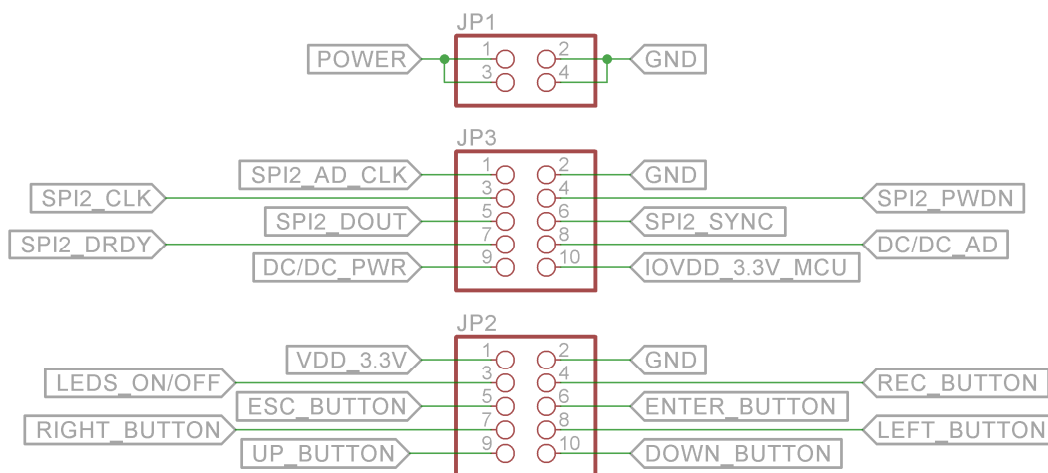
pro mikrokontroler z regulátoru TPS54060. Pro komunikaci s tímto rozhraním složí celkově 9 pinů, které jsou popsány v Tab. 8. Čtyři z těchto pinů jsou datové. To poskytuje teoretickou nejvyšší možnou přenosovou rychlost až 100Mb/s. Další dva piny jsou použity pro funkce detekce SD karty a ochranu proti zápisu, které poskytuje použitý konektor. Více o ukládání dat na paměťové médium lze nalézt v příslušné části kapitoly Softwarová realizace.

Pin SDIO	Označení SDIO	Režim SD 4-bit		Pin MCU
1	SDIO_D3	CD/DAT3	Datový signál 3	PC11
2	SDIO_CMD	CMD/DI	Řídicí signál	PD2
3	GND	VSS1	Zem	GND
4	VDD_3,3V	VDD	Napájení	3,3V
5	SDIO_CLK	CLK/SCLK	Hodinový signál	PC12
6	GND	VSS2	Zem	GND
7	SDIO_D0	DAT0	Datový signál 0	PC8
8	SDIO_D1	DAT1	Datový signál 1 / přerušeni	PC9
9	SDIO_D2	DAT2	Datový signál 2 / čekání na čtení	PC10
10	SDIO_WP	WP	Ochrana proti zápisu	PC7
11	SDIO_CD	CDI#	Detekce SD karty	PD0

Tab. 8 - Rozhraní SDIO, Zdroj: [12]

## 2.2.7 Ostatní komponenty

### Komunikační a napájecí rozhraní DPS



Obr. 23 - Komunikační a napájecí rozhraní DPS, Zdroj: autor

DPS MCU je uvnitř krytu propojena s ostatními DPS pomocí plochých kabelů se samořeznými konektory. Obvodové schéma konektorů je na Obr. 23. Napájení pro DPS A/D převodníku (JP1, Tab. 9) je pro jistotu zdvojeno a vyvedeno samostatně. Konektor s řídicími signály (JP3, Tab. 10) zahrnuje

zemní vodič, který slouží k odstínění dvou hodinových signálů určených k časování A/D převodníku a SPI2 rozhraní. Signály DC/DC\_AD a DC/DC\_PWR jsou určeny ke spínání DC/DC měničů pro napájení vstupních zesilovačů, respektive pro napájení analogového magnetometru.<sup>28</sup> Bližší popis vyvedených signálů je v kapitole popisující DPS A/D převodníku.

Konektor JP2, viz Tab. 11 je určen signálům z tlačítkové DPS. Konektor přivádí řídicí signály z tlačítek, napájí jejich LED diody a signál LEDS\_ON/OFF tyto LED diody spíná. Bližší popis je v kapitole Tlačítková DPS.

JP1			
Pin	Označení	Pin MCU	Funkce
1, 3	POWER	VDD_3,3V	Napájení
2,4	GND	GND	Zem

Tab. 9 - Konektor JP1, Zdroj: autor

JP3				
Pin	Označení	MCU	Pin A/D	Funkce
1	SPI2_AD_CLK	PB9	CLK	Hodinový signál A/D převodníku
2	GND	GND	GND	Zem
3	SPI2_CLK	PB13	SCLK	Hodinový signál SPI2
4	SPI2_PWDN	PB10	PWDN1,2,3	Spínání vstupních kanálů A/D převodníku
5	SPI2_DOUT	PB14	DOUT1	Výstupní data z A/D převodníku
6	SPI2_SYNC	PB12	SYNC	Synchronizace
7	SPI2_DRDY	PB11	DRDY	Signalizace dat na výstupu A/D převodníku
8	DC/DC_AD	PB15	---	Spínání napájení pro vstupní zesilovače
9	DC/DC_PWR	PB8	---	Spínání napájení pro magnetometr
10	IOVDD_3,3V_MCU	PA8	IOVDD	Napájení I/O obvodů A/D převodníků

Tab. 10 - Konektor JP3, Zdroj: autor

JP2			
Pin	Označení	Pin MCU	Funkce
1	VDD_3,3V	3,3V	Napájení LED diod
2	GND	GND	Zem
3	LEDS_ON/OFF	PE0	Spínání LED diod
4	REC_BUTTON	PE1	Přepínač nahrávání
5	ESC_BUTTON	PE2	Tlačítko ESC
6	ENTER_BUTTON	PE3	Tlačítko ENTER
7	RIGHT_BUTTON	PE4	Tlačítko RIGHT
8	LEFT_BUTTON	PE5	Tlačítko LEFT
9	UP_BUTTON	PE7	Tlačítko UP
10	DOWN_BUTTON	PE6	Tlačítko DOWN

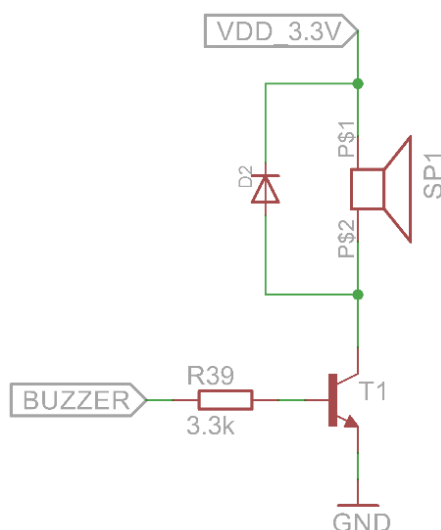
Tab. 11 - Konektor JP2, Zdroj: autor

<sup>28</sup> Viz magnetometr TFM100, Tab. 2

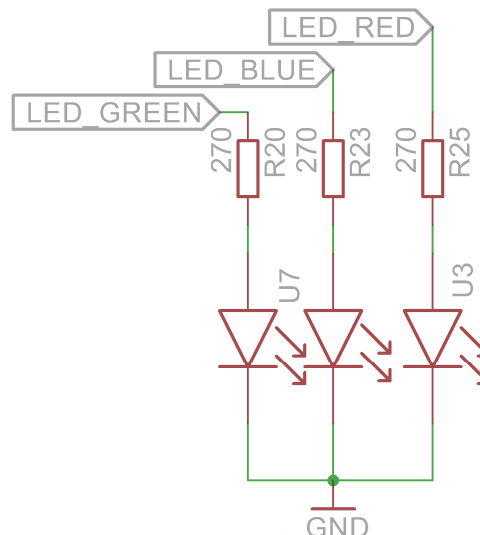


### Akustická a LED signalizace

DPS MCU je osazen Piezo měničem,<sup>29</sup> který je přes tranzistor spínán z pinu PE9 (BUZZER). Na tomto pinu je výstup PWM modulátoru, který piezo měnič rozezná na frekvenci 4 kHz a může tak sloužit například jako akustická signalizace při poklesu napájecího napětí.



Obr. 24 - Akustická signalizace, Zdroj: autor



Obr. 25 - Led signalizace, Zdroj: autor

Pro signalizaci různých událostí jsou na DPS MCU integrovány rovněž 3 LED diody – zelená (LED\_GREEN, PD14), modrá (LED\_BLUE, PD12) a červená (LED\_RED, PD13). Modrá LED dioda spíná při inicializaci zařízení a indikuje jeho chod. Červená dioda indikuje nahrávání na SD kartu a zelená dioda je volně k použití pro události definované uživatelem.

### Krystaly a obvody reálného času

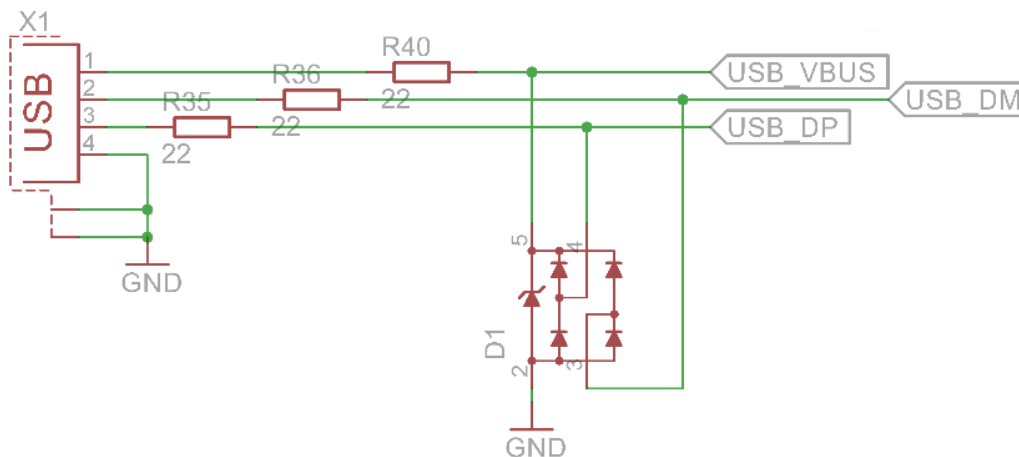
Pro správný běh je mikrokontroler připojen ke krystalu s frekvencí 8 MHz<sup>30</sup>. Ten dodává přesný hodinový signál pro jeho běžný chod a umožňuje jeho taktování za pomoci integrovaných PLL obvodů až na frekvenci 168 MHz.

<sup>29</sup> ABT-402-RC PIEZO TRANSDUCER. In: *Alan Butcher Components Ltd* [online]. 2014 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: [http://www.abcomponents.co.uk/hres/abt\\_402\\_rc.pdf](http://www.abcomponents.co.uk/hres/abt_402_rc.pdf)

<sup>30</sup> DIP HC-49S: Metal Can Type Crystals. In: *TXC* [online]. 2014 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://www.txc.com.tw/download/c/crystal9b.pdf>

Po vypnutí napájení je RTC obvod integrovaný v MCU napájen ze záložní 3 V baterie CR2032.<sup>31,32</sup> Společně s dalším krystalem 32,768 kHz,<sup>33</sup> tak dokáže datalogger vést záznam o reálném čase i po vypnutí napájení.

### Rozhraní USB



Obr. 26 - Rozhraní USB, Zdroj: autor

Na DPS MCU bylo začleněno rozhraní USB 2.0 (konektor typ B), které umožňuje datalogger připojit k PC s přenosovou rychlostí až 480 Mb/s. Toto rozhraní je chráněno před ESD pomocí diodového pole<sup>34</sup> a může pracovat pouze jako periferie připojená k hostitelskému zařízení. O způsobu jeho využití ovšem nebylo dosud rozhodnuto a proto nebyla implementována jeho softwarová část. Nabízí se např. možnosti ukládání dat přímo do PC nebo skrze toto rozhraní ovládat datalogger. Popis jednotlivých pinů, viz Tab. 12.

Pin	Označení	Pin MCU	Funkce
1	USB_VBUS	PA9	Napájení 5 V
2	USB_DM	PA11	Záporný datový signál
3	USB_DP	PA12	Kladný datový signál
4	GND	GND	Zem

Tab. 12 - Rozhraní USB, Zdroj: autor

<sup>31</sup> Držák baterie BR2032. In: *Panasonic* [online]. 2014 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://www.industrial.panasonic.com/www-data/pdf/AAD4000/AAD4000CE3.pdf>

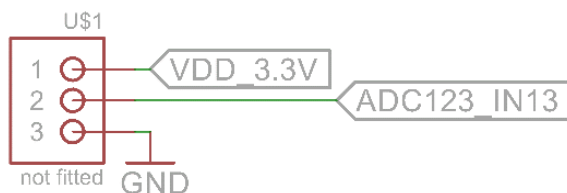
<sup>32</sup> Baterie CR2032: Lithium Battery Coin Cell. In: *Farnell* [online]. 2014 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1671733.pdf>

<sup>33</sup> MC406-32.768KHZ. In: *Farnell* [online]. 2014 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1697946.pdf>

<sup>34</sup> 824011: TVS Diode Array WE-TVS. In: *Würth Elektronik GmbH & Co. KG* [online]. 2010 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://katalog.we-online.de/pbs/datasheet/824011.pdf>

## Čidlo osvětlení

Rovněž dosud nebylo rozhodnuto o funkci čidla osvětlení, které proto nebylo na DPS integrováno.<sup>35</sup> Přesto, že se nabízejí i jiné možnosti využití, je uvažováno především o regulaci jasu displeje podle momentálních světelných podmínek. Pro tuto aplikaci je výstup snímače (ADC123\_IN13, PC3) přiveden na 12-bitový A/D převodník.



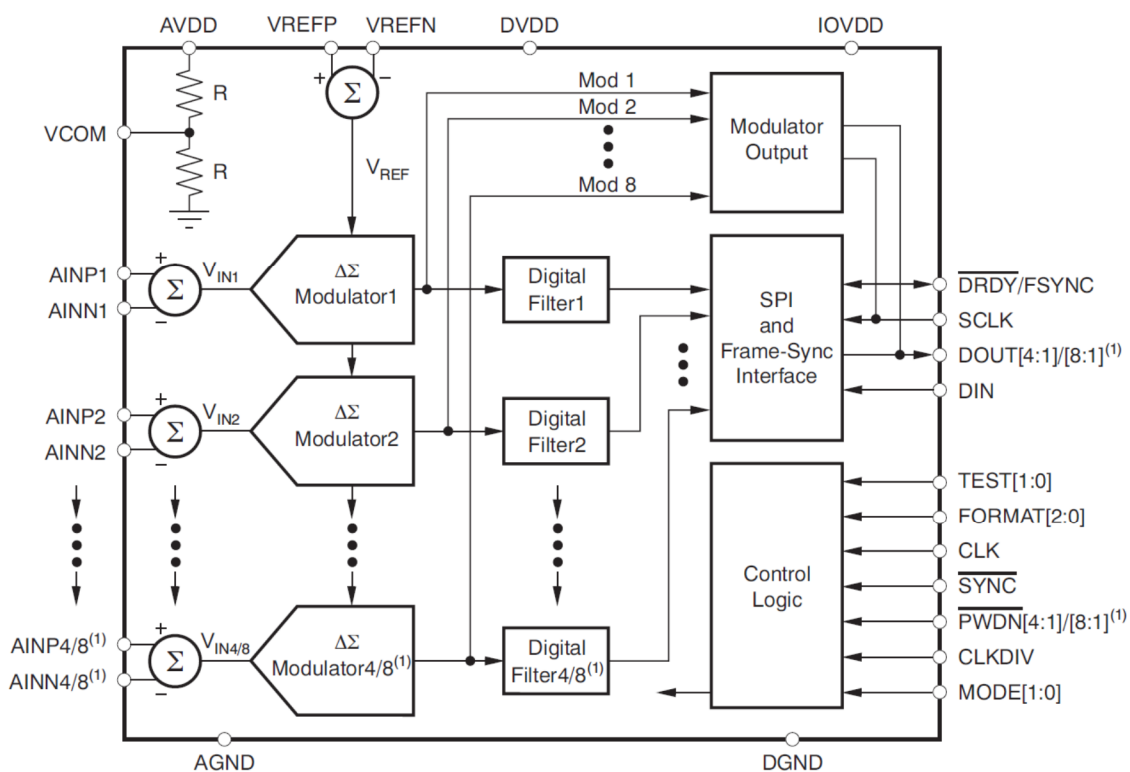
Obr. 27 - Konektor čidla osvětlení, Zdroj: autor

<sup>35</sup> Konektor je na DPS integrován

## 2.3 DPS A/D převodníku

### 2.3.1 A/D převodník

ADS1274<sup>36</sup>, viz Obr. 28 a Obr. 29, je 24-bitový,  $\Delta\Sigma$  A/D převodník podporující simultánní vzorkování až čtyř vstupních kanálů. Konverze je velice přesná s šířkou pásma až 70 kHz a odstupem signálu od šumu až 111 dB. Převodník pracuje v pracovním módu vysokého rozlišení, v němž lze dosáhnout při zmíněném SNR až 52 kSa/s a maximální šířky pásma 24 kHz. Tento mód je nastaven pomocí pinů MODE[1:0]. Vyčítány jsou tři vstupní kanály<sup>37</sup> v diferenciálním režimu<sup>38</sup> s rozsahem vstupního napětí  $\pm V_{REF}$  ( $\pm 2,5$  V). Vyčítání z kanálů je povolováno prostřednictvím pinů PWDNx, které jsou nastavovány z mikrokontroleru.



Obr. 28 - Vnitřní struktura ADS1274 (<sup>(1)</sup>ADS1278), Zdroj: <http://www.ti.com/>

<sup>36</sup> ADS1274: Quad, 128kHz, Simultaneous Sampling 24-Bit Delta Sigma ADC. In: *Texas Instruments* [online]. 2011 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1274.pdf>

<sup>37</sup> Kanály 1-3 odpovídají 3 osám magnetometru – X, Y a Z

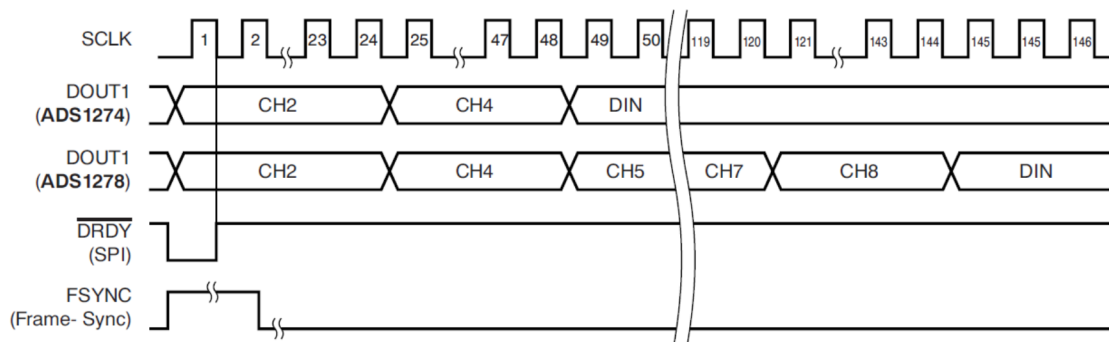
<sup>38</sup> AINPx – AINNx, x – číslo kanálu (1-3)



signál pro práci převodníku (CLK, 2,048 MHz) dodává mikrokontroler. Při zmíněných rychlostech lze vyčítat až 4000 vzorků za sekundu. Je zde i možnost osazení DPS samostatným krystalem (U10), který by nahradil signál z MCU. To sebou ovšem nese dodatečné nároky na napájení krystalu. Funkce jednotlivých pinů jsou popsány v Tab. 13.

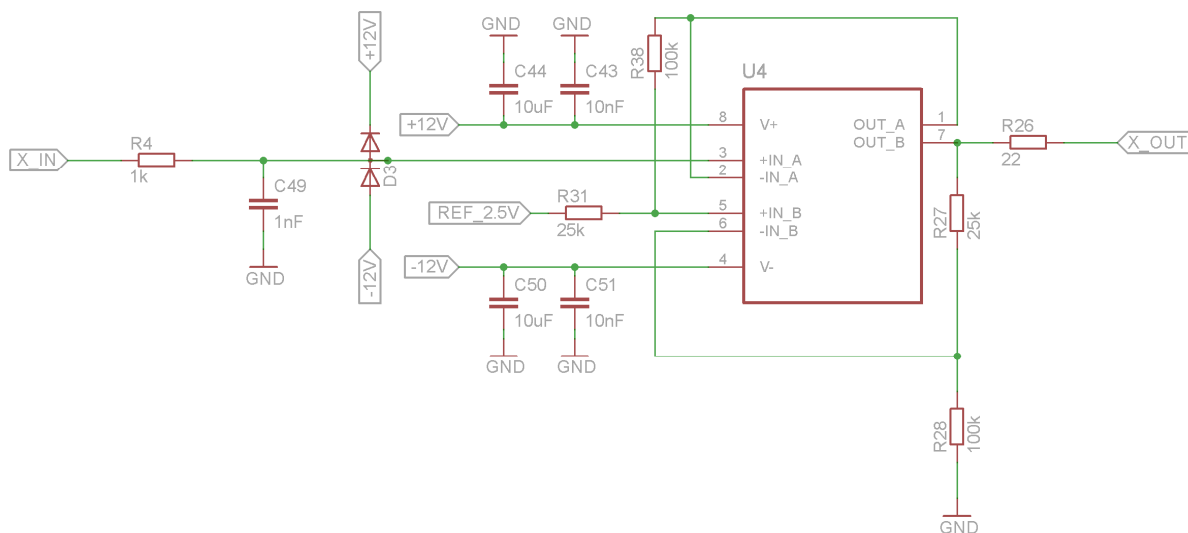
Pin A/D převodníku	Označení	Funkce	Signál
<b>6, 43, 54, 58, 59</b>	AGND	Analogová zem	GND
<b>3</b>	AINP1	Kladný analogový vstup	X_OUT
<b>1</b>	AINP2		Y_OUT
<b>63</b>	AINP3		Z_OUT
<b>4</b>	AINN1	Záporný analogový vstup (2,5 V)	REF_2,5V
<b>2</b>	AINN2		REF_2,5V
<b>64</b>	AINN3		REF_2,5V
<b>5, 44, 53, 60</b>	AVDD	Analogové napájení modulátoru 5 V	AVDD_5V
<b>57</b>	VREFN	Záporná napěťová reference 0 V	GND
<b>56</b>	VREFP	Kladná napěťová reference 2,5 V	REF_2,5V
<b>27</b>	CLK	Hodinový signál (2,048 MHz)	AD_CLK
<b>10</b>	CLKDIV	Nastavení max. frekvence převodníku	AD_DVDD_1,8V
<b>7, 21, 24, 25</b>	DGND	Digitální zem	GND
<b>12</b>	DIN	Připojení dalšího A/D převodníku	GND
<b>20</b>	DOUT1	Výstup převodníku, rozhraní SPI	SPI2_DOUT
<b>29</b>	DRDY	Data připravena ke čtení	DRDY
<b>26</b>	DVDD	Digitální napájení jádra 3,3 V	DVDD_3,3V
<b>32</b>	FORMAT0	Nastavení výstupního režimu, rozhraní a jeho módu (SPI, TDM mód v dynamickém režimu)	GND
<b>31</b>	FORMAT1		GND
<b>30</b>	FORMAT2		GND
<b>22, 23</b>	IOVDD	Napájení pro digitální I/O obvody 3,3 V	DVDD_3,3V
<b>34</b>	MODE0	Volba módu zpracování vstupních dat (Vysoké rozlišení)	DVDD_3,3V
<b>33</b>	MODE1		GND
<b>42</b>	PWDN1	Spínání kanálů mikrokontrolerem	DVDD_3,3V/PWDN
<b>41</b>	PWDN2		DVDD_3,3V/PWDN
<b>40</b>	PWDN3		DVDD_3,3V/PWDN
<b>28</b>	SCLK	Hodinový signál SPI (1,875 MHz)	SPI2_CLK
<b>11</b>	SYNC	Synchronizace kanálů	SYNC
<b>8</b>	TEST0	Volba testovacího módu (Normální chod převodníku)	GND
<b>9</b>	TEST1		GND

Tab. 13 - Zapojení A/D převodníku, Zdroj: autor



Obr. 30 – Dynamický přenos dat z A/D převodníku, Zdroj: <http://www.ti.com/>

## 2.3.2 Obvody úpravy vstupního signálu



Obr. 31 - Vstupní obvody A/D převodníku, Zdroj: autor

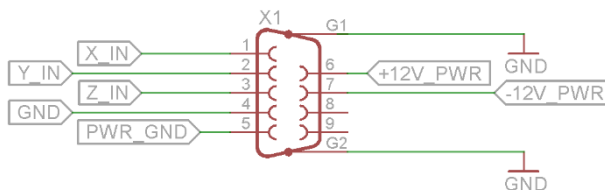
Výstupy analogového magnetometru<sup>39</sup> nabývají typicky hodnot  $\pm 10V$ . Hodnoty v takovémto rozsahu ovšem není možné A/D převodníkem přímo zpracovat. Na všech třech vstupech převodníku (X,Y,Z) jsou proto obvody pro úpravu vstupního signálu, viz Obr. 31. O úpravu se stará dvojice přesných, teplotně stabilních operačních zesilovačů,<sup>40</sup> jež mění rozsah vstupního napětí z bipolárních  $\pm 10 V$  na unipolární 0-5 V.<sup>41</sup> Konektor pro analogový magnetometr je zobrazen na Obr. 32. Mimo

<sup>39</sup> Viz magnetometr TFM100, Tab. 2

<sup>40</sup> OPA2277: High Precision OPERATIONAL AMPLIFIERS. In: *Texas Instruments* [online]. 2005 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa2277.pdf>

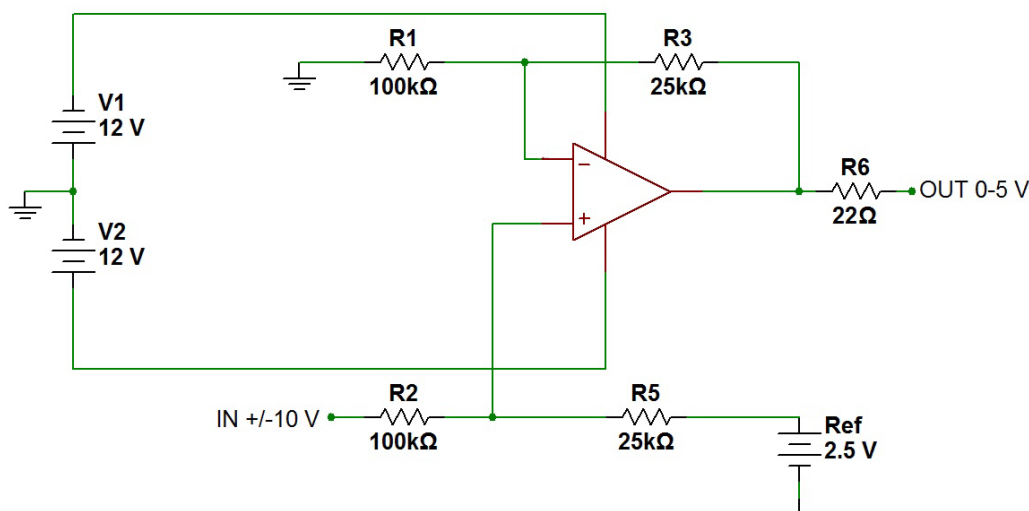
<sup>41</sup> Více v kapitole Napěťová reference

datových signálů je na konektor přivedeno i napájecí napětí  $\pm 12$  V, viz Napájecí obvody A/D převodníku.



Obr. 32 - Konektor pro připojení analogového magnetometru, Zdroj: autor

První z dvojice vstupních operačních zesilovačů<sup>42</sup> pracuje jako sledovač napětí se zesílením 1. Svým velkým vstupním odporem impedančně odděluje magnetometr od dalšího stupně úpravy signálu, který je znázorněn na Obr. 33. Zde se jedná o neinvertující OZ, na jehož vstupu je dělič napětí. Použité vztahy jsou uvedeny v (8) a (9).



Obr. 33 - Úprava vstupního napětí, Zdroj: autor

(8) je vztah pro dělič napětí, jenž snižuje vstupní rozsah z  $\pm 10$  V na 0-4 V, kde  $IN_{oz+}$  představuje napětí na výstupu děliče (0-4 V),  $IN$  je výstup magnetometru ( $\pm 10$  V),  $Ref$  je napěťová reference (2,5 V) a  $R_2$  a  $R_5$  jsou rezistory děliče (100 k $\Omega$  a 25 k $\Omega$ ).

$$IN_{oz+} = Ref + R_5 \left( \frac{IN - Ref}{R_2 + R_5} \right) \quad (8)$$

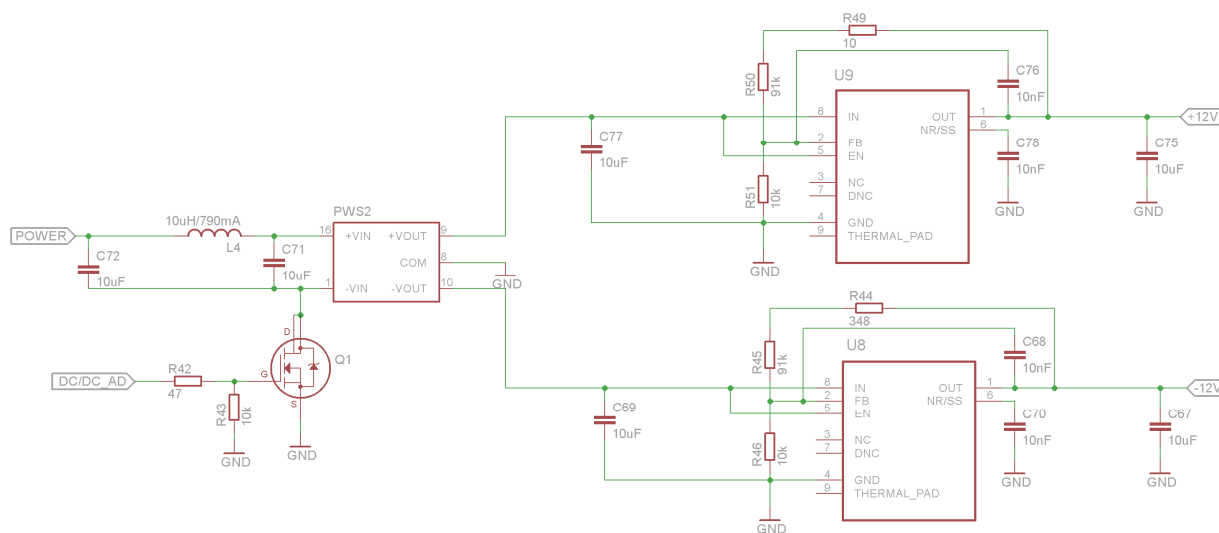
$$OUT = IN_{oz+} \left( 1 + \frac{R_3}{R_1} \right) \quad (9)$$

<sup>42</sup> Dále jen OZ



(9) je vztah pro neinvertující OZ, který výstup děliče lineárně zesílí na daný rozsah 0-5 V. V (9) je OUT výstupní napětí OZ (0-5V),  $IN_{OZ+}$  je napětí na kladném vstupu OZ (0-4 V) a  $R_3$  a  $R_1$  jsou zpětnovazební rezistory (25 k $\Omega$  a 100 k $\Omega$ ).

Pro napájení operačních zesilovačů je použito napětí  $\pm 12V$  zaručující jejich správnou funkci. Toto napětí poskytuje DC/DC měnič, jehož výstup je dále upraven pomocí dvou nízkošumových lineárních stabilizátorů,<sup>43,44</sup> viz Obr. 34.



Obr. 34 - Napájení obvodů úpravy vstupního signálu, Zdroj: autor

Jejich výstup je nastaven dle (10) pro kladný lineární stabilizátor a (11) pro záporný.

$$R_{49} + R_{50} = R_{51} \left( \frac{+12}{V_{ref}} - 1 \right) \quad (10)$$

$$R_{44} + R_{45} = R_{46} \left( \frac{-12}{V_{ref}} - 1 \right) \quad (11)$$

V rovnicích (10) a (11) jsou  $R_{44}$ ,  $R_{45}$ ,  $R_{46}$ ,  $R_{49}$ ,  $R_{50}$  a  $R_{51}$  rezistory (k $\Omega$ ) nastavující výstupní napětí +12 V, respektive -12 V.  $V_{ref}$  je interní referenční napětí stabilizátorů. Pro kladný stabilizátor a rovnici (10) má hodnotu 1,188 V. Pro záporný stabilizátor a rovnici (11) je to -1,184 V.

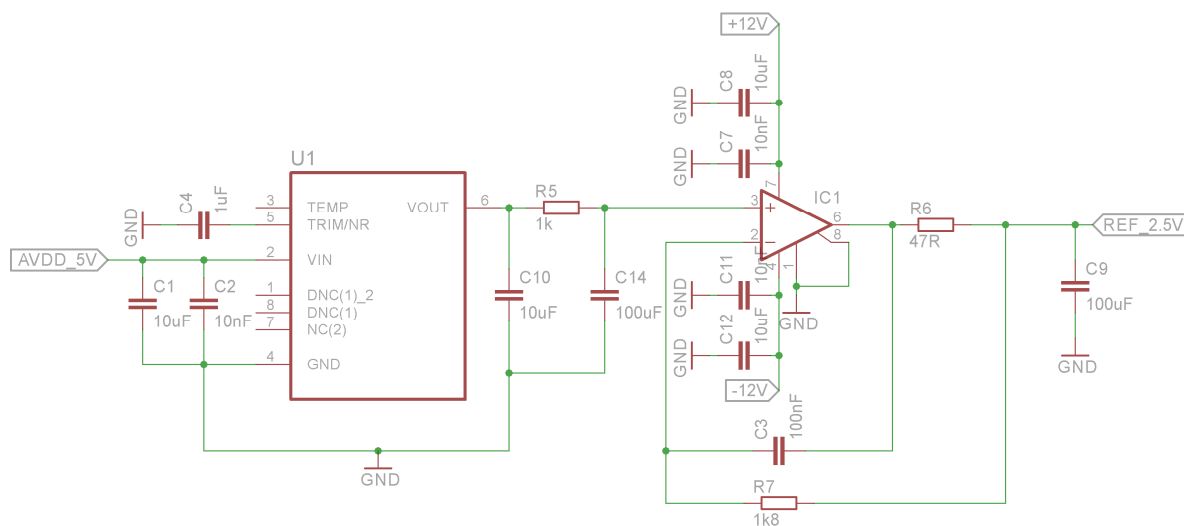
<sup>43</sup> Kladný lineární stabilizátor TPS7A4901: Vin 3V to 36V, 150mA, Ultra-Low Noise, High PSRR, Low-Dropout Linear Regulator. In: *Texas Instruments* [online]. 2013 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps7a4901.pdf>

<sup>44</sup> Záporný lineární stabilizátor TPS7A3001: Vin -3V to -36V, -200mA, Ultra-Low Noise, High PSRR, Low-Dropout Linear Regulator. In: *Texas Instruments* [online]. 2013 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps7a3001.pdf>

Napájení operačních zesilovačů DC/DC měničem je spínáno výkonovým MOSFET tranzistorem<sup>45</sup> řízeným z mikrokontroleru. K sepnutí dojde při nastavení log. 1 na pinu DC/DC\_AD, kdy tranzistor připojí záporný pin  $-VIN$  na zem, viz Obr. 34.

### 2.3.3 Napěťová reference

Aby bylo možno zachovat bipolárnost vstupního signálu bylo nutné použít napěťové reference 2,5 V, která je přivedena na negativní vstup vstupních kanálů A/D převodníku AINNx., viz kapitoly Obvody úpravy vstupního signálu a A/D převodník. Dochází tak ke konverzi z již dříve získaného unipolárního rozsahu 0-5 V zpět na bipolární rozsah  $\pm 2,5$  V. Referenční napětí poskytuje nízkoshumový, stabilní zdroj přesného referenčního napětí REF5025ID<sup>46</sup> doplněný přesným, teplotně stabilním operačním zesilovačem OPA277,<sup>47</sup> viz Obr. 35.



Obr. 35 - Zdroj referenčního napětí 2,5V, Zdroj: autor

Aby bylo docíleno co nejpřesnějšího referenčního napětí bez šumu a rušení, je na výstupu referenčního zdroje připojena RC dolní propust a OZ pracující jako buffer s velkou tolerancí pro kapacitní zátěž. Za stejným účelem jsou na vstup i výstup reference připojeny kondenzátory různých

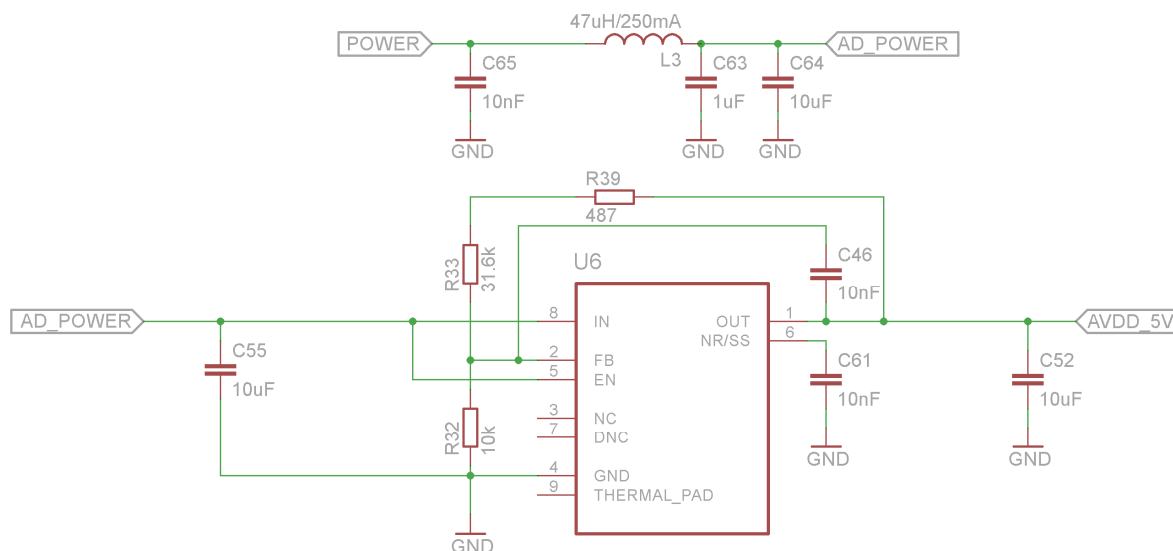
<sup>45</sup> FDT439N: N-Channel 2.5V Specified Enhancement Mode Field Effect Transistor. In: *Fairchild Semiconductor* [online]. 1999 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://www.fairchildsemi.com/ds/FD/FDT439N.pdf>

<sup>46</sup> REF5025: Low Noise, Very Low Drift, Precision Voltage Reference. In: *Texas Instruments* [online]. 2013 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ref5025.pdf>

<sup>47</sup> OPA277: High Precision Operational Amplifiers. In: *Texas Instruments* [online]. 2005 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa277.pdf>

velikostí. Větší kondenzátory pracují s nižšími kmitočty, menší naopak pomáhají filtrovat napěťové rázy vysokých kmitočtů.

### 2.3.4 Napájecí obvody A/D převodníku



Obr. 36 - AVDD 5V, Zdroj: autor

ADS1274 je napájen třemi napěťovými vstupy. Analogovým vstupem AVDD 5 V napájecím modulátor a dvěma digitálními, IOVDD 3,3 V napájecím I/O digitální obvody a DVDD 1,8 V napájecím digitální obvody převodníku. Napájení je přivedeno z DPS MCU. Toto napájení je filtrováno tlumivkou proti proudovým a kondenzátory proti napěťovým rázům. Za tímto LC filtrem následují tři lineární regulátory,<sup>48</sup> jeden pro každé napájecí napětí. Zdroj pro AVDD 5 V je společně s LC filtrem zobrazen na Obr. 36. Výstupní napětí je nastaveno třemi rezistory  $R_{32}$ ,  $R_{33}$  a  $R_{39}$ , viz (12).

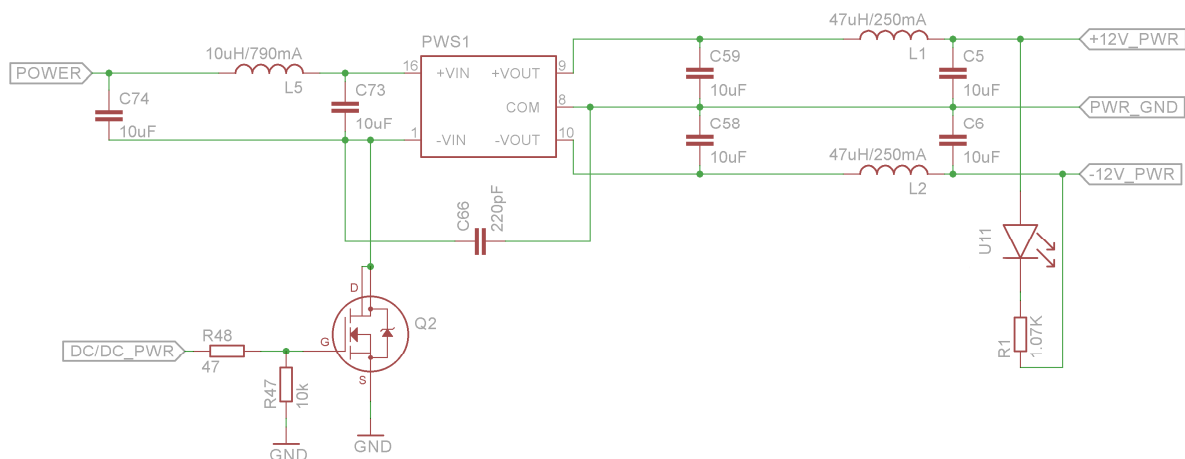
$$R_{33} + R_{39} = R_{32} \left( \frac{+12}{V_{ref}} - 1 \right) \quad (12)$$

V rovnici (12) jsou  $R_{32}$ ,  $R_{33}$  a  $R_{39}$  rezistory (k $\Omega$ ) nastavující výstupní napětí +12 V a  $V_{ref}$  je interní referenční napětí regulátoru 1,188 V.

<sup>48</sup> Kladný lineární stabilizátor TPS7A4901: Vin 3V to 36V, 150mA, Ultra-Low Noise, High PSRR, Low-Dropout Linear Regulator. In: *Texas Instruments* [online]. 2013 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps7a4901.pdf>

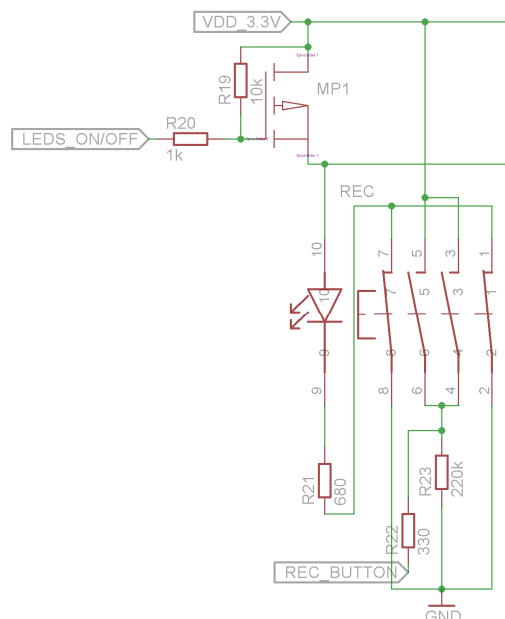
### 2.3.5 Napájecí obvody magnetometru

Analogový magnetometr je připojen k A/D převodníku skrze devítipinový D-subminiature konektor, přes nějž je současně napájen, viz Obr. 32. K napájení magnetometru je použit stejný typ DC/DC měniče jako pro Obvody úpravy vstupního signálu. Rovněž jeho spínání je vyřešeno totožně. Tři výstupní signály DC/DC měniče jsou +12V\_PWR, -12V\_PWR a PWR\_GND, který slouží k zemnění napájecí části, viz Obr. 37. Zapnutí napájení magnetometru je signalizováno zelenou LED diodou.



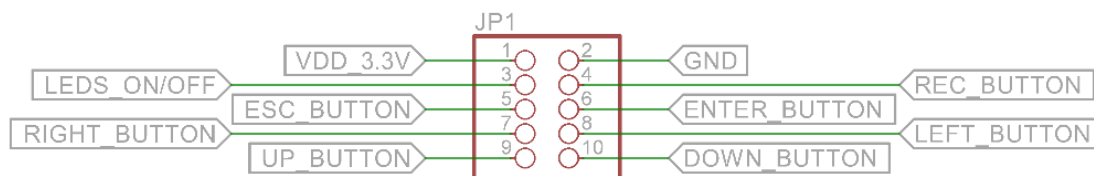
Obr. 37 - Napájení magnetometru, Zdroj: autor

## 2.4 Tlačítková DPS



Obr. 38 - Obvodové zapojení tlačítka, Zdroj: autor

Tlačítková DPS je osazena 7 funkčními tlačítky,<sup>49</sup> jež jsou vsazena do krytu dataloggeru, viz kapitola Ochranný kryt. Dále byl do jejich blízkosti umístěn i spínač napájení dataloggeru, jež je ovšem připojen přímo na DPS MCU.



Obr. 39 - Rozhraní tlačítek, Zdroj: autor

Rozhraní tlačítek je znázorněno na Obr. 39. Tab. 11 popisuje funkce jednotlivých signálů, z nichž VDD\_3,3V, GND a LEDS\_ON/OFF slouží k napájení, potažmo spínání LED diod v tlačítkách. Ty mají uživateli pomoci s orientací v ovládacím rozhraní za špatných světelných podmínek. Vyjma tlačítka REC, jež při sepnutí spustí nahrávání dat, jsou všechna tlačítka bez aretace a slouží

<sup>49</sup> 2 pole SWitch: Basic switch modules. In: *MEC Switches* [online]. 2014 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: [http://www.mec.dk/files/MEC/brochures/MEC\\_ProductCatalogueno7\\_unimec-series-switches.pdf](http://www.mec.dk/files/MEC/brochures/MEC_ProductCatalogueno7_unimec-series-switches.pdf)

k ovládání dataloggeru, pohybu v menu ve čtyřech směrech (UP, DOWN, RIGHT, LEFT) a přechodu mezi jeho jednotlivými úrovněmi (ENTER, ESC).

## 2.5 Ochranný kryt

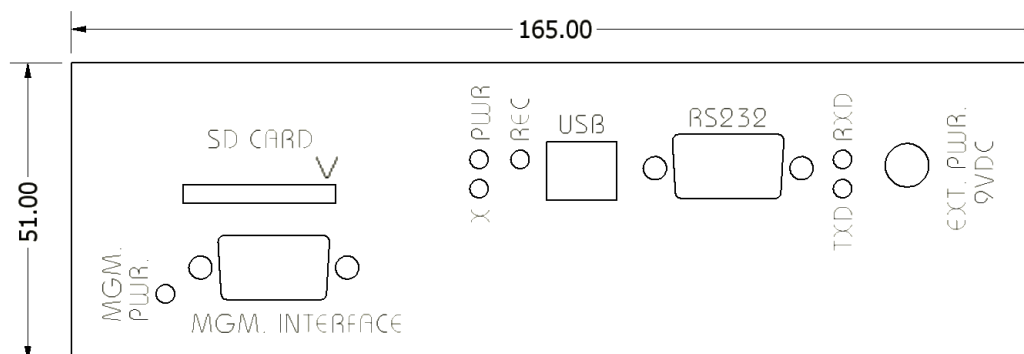


Obr. 40 – Datalogger, Zdroj: autor

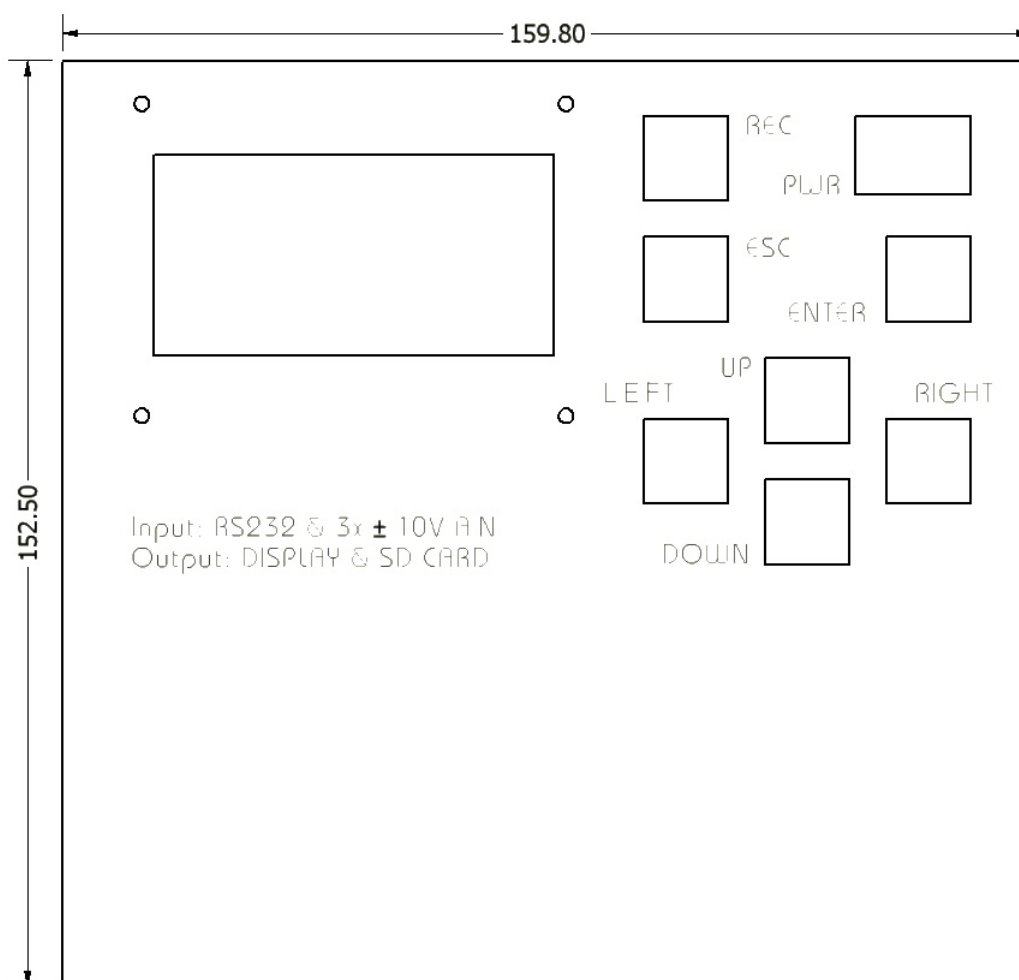
Největší část vnitřního prostoru krytu<sup>50</sup> je určena pro DPS MCU s displejem, pod nímž je umístěna DPS s A/D převodníkem. Tyto dvě DPS jsou připevněny k levé bočnici, ve které jsou otvory pro připojení periférií, napájení a signalizační LED diody. Hlavní DPS je umístěna těsně pod hliníkovým krytem, v němž je otvor pro displej. Otvor je chráněn plexisklem. Pravá část horního krytu je z ergonomického hlediska určena uživatelskému rozhraní (ovládacím tlačítkům), pod nimiž je uložen bateriový držák, ke kterému tak má uživatel v případě potřeby snadný přístup. Schránka, viz Obr. 40 je vyrobena z černě eloxovaného hliníku s rozměry 52 × 160 × 160 mm, který byl na základě

<sup>50</sup> Extruded Aluminum Enclosures: 1455T1601BK. In: *Hammond Manufacturing* [online]. 2013 [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://www.hammondmfg.com/pdf/1455T1601.pdf>

produktové dokumentace a za využití CAD software a CNC frézy opatřen otvory a pro lepší orientaci uživatele také popisky. Obr. 41 a Obr. 42 zobrazují otvory a popisky levé bočnice, respektive horního krytu dataloggeru.



Obr. 41 - Levá bočnice dataloggeru, Zdroj: Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D.



Obr. 42 - Horní kryt dataloggeru, Zdroj: Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D.

## 3 Softwarová realizace

Tato kapitola poskytuje detailní popis softwaru dataloggeru a využití jeho hardwarového vybavení. Začátkem je popsán použitý programovací jazyk a vývojové prostředí. Na to navazují kapitoly popisující strukturu software, použité softwarové knihovny a způsob ovládání dataloggeru skrze textové uživatelské rozhraní, které poskytují potřebný přehled pro orientaci v softwarové struktuře, respektive poskytují uživateli návod pro orientaci v menu záznamníku.

V současné podobě je software ve verzi „data\_logger\_v1.00“, který slouží jako prototyp, jenž bude dále aktualizován s tím, jak budou postupně vyvstávat nové požadavky na organizaci menu, provázanost a optimalizaci jednotlivých funkcí a podobně

### 3.1 Vývojové nástroje a programovací jazyk

K programování bylo použito volně dostupné vývojové prostředí pro ARM Cortex-M4 mikrokontrolery CoCox CoIDE ve verzi 1.7.4.<sup>51</sup> CoIDE je vývojové prostředí založené na Eclipse IDE podporující standardní sadu nástrojů standardu GCC ARM – kompilátor, assembler, linker a debugger. Jako debugger/programovací rozhraní podporovaný CoIDE byl použit ST-Link V2 integrovaný na DPS STM32F4 Discovery, viz kapitola Programátor. Největší předností CoIDE je podpora knihoven výrobce MCU – STMicroelectronics. Ty tvoří nejnižší použitou programovou vrstvu, obsahují ovladače pro jednotlivé periferie MCU a mohou být do programu jednoduše přidány či odebrány. Pro překlad programu do strojového kódu byl dále použit ARM GCC kompilátor<sup>52,53</sup> a STM32 ST-Link Utility,<sup>54</sup> která umožňuje prohlížet, modifikovat a mazat registry MCU.

---

<sup>51</sup> CoCox CoIDE: Free/Open ARM Cortex MCU Development Tools. In: *CooCox* [online]. 2014 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: [http://www.coocox.com/CoIDE/CoIDE\\_Updates.htm](http://www.coocox.com/CoIDE/CoIDE_Updates.htm)

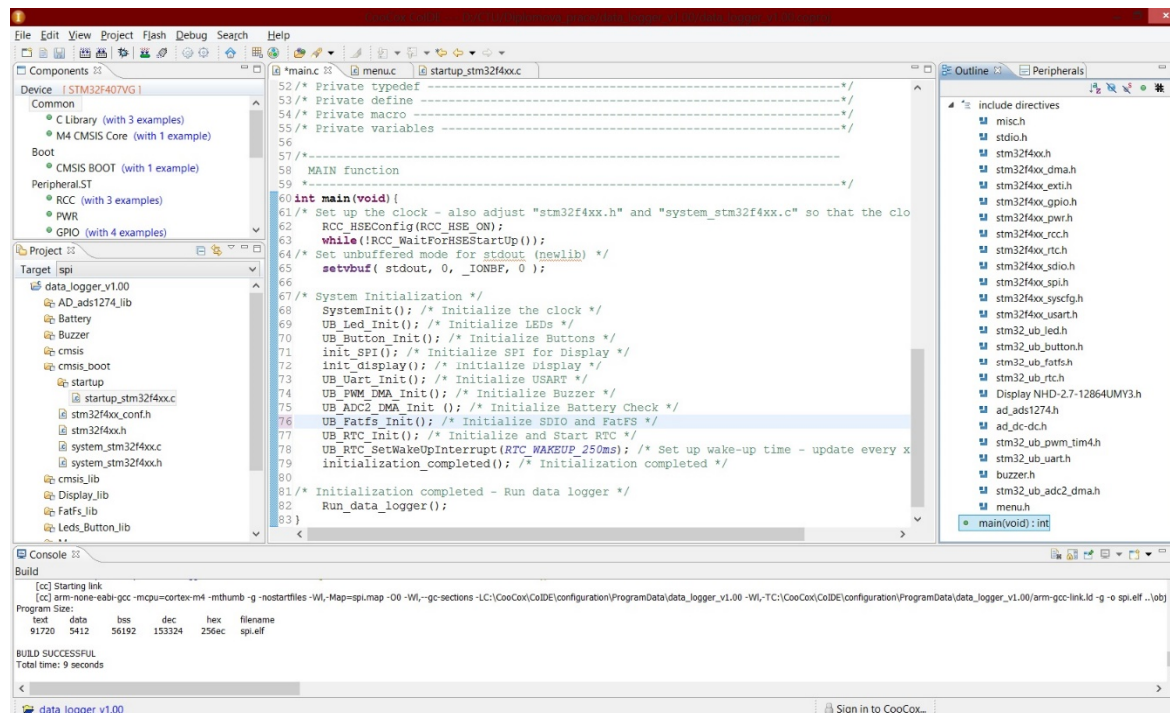
<sup>52</sup> GNU Tools for ARM Embedded Processors: Pre-built GNU toolchain from ARM Cortex-M & Cortex-R processors (Cortex-M0/M0+/M3/M4, Cortex-R4/R5/R7). In: *Launchpad* [online]. 2014 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <https://launchpad.net/gcc-arm-embedded/>

<sup>53</sup> Compiler Setting: Free/Open ARM Cortex MCU Development Tools. In: *CooCox* [online]. 2014 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: [http://www.coocox.com/CoIDE/Compiler\\_Settings.html](http://www.coocox.com/CoIDE/Compiler_Settings.html)

<sup>54</sup> STSW-LINK004: STM32 ST-LINK utility. In: *STMicroelectronics* [online]. 2014 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://www.st.com/web/en/catalog/tools/PF258168>



Na Obr. 43 je znázorněno vývojové prostředí CoIDE s otevřeným projektem „data\_logger\_v1.00“, souborem main().c a přidruženými knihovnami. Program je napsán v programovacím jazyce C.<sup>55</sup> Bližší popis softwarového vybavení dataloggeru se nachází v dalších kapitolách.

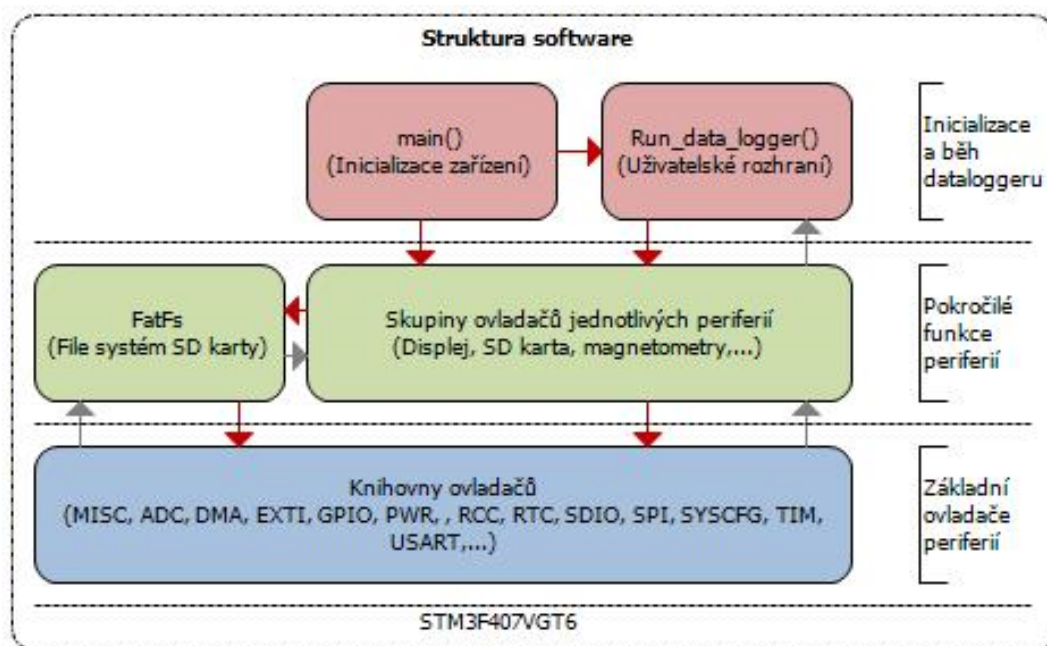


Obr. 43 - CoIDE, Zdroj: autor

<sup>55</sup> C Programming and C++ Programming. In: *Cprogramming* [online]. 2011 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://www.cprogramming.com/>

## 3.2 Struktura software

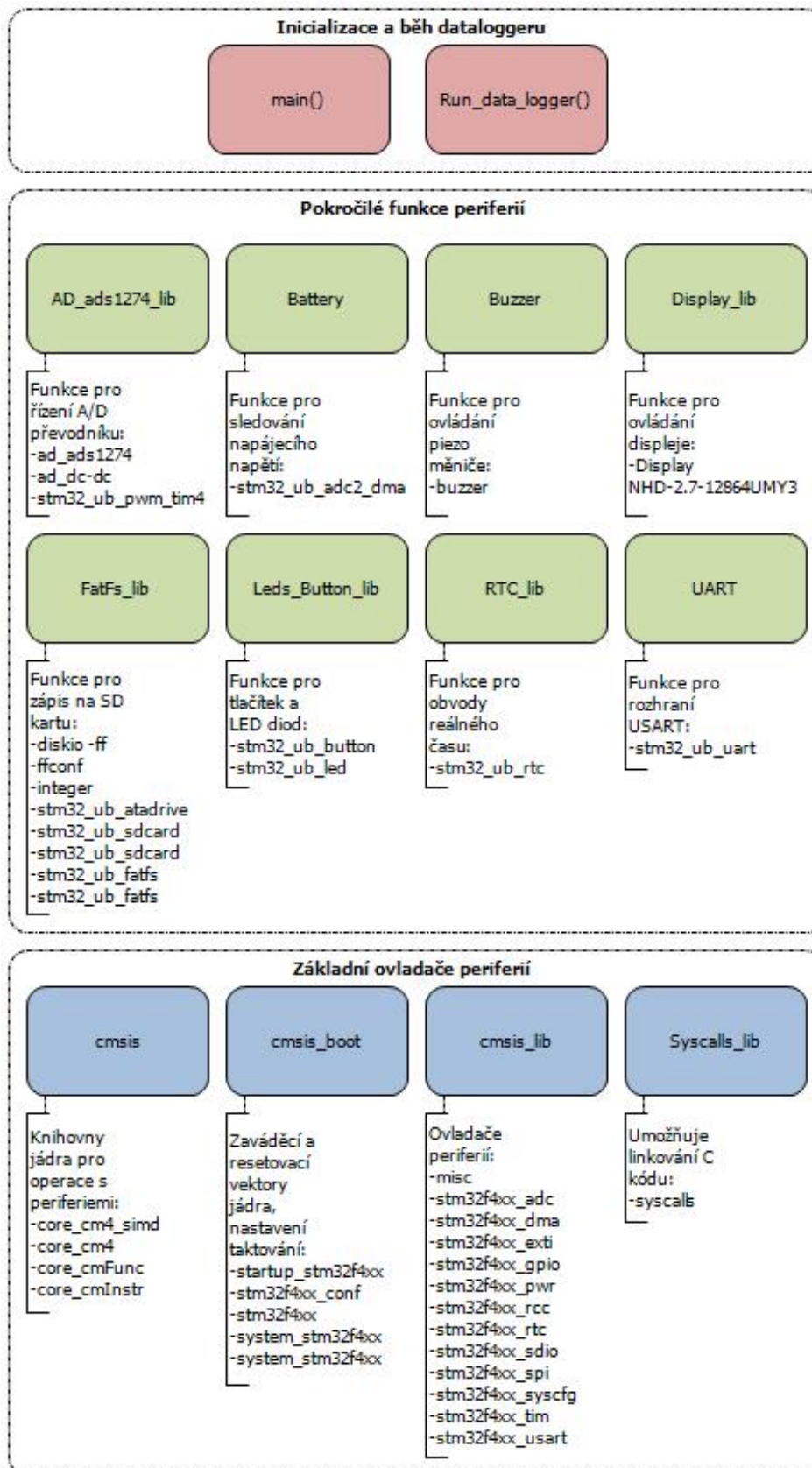
Software lze rozdělit do tří vrstev, viz Obr. 44 a Obr. 45. V nejvyšší vrstvě se nachází funkce `main()`, která při spuštění zařízení provádí inicializaci všech periférií a poté předává běh programu funkci `Run_data_logger()`, jenž představuje uživatelské menu. V menu se na základě uživatelských vstupů a s využitím funkcí integrovaných do druhé vrstvy realizuje obsluha periférií. Integrované funkce pod sebe v logických celcích sdružují skupiny ovladačů pro řízení jednotlivých periférií. Ovladače jsou poskytnuty výrobcem a obsahují funkce na nejnižší atomární úrovni. Příkladem takovýchto základních funkcí je například povolení či nastavení hodinového signálu zvolené periferie nebo odeslání/přijetí jednoho bytu přes rozhraní USART. Druhá vrstva je z velké části implementována za pomoci knihoven `stm32_ub`,<sup>56</sup> které poskytují mezistupeň mezi ovladači a uživatelským menu. Lze tak například jediným příkazem odeslat nebo přijmout celý řetězec znaků. Do této vrstvy je zahrnuta rovněž knihovna pro práci s archivačním systémem `FatFs`,<sup>57</sup> viz příslušná část kapitoly Softwarové knihovny.



Obr. 44 - Struktura software, Zdroj: autor

<sup>56</sup> Komplette-Library-Liste (STM32F4). In: *Mikrocontroller: Quellcode "C" Librarys und Beispiele für ATmega und STM32F4 CPUs* [online]. 2014 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: [http://mikrocontroller.bplaced.net/wordpress/?page\\_id=744](http://mikrocontroller.bplaced.net/wordpress/?page_id=744)

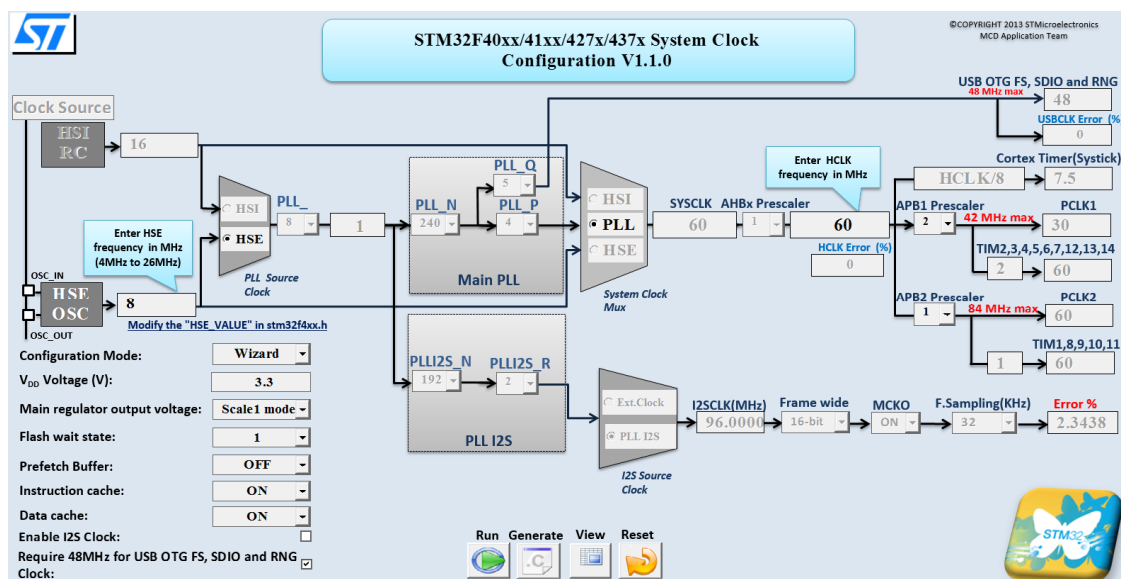
<sup>57</sup> FatFs: Generic FAT File System Module. In: *The Electronic Lives Manufacturing - presented by ChaN* [online]. 2014 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: [http://elm-chan.org/fsw/ff/00index\\_e.html](http://elm-chan.org/fsw/ff/00index_e.html)



Obr. 45 – Struktura knihoven, Zdroj: autor

### 3.3 Softwarové knihovny

Jak bylo zmíněno v předchozích kapitolách, knihovny lze rozčlenit do tří kategorií, viz Obr. 44 a Obr. 45. Nejnižší vrstvě sdružující ovladače periférií poskytnuté výrobcem není třeba se více věnovat. Vyjímkou jsou knihovny nastavujících takt jádra a zavádění programu po restartu MCU (cmsis\_boot) - system\_stm32f4xx, stm32f4xx a startup\_stm32f4xx. Dokument<sup>58</sup> na stránkách STMicroelectronics poskytuje step-by-step návod ke správnému nastavení taktu jádra MCU. Stejným způsobem se nastavují i další parametry taktování jako hodinový signál pro sběrnice MCU a některé periférie jako je SDIO nebo USB. V současné verzi 1.00 je takt jádra MCU nastaven na 60 MHz za použití 8 MHz externího krystalu (LSE). Periférie jako SPI1 (displej) nebo ADC převodník (dohled nad napájecím napětím) připojené na sběrnici APB2, tak mohou pracovat na frekvenci až 60 MHz. Periférie připojené na sběrnici APB1 jako USART3 (digitální magnetometr) a SPI2 (analogový magnetometr) mohou dosáhnout frekvence až 30 MHz. TIM4 (hodinový signál pro analogový magnetometr) je vyjímkou. Přesto, že je připojen na sběrnici APB1, lze jej spolu s několika dalšími časovači využívat až na frekvenci 60 MHz. Hodinový signál pro USB a SDIO je dodáván z PLL samostatně a jeho frekvence je pevně stanovena na 48 MHz, viz Obr. 46.



Obr. 46 - Nastavení taktování MCU, Zdroj: autor

<sup>58</sup> AN3988 Application note: Clock configuration tool for STM32F40xx/41xx/427x/437x micro-controllers. In: *STMicroelectronics* [online]. 2013 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: [http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/application\\_note/DM00039457.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/application_note/DM00039457.pdf)

Nejvyšší vrstvě knihoven se věnují kapitola Textové uživatelské rozhraní, proto se tato kapitola dále zaměřuje pouze na druhou vrstvu, jenž sdružuje do logických skupin ovladače jednotlivých periférií a na základě vstupů od uživatele zprostředkovává jejich řízení.

### A/D převodník

Skupina knihoven `AD_ads1274_lib` obsahuje všechny potřebné funkce pro běh DPS A/D převodníku. `Stm32_ub_pwm_tim4`<sup>59</sup> poskytuje hodinový signál 2,048 MHz (CLK) pro běh převodníku. Frekvence převodníku 2,048 MHz umožňuje průměrování z 4000 Sa/s ( $F_{DATA} = 2.048.000/512$ ). Toho je využito pro potlačení rušení sítě (50 Hz). Toto rušení má periodu 20ms. Pro jeho potlačení je proto průměrován takový počet vzorků (960 Sa), aby jejich počet (celková délka průměrování, 240 ms) byl celočíselným násobkem periody rušení. Knihovna využívá časovače a PWM modulátoru jejichž frekvence je odvozena od frekvence vnitřní sběrnice APB1. Knihovna může být nahrazena integrováním externího oscilátoru na DPS A/D převodníku. Tato varianta je hardwarově připravena, avšak nesla by s sebou dodatečné nároky na napájení.

Spínání a rozpínání DC/DC měničů napájejících vstupní obvody převodníku je obstaráno za pomoci `ad_dc-dc`.<sup>60</sup> Zde dochází pouze k nastavování GPIO pinů – ON/OFF.

Poslední, nejdůležitější částí je `ad_ads1274`. Tato knihovna poskytuje funkce pro řízení převodníku. Od úvodní inicializace rozhraní SPI2, nastavení přerušení a synchronizace za pomoci signálů SYNC přes postupné čtení vstupních dat jednotlivých kanálů obsluhou přerušení sériového rozhraní `EXTI15_10_IRQHandler` (signál DRDY) až po jejich předzpracování a průměrování, viz diagram na Obr. 47.

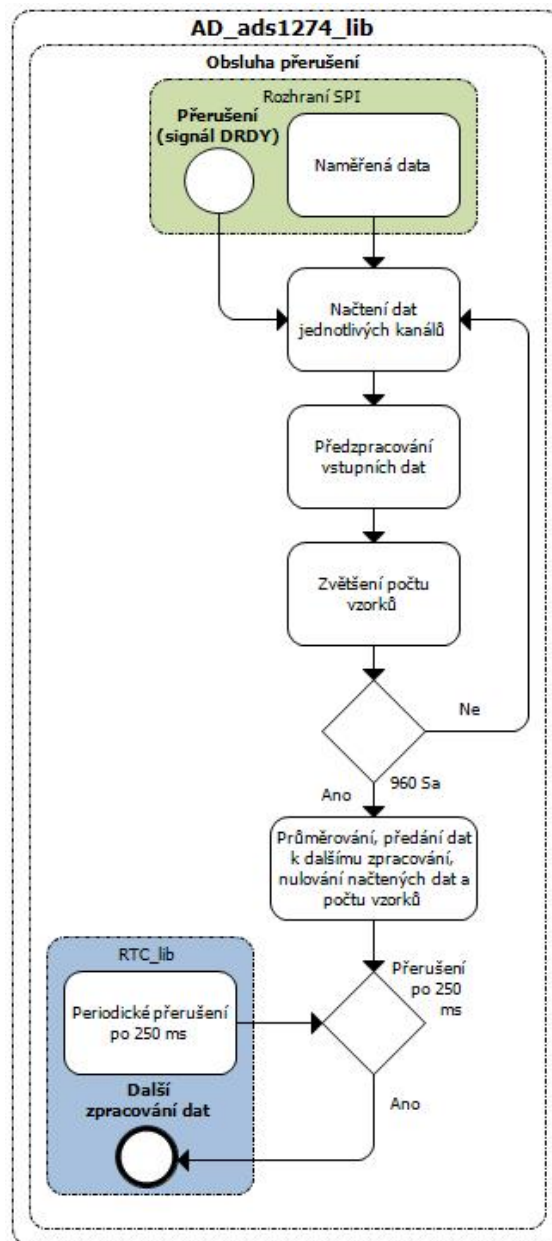
Zpracovaná data jsou periodicky průměrována (po 960 Sa) a každých 250 ms zobrazována na displeji. Dále mohou být data při spuštěném nahrávání každých 1000 ms ukládána na SD kartu. Toto zpracování již nicméně probíhá s použitím funkcí RTC.

Funkce všech tří knihoven jsou spolu blízce propojeny a proto k jejich inicializaci a spouštění dochází zároveň a to při spuštění analogového měření z menu. Po ukončení měření dojde k jejich deinicializaci.

---

<sup>59</sup> 25-PWM-Library (STM32F4). In: *Mikrocontroller: Quellcode "C" Librarys und Beispiele für ATmega und STM32F4 CPUs* [online]. 2013 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: [http://mikrocontroller.bplaced.net/wordpress/?page\\_id=1074](http://mikrocontroller.bplaced.net/wordpress/?page_id=1074)

<sup>60</sup> Modifikace knihovny: 01-LED-Library (STM32F4). In: *Mikrocontroller: Quellcode "C" Librarys und Beispiele für ATmega und STM32F4 CPUs* [online]. 2013 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: [http://mikrocontroller.bplaced.net/wordpress/?page\\_id=113](http://mikrocontroller.bplaced.net/wordpress/?page_id=113)

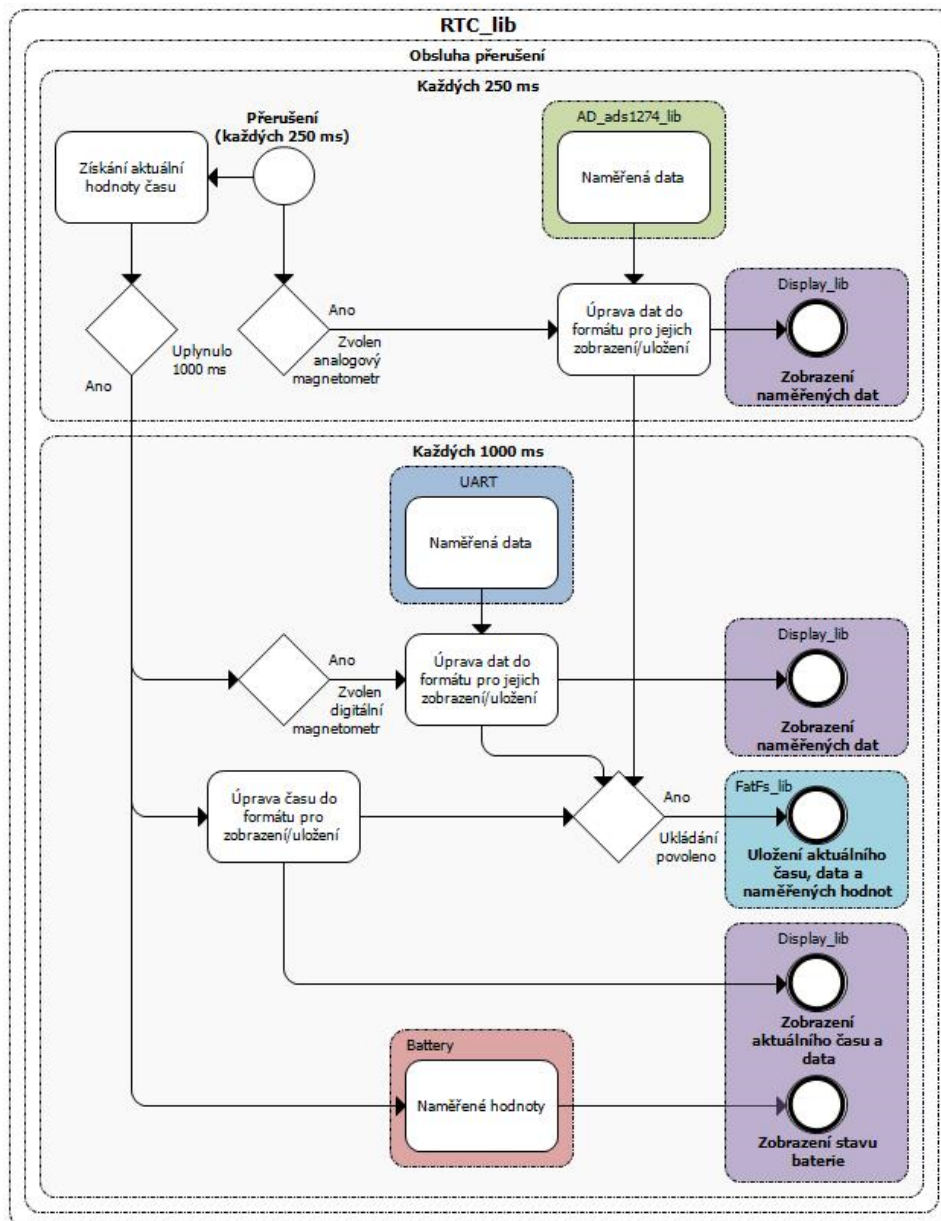


Obr. 47 - Obsluha přerušení A/D převodníku (SPI2), Zdroj: autor

### Obvody reálného času (RTC)

Knihovna `stm32_ub_rtc`<sup>61</sup> umožňuje sledování reálného času. Tyto obvody vyžadují záložní napájení (VBAT) a také externí krystal 32,768 kHz. Baterie poskytuje napájení záložním registrům, jenž drží údaje o čase, zatímco z frekvence krystalu je odvozen tok reálného času.

<sup>61</sup>41-RTC-Library (STM32F4). In: *Mikrocontroller: Quellcode "C" Librarys und Beispiele für ATmega und STM32F4 CPUs* [online]. 2013 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: [http://mikrocontroller.bplaced.net/wordpress/?page\\_id=1629](http://mikrocontroller.bplaced.net/wordpress/?page_id=1629)



Obr. 48 - Obsluha přerušení RTC, Zdroj: autor

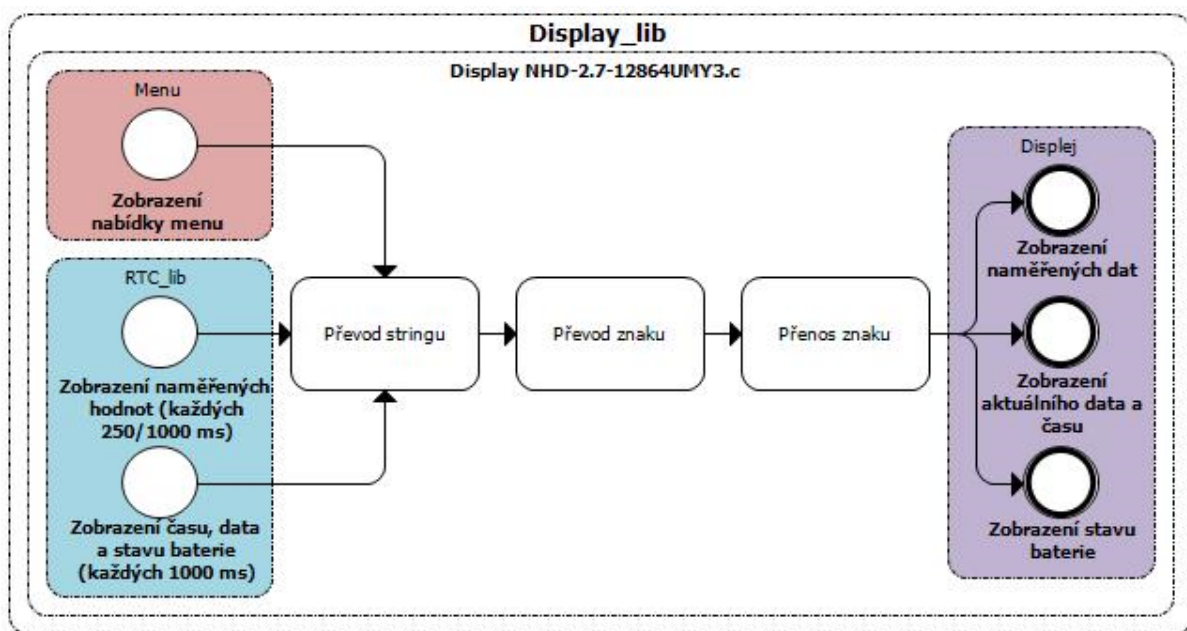
Základními funkcemi je nastavení/vyčtení data a času. Pro aplikaci dataloggeru byla dále nastavena obsluha periodického přerušení `P_RTC_WAKEUP_ISR`. Perioda přerušení je 250 ms a slouží uložení a zobrazení času a naměřených hodnot. Perioda byla zvolena tak, aby bylo možné dostatečně často zobrazovat rychle se měnící data z analogového magnetometru. Obsluha přerušení, viz Obr. 48 při každém přerušení, je-li to povoleno, vyčte data z proměnných držících naměřené hodnoty analogového magnetometru, upraví je do vhodného tvaru a zobrazí je na displeji. Je-li požadováno zobrazení dat z digitálního magnetometru (perioda vyčítání 1000 ms), dochází k jejich zobrazení každých 1000 ms. Stejně často je aktualizován stav napájecího napětí a aktuální čas.

V případě zapnutého nahrávání, jsou data s časovou značkou rovněž každých 1000 ms uložena na SD kartu.

## Displej

Knihovna Display NHD-2.7-12864UMY3<sup>62</sup> slouží ke komunikaci s řadičem displeje SSD1325 po sériové sběrnici SPI přenosovou rychlostí 30 MHz. Knihovna provádí inicializaci rozhraní i samotného displeje a integruje všechny funkce pro jeho nastavení včetně databáze zobrazovaných znaků.

Funkce sloužící k zobrazení dat jsou využívány knihovnou reálného času, jenž periodicky, je-li to povoleno, zobrazuje tato data na displeji. Dále je tato knihovna využita pro interakci s uživatelem, při volbě nastavení a měření v menu. Jak znázorňuje Obr. 49 data určená k zobrazení jsou nejprve zpracována funkcí pracující s celým řetězcem znaků, která jeden po druhém předává znaky dále, kde je jednotlivým znakům v ASCII kódu přiřazen znak definovaný v databázi. Takto zadané znaky jsou následně odeslány ve formě datových hodnot řadiči displeje.



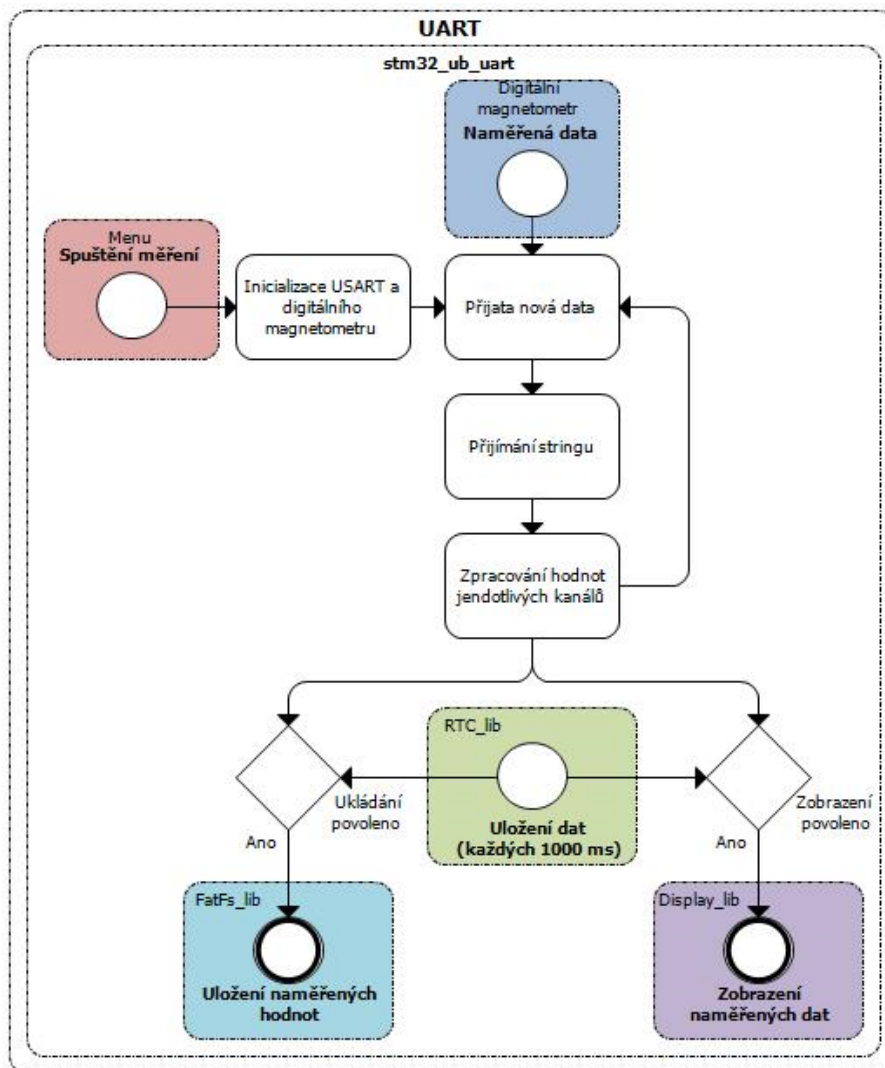
Obr. 49 - Zobrazení dat na displeji, Zdroj: autor

<sup>62</sup> OLED NHD-2.7-12864UCxx: Example Program Code. In: *Newhaven Display International* [online]. 2014 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: [http://www.newhavendisplay.com/app\\_notes/OLED\\_2\\_7\\_12864.txt](http://www.newhavendisplay.com/app_notes/OLED_2_7_12864.txt)



## USART

Rozhraní USART slouží pro měření digitálním magnetometrem a je řízeno skrze funkce knihovny `stm32_ub_uart`.<sup>63</sup> Po spuštění měření z menu, kde jsou rovněž nastaveny parametry měření, tato knihovna provede inicializaci rozhraní USART a digitálního magnetometru vysláním signálu k měření (znak „c“). Po inicializaci dochází na základě nastavených parametrů měření k periodickému sběru dat, jejich zpracování do vhodného tvaru a následného zobrazení či uložení na SD kartu. Zpracovávaný výstup magnetometru má tvar, viz (13).



Obr. 50 - Zpracování dat z USART, Zdroj: autor

<sup>63</sup> 12-UART-Library (STM32F4). In: *Mikrocontroller: Quellcode "C" Librarys und Beispiele für ATmega und STM32F4 CPUs* [online]. 2013 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: [http://mikrocontroller.bplaced.net/wordpress/?page\\_id=609](http://mikrocontroller.bplaced.net/wordpress/?page_id=609)

> +99999.99 +99999.99 -99999.99 +99.99 -99.99 +99.99 -99.99 CR+LF (13)

Přenášený řetězec začíná synchronizačním znakem, za nímž následují hodnoty tři měřených os magnetometru – X, Y, Z, teplota senzoru, teplota elektroniky, napájecí napětí, napětí za měničem a ukončení stringu odřádkováním. Řetězec znaků má pevnou délku. Jeho zpracování je znázorněno na Obr. 50.

Po ukončení měření je odeslán znak „t“, jenž ukončí sběr dat a dojde k deinicializaci rozhraní.

### Rozhraní SDIO

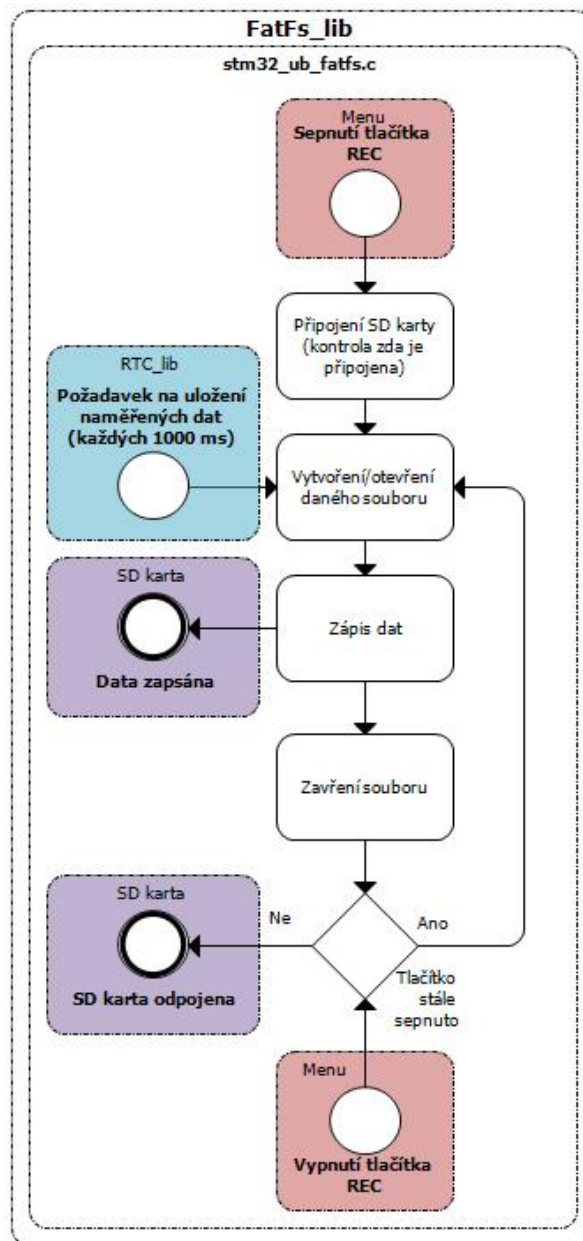
Pro práci s datovými uložišti slouží soubor knihoven FatFs\_lib.<sup>64</sup> Tyto knihovny umožňují použití SD karet s rozhraním SDIO a funkcí DMA. Pro ukládání dat se využívá archivačního systému FatFs<sup>65</sup> pro embedded zařízení, který je nezávisle implementovatelný na různé platformy a kompatibilní s Windows FAT file systémem. Tento file systém umožňuje teoreticky zapisovat soubory o velikosti až 4 GB, celkové velikosti uložiště až 2 TB a podporuje rovněž dlouhé názvy souborů o délce až 255 znaků.

Hlavní knihovnou přizpůsobující FatFs rozhraní SDIO je stm32\_ub\_fatfs, která portuje file systém na rozhraní SDIO a definuje základní funkce pro práci s SD kartou jako načtení karty, zápis do souboru nebo jeho mazání. Lze tak dosáhnout rychlosti čtení po blocích s použitím bufferu (512 B) okolo 2,4 MB/s a zápisu po blocích rychlostí zhruba 500 kB/s. Způsob ukládání dat je znázorněn na Obr. 51.

Pro představu lze uvést, že testovaná 2 GB SD karta, při nepřetržitém ukládání deseti vzorků za vteřinu, umožňuje kontinuální ukládání dat po dobu téměř 25 dnů. V současné verzi software „data\_logger\_v1.00“, probíhá ukládání dat rychlostí 1 Sa/s, což poskytuje proporcionálně delší dobu zápisu.

<sup>64</sup> 13-FATFS\_SDIO-Library (STM32F4). In: *Mikrocontroller: Quellcode "C" Librarys und Beispiele für ATmega und STM32F4 CPUs* [online]. 2013 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: [http://mikrocontroller.bplaced.net/wordpress/?page\\_id=621](http://mikrocontroller.bplaced.net/wordpress/?page_id=621)

<sup>65</sup> FatFs: Generic FAT File System Module. In: *The Electronic Lives Manufacturing - presented by ChaN* [online]. 2014 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: [http://elm-chan.org/fsw/ff/00index\\_e.html](http://elm-chan.org/fsw/ff/00index_e.html)



Obr. 51 - Ukládání dat na SD kartu, Zdroj: autor

### Ostatní

Knihovna Buzzer<sup>66</sup> slouží k rozezvučení piezo měniče integrovaného na DPS MCU. Inicializuje časovač a PWM modul, který piezo měnič rozezná na frekvenci 4 kHz. V současné verzi software

<sup>66</sup> 38-PWM\_DMA-Library (STM32F4). In: *Mikrocontroller: Quellcode "C" Librarys und Beispiele für ATmega und STM32F4 CPUs* [online]. 2013 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: [http://mikrocontroller.bplaced.net/wordpress/?page\\_id=1462](http://mikrocontroller.bplaced.net/wordpress/?page_id=1462)

„data\_logger\_v1.00” slouží piezo měnič k akustické signalizaci poklesu napájecího napětí. Akustická signalizace se povoluje z uživatelského menu a je spínána na základě periodického měření napájecího napětí integrovaným AD převodníkem, viz knihovna Battery.

Knihovna Battery,<sup>67</sup> jak bylo zmíněno výše, slouží k periodickému měření hladiny napájecího napětí. K měření je využito integrovaného AD převodníku, jehož výstup je následně porovnán s referencí. K vyhodnocování dochází každých 1000 ms při přerušení generovaném RTC. Procentuální hodnota napájecího napětí je v tomto intervalu zobrazována na displeji.

Leds\_Button\_lib<sup>68,69</sup> slouží k obsluze GPIO portů, na nichž jsou připojeny LED diody a tlačítka. LED diody slouží k signalizaci různých událostí. Modrá dioda je určena k signalizaci běhu dataloggeru. Červená signalizuje nahrávání na SD kartu a zelená LED dioda je volně k použití pro události definované uživatelem. Tlačítka naproti tomu slouží jako vstup zařízení pro ovládání menu.

### 3.4 Textové uživatelské rozhraní - menu

Menu představuje rozhraní mezi uživatelem a všemi funkcemi dataloggeru, které je spuštěno funkcí main() ihned po základní inicializaci zařízení. Vstupem menu jsou povely od uživatele, na jejichž základě se v něm lze pohybovat a provádět měření či nastavení, viz struktura menu na Obr. 52.

#### Volba měření

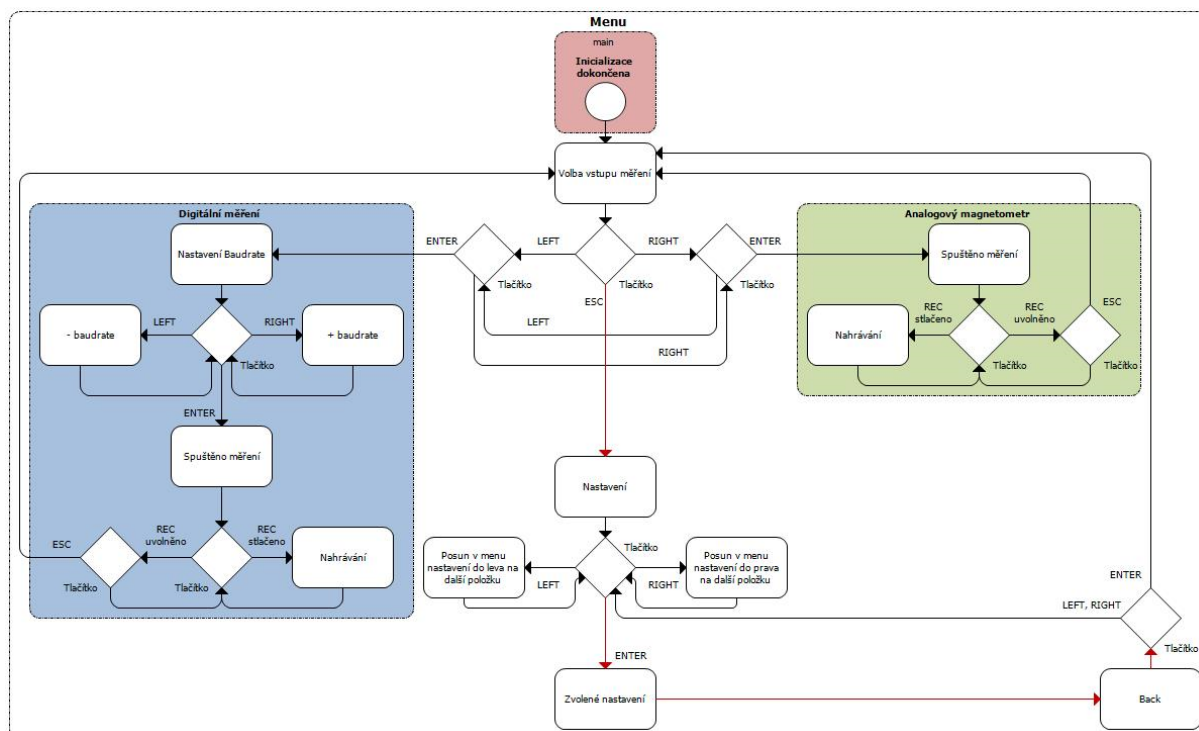
Ihned po inicializaci zařízení jsou uživateli nabídnuty možnosti měření s analogovým nebo digitálním magnetometrem, viz Obr. 53. Volbu lze provést pomocí tlačítek LEFT a RIGHT. Zvolený způsob měření lze potvrdit stiskem tlačítka ENTER. Pomocí tlačítka ESC se lze kdykoli během volby přepnout do menu nastavení.

---

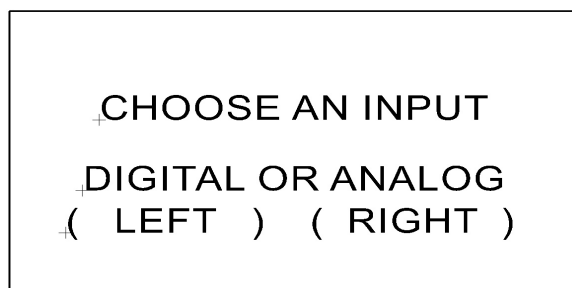
<sup>67</sup> 14-ADC\_DMA-Mode (STM32F4). In: *Mikrocontroller: Quellcode "C" Librarys und Beispiele für ATmega und STM32F4 CPUs* [online]. 2013 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: [http://mikrocontroller.bplaced.net/wordpress/?page\\_id=667](http://mikrocontroller.bplaced.net/wordpress/?page_id=667)

<sup>68</sup> 01-LED-Library (STM32F4). In: *Mikrocontroller: Quellcode "C" Librarys und Beispiele für ATmega und STM32F4 CPUs* [online]. 2013 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: [http://mikrocontroller.bplaced.net/wordpress/?page\\_id=113](http://mikrocontroller.bplaced.net/wordpress/?page_id=113)

<sup>69</sup> 02-Button-Library (STM32F4). In: *Mikrocontroller: Quellcode "C" Librarys und Beispiele für ATmega und STM32F4 CPUs* [online]. 2013 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: [http://mikrocontroller.bplaced.net/wordpress/?page\\_id=456](http://mikrocontroller.bplaced.net/wordpress/?page_id=456)



Obr. 52 - Základní menu (bez nastavení), Zdroj: autor



Obr. 53 - Menu - voba měření, Zdroj: autor

### Měření analogovým magnetometrem

Při zvolení analogového měření jsou inicializovány a nastaveny obvody A/D převodníku a spuštěno měření. Na displeji jsou zobrazeny naměřené hodnoty, počet vzorků, datum, čas a hladina napájecího napětí, viz Obr. 54. Nahrávání na SD kartu lze provést pomocí tlačítka REC. Během nahrávání není možné měření opustit. Opětovným stisknutím tlačítka REC dojde k vypnutí nahrávání a odpojení SD karty. Režim měření lze kdykoli mimo nahrávání opustit pomocí tlačítka ESC, čímž se uživatel dostane zpět do úvodní nabídky volby měření.

+11:11:11	+12.05.2014
# of samples: 960	
X: 99.999,99 nT	
Y: -26.568,85 nT	+Batt
Z: 64.100,00 nT	+100%

Obr. 54 - Obrazovka analogového měření, Zdroj: autor

### Měření digitálním magnetometrem

Při zvolení digitálního měření má uživatel totožné možnosti jako v předchozím případě, viz Obr. 55. Jedinou odlišností je nezobrazení počtu vzorků na displeji, jelikož průměrování provádí sám magnetometr.

+11:11:11	+12.05.2014
X: 99.999,99 nT	
Y: -26.568,85 nT	+Batt
Z: 64.100,00 nT	+100%

Obr. 55 - Obrazovka digitálního měření, Zdroj: autor

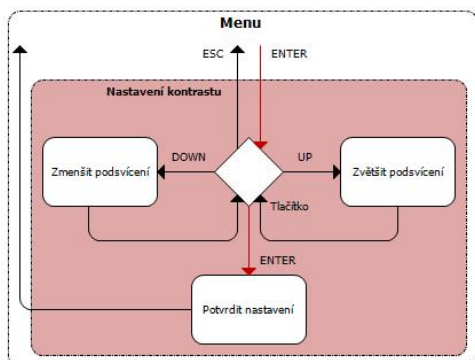
### Menu nastavení

Z úvodního menu, volba měření, se lze kdykoli stisknutím tlačítka ESC dostat do voleb nastavení. Zde se může uživatel pohybovat mezi jednotlivými volbami nastavení pomocí tlačítek LEFT a RIGHT. Do voleb zvoleného nastavení se lze dostat stlačením tlačítka ENTER. Z voleb nastavení se lze zpět na úvodní obrazovku volby měření dostat přes nabídku „BACK“ a potvrzení tlačítkem ENTER.

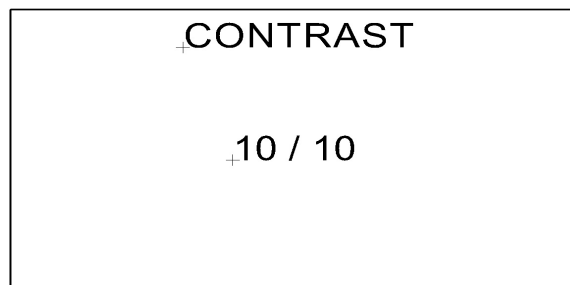
### Nastavení kontrastu displeje

Po vstupu do nastavení kontrastu displeje jej lze měnit pomocí tlačítek UP a DOWN. Potvrzení volby je tlačítkem ENTER. Ponechání původní volby a návrat do menu nastavení se provede pomocí tlačítka ESC. Nastavení kontrastu lze provést v deseti úrovních. Při nastavení nejnižších tří úrovní se rovněž rozsvítí LED diody umístěné na tlačítcích. Je tomu proto, že při nižší úrovni osvětlení není

potřeba tak velkého kontrastu, na druhou stranu světelné podmínky mohou zhoršovat orientaci mezi ovládacími tlačítky a proto se jejich diody rozzáří.



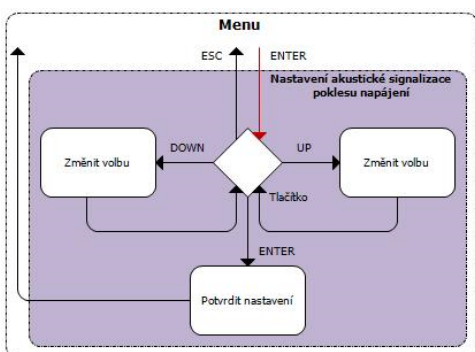
Obr. 56 - Menu - nastavení kontrastu displeje,  
Zdroj: autor



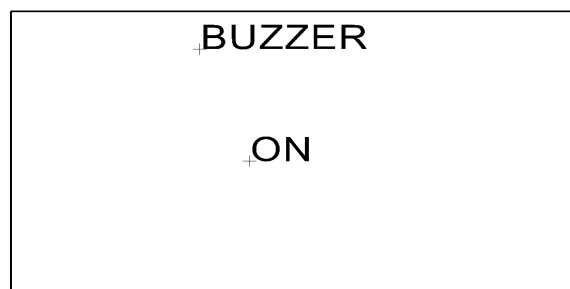
Obr. 57 - Menu - nastavení kontrastu, Zdroj: autor

### Nastavení akustické signalizace

Další položkou v menu nastavení je spouštění akustické signalizace při poklesu napájecího napětí. Pomocí tlačítek UP a DOWN lze volit mezi volbou zapnutí a vypnutí signalizace. Potvrzení, respektive ponechání původní volby lze provést pomocí tlačítek ENTER a ESC. Pokud je signalizace zapnutá, dojde při poklesu napájecího napětí na 50% k rozeznění piezo měniče.



Obr. 58 - Menu - nastavení akustické signalizace,  
Zdroj: autor

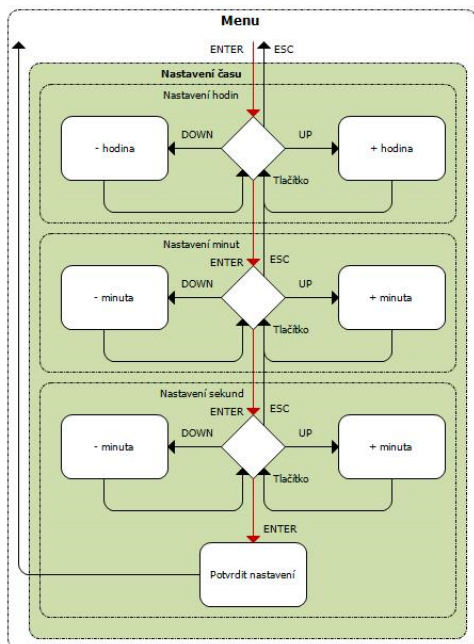


Obr. 59 - Menu - nastavení akustické signalizace,  
Zdroj: autor

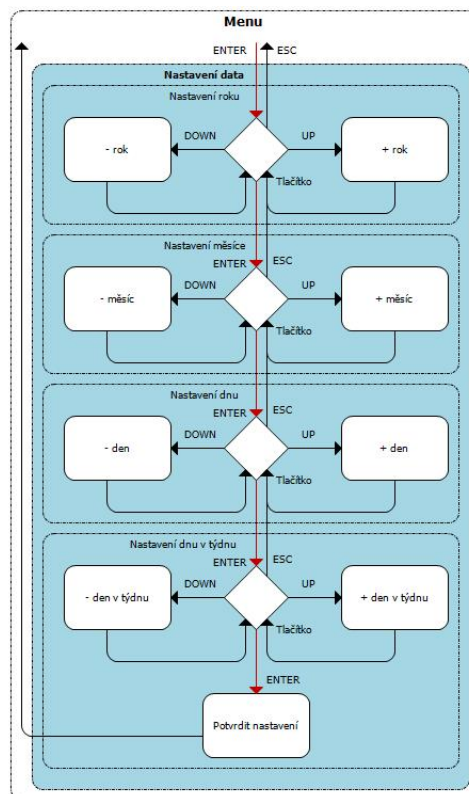
### Nastavení data a času

Čas se nastavuje ve třech krocích. Nejprve hodiny poté minuty a nakonec sekundy. Při volbě každé z položek lze použít tlačítka UP a DOWN. Pro postup (potvrzení daného kroku) či návrat zpět na krok předchozí slouží tlačítka ENTER a ESC.

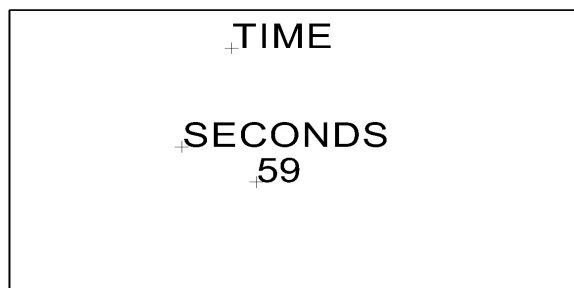
Datum se nastavuje stejně jako čas ovšem ve čtyřech krocích. Nejprve se nastavují roky poté měsíce, dále dny a nakonec dny v týdnu.



Obr. 60 - Menu - nastavení času, Zdroj: autor



Obr. 61 - Menu - nastavení data, Zdroj: autor



Obr. 62 - Menu - nastavení času, Zdroj: autor

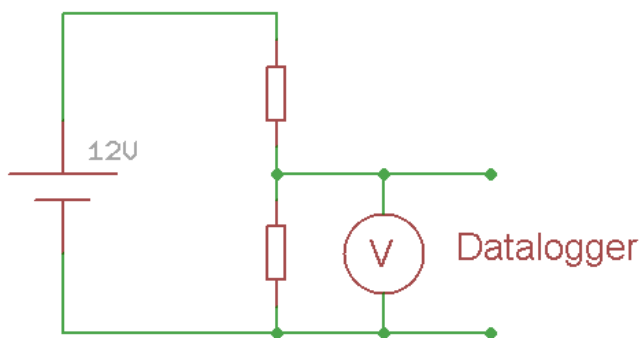


Obr. 63 - Menu - nastavení data, Zdroj: autor



## 4 Testování

Funkce dataloggeru byly ověřeny několika funkčními testy. Měření s digitálním magnetometrem bylo ověřeno s pomocí terminálového emulátoru<sup>70</sup> a redukce USB <-> sériová linka.<sup>71</sup> Komunikace ve směru od dataloggeru k magnetometru, spuštění a ukončování měření, byla ověřena přijetím znaku „c“ při spuštění měření a „t“ při jeho ukončení na terminálu počítače. Tyto znaky spouštějí/ukončují kontinuální měření rychlostí 1 Sa/s. Přijetí znaku „c“ na terminálu, následuje odeslání dat ve formátu, viz (13) a jeho přijetí dataloggerem. Dané hodnoty byly zobrazeny na displeji a při spuštěném nahrávání uloženy na SD kartu.



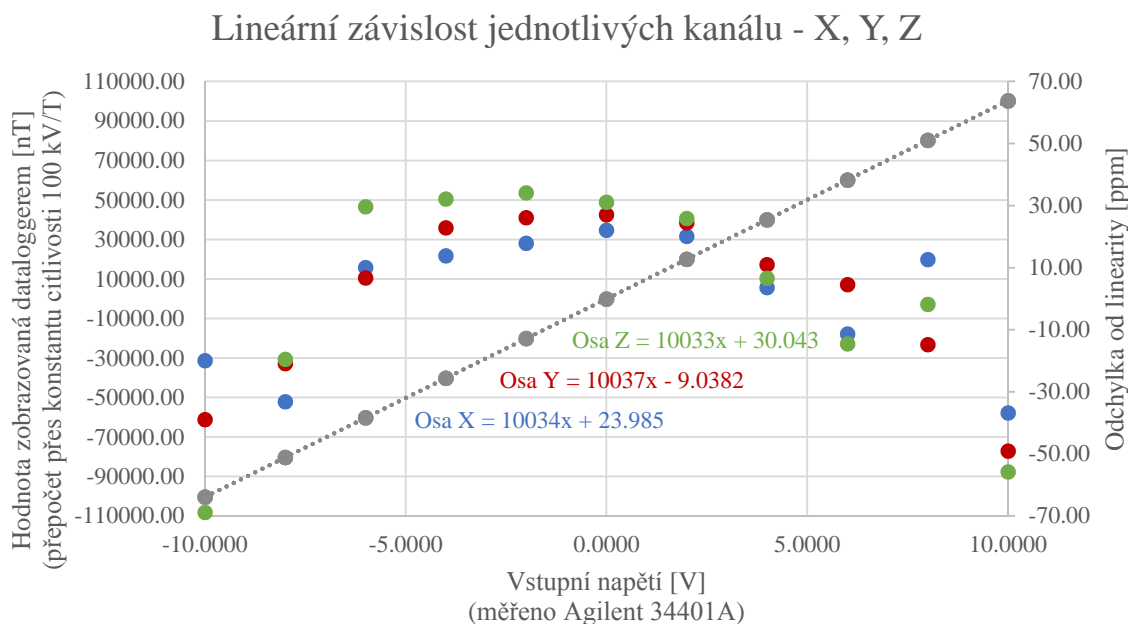
Obr. 64 - Testování měření A/D převodníkem, Zdroj: autor

Funkce analogového měření byla odzkoušena s využitím baterie 12 V, dvou odporových děličů napětí a voltmetru měřícím s přesností na šest a půl desetinných míst.<sup>72</sup> Zapojení je znázorněno na Obr. 64. Při měření s analogovým magnetometrem, odpovídají naměřené hodnoty  $\pm 100.000$  nT výstupnímu napětí  $\pm 10$  V. Tato závislost byla výše zmíněným zapojením simulována. Měřeními tak byly získány lineární závislosti jednotlivých kanálů, viz Graf 3, které byly následně použity pro korekci převodních konstant. Měření zároveň poskytlo údaj o maximální odchylce od linearity, která činila 0,0068% z plného rozsahu. Tato hodnota je pravděpodobně způsobena teplotním driftem vstupních zesilovačů A/D převodníku.

<sup>70</sup> Tera Term: An open-source, free, software implemented, terminal emulator. In: *CBS Interactive* [online]. 2014 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: [http://download.cnet.com/Tera-Term/3000-20432\\_4-75766675.html](http://download.cnet.com/Tera-Term/3000-20432_4-75766675.html)

<sup>71</sup> DS\_US232R-10(R-100/500): USB to RS232 Adapter cable. In: *Premier Farnell UK* [online]. 2011 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1640370.pdf>

<sup>72</sup> Agilent 34401A Multimeter. In: *Agilent Technologies* [online]. 2014 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5968-0162EN.pdf>



Graf 3 - Lineární závislost kanálů analogového magnetometru, Zdroj: autor

Ohřátí DPS A/D převodníku při měření je dobře patrné ze snímku z termokamery VarioCAM,<sup>73</sup> viz Obr. 65. Snímek byl pořízen po celodenním testovacím měření a je z něj patrné ohřátí tří vstupních zesilovačů v horní části DPS a A/D převodníku v jejím středu. Přehřátí převodníku předchází jeho připojení k DPS pomocí „thermal padu“. Velké množství tepla je tak rozptýleno do zemnicích vrstev. Dále je na DPS patrné ohřátí dvou DC/DC měničů a napěťového regulátoru AVDD\_5V, zesilovače referenčního napětí a omezovacího rezistoru zapojeného do série s LED diodou signalizující napájení analogového magnetometru.

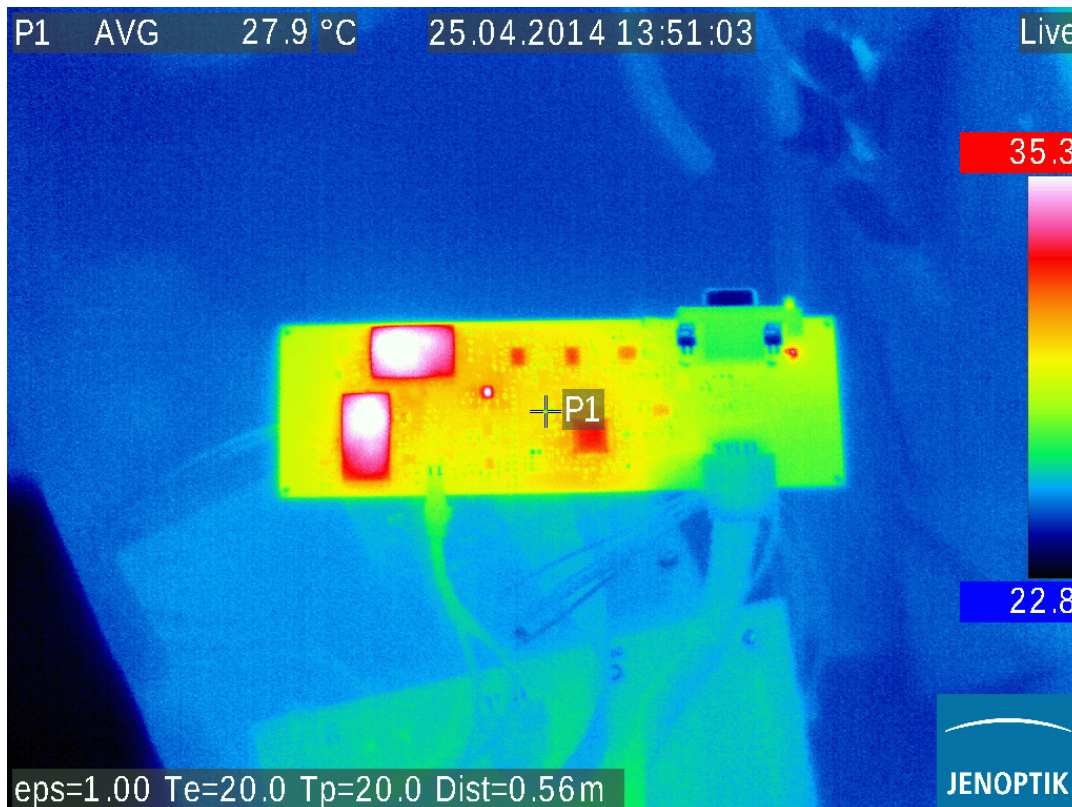
Režim	Napájení 9 V	Napájení 6 V
Režim menu / měření digitálním magnetometrem	65 mA	78 mA
Měření analogovým magnetometrem	227 mA	287 mA
Měření analogovým magnetometrem + záznam	230 mA	292 mA

Tab. 14 - Proudové odběry, Zdroj: autor

Tab. 14 uvádí proudové odběry zařízení, změřené v několika režimech při napájení 6 V a 9 V, které může být dodáváno ze šesti baterií typu AA umístěných v těle dataloggeru. Odběr zařízení při

<sup>73</sup> VarioCAM High Definition thermography cameras: Precision Thermography with 3.1 Megapixel IR Resolution. In: *JENOPTIK AG* [online]. 2014 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: <http://www.jenoptik.com/en-variocam-high-definition-thermography-camera>

práci v menu, respektive při zpracování dat z digitálního magnetometru a napětí 9 V byl 65 mA. Použitím baterií s kapacitou 2500 mAh,<sup>74</sup> tak lze nepřetržitě pracovat až 38 h. Změnou nastavení, například snížením kontrastu displeje, lze výdrž na baterie ještě prodloužit. Při měření analogovým magnetometrem a napětí 9 V, kdy je potřeba napájet obvody A/D převodníku a připojený magnetometr, dosáhl odběr 227 mA. Největší proudový odběr 292 mA, byl dosažen při napájení 6 V a spuštěném záznamu z analogového magnetometru. Použitím výše zmíněných baterií, lze stále dosáhnout výdrže přes 12 h.

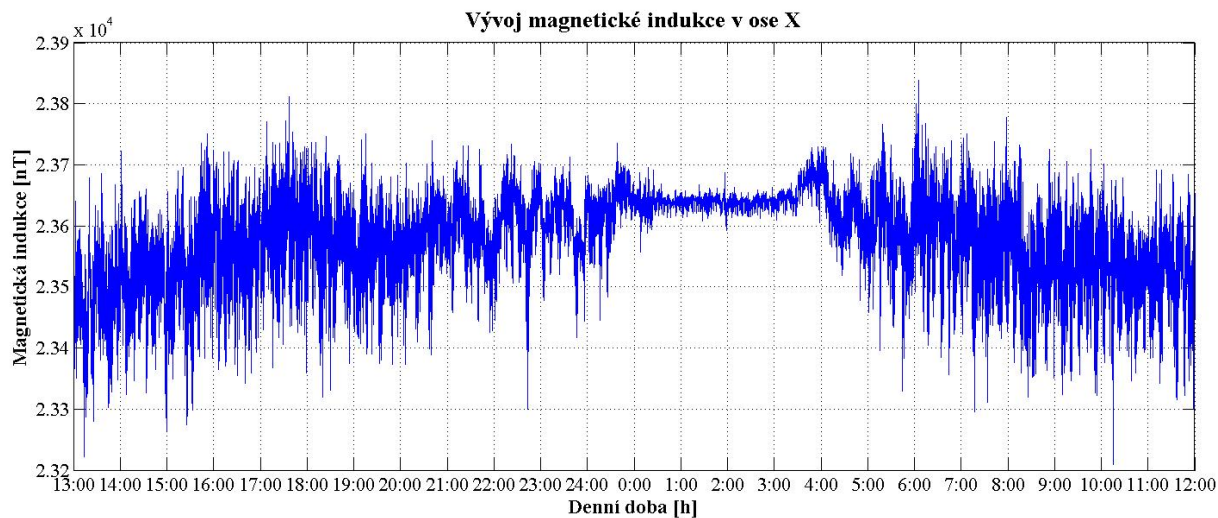


Obr. 65 - Termosnímek DPS A/D převodníku, Zdroj: autor

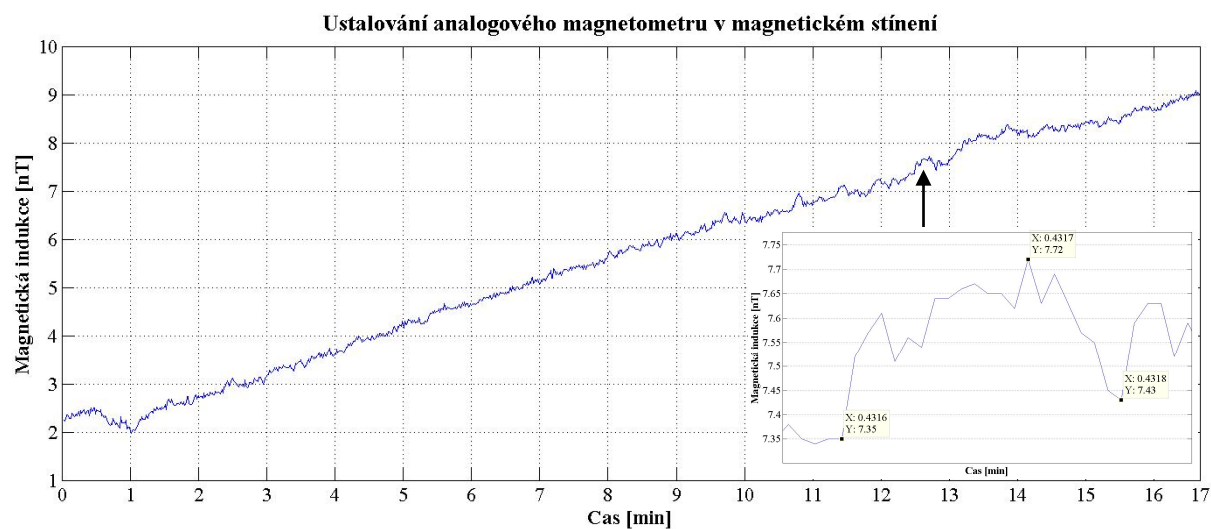
Posledním testem, kterému byl datalogger podroben bylo samostatné jednodenní měření ve sklepení Fakulty elektrotechnické ČVUT. Přesto, že naměřená data nejsou kvůli silnému zarušení dostatečně průkazná, bylo možné po jejich srovnání s jízdními řády DPP identifikovat pokles amplitudy šumu magnetické indukce v ose X v rozmezí mezi 0:24, kdy do stanice metra Dejvická, která se nachází v blízkosti fakulty, doráží poslední souprava a 4:40, kdy ze stanice vyráží první vlak.

<sup>74</sup> Například baterie XX AA 4-Pack: 4HR-3UWX. In: *Panasonic: Sanyo North America Corporation* [online]. 2014 [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://us.sanyo.com/Battery-Products/XX-AA-4-Pack>

Na Obr. 66 je zobrazen vývoj magnetické indukce ve směru osy X během dne. Šum je způsoben pravděpodobně velkým provozem v okolí fakulty, kde se nachází několik tramvajových linek, parkoviště a dočasně je zde přesunuto i několik stanic autobusů. Šum samotného zařízení (magnetometr a záznamník dat) je znázorněn na Obr. 67. Zde je vidět průběh ustalování analogového magnetometru (rostoucí trend) a nízký šum zařízení, jenž dosahuje maximální hodnoty 350 pT.



Obr. 66 - Vývoj magnetické indukce během dne (osa X), Zdroj: autor



Obr. 67 - Ustalování analogového magnetometru (osa X), Zdroj: autor

## Závěr

V rámci této diplomové práce bylo navrženo a realizováno přenosné zařízení provádějící dlouhodobý a bezobslužný sběr dat z vektorových magnetometrů pro měření magnetických polí v rozmezí velikostí vektorů magnetické indukce od 100 pT do 100  $\mu$ T. Sestavené zařízení provádí zobrazení a záznam hodnot naměřených připojenými tříosými magnetometry. Zařízení disponuje jedním vstupem pro připojení magnetometru s digitálním výstupem RS-232 a jedním vstupem pro magnetometr s analogovým výstupem v rozsahu  $\pm 10$  V. Analogový magnetometr je záznamníkem dat zároveň napájen a jím naměřené hodnoty jsou před svým zobrazením/uložením průměrovány, což pomáhá potlačit síťové rušení. Data jsou zobrazována na 2,7" OLED displeji, jenž slouží společně s tlačítky jako uživatelské rozhraní. Lze tak nastavovat různé parametry dataloggeru a měření. Záznam dat lze provádět na SD kartu. Pro měření ve venkovním prostředí je záznamník uložen v hliníkovém krytu a vybaven bateriovým pouzdrem pro 6 baterií typu AA. Skrze konektor je nicméně možné připojit i jiné externí zdroje napájení.

Zařízení bylo otestováno několika funkčními testy, které proběhly bez problémů a podle očekávání. Test ověřující vstupní obvody pro připojení analogového magnetometru pomohl ověřit jejich vysokou linearitu a nízký šum, který je pravděpodobně způsobený teplotní závislostí vstupních zesilovačů převodníku. Naměřená maximální odchylka od linearity na celém rozsahu dosahuje hodnoty pouze 0,0068%. Test rovněž poskytl zpětnou vazbu, na jejímž základě bylo možné korigovat převodní konstanty dataloggeru a dosáhnout tak požadované převodní charakteristiky.

Náměty pro další zlepšení návrhu zařízení spočívají především v úpravě obslužného software dataloggeru na základě jeho použití v reálných aplikacích. Zařízení bylo navrženo tak, aby splňovalo všechny základní funkční požadavky a ty bylo možno dále jednoduše rozšiřovat a zdokonalovat. Rozsáhlejší implementací klidových režimů a optimalizací software by bylo možné dosáhnout zmenšení celkového příkonu zařízení a snížení frekvence řídicího MCU. Návrh hardware se řídil prostorovými možnostmi ochranného krytu. Změnou velikosti či rozložením jednotlivých DPS by bylo možné umístit přímo do těla dataloggeru větší typ baterií s vyšší kapacitou a prodloužit tak dobu práce na baterie.

Sestavené zařízení bylo plně otestováno a splňuje všechny části zadání. Je jej tak možno použít pro široké pole aplikací měření magnetických polí v požadovaném rozsahu a v různých podmínkách.

## Literatura

- [1] Cortex-M4 Processor. ARM. [Http://www.arm.com/](http://www.arm.com/) [online]. 2014 [cit. 2014-03-02]. Dostupné z: <http://www.arm.com/products/processors/cortex-m/cortex-m4-processor.php>
- [2] Electromagnetic radiations and your health: Low-Frequency Fields (II). *LUXORION* [online]. 1999 [cit. 2014-04-11]. Dostupné z: <http://www.astrosurf.com/luxorion/qs1-em-radiation2.htm>
- [3] JANOŠEK, Michal. *Magnetometr s miniaturními senzory fluxgate*. Praha, 2007. Dostupné z: [https://aleph.cvut.cz:443/F?func=direct&doc\\_number=000670330&local\\_base=DUPL&format=999](https://aleph.cvut.cz:443/F?func=direct&doc_number=000670330&local_base=DUPL&format=999). Diplomová práce. ČVUT, FEL, Katedra měření. Vedoucí práce Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
- [4] KRUPIČKA, Svatopluk. *MAGNETISMUS: HISTORIE a SOUČASNOST: Od magnetitu a kompasu k magnetickému disku a spinovému tranzistoru*. 2007. Dostupné z: [http://www.learned.cz/userfiles/pdf/prednasky-cleny-odborne/svatopluk.krupicka\\_0207.pdf](http://www.learned.cz/userfiles/pdf/prednasky-cleny-odborne/svatopluk.krupicka_0207.pdf). Fyzikální ústav AV ČR.
- [5] LAIFR, Jaroslav. *Magnetometr pro řízení polohy satelitu*. Praha, 2011. Dostupné z: [http://fieldbus.feld.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/zaverecne\\_prace/DP\\_2011\\_Laifr\\_locked.pdf](http://fieldbus.feld.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/zaverecne_prace/DP_2011_Laifr_locked.pdf). Diplomová práce. ČVUT, FEL, katedra měření. Vedoucí práce Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D.
- [6] MAUS, Stefan, Susan MCLEAN, Manoj NAIR, Craig ROLLINS, Susan MACMILLAN, Brian HAMILTON a Alan THOMSON. The US/UK World Magnetic Model for 2010-2015. *NOAA Technical Report NESDIS/NGDC*. 2010, 1. Dostupné z: [http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/data/WMM2010/WMM2010\\_Report.pdf](http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/data/WMM2010/WMM2010_Report.pdf)
- [7] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. *International System of Units* [online]. 1998, 2000 [cit. 2014-04-11]. Dostupné z: <http://physics.nist.gov/cuu/Units/>
- [8] RIPKA, Pavel a Antonín PLATIL. *Přesné magnetické snímače a jejich aplikace* [pdf]. Centrum pro rozvoj výzkumu pokročilých řídicích a senzorických technologií, 2010, 24 s. [cit. 11.4.2014]. Dostupné z: [http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura\\_08\\_1006.pdf](http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_08_1006.pdf)
- [9] RIPKA, Pavel. *ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Přesné magnetické snímače a jejich aplikace* [pdf]. 2010, 149 s. [cit. 24.3.2014]. Dostupné z: [http://www.crr.vutbr.cz/system/files/prezentace\\_08\\_1006\\_1.pdf](http://www.crr.vutbr.cz/system/files/prezentace_08_1006_1.pdf)
- [10] RIPKA, Pavel. *Magnetic sensors and magnetometers*. Boston: Artech House, c2001, xviii, 494 p. ISBN 15-805-3057-5.

- [11] RM0090 Reference manual: STM32F40x, STM32F41x, STM32F42x, STM32F43x advanced ARM-based 32-bit MCUs. In: *STMicroelectronics* [online]. 2014 [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: [http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/reference\\_manual/DM00031020.pdf](http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/reference_manual/DM00031020.pdf)
- [12] SD Input/Output (SDIO) Card Specification. *SD Card Specification Simplified Version of: Part E1* [online]. 2001, 1.0 [cit. 2014-04-17]. Dostupné z: [https://www.sdcard.org/downloads/pls/simplified\\_specs/archive/partE1\\_100.pdf](https://www.sdcard.org/downloads/pls/simplified_specs/archive/partE1_100.pdf)
- [13] STM32F4 family – practical session: Atollic TrueSTUDIO STM32 + STM32F4 discovery kit. In: PAVESI, Francesco. *Http://www.emcu.it/* [online]. 2011, 29.10.2011 [cit. 2014-02-28]. Dostupné z: [http://www.emcu.it/STM32F4xx/Exe1/EXE1\\_STM32F4\\_discovery\\_on\\_Atolllic\\_-\\_practical\\_session\\_-\\_trainers\\_conspects\\_V2.pdf](http://www.emcu.it/STM32F4xx/Exe1/EXE1_STM32F4_discovery_on_Atolllic_-_practical_session_-_trainers_conspects_V2.pdf)
- [14] STM32F407VG: High-performance and DSP with FPU, ARM Cortex-M4 MCU with 1 Mbyte Flash, 168 MHz CPU, Art Accelerator, Ethernet. STMICROELECTRONICS. *Http://www.st.com/* [online]. 2013 [cit. 2014-03-02]. Dostupné z: <http://www.st.com/web/catalog/mmc/FM141/SC1169/SS1577/LN11/PF252140>

## Slovník použitých termínů a zkratek

**GCC** (GNU Compiler Collection) – Kompilátor programovacích jazyků

**NMR** (Nuclear Magnetic Resonance) – Nukleární magnetická rezonance

**PLL** (Phase Locked Loop) – Smyčka fázového závěsu

**RISC** (Reduced Instruction Set Computing) – Počítačová architektura zaměřená na zjednodušení instrukcí

**SIMD** (Single Instruction, Multiple Data) – Instrukce pracující s vektory konstantní délky

**SNR** (Signal to Noise Ratio) – Poměr signálu k šumu

**UXO** (Unexploded Ordnance) – Nevybuchlá munice



## Seznam obrázků

Obr. 1 - Mapa rozložení velikosti modulu vektoru pole v závislosti na geografické poloze, Zdroj: <a href="http://www.ngdc.noaa.gov/">http://www.ngdc.noaa.gov/</a> .....	4
Obr. 2 - Rozsahy vybraných typů magnetických senzorů, Zdroj: [9] .....	6
Obr. 3 - TMF100, Zdroj: <a href="http://magnetometer.com/">http://magnetometer.com/</a> .....	8
Obr. 4 - DFM28, Zdroj: <a href="http://www.cmt-gmbh.de/">http://www.cmt-gmbh.de/</a> .....	8
Obr. 5 - DataBridge Serial Data Recorder, Zdroj: <a href="http://www.microdaq.com/">http://www.microdaq.com/</a> .....	10
Obr. 6 - 20 Channel Midi Data Logger, Zdroj: <a href="http://www.microdaq.com/">http://www.microdaq.com/</a> .....	10
Obr. 7 - Navržený datalogger, Zdroj: autor .....	10
Obr. 8 - Blokové schéma dataloggeru, Zdroj: autor .....	12
Obr. 9 - Mikrokontrolery STM32F4, Zdroj: <a href="http://www.embedded.com/">http://www.embedded.com/</a> .....	13
Obr. 10 – Řada mikrokontrolerů STM32, Zdroj: <a href="http://www.st.com/">http://www.st.com/</a> .....	14
Obr. 11 - Obvodové zapojení MCU STM32F407VGT6, Zdroj: autor .....	15
Obr. 12 - Zapojení zaváděcích pinů, Zdroj: autor .....	16
Obr. 13 - Reset mikrokontroleru, Zdroj: autor .....	16
Obr. 14 - STM32F4 Discovery, Zdroj: <a href="http://www.st.com/">http://www.st.com/</a> .....	17
Obr. 15 - Programování dataloggeru, Zdroj: autor .....	18
Obr. 16 – Displej - NHD-2.7-12864UMY3, Zdroj: <a href="http://www.newhavendisplay.com/">http://www.newhavendisplay.com/</a> .....	19
Obr. 17 - Rozhraní displeje, Zdroj: autor .....	20
Obr. 18 - Step-down regulátor TPS54060, Zdroj: autor .....	21
Obr. 19 - Zapojení napájecích pinů MCU, Zdroj: autor .....	22
Obr. 20 - Napájení dataloggeru, Zdroj: autor .....	23
Obr. 21 - Obvodové schéma rozhraní USART, Zdroj: autor .....	24
Obr. 22 - Rozhraní SDIO, Zdroj: autor .....	25
Obr. 23 - Komunikační a napájecí rozhraní DPS, Zdroj: autor .....	26
Obr. 24 - Akustická signalizace, Zdroj: autor .....	28
Obr. 25 - Led signalizace, Zdroj: autor .....	28
Obr. 26 - Rozhraní USB, Zdroj: autor .....	29
Obr. 27 - Konektor čidla osvětlení, Zdroj: autor .....	30
Obr. 28 - Vnitřní struktura ADS1274 ( <sup>(1)</sup> ADS1278), Zdroj: <a href="http://www.ti.com/">http://www.ti.com/</a> .....	31
Obr. 29 - A/D převodník ADS1274, Zdroj: autor .....	32

Obr. 30 – Dynamický přenos dat z A/D převodníku, Zdroj: <a href="http://www.ti.com/">http://www.ti.com/</a> .....	34
Obr. 31 - Vstupní obvody A/D převodníku, Zdroj: autor.....	34
Obr. 32 - Konektor pro připojení analogového magnetometru, Zdroj: autor .....	35
Obr. 33 - Úprava vstupního napětí, Zdroj: autor .....	35
Obr. 34 - Napájení obvodů úpravy vstupního signálu, Zdroj: autor.....	36
Obr. 35 - Zdroj referenčního napětí 2,5V, Zdroj: autor .....	37
Obr. 36 - AVDD 5V, Zdroj: autor.....	38
Obr. 37 - Napájení magnetometru, Zdroj: autor.....	39
Obr. 38 - Obvodové zapojení tlačítka, Zdroj: autor .....	40
Obr. 39 - Rozhraní tlačítek, Zdroj: autor.....	40
Obr. 40 – Datalogger, Zdroj: autor .....	41
Obr. 41 - Levá bočnice dataloggeru, Zdroj: Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D. ....	42
Obr. 42 - Horní kryt dataloggeru, Zdroj: Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D. ....	42
Obr. 43 - CoIDE, Zdroj: autor .....	44
Obr. 44 - Struktura software, Zdroj: autor .....	45
Obr. 45 – Struktura knihoven, Zdroj: autor .....	46
Obr. 46 - Nastavení taktování MCU, Zdroj: autor .....	47
Obr. 47 - Obsluha přerušení A/D převodníku (SPI2), Zdroj: autor.....	49
Obr. 48 - Obsluha přerušení RTC, Zdroj: autor .....	50
Obr. 49 - Zobrazení dat na displeji, Zdroj: autor .....	51
Obr. 50 - Zpracování dat z USART, Zdroj: autor .....	52
Obr. 51 - Ukládání dat na SD kartu, Zdroj: autor.....	54
Obr. 52 - Základní menu (bez nastavení), Zdroj: autor .....	56
Obr. 53 - Menu - voba měření, Zdroj: autor .....	56
Obr. 54 - Obrazovka analogového měření, Zdroj: autor .....	57
Obr. 55 - Obrazovka digitálního měření, Zdroj: autor .....	57
Obr. 56 - Menu - nastavení kontrastu displeje, Zdroj: autor .....	58
Obr. 57 - Menu - nastavení kontrastu, Zdroj: autor.....	58
Obr. 58 - Menu - nastavení akustické signalizace, Zdroj: autor.....	58
Obr. 59 - Menu - nastavení akustické signalizace, Zdroj: autor.....	58
Obr. 60 - Menu - nastavení času, Zdroj: autor.....	59
Obr. 61 - Menu - nastavení data, Zdroj: autor .....	59

---

Obr. 62 - Menu - nastavení času, Zdroj: autor.....	59
Obr. 63 - Menu - nastavení data, Zdroj: autor .....	59
Obr. 64 - Testování měření A/D převodníkem, Zdroj: autor .....	60
Obr. 65 - Termosnímek DPS A/D převodníku, Zdroj: autor .....	62
Obr. 66 - Vývoj magnetické indukce během dne (osa X), Zdroj: autor .....	63
Obr. 67 - Ustalování analogového magnetometru (osa X), Zdroj: autor .....	63

## Seznam grafů

Graf 1 - Dynamický rozsah magnetických polí, Zdroj: [3] .....	3
Graf 2 - Závislost proudového odběru na nastaveném kontrastu, Zdroj: autor .....	21
Graf 3 - Lineární závislost kanálů analogového magnetometru, Zdroj: autor .....	61

## Seznam tabulek

Tab. 1 - Typická velikost radiofrekvenčních polí, Zdroj: [2] .....	4
Tab. 2 - Porovnání magnetometrů fluxgate, Zdroj: <a href="http://magnetometer.com/">http://magnetometer.com/</a> .....	8
Tab. 3 - Porovnání parametrů záznamníků dat, Zdroj: autor .....	10
Tab. 4 - Zaváděcí režimy mikrokontroleru, Zdroj: [11] .....	16
Tab. 5 - Programovací rozhraní, Zdroj: autor .....	17
Tab. 6 - Sériové rozhraní SSD1325, Zdroj: autor .....	20
Tab. 7 - Rozhraní USART, Zdroj: autor .....	25
Tab. 8 - Rozhraní SDIO, Zdroj: [12] .....	26
Tab. 9 - Konektor JP1, Zdroj: autor .....	27
Tab. 10 - Konektor JP3, Zdroj: autor .....	27
Tab. 11 - Konektor JP2, Zdroj: autor .....	27
Tab. 12 - Rozhraní USB, Zdroj: autor .....	29
Tab. 13 - Zapojení A/D převodníku, Zdroj: autor .....	33
Tab. 14 - Proudové odběry, Zdroj: autor .....	61

## **Obsah příloženého CD**

Složka: Datasheets

Složka: Program - data\_logger\_v1.00

Složka: Schemes

tesarjak\_2014\_dp