

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Vektorové měření magnetického pole**

**Jan Široký**

**2017**

## ZADÁNÍ

Doplnění 3D vektorového magnetometru o další senzory kompenzující některé chyby měření, vylepšení datové komunikace.

1. Proveďte návrh a realizaci mechanických úprav zajišťujících vyšší mechanickou stabilitu a menší vliv okolí.
2. Seznamte se s vlastnostmi 3D vektorového magnetometru, navrhnete umístění a přívod vodičů tak, aby byl výsledek co nejméně ovlivněn.
3. Doplněte senzor pro kompenzaci vlivu teploty na měřené hodnoty a otestujte.
4. Upravte formát datové komunikace pro předávání výsledků do podoby vhodnější pro vyšší vzdálenosti bez vlivu rušení.

## **ABSTRAKT**

Geomagnetické pole, jakožto předmět měření, klade specifické požadavky na měřicí zařízení, jeho umístění a práci s naměřenými daty. Předkládaná DP se těmito specifiky zabývá a popisuje konstrukci měřicího zařízení, jehož účel je měření geomagnetického pole pomocí integrovaného senzoru. Dále stručně představuje přirozené projevy geomagnetického pole a vyhodnocuje jejich měřitelnost konstruovaným zařízením. Měření dvou vybraných jevů – denní variace a geomagnetické bouře – porovnává s měřením geomagnetické observatoře Budkov (AVČR), přičemž aplikuje algoritmy definované nadnárodním společenstvím pro pozorování geomagnetického pole – společností INTERMAGNET.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Anizotropní magnetorezistivita, geomagnetické pole, solární bouře, vektorové měření magnetického pole, k-index, hmc5883, budkov, intermagnet.

## **ABSTRACT**

Geomagnetic field as a measurement subject takes specific requirements on a measuring device, its placement and a signal processing. In the first line this paper deals with these specifics and describes in details development of a device which should be able to measure geomagnetic field by integrated magnetometer. After that a short overview over the geomagnetic nature is introduced, focusing on effects which are measurable by the device (daily variation and geomagnetic storm). As a practical part, the device was constructed and the longterm measurement was done. In order to evaluate the device measuring performance the signal was processed as it is recommended by INTERMAGNET and it was compared with measuring results of the geomagnetic observatory of Budkov.

## **KEY WORDS**

Anisotropic magnetoresistivity, geomagnetic field, solar storm, magnetic field vector measuring, k-index, hmc5883, budkov, intermagnet.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 16.5.2017

.....  
Jan Široký

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval konzultantovi Ing. Richardu Linhartovi PhD. za odborné vedení a praktické rady a připomínky. Velký dík patří nesporně personálu geomagnetické observatoře Budkov, kteří mě mile přijali – především Ing. Michalu Vlkovi PhD., který obětoval nemalé množství svého času. Každá tamní hodina pomohla této DP práci být lepší.

Děkuji rodině a Loren za podporu a trpělivost.

**OBSAH**

<b>ÚVOD .....</b>	<b>8</b>
<b>POUŽITÉ SYMBOLY.....</b>	<b>9</b>
<b>KAPITOLA 1: MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE .....</b>	<b>10</b>
• <u>1.1 Měření magnetického pole .....</u>	<u>10</u>
• <u>1.2 Magnetorezistivní jev .....</u>	<u>10</u>
• <u>1.3 AMR senzor.....</u>	<u>11</u>
<b>KAPITOLA 2: MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>13</b>
• <u>2.1 Blokové schéma.....</u>	<u>13</u>
• <u>2.2 Hlavní součásti .....</u>	<u>13</u>
• <u>2.3 Užití komunikační protokoly .....</u>	<u>15</u>
• <u>2.4 Diagnostické doplňky.....</u>	<u>16</u>
• <u>2.5 Spotřeba zařízení .....</u>	<u>16</u>
<b>KAPITOLA 3: ZAŘÍZENÍ Z HLEDISKA ELEKTROMAGNETICKÉ KOMPATIBILITY.....</b>	<b>18</b>
• <u>3.1 Přehled rušení .....</u>	<u>18</u>
• <u>3.2 Opatření proti rušení.....</u>	<u>19</u>
<b>KAPITOLA 4: ANALÝZA CHYB MĚŘENÍ.....</b>	<b>21</b>
• <u>4.1 Teplotní chyby.....</u>	<u>21</u>
• <u>4.2 Neteplovní chyby .....</u>	<u>24</u>
<b>KAPITOLA 5: MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE ZEMĚ.....</b>	<b>27</b>
• <u>5.1 Magnetické pole Země .....</u>	<u>27</u>
• <u>5.2 K-index jako měrný ukazatel intenzity geomagnetické bouře .....</u>	<u>30</u>
• <u>5.3 Dlouhodobé měření magnetického pole Země.....</u>	<u>31</u>
<b>KAPITOLA 6: VYHODNOCENÍ ZAŘÍZENÍ A BUDOUCÍ PRÁCE.....</b>	<b>37</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>39</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>40</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>466</b>
<b>KATALOGOVÉ LISTY .....</b>	<b>488</b>

## ÚVOD

Téma této DP je inspirované prací Ing. Linharta PhD., která se zabývá měřením geomagnetického pole umístění orbitálního [1] i pozemského. Tato práce navazuje na měření pozemského umístění a na prototyp zařízení, který byl vytvořen pro vyšetřování možností integrovaných senzorů založených na anizotropní magnetorezistivitě (AMR).

Senzory na bázi AMR jsou zatíženy různými typy chyb měření. Předmětem prací je tyto chyby analyzovat a omezit na minimum ve všech fázích od návrhu zařízení až po zpracování měřeného signálu.

Práce v první kapitole uvádí teorii měření magnetického pole pomocí AMR principu. Navazuje druhou kapitolou, kde rámcově popisuje návrh měřícího zařízení od blokového schématu po přepočty měřené veličiny. Třetí a čtvrtá kapitola se vrací k návrhu zařízení z pohledu rušení a chyb měření, určuje požadavky na měřící prostředí a na kompenzaci chyb měření. Pátá kapitola představuje typické vlastnosti magnetického pole Země, způsoby jeho vyhodnocování a nakonec výsledky měření realizovaného v geomagnetické observatoři ústavu AVČR, včetně porovnání s referenčním měřením. Poslední kapitola hodnotí výsledky práce a představuje možné směry prací budoucích.



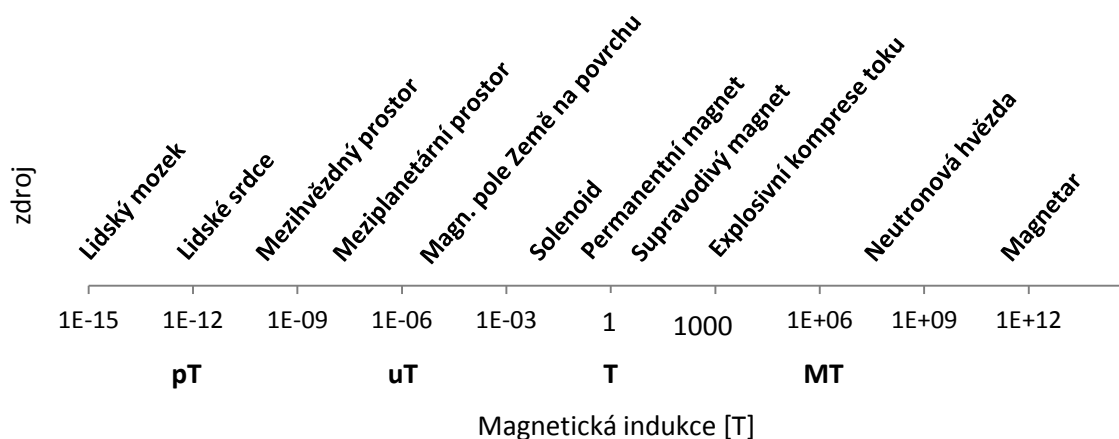
**POUŽITÉ SYMBOLY**

<b>Symbol</b>	<b>Jednotky</b>	<b>Popis</b>
B	[T]	Magnetické indukce
R	[ $\Omega$ ]	Elektrický odpor
t	[ $^{\circ}\text{C}$ ]	Teplota
H	[ $\text{Am}^{-1}$ ]	Magnetická intenzita
MR		Magnetorezistivita
AMR		Anizotropní magnetorezistivita
GMR		Giant magnetorezistivita
TMR		Tunelová magnetorezistivita
GMI		Giant magnetoimpedance
MO		Magnetooptický senzor
SQUID		Supravodivé kvantově interferenční zařízení
NMR		Nukleární magnetická rezonance
DPS		Deska plošných spojů
EMK		Elektromagnetická kompatibilita
MPZ		Magnetické pole Země

## KAPITOLA 1: MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE

### 1.1 Měření magnetického pole

Současné poznání magnetismu se rozprostírá po široké škále měřitelných hodnot. Různě silné zdroje magnetického pole představuje Obr.1. Jsou popsány magnetickou indukcí  $\mathbf{B}$  v jednotkách Tesla  $\mathbf{T}$ . Tato práce se zabývá rozsahem okolo jednotek nT až  $\mu\text{T}$ .



Obr.1.: Přehledová stupnice magnetické indukce a jejích zdrojů [2]

Výčet principů užívaných k měření magnetického pole uvádí Tab.1. Každý z nich má charakteristické vlastnosti předurčující jeho pole využití. Pro tuto práci je důležitý anizotropní magnetorezistivní jev, jehož předností je měřit magnetické pole poměrně velmi přesně, uvážíme-li vysokou integrovatelnost a finanční dostupnost výsledného přístroje.

### 1.2 Magnetorezistivní jev

Obecná magnetorezistivita (MR) je závislost mezi elektrickým odporem materiálu  $\mathbf{R}$  a vnějším magnetickým polem. Rezistivitu, tedy v důsledku rezistanci  $\mathbf{R}$ , chápeme jako „neochotu“ atomů vyměňovat si valenční elektrony. Tu ovlivňují teplota  $\mathbf{t}$  a vnější magnetická intenzita  $\mathbf{H}$  a její směr [3]. Pro anizotropní magnetorezistivitu je důležitý poslední zmíněný parametr a ostatní mohou působit parazitně.

Zvyšováním  $\mathbf{t}$  materiálu dochází ke zvyšování energie jeho fononů<sup>1</sup>. Fonony se tak častěji srážejí s valenčními elektrony (snižují jejich střední volnou dráhu). Schopnost výměny valenčních elektronů v materiálu je snížena, dochází ke zvýšení  $\mathbf{R}$ .

<sup>1</sup> virtuální částice vyjadřující teplotní kmitání atomů v krystalové mřížce

Tab.1: Porovnání magnetických senzorů. [2]

Senzor	Princip	Měří	Frekvenční rozsah [Hz]	Amplitudový rozsah [T]	Šum [T]	Poznámky
Coil	Faradayův princip	$d\Phi/dt$	$10^{-3} - 10^9$	$10^{-10} - 10^2$	100n	objemný, absolutní
Fluxgate	Saturace	H	$0 - 10^3$	$10^{-10} - 10^{-3}$	10p	objemný
Hallova sonda	Lorentzova síla	B	$0 - 10^5$	$10^{-5} - 10^1$	100n	tenkovrstvý
MR	Lorentzova síla	$B^2$	$0 - 10^5$	$10^{-2} - 10^1$	10n	tenkovrstvý
<b>AMR</b>	<b>Spinorbitální interakce</b>	<b>H</b>	<b><math>0 - 10^7</math></b>	<b><math>10^{-9} - 10^{-3}</math></b>	<b>10n</b>	<b>tenkovrstvý</b>
GMR	Spinová akumulace	H	$0 - 10^9$	$10^{-9} - 10^{-3}$	10n	tenkovrstvý
TMR	Tunelový jev	H	$0 - 10^9$	$10^{-9} - 10^{-3}$	1n	tenkovrstvý
GMI	Permeabilita	H	$0 - 10^4$	$10^{-9} - 10^{-2}$		
MO	Kerr/Faradayův jev	M	$0 - 10^5$	$10^{-9} - 10^{-2}$	1p	objemný
SQUID lt	Kvantum toku	$\Phi$	$0 - 10^9$	$10^{-15} - 10^{-2}$	1f	podchlazený
SQUID ht	Kvantum toku	$\Phi$	$0 - 10^4$	$10^{-15} - 10^{-2}$	30f	podchlazený
NMR	Rezonance	B	$0 - 10^3$	$10^{-10} - 10$	1n	bez driftů

Srážkovost elektronů s fonony se zvyšuje také s hustotou obou částic. Hustota materiálových fononů je konstantní. Na hustotu elektronů působí vnější magnetické pole vyjádřené magnetickou intenzitou  $\mathbf{H}$ . S narůstající  $\mathbf{H}$  se nabitě částice kupí a vytvářejí v materiálu místa s vysokou srážkovostí a zvyšují tak  $\mathbf{R}$ .

Vedle amplitudy  $\mathbf{H}$  má na  $\mathbf{R}$  materiálu vliv také její úhel ke směru proudu elektronů. Směrově závislé chování elektronu plyne z Pauliho vylučovacího principu, podle něhož nemohou dva elektrony se spinem stejného směru zaujímat stejnou polohu. Tak směr spinů ovlivňuje nahuštění elektronového oblaku kolem atomového jádra a dále je problém zjednodušen na teorii o srážkovosti řečenou v předchozím odstavci. Závislost  $\mathbf{R}$  materiálu na úhlu  $\mathbf{H}$  nazýváme anizotropní magnetorezistivita (AMR).

### 1.3 AMR senzor

Citlivá část senzoru vyrábí jako tenká vrstva permaloye. Anizotropie, tedy směrovost MR efektu je umocněna seřazením magnetických domén – silnou magnetizací permaloyové vrstvy.  $\mathbf{R}$  citlivé vrstvy dosahuje maxima, jsou-li k sobě vnitřní proud a vnější  $\mathbf{H}$  rovnoběžné. Dalšímu umocnění AMR přispívají jevy povrchového rozptylu<sup>2</sup>, které začnou být znatelné

<sup>2</sup> „surface scattering“

při srovnatelném počtu atomů na povrchu vrstvy s těmi objemovými. Tenkovrstvost je pro AMR stěžejní [3].

Senzor vyrobený předchozím popisem je citlivý v jednom směru  $\mathbf{H}$ . Pro prostorové rozšíření se snímače ztrojí a pootočí do kolmých směrů. Měření  $\mathbf{H}$  obou polarit je možné nanesením magnetické vrstvy, která pootáčí orientaci magnetických domén v permaloji o  $45^\circ$  k protékajícímu proudu. Druhou metodou je zdvojení a citlivé části (pro každý prostorový směr) a pootočení o  $180^\circ$  (tzv. dual strip). Měřitelný rozsah se v tomto případě rozšiřuje na dvounásobek [4, 5].

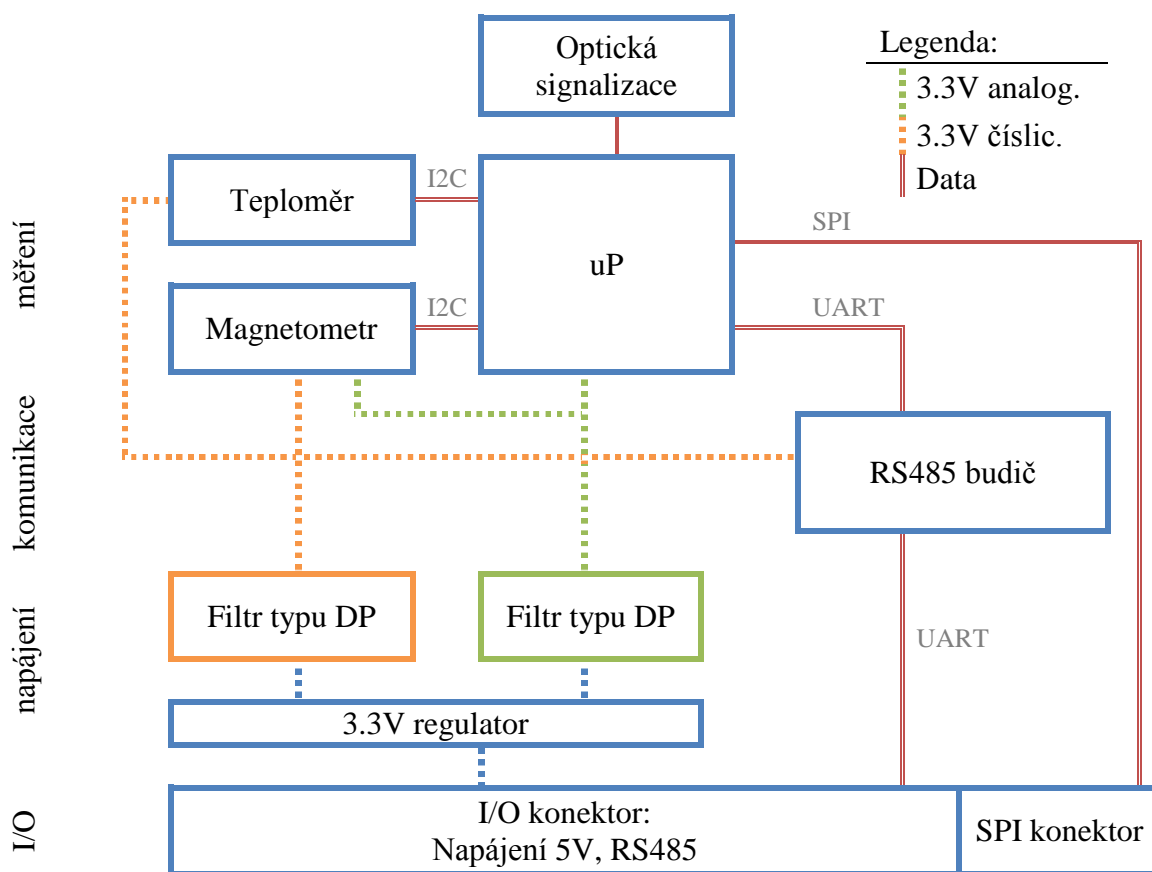
Vnější magnetická intenzita se měří nepřímo - sledováním  $\mathbf{R}$  sensorových proužků. Každý je zapojený do Wheatstoneova můstku a výstup opatřený AČ převodníkem. Informace o vnější  $\mathbf{H}$  tak pokračuje ke zpracování do dalších částí čipu. Měření trpí chybami předurčenými podstatou AMR jevu a dále chybami, které se liší dle provedení vnitřního uspořádání čipu [6].

## KAPITOLA 2: MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ

Zařízení navrhované v této DP vychází již z předtím realizované DPS určené pro testy podobného magnetometru [1]. Jeho uspořádání a části jsou inspirovány původním prototypem a dále doplněné o prvky usnadňující diagnostiku, kompenzaci teplotní závislosti magnetometru a některé další. Celé současné zařízení bude popsáno v této kapitole.

### 2.1 Blokové schéma

Jednotlivé součásti nebo jejich bloky jsou uskupeny dle následujícího schématu na obr.2. Zde je možné vyčíst vedení datových a napájecích cest a vztahy mezi sekcemi budoucí DPS. Nejdůležitější části budou zmíněny dále, popřípadě v kapitole 3.



Obr.2.: Blokové schéma zařízení.

### 2.2 Hlavní součásti

#### 2.2.1 Vektorový senzor magnetického pole

Senzor magnetického pole byl vybrán HMC5883L od firmy Honeywell. Jeho pozitivní vlastností je vysoké rozlišení (relativně k integrovatelnosti). V současnosti (doba

konstrukce zařízení) jde o nejpřesnější integrovaný 3D senzor principu AMR. Komunikace s čipem probíhá po sběrnici I2C, jeho funkce zahrnují automatické odečítání offsetu z měření (flipping), zjišťování velikosti offsetu (self-test) apod. Podrobnější specifikace čipu je uvedena v příloze 2.1 nebo v [HMC5883L], zmíněné ofsetové procedury v kapitole 4.2.2.

Senzor poskytuje informace v jednotkách LSB, které je potřeba přepočítat na  $\mathbf{B}$  v jednotkách Tesla dle katalogového listu součástky. Pro plnou kontrolu nad zaokrouhlováním a práci s daty jsou přepočty pro uvedená měření provedeny při pozdějším zpracování signálu v Matlabu, zařízení přesto disponuje procedurami, které převody mohou realizovat již v CPU na DPS. Informace o vektoru  $\mathbf{B}$  lze vyjádřit souřadnicemi ve třech osách (přepočtem obdobným pro všechny tři osy):

$$B_x[nT] = \text{měření}_x * \text{rozlišení dle nastaveného zesílení} \left[ \frac{mG}{LSB} \right] * 100 \quad (1)$$

Pro potřebu navigace se užívá velikost vektoru  $\mathbf{B}$  značená  $|B|$ , tedy vyjádření v polárních souřadnicích. Počítá se podle následujícího vztahu.

$$|B| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}; \quad \angle XY = \tan^{-1} \frac{B_y}{B_x}; \quad \angle YZ = \tan^{-1} \frac{B_z}{B_y} \quad (2)$$

Geomagnetické pole se vyhodnocuje z horizontální složky vektoru  $\mathbf{B}$ , tzn. z  $\mathbf{B}_x$  a  $\mathbf{B}_y$ , jenž je vstupem do algoritmu K-indexu, který je zmíněn v pozdější kapitole 5.2.

### 2.2.2 Teplotní senzor

Teplotní senzor TMP108 je vybrán pro své vlastnosti nízké spotřeby a komunikaci po sběrnici I2C, což sdílí s magnetometrem. Jako doplňková vlastnost je pouzdro 6BGA, jenž nabízí zajímavou zkušenost z ručního pájení (kombinace mikropájkz a horkého vzduchu). Měření teploty je důležité pro kompenzaci teplotní závislosti magnetometru. Teploměr je proto umístěn v bezprostřední blízkosti magnetometru. [TMP108]

### 2.2.3 Mikrokontrolér jako komunikační podpora

Pro odebrání měřených vzorků ze senzorů a pro komunikaci DPS s vnějším zařízením je zvolen mikrokontrolér ATmega32A. Je dostatečný svými možnostmi a vyniká ve své řadě nízkou spotřebou. Mikrokontrolér byl nakonfigurován po SPI sběrnici za použití pomocných SPI-USB převodníků. Program byl napsán v Atmelstudiu 7 v jazyce C. Pro mělký stack-zásobník mikrokontroléru je důležité dbát na užívání funkcí, které nezabírají příliš paměti. Při neopatrnosti v tomto směru se paměťový prostor heap smísí se stackem a vzniknou chyby

ve funkci zařízení. Dále je nutné přihlížet k náročnosti prováděných výpočtů a užívání komunikačních knihoven ve věci rychlého odbavení měřeného vzorku před koncem vzorkovací periody. [ATmega32A].

## 2.3 Užití komunikační protokoly

### 2.3.1 Interní komunikace

Pro komunikaci je v rámci zařízení použito několik druhů protokolů dle potřeb daných součástí. Prvotní komunikace s DPS za účelem konfigurace CPU užívá SPI sběrnici. Uživatel k jejímu nastavení nemá přístup, po konfiguraci se nevyužívá.

Senzory jsou prodojené s CPU pomocí protokolu I<sup>2</sup>C. Kompromis mezi vysokou frekvencí měření a nízkou spotřebou určuje zvolenou rychlost 400kbit/s. CPU nabízí možnost vlastních vnitřních pull-up rezistorů, přesto je DPS vybavena možností připojit vnější. Kvůli složitému pájení senzorů (pouzdra QFN a BGA) byla I2C komunikace nejprve otestována pomocí provizorně připojené EEPROM. Ta ověřila činnost sběrnice a byla odpojena. Pak I2C sloužila k diagnostice pájení senzorů.

S vnějším světem (např. osobní PC) komunikuje zařízení sériově v 8N1 rámcích, rychlostí 115200baud rate. DPS je opatřena plně duplexním budičem RS485 [SN65HVD1782], který umožňuje komunikace na vyšší vzdálenosti a snižuje nebezpečí zarušení. Implementované komunikační protokoly byly převzaty z [19].

### 2.3.2 Externí komunikace

Zadání této DP počítá s umístěním zařízení v rámci budovy ZČU na Borských polích v Plzni. Proto požaduje užití komunikačního protokolu, který zaručí odolnost vůči rušení pro přenos dat po metalickém vedení o délce desítek metrů. Pro velmi nízký amplitudový rozsah geomagnetického pole však není reálné měřit jej v městském prostředí, čímž zaniká předpoklad podmiňující bod zadání požadující kontrolní nastavbu datových bloků posílaných po metalickém vedení.

Pro uskutečnění dlouhodobého měření byla navázána spolupráce s laboratoří specializovanou na magnetická měření – geomagnetická observatoř Budkov (více podrobností o observatoři v oddílu 5.3.1). Umístění měřících přístrojů je zde v řádech desítek metrů od zpracovávací centrály a je zde proto téma rušení komunikace již vyřešené a tato DP jej proto následovala. Dálkový přenos v observatoři je realizovaný optickými kabely, které jsou vůči vnějšímu rušení odolné. Napojení na jednosměrnou optickou síť je realizováno převodníkem

ELO242 [ELO242] umístěným bezprostředně u měřicího zařízení. Jeho vstupem je RS232 a výstupem optická linka. Pro připojení zařízení na elektricko-optický převodník byl využit erární improvizovaný převodník RS485-RS232 v součinnosti s improvizovaným napájecím zdrojem. Na druhém konci optické linky byl využit obdobný převodník pro převod optického signálu zpět na elektrický, opět v bezprostřední blízkosti cílového zařízení. Elektrický signál za cílovým převodníkem byl zaveden sběrnici RS232 do osobního počítače. Pro kódování dat byl využit formát Base64, který je binárně bezpečný. Převádí 3 oktety binárních znaků původních dat na 4 sextety tisknutelných znaků (Base64 definuje 64 možných). Zmíněné kódování bylo implementováno do programu mikrokontroléru měřicího zařízení.

## 2.4 Diagnostické doplňky

Zařízení je vybavené optickou signalizací provedenou 5ti LED diodami. Signalizováno je napájecí napětí, činnost sériového portu (vysílání i příjem), chyba v I2C komunikaci a stavový signál od teploměru.

Po zapojení zařízení na napájení se automaticky spouští diagnostická procedura testující LED signalizaci, komunikaci s obouma senzory a nakonec kontroluje, zda offset magnetometru je v mezích povolených výrobcem. Průběh a výsledky diagnostické procedury je vypisován na sériový port a signalizován LED diodami na DPS.

Možné chyby v činnosti jsou zapisovány do EEPROM mikrokontroléru, kde je uschována informace o celkovém počtu chyb a o typu poslední chyby.

## 2.5 Spotřeba zařízení

Zařízení pracuje ve stálých laboratorních podmínkách, kde je napojeno na napět'ový zdroj. V takovém případě nejsou nízkospotřebová opatření nezbytná. Nicméně součásti jsou vybírány tak, že v případě potřeby je možné opatření takového rázu zavést. Po doplnění o baterii, solární panel a dodatečné paměťové úložiště by tak zařízení mohlo pracovat jako samostojný sběratel dat.

Pro účely přesného měření magnetického pole musí však některá nízkospotřebová opatření být záměrně zanedbána, aby nevnášela do měření šum. V případě AMR senzoru se jedná především o teplotní stálost, která nesmí být narušována jakýmikoliv podružnými ději na DPS. Vypínání periférií a uspávání čipů je zde nevhodné pro způsobování periodického zahřívání a chladnutí částí. AMR senzor na teplotní změny reaguje výrazně a čistota měření je tak narušena. Odebíraný příkon musí být tedy co nejvíce vyrovnaný. Teplotna zařízení se tak může snáze ustálit a méně tak ovlivňovat měření. Druhý důvod pro konstantní odběr je



zamezení indukce magnetických polí v případech rychlých proudových změn. Takové děje zarušují měřenou veličinu. To se týká spíše budoucích senzorů schopných vyšších vzorkovacích frekvencí, v jejichž měření by se tyto indukované proudy projevíly.

Návrh zařízení se myšlenky nízkého odběru od počátku držel, nakonec však nebyla opatření upotřebena z funkčních důvodů zmiňovaných výše. Byl zohledněn výběr součástí, návrh DPS a návrh procedur, které umožňují ovládání standby módů. Testování vlivů jednotlivých opatření na měřicí schopnosti zařízení a tedy vyšetření, zda je možná modifikace laboratorního měřáku na samostojící, je otázkou budoucích prací. Provedená opatření jsou popsána detailně v [21], návrh DPS vycházel z [7].

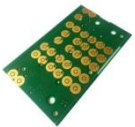



## KAPITOLA 3: ZAŘÍZENÍ Z HLEDISKA ELEKTROMAGNETICKÉ KOMPATIBILITY

### 3.1 Přehled rušení

Diskutované zařízení je zamýšleno jako laboratorní prototyp vyšetřující možnosti v dané oblasti měření, není určené pro komerční, průmyslové, nebo jiný typ veřejného využití. Proto se na něj administrativně nevztahují normy EMK. Normy EMK však vychází z fyzikálních principů, kterým zařízení podléhá. Návrh se z toho důvodu těmito pravidly řídí. Vyzařování zahrnuje předcházející kapitola, dále bude soustředěna pozornost pouze na odolnost.

Problematiku přehledově shrnuje tab.2, která uvádí různé kategorizace zařízení i rušení. Zařízení je hodnoceno jako systém kompaktní (rozsah jedné místnosti – především vlastní rušení), lokální (rozsah jedné budovy – především rušení vzdálené komunikace s DPS) a v poslední řadě jako systém dálkový (kategorizace přesahující fyzické hranice zařízení; uvádí široké prostředí jako rušitele měřeného geomagnetického pole). Rušení je možné dělit z hlediska původu na vnitřní nebo vnější a z hlediska způsobu šíření na rušení polem nebo vedením.

Tab.2: Přehled možných rušení působících na funkci zařízení.

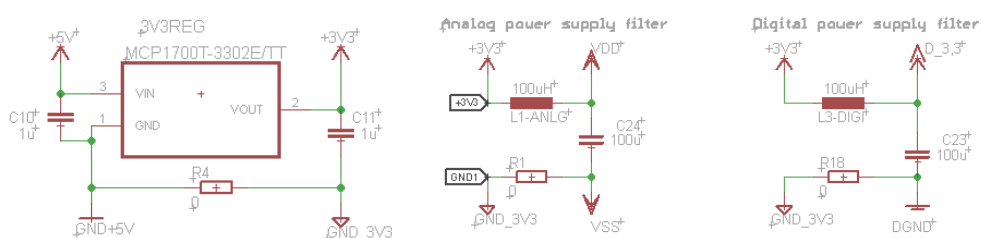
Typ systému	Typ rušení		Šíření rušení			
	Typ rušení	Šíření rušení				
			rušený prvek	rušení	zdroj rušení	opatření
kompaktní	vnitřní	polem	magnetometr	magnetické emise	I2C komunikace UART komunikace	magnetometr operuje v jiné frekvenční doméně
				magnetické emise	vyrovnávací proudy v zemní ploše	oddělení zemních ploch
		vedení	Všechny čipy, především AD převodníky	kolísání Ucc	špičkové odběry číslicových obvodů	oddělení číslicového a analogového napájení
	kolísání Ucc			nekvalitní zdroj Ucc	stabilizátor	
	vf složka v Ucc			nekvalitní zdroj Ucc	filtr typu DP	
	vnější	polem		indukce rušení v napájecí smyčce	elmag. emise městského prostředí	minimalizace plochy smyčky
magnetometr			lokální DC složka magnetického pole	feromagnetika v blízkém okolí	umístění	
			lokální fluktuační magnetického pole	elmag. emise městského prostředí	umístění mimo město	
dálkový						
lokální			Dálková komunikace s DPS	indukce falešných pulsů nebo degradace pravých	elmag. emise městského prostředí	RS-485, protokol

## 3.2 Opatření proti rušení

### 3.2.1 Kolísání napájení

Zařízení je napájené přes USB konektor, který poskytuje standardně 5V. Elektronické prvky na DPS vyžadují napájení 3,3V, pročež je za vstupním napájecím konektorem zařazen stabilizátor redukující úroveň vstupní na úroveň požadovanou. Kolísání vstupního napětí není pro zařízení znatelné, pokud se není vyšší než  $\pm 1,5V$  [MCP1700T-33].

Činnost vnitřních číslicových obvodů může vytvářet kolísání napětí, které se šíří do dalších částí DPS. Napájení napájení je proto těsně za stabilizátorem rozvedené hvězdicovitě, číslicovou a analogovou část dělí filtry typu dolní propust. Při užití součástek o hodnotách viz obr.3 je mezní frekvence filtrů cca 1,6kHz. Zemní plochy obou částí jsou také oddělené, zemnění je tedy realizováno jednobodově. V číslicové části jsou od sebe obvody navzájem chráněny blokovacími kondenzátory o hodnotě 100nF.



Obr.3.: Stabilizátor vstupního napájení, filtry oddělující napájení číslicových a analogových obvodů.

Napětí napájení i jiné může kolísat rušené vnějším magn. polem. Při vedení jakýchkoliv spojů na DPS je nutno minimalizovat plochu proudové smyčky, kterou vodiče tvoří, tedy vést je co nejbližše sobě. Omezí se tak induktivní vazba vodičů s okolím. Pro stejný účel je také vhodné minimalizovat délku vodičů. Toto pravidlo je zde částečně porušeno ku zvýšení vzdálenosti magnetického senzoru od zbytku DPS.

### 3.2.2 Rušení dálkové komunikace

Pro zamezení rušení komunikace mezi DPS a PC využívá zařízení přenos dat po průmyslové sběrnici RS-485. Vodiče jsou kroucené pro omezení induktivních vazeb s okolím a stíněné. Hodnota je přijímačem vyhodnocována z napěťové difference mezi vodiči, což rovněž zvyšuje odolnost vůči rušení. Elektrický přenos mezi měřicím zařízením a nadřazeným systémem pro zpracování dat je však z naprosté většiny realizován opticky, což vnější rušení vylučuje.

### 3.3.3 Rušení měřeného magnetického pole

Účel zařízení – měření geomagnetického pole – pro svou úspěšnost z podstaty vylučuje přítomnost jakýchkoliv jiných zdrojů magnetického pole (vyzařování feromagnetik) nebo jeho zdrojů zkreslení (kupení siločar v nepermanentních feromagnetických). Řešením je umístění do prostředí speciálně určeného k magnetickým měřením, které je prosté nevhodných materiálů.

Měřená veličina může být rovněž rušená zevnitř zařízení. Při změnách napětí na různých částech DPS vznikají vyrovnávací proudy a kolem rušící magnetická pole. Indukovaná pole by měla dosahovat frekvencí komunikace, tzn. mimo měřitelnost senzoru, přesto jsou na DPS odděleny zemní plochy vylité kolem podpůrné elektroniky od zemní plochy v sensorové části. DPS je navíc pravidelně prokovovány, aby se dráha a s ní působení potencionálních rušivých proudů zkrátila. [8]

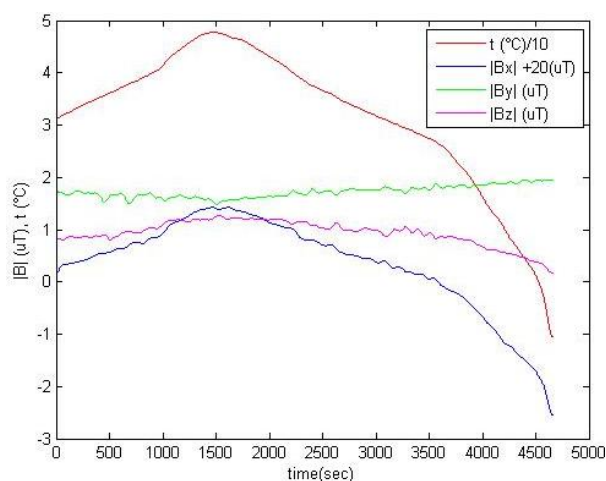
## KAPITOLA 4: ANALÝZA CHYB MĚŘENÍ

### 4.1 Teplotní chyby

#### 4.1.1 Teplotní nestálost magnetometru

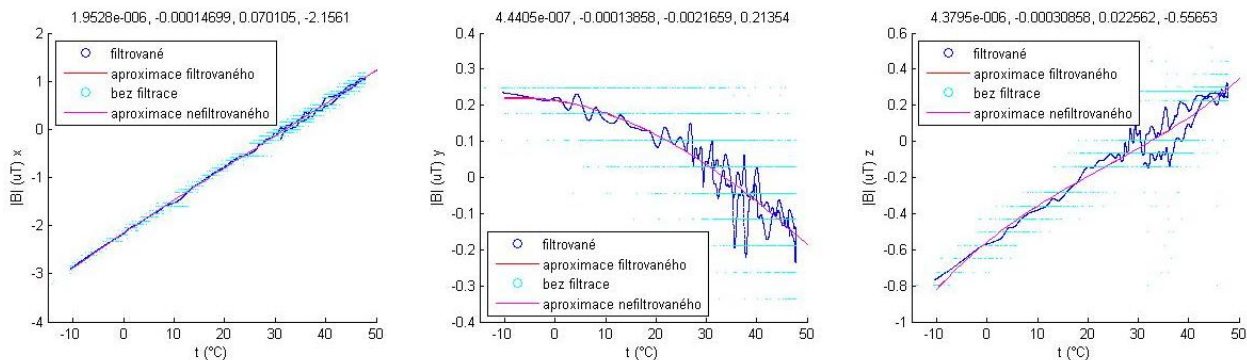
Teplotní závislost je nejvýznamnějším defektem měření  $\mathbf{B}$  pomocí AMR senzoru. Části čipu, které jsou citlivé na změny teploty, je několik. Odpor částí Wheatstonova můstku je teplotně kladně závislý, což může být umocněno snahou o vyšší rozlišení můstku zvyšováním jeho napájecího napětí. Naopak negativní teplotní závislost v můstku vykazuje permaloy. S teplotou dále může kolísat napájení citlivé části senzoru a také její magnetické předpětí. Kompensace se provádí fyzicky přímo u zdroje chyby výrobními opatřeními (např. dual strip), nebo výpočetně v čipu (metoda flipping zmíněná později) nebo ve fázi zpracování dat (uP nebo PC). Z pohledu uživatele není možné rozlišit různé původy teplotní závislosti a kompenzovat jejich příčiny separátně. Je tedy třeba proměřit teplotní závislost celkovou a kompenzovat pak teplotní závislost měření podle jejího vyšetřené průběhu.

Zařízení bylo umístěno do atmosférické komory, kde odečítalo hodnoty  $\mathbf{B}$  při teplotním cyklu mezi  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $+50^{\circ}\text{C}$ . Naměřené průběhy bylo nutné filtrovat dolnoproputním filtrem navrženým experimentálně v Matlabu pro odstranění šumu a periodických artefaktů způsobených pravděpodobně vnitřní činností atmosférické komory. Časový průběh  $\mathbf{B}$  v atmosférické komoře po filtraci je na obr.4.



Obr.4.: Teplota a jednotlivé složky  $\mathbf{B}$  při měření v klimatické komoře.

Z naměřených hodnot teploty a  $\mathbf{B}$  se zkonstruuje závislost  $\mathbf{B}=\mathbf{f}(t)$ , jenž po aproximaci funkcí udá vztah pro přepočtení měřených hodnot na hodnoty oproštěné od teplotní závislosti. Závislosti  $\mathbf{B}=\mathbf{f}(t)$  jsou uvedené na obr.5.



Obr.5.: Teplotní drift B=f(t) pro osu x, y a z (zleva).

Dle aproximací třetího řádu lze teplotní závislost vyjádřit pro každou osu zvlášť dle:

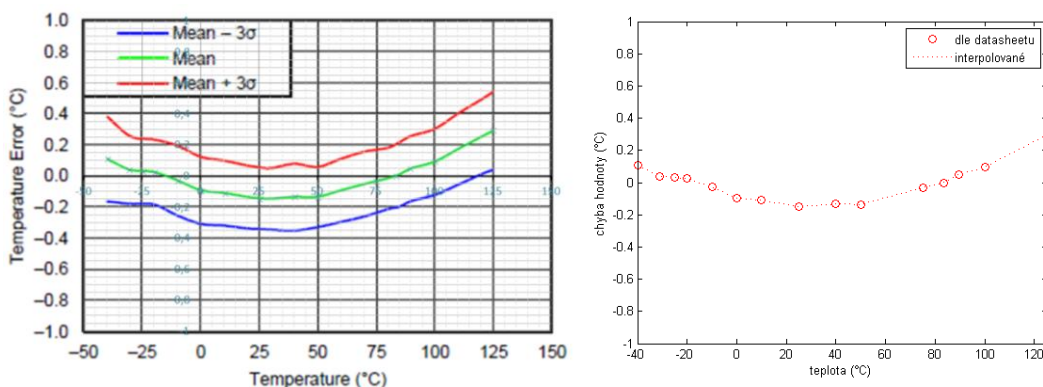
$$B = a_3t^3 + a_2t^2 + a_1t^1 + a_0t \quad [\mu T] \tag{4}$$

Tab.3: Koeficienty závislosti B=f(t).

	$a_3$	$a_2$	$a_1$	$a_0$
<b>x</b>	1,9528 e-6	-1,4699 e-4	7,0105 e-2	-2,1561
<b>y</b>	4,4405 e-7	-1,3858 e-4	-2,1659 e-3	0,21354
<b>z</b>	4,3795 e-6	-3,0858 e-4	2,2562 e-2	-0,55653

### 4.1.2 Teplotní nestálost teploměru

Měření teplotního senzoru je závislé na teplotě okolí (viz výtažek z katalogového listu obr.6, vlevo). Pro účely jemného měření geomagnetického pole a kompenzaci teplotní závislosti magnetometru je vhodné teplotní závislost teploměru zohlednit a kompenzovat. Z katalogového listu teploměru byl pečlivě odečten graf uvedené závislosti pomocí několika bodů a průběh odečtené závislosti byl dokreslen interpolací v Matlabu (obr.6, vpravo).



Obr.6.: Odečtení hodnot z katalogového listu a interpolace odečtených hodnot.

Odečtená teplotní kompenzace spolu s interpolací a navrženým kódem na kompenzaci závislosti byly otestovány a byla vypočítána chyba, kterou algoritmus nechává

zaokrouhlováním. Nepřesnosti se pohybují v jednotkách tisícin °C, což je zanedbatelná hodnota vzhledem k původní chybě. Teplotní závislost teplotního měření uvedená v katalogovém listu.

#### 4.1.3 Tolerance zesílení magnetometru

Tolerance zesílení je v katalogovém listu výrobce uváděna 5%. Při požadavku nejvyššího rozlišení je tedy zesílení na maximum, tedy  $1370 \pm 68,5$  LSB/Gauss. Rozlišení opačné zesílení, tedy  $73 \pm 3,65$  nT. V případě měřeného 1uT je možná odchylka 50nT.

#### 4.1.4 Souhrn teplotních chyb

Na následující tabulce je uveden přehled teplotních chyb měření. Vedle popsaných je zde navíc mezi teplotní chyby zařazen vliv prostředí. Konkrétně jde o chybu způsobenou kolísáním teploty v místnosti, kde bude zařízení pro dlouhodobé testovací měření umístěno. Je zde řízena teplota na 15°C s přesností 0,1°C. Díky kompenzacím teplotních závislostí by tato chyba neměla hrát roli. Stále a pravidelné kolísání v úzkém teplotním rozmezí lze rovněž z výsledků odfiltrovat užitím filtru typu DP.

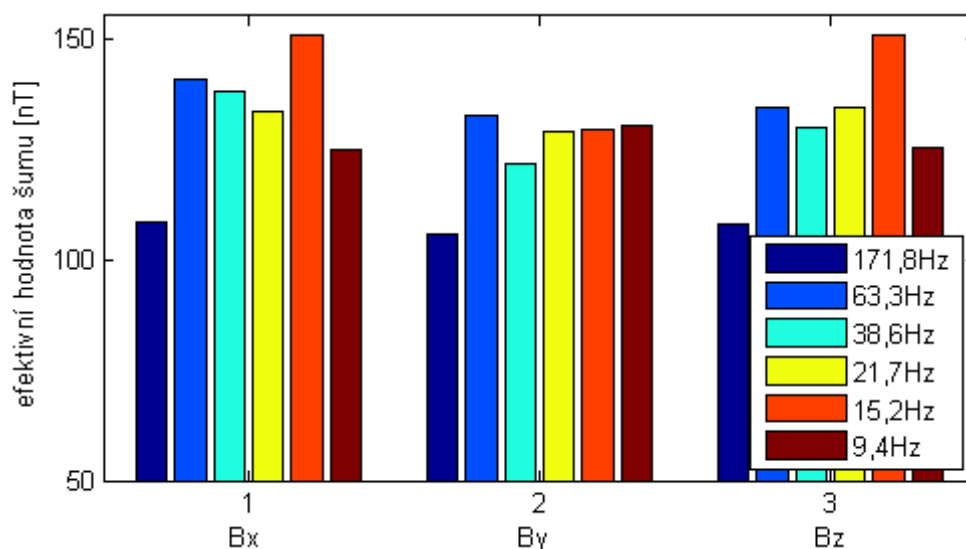
Tab.4: Přehled teplotních chyb měřícího zařízení.

	Chyba			Chyba měření magnetometru	Kompenzace
	Původ	Hodnota	Charakter		
Magneto metr	Teplotní nestálost AMR senzoru (lin. aprox.)	x: 70,105 nT/°C y: -2,170 nT/°C z: 22,562 nT/°C	nelineární	x: 70,105 nT/°C y: -2,170 nT/°C z: 22,562 nT/°C	Kompenzace dle naměřené $B=f(t)$
Teploměr	Odečítání teplotní nestálosti z grafu	-	nelineární	-	zanedbatelná
	Uvedená nepřesnost nestálosti	$\pm 0,3^\circ\text{C}$	lineární	x: $\pm 21,032$ nT y: $\pm 0,651$ nT z: 6,769nT	Tento offset odstraněn při odečítání SS složky od signálu
	Kompenzace teplotní nestálosti	+0,00085°C -0,00064°C	nelineární	10's pT (zanedbatelné)	zanedbatelná
	Nestejná poloha teploměru a magnetometru	-	nelineární	-	Umístění v prostředí s pozvolnými změnami teploty
Observatoř	Kolísání teploty	0,1°C	nelineární	x: 7,011 nT y: -0,217 nT z: 2,256 nT	Kompenzace dle naměřené $B=f(t)$ nebo DP filtrace signálu

## 4.2 Neteplotní chyby

### 4.2.1 Šum magnetometru

Nedokonalosti výroby magnetického senzoru a změny okolního prostředí způsobují šum v měření. V samotné citlivé části vzniká Barkhausenův šum způsobený rozdílným umístěním a velikostí magnetických domén v materiálu. Měření dále ovlivňuje šum z pomocné elektroniky v čipu (nelineární zesílení zesilovačů, tepelný šum v odporech, šum napájecího napětí atd). Jednotlivé příčiny nelze měřit zvláště pro zavedení kompenzace, proto lze šum pouze souhrně vyhodnotit nehlédě na původ a obsah složek. Mezi uživateli diskutovaného senzoru se vedou debaty o přímoúměrné závislosti šumu na zvolené vzorkovací frekvenci měření. Tato závislost je neprokazatelná viz autorem provedené měření na obr.7. Graf ukazuje efektivní hodnotu šumu pro každou osu při různých vzorkovacích frekvencích.



Obr.7.: Efektivní hodnota šumu jako funkce vzorkovací frekvence magnetometru pro osu x, y a z.

Průměrný šum pro osu x je 132,63nT, pro osu y je 124,75nT a 130,41nT pro osu z. Tyto hodnoty jsou příznivější než hodnota 200nT, kterou uvádí katalogový list součástky. Šum byl naměřen nejnižší při nejvyšší frekvenci vzorkování.

Pro měření geomagnetické aktivity je však taková hladina šumu nepřijatelná – měřené události je třeba detekovat s šumovou hladinou max. desítky nT. Díky frekvenčnímu spektru měřených událostí (frekvence okolo 1/24h) lze úspěšně většina šumu eliminovat dolnoproustní filtrací signálu.



#### 4.2.2 Nestálost nuly (ofset)

Diskutovaný magnetometr vykazuje nestálosti nuly a to dva druhy: dlouhodobá nestálost působená stárnutím čipu a dále pak krátkodobá nestálost způsobená remanentním magnetismem v po vystavení senzoru vyšším magnetickým polím.

Pro kontrolu dlouhodobého ofsetu je magnetometr vybaven procedurou *self-test*, která detekuje znehodnocení čidla. Čip stimuluje vlastní senzor jmenovitým magnetickým polem o hodnotě okolo 110uT, provede dvě měření a uživatel tak dostává hodnotu ideálně totožnou s budícím polem v případě nulového ofsetu. Ofset v reálné situaci nulový není a výsledek self-testu je třeba porovnat s limitami, které výrobce udává, a zkontrolovat, zda je v rámci povoleného intervalu. V opačném případě již není zaručeno nezkreslené měření. Rozdíl od 110uT je pak dlouhodobý ofset čidla. Ten však nelze přesně zjistit z důvodu nepřesnosti jmenovitého buzení, kterou výrobce zmiňuje, ale nespecifikuje [HMC5883L: str19].

K odečtení ofsetu způsobeného magnetickou minulostí slouží zabudovaná procedura *flipping*<sup>3</sup> a rovněž, dle výrobce, k odstranění teplotního driftu. Druhý účel ale popírá měření teplotní závislosti provedené autorem (4.1.1). Čip korekci provádí pomocí buzení ve dvou polaritách a následným výpočtem. Provádí se pro každé měření a zcela automaticky, bez zásahu uživatele. Podpůrná elektronika je zabudovaná v čipu a vyžaduje pouze vnější doplnění kondenzátoru pro její napájení. Užíváním „flipování“ se odstraní z měření ofset remanentního magnetismu a odečte ofset způsobený stárnutím. [HMC5883L: str9].

Nestálost nuly je vadou čipu, která zavádí chybu především do dlouhodobých a absolutních měření. Za blíže neurčitý čas ofset narůstá do velikosti, kdy degraduje měřitelný rozsah senzoru.

#### 4.2.3 Nepřesné uložení senzorů v čipu (nonortogonalita)

Třiosý AMR senzor není možné z technologických důvodů vyrobit na jednom kusu křemíku. Citlivé části se vyrábí zvlášť a poté se polohují a spolu s podpůrnými obvody se zalévají ku vytvoření tvaru čipové součástky. Nepřesné uložení zavádí chybu do měření, která lze přepočítat při znalosti odchylek od přesně ortogonálního uložení částí [9]. Tuto odchylku ale výrobce uvádí pouze obecně jako nepřesnost uložení až 2°. Dle goniometrického vztahu lze odvodit výpočet reálné hodnoty jako  $B_{reál.} = B_{měřené} * \frac{1}{\cos 2^\circ}$ . Z toho lze odvodit maximální chyba způsobená neortogonalitou na 0,6nT/1uT měřeních.

---

<sup>3</sup> “set/reset strip driving“.

#### 4.2.5 Další zdroje nepřesností

Rozměrové a tedy i citlivostní rozdíly mezi AMR vrstvami v jednom čipu, magneticky tvrdé kovy v čipu a okolí zkreslující měřené magnetické pole. V těchto případech nelze rozsah chyby zjistit a tedy ani vykompenzovat. Je třeba jim předcházet preventivními opatřeními při výrobě čipu a jeho aplikaci.

#### 4.2.6 Souhrn neteplotních chyb

Tab.5: Souhrn neteplotních chyb.

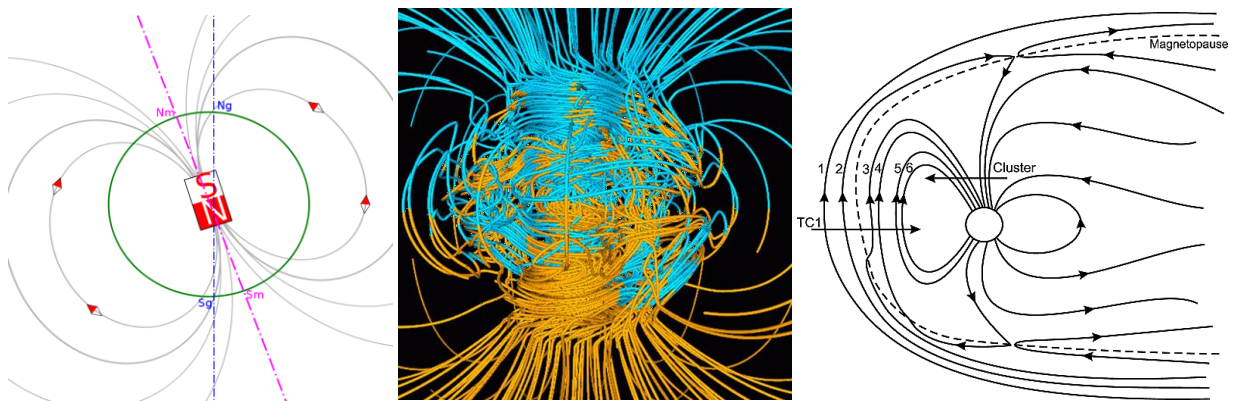
	Chyba			Dopad na chybu magnetometru	
	Původ	Hodnota	Charakter	Chyba měření (rozlišení 73nT/LSB)	Typ ohroženého měření
Magnetometr	Šum	pro x 132,63nT pro y 124,75nT pro z 130,41nT		pro x 132,63nT pro y 124,75nT pro z 130,41nT	Vše
	Ofset		Proměnlivý v čase		Absolutní
	Tolerance zesílení	5%		50nT/1uT	Vše
	Nonortogonalita	0,6nT/1uT		až 0,6nT/1uT	Vše

## KAPITOLA 5: MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE ZEMĚ

### 5.1 Magnetické pole Země

#### 5.1.1 Původ

Hlavním zdrojem zemského magnetismu je geosféra, ačkoliv magnetické procesy lze nalézt i v troposféře, mezosféře a ionosféře [10, 11]. Je produkován tzv. geodynamem, které je připodobňováno k magnetickému rotačnímu generátoru. Tekuté kovy v zemském jádře se pohybují vůči permanentně magnetickým horninám v horní vrstvě geosféry. Dle Faradayova indukčního zákona vznikají proudy v tekuté mase ve spodních vrstvách geosféry, které zpětně produkují magnetické pole. Toto druhotně indukované pole je dominantní složkou Zemského magnetismu – ve většině objemu je totiž teplota přesahuje Currieho hranici a permanentní magnetismus tak nepřipadá v úvahu.

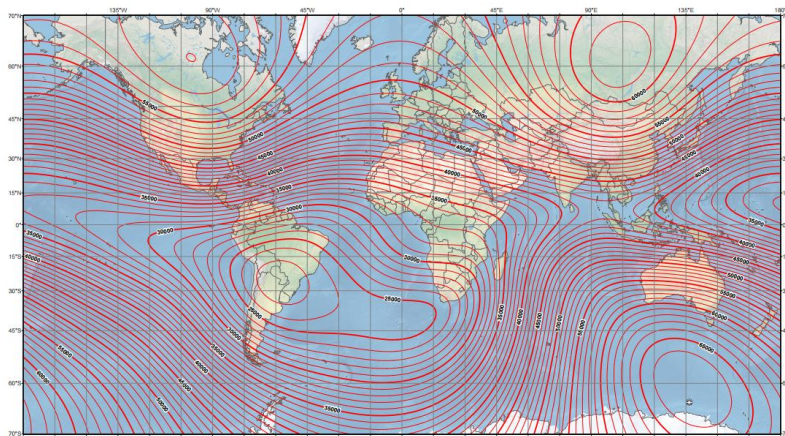


Obr.8.: Magnetické pole Země (zleva): ideální a izolované [12], model geodynamama[13], ideální a ovlivněné solárním větrem [14].

Model magnetického dynama je složitý – snoubí vztlakové a Coriolisovy síly, teplotní proudění a dynamiku kapalin s elektromagnetismem. Proto se často jeho vlastnosti popisují ve zkratce jako důsledek tyčového magnetu umístěného pod povrchem planety (viz obr.8). Osa geomagnetického pole je natočena cca 11 stupňů od osy otáčení (proměnlivá hodnota), přičemž jižní magnetický pól leží nedaleko geografického Severního pólu. Magnituda vektoru  $\mathbf{B}$  se pohybuje mezi 25 a 65 uT (dle geografické polohy). Model bližší realitě je možné pozorovat na obr.8 veprostřed.

Magnetické pole produkované zemským jádrem se měří na mnoha observatořích po celé planetě. Dále se pracuje buď pouze s amplitudou  $\mathbf{B}$  nebo s její jednotlivými složkami. V prvním případě informace o amplitudě  $\mathbf{B}$  z jednotlivých míst vytváří organizace NOAA (National

Oceanic and Atmospheric Administration) a statický „World Magnetic Model“ (obr.9). Slouží například k námořní nebo letecké navigaci.



Obr.9.: Rozložení magnitudy  $B$  na zemském povrchu. [15]

V případě práce s jednotlivými složkami se sleduje především horizontální složka vektoru  $B$  a její fluktuace (odchylky od průměrné hodnoty). Z důvodů, že konstruované zařízení trpí více nekompensovatelnými chybami zkreslující absolutní hodnotu  $B$ , bude se zbytek práce zabývat měřením fluktuací, kde jsou zmíněné chyby kompenzované odečtením stejnosměrné složky měření.

### 5.1.2 Fluktuace magnetického pole Země (MPZ)

Především odstavce popisují Zemské magnetické pole jako geomagnetické pole, tedy stabilní pole produkované Zemí. Skutečné magnetické pole je velmi proměnlivé, ovlivňované různými projevy vnějšího vesmíru i procesy v jiných zemských sférách. Následující část uvádí stručný přehled jednotlivých fluktuací dělených dle času trvání na krátkodobé a dlouhodobé.

Význam slova „dlouhodobé“ je relativní – např. dle [11] je 11-ti roční variace považována za krátkodobou. Z hlediska diskutovaného zařízení je logičtější stanovit hranici mezi dlouhodobostí a krátkodobostí na 1 rok. Dlouhodobé variace jsou pro tento projekt nedetekovatelné a jsou uvedeny pouze pro úplnost. Tab.6 uvádí jejich stručný přehled.

Tab.6: Přehled dlouhodobých variací zemského magnetického pole. Parametry způsobující nedetekovatelnost konstruovaným zařízením jsou označeny hvězdičkou.

Událost	Trvání	Variace MPZ [13]
Pokles energie geodynamika	Konstantní pokles	30nT/year*
Cyklus přepólování	Perioda 450 000 let*	přepólování
Cyklus slunečních skvrn	Perioda 11 let*	80nT

Krátkodobé variace jsou v časovém rámci této DP postihnutelné, ovšem ne vždy detekovatelné. Jejich skrytost pro navrhované zařízení způsobuje buď nízké rozlišení magnetického senzoru, nebo nízká frekvence odběru vzorků (samplerate). Přehled krátkodobých variací MPZ uvádí tab.7. Potenciálně detekovatelné jevy jsou vyznačeny tučně.

Tab.7: Přehled krátkodobých variací MPZ.

Událost	Trvání	Variace MPZ [13]
Sluneční rotace	27 denní perioda	
<b>Geomagnetická bouře</b>	2 - 4 dny	10's – 100's nT
Variace měsíčního původu	24hod a 50.5min perioda	
<b>„Solar quiet“ variace</b>	24hod perioda	80nT
Geomagnetická sub-bouře	1 - 3 dny	10's nT
SlunenčníRTG záblesk	Minuty-hodiny	
Pulzace ve vzdálené magnetosféře	0.3s - 30min, částečně periodické	<100nT
Blesky	<0.1s	

Jak je může být z přehledu vidět, variace MPZ pole jsou nízké relativně k přesnosti vyráběného zařízení. S ohledem na tento fakt, se bude měření soustředit na variaci nejvýraznější co do amplitudy, trvání i typického průběhu – geomagnetická bouře (porucha). Trvá v jednotkách dnů a vykazuje pokles  $B$  o stovky nT. Jejím původem je událost na Slunci (např. erupce), která způsobí zvětšení množství jader vodíku a hélia proudící směrem k Zemi. Takové uskupení ionizovaných částic vykazuje značnou vodivost, tedy i magnetismus. Solární vítr (proud plazmy) „odvane“ geomagnetické pole, jehož hodnota tak poklesne (obr.8). Solární bouře nebo jiná událost na Slunci způsobí geomagnetickou bouři. Typický průběh této variace MPZ lze pozorovat na obr.10 (složka  $B_x$ ). V počáteční fázi dochází k lehkému nárůstu  $B$ , v hlavní fázi dochází ke strmému poklesu  $B$  na její minimum v rámci bouře a v poslední obnovovací fázi se po dobu několik dnů vrací hodnota  $B$  na svou průměrnou hodnotu.

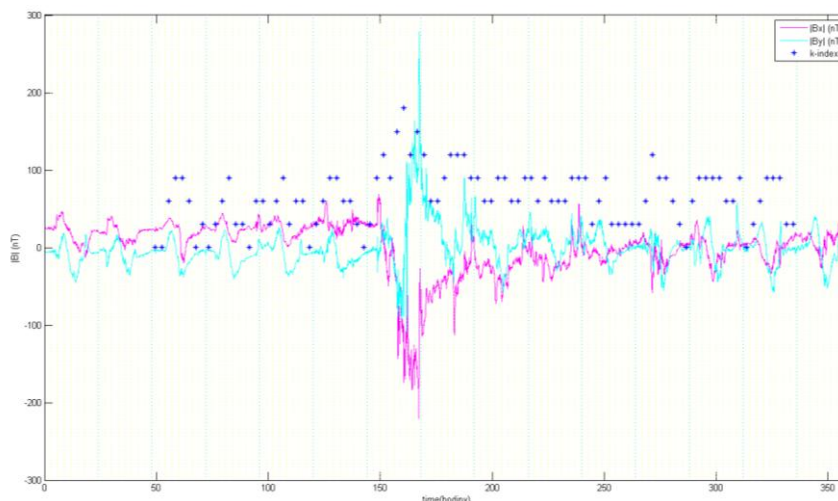
### 5.1.3 Klasifikace magnetického pole Země měrnými ukazateli

Geomagnetické pole je posuzováno dvěma způsoby dle užitku měření: dle magnitudy  $B$  pro navigační účely (změřená hodnota se porovná s hodnotou v mapě vydané v NOAA pro tento účel), nebo dle nějakého koeficientu vyjadřující variaci. Nejčastěji používaný je Dst-index<sup>4</sup>, který určuje globální hodnotu geomagnetického pole průměrováním hodnot měřených na observatořích nedaleko rovníku. Průměrování hodnot z více observatoří je možností také u koeficientů a-index a K-index – taková jejich varianta má navíc dolní

<sup>4</sup> “disturbance storm index“



index  $p$  (planetární). Oba zmíněné ukazatele analyzují horizontální složky  $\mathbf{B}$  a v závislosti na velikosti jejich variace přiřadí události index dle definované stupnice. Ta je v případě  $a$ -indexu lineární, pro  $K$ -index logaritmická. Tato práce se bude držet užití  $K$ -indexu, který k vyhodnocování geomagnetického pole užívá i observatoř Budkov.



Obr.10.: Změřená geomagnetická bouře, tedy detekovaná solární bouře. Složka  $B_x$ ,  $B_y$  a vypočítaný  $K$ -index. Konkrétně jde o bouři naměřenou v observatoři Budkov v druhé polovině března 2015. Data z webu INTERMAGNET [16].

## 5.2 $K$ -index jako měrný ukazatel intenzity geomagnetické bouře

$K$ -index [18], neboli „charakteristický digit“ (kvůli rozsahu 0-9) se počítá následujícím způsobem (obr.11). Algoritmus  $K$ -indexu hodnotí horizontální složky vektoru  $\mathbf{B}$ , jeho vstupem je tedy  $B_x$  a  $B_y$ . Vstupní signály jsou zpracovány odděleně, až nakonec jsou porovnány jejich  $K$ -indexy. Nejprve je signál rozdělen na tříhodinové úseky (bez překryvu a nezávisle na vzorkovací frekvenci). V každém úseku algoritmus detekuje maximum a minimum signálu a jejich srovnáním vyhodnotí variaci dané složky  $\mathbf{B}$  ve vybraném úseku. Hodnota variace  $\mathbf{B}$  je vyhledána na stupnici  $K$ -indexů. Zde každá hodnota  $K$  označuje určitý interval variací hodnot  $\mathbf{B}$ . Obě takto vyhodnocené složky  $\mathbf{B}$ , v této chvíli již  $K$ -indexy, jsou poté srovnány. Na výstupu algoritmu dostáváme jednu hodnotu  $K$ -indexu pro každý 3-hodinový interval měřeného signálu a to ten vyšší z obou porovnávaných.

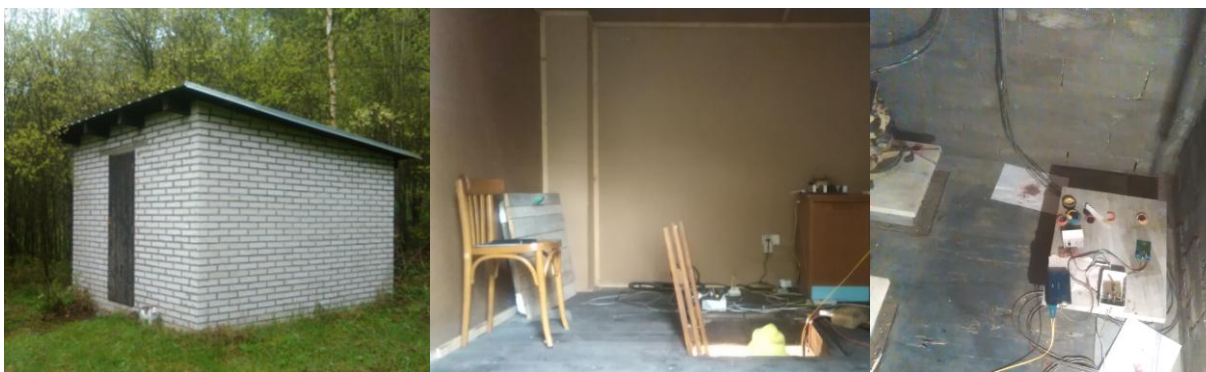


Obr.11.: Princip algoritmu pro výpočet  $K$ -indexu.

Algoritmus pro výpočet  $K$ -indexu obdržel autor z observatoře Budkov, kde bylo prováděno i zkušební měření. Kód v jazyku C byl přepsán do kódu v Matlabu a jeho činnost byla otestována na datech naměřených v minulosti observatoří Budkov obrx.10.

### 5.3 Dlouhodobé měření magnetického pole Země

Pro měření MPZ je nutné potlačit co možná nejvíce rušení prostředím – opustit městské prostředí. Dále pro otestování činnosti konstruovaného zařízení je vhodná blízká přítomnost referenčního měřicího zařízení pro porovnání funkce. Oba požadavky vylučují univerzitní prostředí a předurčují jako ideální místo geomagnetickou observatoř v Budkově na jihu Čech. Objekt provozuje geofyzikální ústav Akademie věd ČR, přesnost měření umožňuje Budkovu řadit se mezi celosvětovou komunitu 156 geomagnetických observatořů INTERMAGNET. Observatoř Budkov je malý komplex jednopokojových budov optimalizovaný pro geomagnetická měření (řízení teploty, nemagnetická konstrukce a vybavení budov, optická komunikace), který provozuje magnetometrická zařízení založená na různých principech.



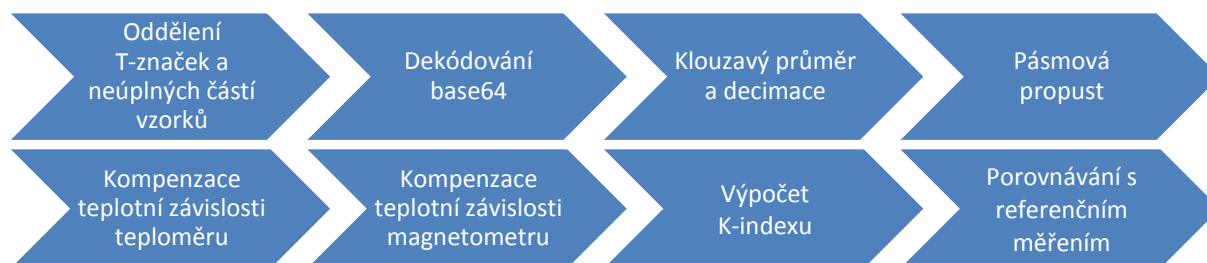
Obr.12.: Umístění měřicího zařízení v observatoři Budkov. Budova pro umístění měřicích přístrojů se nachází v mimoměstském prostředí (vlevo; je vidět rovněž Pacík, člen osazenstva geomagnetické observatoře Budkov). V přízemí se nachází pouze zdroje napájení (veprostřed; Ing. Vlk PhD. sestupující po žebříku do sklepa). Pod úroveň země je pouze měřicí technika (vpravo; lze vidět umístění na žulových podstavcích).

#### 5.3.1 Příprava měřicí aparatury

S pomocí Ing. Michala Vlka PhD. – jehož ochota nesporně umožnila nabýt této DP vyšší úroveň – bylo zařízení instalováno do jedné z budov určené pro měření (obr.12). Teplota ve zvolené místnosti je řízena na  $15^{\circ}\text{C}$  s přesností  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Magnetometry jsou umístěny na masivní žulové postavce zajišťující jejich prostorovou stabilitu. Zde bylo konstruované zařízení připojeno na napájecí blok a datovou linku, jež je přesněji popsána již v oddíle 2.3.2. Odbavování toku dat probíhalo na osobním počítači pod systémem Unix BSD. Odbavovací procedura přidává do toku dat časové značky pro kontrolu pravidelného průběhu a ukládá data každou hodinu do nového textového souboru.

### 5.3.2 Zpracování dat

Měření bylo provedeno při vzorkovací frekvenci okolo 110Hz, každý vzorek obsahuje tři hodnoty pro vektor  $\mathbf{B}$  a jednu hodnotu teploty. Data byla zpracována v Matlabu dle schématu na obr.13.



Obr.13.: Postup zpracování signálu.

Výstupní data jsou zakódována protokolem base64 a jejich kontinuita je přerušována při záznamu vkládanými časovými kódy. Pro rozkódování base64 je nejprve nutné oddělit časové kódy, poté je možné rozkódování. Při rozkódování dochází ke ztrátě některých vzorků z důvodů, že je velký objem dat (9GB) zpracováván po částech. V místech, kde byl datový proud přerušen (hodnota rozdělena mezi dva soubory), může dojít při zpracování k částečné ztrátě dat, který není ve zdrojovém souboru kompletní. Rozkódovací procedura rozeznává, kde a jakým vzorkem (tři osy  $\mathbf{B}$  a teplota) soubory začínají a končí, části oříznutých vzorků maže a zaznamenává jejich počet. Data rozkódovaná z protokolu Base64 ukládá do dočasného souboru.

Měření o vzorkovací frekvenci kolem 110Hz je dále třeba upravit na minutová data, která mohou být vstupem do algoritmu K-indexu. K tomu se využívá dle standardů INTERMAGNETu [17] gausiánský klouzavý průměr s předepsanými váhovými hodnotami a decimace signálu. Po takové úpravě je již objem dat přijatelný a postupně zpracovávané vstupní soubory mohou být ukládány do jednoho kontinuálního.

V měřených hodnotách  $\mathbf{B}$  je znatelný šum způsobený tepelnou závislostí AMR senzoru v součinnosti s teplotní regulací místnosti. Teplota v místnost je regulována s přesností  $0,1^{\circ}\text{C}$ , což teploměr na DPS není schopen přesně detekovat. Jemná oscilace teploty způsobená regulací se skrz teplotní závislost AMR promítá na měřenou  $\mathbf{B}$  bez možnosti kompenzace pomocí teploměru. Tento šum musel být odstraněn filtrem typu DP, jehož parametry byly určeny experimentálně s důrazem na netknutost charakteristických částí průběhu denní geomagnetické variace. Ačkoliv je v místnosti teplota řízena velmi přesně, měření ukázalo dlouhodobý teplotní drift cca  $0,3^{\circ}\text{C}$  během tří týdnů. Takový drift je významější (5LSB) a je



možné pomocí teploměru potlačit. Nejprve je potřeba vyhladit teplotní signál dolnopropustním filtrem, jehož parametry byly určeny experimentálně na základě pozorování zvlnění signálu. Dále se aplikuje kompenzace teplotní závislosti teploměru (získaná viz oddíl 4.2.1)

Dalším krokem je vyrovnání teplotní závislosti magnetometru podle teplotního. Ta se v této fázi zpracování signálu projevuje jako kolísání jeho SS složky. (Připomeňme, že několik opatření pro již bylo přijat předtím: prostředí s řízenou teplotou, dolnopropustní filtrace signálu.) Teplotní závislost je možné provést několika způsoby. Teoreticky nejpřesnější je kompenzační algoritmus vycházející z naměřené teplotní závislosti senzoru v klimatické komoře. V tomto případě byl však aplikován neúspěšně (viz poslední kapitola č.6). Náhradním řešením je extrapolace dlouhodobého kolísání SS složky a jeho odečtení. Signál se nejprve průměruje ku získání bodů vyznačujících trend SS složky. Dále se body aproximují funkcí, jejíž předpis dá možnost interpolace takového počtu bodů, jako obsahuje původní signál. Takto připravený trend se odečte od opravovaného signálu a dlouhodobý drift je potlačen. Takový postup je použitelný pro sledování denní variace nebo geomagnetické bouře. Dojde jím totiž k potlačení sekulárních variací, tzn. dlouhodobě sledovaným variacím geodynamického původu.

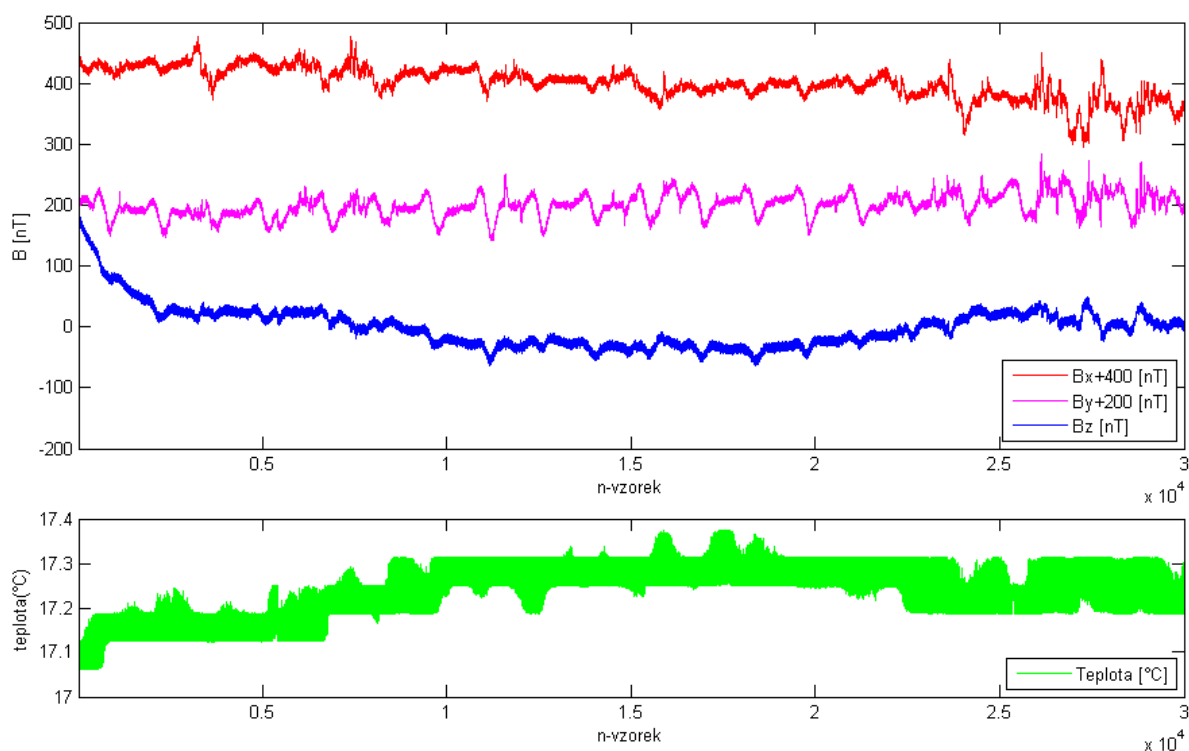
Filtrovaná data se mohou porovnat s referenčním signálem. Referenční signál byl měřen přístrojem představeným v tab.8, která jej porovnává s konstruovaným zařízením. Blíže je jeho princip popsán v patentu [20]. Rovněž výsledky algoritmu K-indexu, je možné porovnat s referenčními, která jsou umístěna na webu interním webu observatoře Budkov.

Tab.8: Porovnání referenčního měřicího zařízení s konstruovaným.

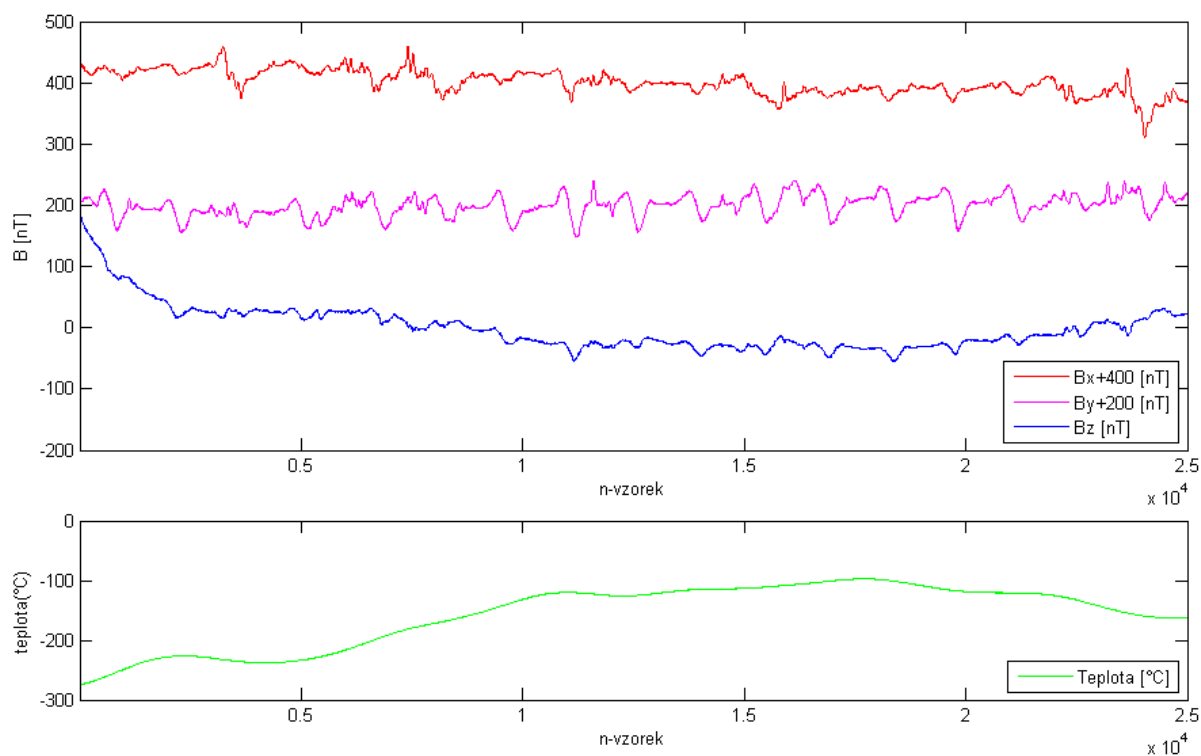
	Referenční přístroj	Konstruovaný přístroj
<b>Jméno</b>	G-DAS se sondou DMI	Emil
<b>Princip</b>	fluxgate	AMR
<b>Rozlišení</b>	50pT	73nT
<b>Vzorkování</b>	16bit/1Hz	12bit/105Hz
<b>Šum</b>	50pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$	200nT

### 5.3.3 Výsledky dlouhodobého měření

Data byla upravena dle předchozího popisu. Obr.14 ukazuje hrubě zpracovaná minutová data třítydenního měření, obr.15 data vyhlazená dolnoprostopustní filtrací.

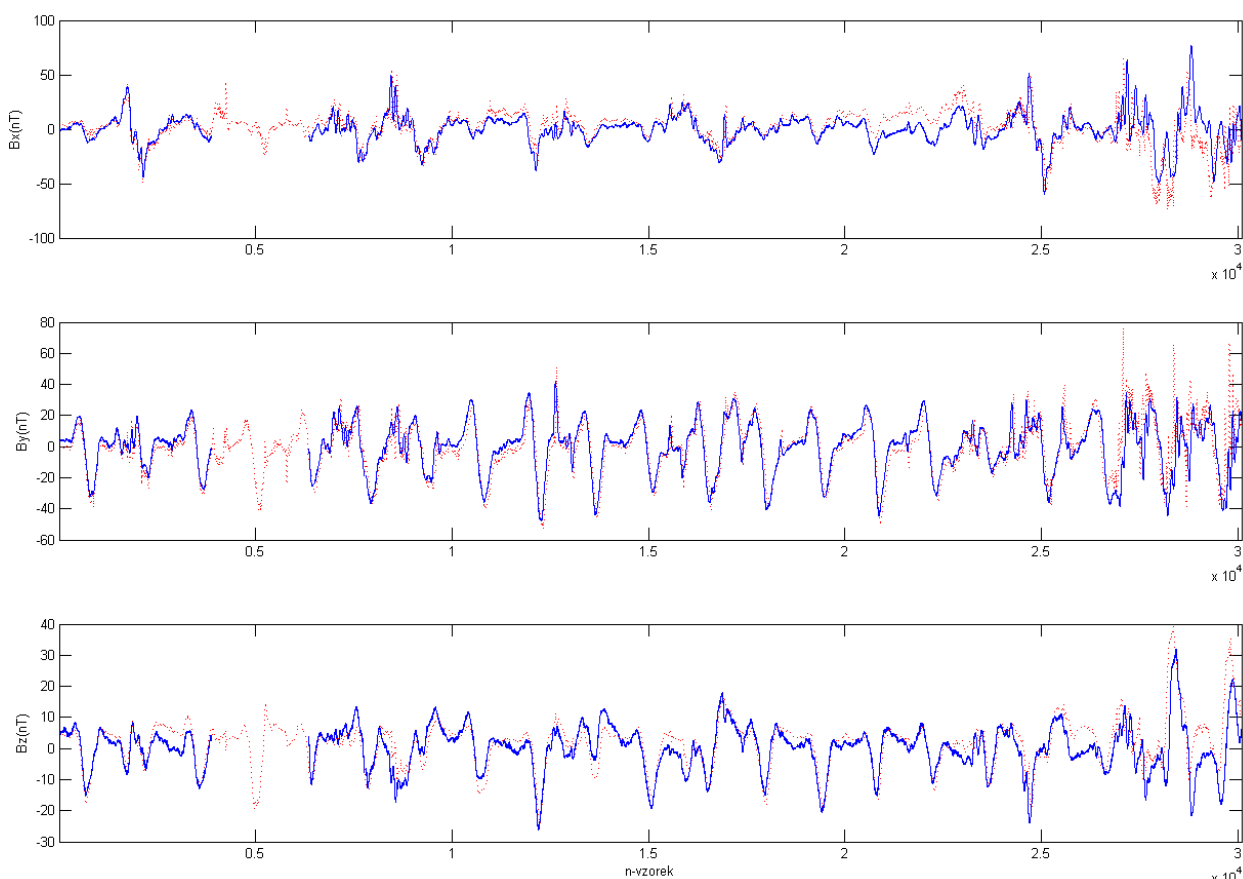


Obr.14.: Minutová data naměřená navrhovaným zařízením.



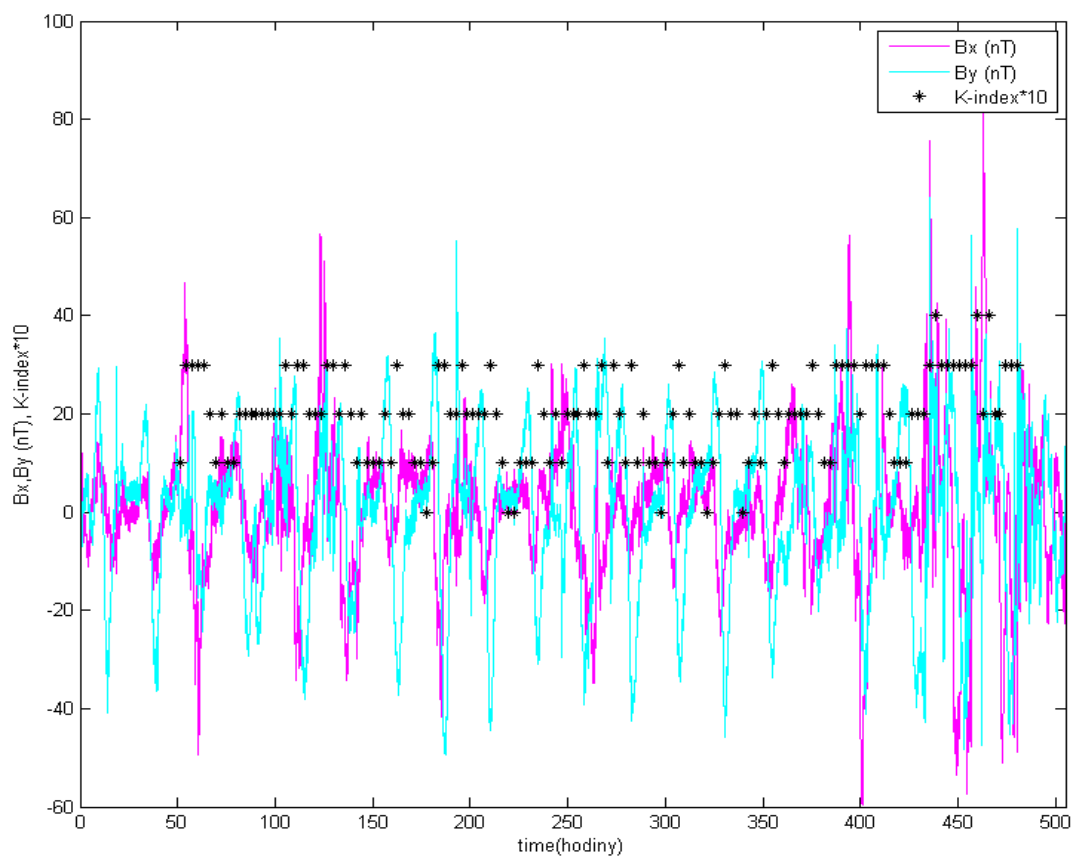
Obr.15.: Minutová data po dolnoprostopustní filtraci jsou připravená ke kompenzaci teplotního driftu.

Zlomová frekvence vyhlazovacího filtru je zvolena nízká pro přehledné vizuální porovnání měření s referenčním signálem (obr.16), ač dochází ke ztrátě některých charakteristických rysů geomagnetického signálu (strmé náběhy, špičky). Je tak dobře rozeznatelný denní cyklus geomagnetické variace. Drobné výkyvy stejnosměrné složky měřeného a referenčního signálu jsou způsobené odstraněním teplotního driftu algoritmem, který nezohledňuje teplotu, pouze vyrovnává střední hodnotu signálu.

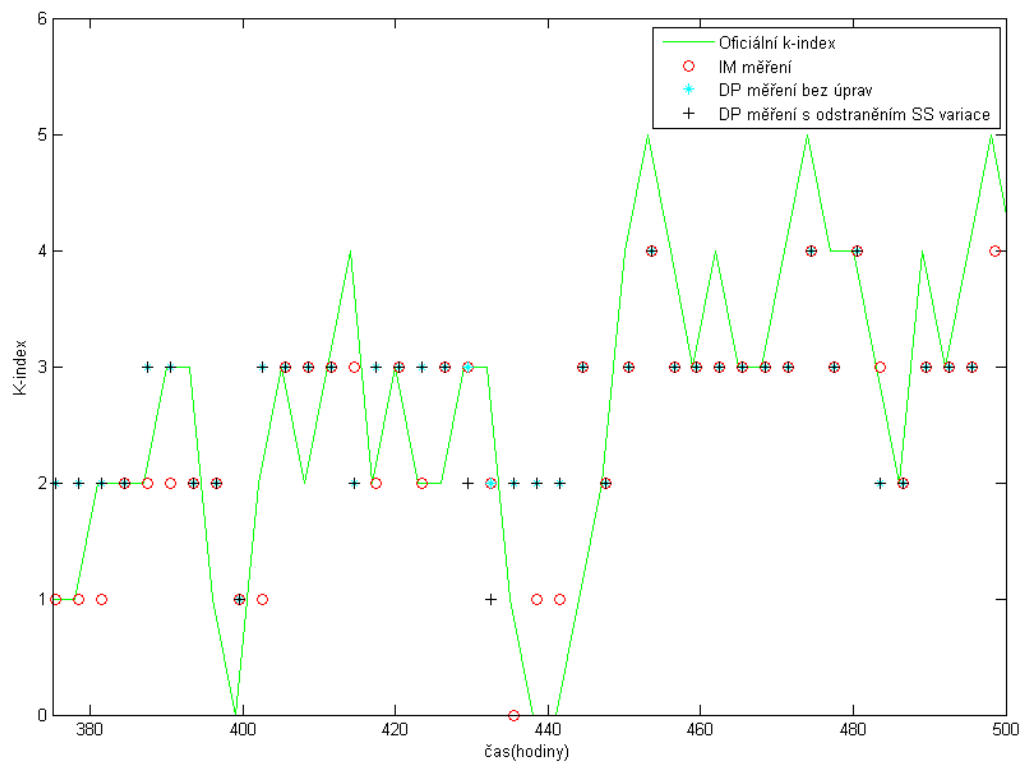


Obr.16.: Porovnání měřených dat (po filtraci DP a odstranění teplotního driftu) s referenčním signálem. Měřená data (modrá) a referenční signál (červená).

Pro výpočet K-indexu je vhodné použít signál prostý jakéhokoliv dolnoproústního filtrování. V opačném případě dochází ke ztrátě charakteristických projevů geomagnetické variace, z kterých je digit K-indexu počítán. Na obr.17 je zobrazený K-index spolu s vyhodnocovaným signálem. Na obr.18 lze porovnat výsledky přeloženého K-index algoritmu pro různá vstupní data: referenční měření (IM měření) a dva sety vstupních dat naměřených konstruovaným zařízením – tato tři měření vyobrazena bodově. Poslední porovnávaný signál (vyobrazěn čárově) je výpočet K-indexu realizovaný původními algoritmy.



Obr.17.: Vyhodnocovaná data a vypočítaný K-index.



Obr.18.: Porovnání různých signálů K-indexu (část měřeného období).

## **KAPITOLA 6: VYHODNOCENÍ ZAŘÍZENÍ A BUDOUCÍ PRÁCE**

Byla provedena analýza projevů magnetického pole na DPS a v jejím okolí, načež bylo navrženo měřicí zařízení aplikující pravidla, která mají snížit vnější ovlivňování a sebeovlivňování. Tato pravidla lze ještě rozšířit v budoucím návrhu pro případy, že by budoucí senzor byl schopný vyšší vzorkovací frekvence a některé procesy na DPS by tak vstupovaly do spektra měřeného **B**.

Byla ozkoušena teplotní kompenzace pomocí vnějšího teplotního čidla. Teplotní závislost magnetometru při dlouhodobém měření však neodpovídá závislostem naměřeným v klimatické komoře, což je zřejmé již pouhým vizuálním srovnáním. Na měření teplotní závislosti by mělo být v budoucnu použité specializované vybavení (vrstvené permaloyové stínění zařízení, horkovzdušný topný systém), aby činnost komory nevnášela chybu do měření magnetického pole. Další chybou teplotní kompenzace je jistě rozdílná poloha magnetometru a teploměru a rovněž rozdílná teplotní kapacita čipů, tzn. nedostatečné tepelné spojení mezi driftujícím senzorem a teplotní kompenzací. Budoucí prací je rovněž výběr teploměru s vyšší přesností. Poslední dva nedostatky nejsou vlivné pro dlouhodobé měření (změny jsou pomalé a filtrují se), jsou však stěžejní pro měření teplotní závislosti čidla.

Náhradní teplotní kompenzace, kterou práce využívá je dvoustupňová. První je teplotní kompenzace místnosti, kde je měřicí zařízení umístěno. Tu je možné výhledově vylepšit (přidání objektu o velké tepelné kapacitě do stejné místnosti, zvýšená izolace místnosti). Druhou fází je kompenzace driftu stejnosměrné hodnoty měřeného signálu. Tato matematická úprava signálu je necitlivá k ročnímu poklesu geomagnetického pole, ale pro pozorování denní variace a geomagnetické bouře je plně dostačující.

Možnosti úprav datové komunikace byly prozkoumány nicméně nakonec nepoužity z důvodů nerelevantnosti takového řešení. Zabezpečuje sice signál oproti vnějšímu rušení, ale dálková komunikace po metalickém měření zarušuje přístroje v areálu observatoře čili je nahrazena optickými linkami a bitově bezpečným protokolem base64. Provoz zařízení mimo geomagnetickou observatoř, kde by metalická komunikace byla relevantní, je nevhodné z důvodu narušení měření prostředím. Měření o délce několika dnů v městském prostředí ukazuje vysoké neshody s referenčním zařízením a navíc artefakty neznámého původu. [21]

Výsledný měřený a upravený signál byl srovnán s referenčním měřením. Shoda není totální, nicméně za velký úspěch považuji pozorování denní variace geomagnetického pole jako

astronomického jevu – signál se velmi blíží referenčnímu měření. Otázkou zůstává, zda je senzor schopný měřit detaily denní pozemské variace, které využívají např. orbitální družice pro komparaci s vlastním měřením v účelu navigace. Závěrem se ukázalo, že senzor není vhodný pro absolutní měření pro mnohé měřicí chyby, které navíc varíují teplotou i časem. Naopak jej lze úspěšně využívat pro měření variací geomagnetického pole, kdy se driftы přirozeně odečtou se stejnosměrnou složkou signálu nebo se odstraní při jeho zpracování.

Dále byl vyšetřen a přepsán do Matlabu algoritmus K-indexu pro detekci stupně geomagnetické poruchy, tedy detekci geomagnetických bouří. Jeho výsledky neodpovídají příliš běžnému vyhodnocení denní variace. Silnější geomagnetickou bouří (stupeň 5) s ním ale detekovat lze. Vhodná úprava pro takovou detekci je vynásobení měřeného signálu experimentálně určeným parametrem 1,25. Z toho lze soudit, že magnetometr vykazuje určitou chybu v zesílení. Jednou z prací odvedené v této oblasti bylo také přiblížit se planetární verzi „K<sub>p</sub>-indexu“ pomocí simulace Sluneční soustavy v Matlabu a prostorových dopočtů k měřenému signálu. Tyto práce byly však předčasně ukončeny kvůli vysokým požadavkům na výpočetní techniku a na čas.

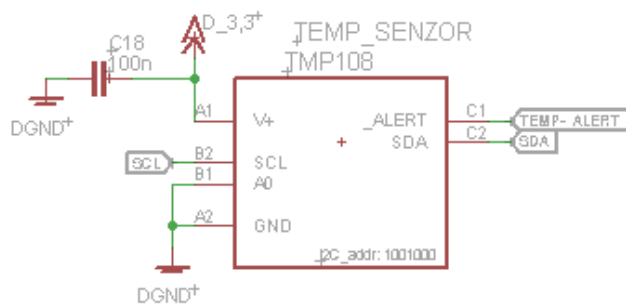
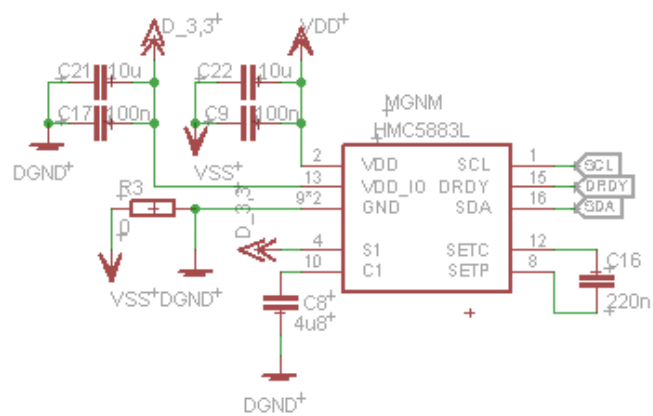
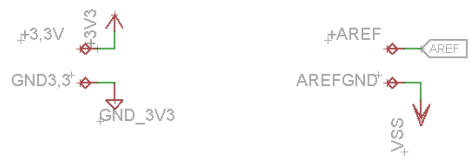
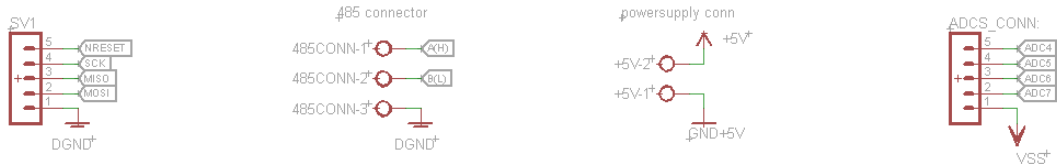
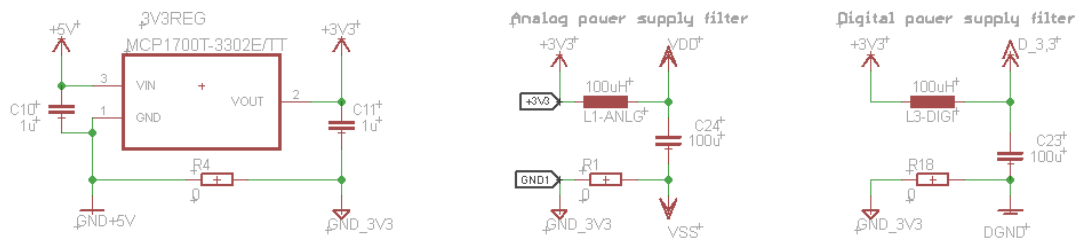
Hodnoceno s dlouhodobého hlediska je budoucnost AMR senzorů nejistá. Senzor potřebuje množství kompenzačních obvodů a trpí teplotní závislostí významnou pro uskutečnění přesnějších měření. Již existují propagační materiály inzerující novou generaci magnetometrů založených na tunelovém jevu. Ty by měly být dle předběžných informací výrobců waferů až o dva řády přesnější. Momentálně jsou však výrobcům komerční elektroniky přístupné zásoby AMR senzorů a tak nezbyvá než se na tunelové magnetometry těšit.

**SEZNAM PŘÍLOH**

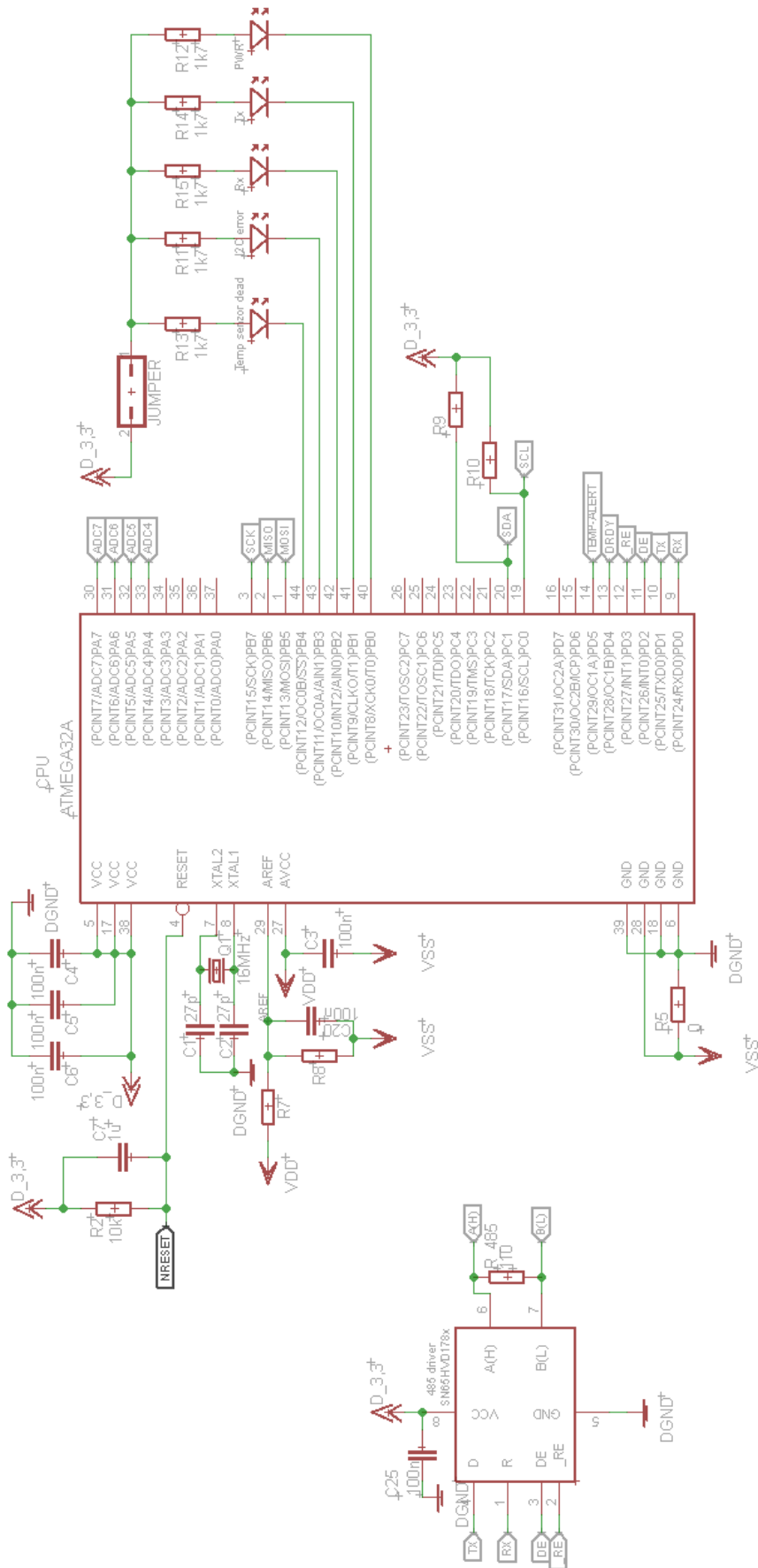
- Návrh schématu ..... 400
- Návrh DPS ..... 422
- Seznam užitých polovodičových prvků ..... 433
- Seznam dalších užitých elektronických prvků ..... 444
- Vybrané katalogové hodnoty magnetometru HMC5883L ..... 455
- Vybrané katalogové hodnoty teplotního senzoru TMP108 ..... 455
- Vybrané katalogové hodnoty CPU ATmega32A ..... 455

## PŘÍLOHY

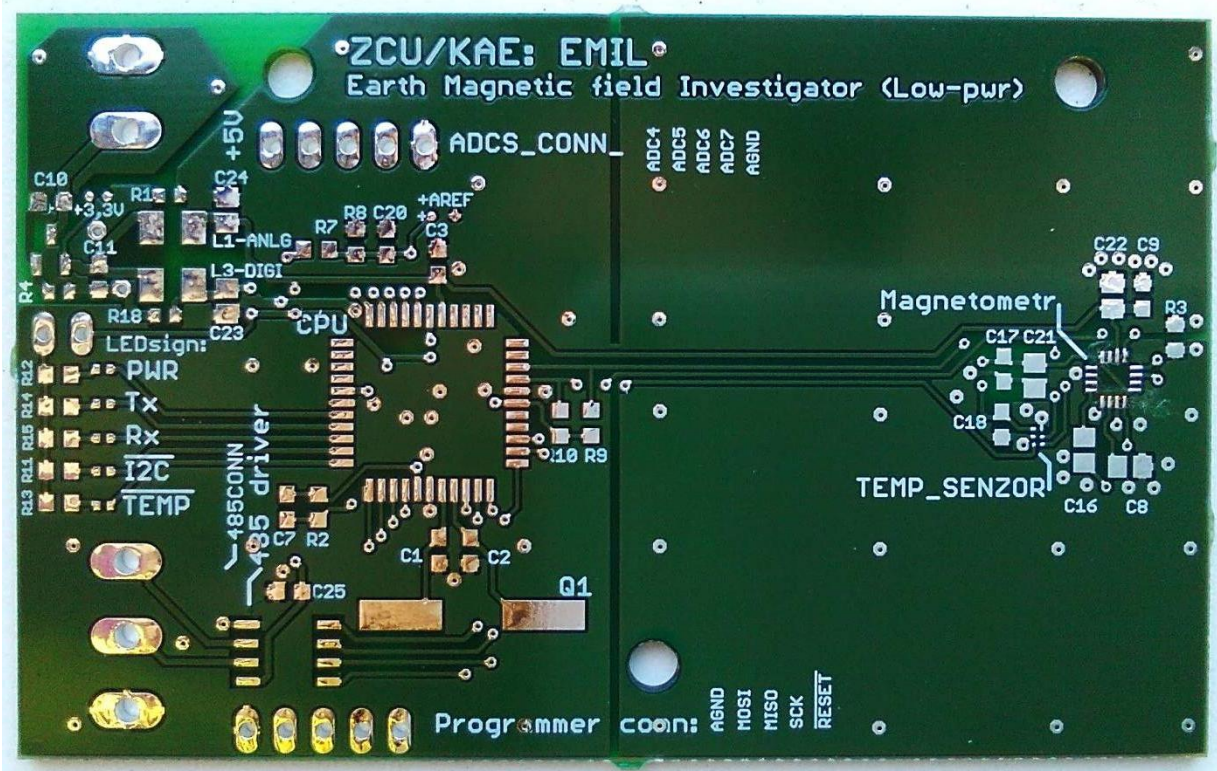
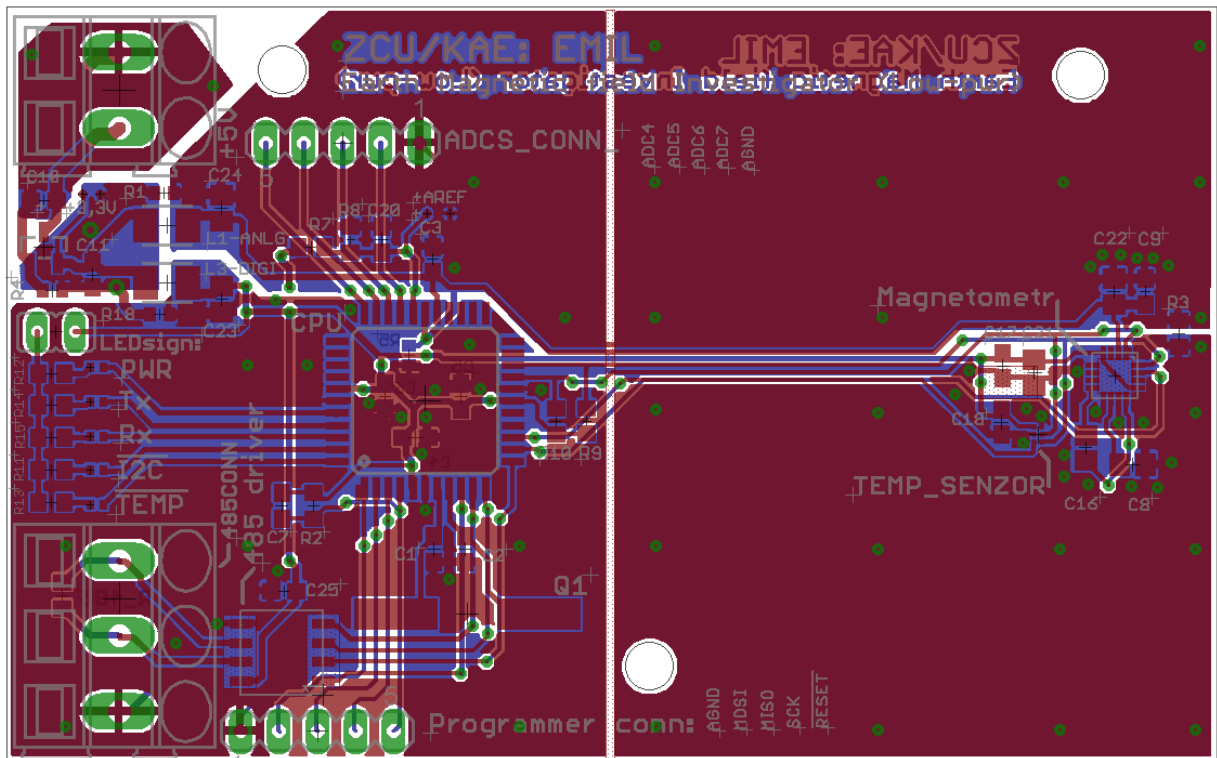
### Návrh schématu







### Návrh DPS



**Seznam užitých polovodičových prvků**

Název	Pouzdro	Počet	Cena [Kč]	Číslo na Farnell	Poznámky
ATmega32A	TQFP44	1	137,207	2425126	
HMC8553L-TR	16-LPCC	1	187,462	1971743	
TMP108	DSBGA6	1	64,876	2496408	
SN65HVD1782	10MSOP	1	129,492	2455485	
SML-P11MTT86 picoLED	Cut Tape	5	9,524	1973103	1mA
MCP1700T-3302E/TT	SOT23-3	1	10,164	1296592	
DPS		2	asi 600		Pragoboard
Podpůrná elektronika		34	asi 200		ZČU
<b>Suma</b>		<b>46</b>	<b>1300 Kč</b>		

## Seznam dalších užitych elektronických prvků

Název	Hodnota	Pouzdro
<b>C1</b>	27p	C-EUC0603
<b>C2</b>	27p	C-EUC0603
<b>C3</b>	100n	C-EUC0603
<b>C4</b>	100n	C-EUC0603
<b>C5</b>	100n	C-EUC0603
<b>C6</b>	100n	C-EUC0603
<b>C7</b>	1u	C-EUC0603
<b>C8</b>	4u8	C-EUC0603
<b>C9</b>	100n	C-EUC0603
<b>C10</b>	1u	C-EUC0603
<b>C11</b>	1u	C-EUC0603
<b>C16</b>	220n	C-EUC0603
<b>C17</b>	100n	C-EUC0603
<b>C18</b>	100n	C-EUC0603
<b>C20</b>	100n	C-EUC0603
<b>C21</b>	10u	C-EUC0603
<b>C22</b>	10u	C-EUC0603
<b>C23</b>	100u	C-EUC0603
<b>C24</b>	100u	C-EUC0603
<b>C25</b>	100n	C-EUC0603
<b>R1</b>	0	R-EU_R0402
<b>R2</b>	10k	R-EU_R0603
<b>R3</b>	0	R-EU_R0603
<b>R4</b>	0	R-EU_R0402
<b>R5</b>	0	R-EU_R0402
<b>R11</b>	1k7	R-EU_R0603
<b>R12</b>	1k7	R-EU_R0603
<b>R13</b>	1k7	R-EU_R0603
<b>R14</b>	1k7	R-EU_R0603
<b>R15</b>	1k7	R-EU_R0603
<b>R18</b>	0	R-EU_R0402
<b>R_485</b>	110	R-EU_R0603
<b>L1-ANLG</b>	100uH	L-EUL3230M
<b>L3-DIGI</b>	100uH	L-EUL3230M
<b>Q1</b>	16MHz	CSM-7X-DU

## Vybrané katalogové hodnoty magnetometru HMC5883L

Magnetometer HMC5883L	
Package	16-LPCC
Dimensions	3x3x0.9 mm
Power supply	2,16-3,6V
Wide magnetic field range	±80e (Gauss)
Sensitivity = f (gain level)	230 – 1370 LSb/gauss
Resolution = f (gain level)	73nT - 435nT
Current draw: Idle mode (ds)	2uA
Current draw: Measurement mode (ds)	100uA
Measurement period	6ms
U <sub>ESD</sub> human body model	2000V
U <sub>ESD</sub> machine model	750V
I2C interface	400kHz
SPI interface	X
Max output rate	160Hz
Temperature output	X
Temp. drift compensation	X
Auto. offset compensation	✓

## Vybrané katalogové hodnoty teplotního senzoru TMP108

TMP108	
Package	6-DSBGA
Dimensions	1.2x0.8x0.6 mm
Power supply	1.4-3.6V
Current draw	6uA
Conversion rate	16Hz
Temperature range	-40°C to +125°C
Communication	400kHz I2C bus

## Vybrané katalogové hodnoty CPU ATmega32A

ATmega32A	
Package	44-TQFP
Dimensions	11.8x11.8x1.2 mm
Power supply	2.7-5.5V
Self-programmable Flash program memory	32kB
EEPROM	1024B
Internal SRAM	2kB
JTAG	✓
PWM channels	4
Sleep modes	6
Programmable I/O Lines	32

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Linhart, R., *Měření zemského magnetického pole*. Elektrotechnika a informatika: 7. ročník přehledky doktorských prací. Fakulta elektrotechnická ZČU v Plzni, 2006(7).
- [2] Coey, J. M. D., *Principles of Magnetic Sensing*. School of Physics and CRANN, Trinity College Dublin. Ireland. [online]. [cit. 2016-02-19]. Dostupné z: <https://www.tcd.ie/Physics/Magnetism/Lectures/py5021/MagneticSensors2.pdf>.
- [3] McGuire, T. R. and Potter, R. I., *Anisotropic Magnetoresistance in Ferromagnetic 3d Alloys*. IEEE Transaction on Magnetics, VOL. MAG-11, NO. 4. July 1975. Dostupné z: [http://www.unife.it/scienze/lm.fisica/insegnamenti/proprieta-magnetiche-materia/materiale/magnetoresistenza\\_anisotropa.pdf](http://www.unife.it/scienze/lm.fisica/insegnamenti/proprieta-magnetiche-materia/materiale/magnetoresistenza_anisotropa.pdf).
- [4] Nickel, J., *Magnetoresistance Overview*. Computer Peripherals Laboratory. HPL-95-60. June, 1995. Dostupné z: <http://www.hpl.hp.com/techreports/95/HPL-95-60.pdf>.
- [5] Wang, K. Y., Edmonds, K. W., Campion, R. P., Zhao, L. X., Foxon, C.T., Gallagher, B.L., *Anisotropic Magnetoresistance and Magnetic Anisotropy in High-quality (Ga,Mn)As Films*. School of Physics and Astronomy, University of Nottingham, Nottingham NG7 2RD, UK. Dostupné z: <http://arxiv.org/ftp/cond-mat/papers/0506/0506250.pdf>.
- [6] Mohamadabadi, K. *Anisotropic Magnetoresistance Magnetometer for inertial navigation systems*. Electronics. Ecole Polytechnique X, 2013. Great Britain.
- [7] Záhlava, V. *Metodika návrhu plošných spojů*. 1. vydání. Praha: ČVUT, Elektrotechnická fakulta, 2000, 81 s. ISBN 80-010-2193-9.
- [8] Vaculíková, P.; Vaculík, E. *Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů*, Grada Publishing, 1998, ISBN 80-7169-568-8.
- [9] Zhiping, Liu a Mingjing, Zhu. *Calibration and Error Compensation of Magnetometer*. Xian 710032, 2014. Xian Technological University.
- [10] Glatzmaier, G.A. and Roberts P.H., *A three-dimensional convective dynamo solution with rotating and finitely conducting inner core and mantle*. Phys. Earth Planet. Inter., 91, 63-75 1995.

- [11] Basavaiah, Nathani. *Geomagnetism: Solid Earth and Upper Atmosphere Perspectives*. Dordrecht; New York: New Delhi: Springer, 2011.
- [12] Bogdanova, Y. V., Owen, C. J., Dunlop, M. W., Wild, J. A., Davies, J. A., Lahiff, A. D., Taylor, M. G. G. T., Fazakerley, A. N., Dandouras, I., Carr, C. M., Lucek, E. A., Rème, H., *Formation of the low-latitude boundary layer and cusp under the northward IMF: Simultaneous observations by Cluster and Double Star*. Journal of Geophysical Research, Space Physics. Agu Publications. [online]. 12.6.2012 [cit. 2016-02-19]. Dostupné z: <http://online.library.wiley.com/doi/10.1029/2007JA012762/full>
- [13] *Earth's Inconstant Magnetic Field*, NASA. [online]. 2013 [cit. 2016-02-19]. Dostupné z: [http://science.nasa.gov/headlines/y2003/29dec\\_magneticfield.htm](http://science.nasa.gov/headlines/y2003/29dec_magneticfield.htm)
- [14] *Geomagnetic Field*. Lecture Notes on Space Weather. [online]. 22.2.2011 [cit. 2016-02-19]. Dostupné z: <https://perswww.kuleuven.be/~u0052182/weather/les2/node3.html>
- [15] Main Field Total Intensity, US/UK World Magnetic Model - Epoch 2015.0. [online]. 1.12.2014 [cit. 2016-02-19]. Dostupné z: [http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/data/WMM2015/WMM2015\\_F\\_MERC.pdf](http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/data/WMM2015/WMM2015_F_MERC.pdf).
- [16] Data download section. INTERMAGNET [online]. [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://www.intermagnet.org/data-donnee/download-eng.php>
- [17] Regimbald, Diane, St-Luis, Benoit, F. Trigg, a Colec, R., ed. *INTERMAGNET: Technical Reference Manual*, v4.6 [online]. In: . Edinburgh EH9 3LA: British Geological Survey, 2012 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: [http://www.intermagnet.org/publications/intermag\\_4-6.pdf](http://www.intermagnet.org/publications/intermag_4-6.pdf)
- [18] Bartels, J., Heck, N.H. & Johnston, HF. (1939). The three-hour range index measuring geomagnetic activity. *Geophysical Research*, 44, 411–454.
- [19] Fleury, P. *AVR Software, AVR-GCC libraries*. 2016 [cit. 2016-02-19]. Available at: <http://homepage.hispeed.ch/peterfleury/avr-software.html>
- [20] Vacquier, V., *Apparatus for responding to magnetic fields*. 454015D— 1949-01-11. Zapsáno 11.1.1949. Dostupné online na: <https://worldwide.espacenet.com/>

publicationDetails/originalDocument?CC=CA&NR=454015A&KC=A&FT=D&ND=3&date=19490111&DB=EPODOC&locale=en\_EP#

[21] Široký, J., *EMIL: Earth Magnetic Field Investigator LowPwr*. Elche (Alicante), Španělsko, 2016. Závěrečná práce. Universidad Miguel Hernández de Elche. Vedoucí práce: Ernesto Avila Navarro.

## KATALOGOVÉ LISTY

[HMC5883L] *Katalogový list Honeywell: HMC5883L* [online]. 2013 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: [https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/HMC5883L\\_3-Axis\\_Digital\\_Compass\\_IC.pdf](https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/HMC5883L_3-Axis_Digital_Compass_IC.pdf)

[TMP108] *Katalogový list Texas Instruments: TMP108* [online]. 2013 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tmp108.pdf>

[ATmega32A] *Katalogový list Atmel: ATmega32A* [online]. 2016 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: [http://www.atmel.com/Images/Atmel-8155-8-bit-Microcontroller-AVR-ATmega32A\\_Datasheet.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-8155-8-bit-Microcontroller-AVR-ATmega32A_Datasheet.pdf)

[MCP1700T-33] *Katalogový list Microchip electronics: MCP1700T-33* [online]. 2013 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20001826C.pdf>

[SN65HVD1782] *Katalogový list Texas Instruments: SN65HVD1782* [online]. 2017 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn65hvd1780.pdf>

[ELO242] *Katalogový list Elo: ELO242* [online]. [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://www.elo.cz/file.php?nid=11785&oid=3097332>