

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

Diplomová práce

**ZAŘÍZENÍ PRO MAPOVÁNÍ
STACIONÁRNÍHO MAGNETICKÉHO POLE V
ROVINĚ**

Bc. Martin VÍTEK

2019

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin VÍTEK**

Osobní číslo: **E17N0057P**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika**

Název tématu: **Zařízení pro mapování stacionárního magnetického pole
v rovině**

Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Zásady pro výpracování:

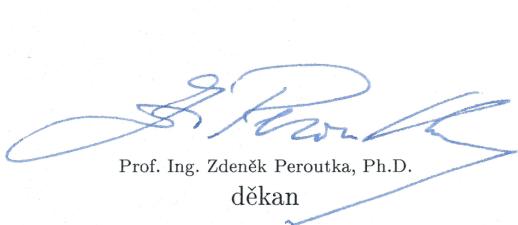
1. Zpracujte rešerši zabývající se principy měření magnetického pole.
2. Porovnejte vlastnosti a možnosti dostupných senzorů a měřicích metod.
3. S využitím zvoleného senzoru zkonstruujte zařízení, pomocí kterého bude možné provést mapování stacionárního magnetického pole v rovině.
4. Navrhněte uživatelské rozhraní pro ovládání měřicího zařízení a způsob zobrazení na měřených hodnot.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

1. Song, Shuang, et al.: Design and Optimization Strategy of Sensor Array Layout for Magnetic Localization System. IEEE Sensors Journal, vol. 17, no. 6, 2017, pp. 1849-1857., doi:10.1109/jsen.2017.2652470.
2. Schlageter, et al.: Tracking System with Five Degrees of Freedom Using a 2D-Array of Hall Sensors and a Permanent Magnet. Sensors and Actuators A: Physical, vol. 92, no. 1-3, 2001, pp. 37-42., doi:10.1016/s0924-4247(01)00537-4.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Juřík
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: 5. října 2018
Termín odevzdání diplomové práce: 30. května 2019



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

ANOTACE A KLÍČOVÁ SLOVA

Předložená diplomová práce se zabývá konstrukcí zařízení pro mapování stacionárního magnetického pole v rovině. Zařízení je složeno z měřícího zařízení MagSpider, polohovacího zařízení DerMagTisch a počítačového programu MagServer.

Zařízení je možné použít pro několik druhů měření. Prvním měřením je živé zobrazení magnetického pole v rozlišení $10\text{ px} \times 10\text{ px}$. Dále je možné měřit magnetické pole v čase s rozlišením $10\text{ px} \times 10\text{ px}$ a vzorkovací frekvencí až 50 Hz . Poslední druh měření je detailní mapování, které proměřuje stacionární magnetické pole v prostoru $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ s krokem až $5\text{ }\mu\text{m}$ a s výsledným rozlišením až $10\,000\text{ px} \times 10\,000\text{ px}$.

První část popisuje motivaci práce, druhy magnetických senzorů, podobná zařízení a výběr použitého magnetometru. Část druhá se zabývá popisem hardwaru, firmwaru a změrených charakteristik měřícího zařízení. Třetí část popisuje zkonstruované polohovací zařízení a jeho změřené charakteristiky. Ve čtvrté části je popsána architektura a funkce naprogramovaného softwaru, který řídí měření. V poslední části jsou prezentovaná měření provedená tímto zařízením a možnosti jeho dalšího využití.

KLÍČOVÁ SLOVA

Měření magnetického pole, mapování magnetického pole, magnetometr, matice senzorů, magnetický scanner, magnetická kamera.

ANOTATION AND KEYWORDS

Presented diploma thesis describes constructed device for mapping stationary magnetic field in plane. The device consists of the measuring device, the positioning device and the computer program for measurement control.

It is possible to perform several types of measurements. The first type is a live view of the magnetic field with a resolution of $10 \text{ px} \times 10 \text{ px}$. The next type is in time measurement with a resolution of $10 \text{ px} \times 10 \text{ px}$ and with sampling frequency up to 50 Hz. The last type is a detailed mapping of the stationary magnetic field in the area with dimensions $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$. Resolution can be up to $10\,000 \text{ px} \times 10\,000 \text{ px}$ with a step equal to $5 \mu\text{m}$.

The first part describes the motivation, types of magnetic sensors, similar devices and selection of used magnetometer. The second part deals with the description of the hardware, firmware and measured characteristics of the constructed measuring device. The third part describes constructed positioning device with measured characteristics. In the fourth part, the architecture and the functionality of the programmed control program are described. The last part presents the measurements taken with the constructed device and the possibilities of its further use.

KEYWORDS

Magnetic field measuring, magnetic field mapping, magnetometer, sensor array, magnetic scanner, magnetic camera.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych velmi rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Martinovi Juříkovi za skvělé vedení, časté podněty a pomoc při jejím vypracování. Dále bych rád poděkoval Ing. Františkovi Machovi, Ph.D. a Ing. Liborovi Poláčkovi, Ph.D. za jejich pomoc při vzniku této práce.

PROHLÁŠENÍ

Předkládám tímto k posouzení diplomovou práci, zpracovanou během mého studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, s použitím uvedené odborné literatury a pramenů, a že veškerý software, použitý při jejím řešení a zpracování, byl využit s respektováním všech jeho licenčních podmínek.

V Plzni, dne 30. 5. 2019

Martin Vítek

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

E	$[V\ m^{-1}]$	intenzita elektrického pole
D	$[C\ m^{-2}]$	elektrická indukce
H	$[A\ m^{-1}]$	intenzita magnetického pole
B	[T]	magnetická indukce
J	$[A\ m^{-2}]$	hustota elektrického proudu
Φ	[Wb]	magnetický tok
t	[s]	čas
u_i	[V]	indukované napětí
F_m	[N]	síla vyvolaná magnetickým polem
q	[C]	elektrický náboj
v	$[m\ s^{-1}]$	rychlosť
I	[A]	elektrický proud
f	[Hz]	frekvence
USB		univerzální sériová sběrnice (Universal Serial Bus)
A/D převodník		převodník analogového signálu na digitální
D/A převodník		převodník digitálního signálu na analogový
3D		třírozměrný prostor
CERN		Evropská organizace pro jaderný výzkum (Conseil Européen pour la recherche nucléaire)
AMR		anizotropní magnetorezistence
SPI		sériové periferní rozhraní (Serial Peripheral Interface)
UART		asynchronní sériová sběrnice (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)
I ² C		multi-master sériová sběrnice (Inter-Integrated Circuit)
CS		výběrový signál (Chip Select)
MEMS		mikro elektro mechanický systém
RMS		efektivní hodnota (Root Mean Square)
PTC		pozistor (Positive Temperature Coefficient)
CMOS		technologie komplementárních polovodičů (Complementary Metal Oxide Semiconductor)
MOSFET		unipolární tranzistor s izolovaným hradlem (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)

FLASH	nevolačilní elektricky programovatelná paměť s náhodným přístupem
RAM	volatilní paměť s náhodným přístupem (Random Access Memory)
SERCOM	periférie sériových komunikací (Serial Communication Interface)
DFLL	digitální fázový závěs (Digital Frequency Locked Loop)
LGA	Land Grid Array
DPS	deska plošných spojů
IDE	integrované vývojové prostředí (Integrated Development Environment)
GCLK	periférie generátoru hodinového kmitočtu (Generic Clock Controller)
NVMCTRL	periférie přístupu do nevolatilní paměti (Non-Volatile Memory Controller)
RXC	přerušení při dokončním příjmu (Receive Complete)
DRE	přerušení při volném odesílacím registru (Data Register Empty)
DMA	přímý přístup do paměti (Direct Memory Access)
DMAC	periférie přímého přístupu do paměti (Direct Memory Access Controller)
CRC	cyklický redundantní součet (Cyclic Redundancy Check)
EMC	elektromagnetická kompatibilita (ElectroMagnetic Compatibility)
ODR	vzorkovací frekvence (Output Data Rate)
CNC	počítačové číslicové řízení (Computer Numerical Control)
API	rozhraní pro programování aplikací (Application Programming Interface)
HTTP	hypertextový protokol (HyperText Transfer Protocol)
HTML	značkovací jazyk (HyperText Markup Language)
CSS	kaskádové styly (Cascading Style Sheets)
TCP	protokol používaný v IP sítích (Transmission Control Protocol)
IPv4	internetový protokol verze 4 (Internet Protocol v4)
IPv6	internetový protokol verze 6 (Internet Protocol v6)

OBSAH

i ÚVOD DO PROBLEMATIKY	12
I.1 ÚVOD	13
I.2 DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ	14
I.3 MOTIVACE	16
I.4 PODOBNÁ ZAŘÍZENÍ	18
I.4.1 Rychlý magnetický scanner	18
I.4.2 Přesný magnetický scanner s jedním senzorem	18
I.4.3 Matice senzorů malých rozměrů	19
I.4.4 MagCam	20
I.5 PRINCIPY MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE	21
I.5.1 Měřící cívka	21
I.5.2 Hallova sonda	21
I.5.3 Anizotropní magnetorezistence	22
I.6 VÝBĚR SENZORU	24
ii MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ MAGSPIDER	26
II.1 ÚVOD	27
II.2 HARDWARE	28
II.2.1 Senzory	28
II.2.2 Napájení	33
II.2.3 Mikrokontrolér	34
II.2.4 Konstrukce	36
II.3 FIRMWARE	41
II.3.1 Inicializace mikrokontroléru	41
II.3.2 Komunikace se senzory	43
II.3.3 Komunikační protokol	45
II.4 CHARAKTERISTIKY	48
II.4.1 Odběr zařízení	48
II.4.2 Linearita	49
II.4.3 Amplitudová frekvenční charakteristika	49
II.4.4 Šum	51
II.4.5 Časová stabilita	51
II.4.6 Teplotní stabilita	52

Obsah

iii	POLOHOVACÍ ZAŘÍZENÍ DERMAGTISCH	53
III.1	ÚVOD	54
III.2	HARDWARE	55
III.2.1	Elektronika	55
III.2.2	Mechanika	57
III.3	FIRMWARE	59
III.4	CHARAKTERISTIKY KŘÍŽOVÉHO STOLU	61
III.4.1	Velikost kroku	62
III.4.2	Velikost vůle	62
iv	SOFTWARE PRO OVLÁDÁNÍ MAPOVÁNÍ MAGSERVER	64
IV.1	ÚVOD	65
IV.2	ARCHITEKTURA PROGRAMU	66
IV.2.1	Komunikace se zařízeními MagSpider a DerMagTisch	66
IV.2.2	Webové rozhraní	67
IV.2.3	Řízení měření	68
IV.3	FUNKCE	69
IV.3.1	Živé zobrazení měřených dat	70
IV.3.2	Měření v čase	72
IV.3.3	Detailní měření	72
v	VÝSLEDKY MĚŘENÍ A MOŽNOSTI APLIKACE	73
V.1	PREZENTACE NAMĚŘENÝCH DAT	74
v.1.1	Měření v čase	74
v.1.2	Detailní mapování	77
V.2	MOŽNOSTI APLIKACE	82
v.2.1	Parametry a cena vytvořeného systému	82
v.2.2	Příklady aplikací	82
vi	ZÁVĚR	86
VI.1	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A SMĚRY POKRAČOVÁNÍ PRÁCE	87
Seznam literatury a informačních zdrojů		88
A	PŘÍLOHA	94
A.1	Schéma měřícího zařízení MagSpider	94
A.2	Plošný spoj měřícího zařízení MagSpider	106
A.3	Seznam typů zpráv pro MagSpider	110
A.4	Seznam typů zpráv pro DerMagTisch	111
A.5	Seznam typů zpráv pro webové rozhraní	112
A.6	MagServer - webové rozhraní	113
A.7	Přílohy v elektronické podobě	113

Část I

ÚVOD DO PROBLEMATIKY

i.1

ÚVOD

V této práci je popsáno měřící zařízení, jehož cílem je mapování stacionárního magnetického pole v rovině. Zařízení se skládá ze tří hlavních částí.

První část je samostatné zařízení pro měření magnetického pole. Toto zařízení obsahuje sto digitálních tříosých magnetometrů, které tvoří matici o rozměrech $10\text{ px} \times 10\text{ px}$. Senzory jsou ovládány mikrokontrolérem, který komunikuje s řídícím počítačem přes rozhraní USB.

Polohovací zařízení je druhou částí, která umožňuje jemné pohyby ve dvourozměrném kartézském systému. Základem je křížový stůl, který má pracovní prostor o velikosti $150\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ s minimálním krokem pohybu $5\text{ }\mu\text{m}$. V kombinaci s měřícím zařízením je možné mapovat magnetické pole v prostoru o velikosti $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ s výslednými sto miliony body, ve kterých byly změřeny tři složky vektoru magnetické indukce.

Poslední částí je ovládací program do počítače, který komunikuje s měřícím i polohovacím zařízením a řídí požadované měření. Program je navržen s architekturou server-klient tak, aby byl multiplatformní a aby bylo možné ovládat měření ze zařízeních různých druhů. Toho je dosaženo použitím multiplatformních knihoven a tím, že je uživatelské rozhraní vytvořeno ve webové aplikaci, což umožňuje snadné ovládání i z mobilních zařízení.

Jako celek je možné zařízení využívat ve třech režimech. První z nich je živé zobrazení měřeného magnetického pole s rozlišením $10\text{ px} \times 10\text{ px}$, druhý režim umožňuje ukládat měřené pole s rozlišením $10\text{ px} \times 10\text{ px}$ v čase se vzorkovací frekvencí až 50 Hz a poslední režim provádí detailní mapování až do rozlišení $10\,000\text{ px} \times 10\,000\text{ px}$. Každý pixel je vyjádřený třemi složkami vektoru magnetické indukce.

i.2

DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ

Magnetické pole je jednou ze složek pole elektromagnetického, které se nachází všude kolem nás. Vytváří se například v okolí vodičů protékaných proudem nebo v okolí permanentních magnetů. Stacionární a kvazistacionární magnetické pole, jehož mapování je předmětem této práce, popisuje první (1) a čtvrtá (2) Maxwellova rovnice

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (2)$$

kde \mathbf{H} je vektor intenzity magnetického pole, \mathbf{J} je vektor proudové hustoty a \mathbf{B} je vektor magnetické indukce.

Mapováním magnetického pole se rozumí měření magnetické indukce \mathbf{B} v bodech daného prostoru. Tato práce se zabývá mapováním v rovině. Všechny body prostoru, ve kterých je prováděno měření, se tedy nacházejí v jedné rovině. Výsledkem mapování je matice prostorově diskrétních hodnot změřené magnetické indukce. Může se jednat jak o velikost vektoru \mathbf{B} , tak o jeho tři složky X, Y, Z které popisují jeho velikost a směr ve třírozměrném prostoru.

Senzor je zařízení, které měřenou veličinu konvertuje na elektrický signál (analogový, nebo digitální). Skládá se z čidla, které je v přímém styku s měřenou veličinou a převodníku, který měřenou veličinu převádí na požadovaný výstupní signál.

Pro měření magnetické indukce se používají speciální druhy senzorů, které jsou v této práci označovány jako magnetometry. Některé z principů, na kterých jsou magnetometry založeny, jsou popsány v kapitole i.5.

Rozlišení mapování je udáváno v pixelech (px). Pixel značí jeden bod roviny, ve kterém byla změřena magnetická indukce. S použitými magnetometry je každý pixel reprezentován třemi složkami vektoru magnetické indukce.

V textu jsou použita kódová jména pro označení jednotlivých částí měřícího systému. **MagSpider** je měřící zařízení s maticí magnetometrů. Polohovací zařízení je označeno jménem **DerMagTisch**. **MagServer** je počítačový program, který

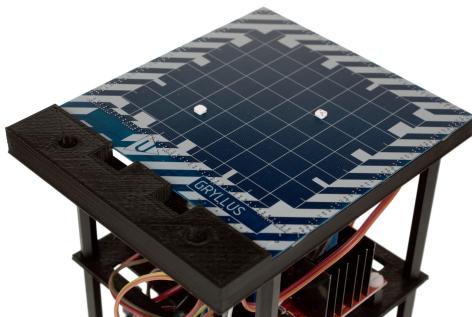
DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ

komunikuje se zařízeními MagSpider a DermagTisch, řídí mapování, ukládá na-měřená data a poskytuje webové uživatelské rozhraní.

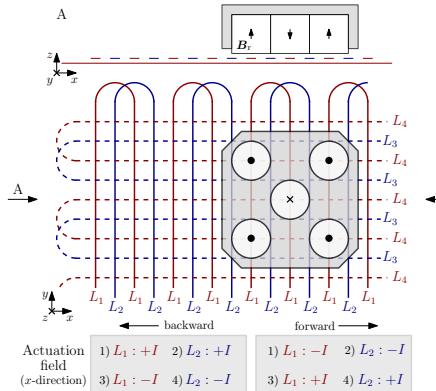
i.3

MOTIVACE

Nápad na konstrukci zařízení pro měření stacionárního magnetického pole v rovině vznikl v projektu magnetických minirobotů. Tento projekt se zabývá polohováním minirobotů pomocí magnetického pole [1]. Tyto miniroboty mají ve svém těle zabudované miniaturní permanentní magnety. Deska, po které se pohybují, je tvořená několika vrstvami planárních aktuačních cívek. Tyto cívky při správném buzení vytváří magnetické pole, které pohybuje minirobotem. Schématické znázornění principu tohoto systému je znázorněno na obrázku 2. Nejnovější prototyp polohovacího zařízení Gryllus, s možností znehybnění robotů v určitých místech desky, je na obrázku 1 [2].



Obr. 1: Prototypová deska Gryllus pro magnetické polohování a dva miniroboty s pěti magnety.



Obr. 2: Schématické zobrazení funkce magnetického polohovacího zařízení. V horní části je pohled z boku. Dolní část zobrazuje pohled shora, kde je znázorněno rozložení aktuačních cívek [2].

Jedním z problémů, který se v tomto projektu řeší, je nezávislé polohování více minirobotů. Nyní je sice možné pohybovat více miniroboty, ale všichni se pohybují ve stejném směru (podaktuovaný systém). Je to dáno provedením aktuačních

MOTIVACE

cívek, kdy celou plochu ovládá jen jeden páár cívek pro každý směr. Tím se výrazně snižuje složitost provedení těchto cívek a zjednoduší se ovládání celého systému, ale za cenu snížení využitelnosti.

Zkoumají se možnosti uspořádání a ovládání celého systému, které by nezávislé polohování minirobotů umožnily. Jednou z možností ovládání systému je metoda komplexního buzení aktuačních cívek. Tímto buzením by se jednotlivé cívky budily tak, aby nad deskou vzniklo magnetické pole, které bude mít v různých místech desky odlišné hodnoty magnetické indukce. Změnou buzení by se tato místa mohla po desce posouvat a tím nezávisle pohybovat s několika miniroboty. Pro tuto novou metodu ovládání byl vytvořen matematický model, který popisuje magnetické pole nad aktuačními cívkami. Tento matematický model nemusí odpovídat realitě. Z tohoto důvodu vznikla idea na konstrukci zařízení, které by dokázalo změřit reálné magnetické pole nad deskou s aktuačními cívkami. Pomocí tohoto měření by bylo možné model zkalirovat a tím zlepšit vlastnosti celého systému.

Z tohoto nápadu vyplynulo zadání se základními požadavky na měřící zařízení. Aktuační cívky jsou na plošném spoji tvořeny cestami s šířkou $120\text{ }\mu\text{m}$ a s izolační mezzerou $380\text{ }\mu\text{m}$. Vzdálenost mezi středy dvou sousedních cest je tedy $500\text{ }\mu\text{m}$. Z těchto rozměrů vychází nutnost snímání magnetického pole s krokem alespoň $50\text{ }\mu\text{m}$, pokud má být změřeno 10 bodů mezi jednotlivými cívkami. Maximální hodnota magnetické indukce nad cívkami byla změřena $1,5\text{ mT}$ [1].

V průběhu vývoje tohoto měřícího zařízení byly objeveny další možnosti využití v projektu magnetických minirobotů i v dalších aplikacích, které jsou popsány v kapitole v.2.

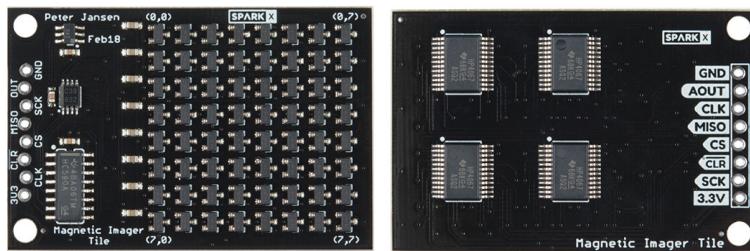
i.4

PODOBNÁ ZAŘÍZENÍ

I.4.1 RYCHLÝ MAGNETICKÝ SCANNER

Vysokorychlostní magnetická dlaždice je projekt [3], ve kterém bylo zkonstruováno zařízení s maticí 8×8 Hallových sond DRV5053VA. Cílem projektu bylo získat plošné zobrazení magnetického pole s vysokou vzorkovací frekvencí. Zařízení obsahuje 64 Hallových sond, čtyři analogové přepínače a A/D převodník.

Toto zařízení bylo pro účely práce pořízeno a zakoupeno. Bylo zjištěno, že dodávaný software je hodně prototypový a dosažené výsledky byly méně přesné, než u zařízení, které popisuje tato práce.

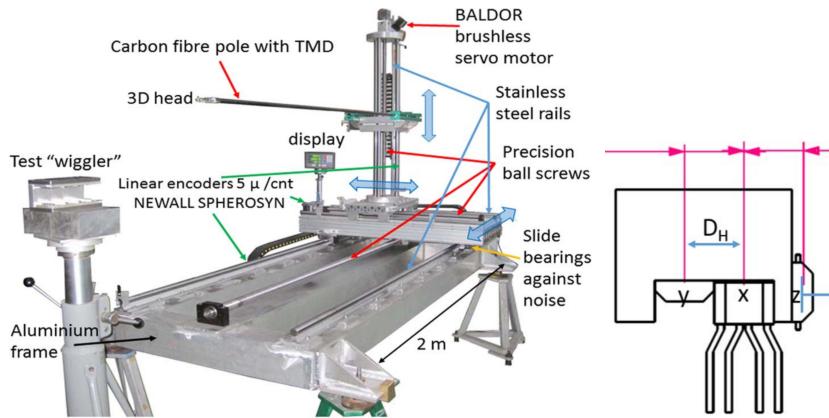


Obr. 3: Magnetic Imager Tile [4].

I.4.2 PŘESNÝ MAGNETICKÝ SCANNER S JEDNÍM SENZOREM

Vysoce přesný 3D scanner magnetického pole pro malé a střední magnety [5] je zařízení, které bylo vyvinuté v CERNu pro mapování magnetického pole permanentních magnetů. Jeho základní částí je lineární tříosý polohovací systém, který umožňuje mapování prostoru $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 2\text{ m}$ s přesností $\pm 20\text{ }\mu\text{m}$. Jako senzor byly použity tři Hallovovy sondy AKM HG302A, které jsou ortogonálně upevněny v keramickém držáku a umožňují tak měření tří složek vektoru magnetické indukce. Měřící rozsah je $2,5\text{ T}$ s rozlišením $200\text{ }\mu\text{T}$.

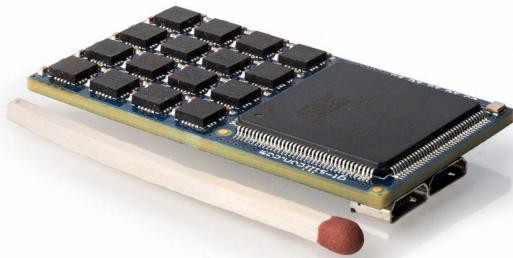
i.4.3 MATICE SENZORŮ MALÝCH ROZMĚRŮ



Obr. 4: Přesný 3D scanner magnetického pole pro malé a střední magnety a detail konstrukce měřícího senzoru [5].

I.4.3 MATICE SENZORŮ MALÝCH ROZMĚRŮ

Toto měřící zařízení bylo vyvinuto pro určování polohy a orientace permanentních magnetů v prostoru [6]. Je založeno na dvou maticích senzorů MPU9150 (tříosý magnetometr, akcelerometr a gyroskop) o rozměrech 4×4 . Celkem zařízení obsahuje 32 magnetometrů a velikostně odpovídá krabičce od sirek. Každá matice je umístěna opačné straně desky plošných spojů. Měřící rozsah je $\pm 1,2$ mT s rozlišením 300 nT a směrodatnou odchylkou šumu $1,4$ μ T. V prostoru o rozměrech 80 mm \times 80 mm \times 80 mm je možné určení polohy s chybou 10 mm a natočení s chybou 15° .



Obr. 5: Matice senzorů malých rozměrů [6].

i.4.4 MAGCAM

I.4.4 MAGCAM

Firma MagCam [7] vyvíjí a prodává magnetické kamery, které jsou založené na matici 128×128 Hallových sond [8, 9, 10]. Hallový sondy jsou vyrobeny na společném křemíkovém substrátu. Prodávají verzi MagCam MiniCube1D, která měří jen jednu složku magnetické indukce a verzi MiniCube3D, která měří složky tří. Celková plocha matice senzorů je $12,7 \text{ mm} \times 12,7 \text{ mm}$. Senzory jsou od sebe vzdálené $100 \mu\text{m}$. Měřící rozsah je $\pm 1 \text{ T}$ s rozlišením $100 \mu\text{T}$. Vyčtení dat ze všech 16 384 Hallových sond trvá méně než 1 s. K samotným magnetickým kamerám také dodávají polohovací zařízení.



Obr. 6: MagCam MiniCube3D a Magcam Portal/Combi Scanner [11, 12].

i.5

PRINCIPY MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE

I.5.1 MĚŘÍCÍ CÍVKA

Nejjednodušší metodou pro měření magnetické indukce je měřící cívka. Vychází ze zákona o elektromagnetické indukci

$$u_i = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (3)$$

kde u_i je napětí indukované do měřící cívky, Φ je magnetický indukční tok a t je čas. Magnetický tok, za předpokladu lineárního a homogenního magnetického pole na ploše S , je možné vypočítat dle vzorce

$$\Phi = NBS, \quad (4)$$

kde N je počet závitů měřící cívky, B je magnetická indukce v kolmém směru na měřící cívku a S je efektivní plocha měřící cívky. Po dosazení do rovnice (3) je možné vyjádřit B jako

$$B = -\frac{1}{NS} \int_{t_1}^{t_2} u_i dt. \quad (5)$$

Z rovnice (3) je vidět, že se musí měnit indukční tok Φ , aby se do měřící cívky indukovalo napětí. Tato metoda je tedy vhodná jen pro v čase proměnná magnetická pole. Měření stacionárních polí je možné pomocí otáčení s měřící cívkou, čímž se dosáhne změny indukčního toku Φ , nebo použitím pomalého integrátoru. Nevýhodou této metody je kapacita mezi jednotlivými závity cívky, která omezuje maximální kmitočet změn měřeného pole.

I.5.2 HALLOVA SONDA

Hallová sonda je tvořena tenkou destičkou z polovodičového materiálu (GaAs, InSb, Si). Na bočních stranách destičky jsou připevněny dvě dvojice kontaktů (viz obrázek 7). Jeden páár je široký, který do destičky přivádí proud ze zdroje konstantního proudu. Druhý páár je úzký a je na něm měřeno Hallovou napětí. Kolmo

i.5.3 ANIZOTROPNÍ MAGNETOREZISTANCE

na plochu destičky působí měřené magnetické pole. Magnetické pole působí na nosiče náboje, které procházejí polovodičovou destičkou, Lorentzovou silou

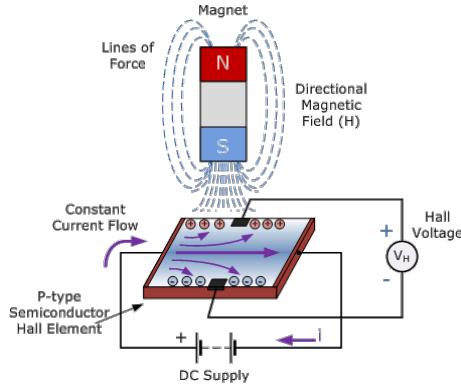
$$\mathbf{F}_m = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}, \quad (6)$$

kde \mathbf{F}_m je výsledný vektor síly působící na nosiče náboje, q je velikost náboje, \mathbf{v} je vektor rychlosti nosičů náboje a \mathbf{B} je vektor měřené magnetické indukce. Nosiče náboje jsou touto silou vychylovány ke stranám destičky, kam jsou upevněny měřící kontakty. Tímto vychýlením vzniká rozdíl potenciálů, protože na jedné straně je více elektronů a na druhé je více dér. Velikost Hallova napětí U_H lze vyjádřit jako

$$U_H = \frac{IB}{\rho_n q d}, \quad (7)$$

kde I je proud protékající destičkou, B je kolmá složka magnetické indukce na plochu destičky, ρ_n je počet nosičů náboje na jednotku objemu, q je velikost náboje a d je tloušťka destičky.

Hallový sondy se dají využít pro měření stacionárních i nestacionárních magnetických polí. Jejich nevýhodou je nižší citlivost a teplotní závislost.



Obr. 7: Schématické znázornění principu Hallové sondy [13].

i.5.3 ANIZOTROPNÍ MAGNETOREZISTANCE

Anizotropní magnetorezistence (AMR) je jev, kdy se mění odpor AMR materiálu v závislosti na vnějším magnetickém poli. Jako materiál pro magnetorezistory se typicky používá permalloy (slitina 81 %Ni a 19 %Fe). Tento materiál má vysokou hodnotu relativní permeability (50 000–140 000) a mimo měření magnetického pole se využívá i pro výrobu panelů, které magnetické pole stíní.

AMR senzory jsou tvořeny tenkou vrstvou permalloye, která je při výrobě senzoru nanesena na křemíkovou destičku. Při výrobě je tato vrstva zmagnetována

i.5.3 ANIZOTROPNÍ MAGNETOREZISTANCE

silným externím magnetickým polem, čímž dojde k natočení všech magnetických domén vrstvy do směru externí magnetizace. Pokud je poté na AMR vrstvu připojen zdroj napětí, tak lze měřit změnu jejího odporu v závislosti na úhlu vektoru výsledné magnetizace. Tento vektor vzniká součtem vektoru interní magnetizace a vektoru měřeného magnetického pole, vůči vektoru interní magnetizace. Senzory jsou navržené tak, aby byly citlivé hlavně na magnetické pole, jehož vektor je kolmý na vektor interní magnetizace.

Působením měřených magnetických polí se může změnit vnitřní magnetizace, která byla vytvořena při výrobě. Proto bývá u této vrstvy integrovaná cívka, kterou lze vrstvu znova definovaně zmagnetovat. U vyspělejších senzorů lze měnit směr proudu touto cívkou a tím měnit i směr magnetizace AMR vrstvy. Toho lze využít pro odstranění ofsetu senzoru. Nejprve se změří hodnota magnetické indukce s nastaveným jedním směrem magnetizace a poté se změří hodnota druhá s nastavenou opačnou magnetizací. Pokud se z obou naměřených hodnot spočítá průměr, tak se získá hodnota s odstraněným ofsetem dle výpočtu

$$B_{out} = \frac{B_+ + B_-}{2} = \frac{2B + B_{off} - B_{off}}{2} = B, \quad (8)$$

kde B_+ je hodnota magnetické indukce změřená s kladnou magnetizací, B_- je hodnota magnetické indukce změřená se zápornou magnetizací, B_{off} je ofset senzoru a B je změřená magnetická indukce s odstraněným ofsetem senzoru.

Pro zvýšení citlivosti a teplotní stability bývají v senzoru zapojeny čtyři shodné AMR vrstvy do Wheatonova můstku. Pro zlepšení linearity jsou obdélníkové AMR vrstvy umístěny pod úhlem 45° vůči protékajícímu proudu [14].

AMR magnetometry se používají v aplikacích, kde je potřeba měřit vektor magnetického pole, tedy například v elektronických kompasech. Integrují se společně s MEMS akcelerometry do jednoho senzoru, pro umožnění poměrně přesného určení orientace daného zařízení v třírozměrném prostoru.

i.6

VÝBĚR SENZORU

Volbu senzoru magnetického pole ovlivnila hlavně požadovaná hodnota měřené magnetické indukce 1,5 mT a aktuální dostupnost jednotlivých typů magnetických senzorů v době výběru. Protože výstup tříosých magnetometrů poskytuje více informací o měřeném magnetickém poli, tak bylo vybíráno hlavně z nich.

Běžně dostupné jsou buď Hallový sondy s analogovým výstupem, nebo magnetometry v integrovaných obvodech s digitálním výstupem. Parametry senzorů, ze kterých bylo vybíráno, jsou uvedeny v tabulce 2.

Vybrán byl senzor LSM303AGR, který v jednom pouzdře integruje tříosý magnetometr, tříosý akcelerometr a teploměr. Parametry magnetometru splňují požadavky zadání a slibují poměrně přesné měření magnetické indukce. Nevýhodou tohoto senzoru je jeho miniaturní pouzdro o rozměrech 2 mm × 2 mm a vyšší cena. Senzor je podrobně popsán v kapitole ii.2.1.

Tab. 2: Parametry různých senzorů magnetického pole.

Označení	Výrobce	Typ	Rozhraní	Rozsah [mT]	Rozlišení	Šum [μ T]	Pouzdro	Cena [Kč]
DRV5053OA	TI	Halova sonda	analog	± 73	-	± 454	SOT-23	13
A1326	Allegro	Halova sonda	analog	± 100	-	± 140	SOT-23W	29
LIS3MDL	STM	3 osý magnetometr	SPI/I ² C	$\pm 1,6$	16b	$\pm 0,4$	LGA-12	25
LSM303AGR	STM	3 osý magnetometr	SPI/I ² C	$\pm 4,9152$	16b	$\pm 0,3$	LGA-12	55
MAG3110	NXP	3 osý magnetometr	I ² C	± 1	15b	$\pm 0,25$	DFN-10	16
MLX90393	Melexis	3 osý magnetometr	SPI/I ² C	± 50	16b	± 1	QFN-16	35
MPU-9250	InvenSense	3 osý magnetometr	SPI/I ² C	$\pm 4,8$	14b	$\pm 1,4$	QFN-24	159

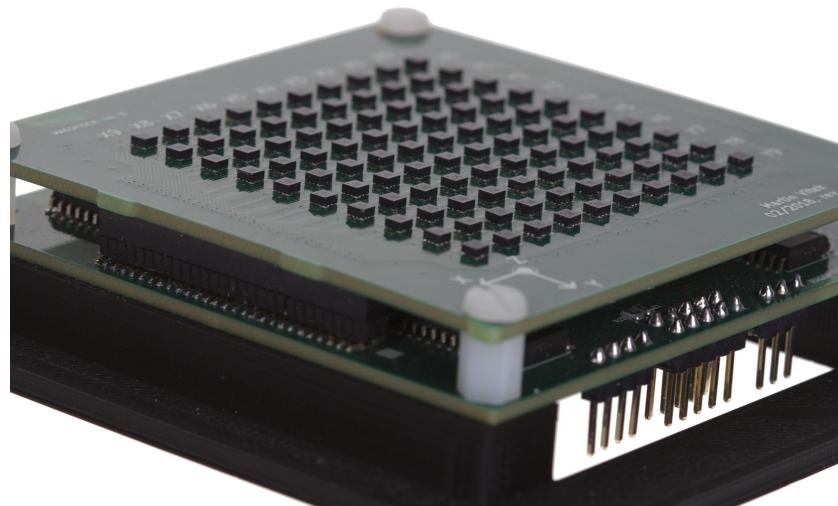
Část II

MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ MAGSPIDER

ii.1

ÚVOD

Pro měření stacionárního magnetického pole v rovině bylo zkonstruováno zařízení, které má kódové jméno **MagSpider**. Bylo zvoleno uspořádání se senzory ve dvourozměrné matici 10×10 s rozestupem 5 mm v obou osách. Toto uspořádání bylo zvoleno z důvodu stonásobnému zrychlení detailního měření oproti situaci jen s jedním senzorem. Zároveň je možné samotným měřícím zařízením MagSpider získat snímek magnetického pole v základním rozlišení $10 \text{ px} \times 10 \text{ px}$ bez nutnosti pohybu zařízením nebo měřeným předmětem.



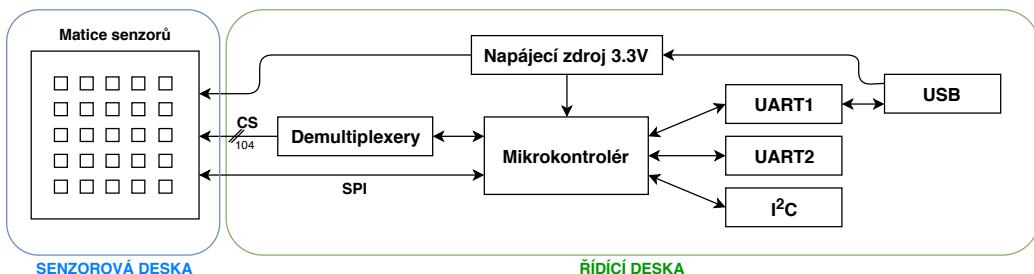
Obr. 8: Měřící zařízení MagSpider.

ii.2

HARDWARE

Základem zařízení je mikrokontrolér, který řídí senzory a komunikuje s počítačem. Matice magnetometrů je k mikrokontroléru připojena sběrnicí SPI. Komunikace se zařízením je možná přes rozhraní USB s integrovaným převodníkem pro vytvoření virtuálního sériového portu. Dále jsou vyvedená rozhraní UART a I²C pro možnost dalšího rozšíření zařízení. Napájení je zajištěno přes USB nebo externím napájecím konektorem.

MagSpider je rozdělen na dvě desky plošných spojů. První z nich je deska senzorová, na které jsou umístěny senzory pro měření magnetického pole. Druhá deska je řídící a zajišťuje komunikaci mezi senzory a počítačem. Díky tomuto modulárnímu designu je možná snadná výměna jakékoli části zařízení. Například při změně typu senzorů, lze vyměnit jen senzorovou desku a ponechat desku řídící.



Obr. 9: Blokové schéma měřícího zařízení MagSpider.

II.2.1 SENZORY

Vybraný senzor magnetického pole LSM303AGR [15] od firmy STMicroelectronics obsahuje tříosý magnetometr, tříosý akcelerometr a teploměr v miniaturním pouzdře LGA-12 s 12 piny o rozměrech 2 mm × 2 mm × 1 mm. Parametry senzoru jsou shrnutы v tabulce 3, parametry magnetometru v tabulce 4 a parametry akcelerometru v tabulce 5.

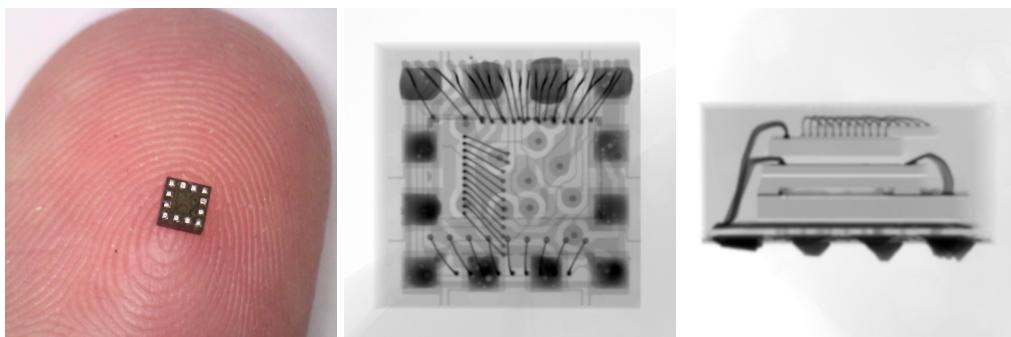
ii.2.1 SENZORY

Senzor je primárně určený do přenosných zařízení, jako jsou mobilní telefony nebo tablety, pro určení jejich prostorové orientace nebo pro detekci pohybu. Pro toto použití se hodí hlavně z hlediska nízké spotřeby. Díky jeho dobrým parametrym (viz tabulka 4) byl zvolen pro tuto aplikaci. Magnetometr je založen na AMR (Anizotropní Magnetorezistance) technologii [16, 17].

Senzor komunikuje buď přes sběrnici I²C, nebo přes třívodičové SPI. Napájecí napětí je v rozsahu 1,71 V–3,6 V. Senzor je interně tvořen dvěma samostatnými čipy, což je vidět na blokovém schématu (obrázek ??) a rentgenovém snímku (obrázek 10). Jeden čip zajišťuje akcelerometr s teploměrem a druhý je vyhrazen pro magnetometr. Toto rozdělení například umožňuje uspávat zvlášť každou část senzoru. Také to ale znamená, že má senzor dvě adresy na I²C sběrnici (magnetometr: 0x1E, akcelerometr: 0x19) a na sběrnici SPI má dva výběrové signály CS (chip select).

Dále jsou ze senzoru vyvedeny signály od vnitřních přerušení. Akcelerometr má přerušení dvě, která je možné využít pro signalizaci detekce pohybu, nebo volného pádu. Magnetometr má přerušení jedno, které může signalizovat, že jsou k dispozici nová naměřená data, nebo překročení nastavené hodnoty magnetické indukce.

Akcelerometr i magnetometr obsahují struktury, které umožňují otestovat oba senzory bez nutnosti pohybu se senzorem nebo použití dalšího externího zařízení. U magnetometru se jedná o zapínatelnou cívku, která při průchodu proudem vytváří magnetické pole s magnetickou indukcí v rozsahu 1,5 µT–50 µT. Akcelerometr má integrované struktury, které při testu působí elektrostatickou silou na MEMS struktury a senzor měří o 66 mg–1 404 mg zvětšenou velikost zrychlení.



Obr. 10: Fotografie senzoru LSM303AGR mikroskopem a jeho rentgenové snímky.

Senzory nemají nastavitelnou adresu, a tak by, při zvolení komunikace přes sběrnici I²C, byl problém s adresováním všech sto senzorů. Adresování by bylo možné vyřešit použitím velkého počtu I²C multiplexerů (například PCA9547 [18]). Byla tedy zvolena komunikace přes sběrnici SPI, u které se jednotlivé senzory ad-

ii.2.1 SENZORY

Tab. 3: Parametry senzoru LSM303AGR udávané výrobcem.

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	1,71 V–3,6 V
Odběr magnetometru	200 μ A
Odběr akcelerometru	1,6 μ A
Odběr ve spánku	2 μ A
Rychlosť I ² C	100 kHz, 400 kHz, 1 MHz, 3,4 MHz
Rychlosť SPI	max. 10 MHz
Pracovní teplotní rozsah	–40 °C až 85 °C

Tab. 4: Parametry magnetometru senzoru LSM303AGR udávané výrobcem.

Parametr	Hodnota
Rozsah	$\pm 4,9152$ mT
Citlivost	150 nT/LSB
Offset	$\pm 6 \mu$ T
Maximální frekvence měření	100 Hz (150 Hz)
RMS šum	300 nT
Změna citlivosti s teplotou	$\pm 0,03\%/\text{}^{\circ}\text{C}$
Ozměna offsetu s teplotou	± 30 nT/ $\text{}^{\circ}\text{C}$

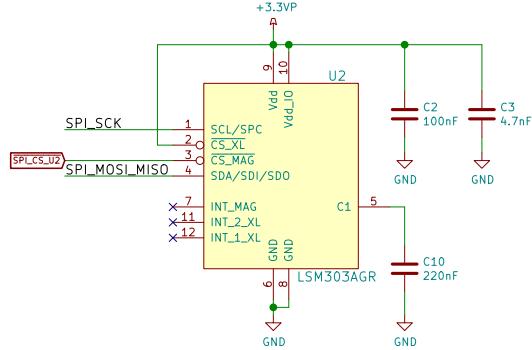
Tab. 5: Parametry akcelerometru senzoru LSM303AGR udávané výrobcem.

Parametr	Hodnota
Rozsah	± 2 g, ± 4 g, ± 8 g, ± 16 g
Citlivost	(0,98; 1,95; 3,9; 11,72) mg/LSB
Offset	± 40 mg
Maximální frekvence měření	1,344 kHz
RMS šum	3 mg
Změna citlivosti s teplotou	$\pm 0,01\%/\text{}^{\circ}\text{C}$
Ozměna offsetu s teplotou	$\pm 0,5$ mg/ $\text{}^{\circ}\text{C}$

resují CS signály. Sběrnice SPI je také rychlejší. Hodinový kmitočet může být až 10 MHz oproti 3,4 MHz u sběrnice I²C a při komunikaci se senzorem se nemusí u každé zprávy posílat adresa senzoru.

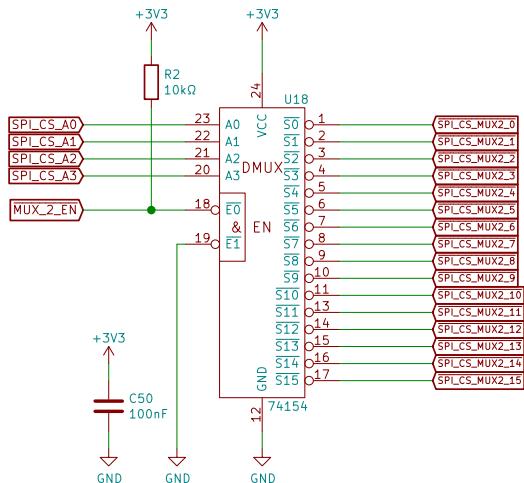
Každý čip v pouzdře (magnetometr i akcelerometr) má vlastní výběrový signál CS. Pro komunikaci se všemi senzory (magnetometry i akcelerometry) je potřeba ovládat 200 výběrových signálů. Jelikož akcelerometry nejsou pro zařízení nutné, tak byly připojeny jen čtyři (jeden v každém rohu senzorové matice) a počet výběrových signálů se tím snížil na 104. Z připojených akcelerometrů je získávána teplota senzorů.

ii.2.1 SENZORY



Obr. 11: Schéma zapojení jednoho ze senzorů LSM303AGR.

Aby se nemusel použít zbytečně výkonný, velký a drahý mikrokontrolér, který by měl dostatečný počet vstupních výstupních pinů pro ovládání všech výběrových signálů, tak bylo zvoleno jiné řešení. Byly využity demultiplexery CD74HC154M [19], které ze 4 adresních signálů generují invertovaný výstupní signál 1 ze 16 (15 signálů je v logické 1 a jeden je v logické 0). Pro obslužení 104 výběrových signálů je potřeba použít 7 těchto demultiplexerů (které dohromady poskytují 112 výstupů). Z důvodu jednoduššího návrhu DPS bylo použito 8 demultiplexerů (4 na každé straně desky). Mikrokontrolér ovládá 4 adresní signály (SPI_CS_A0 až SPI_CS_A3), které jsou připojeny na všechny demultiplexery a 8 signálů, které zapínají jednotlivé demultiplexery (MUX_1_EN až MUX_8_EN).

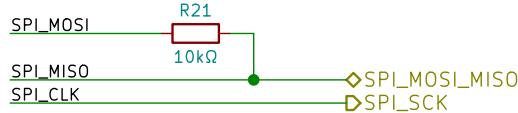


Obr. 12: Schéma zapojení jednoho z demultiplexerů.

Jak bylo zmíněno v předchozím textu, senzor komunikuje po SPI sběrnici s využitím jen třech signálů oproti čtyřem standardním (signály MOSI a MISO jsou spo-

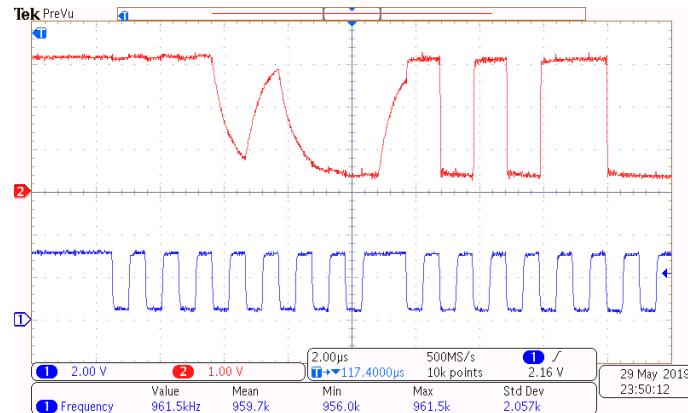
ii.2.1 SENZORY

jeny do jednoho signálu). Zvolený mikrokontrolér nemá integrovanou podporu pro třívodičové SPI. Bylo tedy použito zapojení viz obrázek 13. Signál SPI_MOSI z mikrokontroléru je přes rezistor R21 spojen se signálem SPI_MISO. Pokud mikrokontrolér zapisuje data do senzoru, signál SPI_MOSI se chová jako v běžném SPI. Pokud se data ze senzoru čtou, signál SPI_MOSI se nastaví do logické 1 (mikrokontrolér vysílá 0xFF) a rezistor R21 se pro signál SPI_MISO chová jako pull-up.



Obr. 13: Schéma zapojení třívodičového SPI. Na levé straně jsou signály připojeny do mikrokontroléru, na straně pravé do senzorů.

Toto řešení je sice jednoduché, ale při prvním testování se objevil problém s vysíláním dat do senzorů při rychlosti vyšší než 500 kHz (příjem byl bezproblémový). Hodnota rezistoru R21 10 k Ω byla příliš vysoká, aby se stihly dostatečně rychle nabíjet kapacity plošného spoje a vstupů senzorů (viz obrázek 14). Senzory kvůli této chybě špatně rozeznávaly vysílané bity. Hodnota odporu rezistoru R21 byla snížena na hodnotu 1 k Ω a s touto hodnotou je možné bez problémů komunikovat s frekvencí hodin SPI až 2 MHz.

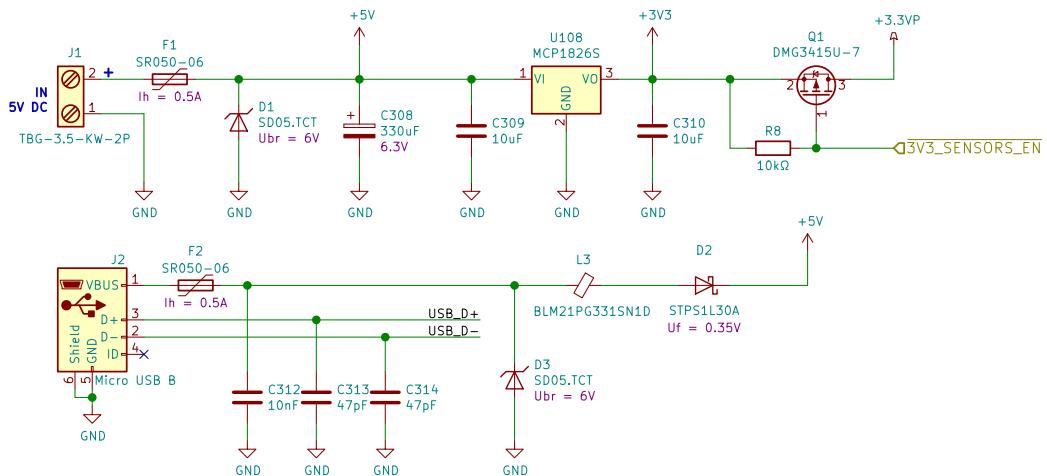


Obr. 14: Průběhy signálů na SPI sběrnici. Modré (1) je označen signál SPI_CLK. Červené (2) je označen signál SPI_MOSI_MISO. Prvních 8 bitů odesílá mikrokontrolér, následujících 8 bitů je odpověď od senzoru.

ii.2.2 NAPÁJENÍ

II.2.2 NAPÁJENÍ

Zařízení je možné napájet buď přes napájecí konektor **J1** nebo přes USB konektor **J2**. Obě napájecí větve jsou jištěny vratnými pojistkami PTC **F1**, **F2** (SR050-06 [20]) s jmenovitým proudem 500 mA. Pojistky tvoří společně s transily **D1**, **D3** (SD05.TCT [21]) ochranu proti přepólování napájecího napětí a ochranu přepěťovou. Napájení z USB konektoru **J2** je filtrováno feritovou perlou **L3** (BLM21PG331SN1 [22]) a je připojeno přes schottky diodu **D2** (STPS1L30A [23]) s typickým úbytkem v propustném směru 260 mV na hlavní napájecí větev +5V. Tím je umožněno napájení přes konektor **J1** a komunikace přes USB ve stejný okamžik.



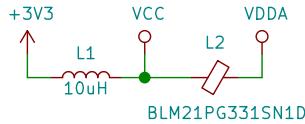
Obr. 15: Schéma zapojení napájení.

Z +5V větve je napájený UART – USB převodník **U110**. Zbytek zařízení je napájen z větve +3V3, kterou vytváří lineární stabilizátor **U108** (MCP1826S [24]). Lineární stabilizátor byl vybrán místo spínaného zdroje z důvodu menšího elektromagnetického vyzařování, které by mohlo ovlivňovat měření magnetického pole. Jedná se o stabilizátor postavený na CMOS technologii, s úbytkem napětím typicky 250 mV. Nízký napěťový úbytek umožňuje spolehlivou funkci při napájení z USB, kdy se musí počítat s úbytkem napětí na USB kabelu, konektoru a s úbytkem na diodě **D2**. Se započtením úbytků může být na vstupu stabilizátoru jen 4,1 V.

Senzory jsou napájené z větve +3.3VP přes MOSFET tranzistor **Q1** (DMG3415U [25]), který je ovládán z mikrokontroléru U111 signálem **3V3_SENSORS_EN**. Tímto zapojením je možné senzory restartovat nebo je vypnout pro snížení spotřeby zařízení. Při testování se ukázalo, že není možné senzorům vypnout napájení, protože demultiplexery mají v klidovém stavu na výstupech stálé logickou 1 a toto napětí se dostává přes ochranné diody na pinech senzorů na jejich napájení. Pro

ii.2.3 MIKROKONTROLÉR

odpojení napájení senzorů by bylo třeba vypnout i napájení demultiplexerů, čímž by se dále snížil odběr zařízení.



Obr. 16: Schéma zapojení napájení mikrokontroléru.

Mikrokontrolér **U111** je napájen z větví VCC a VDDA. Větev VCC je tvořena z větve +3V3 přes odrušovací tlumivku **L1**. Napájí digitální části mikrokontroléru a je z ní tvořena větev VDDA přes feritovou perlu **L2**, která napájí analogovou část mikrokontroléru a operační zesilovač.

II.2.3 MIKROKONTROLÉR

Zařízení je řízeno mikrokontrolérem **U111** (ATSAMD21G17A [26]), který je založen na jádře ARM Cortex M0+. Parametry vybraného mikrokontroléru jsou:

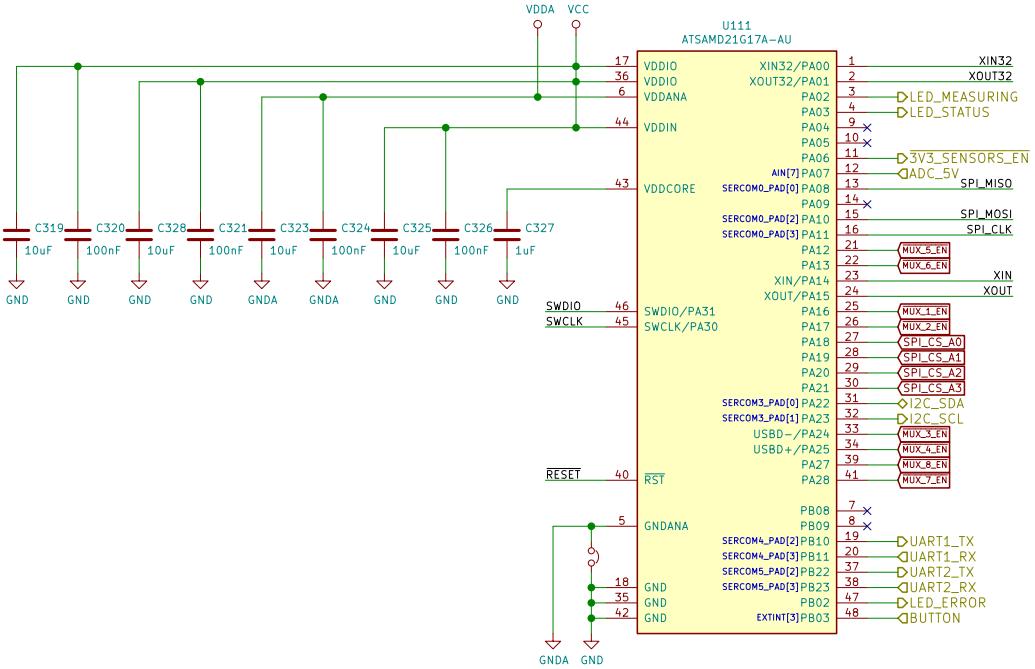
- 128 kB FLASH
- 16 kB RAM
- 48 MHz maximální pracovní kmitočet
- 38 vstupně/výstupních pinů
- 6 × SERCOM (Serial Communication Interface - UART, SPI, I²C)
- 12 bit A/D převodník, 350 ksps
- 10 bit D/A převodník, 350 ksps
- 6 × čítač/časovač
- 1 × USB (host/device)

K mikrokontroléru jsou připojeny dva krystaly. Krystal **Y1** s rezonančním kmitočtem 32,768 kHz, který je v mikrokontroléru vynásoben pomocí DFLL (Digital Frequency Locked Loop) na 48 MHz, což je hlavní hodinový kmitočet mikrokontroléru. Krystal **Y2** s rezonančním kmitočtem 25 MHz byl zamýšlen jako záložní, pokud by nastal problém s krystalem **Y1**. Při testování žádný problém nenastal a krystal **Y2** slouží jako zdroj hodinového kmitočtu pro čítač, který vytváří přerušení s přesnou periodou 1 ms.

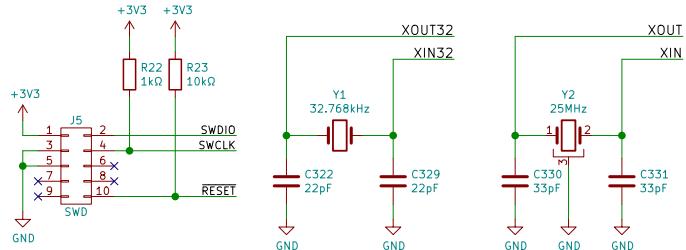
Mikrokontrolér je možné programovat a ladit přes standardní rozhraní SWD, které je vyvedené na konektor **J5**.

Pro komunikaci s počítačem bylo vybráno rozhraní USB. Mikrokontrolér **U111** sice obsahuje integrovaný řadič USB sběrnice, ale kvůli zjednodušení jeho programování bylo zvoleno řešení s osvědčeným externím převodníkem UART – USB

ii.2.3 MIKROKONTROLÉR



Obr. 17: Schéma zapojení mikrokontroléru.



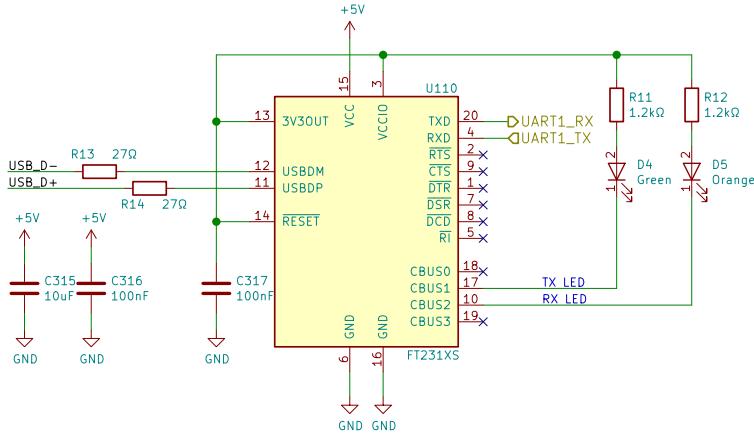
Obr. 18: Schéma zapojení krystalů a programovacího konektoru.

U110 (FT231XS [27]). Pro sériovou výrobu by se vyplatilo tento obvod vynechat a použít interní periferii mikrokontroléru. Tím by se ušetřila část nákladů na výrobu zařízení.

Převodník se na straně počítače chová jako standardní virtuální sériový port a na straně mikrokontroléru jako UART. Maximální možná přenosová rychlosť převodníku na UART rozhraní jsou 3 Mbd. Zapojení je standardní dle katalogového listu výrobce. Piny pro hardwarové řízení toku nejsou využity. Programovatelné piny CBUS1 a CBUS2 jsou využity pro LED, které indikují příjem a odesílání dat.

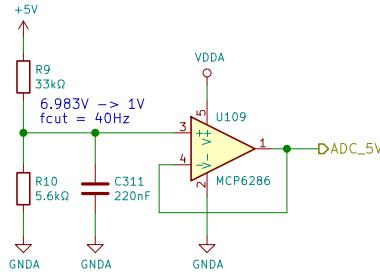
Pro informaci o velikosti napájecího napětí je na napájecí větvi +5V zapojen napěťový dělič **R9, R10**, který snižuje měřené napětí do rozsahu napěťové reference mikrokontroléru (0 V–1 V). Dělič společně s kondenzátorem **C311** tvoří filtr

ii.2.4 KONSTRUKCE



Obr. 19: Schéma zapojení převodníku UART – USB.

typu dolní propust se zlomovou frekvencí 40 Hz pro odfiltrování rušení. Následuje operační zesilovač **U109** (MCP6286 [28]) zapojený jako napěťový sledováč, který zajišťuje nízkou výstupní impedanci pro A/D převodník.



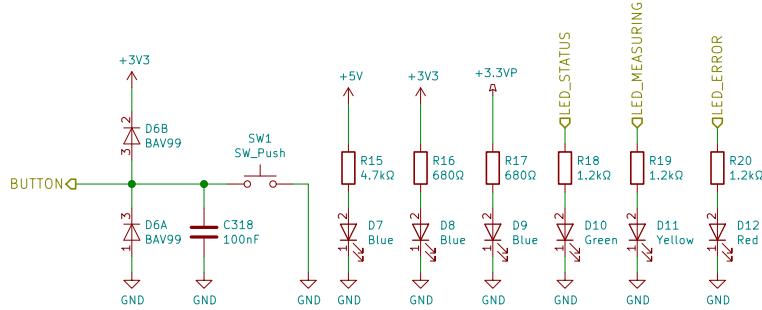
Obr. 20: Schéma zapojení měření napájecí větve +5V.

Pro snadnou diagnostiku zařízení jsou na LED **D7**, **D8** a **D9** připojeny na důležité napájecí větve +5V, +3V3 a +3.3VP. LED **D10**, **D11** a **D12** jsou připojeny k mikrokontrolérovi a indikují stav zařízení, stav měření a chybové stavy. Pro umožnění interakce s uživatelem je k dispozici tlačítko **SW1**. Tlačítko bylo využito při testovaní a programování zařízení. Všechny funkce se ovládají komunikačním protokolem z počítače.

II.2.4 KONSTRUKCE

Zařízení je navrženo na dvou čtyřvrstvých deskách plošných spojů, které jsou propojeny dvěma konektory s 2×28 piny a roztečí 1,27 mm. Vnitřní vrstvy **IN2** a **IN3** jsou vyhrazené pro napájení. Na vnějších vrstvách (**TOP** a **BOT**) jsou propojeny signální spoje. Všechny součástky, kromě některých konektorů, jsou určeny

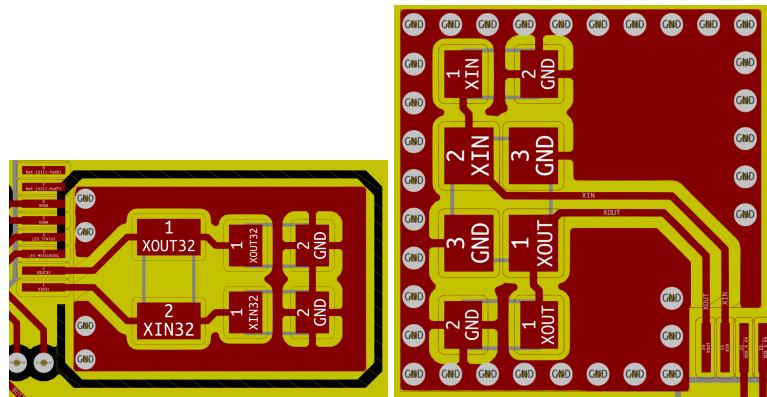
ii.2.4 KONSTRUKCE



Obr. 21: Schéma zapojení tlačítka a indikačních LED.

pro povrchovou montáž. Pasivní součástky jsou použity ve velikostech 0603 a 0805.

Při návrhu bylo dbáno na kvalitní provedení napájení integrovaných obvodů, hlavně tedy na umístění jejich blokovacích kondenzátorů. Dále byla věnována pozornost krystalovým oscilátorům, především krystalu $Y1$, který je náchylnější na rušení.

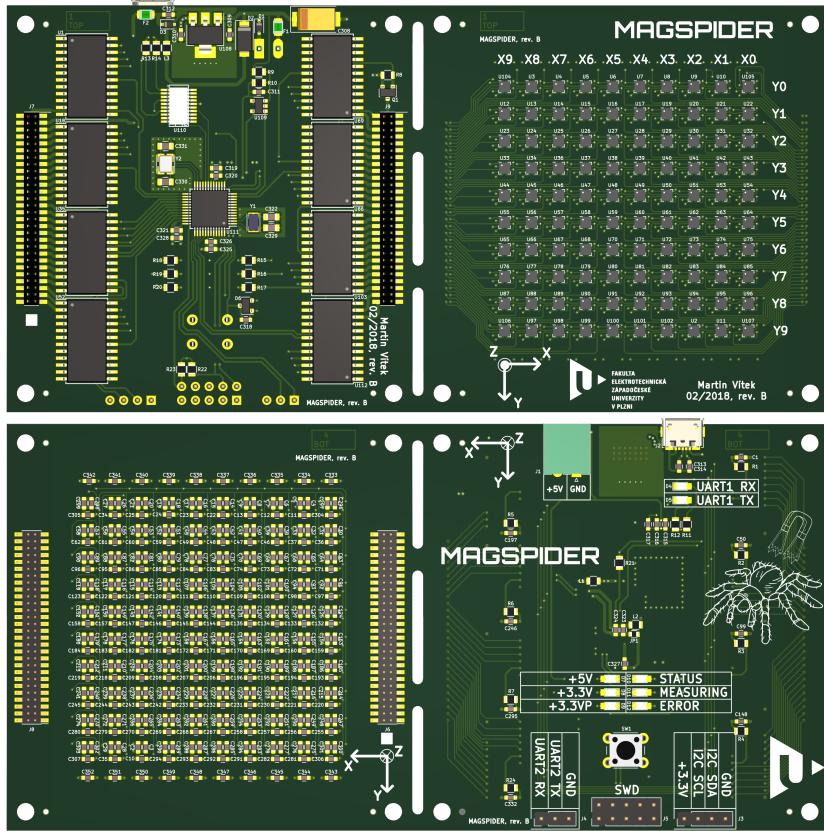


Obr. 22: Návrh plošného spoje v okolí krystalů $Y1$ a $Y2$.

Návrh byl proveden v návrhovém systému KiCad verze 5. Plošné spoje a šablony pro pájecí pastu vyrobila firma PragoBoard. Povrchová úprava byla zvolena v chemickém zlatě, z důvodu výsledné rovinosti pájecích plošek, která usnadňuje osazování SMD součástek.

Senzory LSM303AGR jsou dostupné jen v pouzdře typu LGA (Land Grid Array). Všech 12 vývodů je na spodní straně pouzdra a nejsou vyvedené na kraj (spodní strana pouzdra je detailně vidět na obrázku ??). Z tohoto důvodu bylo zvoleno pájení přetavením. Plošný spoj byl navržen se součástkami z obou stran. Při pájení přetavením se nejdříve osadí a zapájí jedna strana a poté druhá. Což znamená, že první osazená strana se pájí dvakrát, ale podruhé jsou součástky orientované

ii.2.4 KONSTRUKCE



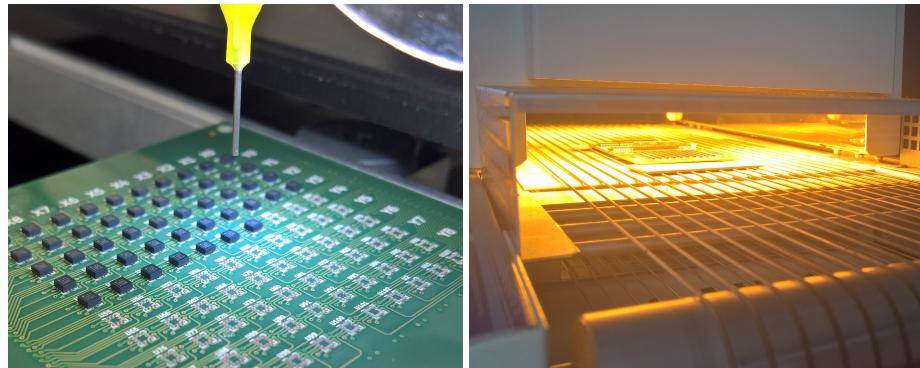
Obr. 23: Render plošného spoje, strana TOP na horním obrázku a strana BOT na spodním.

dolů. Proto jsou na straně BOT jen malé součástky, které se při druhém pájení udrží povrchovým napětím pájky a nespadnou. Na straně TOP, která se pájí jen jednou, jsou choulostivé senzory a velké integrované obvody.

Na plošné spoje byla nanesena pájecí pasta přes šablonu (tloušťka 120 µm, plocha otvorů 95 % pájecích plošek). Plošné spoje byly osazeny na ručním osazovacím stroji, do kterého se upne plošný spoj a z podavačů se pomocí vakuové jehly umisťují součástky do pájecí pasty (obrázek 24). Osazený plošný spoj byl zapájen v průběžné pájecí peci. Poté byly ručně dopájeny konektory, tlačítko a bylo opraveno několik chyb, které vznikly při přetavení.

Po osazení a zapájení všech součástek bylo zjištěno, že je někde v zařízení zkraťované napájení. Měřením bylo zjištěno, že jsou zkratované některé piny senzorů. Pro lokalizaci zkratů v matici senzorů byla deska rentgenována (obrázek 25). Rentgenových snímků ukázaly, že 75 ze 100 senzorů mají zkraty na některých pinech.

ii.2.4 KONSTRUKCE



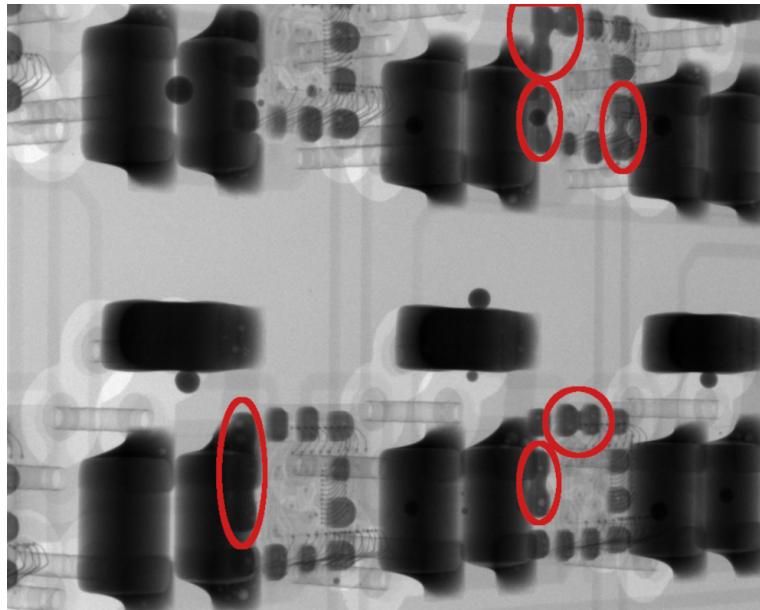
Obr. 24: Fotografie z osazování a pájení zařízení.

Zkraty byly pravděpodobně způsobeny tím, že se vakuová jehla na osazovacím stroji vypíná tím, že se součástka zatlačí do pájecí pasty. Tím ale dojde k plošné expanzi pájecí pasty a u jemných součástek, jako jsou osazované senzory, se spojí pájecí plošky expandovanou pájecí pastou. Dále na plošné spoji není nepájivá maska mezi pájecími ploškami senzorů. Mezi ploškami by měla být nepájivá maska o šířce 50 μm , ale společnost PragoBoard umí vyrobit minimální šířku 100 μm , což také mohlo být jedním z důvodů zkratů.

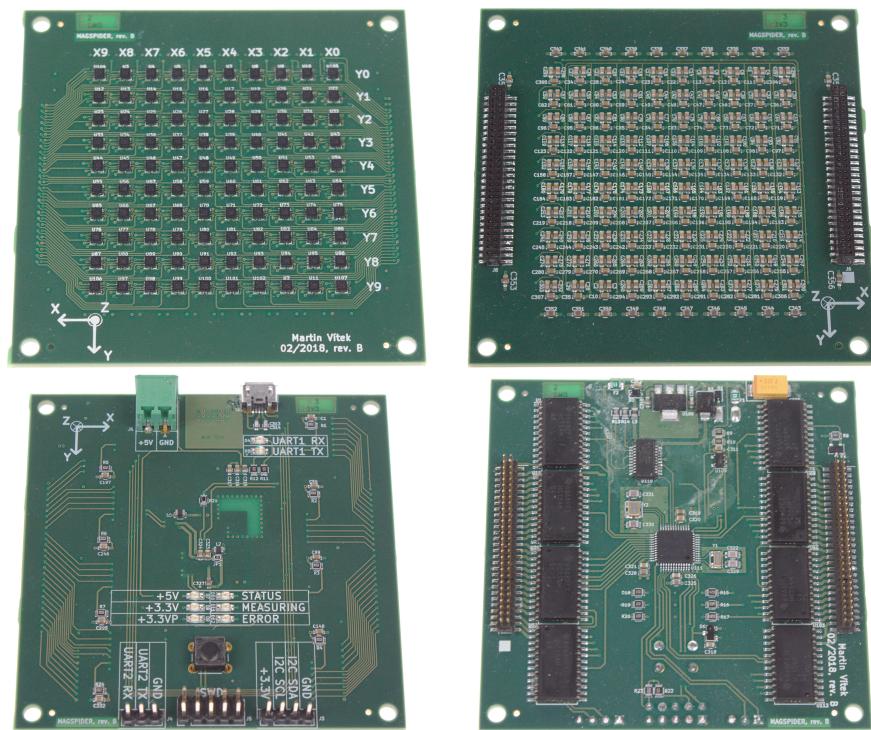
Všechny senzory byly odpájeny a připájeny znovu jinou technikou, kdy se vakuová jehla vypínala tlačítkem na stroji. Tím nedošlo k expanzi pájecí pasty mezi pájecí plošky. Touto technikou se podařilo většinu senzorů zapájet bez zkratů. Chybně zapájené senzory se pak ručně horkovzdušnou pájecí stanicí odpajovaly a znova pájely tak dlouho, dokud nebyly zapájeny bez zkratů.

Některé ze senzorů poté začaly měřit špatné hodnoty nebo přestaly komunikovat, což mohlo být způsobeno četnými teplotními cykly, kterými senzory prošly při opakovaném pájení. Po výměně vadných senzorů je možné komunikovat se všemi senzory, které měří korektní hodnoty magnetické indukce.

ii.2.4 KONSTRUKCE



Obr. 25: Detail zkratů (označeny červeně) pájecích plošek senzorů z rentgenu.



Obr. 26: Osazené a zapájené DPS zařízení. Na horních fotografiích je senzorová deska a na spodních je deska řídící.

ii.3

FIRMWARE

Firmware mikrokontroléru byl naprogramován v jazyce C++17. Pro přeložení a nahrání kódu do mikrokontroléru není potřeba vývojové IDE. Pro překlad lze použít překladač `arm-none-eabi-gcc`, standardní knihovna `newlib`, `cmake` a `make`. Nahrání programu do mikrokontroléru je možné s pomocí `OpenOCD`. S využitím těchto nástrojů lze program přeložit a nahrát pomocí níže uvedených příkazů ve složce projektu.

```
cd MagSpider/FW
mkdir build && cd build
cmake ..
make
../upload.sh
```

Firmware nejprve inicializuje potřebné periférie mikrokontroléru, poté inicializuje senzory a následně čeká na příkazy z počítače. Při zapnutém kontinuálním vyčítání dat z magnetometrů jsou změřená data periodicky odesílána do počítače.

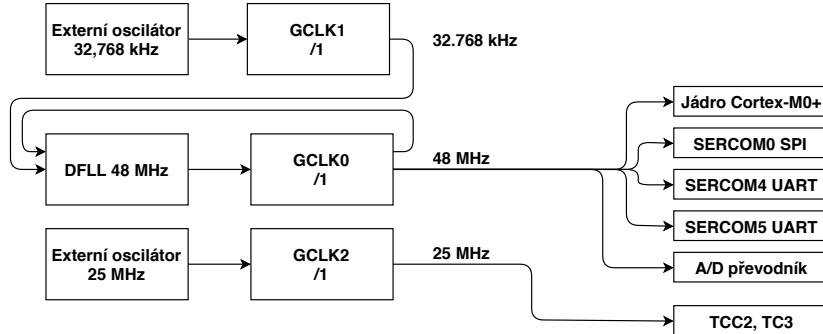
II.3.1 INICIALIZACE MIKROKONTROLÉRU

Nastavení generátorů hodin

Hodinový systém mikrokontroléru je velmi flexibilní a umožňuje unikátní hodinový kmitočet pro každou periférii. Celkem je k dispozici 9 generátorů hodin GCLK (Generic Clock Controller). Každý může mít vstup z jiného oscilátoru a má vlastní nastavitelnou děličku, kterou se dá hodinový kmitočet dále upravovat. Vyhodou je možnost nastavení na míru dané aplikaci. Vysoký kmitočet mohou mít jen periférie, které ho opravdu potřebují a ostatní mohou mít kmitočet nižší, čímž je možné dosáhnout nižší spotřeby. Nebo je naopak možné aby některé čítače měly hodinový kmitočet nastavený až na 96 MHz, i když má jádro maximální dovolený kmitočet jen 48 MHz. Nevyhodou je složitější nastavení a nutnost syn-

ii.3.1 INICIALIZACE MIKROKONTROLÉRU

chronizovat přístup do některých registrů periférií, čímž se do nich prodlužuje přístupová doba.



Obr. 27: Schéma nastavení hodinových signálů.

Nastavení generátorů hodin zajišťuje funkce `SamSystem::init_clock()`. Externí oscilátor 32,768 kHz je připojen na generátor GCLK1, který je zdrojem pro fázový závěs DFLL. Fázový závěs násobí vstupní signál na kmitočet 48 MHz. Jeho výstup je přiveden do generátoru GCLK0, který je zdrojem pro jádro mikrokontroléru, periférie SERCOM a A/D převodník. Hodinový signál z externího oscilátoru 25 MHz je veden přes generátor GCLK2 do periférií čítačů/časovačů.

Při nastavení hodinového kmitočtu jádra mikrokontroléru na více než 24 MHz (při napájecím napětí 2,7 V–3,63 V) je nutné nastavit počet čekacích cyklů FLASH paměti na 1 (NVMCTRL->CTRLB.bit.RWS = 1). Bez tohoto nastavení dojde k nepředvídatelnému chování mikrokontroléru, protože by nebyla dodržena minimální doba přístupu a FLASH by nestihla korektně vystavovat data.

Nastavení A/D převodníku

A/D převodník je nastaven metodou `ADC_class::init()` na automatické převzorkování na 14 bit rozlišení, interní napěťovou referenci 1 V a jsou použity kalibrační hodnoty offsetu a linearity, které jsou z výroby uloženy v paměti mikrokontroléru.

Z hlavní smyčky programu je každých 500 ms spuštěn převod A/D převodníku, který změří napětí na +5V napájecí větví (signál `ADC_5V`), napětí na věti +3V3 (interní signál mikrokontroléru) a teplotu na interním senzoru mikrokontroléru.

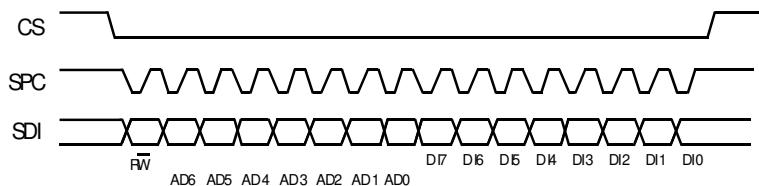
Po dokončení převodů se změřené hodnoty přepracují na napětí a teplotu a jsou odeslány do počítače.

ii.3.2 KOMUNIKACE SE SENZORY

II.3.2 KOMUNIKACE SE SENZORY

Senzory jsou připojeny přes sběrnici SPI, která je v mikrokontroléru obsluhována periférií SERCOM0. Hodinový kmitočet sběrnice je nastaven jen na 2 MHz, kvůli problému se spojením signálů MOSI a MISO přes rezistor **R21** (viz obrázek 13). SPI je nastaveno na mód 3 (setup - falling, sample - rising) s osmi datovými bity.

Komunikační protokol senzorů je jednoduchý. Nejprve se odešle adresa registru společně s bitem, který indikuje, jestli se má z registru číst nebo do něj zapisovat (viz obrázek 28). Je možné zapsat nebo přečíst několik po sobě jdoucích registrů. Stačí pouze na začátku komunikace poslat adresu a dále odesílat / přijímat bajty. Adresa registru, ke kterému se aktuálně přistupuje, se automaticky inkrementuje.



Obr. 28: Zápis 1B do registru magnetometru [15]. CS je výběrový signál senzoru, SPC je hodinový signál SPI_SCK a SDI je kombinovaný datový signál SPI_MOSI_MISO.

Základem pro snadnou komunikaci se senzory je ve vytvořeném programu třída SPI_select. Obsahuje metody `select()` a `deselect()`, které podle zadaných souřadnic senzoru v matici a podle typu senzoru (magnetometr, nebo akcelerometr) ovládají signály SPI_CS_AX a MUX_y_EN demultiplexerů. Demultiplexery poté ovládají jednotlivé CS signály senzorů.

Implementace SPI protokolu senzorů se nachází v šablonové třídě `LSM303AGR_SPI<type>`. Při jejím instancování se šablonou předá typ senzoru. Metody této třídy se dle této hodnoty řídí, zda mají komunikovat s magnetometrem, nebo s akcelerometrem. Tím se v programu ušetří několik cyklů. Rozhodování o tom, s jakým typem senzoru se komunikuje, provede již překladač. V této třídě se nachází instance třídy SPI_select. Implementované jsou metody `write_register()`, `read_register()` které pracují se zadánou adresou registru a jedním bajtem, nebo polem bajtů. Dále jsou zde implementované metody `set_bits()` a `clear_bits()`, které manipulují s jednotlivými bity daného registru senzoru.

Metody které jsou specifické pro magnetometr jsou implementovány ve třídě `LSM303AGR_Mag`. Tato třída dědí od třídy `LSM303AGR_SPI` s šablonovým parametrem `type` nastaveným na `SPI_MAGNETOMETER`. Jsou zde implementovány základní metody, které umožňují nastavení magnetometru, zjištění jeho stavu a

ii.3.2 KOMUNIKACE SE SENZORY

získání naměřených dat. Metoda `check_who_am_i()` ověřuje, jestli je komunikace s magnetometrem funkční. Přečte se obsah registru `WHO_AM_I_M` (`0x4F`), který obsahuje specifickou hodnotu `0b01000000` a porovná se s touto hodnotou uloženou v paměti mikrokontroléru. Také je implementován self-test v metodě `self_test()`, kterou je možné ověřit, že je magnetometr funkční. Metoda změří magnetickou indukci s vypnutou a poté zapnutou cívkou, která je integrována v senzoru. Rozdíl těchto hodnot musí být v rozmezí, které udává katalogový list. Podrobnosti o self-testu a dalších vlastnostech senzoru jsou uvedeny v aplikační poznámce AN4825 [29].

Třída `LSM303AGR_ACC` implementuje základní metody pro ovládání akcelerometru. Jsou zde pouze základní metody `init()` pro inicializaci akcelerometru, `check_who_am_i()` pro ověření komunikace a `get_temperature()` pro získání teploty z interního čidla senzoru. Čtení dat z akcelerometrů nebylo implementováno. Tato data nejsou pro současný stav zařízení zajímavá.

Obě třídy pro magnetometr i akcelerometr jsou instancované ve třídě `LSM303AGR`, která představuje fyzický senzor a má v proměnných `x` a `y` uloženou pozici senzoru v matici.

Matice senzorů je instancovaná ve třídě `MagSpider` jako dvojrozměrné pole `LSM303AGR sensor[10][10]`. Tato třída dále dále obsahuje metody pro hromadné ovládání, testování a získávání dat ze všech senzorů. K jednotlivým senzorům přistupuje následujícím způsobem:

```
// Získání změřené magnetické indukce ze senzoru[5][5]
int32_t mag_x, mag_y, mag_z;
sensor[5][5].mag.get_data(mag_x, mag_y, mag_z);

// Získání teploty ze senzoru[1][9]
int16_t temperature = sensor[1][9].acc.get_temperature();

// Inicializace všech senzorů
for (auto& row : sensor)
{
    for (auto& item : row)
    {
        item.mag.init();
        item.acc.init();
    }
}
```

ii.3.3 KOMUNIKAČNÍ PROTOKOL

II.3.3 KOMUNIKAČNÍ PROTOKOL

Rozhraní UART

Pro hlavní komunikaci s počítačem se používá periférie SERCOM4 v režimu UART s nastavením, které je sumarizováno v tabulce 6. Dále je k dispozici druhé rozhraní UART využívající SERCOM5, které je využito pro ladící výpisy. Tabulka 7 udává parametry tohoto rozhraní.

Tab. 6: Nastavení hlavního UART rozhraní.

Parametr	Hodnota
Baudrate	3 000 000 Bd
Počet datových bitů	8
Počet stop bitů	1
Parita	není
Řízení toku	není

Tab. 7: Nastavení vedlejšího UART rozhraní.

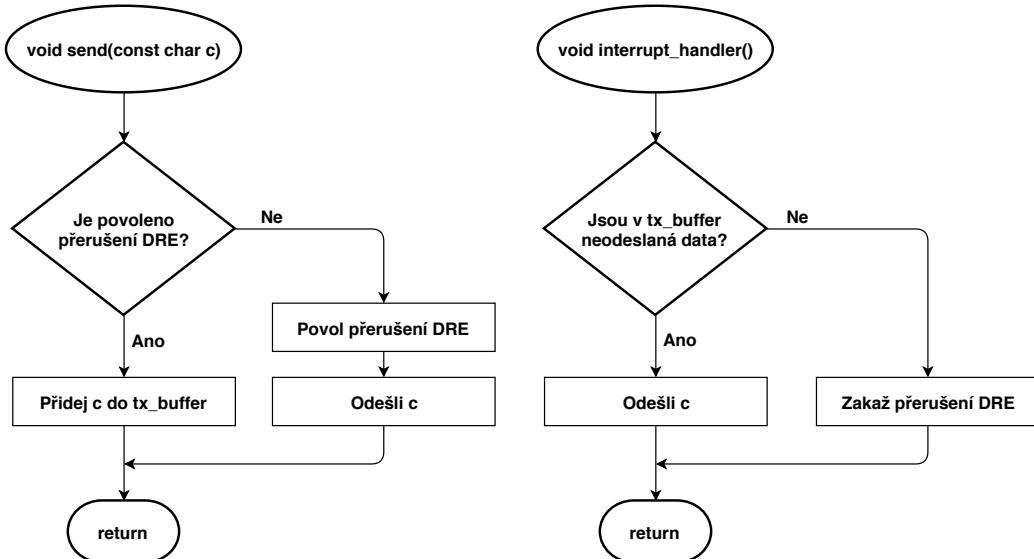
Parametr	Hodnota
Baudrate	115 200 Bd
Počet datových bitů	8
Počet stop bitů	1
Parita	není
Řízení toku	není

Periferie SERCOM3 je napojena na konektor *J3*, na který je možné připojit rozšíření přes sběrnici I²C.

Přístup k UART perifériím je implementován ve třídě USART, která se instancuje referencí na danou SERCOM periférii. Příjem i vysílání dat je vyřešeno přes přerušení RXC (Receive Complete) pro příjem a DRE (Data Register Empty) pro odesílání. Mikrokontrolér tak nemusí čekat na přijetí a odeslání dat. Přijímaná data jsou ukládána v kruhovém bufferu `rx_buffer`, data pro odeslání v bufferu `tx_buffer`.

Při vývoji bylo změřeno, že odeslání naměřeného jednoho vzorku ze všech magnetometrů (1 900 B) trvá 20 ms. Pro využití nejvyšší možné vzorkovací frekvence magnetometrů 100 Hz, musí vyčtení dat z magnetometrů a jejich odeslání do počítače trvat maximálně 10 ms. Kombinace vysoké rychlosti UART rozhraní a poměrně velkého množství dat znamená, že mikrokontrolér stráví hodně času přepínáním mezi normálním programem a obsluhou přerušení. Odesílání v přerušení bylo tedy vypnuto a při obyčejném blokujícím odesílání trvá odeslání na-

ii.3.3 KOMUNIKAČNÍ PROTOKOL



Obr. 29: Vývojový diagram odesílání dat s využitím přerušení.

měřených dat jen 7 ms (teoretické minimum je 5,7 ms). Lepším řešením by bylo použití DMA (Direct Memory Access) pro automatický přenos dat z paměti do UART periférie. Pro využití vzorkovací frekvence 100 Hz by bylo nutné zvýšit rychlosť SPI sběrnice senzorů. Vyčtení magnetických dat při aktuální frekvenci 2 MHz trvá 10 ms. Při aktuální implementaci je maximální vzorkovací frekvence magnetometrů 50 Hz.

Popis komunikačního protokolu

Pro jednoduchou a spolehlivou komunikaci mezi měřícím zařízením MagSpider a počítačem byl naprogramován komunikační protokol (třída `Protocol`). Formát zprávy je popsán v tabulce 8.

První bajt je vždy '#' a značí začátek zprávy. Druhý bajt definuje příkaz a třetí délku následujících dat. Pokud je délka dat větší než nula, tak následují datové bajty. Zpráva končí dvěma bajty CRC-16, které se počítá z předcházejících bajtů příkaz, délka dat a data. CRC se počítá dle polynomu $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$ s počáteční hodnotou 0x0000 (XModem). Tento typ CRC byl použit, protože ho vybraný mikrokontrolér umí počítat v periférii DMAC (Direct Memory Access Controller) a výpočet se tedy nemusel implementovat v programu. Příklad zprávy, která obsahuje změřenou magnetickou indukci z jednoho magnetometru, je uveden v tabulce 9. Všechny typy zpráv jsou uvedeny v příloze A.3.

Pokud není celá zpráva přijata do 500 ms, tak jsou přijatá data smazána a znova se čeká na bajt značící začátek další zprávy.

ii.3.3 KOMUNIKAČNÍ PROTOKOL

Tab. 8: Formát zprávy.

Popis	Start	Příkaz	Délka dat	Data	CRC
Počet bajtů	1	1	1	0–16	2

Tab. 9: Příklad zprávy se změřenou magnetickou indukcí senzoru [8,1].

Start	' #'
Příkaz	' m'
Délka dat	14
Data[0]	(uint8_t) 8 <i>x souřadnice senzoru</i>
Data[1]	(uint8_t) 1 <i>y souřadnice senzoru</i>
Data[2-5]	(int32_t) -29100 <i>magnetická indukce v ose x [nT]</i>
Data[6-9]	(int32_t) -17100 <i>magnetická indukce v ose y [nT]</i>
Data[10-13]	(int32_t) -76200 <i>magnetická indukce v ose z [nT]</i>
CRC	0x2669

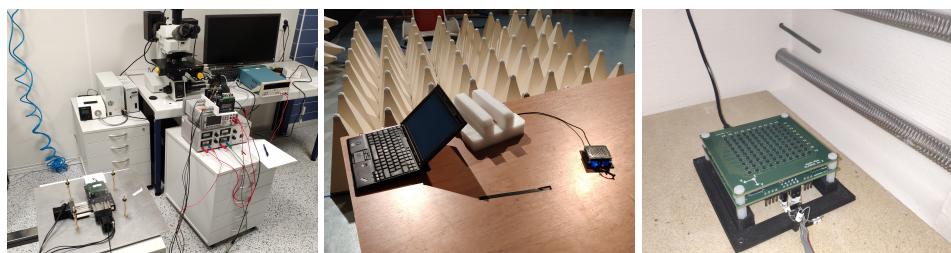
ii.4

CHARAKTERISTIKY

V této kapitole jsou uvedeny charakteristiky zařízení a popis, jak byly změřeny. Jelikož je zařízení primárně určeno pro měření magnetického pole, tak byly změřeny jen charakteristiky magnetometrů. Některá měření byla provedena v místnostech, které jsou magneticky odstíněné. Linearita a šum byly změřeny v laboratoři mikroskopie a časový drift byl změřen v EMC komoře.

Pro zpřesnění měření bylo potřeba provést další kalibrace zařízení. Největšího zpřesnění by se dosáhlo kalibrací ofsetu senzorů a nepřesného osazení magnetometrů na plošném spoji. Tyto kalibrace ještě nebyly provedeny a budou předmětem dalšího výzkumu.

Při měření byla také zjištěna reakce magnetometrů na přesycení. Zvyšováním magnetické indukce nad měřící rozsah senzoru dochází k poklesu měřené hodnoty. Senzor nemá indikaci přesycení a nelze tedy tento stav detektovat.



Obr. 30: Fotografie z měření některých charakteristik. Zleva je mikroskopová laboratoř, EMC komora a měření v laboratorní peci.

II.4.1 ODBĚR ZAŘÍZENÍ

Odběr zařízení byl změřen multimetrem Hioki DT4282 [30] na konektoru *J1* při napájení 5 V z laboratorního zdroje. Změřené hodnoty jsou v tabulce 10.

ii.4.2 LINEARITA

Tab. 10: Změřené hodnoty napájecího proudu při 5 V. ODR (Output Data Rate) je vzorkovací frekvence magnetometrů.

Nastavení senzorů	I [mA]
Odpojeno napájení senzorů	27,5
Idle	28,9
ODR 10 Hz	46,5
ODR 20 Hz	54,4
ODR 50 Hz	70,8
ODR 100 Hz	90,5

II.4.2 LINEARITA

Linearita byla změřena pomocí cívky se vzduchovým jádrem, která byla umístěna na měřícím zařízení. Cívka byla napájena stejnosměrným proudem z laboratorního zdroje a proud byl měřen stolním multimetrem Agilent 34460A [31]. Pro každou hodnotu proudu protékající cívkou bylo změřeno 100 vzorků (2 s), které byly zprůměrovány a vyneseny do grafu 31. Je vidět, že výstup magnetometru je lineární. Maximální chyba je ± 300 nT, což odpovídá 0,006 % z rozsahu.

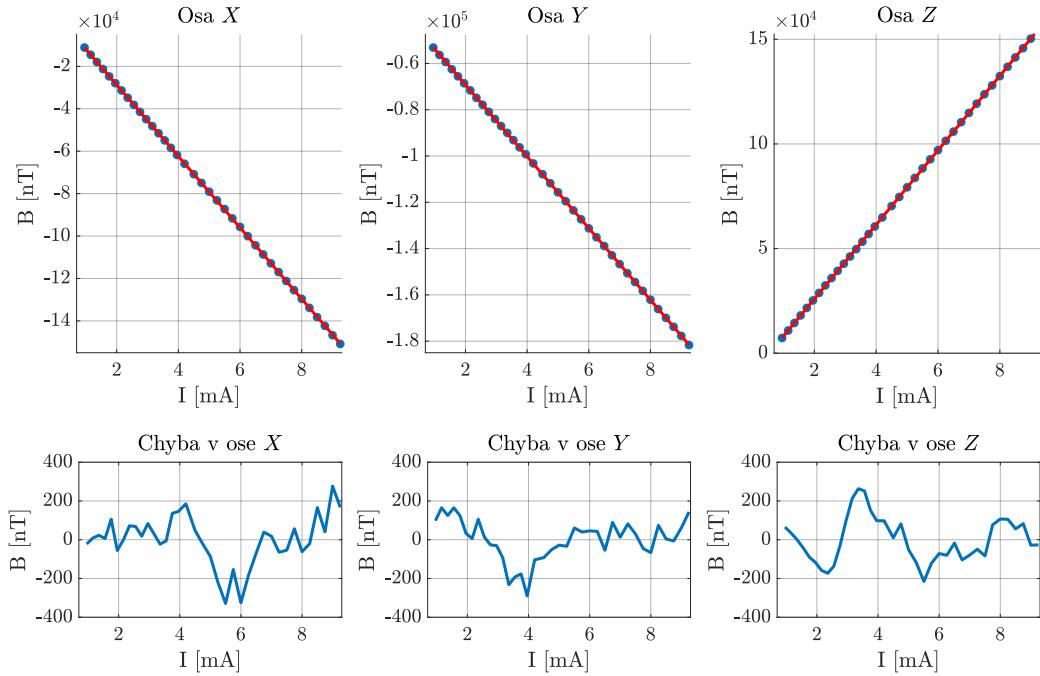
II.4.3 AMPLITUDOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA

Pro zjištění maximální měřitelné frekvence změn magnetického pole byla změřena amplitudová frekvenční charakteristika. Měření bylo provedeno cívkou se vzduchovým jádrem, která byla buzena sinusovým signálem z generátoru funkcí Tektronix AFG1022 [32]. ODR (Output Data Rate - vzorkovací frekvence) magnetometrů byla nastavena na 50 Hz. Pro každou frekvenci bylo změřeno 750 vzorků (15 s). Amplituda změřeného signálu pro každou měřenou frekvenci byla vynešena do grafu 32.

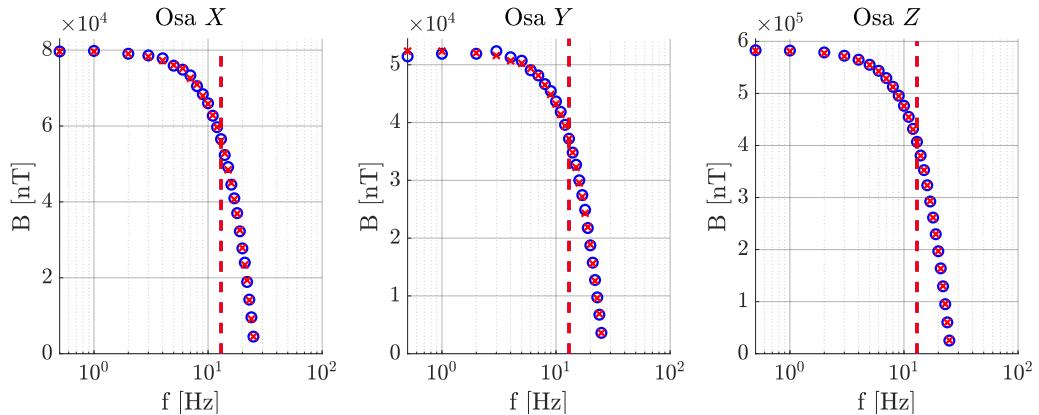
Magnetometry obsahují integrovaný digitální filtr typu dolní propust, jehož zlomová frekvence lze nastavit na hodnoty ODR/2 nebo ODR/4. Měření bylo provedeno pro obě nastavení filtru.

Jak je vidět z grafu 32, nastavení filtru nemá vliv na změřenou charakteristiku. Pravděpodobně je toto chování způsobeno zapnutou kompenzací ofsetu magnetometru. Maximální frekvence odpovídá teoretickému předpokladu dle Shannon-Kotelníkova teorému. Vzorkovací frekvence musí být alespoň dvakrát větší, než je frekvence měřeného signálu. Při vzorkování frekvencí 50 Hz s filtrem dolní propust s frekvencí zlomu 25 Hz vychází maximální frekvence měřeného signálu 12,5 Hz. Měřením byla tato frekvence určena jako 12 Hz.

ii.4.3 AMPLITUDOVÁ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA



Obr. 31: Modrá kolečka, v horní části, znázorňují změřenou magnetickou indukci. Červeně je zobrazena přímka, která je proložena změřenými body. V dolní části je zobrazena odchylka naměřených hodnot od přímky.

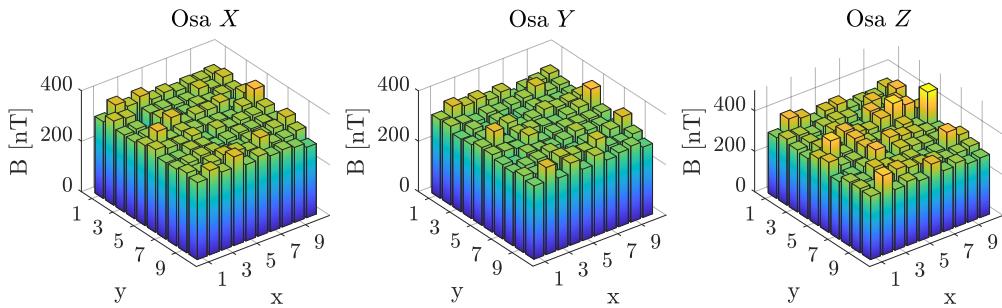


Obr. 32: Modrá kolečka a červené krížky znázorňují změřenou amplitudu magnetické indukce pro nastavení filtru na ODR/2 a ODR/4. Čárkovaná čára znázorňuje f_{max} , na které amplituda klesla o 3 dB (0.71 z $B_{0,5\text{Hz}}$)

ii.4.4 ŠUM

II.4.4 ŠUM

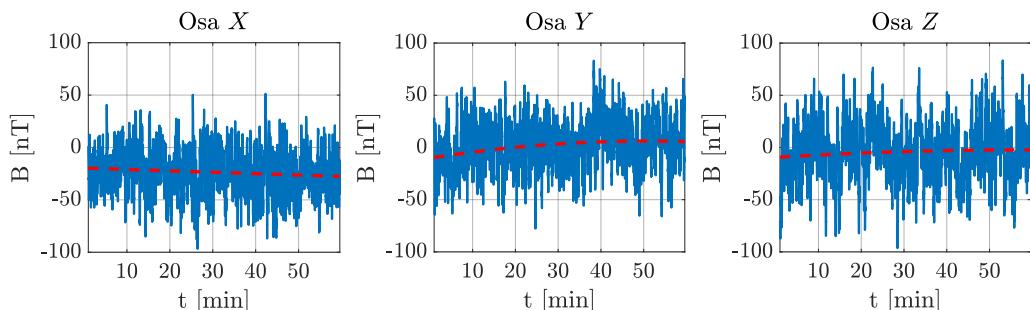
Pro analýzu šumu magnetometrů bylo změřeno 3 000 vzorků (60 s) magnetického pole v magneticky odstíněné místnosti (mikroskopová laboratoř). Graf 33 zobrazuje směrodatnou odchylku všech magnetometrů. Hodnota směrodatné odchylky je průměrně 350 nT, tedy 0,007 % z rozsahu. I přes nedokonalé stínění laboratoře nedošlo k výraznému ovlivnění měření šumem prostředí, což je vidět z výsledné hodnoty směrodatné odchylky.



Obr. 33: Změřená směrodatná odchylka magnetické indukce všech magnetometrů pro všechny osy. Osy x a y určují pozici senzoru v matici. Osa z zobrazuje směrodatnou odchylku

II.4.5 ČASOVÁ STABILITA

Časová stabilita magnetometrů byla stanovena v EMC komoře, kde bylo změřeno 200 000 vzorků (≈ 1 h) magnetického pole okolního prostředí. V grafu 34 je zobrazena odchylka od průměrné hodnoty několika tisíc vzorků ze začátku měření. Odchylka v čase je menší (± 100 nT) než rozlišení senzoru (150 nT).



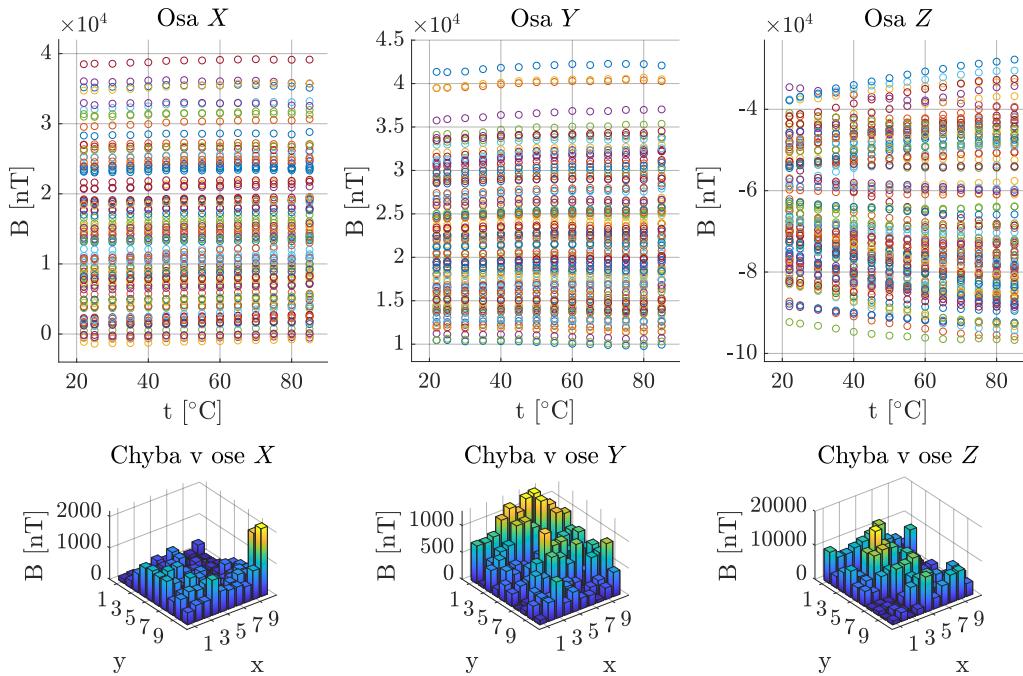
Obr. 34: Modrá čára zobrazuje odchylku změřené magnetické indukce. Červená čára je polynom druhého řádu proložený naměřenými daty.

ii.4.6 TEPLITNÍ STABILITA

II.4.6 TEPLITNÍ STABILITA

Pro určení teplotní stability bylo zařízení vloženo do laboratorní pece a bylo zahříváno z pokojové teploty až na 85 °C, což je maximální provozní teplota senzorů udávaná výrobcem. Při zahřívání bylo změřeno 250 vzorků (5 s) magnetického pole v peci. Pec byla při měření vypnuta, aby měření nebylo ovlivněno magnetickým polem topných spirál, které kolem nich vzniká při průchodu proudu. Teplota byla měřena interními teploměry senzorů, které měří teplotu čipu. Ta je oproti okolí vyšší díky vlastnímu zahřívání. Měření bylo provedeno s tolerancí $\pm 0,5$ °C od požadované hodnoty teploty. Změřená magnetická indukce byla pro danou teplotu zprůměrována z naměřených dat.

Graf 35 zobrazuje teplotní závislost všech magnetometrů. U některých os některých senzorů je teplotní závislost poměrně velká, u jiných je minimální. Osa Z má chybu o řád vyšší než ostatní osy. Pro přesné měření je nutné, aby se co nejméně měnila teplota senzorů.



Obr. 35: Horní část grafu zobrazuje teplotní závislost všech magnetometrů při změně teploty z 22 °C na 85 °C. V dolní části, osy x a y udávají pozici senzoru v matici a osa z zobrazuje absolutní hodnotu z rozdílu mezi změřenou magnetickou indukcí při 30 °C a 85 °C.

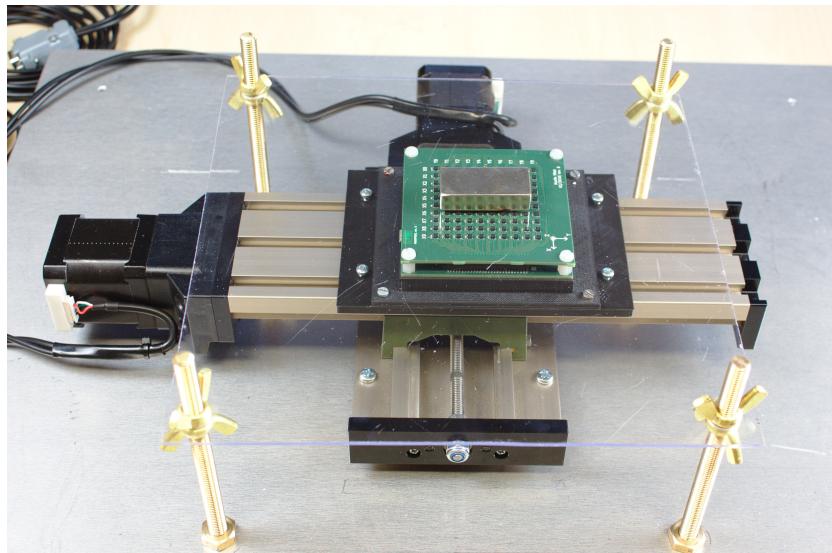
Část III

POLOHOVACÍ ZAŘÍZENÍ DERMAGTISCH

iii.1

ÚVOD

Pro získání většího prostorového rozlišení, než je základních $10\text{ px} \times 10\text{ px}$ (krok 5 mm) měřicího zařízení MagSpider, bylo zkonstruováno polohovací zařízení s kódovým jménem **DerMagTisch**. Polohovací zařízení má velmi malý krok pohybu 5 μm , díky kterému je možné zmapovat magnetické pole v prostoru o velikosti 50 mm \times 50 mm s výsledným rozlišením až 10 000 px \times 10 000 px.



Obr. 36: Polohovací zařízení DerMagTisch.

iii.2

HARDWARE

Polohovací zařízení je založeno na křížovém stole KT 70 CNC-ready [33] (obrázek 38), jehož parametry jsou uvedeny v tabulce 11. Tento stůl byl vybrán, protože je z většiny vyroben z hliníku, což je nemagnetický materiál. Bohužel, některé části jsou železné (závitové tyče, plechy motorů). Tyto feromagnetické části v okolí měřeného předmětu deformují jeho magnetické pole, čímž vzniká chyba měření. Pokud dojte k jejich zmagnetování, tak se remanentní indukce sčítá s polem měřeného předmětu (chyba je v řádu desítek μT).

Tab. 11: Parametry křížového stolu KT 70 CNC-ready udávané výrobcem.

Parametr	Hodnota
Posun (osa x)	150 mm
Posun (osa y)	70 mm
Krok	5 μm

Tab. 12: Parametry krokových motorů LDO-42STH47-1804ACP udávané výrobcem.

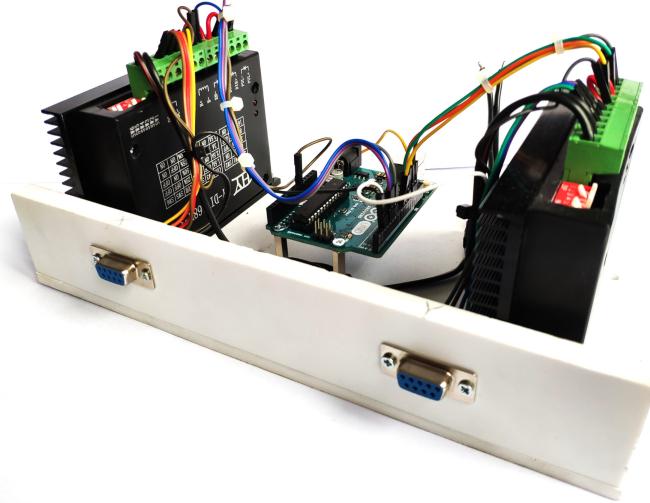
Parametr	Hodnota
Typ	bipolární
Úhel kroku	1,8°
Statický moment	0,5 N m
Jmenovitý proud	1,8 A/fáze

III.2.1 ELEKTRONIKA

Křížový stůl obsahuje dva krokové motory LDO-42STH47-1804ACP (parametry jsou uvedeny v tabulce 12) a každá osa má jeden koncový spínač. Krokové motory jsou řízeny drivery HY-DIV168N-3.5A [34], které jsou založeny na integrovaném obvodu TB6560AHQ [35]. Driver je určen pro řízení bipolárního krokového motoru s maximálním proudem 3,5 A a umožňuje až 16 krokové mikrokrokování s maximální frekvencí kroků 15 kHz. Bylo by tedy možné krok posunu polohovacího zařízení snížit až na šestnáctinu 5 μm , tedy na 312,5 nm, ale tato možnost není využita. Pozice, které jsou v mikrokrocích, mají mnohem menší statický moment a nemusejí být od sebe vzdáleny přesně $\frac{1}{16}$ základního kroku [36]. Mikrokrokování je použito pro snížení vibrací a hluku.

iii.2.1 ELEKTRONIKA

Drivery jsou ovládány z vývojové desky Arduino UNO, která obsahuje AVR mikrokontrolér ATmega328p [37]. Komunikace s počítačem je řešena přes USB rozhraní a virtuální sériový port, který obsluhuje integrovaný převodník UART – USB realizovaný předprogramovaným mikrokontrolérem Atmega16U2 [38].



Obr. 37: Propojené drivery s řídícím mikrokontrolérem.

Ovládání driveru je možné opticky oddělenými vstupy PUL (řízení kroků), DIR (nastavuje směr otáčení) a EN (zapíná výstup driveru). Drivery jsou propojeny s mikrokontrolérem dle tabulky 13 a jsou nastaveny na výstupní proud 1,5 A, 100 % momentu a mikrokrokování s 16 mikrokroky.

Koncové spínače křížového stolu jsou připojeny k pinům 2 (osa x) a 3 (osa y), na kterých jsou zapnuty interní pull-up rezistory mikrokontroléru.

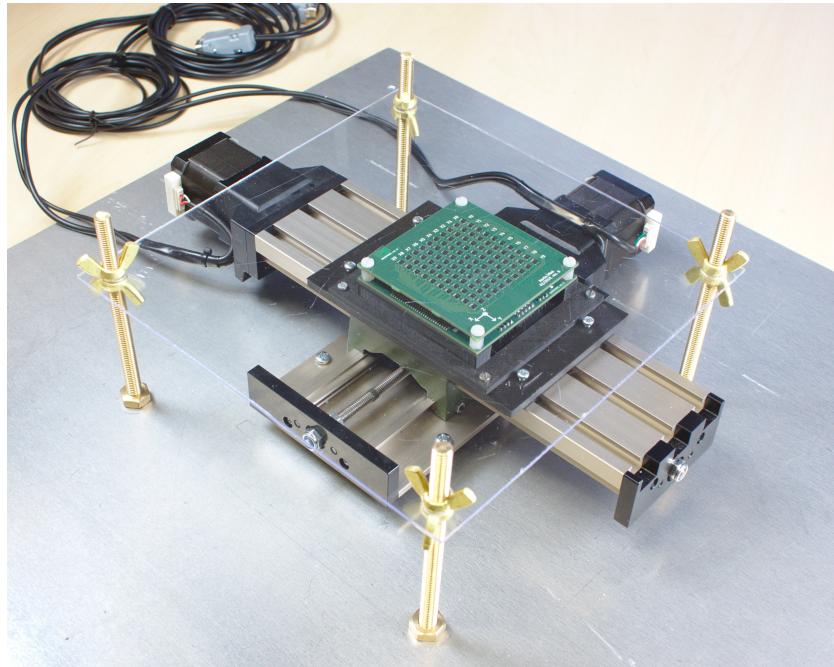
Tab. 13: Propojení driverů a mikrokontroléra.

Driver x	Arduino	Driver y	Arduino
EN+	5 (PD5)	EN+	9 (PB1)
EN-	GND	EN-	GND
DIR+	4 (PD4)	DIR+	10 (PB2)
DUR-	GND	DUR-	GND
PUL+	6 (PD6 - OC0A)	PUL+	11 (PB3 - OC2A)
PUL-	GND	PUL-	GND

iii.2.2 MECHANIKA

III.2.2 MECHANIKA

Křížový stůl je připevněn na hliníkové desce, která slouží jako stabilní základ zařízení. Deska má rozměry 500 mm × 500 mm × 10 mm. Dále jsou do ní zašroubovány čtyři mosazné závitové tyče M8 délky 115 mm, na které se uchycují přípravky pro upevnění měřeného předmětu.

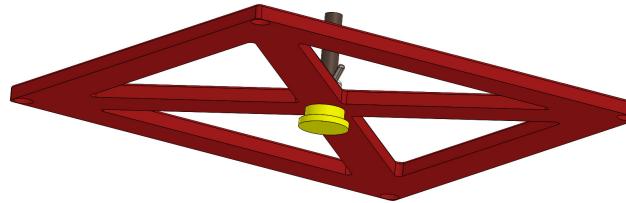


Obr. 38: Sestavené polohovací zařízení DerMagTisch.

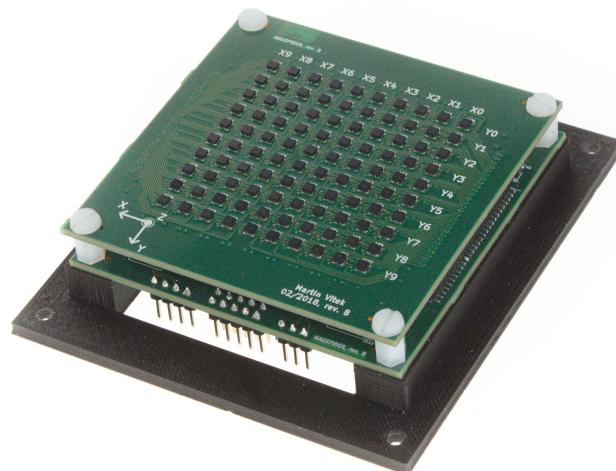
Jedním z přípravků je plexisklo s rozměry 225 mm × 225 mm × 3 mm, na které je možné měřený předmět položit (viz obrázek 38). Dále byl navržen držák (obrázek 39), který umožňuje zmapovat měřený předmět z menší vzdálenosti (u plexiskla je minimální vzdálenost 3 mm). Prototyp tohoto držáku byl vytištěn na 3D tiskárně.

Měřící zařízení MagSpider je ke křížovému stolu upevněno přes dvojdílný držák. První díl je přišroubovaný k samotnému MagSpideru a slouží zároveň i jako základna, pokud není MagSpider namontován na křížovém stole. Druhý díl tvoří redukci mezi T drážkami křížového stolu a dílem prvním.

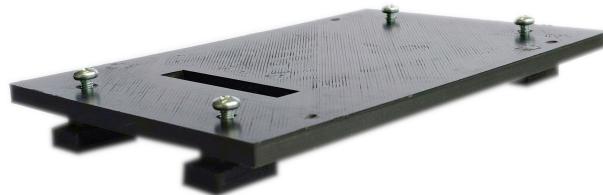
iii.2.2 MECHANIKA



Obr. 39: 3D model prototypu držáku pro měřená tělesa. Červený rám je nasazen na závitových tyčích základny. Měřené těleso je přilepeno k žluté části, kterou lze pomocí závitové tyče umístit těsně nad senzory.



Obr. 40: Měřící zařízení MagSpider přimontované na první díl držáku.



Obr. 41: Druhý díl držáku, kterým se měřící zařízení MagSpider připevní ke křížovému stolu.

iii.3

FIRMWARE

Firmware pro mikrokontrolér byl naprogramován v jazyce C++17. Není třeba využít vývojové IDE pro přeložení a nahrání kódu do mikrokontroléru. Pro překlad je třeba mít nainstalovaný překladač `avr-gcc`, standardní knihovnu `avr-libc`, `cmake` a `make`. Pro nahrání přeloženého programu se využívá `avrdude`.

Přeložení a nahrání programu je možné pomocí níže uvedených příkazů ve složce projektu.

```
cd DerMagTisch/FW
mkdir build && cd build
cmake ..
make
make upload_DerMagTisch
```

Firmware komunikuje s počítačem a dle příkazů ovládá signály pro drivery krovových motorů.

Pro časování programu je využit 16 bitový čítač/časovač `TC1`, který je ovládán třídou `SystemTimer`. Časovač je nastaven tak, že generuje přerušení s periodou 1 ms, ve kterém se inkrementuje proměnná `ms`, od které se program časuje.

Ovládání krovových motorů je implementováno ve třídě `StepperMotor`. Pro generování pulzů pro krovování jsou využity čítače/časovače `TC0` a `TC2`. Metoda `do_steps()` nastaví daný časovač, tak aby generoval přerušení s periodou, která je daná vstupním parametrem `speed`. V přerušení od přetečení čítače se provádí kontrola, jestli už byly provedeny všechny požadované kroky. Pokud ne, tak se na výstupním pinu mikrokontroléru vygeneruje pulz pro driver. Ve třídě jsou dále proměnné `enabled`, `moving` a `move_done`, které poskytují aktuální informace o zapnutí výstupu driveru, jestli se daný motor pohybuje a jestli už motor dojel na žádanou pozici. Rychlosť pohybu lze nastavit v rozmezí 38 µm/s až 4 882 µm/s.

Třída `DerMagTisch` instancuje třídu `StepperMotor` zvlášť pro každý motor a třídu `Communication` pro komunikaci s počítačem. Dále obsahuje metody, které periodicky odesílají informace o stavu polohovacího zařízení.

Komunikace s počítačem probíhá přes rozhraní UART a virtuální sériový port. Protokol komunikace je stejný jako u měřícího zařízení MagSpider, který je popsán v kapitole ii.3.3. Všechny typy zpráv, které jsou podporovány polohovacím zařízením jsou uvedeny v příloze A.4. Protokol je implementován ve třídě Communication. Pro komunikaci je využita integrovaná periférie USART mikrokontroléru s nastavením dle tabulky 14. Příjem dat využívá přerušení, odesílání dat je blokující.

Koncové spínače křížového stolu jsou napojeny na vstupy externích přerušení INT0 a INT1. Tyto přerušení jsou nastaveny tak, aby reagovaly na sestupnou hranu signálu z koncových spínačů. Pokud je vyvoláno přerušení, tak se zastaví krokový motor dané osy. Při testování bylo zjištěno, že se při zapnutí výstupu driverů naindukuje do vodičů koncového spínače rušení, které vyvolá falešná přerušení. Kvůli velkému množství falešných impulzů nejsou koncové spínače využity.

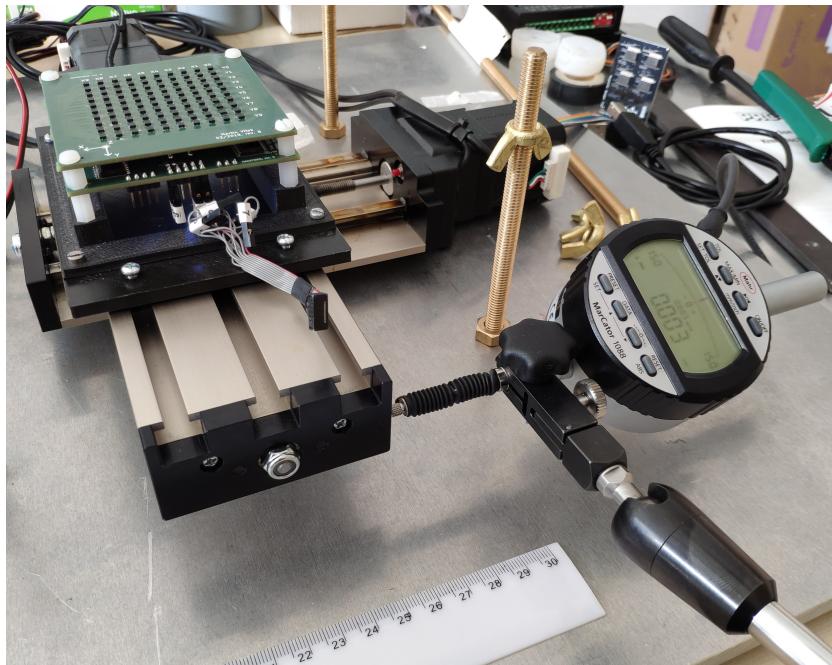
Tab. 14: Nastavení UART rozhraní.

Parametr	Hodnota
Baudrate	76 800 Bd
Počet datových bitů	8
Počet stop bitů	1
Parita	není
Řízení toku	není

iii.4

CHARAKTERISTIKY KŘÍŽOVÉHO STOLU

Pro ověření udávaného kroku křížového stolu a zjištění jeho dalších vlastností, bylo provedeno měření pomocí digitálního úchylkoměru Mahr Marcator 1088 [39], který má rozlišení 1 µm. Testovací sestava je zobrazena na obrázku 42.



Obr. 42: Měření kroku a vůle křížového stolu pomocí úchylkoměru.

iii.4.1 VELIKOST KROKU

III.4.1 VELIKOST KROKU

Krok byl změřen posunutím o 20 mm (4 000 kroků), odečtením reálné vzdálenosti a jejím následným vydelením počtem kroků. Toto měření bylo provedeno pro několik rychlostí, v obou směrech a pro obě osy. Bylo zjištěno, že na rychlosti ani na směru nezáleží. Vypočítané velikosti kroku pro jednotlivé osy jsou uvedeny v tabulce 15.

Tab. 15: Změřená velikost kroku křížového stolu.

Osa	Krok [μm]
x	4,985
y	5,002

III.4.2 VELIKOST VŮLE

Pohyb křížového stolu je založen na fixně umístěné matici upevněné v posuvné části stolu. Matice je našroubovaná na závitové tyče, která je upevněna k nepohyblivé části stolu a otáčí s ní krokový motor. Při změně směru otáčení závitové tyče dojde k jejímu protočení ve vůli matice. Motor se o několik kroků otočí, ale matice se neposune. Velikost této vůle je závislá na přesnosti a toleranci výroby závitové tyče a matice. Je možné udělat tolerance menší, ale tím dojde ke zvýšení tření, které působí proti momentu motoru.

Vůle byla změřena tak, že se stůl v jedné ose posunul o 1 mm, tím se eliminovala vůle v tomto směru. Vynuloval se úchylkoměr a stůl se následně posunul zpět o 1 mm. Z úchylkoměru byla odečtena reálná vzdálenost, o kterou se stůl posunul. Odečtením této hodnoty od 1 mm požadovaného posunu, byla získána velikost vůle pro měřenou osu.

Před změřením prezentovaných hodnot v tabulkách 16 a 17 byl křížový stůl rozebrán a bylo dotaženo osazení závitových tyčí v ložiscích a byl nastaven přítlač pouzder na ližiny. Tím se vůle v ose x zmenšila na $\frac{1}{2}$ a v ose y na $\frac{2}{3}$ původní hodnoty. Jak je vidět z výsledků, mnohem větší vůle je v ose y. Je to dáno tím, že kromě vůle mezi závitovou tycí a matkou je ještě navíc přítomna vůle v ložisku, ve kterém je upevněna závitová tyč.

Pokud se z jednoho místa stůl posune o nějakou vzdálenost (například 1 mm), tak se po posunu o stejnou vzdálenost opačným směrem vrátí do výchozí polohy s tolerancí $\pm 10 \mu\text{m}$. Z toho ale nelze hodnotit celkovou přesnost, protože jednotlivé pozice v posunu jsou ovlivněny vůlí v počátku pohybu a ta není vždy stejná.

iii.4.2 VELIKOST VŮLE

Tab. 16: Průměrná velikost vůlí křížového stolu pro obě osy a oba směry pohybu.

Osa	Vůle [μm]
x+	163,8
x-	167,5
y+	247,4
y-	243,2

Tab. 17: Velikost vůlí křížového stolu pro různé polohy osy x a pro oba směry pohybu.

Poloha [mm]	Vůle+ [μm]	Vůle- [μm]
0	180,8	177,8
20	156,6	153,8
40	141,2	152,6
60	165,2	175,2
63	175,0	178,0

Část IV

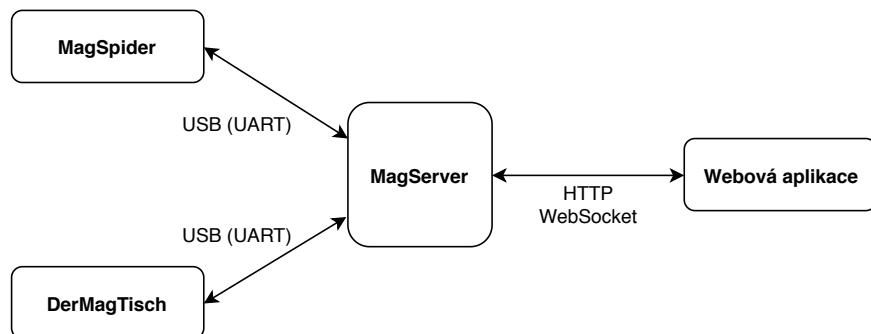
SOFTWARE PRO OVLÁDÁNÍ MAPOVÁNÍ MAGSERVER

iv.1

ÚVOD

Celé zařízení pro mapování magnetického pole je složeno z měřícího zařízení MagSpider a polohovacího zařízení DerMagTisch. Pro zmapování pole měřeného objektu je třeba ovládat obě zařízení zároveň a ukládat naměřená data tak, aby z nich bylo možné zrekonstruovat změřené magnetické pole.

Proto byl naprogramován program do počítače s kódovým jménem **MagServer**, který řídí měření, umožňuje ukládat naměřená data v několika režimech a poskytuje uživatelské rozhraní pro ovládání jednotlivých zařízení a samotného měření.



Obr. 43: Blokové schéma celého mapovacího zařízení.

MagServer je naprogramován v jazyce C++17 s využitím knihoven `asio` [40], `libserialport` [41], `fmt` [42] a `spdlog` [43]. Pro překlad je možné použít překladač `gcc`, případně pro překlad na platformu Windows lze použít `mingw-w64`. Program je možné přeložit a spustit pomocí následujících příkazů ve složce projektu:

```
cd Magserver
mkdir build && cd build
cmake ..
make
./MagServer
```

iv.2

ARCHITEKTURA PROGRAMU

IV.2.1 KOMUNIKACE SE ZAŘÍZENÍMI MAGSPIDER A DERMAGTISCH

Pro komunikaci přes sériový port je využita knihovna `libserialport`, která poskytuje jednoduché a jednotné API pro většinu operačních systémů. Jelikož se jedná o knihovnu primárně určenou pro jazyk C, byla naprogramovaná třída `SerialPortWrapper`, která obaluje původní funkce knihovny.

Třída `SerialPortEngine` dědí od třídy `SerialPortWrapper` a řeší příjem a odesílání dat na sériovém portu. Jedno vlákno je vyhrazeno pro příjem a druhé pro odesílání dat. Tímto způsobem nedochází k blokování programu. Pokud nejsou dostupná nová data pro příjem či odesílání, tato vlákna spí a nespotřebují systémové prostředky. Pro uložení dat, která byla přečtena (nebo se mají zapsat) jsou využity datové typy fronty `std::queue<uint8_t>`. Kód, který využívá tuto třídu, jen kontroluje, jestli jsou v příjímací frontě nová data, případně zapíše do odesílací fronty data k odeslání.

Implementace komunikačního protokolu (viz kapitola ii.3.3) se nachází ve třídě `MyProtocol`. Je zde implementován základ tohoto protokolu bez specifických příkazů pro jednotlivá zařízení. Přístup k sériovému portu poskytuje instance třídy `SerialPortEngine`. Přijatá data jsou zpracována metodou `rx_handler()`, která je spuštěna ve vlastním vlákně. Pokud je přijata validní zpráva, tak je vyhodnocena virtuální metodou `decode_message(msg)`, která musí být implementována potomkem této třídy. Tím je umožněno sdílení jádra protokolu specifickými implementacemi pro různá zařízení s různými typy zpráv. Dále jsou zde implementované metody pro odesílání zpráv, odesílání chyb a metody pro ladění komunikačního protokolu.

Protokol pro zařízení MagSpider je implementován ve třídě `MagSpiderProtocol`, která dědí od třídy `MyProtocol`. Jsou zde definované typy zpráv a jejich datové struktury. Dále jsou zde implementovány metody pro odesílání specifických zpráv, které z požadovaných dat vytvoří zprávu protokolu a odešlou jí do zařízení. Podobně jsou specifika protokolu pro polohovací zařízení DerMagTisch implementována ve třídě `DerMagTischProtocol`.

iv.2.2 WEBOVÉ ROZHRANÍ

IV.2.2 WEBOVÉ ROZHRANÍ

Uživatelské rozhraní bylo vytvořeno v podobě webové stránky, což program zjednodušuje z hlediska multiplaformnosti a velmi jednoduše umožňuje ovládání měření z jiných zařízení, než z počítače, ke kterému jsou připojena zařízení MagSpider a DerMagTisch. Do MagServeru byl naprogramován jednoduchý web server, čímž odpadá potřeba mít nainstalovaný web server na cílovém počítači.

Webové rozhraní je naprogramováno v jazyce HTML5 a v JavaScriptu. Pro komunikaci mezi uživatelským rozhraním a MagServerem byl zvolen komunikační protokol WebSocket, který umožňuje obousměrnou komunikaci po TCP spojení. Výhodou tohoto protokolu je jeho podpora v JavaScriptu, kde stačí použít hotovou třídu `WebSocket`.

Pro webový server je základem třída `TCPserver`, která obsluhuje TCP připojení s využitím knihovny `asio` pro přístup k síťovým socketům operačního systému. Tato knihovna poskytuje moderní C++ rozhraní a několik způsobů, kterými je možné síťová připojení obsluhovat. V této třídě je využito asynchronních vlastností knihovny. Jsou zde spuštěna čtyři vlákna, která síťová připojení obsluhují. Při přijetí nového paketu knihovna `asio` automaticky zavolá metodu `accept_handler()`, která přijatá data předá callback metodě nadřazené třídy `MagWebServer`, která přijatý paket zpracuje. Pro odeslání paketu je implementována metoda `write()`, která paket předá knihovní funkci a zajistí jeho odeslání. Nedochází tím k blokování programu při čekání na data a celý mechanizmus přijímání a odesílání dat je podobný UARTU v mikrokontroléru s využitím přerušení. Podporována jsou TCP připojení využívající protokoly IPv4 i IPv6.

Web server je implementován ve třídě `MagWebServer`. Paket, který je přijatý třídou `TCPserver`, je zpracován metodou `process_data()`. Ta podle začátku zprávy rozhodne, jestli paket patří HTTP, nebo WebSocket protokolu a podle toho jí předá metodě `process_http()`, nebo `process_websocket()`.

Z HTTP protokolu jsou implementovány jen základy, které jsou potřeba pro webové rozhraní. Podporován je dotaz GET, kterým je možné vyžádat odeslání souborů HTML, CSS, JavaScriptu, obrázků nebo souboru communication, který slouží pro zahájení WebSocket komunikace.

Implementace protokolu WebSocket podporuje základní textové zprávy, které jsou vyhodnoceny a zpracovány metodou `process_text_message()`. Metoda `assemble_websocket_message()` vytváří WebSocket zprávy.

Dále jsou zde implementována dvě vlákna, která v pravidelný intervalech posílají informace o stavu jednotlivých zařízení a naměřená magnetická data.

Pro předání příkazů a dat mezi MagServerem a webovým rozhraním byl navržen jednoduchý textový protokol, jehož zprávy se posílají přes WebSocket protokol. Zpráva protokolu začíná označením typu zprávy a za dvojtečkou následují data. Datových polí za sebou může následovat několik a jsou oddělena mezerou.

iv.2.3 ŘÍZENÍ MĚŘENÍ

Obsahem dat může být text nebo číslo v textovém formátu. Seznam všech podporovaných zpráv je možné nalézt v příloze A.5.

Příklad zprávy, která spouští detailní měření, je uveden níže. Nastavení měření, dle této zprávy, je: 20 kroků v ose x , 20 kroků v ose y , rychlosť 4 800 $\mu\text{m}/\text{s}$, velikosť kroku 250 μm , průměrovat 5 vzorků a text, popisující měření.

```
DETAILED_MEASURING: enable 20 20 4800 250 5 popis_mereni
```

IV.2.3 ŘÍZENÍ MĚŘENÍ

Třída MagServer instancuje specifické třídy komunikace MagSpiderProtocol a DerMagTischProtocol pro komunikaci se zařízeními. Dále instancuje třídu MagWebServer, která obsluhuje protokoly HTTP a WebSocket. Jsou zde implementované metody, které ovládají měření - ukládají změřená magnetická data a pohybují polohovacím zařízením DerMagTisch. Každá z těchto metod si vytvoří nové vlákno, ve kterém je následně spuštěna.

Pro ukládání naměřených dat byl vybrán formát MAT-File, což je výchozí formát souborů programu Matlab, který se používá pro zpracování dat. Jeho specifikace jsou popsány v dokumentu MAT-File Format [44]. Implementace tohoto formátu je ve třídě MatFile. Jsou zde naprogramovány metody pro zapsání hlavičky, naměřených dat a struktury, která popisuje nastavení měření. Pro úsporu místa na disku se soubory komprimují pomocí knihovny zlib [45]. Data, která byla měřena ≈ 1 h při vzorkovací frekvenci 50 Hz (200 000 vzorků), mají v nezkompromované podobě velikost 240 MB. Po komprimaci se jejich velikost zmenšila na 68 MB, tedy jen 28,3 % původní velikosti.

properties =	
<u>struct</u> with fields:	
Bx	10x10x100 int32
By	10x10x100 int32
Bz	10x10x100 int32
properties	1x1 struct
datetime: '2019-04-23 15:12:24'	
description: 'microscop lab linearity 0.256488'	
samples: 100	
framerate: 50	
filter: 0	
temperature: 27	
magspider_ver: 'MagSpider 2/2018 revB'	

Obr. 44: Ukázka struktury uloženého souboru s daty ze 100 vzorků.

iv.3

FUNKCE

Magserver je možné spustit s parametrem, kterým se specifikuje port, na kterém má po spuštění naslouchat webový server. Výchozí port je 8080. Dále MagServer vypíše dostupné sériové porty a uživatel musí vybrat, ke kterému portu je připojeno měřící zařízení MagSpider a ke kterému polohovací zařízení DerMagTisch. Poté už je možné v prohlížeči zadat IP adresu počítače, na kterém je MagServer spuštěný s vybraným portem. Například tedy <http://localhost:8080>, pokud je MagServer spuštěn na stejném počítači.

```
14:52 $ ./MagServer 8080
[0] /dev/ttyUSB1
[1] /dev/ttyS0
[2] /dev/ttyACM0
[3] /dev/ttyUSB0

Select MagSpider port: 0

Select DerMagTisch port: 2

[2019-05-22 14:52:49.770] [console] [info] Starting io_service.run()
[2019-05-22 14:52:49.771] [main] [info] Starting MagWebServer on port 8080
[2019-05-22 14:52:49.773] [MyProtocol /dev/ttyUSB1] [info] Opened serial port
[2019-05-22 14:52:49.774] [MyProtocol /dev/ttyACM0] [info] Opened serial port
[2019-05-22 14:52:49.787] [MyProtocol /dev/ttyUSB1] [info] SN: 0x3d3054c3 0x504c5435 0x382e314a 0xff051d39
```

Obr. 45: Ukázka spuštění MagServeru se specifikovaným portem.

Uživatelské rozhraní je rozděleno do tří částí. V první části, která se nachází vlevo nahoře se zobrazují informace o MagServeru, MagSpideru a DerMagTischu (obrázek 46). U MagSpideru lze navíc nastavovat některé parametry magnetometrů. Druhá část v pravé horní části umožňuje ovládání jednotlivých zařízení, nastavování a spouštění měření (obrázek 47). Ve třetí části umístěné vespod se živě zobrazují měřená data (obrázek 50).

iv.3.1 ŽIVÉ ZOBRAZENÍ MĚŘENÝCH DAT

MagServer status	
WebSocket status:	CONNECTED
In time measuring status:	Disabled
Detailed measuring status:	Disabled
Detailed measuring progress:	0 % 

Obr. 46: Uživatelské rozhraní - MagServer - zobrazení stavu.

MagSpider status	
MCU serial number:	0x3D3054C3 504C5435 382E314A FF051D39
Voltage 5V:	4.649 V
Voltage 3V3:	3.307 V
Temperature MCU:	47.19 °C
Temperature sensors:	24.43 °C
Mag mode:	Continuous
ODR:	50 Hz ▾
Filter:	ODR/2 ▾
Frequency of set pulse:	Every 63 ODR ▾

Obr. 47: Uživatelské rozhraní -MagSpider - zobrazení stavu.

DerMagTisch status	
Temperature MCU:	17 °C
Drivers:	false
Moving:	x: false y: false

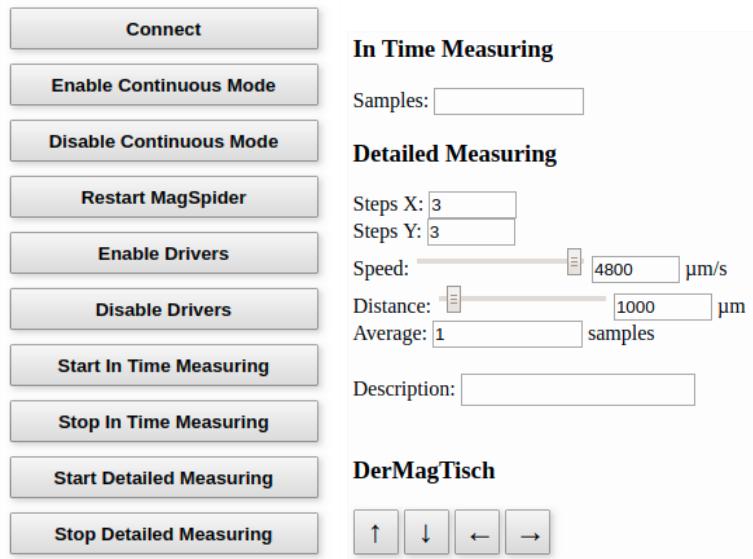
Obr. 48: Uživatelské rozhraní - DerMagTisch - zobrazení stavu.

IV.3.1 ŽIVÉ ZOBRAZENÍ MĚŘENÝCH DAT

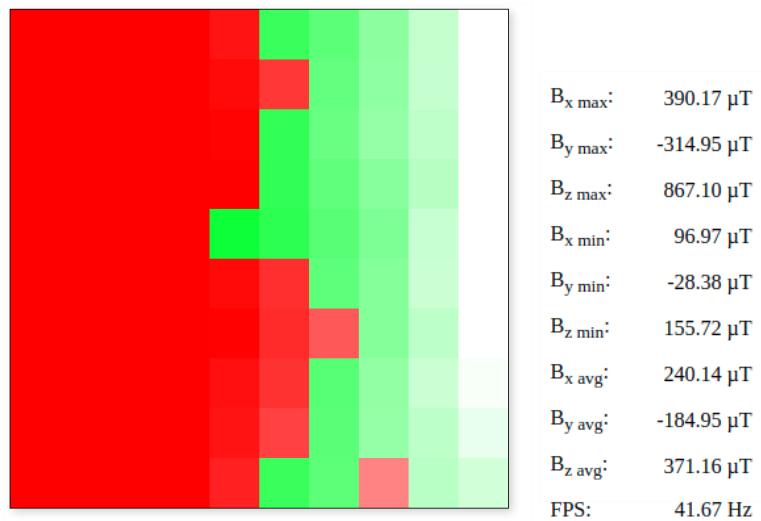
První z režimů měření je živé zobrazení magnetické indukce, která je měřena senzory. Velikost vektoru magnetické indukce je vyjádřena průhledností jednotlivých čtverců (viz obrázek 50). Každý čtverec odpovídá jednomu magnetometru. Čtverec může být zelený, nebo červený, v závislosti na orientaci složky z vektoru

iv.3.1 ŽIVÉ ZOBRAZENÍ MĚŘENÝCH DAT

magnetické indukce. Dále jsou zobrazeny maximální, minimální a průměrné hodnoty ze všech senzorů pro všechny osy.



Obr. 49: Uživatelské rozhraní - ovládání měření.



Obr. 50: Uživatelské rozhraní - živé zobrazení měřených dat.

iv.3.2 MĚŘENÍ V ČASE

IV.3.2 MĚŘENÍ V ČASE

Měření v čase ukládá změřenou magnetickou indukci ze všech senzorů s periodou jejich vzorkovací frekvence. Měření lze spustit tlačítkem Start In Time Measuring. Měření je zastaveno po uložení nastaveného počtu vzorků nebo po stisku tlačítka Stop In Time Measuring. Soubor s naměřenými daty je uložen ve složce MagServer/data. Struktura souboru je zobrazena na obrázku 44.

IV.3.3 DETAILNÍ MĚŘENÍ

Detailní měření mapuje magnetické pole v prostoru 50 mm × 50 mm s krokem v rozmezí 5 μm až 5 mm. Po nastavení parametrů je možné měření spustit tlačítkem Start Detailed Measuring. Začíná se z aktuální pozice polohovacího zařízení DerMagTisch, poté se DerMagTisch posune o 1 mm v obou osách, čímž se eliminuje vůle v začátku měření. Následně se změří zadaný počet vzorků (parametr Average), které se zprůměrují. DerMagTisch se posune o zadanou vzdálenost (parametr Distance) v ose x do další pozice, ve které se provede nové měření. Takto se proměří tolik pozic, kolik jich je požadováno parametrem Steps x. Tím je změřena jedna řada. DerMagTisch se posune o zadanou vzdálenost (parametr Distance) v ose y a zároveň se v ose x vrátí na počátek. Změří se další řada v ose x. Řad se změří tolik, kolik jich je požadováno parametrem Steps y. Při změně směru v ose y je aplikován dodatečný posun o průměrnou hodnotu vůle křížového stolu, aby se dosáhlo přesnějšího polohování. Pro měření lze nastavit rychlosť posunu parametrem Speed.

Část V

VÝSLEDKY MĚŘENÍ A MOŽNOSTI APLIKACE

V.1

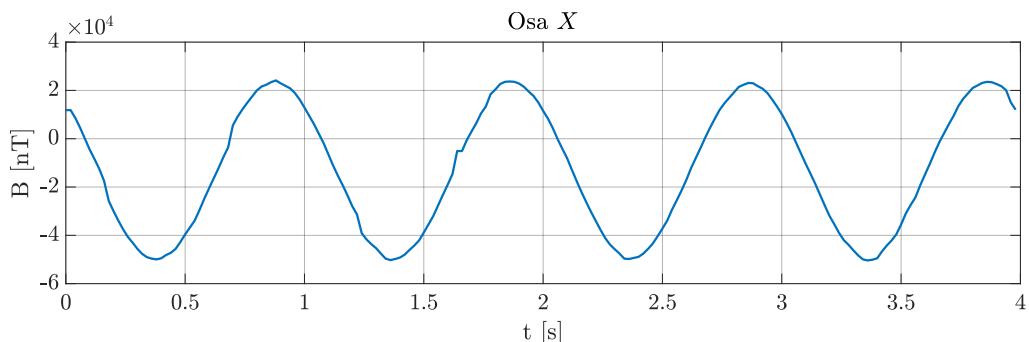
PREZENTACE NAMĚŘENÝCH DAT

V této kapitole jsou představeny výsledky měření, která byla provedena pomocí popsaného zařízení.

v.1.1 MĚŘENÍ V ČASE

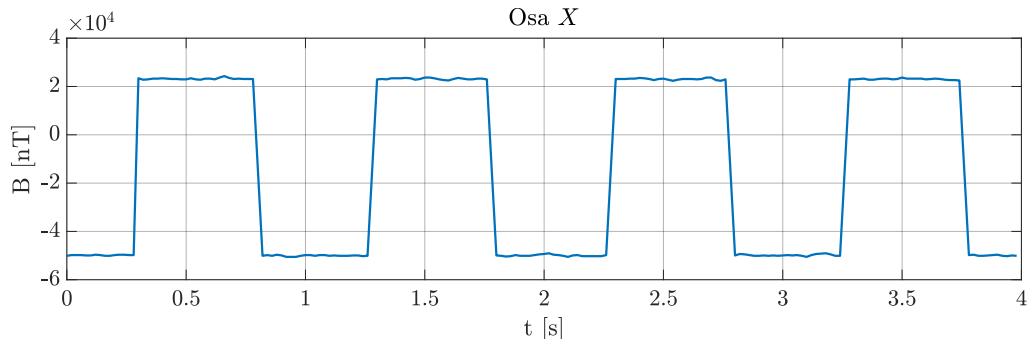
V čase byla změřena cívka se vzduchovým jádrem (obrázek 60) buzená z generátoru funkcí. Výsledky jsou na obrázcích 51, 52, 53. Dále bylo v čase měřeno několik různých prostředí - obrázky 54 a 55. Na naměřených datech je vidět dobrá účinnost stínění EMC komory proti nízkofrekvenčnímu magnetickému poli. Pro přehlednost jsou data z těchto měření vykreslena jen z jednoho senzoru a jedné osy. Měřeno bylo provedeno se vzorkovací frekvencí magnetometrů 50 Hz.

Bylo provedeno měření rotoru s permanentními magnety, který je součástí nově vyvýjeného typu peristaltického čerpadla *Intestino* [46]. Osa rotace měřeného rotoru byla rovnoběžná s deskou měřícího zařízení a bylo změřeno několik otáček. Tři snímky změřeného magnetického pole jsou ve vektorech zobrazeny na obrázku 56. Na CD je přiloženo video, které bylo z tohoto měření vytvořeno.

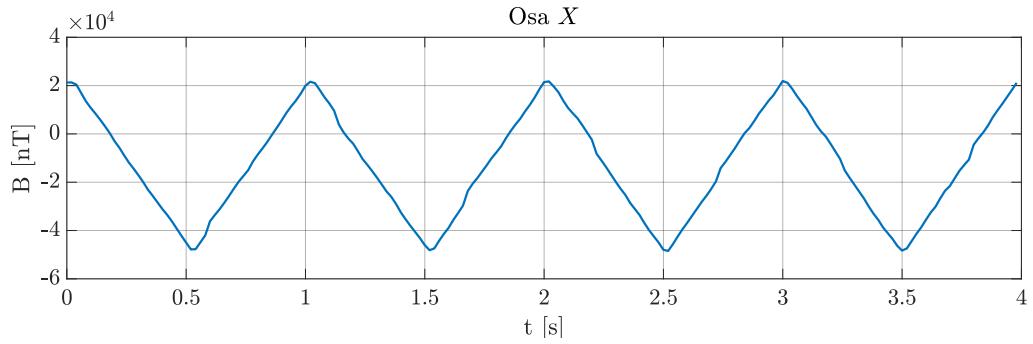


Obr. 51: Měření cívky se vzduchovým jádrem v čase, která byla buzena sinusovým signálem o frekvenci 1 Hz.

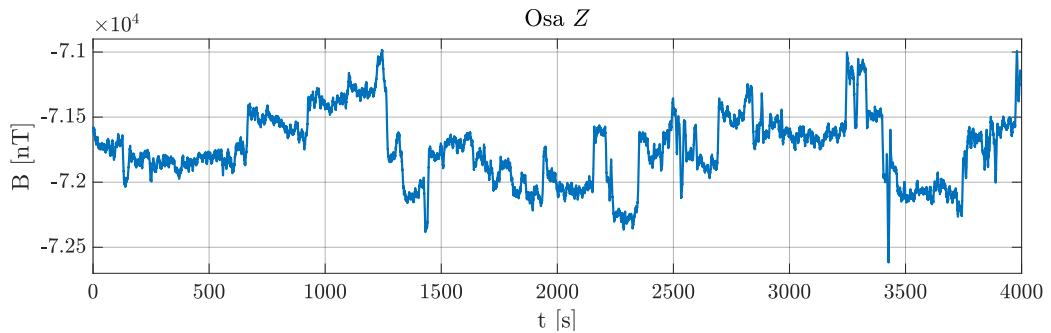
v.1.1 MĚŘENÍ V ČASE



Obr. 52: Měření cívky se vzduchovým jádrem v čase, která byla buzena obdélníkovým signálem o frekvenci 1 Hz.

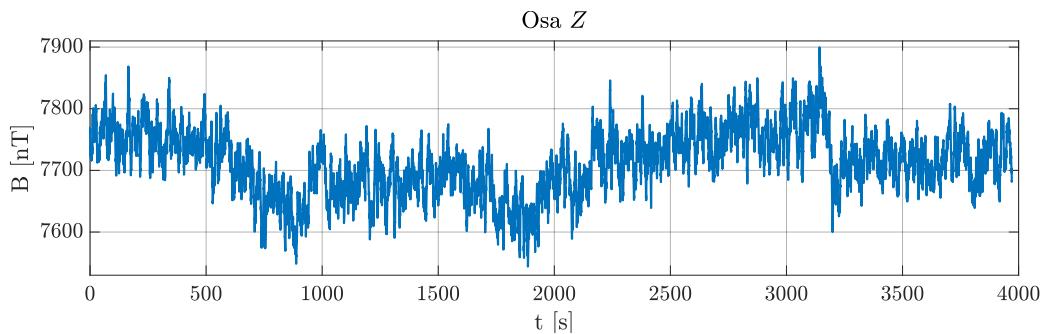


Obr. 53: Měření cívky se vzduchovým jádrem v čase, která byla buzena trojúhelníkovým signálem o frekvenci 1 Hz.

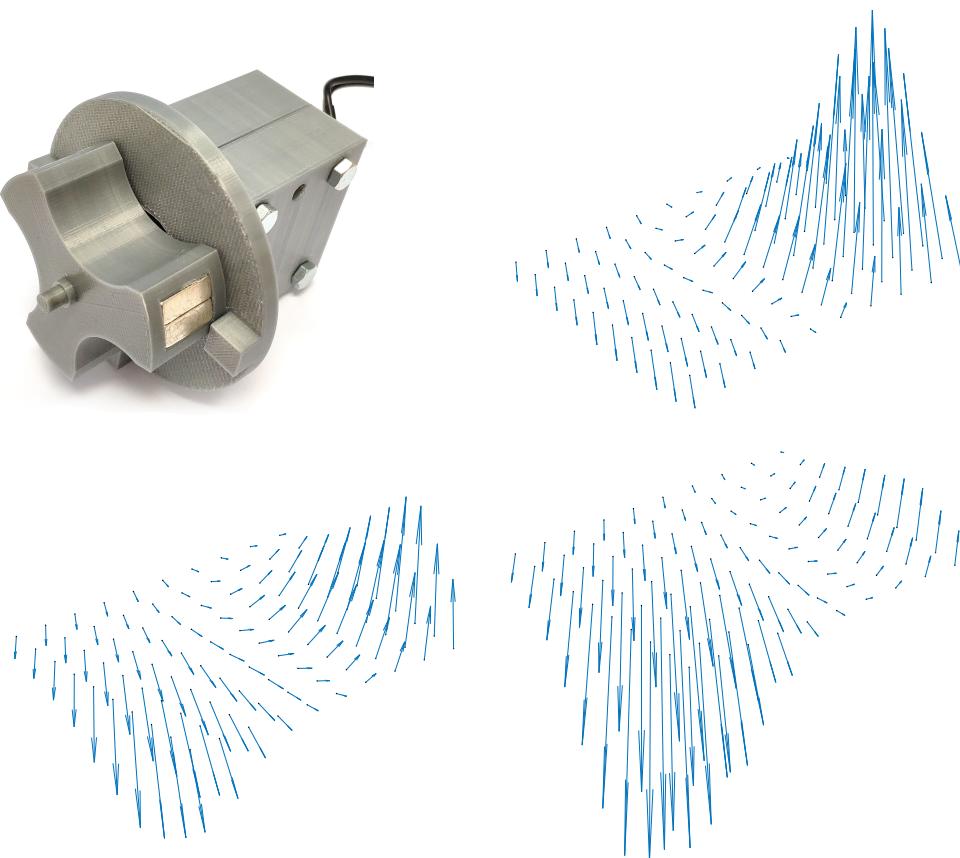


Obr. 54: Měření prostředí kanceláře v čase. Průběh je vyfiltrovaný klouzavým průměrem přes 300 vzorků.

v.1.1 MĚŘENÍ V ČASE



Obr. 55: Měření prostředí EMC komory v čase. Průběh je vyfiltrovaný klouzavým průměrem přes 300 vzorků.



Obr. 56: Měření otáčejícího se magnetického pole rotoru peristaltického čerpadla *Intestino* v čase. Postupně jsou zobrazeny vektory magnetické indukce v časech 80 ms, 240 ms a 360 ms.

v.1.2 DETAILNÍ MAPOVÁNÍ

v.1.2 DETAILNÍ MAPOVÁNÍ

Obrázek 57 demonstруje prostorové rozlišení zařízení. Bylo změřeno pole miniaturního permanentního magnetu s krokem $5\text{ }\mu\text{m}$. Na grafu je vidět hladké rozložení jeho magnetické indukce a schopnost měřit změny magnetického pole i s takto malým krokem posunu.

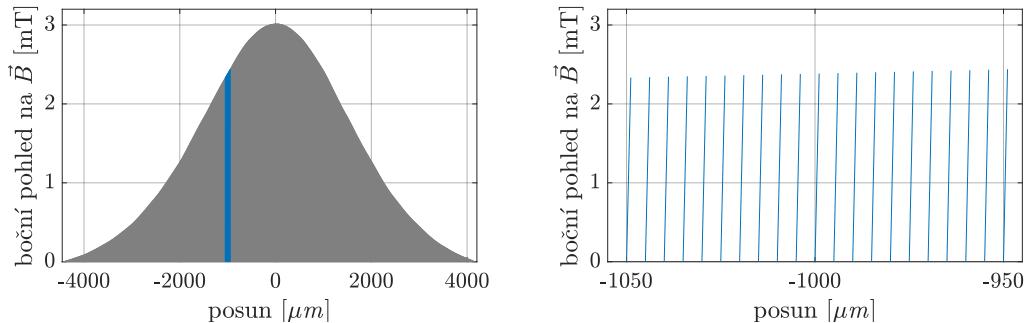
Na obrázku 58 je demonstrováno základní rozlišení $10\text{ px} \times 10\text{ px}$ měřícího zařízení. Změřen byl permanentní magnet a byla zobrazena amplituda jeho magnetické indukce a magnetické siločáry.

Následující obrázky zobrazují zmapovaná magnetická pole. V grafech je vynešena amplituda změrené magnetické indukce. Na obrázcích 62 a 64 udává polaritu amplitudy polarita indukce osy Z . Na ostatních obrázcích je zobrazena absolutní hodnota.

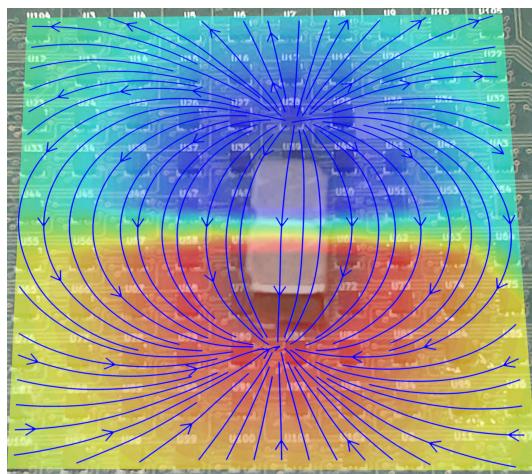
Pro demonstraci různých rozlišení bylo zmapováno pole miniaturního magnetu s rozlišeními $20\text{ px} \times 20\text{ px}$ (doba mapování 4 s), $200\text{ px} \times 200\text{ px}$ (doba mapování 93 s) a $500\text{ px} \times 500\text{ px}$ (doba mapování 336 s). Mapováno bylo s nastavenými 4 vzorky pro průměrování. Výsledky jsou na obrázku 59.

Na dalších obrázcích jsou zobrazeny výsledky mapování různých předmětů. Obrázek 60 zobrazuje pole cívky se vzduchovým jádrem (průměr 40 mm) a dvou miniaturní magnetů. Na obrázku 61 je zmapováno pole magnetu na ledničku. Z dat je vidět, že má tento magnet střídavou magnetizaci. Pravděpodobně proto, aby ho bylo možné upevnit i na zmagnetizované povrchy. Z projektu magnetického polohování byl zmapován minirobot s pěti magnety (obrázek 62) a deska s aktuačními cívkami *MagStrier* (obrázek 63). Pro demonstraci výrobní tolerance permanentních magnetů byla vytvořena matice sto miniaturních magnetů, která je zmapována na obrázku 64. Je vidět, že se velikost magnetické indukce u každého magnetu liší. Jako poslední byly zmapovány dva vzorky magnetoreologických elastomerů (obrázek 65). Mapován byl prototyp *Gekon* s mikročásticemi železa, který má nezanedbatelnou remanentní indukci. Také byl zmapován nejnovější prototyp s mikročásticemi neodymu, který byl při výrobě zmagnetován tak, aby měl pulzní sinusovou magnetizaci.

v.1.2 DETAILNÍ MAPOVÁNÍ

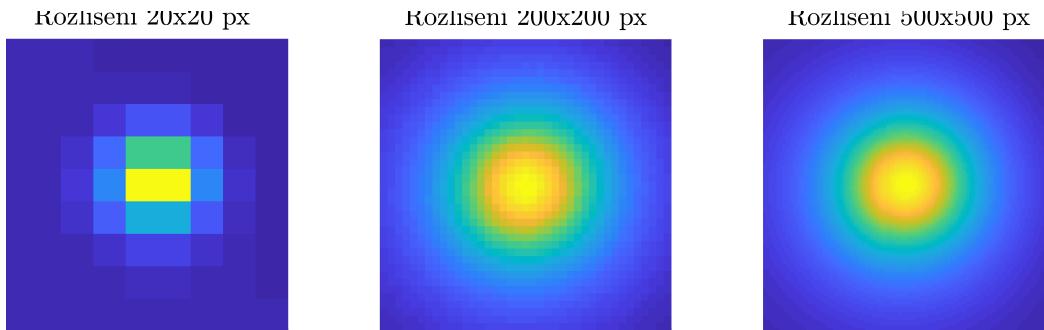


Obr. 57: Detailně zmapovaný magnet o velikosti $1\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ s krokem měření $5\text{ }\mu\text{m}$. V levé části je boční pohled na řez vektorů zmapovaného pole. Modře označená část je detailně zobrazena v pravé části.

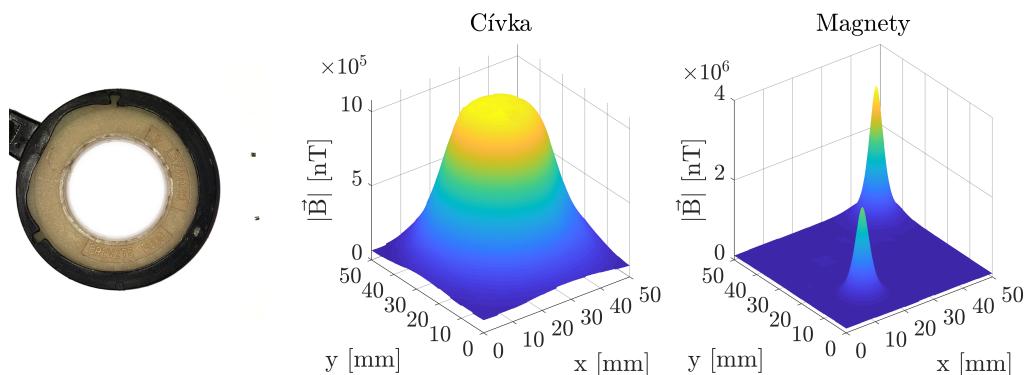


Obr. 58: Ilustrace magnetického pole magnetu v základním rozlišení $10\text{ px} \times 10\text{ px}$. Barevná mapa zobrazuje amplitudu magnetické indukce. Modré čáry zobrazují siločáry.

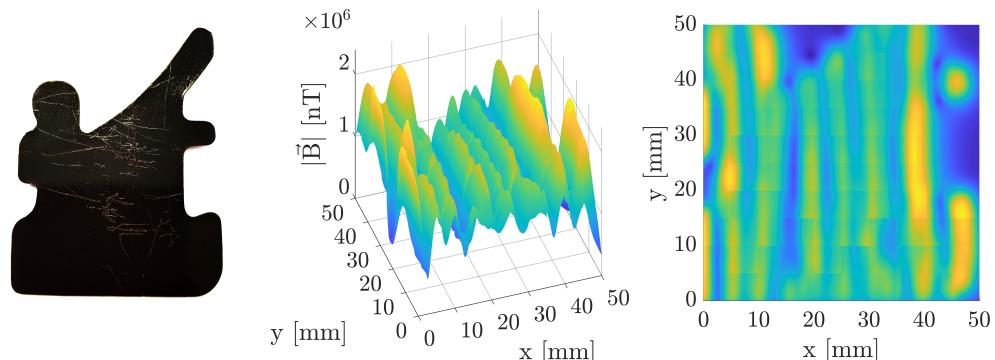
v.1.2 DETAILNÍ MAPOVÁNÍ



Obr. 59: Demonstrační různých rozlišení (kroku) mapování. Mapován byl válcový magnet o průměru 1 mm a výšce 1 mm s rozlišením $20 \text{ px} \times 20 \text{ px}$ (krok $2500 \mu\text{m}$), $200 \text{ px} \times 200 \text{ px}$ (krok $250 \mu\text{m}$) a $500 \text{ px} \times 500 \text{ px}$ (krok $100 \mu\text{m}$). Zobrazen je výřez z naměřených dat.

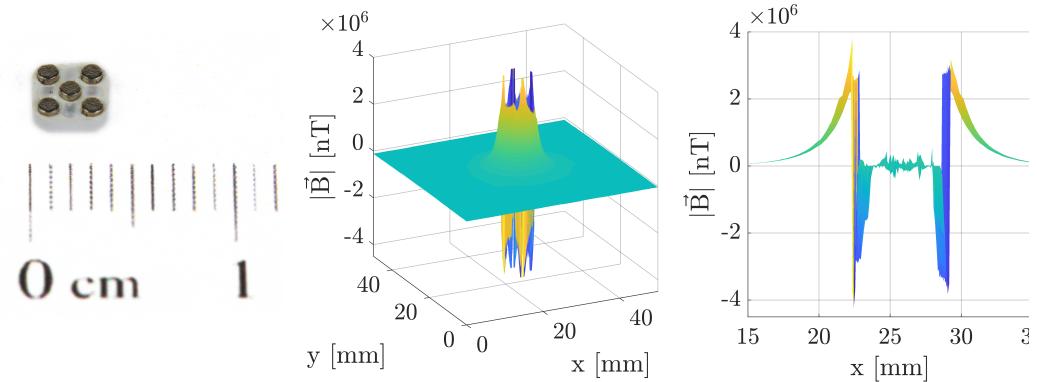


Obr. 60: Zmapované pole cívky se vzduchovým jádrem (při 2 mA) a dvou miniaturních magnetů s rozlišením $500 \text{ px} \times 500 \text{ px}$ (krok $100 \mu\text{m}$).

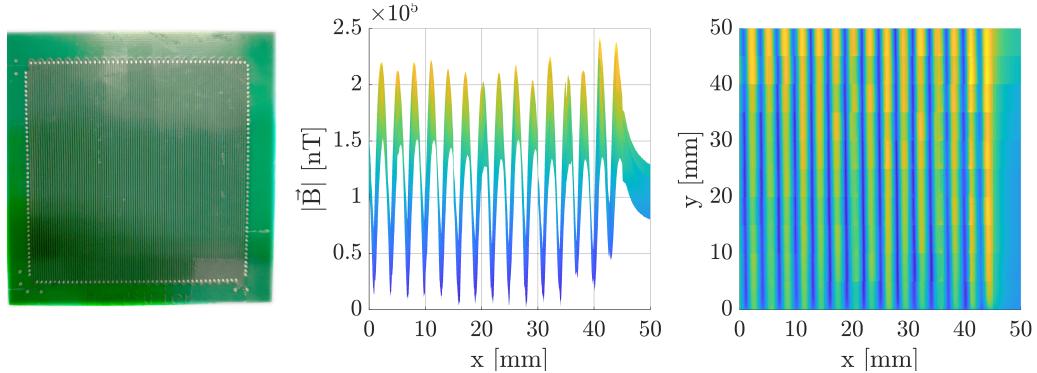


Obr. 61: Zmapované pole magnetu na ledničku s rozlišením $500 \text{ px} \times 500 \text{ px}$ (krok $100 \mu\text{m}$).

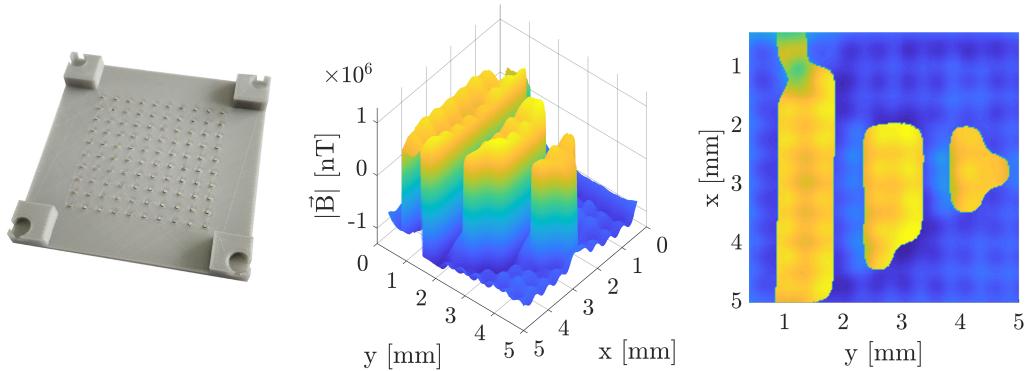
v.1.2 DETAILNÍ MAPOVÁNÍ



Obr. 62: Zmapované pole minirobotu s pěti magnety s rozlišením $500 \text{ px} \times 500 \text{ px}$ (krok $100 \mu\text{m}$).

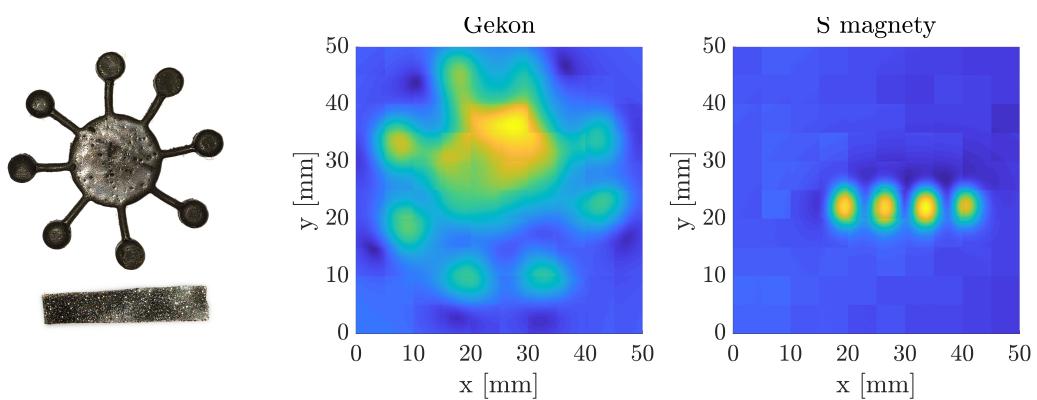


Obr. 63: Zmapované pole prototypové desky *MagStrier* s rozlišením $500 \text{ px} \times 500 \text{ px}$ (krok $100 \mu\text{m}$). Prostřední graf zobrazuje pohled z boku, pravý ze shora.



Obr. 64: Zmapované pole matice 100 magnetů s rozlišením $200 \text{ px} \times 200 \text{ px}$ (krok $250 \mu\text{m}$). Magnety jsou orientovány tak, že tvoří logo Západočeské univerzity v Plzni.

v.1.2 DETAILNÍ MAPOVÁNÍ



Obr. 65: Zmapované pole dvou vzorků magnetoreologických elastomerů s rozlišením $500 \text{ px} \times 500 \text{ px}$ (krok $100 \mu\text{m}$). Na prostředním grafu je zobrazen prototyp *Gekon* se železnými mikročásticemi, na levém prototyp s neodymovými mikročásticemi s pulzní sinusovou magnetizací [47].

V.2

MOŽNOSTI APLIKACE

První část se zabývá parametry a cenou vytvořeného zařízení pro mapování stacionárního magnetického pole v rovině. V druhé části jsou uvedeny příklady aplikací celého zařízení nebo jen jeho částí v laboratorním, průmyslovém a školním prostředí.

v.2.1 PARAMETRY A CENA VYTVOŘENÉHO SYSTÉMU

Parametry vytvořeného systému pro mapování magnetického pole jsou uvedeny v tabulce 18. Cena za jednotlivé součásti je uvedena v tabulce 19. Celková cena materiálu je 21 805 Kč.

Tab. 18: Parametry vytvořeného systému.

Parametr	Hodnota
Prostor živého náhledu	45 mm × 45 mm
Prostor detailního mapování	50 mm × 50 mm
Rozlišení živého náhledu	10 × 10 × 3
Rozlišení detailního mapování	až 10 000 × 10 000 × 3
Doba detailního mapování	80 s při rozlišení 200 × 200 × 3
Rozsah	±4,915 mT
Rozlišení	150 nT
Chyba linearity	≈ ± 300 nT
Směrodatná odchylka šumu	≈ 350 nT
Maximální frekvence měřeného pole	12 Hz

v.2.2 PŘÍKLADY APLIKACÍ

Výuková pomůcka

Ve školách se pro demonstraci a zobrazení magnetického pole využívají železné piliny (110 Kč, 250 g [48]) nebo fólie flux detektor (90 Kč, 75 mm × 75 mm [49]). Obě tyto metody jsou jednoduché a názorné, ale špatně se ukazují většímu počtu

Tab. 19: Cena součástí vytvořeného systému.

Součást	cena [Kč]
MagSpider - DPS	3 142
MagSpider - senzory	5 531
MagSpider - ostatní součástky	1 765
DerMagTisch - křížový stůl	7 861
DerMagTisch - mechanická konstrukce	2 000
DerMagTisch - Arduino UNO	702
DerMagTisch - drivery krokových motorů	604
Ostatní položky	200

žáků. Experimenty obvykle provádí učitel kvůli nutnosti opatrného zacházení s výukovými pomůckami, při kterých všichni žáci nemusí mít dobrý výhled na předváděný experiment.

Měřící zařízení MagSpider lze použít jako výukovou pomůcku pro zobrazování magnetických polí. Měřená data lze živě promítat projektorem na plátno, na které pohodlně vidí všichni studenti. Pokud by učebna byla vybavena počítači, mohl by každý student sledovat měřené magnetické pole živě na svém počítači. Bylo by potřeba vyrobit vhodnou krabičku, která by zařízení zajistila dostatečnou mechanickou ochranu a do MagServeru doprogramovat více možností pro zobrazení magnetického pole.



Obr. 66: Příklady pokusů se železnými pilinami a fólií flux detektor [50, 49].

Magnetická kamera

K měřícímu zařízení MagSpider by bylo možné přidat barevný grafický display a akumulátor. Výsledné mechanické řešení zařízení by mohlo připomínat termokameru. Vzniklo by tak přenosné zařízení, které by bylo možné využívat pro zobrazení magnetických polí v terénu, například při inspekci elektrických točivých

v.2.2 PŘÍKLADY APLIKACÍ

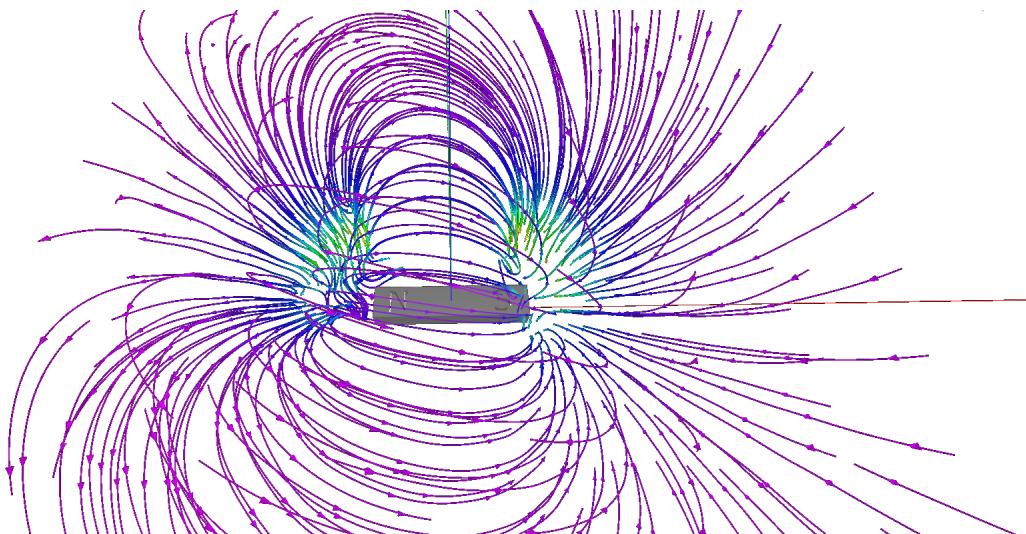
strojů. Také by bylo možné do zařízení integrovat vizuální kameru a do zobrazovaného magnetického pole promítat prostor, ve kterém je pole měřeno.

Magnetický scanner

Prezentovaná zařízení MagSpider a DerMagTisch spolu tvoří scanner magnetického pole, kterým lze detailně mapovat magnetické pole různých předmětů. Toto zařízení může být použito ve výrobě magnetů, cívek, magnetických obvodů a v dalších výrobních provozech pro detailní kontrolu parametrů výrobků na konci výrobní linky. V laboratorních a výzkumných ústavech může sloužit pro kalibraci matematických modelů, které popisují magnetické pole kolem předmětů sestavených z permanentních magnetů (jako jsou miniroboty [1]) nebo pro zobrazení magnetizace magnetoreologických elastomerů [47].

3D magnetický scanner

Pokud by se do polohovacího zařízení DerMagTisch zabudovala třetí osa, bylo by možné měřícím zařízením MagSpider pohybovat i v ose z. Tím by bylo možné mapovat magnetické pole v trojrozměrném prostoru, čímž by se získaly další informace o měřeném magnetickém poli.



Obr. 67: Zmapované magnetické pole ve 3D prostoru [51].

Měření magnetických polí v EMC

Při vývoji elektroniky je nutné testovat její elektromagnetickou kompatibilitu, jejíž podmínky je nutné splnit pro uvedení zařízení na trh. Zkonstruované mapo-

v.2.2 PŘÍKLADY APLIKACÍ

vací zařízení by bylo možné využít pro mapování desek plošných spojů bud' v detailním režimu, pro získání podrobného rozložení magnetického pole nebo pro skenování s méně detaily, které ale trvá kratší dobu. Vývojář by mohl programovat zkoumané zařízení a zároveň by ho mohl mapovat. Výhodou tohoto zařízení je poměrně velká rychlosť mapování, takže by vývojář měl velmi rychlou zpětnou vazbu o vyzařování zařízení. Pokud by stačilo jen základní rozlišení měřícího zařízení MagSpider, mohl by odezvu zařízení sledovat živě. Moderní zařízení jsou řízena mikrokontroléry a jejich vyzařování je dá ovlivňovat jejich programem.

Magnetometry mají sice vzorkovací frekvenci jen 100 Hz, ale alespoň částečně při měření integrují a dokáží tak měřit i vysokofrekvenční pole. Toto chování bylo otestováno na zařízení s mikrokontrolérem s hodinovou frekvencí 3 MHz.

Zařízení by také mohlo být použito pro hledání zkratů na deskách plošných spojů za předpokladu, že je možné, aby zkratem protékal dostatečně velký proud, který vybudí detekovatelné magnetické pole.

Lokalizace magnetů v prostoru

S využitím měřícího zařízení MagSpider je možné určovat pozici zdrojů magnetického pole (magnety, cívky). To bylo experimentálně vyzkoušeno pro lokalizaci minirobota v projektu polohování minirobotů magnetickým polem [1] a tato lokalizace bude dále rozvíjena.

V lékařství by bylo možné lokalizovat katetry [52] nebo miniaturní kapsle [53]. Nyní se používá rentgen a speciální barvivo, které se vstříkne do krve pacienta. S mapováním magnetického pole by tyto zákroky byly jednodušší a pohodlnější pro pacienta.

Část VI

ZÁVĚR

vi.1

ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A SMĚRY POKRAČOVÁNÍ PRÁCE

Cílem práce bylo navrhnout, zkonstruovat a otestovat zařízení, které by umožnilo mapování stacionárního magnetického pole v rovině. Hlavní motivací bylo vytvoření zařízení, které pomůže ve výzkumu projektu magnetického polohování [1, 2] a magnetoreologických elastomerů [47]. Jak se v průběhu této práce ukázalo, možnosti využití tohoto zařízení jsou mnohem širší, než jaké byly počáteční předpoklady.

Navržené a zkonstruované zařízení se skládá ze tří částí - měřícího zařízení MagSpider, polohovacího zařízení DerMagTisch a softwaru pro ovládání měření MagServer. Měřící zařízení MagSpider je založeno na matici magnetických senzorů o velikosti 10×10 a je řízeno mikrokontrolérem, který komunikuje s řídícím programem. Polohovací zařízení DerMagTisch je založeno na křížovém stolu s krovovými motory ovládanými z mikrokontroléru, který komunikuje s řídícím programem. Obě zařízení jsou řízena počítače programem MagServer, který řídí měření, ukládá naměřená data a poskytuje webové uživatelské rozhraní.

Byly prezentovány výsledky měření charakteristik obou zařízení a příklady měření, které byly provedeny zkonstruovaným zařízením v módech živého měření, měření v čase a detailního mapování. Dále byly shrnuty parametry zkonstruovaného zařízení, jeho cena a možnosti aplikace do různých odvětví.

Zařízení splnilo požadavky, které v počátku práce vznikly v projektu magnetických minirobotů. Vzniklo zařízení, které je možné velmi jednoduše používat pro mapování magnetického pole různých předmětů.

Dalšími kroky, které jsou nutné pro zvýšení přesnosti mapování, jsou kalibrace senzorů a zpřesnění polohování. U senzorů je nutné zkalibrovat jejich osazení na plošném spoji, offset, ověřit jejich přesnost jiným kalibrovaným měřícím zařízením a detekovat přesycení. Pro přesné měření, které nebude ovlivněno okolním prostředím, je třeba navrhnout metodu pro odstranění magnetického pole okolí z naměřených dat. U polohovacího zařízení je nezbytné odstranit chybu ve vůli posunů, což je možné bud' zpětnou vazbou polohy nebo použitím polohovacího zařízení, které bude založené na jiném principu, který má tuto vůli minimální.

SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

BIBLIOGRAFIE

1. KUTHAN, Jiří. *Elektromagnetický systém pro polohování magnetických těles* [online]. Plzeň, 2017 [cit. 12.06.2019]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/handle/11025/27945>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Katedra technologií a měření.
2. KUTHAN, Jiří; JURÍK, Martin; MACH, František. Magnetic Actuation of Multiple Robots by the Coplanar Coils System. MARSS. 2019.
3. JANSEN, Peter. *hackaday.io: A Third, High-Speed Magnetic Imager Tile* [online]. 12.02.2018 [cit. 26.06.2019]. Dostupné z: <https://hackaday.io/project/18518-iteration-8/log/91551-a-third-high-speed-magnetic-imager-tile>.
4. *sparkfun.com: Magnetic Imaging Tile - 8x8* [online] [cit. 26.06.2019]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/14652>.
5. BERGSMA, F.; BLANC, P. H.; GARNIER, F.; GIUDICI, P. A. A High Precision 3D Magnetic Field Scanner for Small to Medium Size Magnets. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2016.
6. SKOG, Isaac; JALDEN, Joakim; NILSSON, John-Olof; GUSTAFSSON, Fredrik. Position and Orientation Estimation of a Permanent Magnet Using a Small-Scale Sensor Array. *I2MTC*. 2018.
7. MAGCAM. *magcam.com* [online] [cit. 26.06.2019]. Dostupné z: <https://www.magcam.com/>.
8. VERVAEKE, Koen. Large area magnetic field camera for inline motor magnet inspection. *EDPC*. 2012.
9. VERVAEKE, Koen. 3-axis magnetic field camera for ultrafast and high resolution inspection of permanent magnets. *EDPC*. 2014.
10. VERVAEKE, Koen. 6D magnetic field distribution measurements of permanent magnets with magnetic field camera scanner. *EDPC*. 2015.
11. MAGCAM. *magcam.com: Magcam MiniCube3D* [online] [cit. 26.06.2019]. Dostupné z: <https://www.magcam.com/product/Minicube3D>.
12. MAGCAM. *magcam.com: Magcam Portal/Combi Scanner* [online] [cit. 26.06.2019]. Dostupné z: https://www.magcam.com/product/magcam_magnetic_field_scanner.

Bibliografie

13. *electronics-tutorials.ws: Hall Effect Sensor* [online] [cit. 24. 06. 2019]. Dostupné z: <https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/hall-effect.html>.
14. FŮRA, Viktor. *Dvojitý vektorový AMR magnetometr* [online]. Praha, 2016 [cit. 24. 06. 2019]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/70543>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta elektrotechnická.
15. *STMicroelectronic: LSM303AGR - katalogový list* [online]. 28. 11. 2018 [cit. 12. 06. 2019]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lsm303agr.pdf>.
16. *STMicroelectronic fórum: How to handle e-Compass thermal drift* [online]. 01. 03. 2019 [cit. 12. 06. 2019]. Dostupné z: <https://community.st.com/s/question/0D50X0000ARQY2VSQX/how-to-handle-ecompass-thermal-drift>.
17. *STMicroelectronic fórum: katalogový list* [online]. 28. 03. 2018 [cit. 12. 06. 2019]. Dostupné z: <https://community.st.com/s/question/0D50X00009XkWWLSA3/lsm303agr-magnetometer-theory-of-operation>.
18. *NXP: PCA9547 - katalogový list* [online]. 01. 04. 2014 [cit. 13. 06. 2019]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/PCA9547.pdf>.
19. *Texas Instruments: CD74HC154 - katalogový list* [online]. 2004 [cit. 14. 06. 2019]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd54hc154.pdf>.
20. *ECE: Surface Mount PTC SR (0805) Model - katalogový list* [online] [cit. 15. 06. 2019]. Dostupné z: https://www.tme.eu/Document/c81d18e579dc5d0e2d9a7586078d3885/SR_.pdf.
21. *Semtech: SD05 and SD12 - katalogový list* [online] [cit. 17. 06. 2019]. Dostupné z: <https://www.semtech.com/uploads/documents/sdxx.pdf>.
22. *Murata: BLM21PG331SN1 - katalogový list* [online] [cit. 17. 06. 2019]. Dostupné z: <https://www.murata.com/en-eu/api/pdfdownloadapi?cate=&partno=BLM21PG331SN1%23>.
23. *STMicroelectronic: STPS1L30 - katalogový list* [online]. 17. 09. 2018 [cit. 17. 06. 2019]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stps1l30.pdf>.
24. *Microchip: MCP1826/MCP1826S - katalogový list* [online]. 2013 [cit. 17. 06. 2019]. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22057B.pdf>.

Bibliografie

25. *Diodes Incorporated: DMG3415U - katalogový list* [online]. 2018 [cit. 17. 06. 2019]. Dostupné z: <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/ds31735.pdf>.
26. *Microchip: SAM D21 Family - katalogový list* [online]. 2018 [cit. 17. 06. 2019]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/SAMD21-Family-Datasheet-DS40001882D.pdf>.
27. *Future Technology Devices International Limited: FT231X - katalogový list* [online]. 15. 02. 2013 [cit. 17. 06. 2019]. Dostupné z: https://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT231X.pdf.
28. *Microchip: MCP6286 - katalogový list* [online]. 2009 [cit. 17. 06. 2019]. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22196a.pdf>.
29. *STMicroelectronic: AN4825 - aplikační poznámka* [online]. 12. 04. 2016 [cit. 19. 06. 2019]. Dostupné z: https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/group0/6d/cd/b8/e0/44/98/4e/81/DM00265383/files/DM00265383.pdf/jcr:content/translations/en.DM00265383.pdf.
30. *Hioki: DT4281, DT4282 - návod* [online]. 2016 [cit. 20. 06. 2019]. Dostupné z: <https://www.hioki.com/file/cmw/hdInstructionManual/93344/pdf/?action=browser>.
31. *Keysight Technologies: Digital multimetres 34460A - katalogový list* [online]. 12. 02. 2019 [cit. 20. 06. 2019]. Dostupné z: <https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5991-1983EN.pdf?id=2318052>.
32. *Tektronix: Arbitrary/Function Generator AFG1000 Series - katalogový list* [online]. 25. 04. 2017 [cit. 20. 06. 2019]. Dostupné z: <https://www.tek.com/link-click-count?url=https%3A//download.tek.com/datasheet/AFG1000-Series-Function-Generator-Datasheet-75W601602.pdf&nid=250611>.
33. *Proxxon: MF 70 cnc-ready - manuál* [online] [cit. 20. 06. 2019]. Dostupné z: <https://www.proxxon-tools.com.au/downloads/manuals/27112%20MF70CNC.pdf>.
34. *HY: HY-DIV168N-3.5A two phase hybrid stepper motor drive - manuál* [online] [cit. 20. 06. 2019]. Dostupné z: <http://www.hobbycncaustralia.com.au/Res/HY-DIV168N-3.5A.doc>.
35. *Toshiba: TB6560AHQ, TB6560AFG - katalogový list* [online]. 18. 01. 2011 [cit. 20. 06. 2019]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/ac7b7176b9f9e12000d15071e4e6e62a/TB6560AHQ.pdf>.

Bibliografie

36. *Mikrokrokování: sny a skutečnost.* In: *robodoupe.cz* [online]. 18.03.2016 [cit. 21.06.2019]. Dostupné z: <http://robodoupe.cz/2016/mikrokrokovani-sny-a-skutecnost/>.
37. *Microchip: ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P - katalogový list* [online]. 2018 [cit. 21.06.2019]. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061A.pdf>.
38. *Atmel: ATmega8U2, ATmega16U2, ATmega32U2 - katalogový list* [online]. 2012 [cit. 21.06.2019]. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/doc7799.pdf>.
39. *Mahr: Marcator 1088 - návod* [online] [cit. 21.06.2019]. Dostupné z: <https://www.klz.inshop.cz/inshop/files/4337000/MarCator%201088%20a%201088%20W%20n%C3%A1vod%20CZ.pdf>.
40. *Asio C++ Library* [online] [cit. 21.06.2019]. Dostupné z: <https://think-async.com/>.
41. *sigrok: libserialport* [online]. 28.04.2018 [cit. 21.06.2019]. Dostupné z: <https://sigrok.org/wiki/Libserialport>.
42. *{fmt}* [online] [cit. 21.06.2019]. Dostupné z: <https://github.com/fmtlib/fmt>.
43. *spdlog* [online] [cit. 21.06.2019]. Dostupné z: <https://github.com/gabime/spdlog>.
44. *MathWorks: MAT-File Format* [online]. 2019 [cit. 22.06.2019]. Dostupné z: https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/matfile_format.pdf.
45. *zlib* [online]. 15.11.2017 [cit. 22.06.2019]. Dostupné z: <https://www.zlib.net/>.
46. SKŘIVAN, Vojtěch; SODOMKA, Ondřej; MACH, František. Magnetically Controlled Peristaltic Pump. 2019.
47. SODOMKA, Ondřej. Magnetic Forces Behind Hyperelastic Behaviour of Magnetorheological Elastomers. *Compumag*. 2019.
48. UNIMAGNET. *unimagnet.cz: Železný prach - 250 gramů* [online] [cit. 23.06.2019]. Dostupné z: <https://www.unimagnet.cz/50-zelezny-prach.html>.
49. UNIMAGNET. *unimagnet.cz: Senzorová fólie Flux detektor 75x75 mm* [online] [cit. 23.06.2019]. Dostupné z: <https://www.unimagnet.cz/23-flux.html>.

Bibliografie

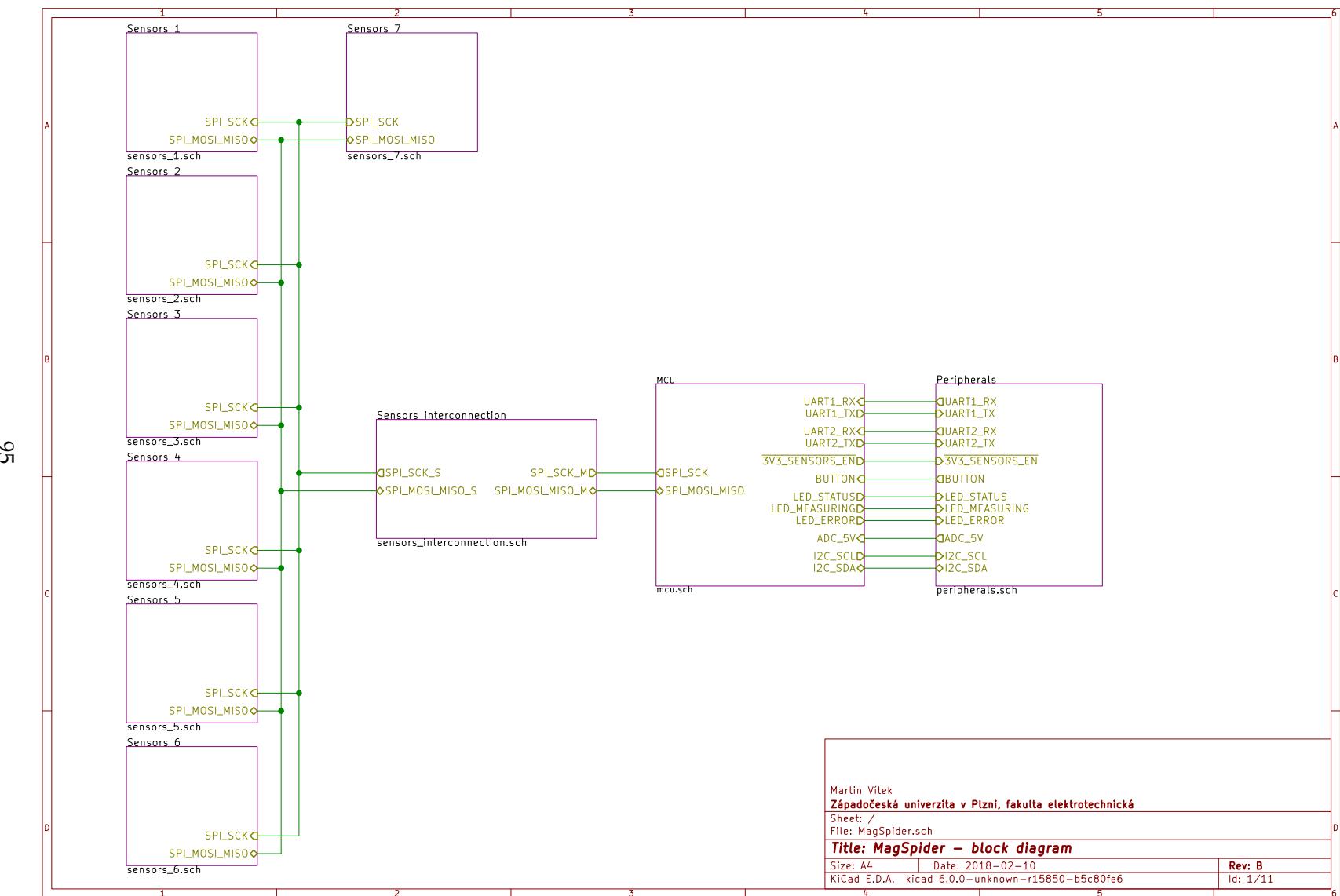
50. UNIMAGNET. *unimagnet.cz: Magnetické otazníky 1 – Co je magnetit, jak funguje magnetické pole a síla magnetu?* [online] [cit. 23.06.2019]. Dostupné z: <https://www.unimagnet.cz/blog/magneticke-otazniky-1-co-je-magnetit-jak-funguje-magneticke-pole-a-sila-magnetu-n85>.
51. YAPO, Ted. *hackaday.io: 3D Magnetic Field Scanner: Duh! and Scans!* [online]. 07.10.2016 [cit. 23.06.2019]. Dostupné z: <https://hackaday.io/project/11865-3d-magnetic-field-scanner/log/41576-duh-and-scans>.
52. HEUNIS, Christoff; SIKORSKI, Jakub; MISRA, Sarthak. Magnetic Actuation of Flexible Surgical Instruments for Endovascular Interventions. *IEEE robotics and automation magazine*. 2017.
53. SON, Donghoon; DOGAN, Mustafa Doga; SITTI, Metin. Magnetically actuated soft capsule endoscope for fine-needle aspiration biopsy. 2017.

A

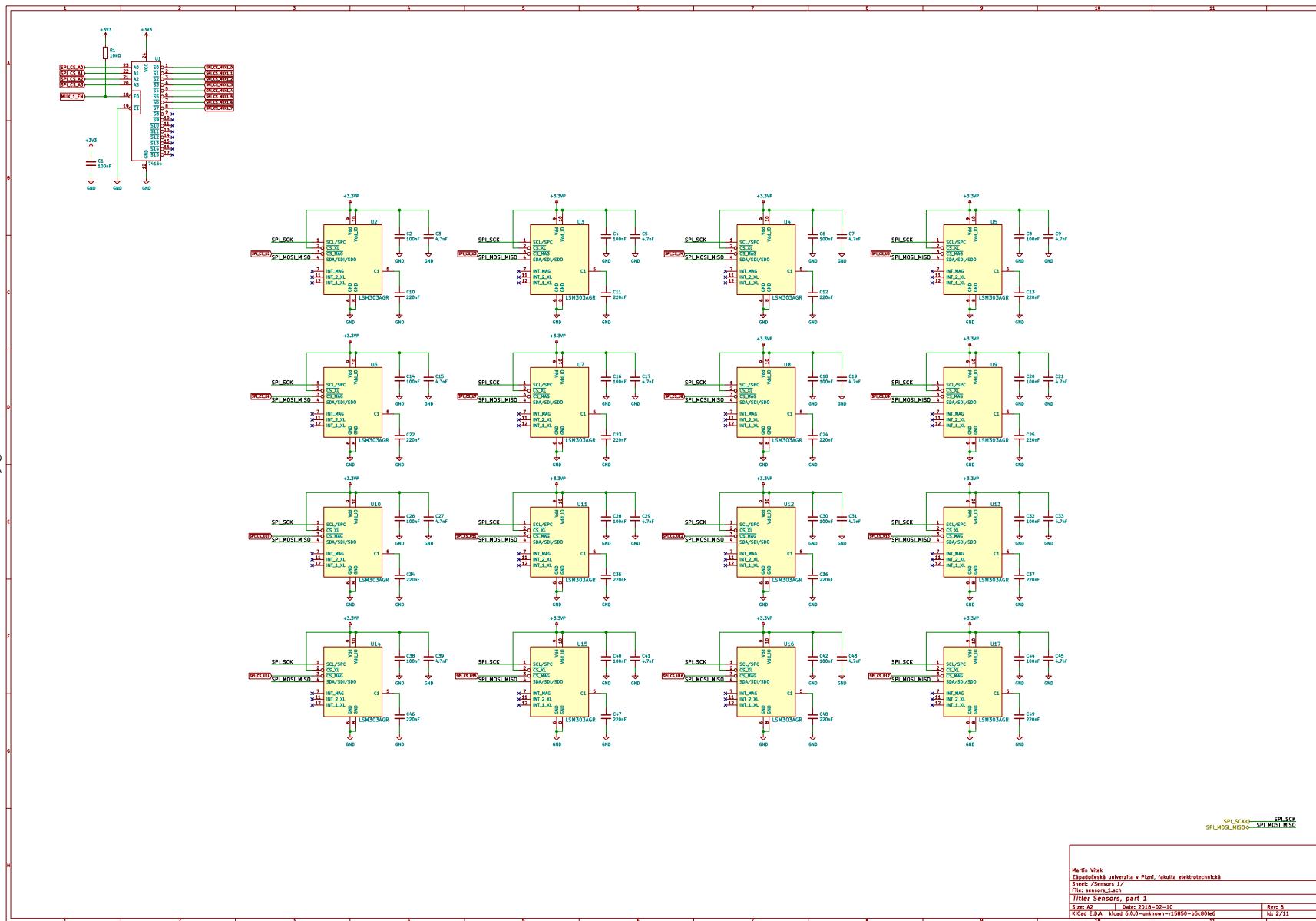
PŘÍLOHA

A.1 SCHÉMA MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ MAGSPIDER

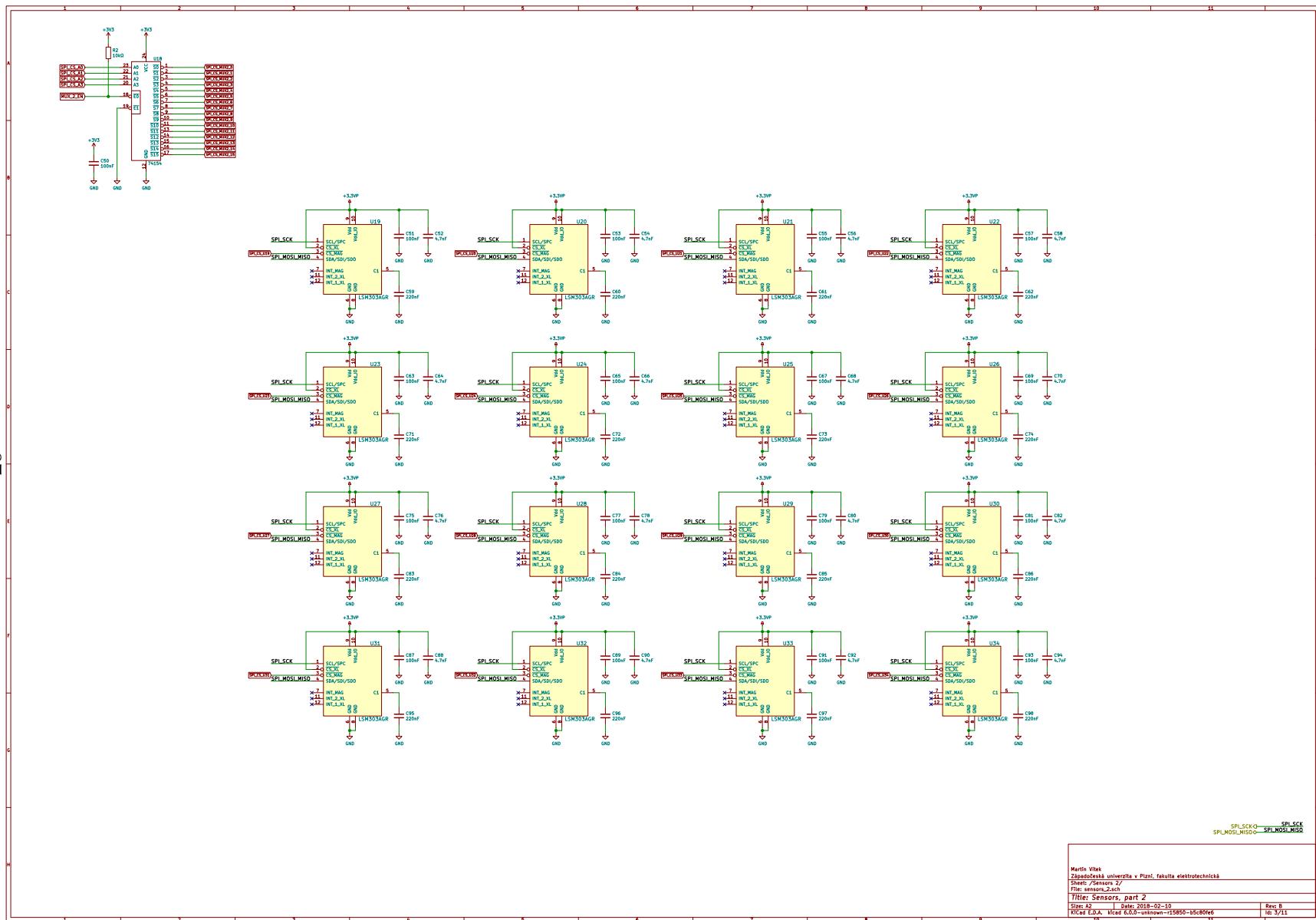
A.1 SCHÉMA MĚŘÍCÍHO ZAŘÍZENÍ MAGSPIDER



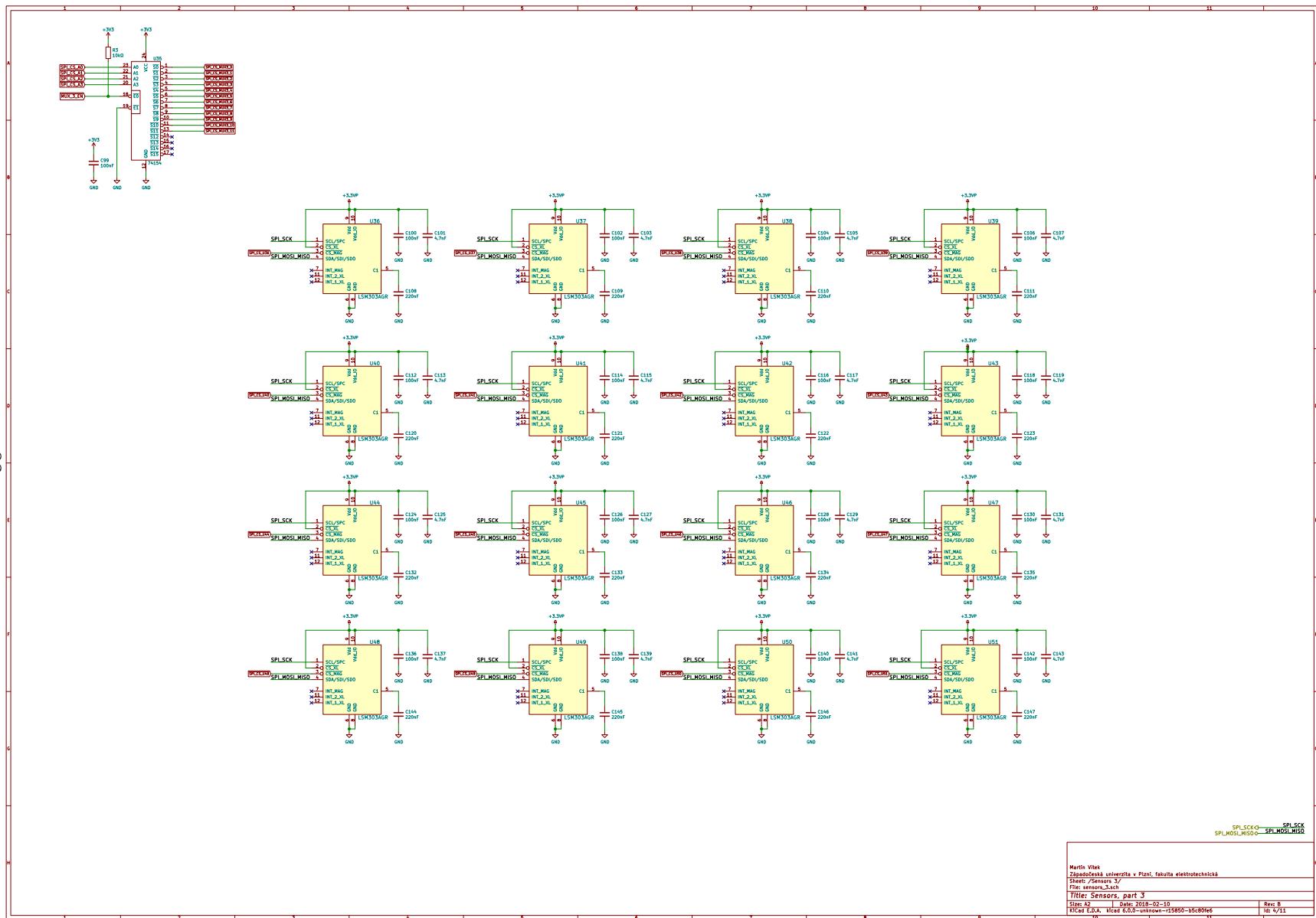
A.1 SCHÉMA MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ MAGSPIDER



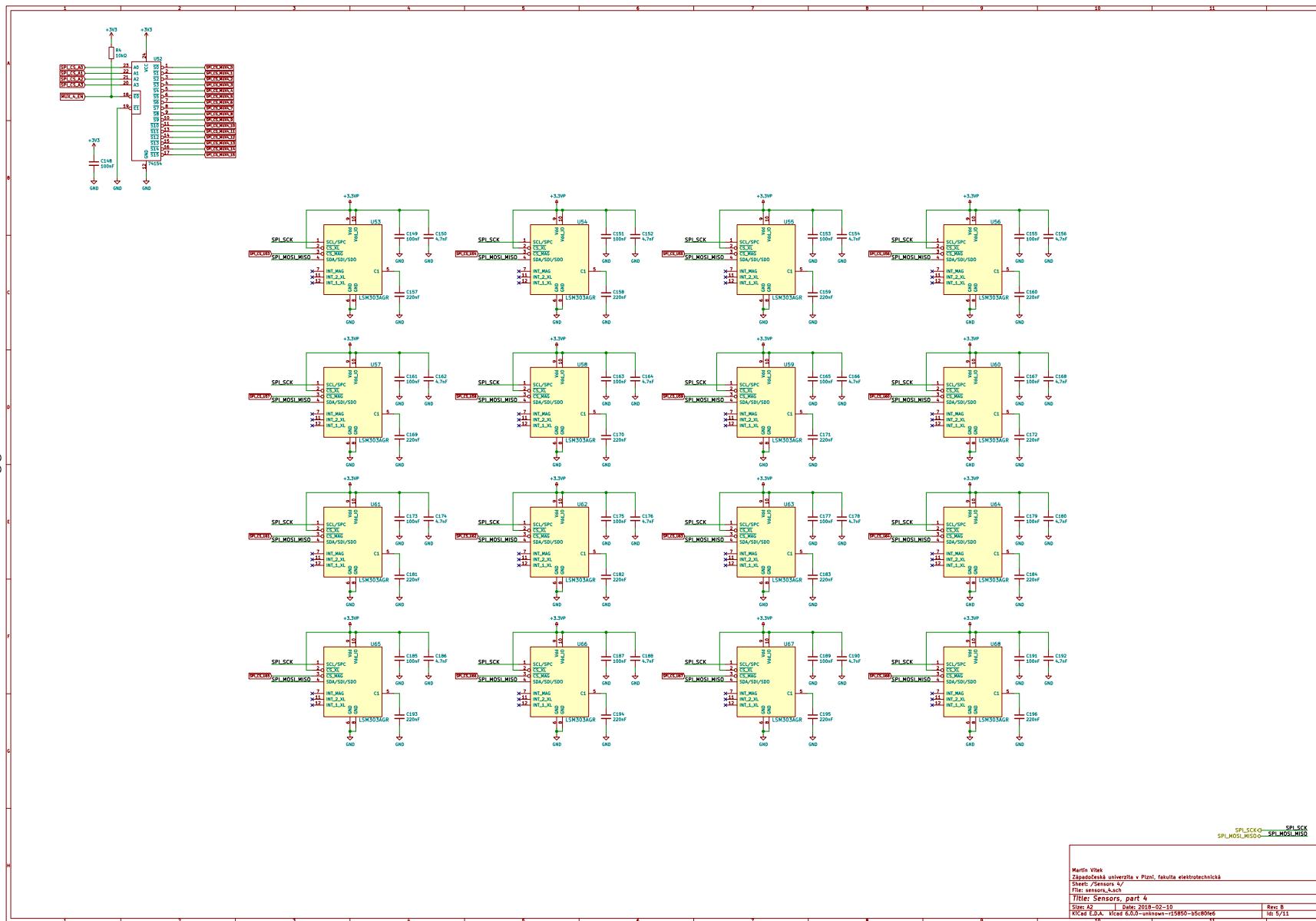
A.1 SCHÉMA MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ MAGSPIDER



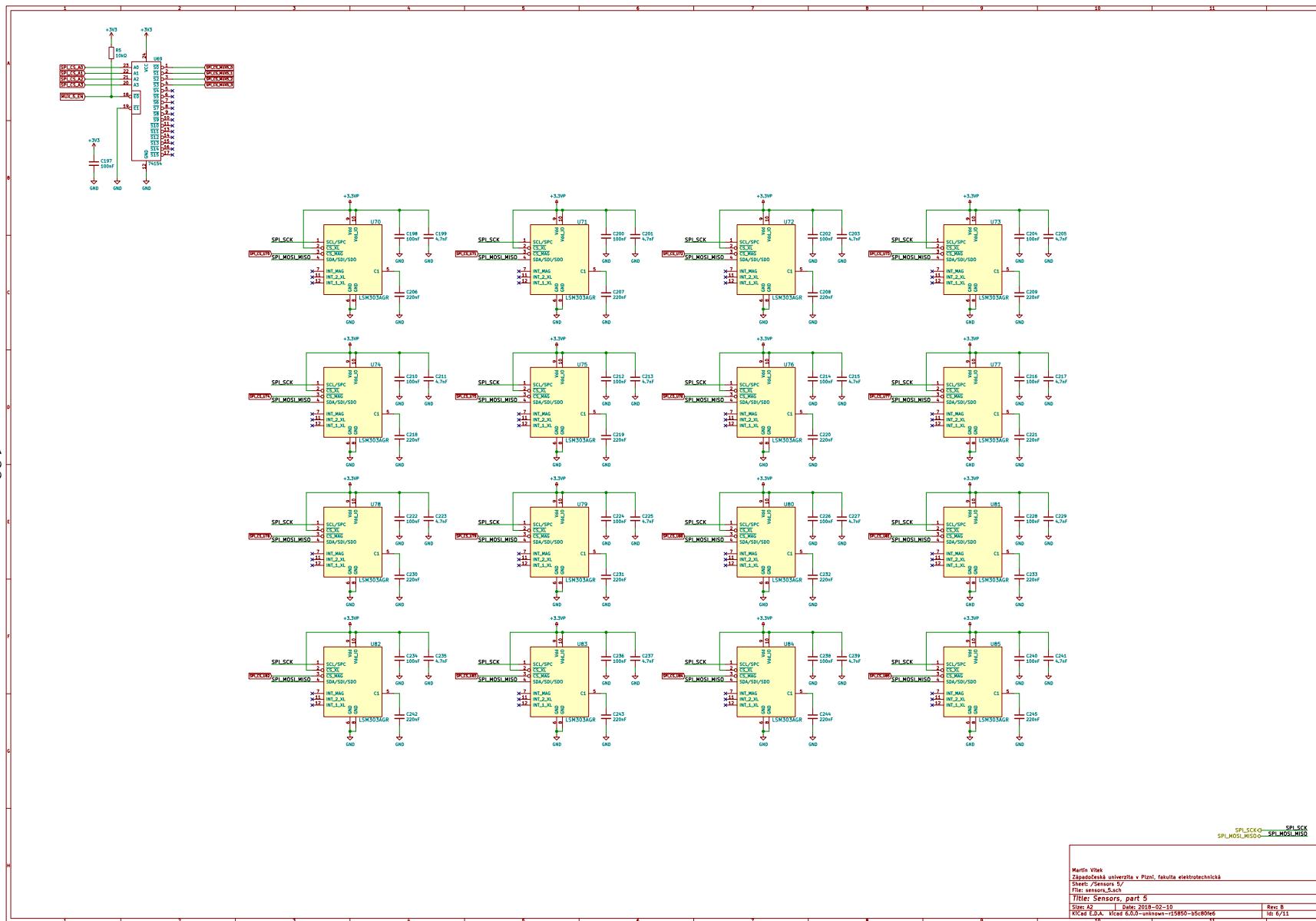
A.1 SCHÉMA MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ MAGSPIDER



A.1 SCHÉMA MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ MAGSPIDER



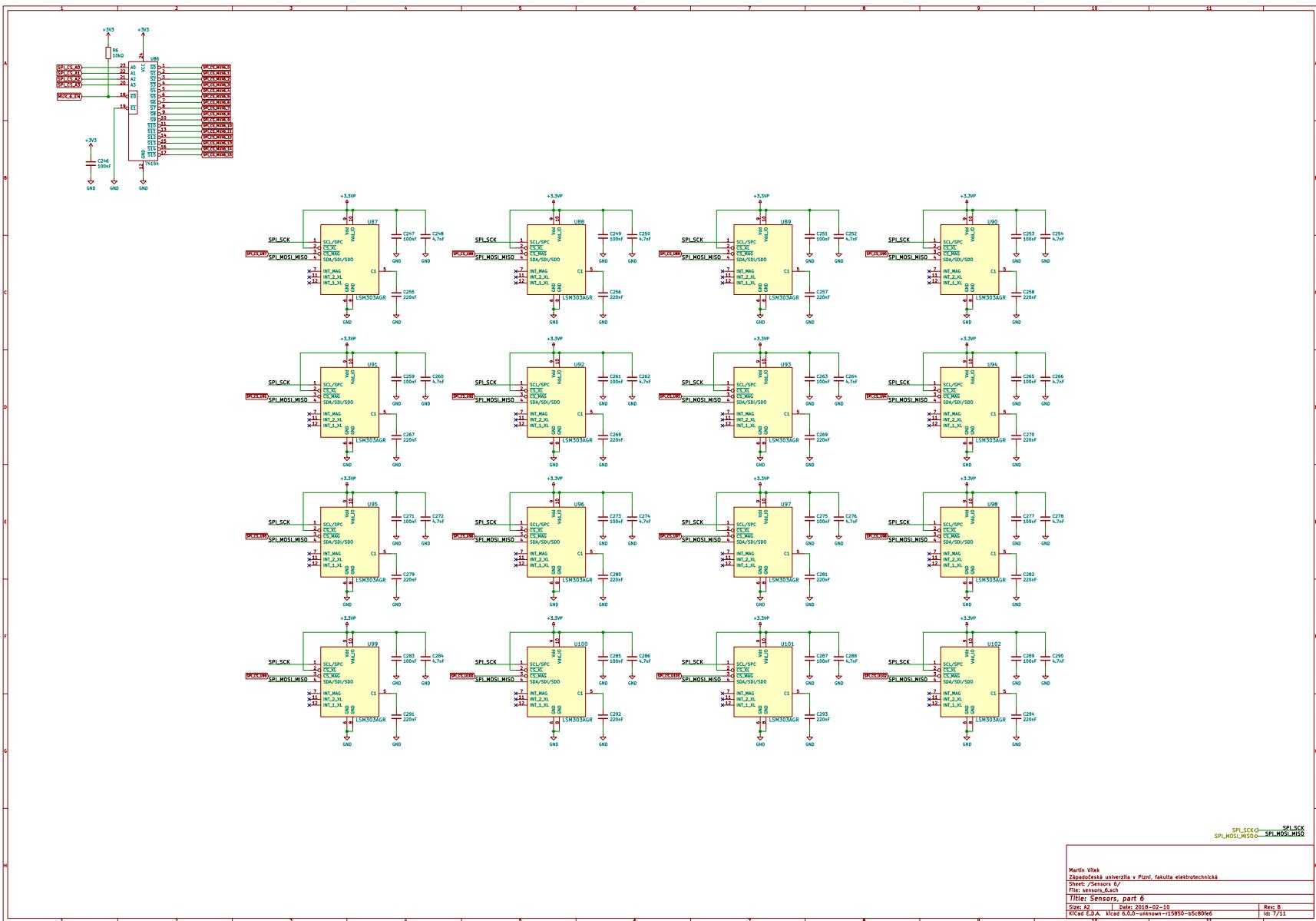
A.1 SCHÉMA MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ MAGSPIDER



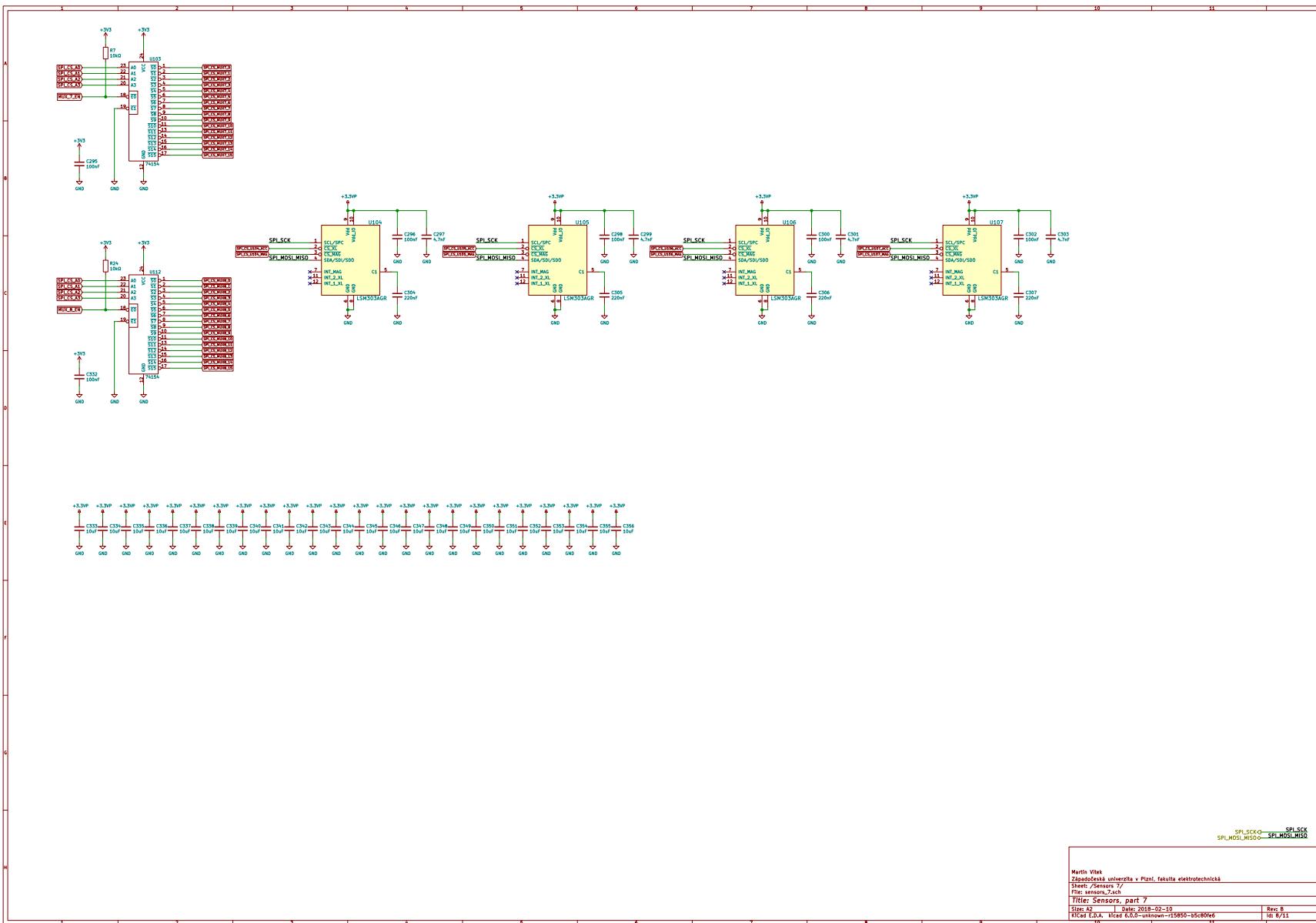
100

SPI_SCK		SPI_MOSI	
Martin Vitek	Západopolská univerzita v Plzni, fakulta elektrotechnická		
/Sensors/Sch			
File: Sensors.Schd			
Title: Sensors_part_5			
Size: A2	Date: 2018-02-10		
Editor: EDA, Verz: 6.0.0 - unknown - 15850-19c80fed			
Rev: B			
10			
11			

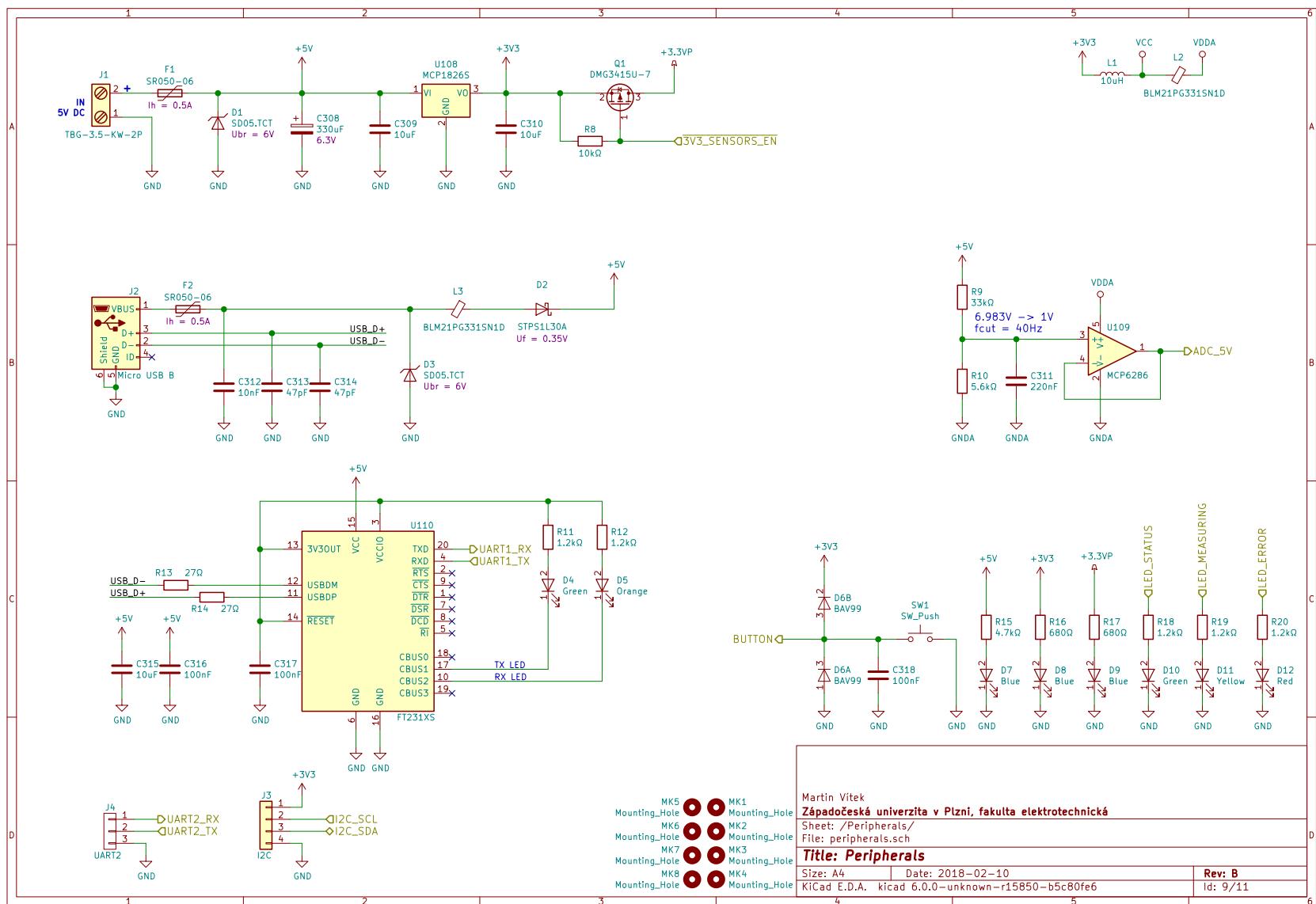
A.1 SCHÉMA MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ MAGSPIDER



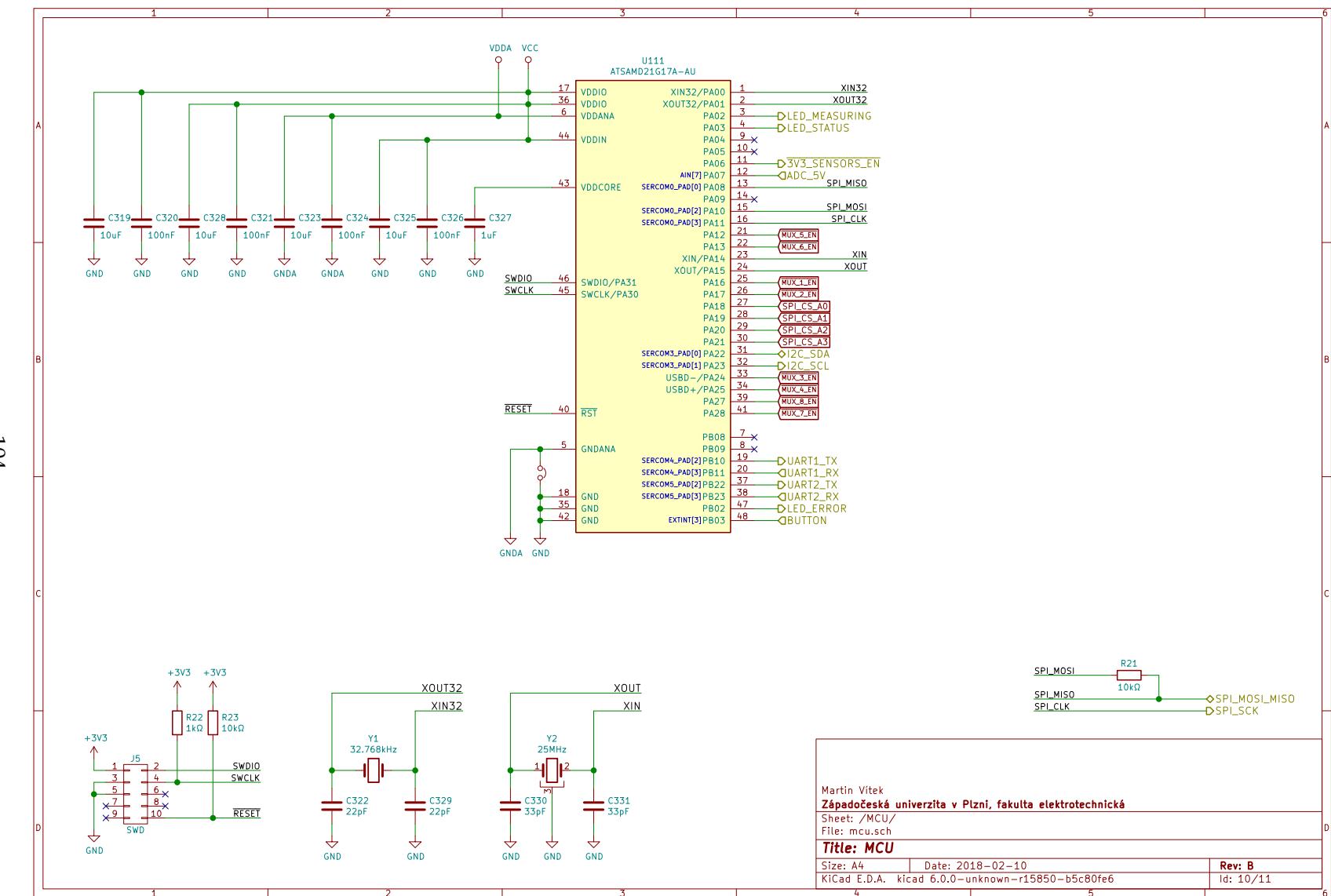
A.1 SCHÉMA MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ MAGSPIDER



A.1 SCHÉMA MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ MAGSPIDER

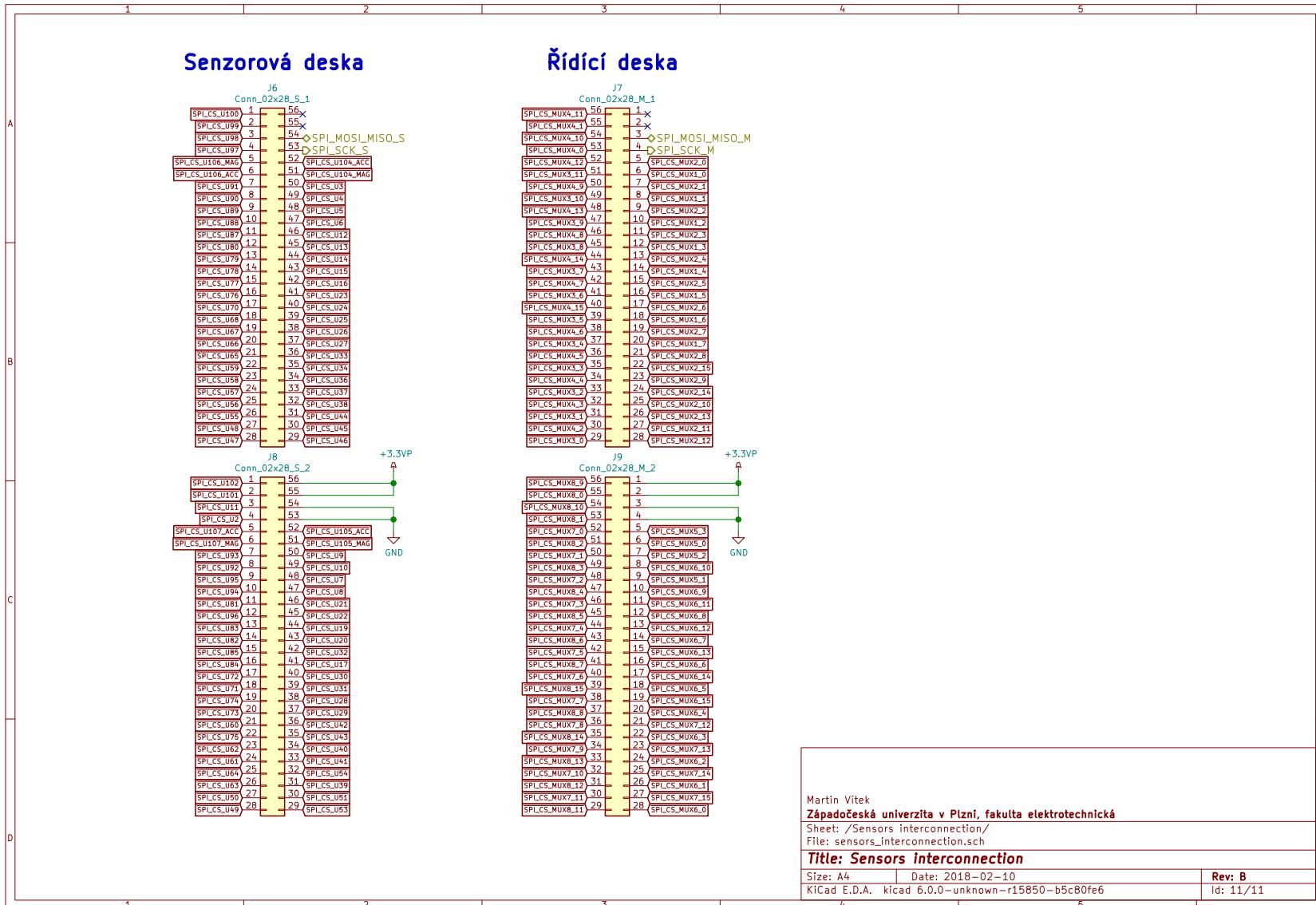


A.1 SCHÉMA MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ MAGSPIDER



A.1 SCHÉMA MĚŘÍCÍHO ZAŘÍZENÍ MAGSPIDER

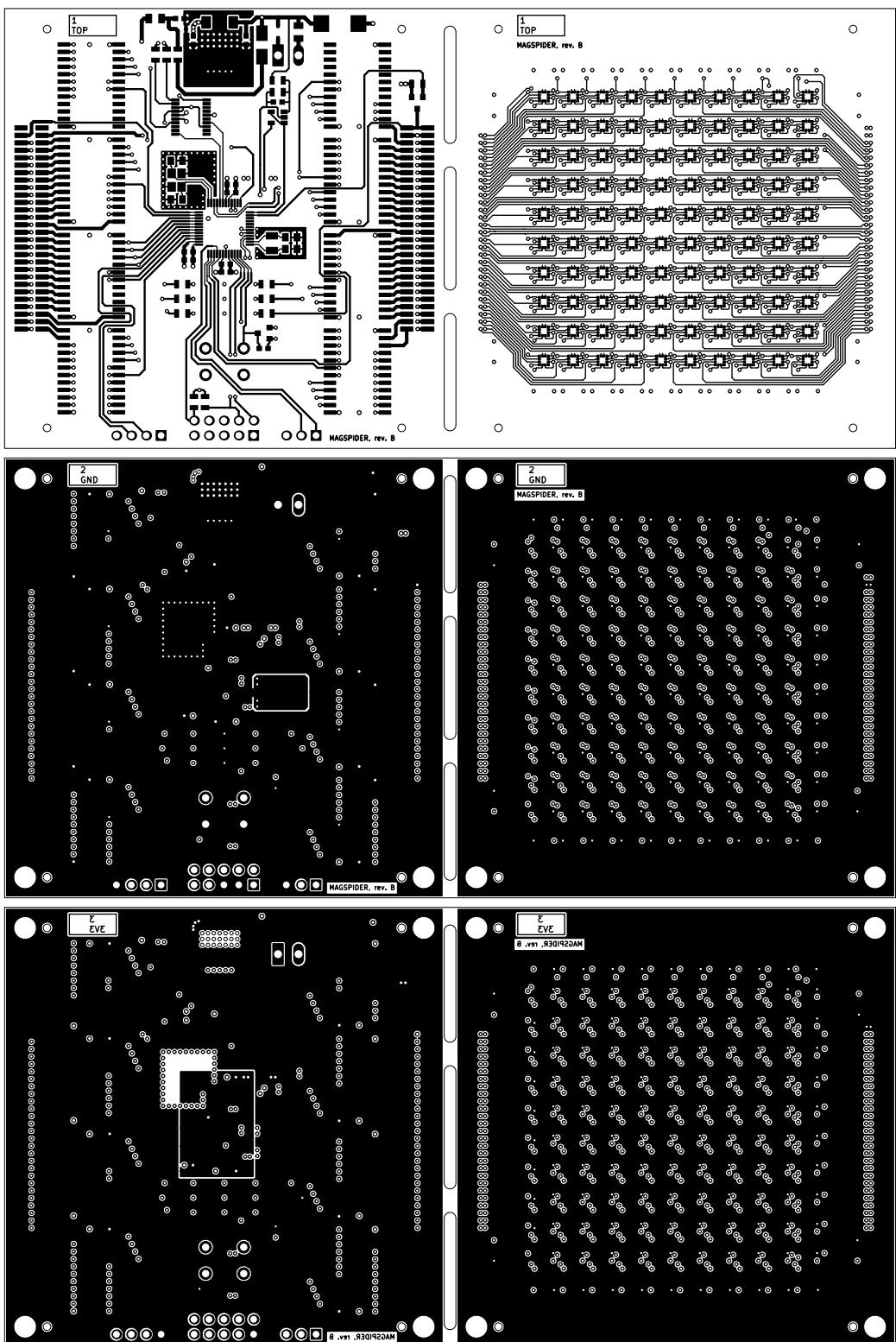
105



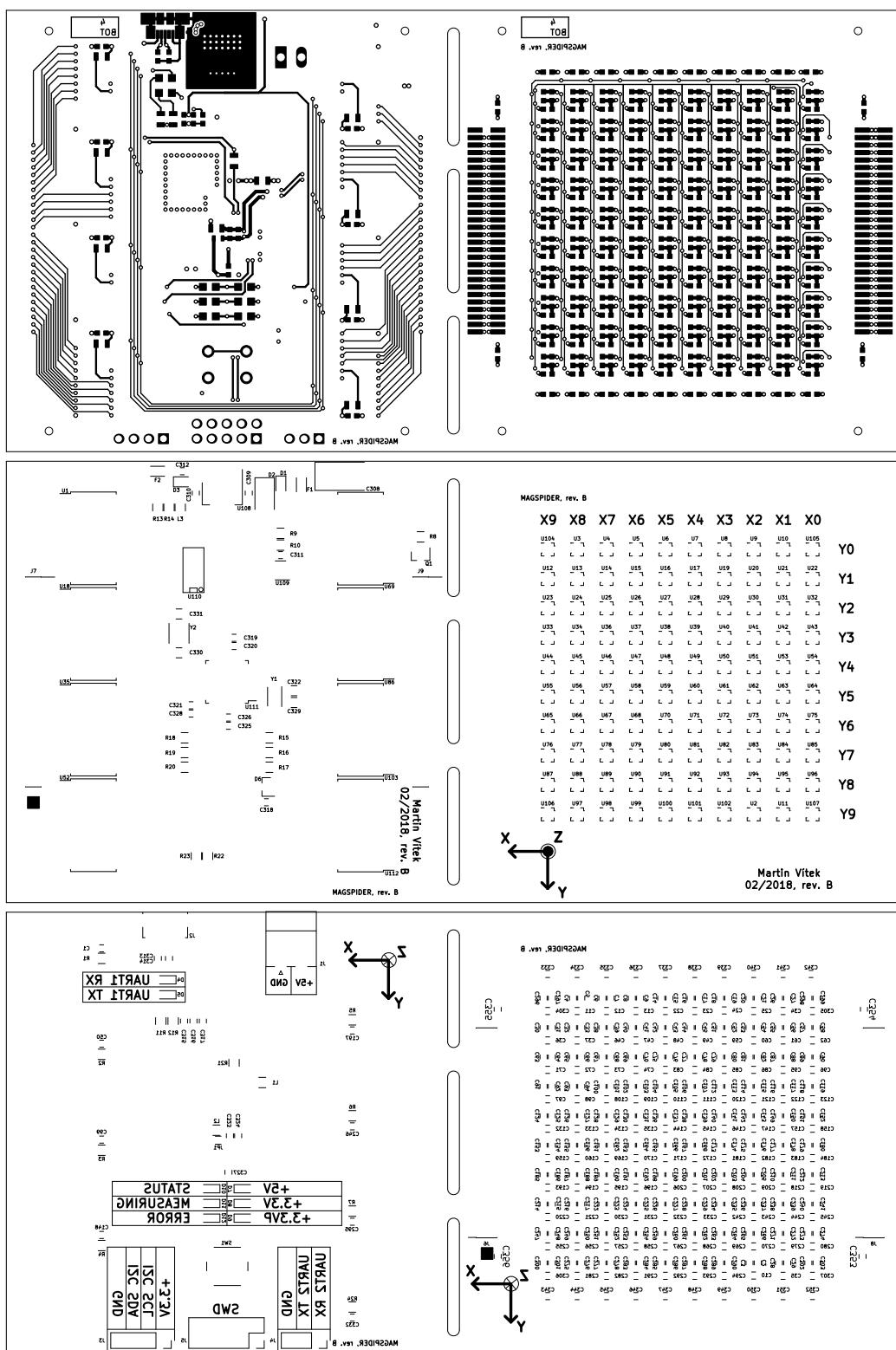
A.2 PLOŠNÝ SPOJ MĚŘÍCÍHO ZAŘÍZENÍ MAGSPIDER

A.2 PLOŠNÝ SPOJ MĚŘÍCÍHO ZAŘÍZENÍ MAGSPIDER

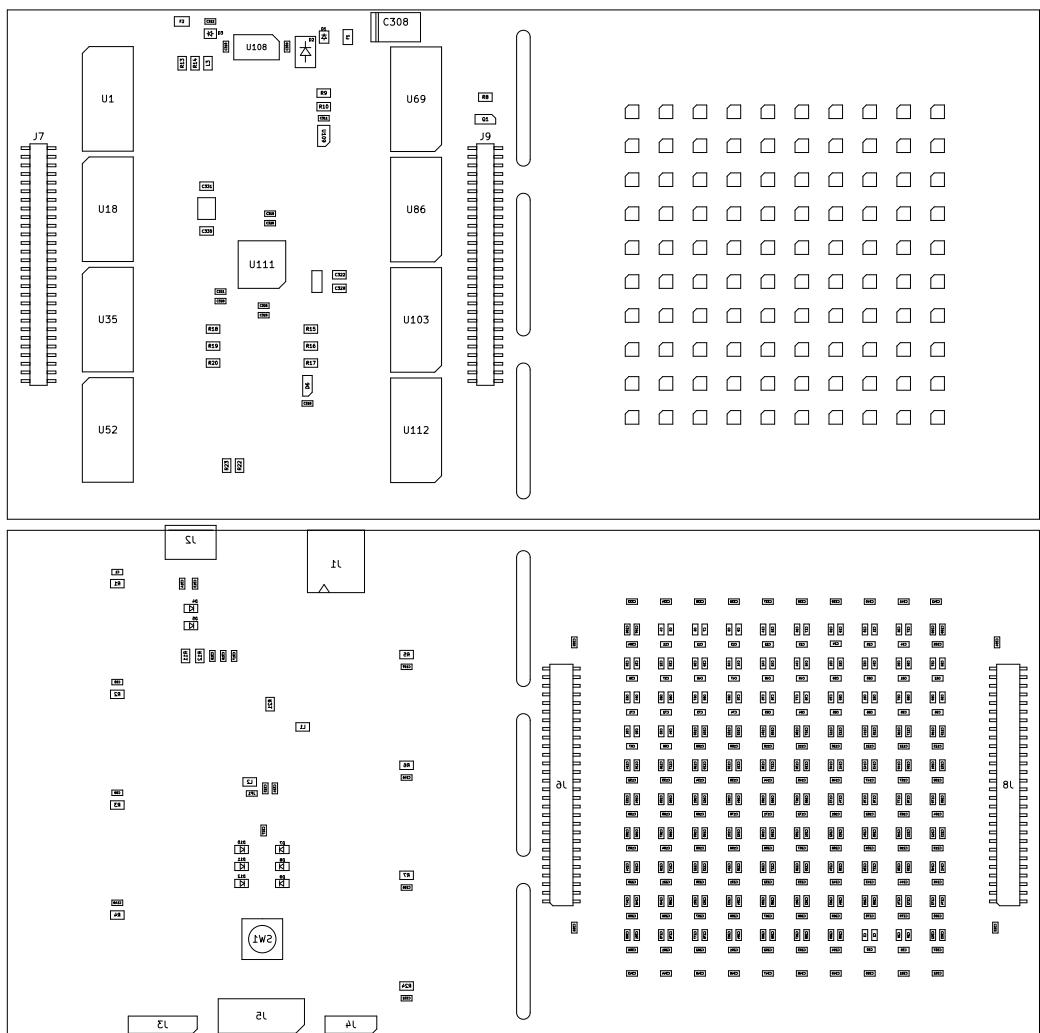
A.2 PLOŠNÝ SPOJ MĚŘÍCÍHO ZAŘÍZENÍ MAGSPIDER



A.2 PLOŠNÝ SPOJ MĚŘÍCÍHO ZAŘÍZENÍ MAGSPIDER



A.2 PLOŠNÝ SPOJ MĚŘÍCÍHO ZAŘÍZENÍ MAGSPIDER



A.3 SEZNAM TYPŮ ZPRÁV PRO MAGSPIDER

A.3.1 SEZNAM TYPŮ ZPRÁV PRO MAGSPIDER

Tab. 20: Seznam typů zpráv, které MagSpider přijímá

Zpráva	Popis
'# ' 'R ' 0	Vyžádání restartu
'# ' 'T ' 0	Vyžádání teploty senzorů
'# ' 'S ' 0	Vyžádání sériového čísla MCU
'# ' 'N ' 0	Vyžádání módu magnetometrů
'# ' 'O ' 0	Vyžádání ODR magnetometrů
'# ' 'F ' 0	Vyžádání nastavení filtru magnetometru
'# ' 'U ' 0	Vyžádání nastavení set pulzů magnetometru
'# ' 'P ' 1 state	Zapnutí/vypnutí napájení senzorů
'# ' 'C ' 1 state	Zapnutí/vypnutí kontinuálního vyčítání dat z magnetometrů
'# ' 'B ' 1 odr	Nastav ODR magnetometrů
'# ' 'D ' 1 filter	Nastav filtr magnetometrů
'# ' 'G ' 1 setpulse	Nastav frekvenci set pulzů magnetometrů

Tab. 21: Seznam typů zpráv, které MagSpider odesílá

Zpráva	Popis
'# ' 'm ' 14 x y Bx By Bz	Složky magnetické indukce ze senzoru[x,y]
'# ' 't ' 2 temperature	Průměr teploty ze senzorů
'# ' 'd ' 12 5V 3V3 mcutemp	Napětí větve 5V, 3V3 a teplota MCU
'# ' 's ' 16 sn[16]	Sériové číslo MCU
'# ' 'n ' 1 mode	Mód vyčítání dat z magnetometrů
'# ' 'o ' 1 odr	Nastavení ODR magnetometrů
'# ' 'f ' 1 filter	Nastavení filtru magnetometrů
'# ' 'u ' 1 state	Nastavení set pulzů magnetometrů

A.4 SEZNAM TYPŮ ZPRÁV PRO DERMAGTISCH

A.4.4 SEZNAM TYPŮ ZPRÁV PRO DERMAGTISCH

Tab. 22: Seznam typů zpráv, které DerMagTisch přijímá

Zpráva	Popis
'# ' 'Z' 2 x y	Zapnout výstup driveru X a/nebo Y
'# ' 'V' 2 x y	Vypnout výstup driveru X a/nebo Y
'# ' 'G' 7 ax dist speed	Posun osu ax o dist µm rychlostí speed

Tab. 23: Seznam typů zpráv, které DerMagTisch odesílá

Zpráva	Popis
'# ' 't' 1 temperature	Teplota MCU
'# ' 'd' 2 statusx statusy	Stav výstupu driverů
'# ' 'n' 2 statusx statusy	Stav pohybu os
'# ' 'm' 1 axis	Osa dojela na požadovanou pozici

A.5 SEZNAM TYPŮ ZPRÁV PRO WEBOVÉ ROZHRANÍ

A.5 SEZNAM TYPŮ ZPRÁV PRO WEBOVÉ ROZHRANÍ

Tab. 24: Seznam typů zpráv, které webové rozhraní přijímá

Zpráva

```
MAG_DATA: x y Bx By Bz
ADC: 5V 3V3 magspider_mcu_temperature
SERIAL: magspider_mcu_serial_number
MAG_MODE: mode
IN_TIME_MEASURING_STATUS:
DETAILED_MEASURING_STATUS: status
DETAILED_MEASURING_PROGRESS: progress
DERMAGTISCH_SERIAL: dermagtisch_mcu_serial_number
DERMAGTISCH_TEMPERATURE: temperature
DERMAGTISCH_DRIVERS_STATUS: driver_x driver_y
DERMAGTISCH_MOVING_STATUS: moving_x moving_y
MAGSPIDER_MAGNETOMETERS_INFO: odr filter set_pulse
SENSORS_TEMPERATURE: temperature
```

Tab. 25: Seznam typů zpráv, které webové rozhraní odesílá

Zpráva

```
RESET:
SET_CONTINUOUS_MODE: state
IN_TIME_MEASURING: state samples description
SERIAL:
MAG_MODE:
GET_IN_TIME_MEASURING_STATUS:
GET_DETAILED_MEASURING_STATUS:
SET_DRIVERS: state
TABLE_GO: axis speed distance
DETAILED_MEASURING: state steps_x steps_y speed distance
average description
SET_MAGSPIDER_MAG_ODR: odr
SET_MAGSPIDER_MAG_FILTER: filter
SET_MAGSPIDER_MAG_PULSE: pulse
SET_SENSORS_POWER_STATE: state
```

A.6 MAGSERVER - WEBOVÉ ROZHRANÍ

A.6 MAGSERVER - WEBOVÉ ROZHRANÍ

A.7 PŘÍLOHY V ELEKTRONICKÉ PODOBĚ

Na přiloženém CD jsou následující položky:

- vlastní diplomová práce ve formátu PDF,
- projekt MagSpider obsahující:
 - schéma,
 - návrh DPS,
 - podklady pro výrobu DPS,
 - zdrojový kód,
 - firmware v binární podobě,
- projekt DerMagTisch obsahující:
 - zdrojový kód,
 - firmware v binární podobě,
- projekt MagServer obsahující:
 - zdrojový kód,
 - firmware v binární podobě,
- některá zmapovaná magnetická pole,
- videa z měření.

A.7 PŘÍLOHY V ELEKTRONICKÉ PODOBĚ

MagServer status

WebSocket status: CONNECTED

In time measuring status: Disabled

Detailed measuring status: Enabled

Detailed measuring progress: 24.00 %

MagSpider status

MCU serial number: 0x3D3054C3 504C5435 382E314A FF051D39

Voltage 5V: 4.667 V

Voltage 3V3: 3.307 V

Temperature MCU: 50.09 °C

Temperature sensors: 28.37 °C

Mag mode: Continuous

ODR: 50 Hz ▾

Filter: ODR/2 ▾

Frequency of set pulse: Every 63 ODR ▾

DerMagTisch status

Temperature MCU: 21 °C

Drivers: true

Moving: x: false y: false

Connect
Enable Continuous Mode
Disable Continuous Mode
Restart MagSpider
Enable Drivers
Disable Drivers
Start In Time Measuring
Stop In Time Measuring
Start Detailed Measuring
Stop Detailed Measuring

In Time Measuring

Samples:

Detailed Measuring

Steps X: 20

Steps Y: 20

Speed: 4800 µm/s

Distance: 250 µm

Average: 4 samples

Description: magnet 250um

DerMagTisch

↑ ↓ ← →

B _x max:	840.57 µT
B _y max:	371.34 µT
B _z max:	-1870.95 µT
B _x min:	-0.23 µT
B _y min:	0.17 µT
B _z min:	-56.32 µT
B _x avg:	-10.10 µT
B _y avg:	-14.11 µT
B _z avg:	-111.69 µT
FPS:	47.62 Hz

Obr. 68: MagServer - uživatelské webové rozhraní.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1	Prototypová deska Gryllus pro magnetické polohování a dva miniroboty s pěti magnety.	16
Obrázek 2	Schématické zobrazení funkce magnetickho polohovacího zařízení. V horní části je pohled z boku. Dolní část zobrazuje pohled shora, kde je znázorněno rozložení aktuačních cívek [2].	16
Obrázek 3	Magnetic Imager Tile [4].	18
Obrázek 4	Přesný 3D scanner magnetického pole pro malé a střední magnety a detail konstrukce měřícího senzoru [5].	19
Obrázek 5	Matice senzorů malých rozměrů [6].	19
Obrázek 6	MagCam MiniCube3D a Magcam Portal/Combi Scanner [11, 12].	20
Obrázek 7	Schématické znázornění principu Hallový sondy [13].	22
Obrázek 8	Měřící zařízení MagSpider.	27
Obrázek 9	Blokové schéma měřícího zařízení MagSpider.	28
Obrázek 10	Fotografie senzoru LSM303AGR mikroskopem a jeho rentgenové snímky.	29
Obrázek 11	Schéma zapojení jednoho ze senzorů LSM303AGR.	31
Obrázek 12	Schéma zapojení jednoho z demultiplexerů.	31
Obrázek 13	Schéma zapojení třívodičového SPI. Na levé straně jsou signály připojeny do mikrokontroléru, na straně pravé do senzorů.	32
Obrázek 14	Průběhy signálů na SPI sběrnici. Modré (1) je označen signál SPI_CLK. Červeně (2) je označen signál SPI_MOSI_MISO. Prvních 8 bitů odesílá mikrokontrolér, následujících 8 bitů je odpověď od senzoru.	32
Obrázek 15	Schéma zapojení napájení.	33
Obrázek 16	Schéma zapojení napájení mikrokontroléru.	34
Obrázek 17	Schéma zapojení mikrokontroléru.	35
Obrázek 18	Schéma zapojení krystalů a programovacího konektoru.	35
Obrázek 19	Schéma zapojení převodníku UART – USB.	36
Obrázek 20	Schéma zapojení měření napájecí větve +5V.	36
Obrázek 21	Schéma zapojení tlačítka a indikačních LED.	37
Obrázek 22	Návrh plošného spoje v okolí krystalů Y1 a Y2.	37
Obrázek 23	Render plošného spoje, strana TOP na horním obrázku a strana BOT na spodním.	38

Seznam obrázků

Obrázek 24	Fotografie z osazování a pájení zařízení	39
Obrázek 25	Detail zkratů (označeny červeně) pájecích plošek senzorů z rentgenu.	40
Obrázek 26	Osazené a zapájené DPS zařízení. Na horních fotografiích je senzorová deska a na spodních je deska řídící.	40
Obrázek 27	Schéma nastavení hodinových signálů.	42
Obrázek 28	Zápis 1 B do registru magnetometru [15]. CS je výběrový signál senzoru, SPC je hodinový signál SPI_SCK a SDI je kombinovaný datový signál SPI_MOSI_MISO.	43
Obrázek 29	Vývojový diagram odesílání dat s využitím přerušení.	46
Obrázek 30	Fotografie z měření některých charakteristik. Zleva je mikroskopová laboratoř, EMC komora a měření v laboratorní peci.	48
Obrázek 31	Modrá kolečka, v horní části, znázorňují změrenou magnetickou indukci. Červeně je zobrazena přímka, která je proložena změřenými body. V dolní části je zobrazena odchylka naměřených hodnot od přímky.	50
Obrázek 32	Modrá kolečka a červené křížky znázorňují změrenou amplitudu magnetické indukce pro nastavení filtru na ODR/2 a ODR/4. Čárkovaná čára znázorňuje f_{max} , na které amplituda klesla o 3 dB (0.71 z $B_{0,5Hz}$)	50
Obrázek 33	Změřená směrodatná odchylka magnetické indukce všech magnetometrů pro všechny osy. Osy x a y určují pozici senzoru v matici. Osa z zobrazuje směrodatnou odchylku	51
Obrázek 34	Modrá čára zobrazuje odchylku změřené magnetické indukce. Červená čára je polynom druhého řádu proložený naměřenými daty.	51
Obrázek 35	Horní část grafu zobrazuje teplotní závislost všech magnetometrů při změně teploty z 22 °C na 85 °C. V dolní části, osy x a y udávají pozici senzoru v matici a osa z zobrazuje absolutní hodnotu z rozdílu mezi změrenou magnetickou indukcí při 30 °C a 85 °C.	52
Obrázek 36	Polohovací zařízení DerMagTisch.	54
Obrázek 37	Propojené drivery s řídícím mikrokontrolérem.	56
Obrázek 38	Sestavené polohovací zařízení DerMagTisch.	57
Obrázek 39	3D model prototypu držáku pro měřená tělesa. Červený rám je nasazen na závitových tyčích základny. Měřené těleso je přilepeno k žluté části, kterou lze pomocí závitové tyče umístit těsně nad senzory.	58
Obrázek 40	Měřící zařízení MagSpider přimontované na první díl držáku.	58

Seznam obrázků

Obrázek 41	Druhý díl držáku, kterým se měřící zařízení MagSpider připevní ke křížovému stolu.	58
Obrázek 42	Měření kroku a vůle křížového stolu pomocí úchylkoměru.	61
Obrázek 43	Blokové schéma celého mapovacího zařízení.	65
Obrázek 44	Ukázka struktury uloženého souboru s daty ze 100 vzorků.	68
Obrázek 45	Ukázka spuštění MagServeru se specifikovaným portem.	69
Obrázek 46	Uživatelské rozhraní - MagServer - zobrazení stavu.	70
Obrázek 47	Uživatelské rozhraní -MagSpider - zobrazení stavu.	70
Obrázek 48	Uživatelské rozhraní - DerMagTisch - zobrazení stavu.	70
Obrázek 49	Uživatelské rozhraní - ovládání měření.	71
Obrázek 50	Uživatelské rozhraní - živé zobrazení měřených dat.	71
Obrázek 51	Měření cívky se vzduchovým jádrem v čase, která byla buzena sinusovým signálem o frekvenci 1 Hz.	74
Obrázek 52	Měření cívky se vzduchovým jádrem v čase, která byla buzena obdélníkovým signálem o frekvenci 1 Hz.	75
Obrázek 53	Měření cívky se vzduchovým jádrem v čase, která byla buzena trojúhelníkovým signálem o frekvenci 1 Hz.	75
Obrázek 54	Měření prostředí kanceláře v čase. Průběh je vyfiltrovaný klouzavým průměrem přes 300 vzorků.	75
Obrázek 55	Měření prostředí EMC komory v čase. Průběh je vyfiltrovaný klouzavým průměrem přes 300 vzorků.	76
Obrázek 56	Měření otáčejícího se magnetického pole rotoru peristatického čerpadla <i>Intestino</i> v čase. Postupně jsou zobrazeny vektory magnetické indukce v časech 80 ms, 240 ms a 360 ms.	76
Obrázek 57	Detailně zmapovaný magnet o velikosti 1 mm × 1 mm × 1 mm s krokem měření 5 µm. V levé části je boční pohled na řez vektorů zmapovaného pole. Modře označená část je detailně zobrazena v pravé části.	78
Obrázek 58	Ilustrace magnetického pole magnetu v základním rozlišení 10 px × 10 px. Barevná mapa zobrazuje amplitudu magnetické indukce. Modré čáry zobrazují siločáry.	78
Obrázek 59	Demonstrace různých rozlišení (kroku) mapování. Mapován byl válcový magnet o průměru 1 mm a výšce 1 mm s rozlišením 20 px × 20 px (krok 2 500 µm), 200 px × 200 px (krok 250 µm) a 500 px × 500 px (krok 100 µm). Zobrazen je výrez z naměřených dat.	79
Obrázek 60	Zmapované pole cívky se vzduchovým jádrem (při 2 mA) a dvou miniaturních magnetů s rozlišením 500 px × 500 px (krok 100 µm).	79
Obrázek 61	Zmapované pole magnetu na ledničku s rozlišením 500 px × 500 px (krok 100 µm).	79

Seznam obrázků

Obrázek 62	Zmapované pole minirobotu s pěti magnety s rozlišením 500 px × 500 px (krok 100 µm).	80
Obrázek 63	Zmapované pole prototypové desky <i>MagStrier</i> s rozlišením 500 px × 500 px (krok 100 µm). Prostřední graf zobrazuje pohled z boku, pravý ze shora.	80
Obrázek 64	Zmapované pole matice 100 magnetů s rozlišením 200 px × 200 px (krok 250 µm). Magnety jsou orientovány tak, že tvoří logo Západočeské univerzity v Plzni.	80
Obrázek 65	Zmapované pole dvou vzorků magnetoreologických elastomerů s rozlišením 500 px × 500 px (krok 100 µm). Na prostředním grafu je zobrazen prototyp <i>Gekon</i> se železnými mikročásticemi, na levém prototyp s neodymovými mikročásticemi s pulzní sinusovou magnetizací [47].	81
Obrázek 66	Příklady pokusů se železnými pilinami a fólií flux detektor [50, 49].	83
Obrázek 67	Zmapované magnetické pole ve 3D prostoru [51].	84
Obrázek 68	MagServer - uživatelské webové rozhraní.	114

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2	Parametry různých senzorů magnetického pole.	25
Tabulka 3	Parametry senzoru LSM303AGR udávané výrobcem.	30
Tabulka 4	Parametry magnetometru senzoru LSM303AGR udávané výrobcem.	30
Tabulka 5	Parametry akcelerometru senzoru LSM303AGR udávané výrobcem.	30
Tabulka 6	Nastavení hlavního UART rozhraní.	45
Tabulka 7	Nastavení vedlejšího UART rozhraní.	45
Tabulka 8	Formát zprávy.	47
Tabulka 9	Příklad zprávy se změřenou magnetickou indukcí senzoru [8,1].	47
Tabulka 10	Změřené hodnoty napájecího proudu při 5 V. ODR (Output Data Rate) je vzorkovací frekvence magnetometrů.	49
Tabulka 11	Parametry křížového stolu KT 70 CNC-ready udávané výrobcem.	55
Tabulka 12	Parametry krokových motorů LDO-42STH47-1804ACP udávané výrobcem.	55
Tabulka 13	Propojení driverů a mikrokontroléru.	56
Tabulka 14	Nastavení UART rozhraní.	60
Tabulka 15	Změřená velikost kroku křížového stolu.	62
Tabulka 16	Průměrná velikost vůlí křížového stolu pro obě osy a oba směry pohybu.	63
Tabulka 17	Velikost vůlí křížového stolu pro různé polohy osy x a pro oba směry pohybu.	63
Tabulka 18	Parametry vytvořeného systému.	82
Tabulka 19	Cena součástí vytvořeného systému.	83
Tabulka 20	Seznam typů zpráv, které MagSpider přijímá	110
Tabulka 21	Seznam typů zpráv, které MagSpider odesílá	110
Tabulka 22	Seznam typů zpráv, které DerMagTisch přijímá	111
Tabulka 23	Seznam typů zpráv, které DerMagTisch odesílá	111
Tabulka 24	Seznam typů zpráv, které webové rozhraní přijímá	112
Tabulka 25	Seznam typů zpráv, které webové rozhraní odesílá	112