



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

MĚŘENÍ POHYBU INERCIÁLNÍMI SENZORY

MOTION MEASUREMENT BY INERTIAL SENSORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Veronika Junasová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vladimír Levek, Ph.D.

BRNO 2022

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

Studentka: Bc. Veronika Junasová

ID: 199982

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Měření pohybu inerciálními senzory

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte přípravek pro měření pohybu v prostoru pomocí akcelerometru, gyroskopu a magnetometru. Nejprve prostudujte možné metody měření jak z mechanického tak i z elektrotechnického pohledu. Zjistěte dostupná řešení a zvolte vhodnou metodu optimalizovanou z hlediska přesnosti a dostupnosti zvoleného senzoru. Součástí diplomové práce bude rovněž popis měření, optimalizace, filtrace, kalibrace a vyhodnocení výsledků měření. Zařízení navrhněte, realizujte a také proveďte řadu měření pro specifické druhy pohybů. Výsledky měření kvalifikovaně diskutujte a zhodnoťte jednotlivé měřicí postupy a metody.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 24.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Vladimír Levek, Ph.D.

doc. Ing. Lukáš Fucik, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Táto práca sa zameriava na meranie špecifických druhov pohybu v priestore s využitím inerciálnych senzorov, a to akcelerometrom, gyroskopom a magnetometrom. Nachádza sa tu základný popis zmienených senzorov, popis spôsobov filtrácie ich meraní a odvodený matematický popis merania. Súčasťou práce je návrh prípravku s vybranými senzormi, popis kalibrácie senzorov, meranie inklinácie a azimutu, optimalizácia merania, implementácia zvoleného filtra. Funkčnosť merania, kalibrácie a filtrácie je v práci podložená ukázkami výstupov merania.

Kľúčové slová

Akcelerometer, gyroskop, magnetometer, inklinácia, azimut, kalibrácia, filtrácia.

Abstract

This work deals with measuring specific types of movement in space using inertial sensors. It focuses on accelerometer, gyroscope and magnetometer. There is basic introduction to mentioned sensors, description of means of filtration their measurements and related mathematical part. The work contains design of board with selected sensors, description of sensors calibration, measurement of inclination and azimuth, optimization of measurement, implementation of chosen filter. Functionality of measurement, calibration and filtration is demonstrated by results of measurement.

Keywords

Accelerometer, gyroscope, magnetometer, inclination, azimuth, calibration, filtration.

Bibliografická citácia

JUNASOVÁ, V. *Meranie pohybu inerciálnymi senzormi*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2022. 79 s., 4 s. příloh. Diplomová práce. Vedúci práce: Ing. Vladimír Levek, Ph.D.

Prehlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko študenta:	<i>Veronika Junasová</i>
VUT ID študenta:	<i>199982</i>
Typ práce:	<i>Diplomová práca</i>
Akademický rok:	<i>2021/22</i>
Téma záverečnej práce:	<i>Meranie pohybu inerciálnymi senzormi</i>

Prehlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracovala samostatne pod vedením vedúceho záverečnej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušila autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahla nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomá následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Zb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníku č. 40/2009 Zb.

V Brne dňa: 24. mája 2022

podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu diplomovej práce Ing. Vladimírovi Levkovi, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej diplomovej práce.

V Brne dňa: 24. mája 2022

podpis autora

Obsah

ZOZNAM OBRÁZKOV	9
ZOZNAM TABULIEK	11
ÚVOD	12
1. INERCIÁLNE SENZORY	13
1.1 PRINCÍP FUNKCIE AKCELEROMETRA	13
1.1.1 Druhy akcelerometrov podľa počtu rovín	14
1.1.2 Druhy akcelerometrov podľa hardvérového vybavenia	15
1.1.3 Druhy akcelerometrov podľa prevodného mechanizmu	15
1.1.4 Kalibrácia akcelerometrov	17
1.2 PRINCÍP FUNKCIE GYROSKOPU	18
1.2.1 Druhy gyroskopov podľa počtu osí	19
1.2.2 Druhy gyroskopov podľa hardvérového vybavenia	19
1.2.3 Druhy gyroskopov podľa princípu merania	20
1.2.4 Kalibrácia gyroskopov	22
1.3 PRINCÍP FUNKCIE MAGNETOMETRA	23
1.3.1 Druhy magnetometrov podľa hardvérového vybavenia	23
1.3.2 Druhy magnetometrov podľa fyzikálneho javu	23
1.3.3 Druhy magnetometrov podľa schopnosti merania typu veličiny	25
1.3.4 Kalibrácia magnetometrov	25
2. FILTRÁCIA A MATEMATICKÝ APARÁT	31
2.1 FILTRÁCIA VÝSTUPOV INERCIÁLNYCH SENZOROV	31
2.1.1 Kalmanov filter	31
2.1.2 Komplementárny filter	31
2.1.3 Komplementárny Kalmanov filter	32
2.2 MATEMATICKÝ POPIS INERCIÁLNYCH SENZOROV	32
2.2.1 Matematický popis určenie inklinácie akcelerometrom	32
2.2.2 Matematický popis určenie uhlov gyroskopom	36
2.2.3 Matematický popis určenia azimutu magnetometrom	37
3. NÁVRH PRÍPRAVKU	38
3.1 NAPÁJACIA ČASŤ PRÍPRAVKU	39
3.1.1 USB rozhranie	39
3.1.2 Batéria s nabíjacím obvodom	40
3.1.3 Lineárny stabilizátor LDO	42
3.2 RIADIACA ČASŤ PRÍPRAVKU	43
3.2.1 Mikrokontrolér MCU	43
3.2.2 Externá pamäť	45
3.2.3 Užívateľské rozhranie	46
3.3 ČASŤ PRÍPRAVKU S INERCIÁLNYMI SENZORMI	46
3.3.1 Akcelerometer a gyroskop	47
3.3.2 Magnetické senzory	48
4. REALIZÁCIA A OŽIVENIE PRÍPRAVKU	50

4.1	REALIZÁCIA A VÝROBA DPS.....	50
4.2	PROGRAMOVÉ VYBAVENIE.....	51
4.3	MERANIE A TESTOVANIE PRÍPRAVKU.....	56
4.3.1	<i>Kalibrácia magnetometrov.....</i>	<i>57</i>
4.3.2	<i>Testovanie merania azimutu magnetometrami.....</i>	<i>62</i>
4.3.3	<i>Kalibrácia akcelerometra a gyroskopu.....</i>	<i>67</i>
4.3.4	<i>Testovanie merania inklinácie.....</i>	<i>69</i>
4.3.5	<i>Testovanie merania azimutu gyroskopom.....</i>	<i>71</i>
	ZÁVER.....	75
	LITERATÚRA.....	77
	ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK.....	82
	ZOZNAM PRÍLOH.....	88

ZOZNAM OBRÁZKOV

1.1	Štruktúra kapacitného MEMS akcelerometra, prevzaté z [8].....	16
1.2	Štruktúra piezorezistívneho akcelerometra, prevzaté z [9].....	16
1.3	Štruktúra piezoelektrického akcelerometra, prevzaté z [11]	17
1.4	Koncepcia mechanického gyroskopu, prevzaté z [18]	20
1.5	Princíp Sagnacovho efektu v optickom gyroskope, prevzaté z [19].....	21
1.6	Koncepcia vibračného gyroskopu, prevzaté z [2]	22
1.7	Znázornenie Hallovho efektu, prevzaté z [2]	24
1.8	Znázornenie Lorentzovej sily F_L , prevzaté z [28]	25
1.9	Ideálne výsledky merania magnetometra bez vonkajšieho rušenia, prevzaté z [31]	26
1.10	Skreslenie spôsobené magneticky tvrdými materiálmi, prevzaté z [31].....	27
1.11	Skreslenie spôsobené magneticky mäkkými materiálmi, prevzaté z [31]	28
2.1	Referenčná sústava súradníc s vyznačenými smermi referenčných osí, osí akcelerometra, rotácií, uhlov rotácií a vektoru tiažového zrýchlenia, prevzaté z [4].....	33
2.2	Príklad náklonu akcelerometra valením, prevzaté z [34]	34
2.3	Natočenie trojosového akcelerometra v priestore, prevzaté z [4].....	35
3.1	Kompletná bloková schéma meracieho prípravku	38
3.2	Schéma zapojenia USB rozhrania	39
3.3	Batéria s nabíjacím obvodom	41
3.4	Schéma diódovej logiky výberu napájania a zapojenie LDO.....	42
3.5	Schéma zapojenia vývodov MCU so signálmi a napájaním.....	44
3.6	Schéma zapojenia konektoru na programovanie MCU	45
3.7	Schéma zapojenia externej pamäti EEPROM	45
3.8	Zapojenie LED diód a tlačidla.....	46
3.9	Schéma zapojenia IMU obsahujúca akcelerometer a gyroskop	47
3.10	Schéma zapojenia magnetometru MMC5633NJL	48
3.11	Schéma zapojenia magnetometru BM1422AGMV	49
4.1	Horná strana meracieho prípravku	50
4.2	Spodná strana meracieho prípravku so senzormi	51
4.3	Vývojový diagram meracieho prípravku.....	52
4.4	Kruhový podstavec na meranie otáčaním okolo osi z	57
4.5	Rozmiestnenie nameraných hodnôt v priestore z magnetometra MMC pri otáčaní okolo osi z pred kalibráciou.....	58
4.6	Rozmiestnenie hodnôt v priestore z magnetometra MMC pri otáčaní okolo osi z po kalibrácii skreslenia magneticky tvrdými materiálmi (modrá závislosť) a po kompletnej kalibrácii (oranžová závislosť).....	59
4.7	Rozmiestnenie nameraných hodnôt v priestore z magnetometra BM pri otáčaní okolo osi z pred kalibráciou.....	60
4.8	Rozmiestnenie hodnôt v priestore z magnetometra BM pri otáčaní okolo osi z po kalibrácii skreslenia magneticky tvrdými materiálmi (modrá závislosť) a po kompletnej kalibrácii (oranžová závislosť).....	61
4.9	Meranie azimutu magnetometrom MMC pri pomalom otáčaní	63
4.10	Meranie azimutu magnetometrom BM pri pomalom otáčaní.....	64
4.11	Závislosť zmeranej hodnoty uhlu azimutu magnetometrom MMC na nastavovanom uhle	65
4.12	Závislosť relatívnej odchýlky azimutu magnetometra MMC na nastavovanom uhle	65
4.13	Závislosť zmeranej hodnoty uhlu azimutu magnetometrom BM na nastavovanom uhle	66
4.14	Závislosť relatívnej odchýlky azimutu magnetometra BM na nastavovanom uhle.....	67

4.15	Zmerané a vykompenzované hodnoty akcelerometra pre osi x a y	68
4.16	Zmerané a vykompenzované hodnoty akcelerometra pre osi z	68
4.17	Zmerané a vykompenzované hodnoty gyroskopu pre osi x , y , z	69
4.18	Meranie tiltu akcelerometrom pri odklone od osi z	70
4.19	Závislosť zmeranej hodnoty uhlu tiltu akcelerometrom na nastavovanom uhle	70
4.20	Závislosť relatívnej odchýlky tiltu na nastavovanom uhle	71
4.21	Meranie azimutu gyroskopom otáčaním okolo osi z	72
4.22	Meranie azimutu gyroskopom pri rýchlom otočení	72
4.23	Závislosť zmeranej hodnoty uhlu azimutu magnetometrom MMC na nastavovanom uhle	73
4.24	Závislosť relatívnej odchýlky azimutu magnetometra MMC na nastavovanom uhle	74

ZOZNAM TABULIEK

3.1	Prúdový odber vybraných súčiastok prípravku	40
4.1	Príkazy zadávané do terminálu a funkcie nimi vyvolané	53
4.2	Parametre merania magnetometrom MMC na kalibráciu skreslenia magneticky tvrdými materiálmi	58
4.3	Parametre merania magnetometrom MMC na kalibráciu skreslenia magneticky mäkkými materiálmi	59
4.4	Parametre merania magnetometrom MMC po dokončení kalibrácie	60
4.5	Parametre merania magnetometrom BM na kalibráciu skreslenia magneticky tvrdými materiálmi	61
4.6	Parametre merania magnetometrom BM na kalibráciu skreslenia magneticky mäkkými materiálmi	62
4.7	Parametre merania magnetometrom BM po dokončení kalibrácie	62
4.8	Hodnoty offsetu akcelerometra a gyroskopu pre osi x , y , z	69

ÚVOD

Informácie o polohe a pohybe v priestore nachádzajú svoje uplatnenie v mnohých odvetviach naprieč viacerými disciplínami, a to napríklad v robotike, letectve, námorníctve, zdravotníctve. Sensory na snímanie polohy sa využívajú nie len v drobnej elektrotechnike, ako mobilné telefóny, kompasov či navigácie, ale aj v rôznych detekčných zariadeniach, automobiloch, lietadlách, raketách alebo satelitoch. V každej aplikácii, v ktorej sa používajú, sú na ne kladené iné nároky a vzhľadom na to sa mení aj spôsob filtrovania výsledkov ich meraní. Je preto vhodné pri práci s nimi poznať funkciu a spôsoby aplikácie týchto senzorov, možnosti ich kalibrácie a filtrovania nameraných výsledkov.

Odlíšne spôsoby využitia senzorov snímajúcich pohyb a polohu vedú k rôznym riešeniam pri práci s nimi. V závislosti na aplikácii sa líšia typy použitých senzorov, ich počet aj kombinácia. Filtrácia, ktorá slúži na odstránenie chyby merania daného senzoru, je vzhľadom na iný spôsob fungovania senzorov odlišná a potreba jej presnosti, prípadne samotnej prítomnosti, závisí výhradne na aplikácii.

Práca so senzormi pohybu a polohy je komplexná záležitosť, ktorej by mal návrhár pracujúci s nimi porozumieť, aby bol schopný dosiahnuť požadovaný cieľ. Ide však o širokú oblasť, ktorá zahŕňa nie len poznatky fungovania senzorov ale aj znalosť a porozumenie filtrov, ktoré sú v týchto prípadoch pomerne komplikované. Takéto znalosti človek nadobúda dlhodobým štúdiom alebo prácou v danej oblasti. Je preto užitočné mať dokument popisujúci spôsoby spracovania nameraných hodnôt, ktorý bude obsahovať prehľad kalibrácie senzorov, filtrácie a príklady ich realizácie.

Spolupráca na projekte zaoberajúcom sa uhlom odklonu od zvislice v špecifickej aplikácii bola motiváciou pre túto tému. Praktické riešenie práce sa bude odrážať práve na problematike riešenia v danej aplikácii, vzhľadom na ňu budú zvolené použité senzory a meranie sa bude zameriavať na určenie inklinácie.

Prvé dve kapitoly práce sa zaoberajú teóriou potrebnou k správnej aplikácii senzorov a dosiahnutia požadovaných výsledkov. V prvej kapitole je prebraná problematika inerciálnych senzorov, so zreteľom na akcelerometer, gyroskop a magnetometer. Sú tu popísané ich základné vlastnosti, delenie a spôsoby kalibrácie. Druhá kapitola obsahuje informácie o možnostiach filtrovania výsledkov získaných senzormi a matematického popisu získania požadovaných veličín z nameraných údajov.

Praktickej časti práce je venovaná tretia a štvrtá kapitola. V tretej kapitole sú pojednávané časti návrhu meracieho prípravku s podrobným popisom návrhu všetkých blokov. Posledná kapitola diplomovej práce sa zaoberá realizáciou dosky plošných spojov a oživením prípravku. Na konci sa nachádza časť práce s meraním parametrov, optimalizáciou výstupov senzorov a implementáciou filtra na získanie žiadanej informácie o inklinácii a azimute.

1. INERCIÁLNE SENZORY

Inerciálne senzory sú malé, nízkovýkonové zariadenia prevádzajúce inerciálne sily na merateľné elektrické signály umožňujúce merať polohu, rýchlosť pohybu, zrýchlenie, náklon, orientáciu, otrasy, vibrácie a mnoho ďalších. Ich pomerne jednoduchá implementácia ich predurčuje k širokému využitiu od mobilných telefónov, kde sa používajú na navigáciu alebo zmenu orientácie obrazovky, až po lekárske, vojenské, letecké a vesmírne aplikácie.

Častokrát sa na meranie zrýchlenia, rýchlosti, polohy či náklonu dá použiť jeden senzor a pomocou matematických výpočtov hodnotu z jeho výstupu previesť na ďalšie požadované veličiny. Vďaka tomu je možné na meranie inklinácie použiť napríklad akcelerometer, ktorý sníma zrýchlenie alebo zintegrovaný výstup gyroskopu merajúceho počet otáčok za časovú jednotku.

Zariadenie spájajúce aspoň dva inerciálne senzory sa označuje ako inerciálna meracia jednotka IMU (z ang. *Inertial Measurement Unit*). Všetky obsahujú akcelerometer a gyroskop, na upresnenie merania a zvýšenie presnosti sa pridáva magnetometer. Podľa typu použitých inerciálnych senzorov a ich počtu môže mať 2 až 9 stupňov voľnosti [1]. Niektoré IMU môžu mať aj iné typy senzorov, napríklad na meranie teploty, vlhkosti alebo tlaku. V takom prípade sa zvyšujú stupne voľnosti.

Táto kapitola je venovaná inerciálnym senzorom používaným v IMU, umožňujúcim meranie inklinácie pohybu a orientácie magnetického poľa. Ide o senzory:

- akcelerometer,
- gyroskop,
- magnetometer.

Pozornosť bude ďalej venovaná princípu fungovania zmienovaných senzorov, ich typom, výhodám a nevýhodám.

1.1 Princíp funkcie akcelerometra

Akcelerometer je senzor umožňujúci merať statické a dynamické zrýchlenie naň pôsobiace, čiže zmenu rýchlosti za čas. Gravitačnú silu, spôsobujúcu namerané statické zrýchlenie, je možné považovať za konštantnú (mierne sa líši s polohou a nadmorskou výškou), čiže má stály smer a veľkosť. Iné sily spôsobujúce namerané dynamické zrýchlenie sa môžu líšiť smerom a veľkosťou, a to v širšom rozsahu frekvencií. Vzhľadom na to by mal byť akcelerometer schopný zaznamenať zrýchlenie vyvolané pomalými aj rýchlymi zmenami [2].

Meranie dynamického zrýchlenia sa používa napríklad na snímanie otrasov, pohybov, vibrácií s malou amplitúdou a frekvenciu do niekoľko desiatok Hz [3]. Tieto poznatky sa využívajú častokrát v priemysle na určenie správnej funkcie prístrojov a zariadení, na zabezpečenie stability mostov alebo iných stavebných objektov. Informácie

o vibráciách sa využívajú aj v lekárskej technike, elektrotechnike, mobilných telefónoch, navigácii. Pomocou nameraného statického tiažového zrýchlenia je možné určiť uhol odklonu senzoru od zvislice. Zmienené meranie nachádza využitie napríklad digitálnych fotoaparátov, v priemysle či medicíne na určenie smeru zariadenia [4].

Vyhodnotenú zrýchlenie sa udáva ako násobok tiažového zrýchlenia g , ktorého hodnota sa udáva na $9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Vzhľadom na to sa udáva výstup akcelerometra v jednotke g . Skutočná hodnota zrýchlenia a_{real} je daná vynásobením zisteného zrýchlenia akcelerometrom a_{AKC} a tiažového zrýchlenia g , čiže:

$$a_{\text{real}} = a_{\text{AKC}} \cdot g \text{ [m}\cdot\text{s}^{-2}\text{]}. \quad (1.1)$$

Fungovanie akcelerometra je založené na Newtonovom druhom pohybovom zákone, označovanom aj ako zákon sily, v ktorom je zadefinované, že zrýchlenie, eventuálne spomalenie je priamoúmerné sile, ktorá vyvolala toto zrýchlenie, respektíve spomalenie a nepriamoúmerné hmotnosti daného telesa. Matematické vyjadrenie zákona sily je:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \text{ [m}\cdot\text{s}^{-2}\text{]}, \quad (1.2)$$

kde \vec{a} je vektor zrýchlenia, \vec{F} je vektor pôsobiacej sily a m je hmotnosť telesa, na ktoré sila pôsobí. Na zmeranie zrýchlenia na známej hmotnosti je potrebné zmerať pôsobiacu silu, na čo sa používa senzor sily. Ten obsahuje dve časti, a to pružinu, ktorá sa vplyvom sily deformuje alebo posunie a senzor, ktorý určí veľkosť deformácie, respektíve posunutia [2]. Sensory využívajú prevodný mechanizmus, ktorý zmení deformáciu, respektíve posun, na inú veličinu, pričom sa využívajú elektrické a mechanické javy. Existuje viacero druhov prevodných mechanizmov, napríklad kapacitný, piezorezistívny, piezoelektrický, teplotný.

Dá sa rozlíšiť viacero druhov delenia akcelerometrov, a to podľa počtu rovín merania, hardvérového vybavenia, respektíve typu výstupného signálu a podľa aplikovaného prevodného mechanizmu, ktorý môže mať pôvod v elektrických alebo mechanických javoch.

1.1.1 Druhy akcelerometrov podľa počtu rovín

Podľa počtu rovín, v ktorých sú schopné akcelerometre merať zrýchlenie, sa rozlišujú:

- jednoosové akcelerometre,
- dvojosové akcelerometre,
- trojosové akcelerometre.

Pri dvojosovom a trojosovom akcelerometri bývajú osi navzájom kolmé. Trojosové akcelerometre sa vo svojej podstate skladajú z troch navzájom kolmých jednoosových akcelerometrov. Väčší počet osí má výhodu pri meraní inklinácie, pretože sa zvyšuje presnosť merania [4].

1.1.2 Druhy akcelerometrov podľa hardvérového vybavenia

Podľa použitého hardvéru, respektíve podľa typu signálu, ktorý je na výstupe akcelerometra, existujú:

- digitálne akcelerometre,
- analógové akcelerometre.

Digitálne akcelerometre využívajú impulznú šírkovú moduláciu PWM (z ang. *Pulse Width Modulation*), kedy doba vysokého napätia odpovedá zrýchleniu. Informácie o zrýchlení sa sprostredkujú cez niektorú zo sériových zberníc I²C (z ang. *Internal – Integrated Circuit*), SPI (z ang. *Serial Peripheral Interface*), alebo UART (z ang. *Universal Asynchronous Receiver – Transmitter*) [5; 6].

Výstupom analógových akcelerometrov je spojité napätie úmerné zaznamenanému zrýchleniu, ktoré je prekonvertované na digitálnu hodnotu pomocou AD prevodníku (ADC, z ang. *Analog to Digital Converter*) v podobe diskretnej súčiastky, alebo zabudovanom v mikrokontroléri [6]. Zmeraná hodnota zrýchlenia a_{AKC_x} v ose x v násobkoch g , a obdobne pre osi y a z , je daná ako:

$$a_{AKC_x} = \frac{ADC_{AKC_x} \cdot V_{ref} - V_{AKC_{0g}}}{2^{n-1} \cdot sensitivity_{AKC}} \text{ [g]}, \quad (1.3)$$

kde ADC_{AKC_x} je prekonvertovaná digitálna hodnota zrýchlenia na výstupe AD prevodníku, V_{ref} je referenčné napätie prevodníku, n je počet bitov prevodníku, $V_{AKC_{0g}}$ je napätie udávané výrobcom, pri ktorom je zrýchlenie 0 g (toto je potrebné na získanie záporných hodnôt zrýchlenia) a $sensitivity_{AKC}$ je parameter akcelerometra udávajúci pomer zmeny zrýchlenia (vstupu) voči zmene výstupného signálu. *Sensitivity*, respektíve citlivosť, udáva výrobca, tradične dosahuje jednotky mV/g a čím je väčšia jej hodnota, tým je dosiahnutá vyššia presnosť merania [5; 6].

1.1.3 Druhy akcelerometrov podľa prevodného mechanizmu

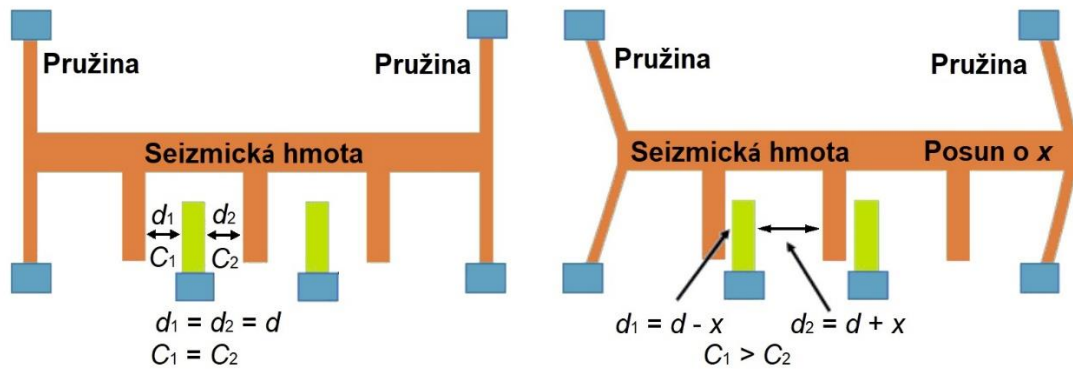
Akcelerometre môžu byť založené na rôznych prevodných mechanizmoch, vzhľadom na čo sa rozlišuje niekoľko typov akcelerometrov. Jedny z najpoužívanejších sú [3; 7]:

- kapacitné MEMS (z ang. *Micro-Electro-Mechanical Systems*) akcelerometre,
- piezorezistívne akcelerometre,
- piezoelektrické akcelerometre.

MEMS akcelerometre sú senzory vytvorené technológiou MEMS, čo je skratka pre mikro-elektromechanický systém. Táto technológia spája mechanické a elektrické štruktúry implementované do integrovaných obvodov. Na obrázku 1.1 je zobrazená štruktúra kapacitného MEMS akcelerometra, v ktorom oranžová farba predstavuje pohyblivú seizmickú hmotu hrebeňovej štruktúry zavesenú na pružinách nachádzajúcich sa na krajoch a zelená farba predstavuje pevne umiestnené elektródy [8].

Pevné elektródy tvoria s hrebeňmi seizmickej hmoty kapacitory, kde hrebene predstavujú spoločné pohyblivé stredné elektródy. Nachádzajú sa tu dva kapacitry, ktoré

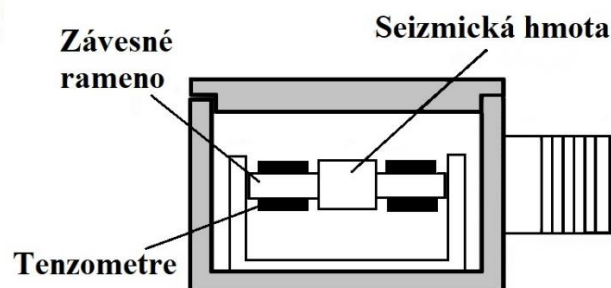
majú v pokojovom stave rovnakú kapacitu, pretože majú rovnakú vzdialenosť nepohyblivej elektródy od pohyblivej. Pôsobiacia sila vyvolá zrýchlenie seizmickej hmoty, tá sa následne pohne príslušným smerom, zmení sa vzdialenosť elektród u oboch kapacitorov, a to vedie k zmene kapacity. Vyhodnocuje sa diferenciálna zmena kapacity C_1 a C_2 , ktorá je meničom prekonvertovaná na napätie.



Obrázok 1.1 Štruktúra kapacitného MEMS akcelerometra, prevzaté z [8]

Výhodou kapacitných MEMS akcelerometrov je ich malý rozmer, nízka cena, možnosť priamej montáže na DPS (doska plošných spojov). Medzi nevýhody patria malá presnosť merania, najmä pri zaznamenávaní väčších amplitúd a frekvencií [3].

Piezorezistívne akcelerometry využívajú vo svojej štruktúre piezorezistívny materiál, ktorý sa vplyvom mechanického namáhania pri pôsobení sily zdeformuje a tým zmení svoj odpor meraný Wheatonovým mostíkom, ktorý ho prevádza na napätie. Na obrázku 1.2 je znázornený piezorezistívny akcelerometer merajúci vychýlenie seizmickej hmoty prostredníctvom kremíkových alebo kovových tenzometrov umiestnených na závesnom ramene seizmickej hmoty [9].

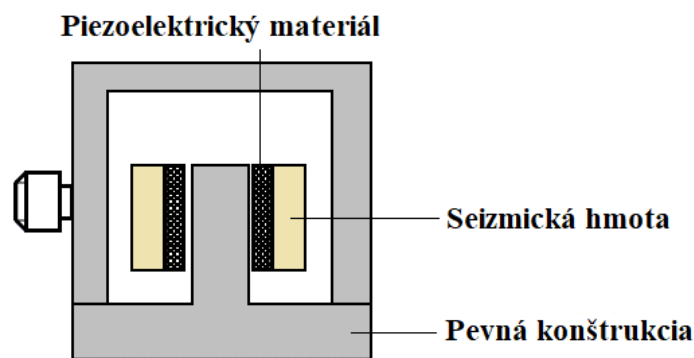


Obrázok 1.2 Štruktúra piezorezistívneho akcelerometra, prevzaté z [9]

Významnou výhodou piezorezistívnych akcelerometrov je možnosť merať v širokom frekvenčnom pásme, čiže aj pomaly sa meniace signály, schopnosť vydržať veľké zrýchlenie. Nevýhodami sú vyššia cena oproti kapacitným MEMS akcelerometrom, problém s vyhodnocovaním slabých signálov a teplotná závislosť, ktorú je nutné

kompenzovať. Existuje možnosť vyrobiť piezorezistívne MEMS akcelerometre, v ktorých je eliminovaná závislosť na teplote [2; 3].

Piezoelektrické akcelerometre fungujú na piezoelektrickom efekte, kedy sa vplyvom mechanického pôsobenia generuje elektrický náboj, ktorý je meraný buď externou elektronikou s vysokou vstupnou impedanciou, alebo zaintegrovanou elektronikou v senzore meniacou náboj na napätie. Využívajú sa keramické piezoelektrické materiály ako titaničitán bárnatý, olovo-zirkonát-titanát, metaniobát olova alebo piezoelektrický kryštál. Kryštál vďaka svojej pružnosti funguje ako pružina a je upevnený medzi pevnú konštrukciu a seizmickú hmotu, ktorá naň pôsobí silou úmernou zrýchleniu. Obrázok 1.3 je príkladom usporiadanie piezoelektrického akcelerometra [10; 2].



Obrázok 1.3 Štruktúra piezoelektrického akcelerometra, prevzaté z [11]

Akcelerometre založené na piezoelektrickom jave majú výhodu vo vysokej presnosti, citlivosti, širokom teplotnom rozsahu a vysokej lineárnosti generovaného náboja na pôsobiacom zrýchlení. Negatívom je závislosť citlivosti na frekvencii a úzke frekvenčné pásmo [2; 3].

1.1.4 Kalibrácia akcelerometrov

Kalibrácia akcelerometra je potrebná na správne určenie požadovaných parametrov. Akcelerometer ako súčiastka nie je dokonalá, máva nenulový offset, ktorý by sa počas merania nepriaznivo prejavil. Pri výrobe síce bývajú kalibrované, ale tieto kalibrácie majú určité limity a v spojení s akýmkoľvek statickým stresom na časti akcelerometra môže vzniknúť offset [4].

Offset akcelerometra sa určuje pri jeho nehybnosti, kedy je položený v pokoji na rovnom povrchu. Dve z osí by mali merať nulové zrýchlenie a os smerujúca do stredu zeme by mala namerať hodnotu rovnú tiažovému zrýchleniu, čiže $1g$. Ak os z je rovnobežná s tiažovým zrýchlením, na osiach x a y by malo byť zrýchlenie nulové.

Jednou z možností ako určiť offset je spraviť priemernú hodnotu z dostatočného počtu meraní. Príklad výpočtu offsetu x_{akc_offset} pre os x , ak os z je rovnobežná s tiažovým zrýchlením je:

$$x_{akc_offset} = \frac{\sum_{k=1}^i x_{akc_k}}{i} [g], [-], \quad (1.4)$$

kde x_{akc_k} je k -té namerané zrýchlenie v ose x , k je sumačný index so spodnou hranicou 1 predstavujúcou prvý člen sumácie, hornou hranicou i predstavujúcou posledný člen sumácie a zároveň počet meraných hodnôt. Offset môže byť určený z hodnôt prevedených na násobky tiažového zrýchlenia alebo z hodnoty pred prevodom.

Zo vzťahu (1.4) je vidieť, že offset je možné určiť aritmetickým priemerom z dostatočného množstva nameraných hodnôt v danej ose. Rovnaký výpočet by sa aplikoval aj pre os y a z s tým, že pre os z sa k výslednej hodnote offsetu pričíta ešte hodnotu odpovedajúca $1g$. Vykompenzované zrýchlenie x_{akc_cal} v ose x sa potom určí ako:

$$x_{akc_cal} = x_{akc_new} - x_{akc_offset} [g], [-], \quad (1.5)$$

kde x_{akc_new} je nové namerané zrýchlenie v ose x . Rovnaký výpočet skalibrovaných zrýchlení potom platí aj pre osi y a z .

1.2 Princíp funkcie gyroskopu

Gyroskop je inerciálny senzor schopný zaznamenávať zmenu uhlovej rýchlosti za čas v jednotkách V°/s . Nachádza využitie v kompasoch, navigáciách, stabilizačných zariadeniach, zbraniach, robotike, mobilných telefónoch, autopilotoch na lodiach a lietadlách, ale aj vo vesmírnych aplikáciách, ako v zariadeniach na vypúšťanie rakiet alebo satelitoch [2; 12].

Gyroskop sa dá teoreticky použiť na určenie uhlovej rýchlosti a samotného uhlu posunutia za čas prostredníctvom integrácie, toto je však komplikované kvôli driftu gyroskopu, ktorý s časom rastie. Drift gyroskopu a akýkoľvek šum súčastky sa výrazne prejaví a výsledná hodnota potom neodpovedá skutočnosti. Z tohto dôvodu sa gyroskopy kombinujú s inými inerciálnymi senzormi a pri ich aplikácii sa využívajú adekvátne filtre alebo sa priebežne korigujú inými metódami.

Princíp merania je založený na Coriolisovom jave, ktorý popisuje, takzvané Coriolisove zrýchlenie, čo je miera zmeny rýchlosti spôsobená radiálnou rýchlosťou zariadenia [13]. Coriolisova sily, vyvolávajúca Coriolisove zrýchlenie, je vyjadrená vzťahom:

$$F_C = 2 \cdot m \cdot v \times \omega [N], \quad (1.6)$$

v ktorom F_C je Coriolisova sila, m je hmotnosť telesa, v je rýchlosť telesa pohybujúceho sa v sústave, ktorá sa otáča s uhlovou rýchlosťou ω [14].

Jednotlivé druhy gyroskopov možno rozlíšiť podľa podobných parametrov ako pri akcelerometroch. Rozlišujú sa druhy podľa počtu osí, v ktorých merajú, podľa typu výstupného signálu, respektíve implementovaného hardvéru a podľa spôsobu merania uhlovej rýchlosti.

1.2.1 Druhy gyroskopov podľa počtu osí

Podľa počtu rotačných osí, v ktorých gyroskopy dokážu merať, sa rozlišujú [15]:

- jednoosové gyroskopy,
- dvojosové gyroskopy,
- trojosové gyroskopy.

Rovnako ako pri akcelerometroch sú osi na seba vzájomne kolmé a skladajú sa z dvoch, respektíve troch, jednoosových gyroskopov. V súčasnosti sa vo väčšine IMU využívajú trojosové gyroskopy spolu s trojosovými akcelerometrami.

1.2.2 Druhy gyroskopov podľa hardvérového vybavenia

Výstup gyroskopov možno rozlíšiť podľa výstupného elektrického obvodu zakomponovaného do súčiastky, čiže pomocou ich hardvérového vybavenia na:

- analógové gyroskopy,
- digitálne gyroskopy.

Analógové gyroskopy majú na výstupe spojitú nameranú hodnotu. V takom prípade je pre ich spracovanie v procesore nutné previesť analógovú hodnotu na digitálnu využitím AD prevodníka. Prepočet na jednotku $mV/^{\circ}/s$ je principiálne rovnaký ako vzťah (1.3) prepočtu zmeranej hodnoty zrýchlenia akcelerometrom [6]. Tento vzťah platí rovnako pre všetky osi, v ktorých sa meria. Nameraná hodnota uhlovej rýchlosti za čas, označená v_{GYR_x} , sa dá prepočítať ako:

$$v_{GYR_x} = \frac{ADC_{GYR_x} \cdot V_{ref} - V_{GYR_0}}{sensitivity_{GYR}} \text{ [}^{\circ}/s\text{]}, \quad (1.7)$$

kde ADC_{GYR_x} je prekonvertovaná digitálna hodnota zmeraného uhlového zrýchlenia za čas na výstupe AD prevodníku, V_{ref} je referenčné napätie prevodníku, n je počet bitov prevodníku, V_{GYR_0} je napätie udávané výrobcom, pri ktorom je uhlové zrýchlenie nulové (je potrebné na získanie záporných) a $sensitivity_{GYR}$, v preklade citlivosť, je parameter akcelerometra udávajúci pomer zmeny zrýchlenia (vstupu) voči zmene výstupného signálu.

Gyroskopy s digitálnym výstupom môžu komunikovať a posielat' namerané hodnoty niektorou zo sériových zberníc ako je napríklad SPI, I²C. Takéto súčiastky častokrát obsahujú prídavné funkcie uľahčujúce prácu s nimi [16].

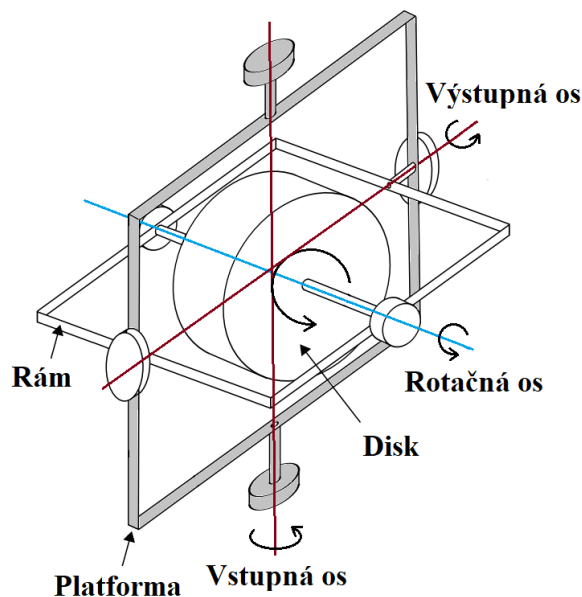
1.2.3 Druhy gyroskopov podľa princípu merania

Gyroskopy sa delia podľa spôsobu merania na [2]:

- mechanické gyroskopy,
- optické gyroskopy,
- vibračné gyroskopy.

Mechanické gyroskopy sa skladajú z disku, ktorý dokáže rotovať okolo rotačnej osi, pričom tá je pripevnená k rámu. Samotný rám sa môže otáčať okolo jednej alebo dvoch osí, vplyvom čoho je tento typ gyroskopu jednoosový alebo dvojosový. Rám je pohyblivo spojený s platformou. Príklad takéhoto usporiadania je vidieť na obrázku 1.4. Presnosť závisí na trení, prítomnosti magnetického poľa, vyvážení disku a tieto javy môžu spôsobovať drift [2; 17].

V mechanickom gyroskope sa využíva niekoľkých javov, a to schopnosť disku zachovať si rovinu, v ktorej rotuje a precesia. Zachovanie roviny znamená, že pri rotácii disku má ten tendenciu zostať v rovnakej pozícii v priestore aj pri natočení celého gyroskopu, čo umožňuje voľne otočný rám. Precesia predstavuje jav, keď sa platforma natáča okolo jednej osi (na obrázku 1.4 označená ako vstupná os) a gyroskop vytvorí točivý moment okolo osi k nej kolmej (označenej ako výstupná os), vplyvom čoho sa natočí rotačná os okolo výstupnej osi.

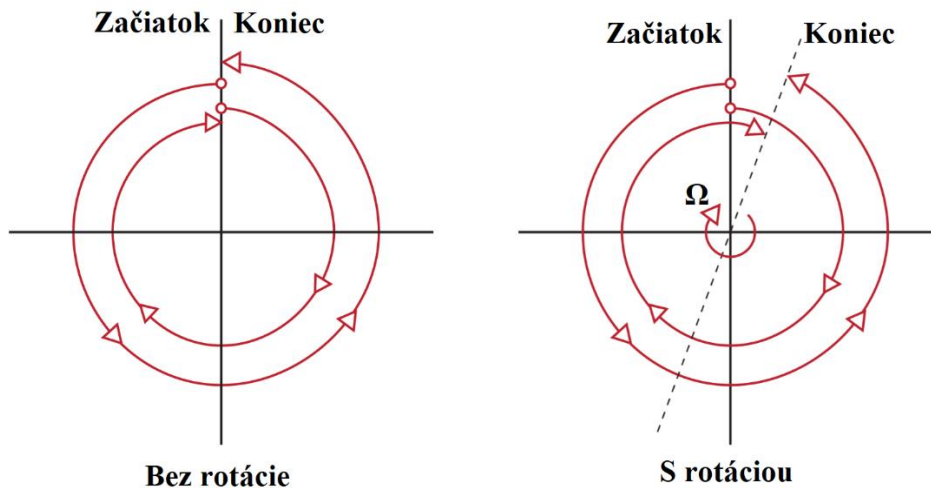


Obrázok 1.4 Konceptia mechanického gyroskopu, prevzaté z [18]

Nevýhodou mechanických gyroskopov je ich veľký rozmer, pričom samotná architektúra nedovoľuje malú štruktúru, ktorá by bola vhodná do malých zariadení. Zároveň sú pomerne drahé, kvôli spôsobu, akým sa vyrábajú [2].

Optické gyroskopy sa zakladajú na Sagnacovom efekte. Využívajú sa dva laserové lúče, ktoré sa šíria v navzájom opačnom smere po optickom kruhu s určitým indexom

lomu n_{om} a polomerom R , na základe ktorých je známy čas obehu po kruhu. Vplyvom rotácie gyroskopu sa zmenia dráhy, ktoré musia lúče prejsť a ich rozdielom je daná uhlová rýchlosť rotácie Ω . Princíp funkcie je znázornený na obrázku 1.5, kde gyroskop v pokoji a obidva lúče majú rovnakú dráhu. Napravo došlo k rotácii gyroskopu a jeden lúč má dlhšiu dráhu ako druhý [2].

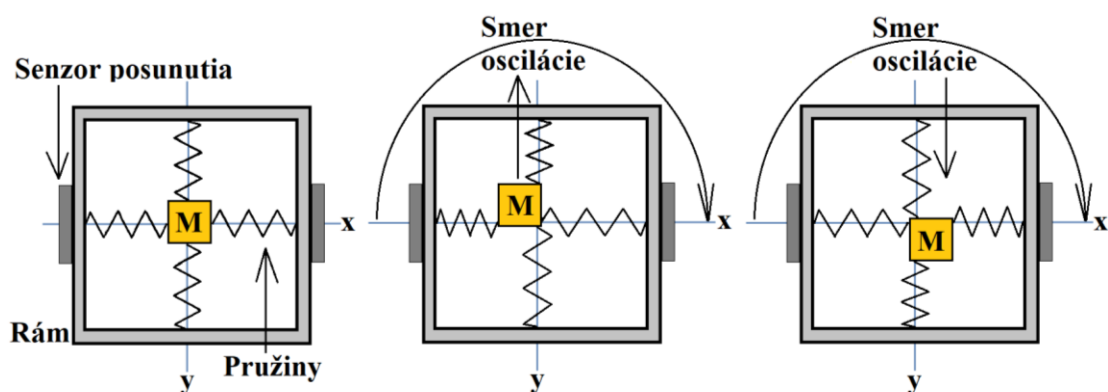


Obrázok 1.5 Princíp Sagnacovho efektu v optickom gyroskope, prevzaté z [19]

Medzi výhody optických gyroskopov patria vysoká spoľahlivosť, vysoká presnosť a schopnosť pracovať aj v problematickejšom prostredí. Ide o pomerne lacnú súčiastku s malými rozmermi.

Vibračné gyroskopy pracujú na princípe Coriolisovho zrýchlenia, kedy sa posunutím objektu preč od jeho centra zväčší tangenciálna zložka rýchlosti a objekt tým pádom zrýchľuje. Coriolisovo zrýchlenie je priamoúmerné počtu otáčok a silu, ktorá pri ňom pôsobí, je možné prekonvertovať na elektrický signál.

Koncepcia vibračného gyroskopu je na obrázku 1.6. Nachádza sa tu objekt M pripojený štyrmi pružinami k rámu, ktorý vplyvom externého budenia osciluje v ose y . Pri otočení rámu Coriolisova sila posunie masu do ľavej alebo pravej strany. Posun sa potom zmeria senzorom posunutia v ose x . Pri oscilácii smerom nahor v ose y sa objekt posunie naľavo. Pri oscilácii objektu smerom nadol v ose y sa posunie napravo [2].



Obrázok 1.6 Koncepcia vibračného gyroskopu, prevzaté z [2]

Možnosť vyrábania vibračných gyroskopov technológiou MEMS je značnou výhodou, pretože sú vyrábané vo veľkých množstvách, majú malé rozmery a nižšie ceny.

1.2.4 Kalibrácia gyroskopov

Kalibrácia gyroskopu je rovnako podstatná ako kalibrácia akcelerometra, pretože sa u nej rovnako vyskytuje nenulový offset, ktorý by sa počas merania nepriaznivo prejavil na zmeraných dátach. Aj napriek tomu, že môže byť gyroskop bez pohybu, jeho výstupy ukazujú určitú hodnotu uhlového zrýchlenia [20].

Offset gyroskopu sa určuje z polohy v pokoji na rovnom povrchu. Princíp merania jeho merania je rovnaký ako v akcelerometri s jediným rozdielom, že všetky osi by mali mať nulovú hodnotu na výstupe. Offsetu x_{gyr_offset} pre os x je možné vypočítať:

$$x_{gyr_offset} = \frac{\sum_{k=1}^i x_{gyr_k}}{i} \text{ [}^\circ\text{/s], [-]}, \quad (1.8)$$

kde x_{gyr_k} je k -té namerané zrýchlenie v ose x , k je sumačný index so spodnou hranicou 1 predstavujúcou prvý člen sumácie, hornou hranicou i predstavujúcou posledný člen sumácie a zároveň počet meraných hodnôt. Offset môže byť rovnako ako pri akcelerometroch určený z hodnôt prevedených na jednotky $^\circ\text{/s}$ alebo z hodnoty bez jednotky pred prevodom.

Pri gyroskopoch je offset získaný aritmetickým priemerom z dostatočného množstva nameraných hodnôt v danej ose. Rovnaký výpočet sa používa aj pre os y a z bez rozdielu. Výsledné vykompenzované zrýchlenie x_{gyr_cal} v ose x je:

$$x_{gyr_cal} = x_{gyr_new} - x_{gyr_offset} \text{ [}^\circ\text{/s], [-]}, \quad (1.9)$$

kde x_{gyr_new} je nové namerané zrýchlenie v ose x . Rovnaký výpočet skalibrovaných zrýchlení potom platí aj pre osi y a z .

1.3 Princíp funkcie magnetometra

Magnetometre zaznamenávajú smer a silu externého magnetického poľa, ktorú udávajú v jednotkách Tesla (T) alebo Gauss (G) [21]. Bežne sa používa na zaznamenávanie magnetického severu, na určenie smerovania zariadení, ale dá sa použiť aj na meranie prítomného magnetického poľa. Dokážu zaznamenávať permanentné aj dočasné magnetické pole. Využívajú sa napríklad v archeológii, v geografických prieskumoch, detektoroch kovov, v telefónnych zariadeniach alebo vesmírnych aplikáciách.

Druhy magnetometrov sa rozlišujú podľa viacerých klasifikácií, a to napríklad podľa typu výstupu obdobne ako pri akcelerometroch a gyroskopoch, ďalej podľa fyzikálneho javu, na ktorého základe fungujú a podľa schopnosti merania skalárnej alebo vektorovej veličiny.

1.3.1 Druhy magnetometrov podľa hardvérového vybavenia

Podľa implementovaného hardvéru, respektíve podľa typu výstupu magnetometra sa rozlišujú [22; 23]:

- analógové magnetometre,
- digitálne magnetometre.

Ak je na výstupe magnetometra spojitá veličina ide o analógový magnetometer. Na výstupe môže byť analógový prúd, napätie alebo frekvencia. Výstup magnetometra sa prevádza obdobne ako pri akcelerometri a gyroskope s využitím citlivosti označenej ako $sensitivity_{MAG}$ a napätia pri nulovom magnetickom poli $V_{MAG,0}$. Príklad prepočtu magnetickej indukcie B_{MAGx} na výstupe magnetometra pri použití AD prevodníku je:

$$B_{MAGx} = \frac{\frac{ADC_{MAG,x} \cdot V_{ref}}{2^{n-1}} - V_{MAG,0}}{sensitivity_{MAG}} [G], [T], \quad (1.10)$$

kde ADC_{MAGx} je prekonvertovaná hodnota zmeraného magnetického poľa na výstupe AD prevodníku, V_{ref} je referenčné napätie prevodníku a n je počet bitov prevodníku.

Pri digitálnych magnetometroch je výstup nespojitý a informácie sa prenášajú pomocou niektorej zo zberníc. Tento výstup musí byť prepočítavaný pomocou nulovej hodnoty magnetického poľa a citlivosti udávanej v LSB/T, alebo LSB/G.

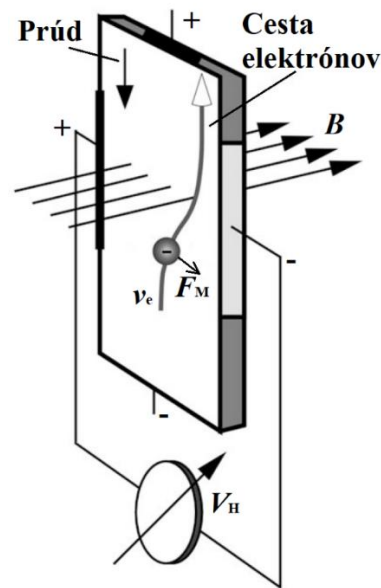
1.3.2 Druhy magnetometrov podľa fyzikálneho javu

Magnetometre možno klasifikovať podľa použitého fyzikálneho mechanizmu na magnetometre využívajúce:

- Hallov efekt,
- magnetorezistívne snímanie,
- Lorentzovu silu.

Na obrázku 1.7 je vysvetlený Hallov efekt na vodiči, ktorý je vložený do magnetického poľa a má dva kontakty na stranách na pripojenie voltmetra,

dva kontakty na koncoch na pripojenie zdroja prúdu. Pôsobením sily magnetického poľa F_M sa elektróny nahnú na pravú stranu vodiča, vplyvom čoho je jeho pravá strana zápornejšia a ľavá kladnejšia. Vzniká tak priečny potenciálový rozdiel označovaný ako Hallovo napätie V_H , ktorého hodnota aj znamienko závisia na veľkosti a smere ako magnetického poľa, tak aj prechádzajúceho prúdu. Pomocou známych parametrov vodiča a rýchlosti pohybu elektrónov v_e je možné z Hallovoho napätia určiť magnetickú indukciu pôsobiaceho poľa B [2; 24].



Obrázok 1.7 Znázornenie Hallovoho efektu, prevzaté z [2]

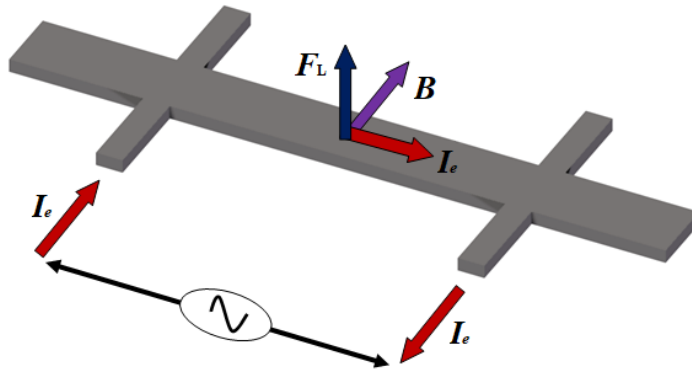
Hallovo efekt sa dá využiť na detekciu magnetického poľa, pozície a posunutia objektov. Výhodou magnetometrov s Hallovým efektom je ich možnosť výroby priamo na čip, vďaka čomu dokážu mať malé rozmery a lacnú výrobu. Medzi ich nevýhody patrí nízke rozlíšenie, offset a menší dynamický rozsah [2; 25].

Pri magnetorezistívnom snímaní sa využíva materiál v podobe tenkého plátu, ktorým preteká prúd. Pôsobením externého magnetického poľa materiál mení svoj odpor, čím sa odpovedajúco zmení aj prúd. Ako materiál sa uplatňuje Permalloy, čo je zliatina niklu a železa. V senzore sa často ako zdroj magnetického poľa využíva permanentný magnet pripojený k senzoru [23; 26].

Výhodou magnetometrov na princípe magnetorezistivity je ich vysoká citlivosť, možnosť výroby vo forme integrovaného obvodu a malá cena. Využíva sa pri zisťovaní polohy, rotácie, alebo blízkosti externého magnetického poľa [26; 2].

Lorentzova sila F_L vzniká pri pohybe častice s nábojom v magnetickom poli. Je daná vektorovým súčtom pôsobiacej magnetickej a elektrickej sily, vplyvom čoho je kolmá na magnetické pole s indukčnosťou B aj prúd I_e daný pohybom častice s elektrickým nábojom, ako je vidieť na obrázku 1.8. Pôsobením Lorentzovej sily sa deformuje štruktúra magnetometra, čo je možné zmerať prostredníctvom piezorezistívneho,

kapacitného, alebo optického snímania. Pri tomto type magnetometra sa využíva zmena prúdu s frekvenciou rovnou rezonančnej frekvencii samotnej štruktúry, aby sa tak zvýšila citlivosť zariadenia [24; 27].



Obrázok 1.8 Znáznornenie Lorentzovej sily F_L , prevzaté z [28]

Medzi výhody magnetometrov na báze Lorentzovej sily je možnosť ich výroby technológiou MEMS, ich vysoké rozlíšenie v tejto technológii, nízka cena a nízka spotreba. Výhodou je aj fakt, že na svoju funkciu nevyžadujú feromagnetické materiály, pri ktorých býva problematická ich hysterézia [27; 29].

1.3.3 Druhy magnetometrov podľa schopnosti merania typu veličiny

Magnetometre je možné rozdeliť podľa typu veličiny, ktorú zaznamenávajú na:

- skalárne magnetometre,
- vektorové magnetometre.

Zaznamenávať skalárnu hodnotu intenzity magnetickej hmoty, pričom sú schopné dosiahnuť dobrú presnosť, umožňujú skalárne magnetometre. Spôsoby merania presnej numerickej hodnoty magnetického poľa sú postavené na odlišných fyzikálnych javoch, medzi ktorými sú napríklad Hallov efekt, alebo protónová procesia [21] [30].

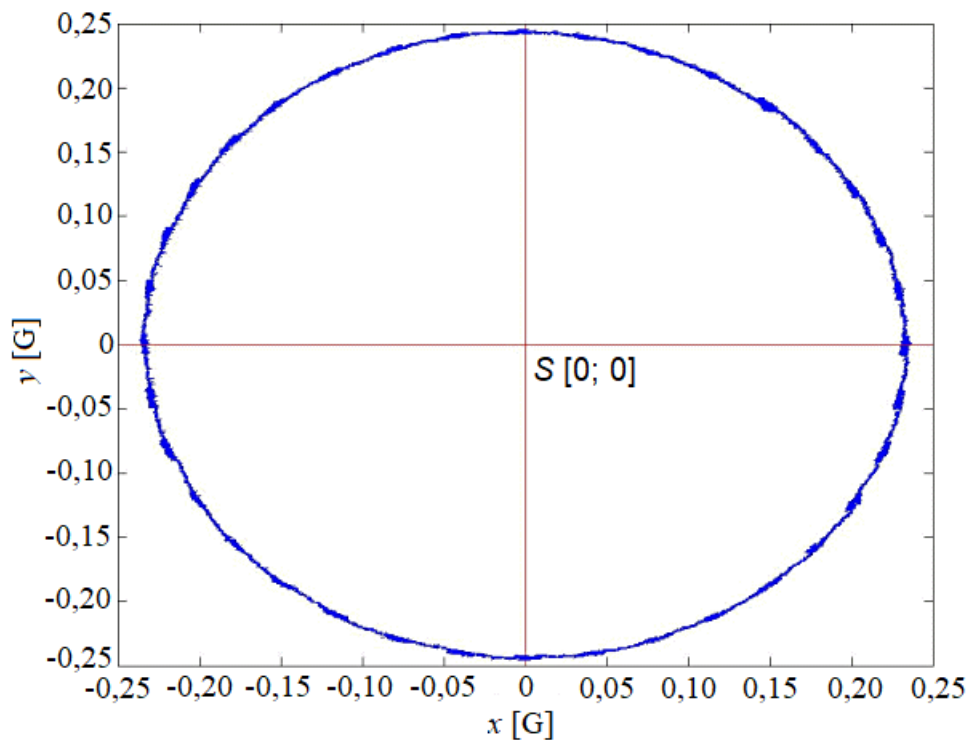
Vektorové magnetometre umožňujú snímať veľkosť magnetického poľa aj jeho smer. Na meranie sa využíva napríklad Hallov efekt, alebo magnetorezistencia [30].

1.3.4 Kalibrácia magnetometrov

Magnetometre sú značne ovplyvnené ich okolím, pretože akékoľvek nežiadúce magnetické pole v jeho okolí môže spôsobiť drift výsledkov merania. Ich meranie je preto potrebné kalibrovať v prostredí, v ktorom budú prebiehať merania. Najčastejšie spôsoby kalibrácie sa označujú ako *hard ironing* a *soft ironing*, pričom tieto názvy vychádzajú z označení pre magneticky tvrdé a magneticky mäkké materiály [20].

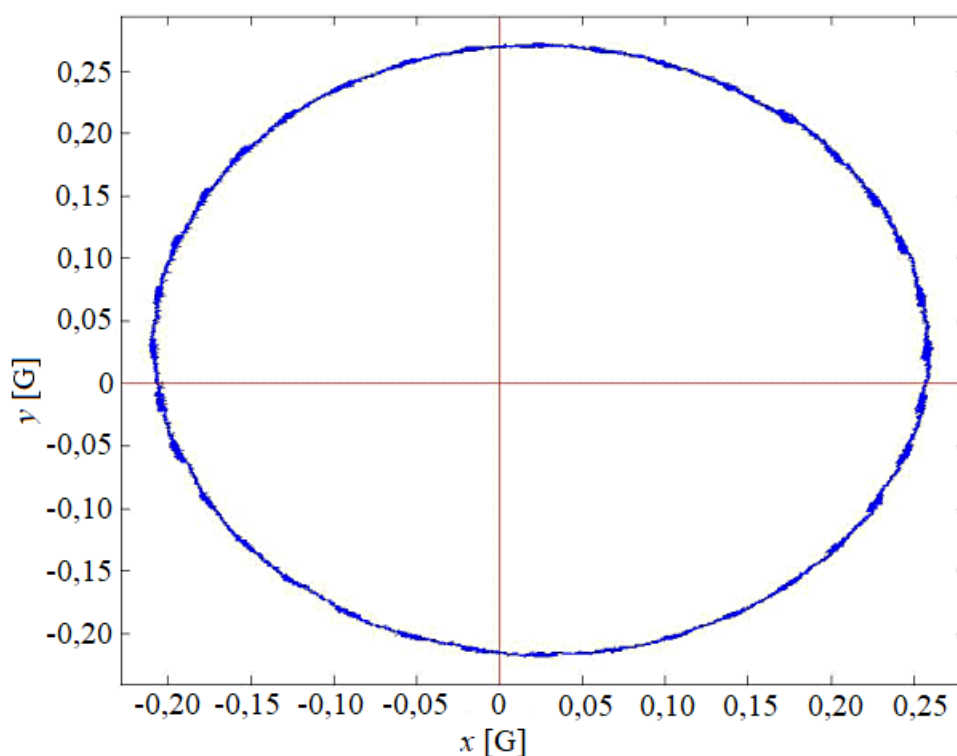
V ideálnom prípade, kedy nepôsobí na magnetometer žiadne rušenie, je veľkosť výsledkov merania v absolútnej hodnote vo všetkých osiach a natočeniach rovnaká so strednom S v nule. Príklad tohto je znázornený na obrázku 1.9, v ktorom sú zobrazené namerané hodnoty magnetometrom v rovine definovanej osami x a y . Je vidieť, že merané

hodnoty vytvárajú kružnicu so stredom v bode $S [0; 0]$. Zobrazenie v trojrozmernom priestore pri pridaní osi z by vyzeral ako guľa so stredom v nule [31].



Obrázok 1.9 Ideálne výsledky merania magnetometra bez vonkajšieho rušenia, prevzaté z [31]

Magneticky mäkké a tvrdé materiály v blízkosti magnetometra môžu spôsobovať odchýlky kružnice, respektíve v prípade trojrozmerného priestoru gule. Pri magneticky tvrdých materiáloch, ktoré okolo seba vytvárajú konštantné magnetické pole, sa porucha prejavuje ako permanentný ofset a stred nie je v bode $[0; 0]$, ako je vidieť na obrázku 1.10. Tento ofset predstavuje hodnotu, ktorá sa pričítava ku každej ose magnetometra a je konštantná, ak sa pozícia materiálu voči senzoru nemení, pretože sa potom nemení ani magnetické pole ním vytvorené.



Obrázok 1.10 Skreslenie spôsobené magneticky tvrdými materiálmi, prevzaté z [31]

Keďže *hard ironing* predstavuje proces kalibrácie odstránením konštantného aditívneho skreslenia spôsobeného prítomnosťou magneticky tvrdých materiálov, je potrebné zistiť ofset vo všetkých osiach magnetometra. Na určenie ofsetu je potrebné magnetometrom otočiť minimálne o 360°. Polohy oproti sebe by mali mať rovnakú hodnotu ale s opačným znamienkom. Preto sa z nameraných dát určí maximum a minimum pre každú os. Príklad výpočtu ofsetu $x_{\text{mag_offset}}$ pre os x magnetometra merajúcom v Gaussoch je:

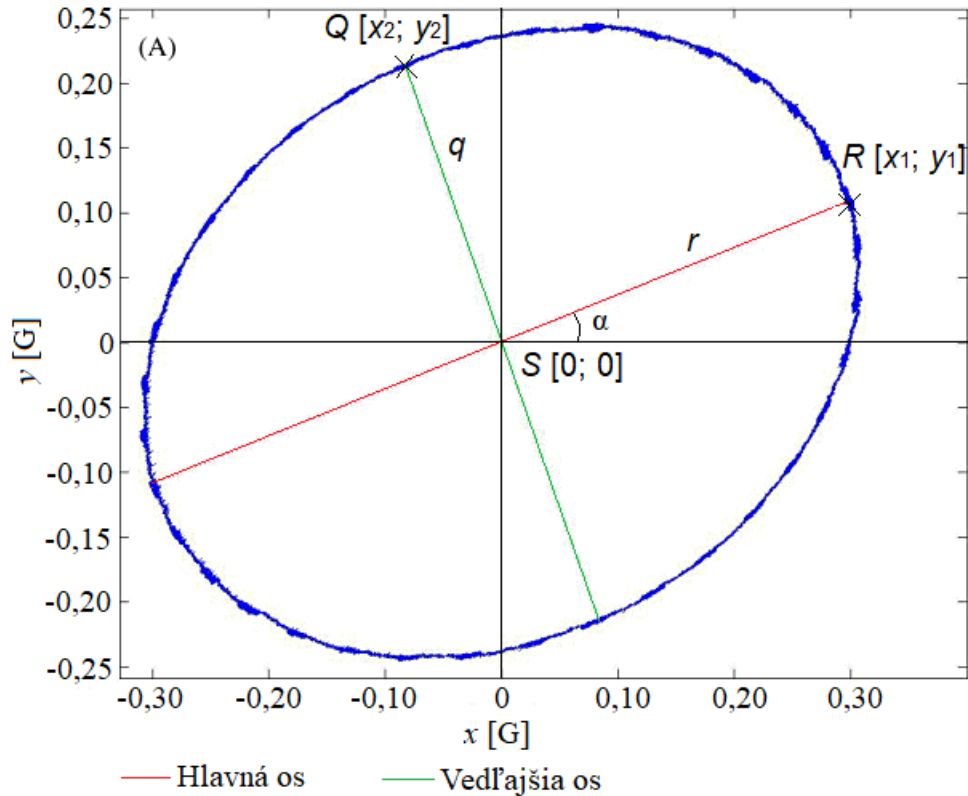
$$x_{\text{mag_offset}} = \frac{x_{\text{mag_max}} + x_{\text{mag_min}}}{2} \quad [\text{G}], [\text{T}], [-], \quad (1.11)$$

kde $x_{\text{mag_max}}$ predstavuje priemer nameraných maxím v ose x , $x_{\text{mag_min}}$ je priemer miním v ose x . Jednotlivé namerané hodnoty a aj ofset budú v jednotkách T alebo G v závislosti na použítom magnetometre, alebo budú bez jednotky, ak sa budú používať hodnoty pred prevodom na G alebo T. Obdobný výpočet ako je (1.11) by sa aplikoval aj na ostatné osi. Vykompenzovaná hodnota $x_{\text{mag_HI_cal}}$ sa získa odčítaním ofsetu od novej nameranej hodnoty $x_{\text{mag_new}}$ v danej ose:

$$x_{\text{mag_HI_cal}} = x_{\text{mag_new}} - x_{\text{mag_offset}} \quad [\text{G}], [\text{T}], [-]. \quad (1.12)$$

Magneticky mäkké materiály dokážu ovplyvňovať magnetické pole v ich okolí, pričom nemusia vytvárať vlastné magnetické pole. Skreslenie nimi spôsobené závisí na orientácii daného materiálu voči magnetometru. V prípade dvojsového merania

sa prejavuje sploštením kružnice do tvaru elipsy a jej natočením o určitý uhol α , čo je vykreslené na obrázku 1.11. Tento typ kompenzácie sa aplikuje po vykompenzovaní skreslenia spôsobeného magneticky tvrdými materiálmi, aby bol stred v bode $[0; 0]$.



Obrázok 1.11 Skreslenie spôsobené magneticky mäkkými materiálmi, prevzaté z [31]

V prvom kroku je potrebné odstrániť natočenie elipsy o uhol α . Na obrázku 1.11 je označená hlavná polos r a vedľajšia polos je označená q . Hlavná, respektíve vedľajšia, polos predstavujú vzdialenosť od stredu S so súradnicami $[0; 0]$ po bod R so súradnicami $[x_1; y_1]$, respektíve po bod Q so súradnicami $[x_2; y_2]$. Veľkosť polosi r a q je možné určiť ako:

$$r = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \quad [\text{G}], [\text{T}], [-] \quad (1.13)$$

a

$$q = \sqrt{x_2^2 + y_2^2} \quad [\text{G}], [\text{T}], [-]. \quad (1.14)$$

Z nameraných hodnôt získaných otáčaním magnetometra minimálne o 360° je možné vypočítať vzdialenosť každého bodu kružnice od stredu. Maximálna vypočítaná hodnota

predstavuje hlavnú polos r a minimálna vedľajšiu polos q . Uhol natočenia α je možné získať prostredníctvom vzťahu:

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{y_1}{r} \right) [^\circ]. \quad (1.15)$$

Elipsu je možné natočiť pomocou zisteného uhla α , do osí x a y podľa vzťahov:

$$x_{\text{rot}} = x_{\text{mag_HI_cal}} \cdot \cos \alpha + y_{\text{mag_HI_cal}} \cdot \sin \alpha \quad [\text{G}], [\text{T}], [-] \quad (1.16)$$

a

$$y_{\text{rot}} = y_{\text{mag_HI_cal}} \cdot \cos \alpha - x_{\text{mag_HI_cal}} \cdot \sin \alpha \quad [\text{G}], [\text{T}], [-], \quad (1.17)$$

kde x_{rot} , y_{rot} sú výsledné hodnoty merania magnetometra po natočení o uhol α , $x_{\text{mag_HI_cal}}$, $y_{\text{mag_HI_cal}}$ sú hodnoty magnetometra vykompenzované voči skresleniu magneticky tvrdými materiálmi.

Nakoľko je požadovaným tvarom kružnica, je následne potrebné tvar elipsy upraviť prostredníctvom faktoru škálovania σ . Ide o pomer dĺžok polosí daný ako:

$$\sigma = \frac{q}{r} [-], \quad (1.18)$$

ktorým sa delia zmerané hodnoty.

V prípade magnetometra merajúceho v troch osiach spôsobujú magneticky mäkké materiály skreslenie gule do tvaru elipsoidu, ktorého parametre je potrebné zistiť obdobne ako pri dvojosovom meraní, prepočítať natočenie a upraviť tvar do pôvodnej gule pomocou škálovania. Ide o výpočtovo náročný proces, ktorý by procesoru zabral viac času a tým by zvýšil aj spotrebu. V niektorých aplikáciách je z pohľadu efektivity a ceny výhodnejšie vynechať tento typ kompenzácie a namiesto toho odstrániť magneticky mäkké materiály z okolia magnetometra [20; 31].

V situáciách, kedy je nevýhodné určovať skreslenie magneticky mäkkými materiálmi spôsobom popísaným vyššie je možné použiť zjednodušený spôsob úpravy skreslenia z elipsoidu na guľu. V takom prípade sa určí minimum a maximum pre každú os obdobne ako pri zisťovaní skreslenia magneticky tvrdými materiálmi, s tým rozdielom, že v tomto bode už musí byť offset vykompenzovaný. Zo získaných hodnôt maxima $x_{\text{mag_HI_cal_max}}$ a minima $x_{\text{mag_HI_cal_min}}$ sa určí ich delta $x_{\text{mag_delta}}$:

$$x_{\text{mag_delta}} = \frac{x_{\text{mag_HI_cal_max}} - x_{\text{mag_HI_cal_min}}}{2} \quad [\text{G}], [\text{T}], [-]. \quad (1.19)$$

Vzťah (1.19) sa aplikuje aj na osi y , respektíve z , na získanie delty $y_{\text{mag_delta}}$, respektíve $z_{\text{mag_delta}}$. Z nich sa ďalej spracuje aritmetický priemer avg_{mag} :

$$avg_{\text{mag}} = \frac{x_{\text{mag_delta}} + y_{\text{mag_delta}} + z_{\text{mag_delta}}}{3} \quad [\text{G}], [\text{T}], [-]. \quad (1.20)$$

Skreslenie v jednotlivých osiach sa určí podielom aritmetického priemeru vypočítaného v (1.20) a výpočtu delty danej osi zo vzťahu (1.19). Príklad výpočtu faktoru skreslenia $scale_{mag_x}$ pre os x je:

$$scale_{mag_x} = \frac{avg_{mag}}{x_{mag_delta}} [-]. \quad (1.21)$$

Celková kalibrácia nových nameraných hodnôt voči skresleniu magneticky tvrdými aj mäkkými materiálmi obsahuje odčítanie offsetu a následné vynásobenie faktorom skreslenia. Kompletný výpočet kalibrácie výstupu x_{mag_cal} pre os x vyzerá nasledovne:

$$x_{mag_cal} = (x_{mag_new} - x_{mag_offset}) \cdot scale_{mag_x} [G], [T], [-]. \quad (1.22)$$

Kompenzácia daná výpočtom (1.22) sa má aplikovať na všetky merané osi. Z výpočtu je zjavné, že tento spôsob kalibrácie je možné realizovať ako na tri osi tak aj na dve osi, nakoľko sa tu neuplatňuje rotačná matica, ktorá by sa vplyvom pridávania alebo uberania dimenzií menila. Vplyvom toho je tu zároveň dosiahnutá nižšia presnosť kompenzácie, ale výpočtová náročnosť je menšia. Voľba vhodného spôsobu kalibrácie závisí na danej aplikácii.

2. FILTRÁCIA A MATEMATICKÝ APARÁT

Kombináciou dvoch alebo viacerých inerciálnych senzorov je možné dosiahnuť lepšiu presnosť a získať parametre, ktoré by sa použitím jedného z nich zistiť nedali. Pri kombinovaní inerciálnych senzorov sa preto využíva ich vzájomná komplementárnosť. Hoci tieto senzory zaznamenávajú informácie týkajúce sa rovnakého javu, výsledná výstupná informácia je spojením tých dát, ktoré majú v danom senzore vyššiu presnosť. Vďaka tomuto je možné do istej miery vykompenzovať offset a drift, ktoré časom vznikajú v akcelerometri a gyroskope, a ktorých vplyvom sa akumuluje chyba [15].

Dlhodobú presnosť je možné zaistiť využitím príslušného filtra. V nasledujúcej časti budú preto charakterizované niektoré typy filtrov používaných pri inerciálnych senzoroch a matematické odvodenie niektorých parametrov, ktoré je možné vypočítať využitím výstupov senzorov.

2.1 Filtrácia výstupov inerciálnych senzorov

Medzi najpoužívanejšie filtre pracujúce s inerciálnymi senzormi sú komplementárny filter a Kalmanov filter. Ide o digitálne filtre, takže ich spracovanie prebieha v procesore, ktorý musí byť vzhľadom na to dimenzovaný. Líšia sa svojou komplikovanosťou, implementačnou náročnosťou a presnosťou dosiahnutých výsledkov. V tejto kapitole budú všeobecne popísané princípy týchto dvoch filtrov a ich kombinácie.

2.1.1 Kalmanov filter

Kalmanov filter, označovaný aj skratkou KF (z ang. *Kalman Filter*), je filter vyžadujúci na svoje fungovanie znalosť fyzikálneho modelu systému [32]. Tento model je potrebné vedieť čo najpresnejšie, pretože závisí na šumových parametroch systému. Na popis filtru sa používajú operácie s komplexnými maticami, vplyvom čoho je náročný na implementáciu a na spracovanie procesorom, ktorý musí byť dostatočne robustný na dané matematické operácie.

Práca s Kalmanovým filtrom sa skladá z dvoch častí, prvou je určenie predpokladaného modelu a druhou je úprava pomocou modelu merania. Výhodou je jeho presnosť a určenie výchylky gyroskopu. Je vhodný pre súčiastky s vyšším šumom, pretože berie do úvahy fyzikálne vlastnosti systému. Pomocou tohto filtru sú dosiahnuté veľmi dobré výsledky pri meraní s IMU, ale za cenu problematickej implementácie a výpočtovej záťaži procesoru.

2.1.2 Komplementárny filter

Jednoduchší typ filtru je komplementárny filter, so skratkou CF (z ang. *Complementary Filter*), ktorý na rozdiel od KF nevyžaduje poznatky ohľadom fyzikálnej stránky modelu ani komplexný matematický popis [32]. Pri komplementárnom filtri sa rozlišujú

dva druhy, a to lineárny (LCF, z ang. *Linear Complementary Filter*) a nelineárny (NCF, z ang. *Non-linear Complementary Filter*).

Lineárny komplementárny filter využíva filter hornej a dolnej priepusti, v ktorých sú uplatnené komplementárne vlastnosti gyroskopu a akcelerometra s magnetometrom. Výhodou tohto typu je nízka cena, nevýhodou nemožnosť určenia výchylky gyroskopu.

Nelineárny komplementárny filter sa skladá z proporcionálnej časti, ktorá spracúva zmenu frekvencie medzi dvomi senzormi a integrálnej časti, ktorá pracuje s výchylkou gyroskopu. Využívajú sa v ňom dva koeficienty K_P a K_I , ktoré predstavujú proporcionálne a integrálne zosilnenie.

2.1.3 Komplementárny Kalmanov filter

Spojením komplementárneho a Kalmanovho filteru do jednej štruktúry vznikol komplementárny Kalmanov filter (CKF, z ang. *Complementary – Kalman Filter*) [32]. Kalmanov filter sa používa na kompenzáciu chyby gyroskopu a komplementárny filter sa následne použije na určenie polohy. Rozdiel medzi CKF a KF je ten, že výpočet integrácie výstupu z gyroskopu prebieha mimo KF.

Komplementárny Kalmanov filter je pomerne zložitý na spracovanie, nakoľko obsahuje maticové operácie, vplyvom čoho je drahší na implementáciu ako CF. Zároveň je tu potreba vziať do úvahy šum pre správne nastavenie časti s KF.

2.2 Matematický popis inerciálnych senzorov

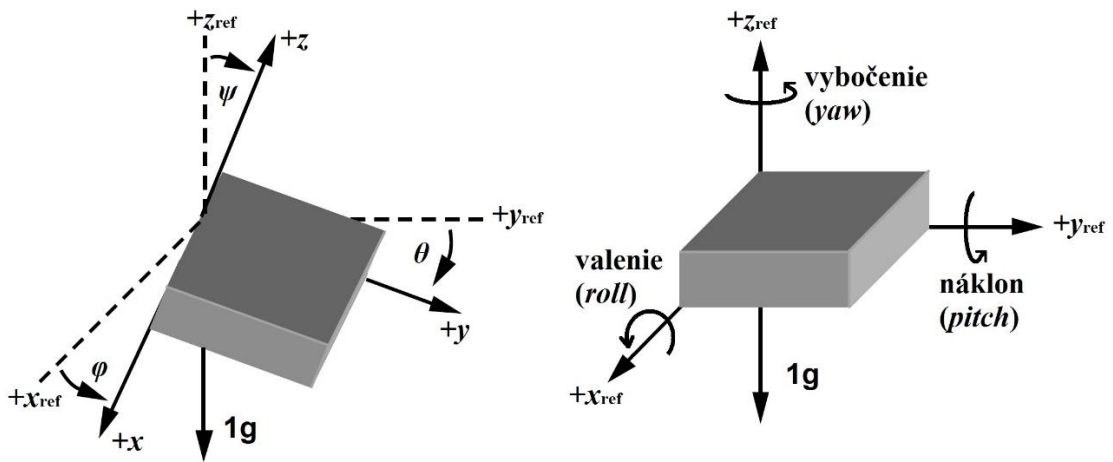
Každý inerciálny senzor meria iný parameter, ale ich výstupy je možné po vhodnom prepočte vzájomne kombinovať. Z akcelerometra je možné trigonometrickým odvodením získať informácie o inklinácii. Z gyroskopu sa dá integráciou vypočítať uhol natočenia. Dáta magnetometra je možné použiť napríklad na určenie azimutu, ktorý v jeho prípade odpovedá funkcii kompasu. Matematickým popisom týmto aplikácií inerciálnych senzorov sa zaoberajú nasledujúce podkapitoly.

2.2.1 Matematický popis určenie inklinácie akcelerometrom

Výstupom akcelerometra je zaznamenané statické alebo dynamické zrýchlenie, pričom na určenie uhla sa využíva statické tiažové zrýchlenie pôsobiace vždy kolmo k povrchu zeme. Namerané zrýchlenie sa udáva v násobkoch tiažového zrýchlenia g a môže byť kladné alebo záporné v závislosti na tom, akým smerom pôsobila sila, ktorá vytvorila dané zrýchlenie, vzhľadom na smer akcelerometra.

Rozličné typy akcelerometrov dokážu merať zrýchlenie v jednej, dvoch alebo troch osiach, pričom výpočty sú s pridávaním dimenzií komplexnejšie. Matematický popis určenia zrýchlenia a smeru v troch osiach vychádza zo vzťahov z jednej a dvoch osí, preto je popis vzťahnutý práve na tri osi. Na obrázku 2.1 je zadefinovaná referenčná sústava súradníc, na ktorú je matematický popis aplikovaný. Sú tu vyznačené smery jednotlivých referenčných osí x_{ref} , y_{ref} , z_{ref} , osi akcelerometra x , y , z , rotácie,

valenie, náklon, vybočenie (z ang. *roll, pitch, yaw*), uhly rotácií φ , θ , ψ a smer pôsobenia vektoru tiažového zrýchlenia g .



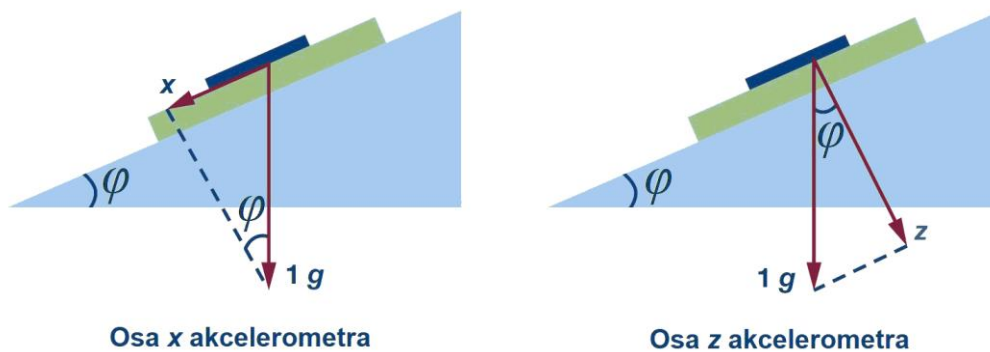
Obrázok 2.1 Referenčná sústava súradníc s vyznačenými smermi referenčných osí, osí akcelerometra, rotácií, uhlov rotácií a vektoru tiažového zrýchlenia, prevzaté z [4]

Podľa konvencie sa k osi x , ktorá predstavuje pohyb do strán, vzťahuje valenie a uhol odklonu osi akcelerometra x od referenčnej osi x_{ref} sa označuje φ . Osi y , predstavujúcej pohyb dopredu a dozadu, prislúcha náklon a uhol odklonu osi y akcelerometra od referenčnej osi y_{ref} je θ . Os z je v smere pohybu nahor a nadol s rotáciou označovanou ako vybočenie a uhol odklonu osi z akcelerometra od referenčnej osi z_{ref} ψ [33]. Uhly rotácie sa označujú ako Eulerove uhly a predstavujú súbor postupných rotácií sústavy súradníc, viazanej k nakláňanému akcelerometru, vzhľadom na referenčnú sústavu označenú ako x_{ref} , y_{ref} , z_{ref} .

V pokojovom stave bez žiadneho náklonu akcelerometra je os z rovnobežná s vektorom tiažového zrýchlenia, osi y a x sú kolmé na tento vektor a všetky uhly rotácie sú nulové. Výstup z akcelerometra pre osi x a y má označenie A_x , A_y sú nulové násobky tiažového zrýchlenia. Os z zaznamenáva statické tiažové zrýchlenie pôsobiace na akcelerometer, a preto je jeho výstup A_z rovný tiažovému zrýchleniu.

Po natočení akcelerometra okolo osi y naklonením bude uhol rotácie φ nenulový, ako je znázornené na obrázku 2.2 a pomocou trigonometrie je možné vyjadriť výstup na osi x akcelerometra ako:

$$A_x = 1 g \cdot \sin \varphi \quad [g]. \quad (2.1)$$



Obrázok 2.2 Príklad náklonu akcelerometra valením, prevzaté z [34]

Ak by sa na vyjadrenie uhla φ použil iba jeden výstup alebo meranie by bolo uskutočnené jednoosovým akcelerometrom, presnosť merania náklonu by sa znižovala s väčším uhlom valenia φ . Toto je spôsobené sínusovou závislosťou výstupu na uhle valenia φ , pretože pri uhle $\pm 90^\circ$ sa mení výstup akcelerometra pomalšie. Pri malom uhle φ blízkom 0° je zmena výstupu akcelerometra A_x približne lineárna so zmenou tohto uhla a meranie je presnejšie. Nepresnosť merania je spôsobená aj pri rotácii voči inej osi ako x . Tu sa využije závislosť výstupu A_z na uhle φ :

$$A_z = 1g \cdot \cos\varphi \text{ [g]}. \quad (2.2)$$

Uhol valenia φ sa dá vyjadriť pomerom výstupu osi x a z , čím sa vykompenzuje nepresnosť spôsobená nelineárnym priebehom závislosti merania zrýchlenia akcelerometrom a uhlom rotácie. Tento pomer vedie k pomeru sínusu a kosínusu:

$$\frac{A_x}{A_z} = \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi} = \tan\varphi \text{ [-]}. \quad (2.3)$$

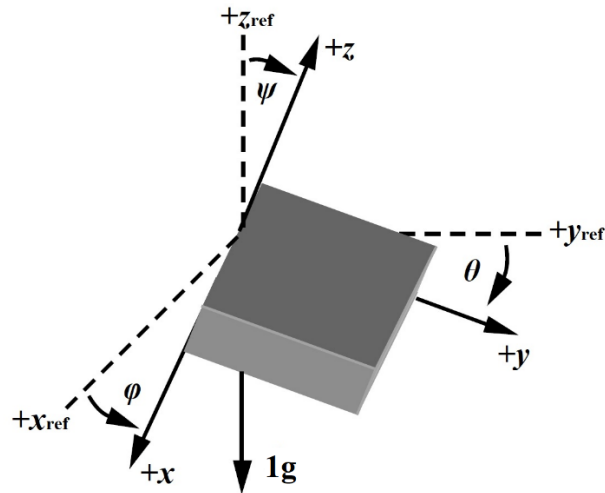
Vzťah (2.3) sa používa pri dvojosovom meraní náklonu akcelerometrom a prípadne pri trojosovom meraní náklonu pri malej rotácii okolo osi y . Pri väčšom uhle rotácie okolo osi y by však presnosť vzťahu klesla. Kvôli zmieneným nepresnostiam je najvýhodnejšie používať meranie trojosovým akcelerometrom, ktoré umožňuje merať všetky uhly rotácie. Na názornejšie objasnenie výpočtu vzťahov rotácie akcelerometra je na obrázku 2.3 vidieť rotáciu akcelerometra v priestore.

Pri určení uhlov rotácie akcelerometrom sa využíva fakt, že v referenčnej sústave súradníc je rovina tvorená osami x_{ref} , y_{ref} horizontálna s nulovým pôsobiacim zrýchlením a os z_{ref} je na ňu kolmá s pôsobiacim zrýchlením rovným hodnote tiažového zrýchlenia. Z obrázku 2.3 je vidieť, že uhly φ , respektíve θ , sú uhly medzi osami x , respektíve y , a rovinou $x_{\text{ref}} - y_{\text{ref}}$ z referenčnej sústavy súradníc. Uhol ψ predstavuje uhol rotácie osi z od vektora tiažového zrýchlenia g .

V pokojovom stave pri ľubovoľnej rotácii akcelerometra v priestore by mali zrýchlenia namerané v jednotlivých osiach dať hodnotu tiažového zrýchlenia.

Toto vyplýva z Pytagorovej vety uplatnenej v 3D priestore. Čiže platí, že kvadratický súčet všetkých zložiek sa musí rovnať tiažovému zrýchleniu:

$$A_x^2 + A_y^2 + A_z^2 = 1g \text{ [g]}. \quad (2.4)$$



Obrázok 2.3 Natočenie trojosového akcelerometra v priestore, prevzaté z [4]

Uhol rotácie φ osi x je podobne ako vo vzťahu daný pomerom zložiek nameraných akcelerometrom. Výstup osi x akcelerometra A_x je však vzťahnutý na časť tiažového zrýchlenia tvorenú náklonom v osiach y, z , ktorá je kolmá na výstup A_x . S použitím trigonometrie vychádza vzťah pre uhol φ :

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}} \right) \text{ [}^\circ\text{]}. \quad (2.5)$$

Obdobne ako vo vzťahu (2.5) je vyjadrený vzťah pre uhol θ , ktorý je daný pomerom zrýchlenia v ose y a časti tiažového zrýchlenia zloženú zo zrýchlenia v smere osí x a z :

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}} \right) \text{ [}^\circ\text{]}. \quad (2.6)$$

Uhol ψ sa zisťuje z pomeru časti tiažového zrýchlenia tvorenou zrýchlením v smere osí x a y voči zrýchleniu v smere osi z akcelerometra. Výsledný vzťah pre uhol ψ je:

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}}{A_z} \right) \text{ [}^\circ\text{]}. \quad (2.7)$$

Uhly vyjadrené vzťahmi (2.5), (2.6) a (2.7) predstavujú kompletný výpočet náklonu v 3D priestore s použitím informácií z akcelerometra.

2.2.2 Matematický popis určenie uhlov gyroskopom

Uhly *roll*, *pitch* a *yaw* je možné získať ako z akcelerometra, tak aj z výstupov osí x , y , z gyroskopu. Jeho výstup v jednotlivých osiach udáva rýchlosť otáčania okolo týchto osí a ich integráciou je možné dostať z uhlovej rýchlosti uhol [20].

Výstup z gyroskopu sa pre osi x , y , z označí ako G_x , G_y a G_z . V prípade gyroskopu integrál výstupu predstavuje aktuálne nameranú hodnotu uhlovej rýchlosti v niektorej z osí vynásobenú časom, ktorý uplynul od predchádzajúceho merania. Uhol φ je na základe zmienenej možné určiť z hodnoty výstupu gyroskopu G_x v ose x ako:

$$\varphi = \varphi_{\text{prev}} + G_x \cdot \Delta t \text{ [}^\circ\text{]}, \quad (2.8)$$

kde φ_{prev} je hodnota uhla získaná v predchádzajúcom meraní a Δt je čas, ktorý uplynul od posledného merania gyroskopom. Rovnaký výpočet sa aplikuje na získanie uhlov θ a ψ .

Existuje viacero metód integrácie, ktoré je možné na získanie uhla z gyroskopu použiť. Medzi ne patrí napríklad obdĺžniková, lichobežníková alebo Simpsonova metóda integrácie. V tejto práci bude popísaný princíp obdĺžnikovej a lichobežníkovej integrácie.

Obdĺžniková metóda integrácie využíva rozdelenie intervalu medzi bodmi a a b , v ktorom sa integruje, na polovicu. Funkčná hodnota v tomto bode je $f([a + b] / 2)$ a predstavuje výšku obdĺžnika v_o . Šírka obdĺžnika h_o , ktorým sa aproximuje, je rozdiel bodov b a a [35].

Pomocou výšky v_o a šírky obdĺžnika h_o sa určí plocha jedného intervalu. Ak je integrál krivky $f(x)$ rozdelený na c intervalov, tak výsledok integrálu je:

$$\int_a^b f(x) dx = h_o \cdot \sum_{k=0}^c f\left(\frac{a_k + b_k}{2}\right) \text{ [-]}, \quad (2.9)$$

kde a_k k -tý počiatok obdĺžnika, b_k je k -tý koniec obdĺžnika a k je sumačný index. Jednotka výpočtu odpovedá veličine, ktorá je integrálom počítaná.

Obdĺžniková metóda integrácie je jednoduchý spôsob aproximácie, ktorý nie je náročný na výpočet. Z jej jednoduchosti však plynie vyššia nepresnosť výpočtu, ktorú je nutné minimalizovať väčším počtom intervalov, na ktoré je integrál rozdelený.

Lichobežníková metóda integrácie, tiež označovaná ako trapézová, aproximuje jednotlivé intervaly lichobežníkom, ako naznačuje názov. Šírka intervalu, daná rozdielom okrajových intervalu b a a , v tomto prípade predstavuje výšku lichobežníka, a funkčné hodnoty $f(a)$, $f(b)$ na okrajoch intervalu odpovedajú dĺžkam jeho základní. Obsah aproximovaného lichobežníka krivky $f(x)$ je potom:

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{b - a}{2} (f(a) + f(b)) \text{ [-]}. \quad (2.10)$$

Jednotka výpočtu vychádza z veličiny, ktorá sa integruje. Celý integrál sa vypočíta sčítaním obsahov všetkých lichobežníkov, pričom jednotlivé okraje sa opakujú dvakrát, najskôr ako pravý okraj, potom ako ľavý.

Metóda aproximácie lichobežníkmi je presnejšia a nepotrebuje rozdelenie integrálu na taký veľký počet ako obdĺžniková metóda. Medzi jej nevýhody patrí to, že je o niečo náročnejšia ako obdĺžniková metóda.

2.2.3 Matematický popis určenia azimutu magnetometrom

Magnetometre je možné pomerne jednoduchou aplikáciou použiť na meranie azimutu, čiže odklonu od určitej osi alebo objektu. Tieto inerciálne senzory vďaka snímaniu magnetického poľa zeme dokážu určiť magnetický sever zemegule, čím dokážu fungovať ako kompas.

Azimut voči severu predstavuje uhol odklonu v stupňoch od neho do jednej alebo do druhej strany. Ak sever predstavuje 180° , potom juh bude 0° , východ 270° a západ 90° . To znamená že smerom k východu, respektíve v smere otáčania hodinových ručičiek, uhol rastie a smerom na západ, respektíve proti smeru hodinových ručičiek, uhol klesá. Azimut referujúci na odklon od severu sa označuje aj ako magnetický azimut.

Keďže magnetický azimut sa určuje v rovine xy ide v podstate o uhol ψ . Ten je možné určiť vhodným pomerom výstupov z magnetometra pre osi x a y označené ako M_x a M_y . Hodnotu azimutu ψ je možné určiť ako [31]:

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{M_x}{M_y} \right) [^\circ]. \quad (2.11)$$

Výstupom uvedeného výpočtu je hodnota od -90° do 90° , pričom na určenie magnetického azimutu je potrebný rozsah od -180° do 180° . Zároveň je problematické zavádzanie tohto výpočtu do programu, pretože existuje možnosť, že výstup M_y bude nulový. Vzhľadom na uvedené problémy vzťahu (2.11) sa v programe lepšie uplatní vzťah:

$$\psi = \frac{180}{\pi} \cdot \text{atan2} \left(\frac{M_x}{M_y} \right) [^\circ], \quad (2.12)$$

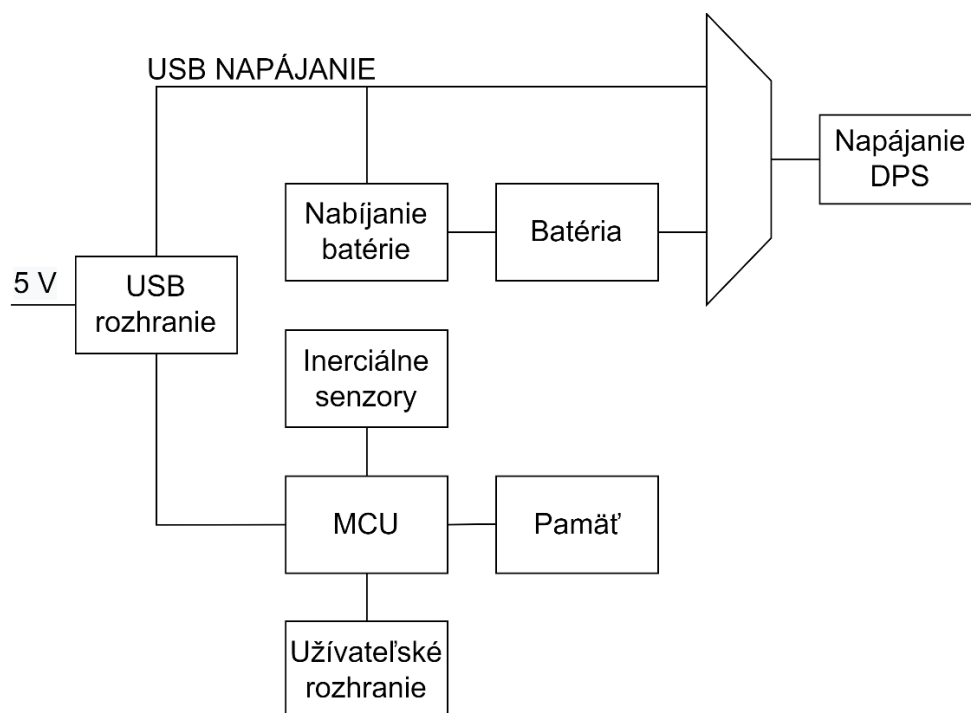
ktorého výsledok je v požadovanom rozsahu od -180° do 180° . Samotná funkcia $\text{atan2}()$ dáva výsledok v radiánoch, preto je pred ňou vo vzťahu (2.12) ešte uvedený prepočet na stupne [36]. Uvedený rozsah je možné vhodne upravovať pomocou jednoduchých prepočtov, aby výsledok odpovedal rozsahovo požiadavkám danej aplikácie.

3. NÁVRH PRÍPRAVKU

Prípravok má umožniť meranie špecifických druhov pohybov, ktoré vychádzajú z projektu, z ktorého je diplomová práca odvodená. Ide konkrétne o meranie inklinácie a azimutu. Meranie zabezpečujú gyroskop, akcelerometer, ktoré sú spojené v IMU a dva magnetometre. Prípravok umožňuje zaznamenané informácie ukladať do externej pamäte a prostredníctvom USB (z ang. *Universal Serial Bus*) rozhrania previesť do počítača. Pre potreby jednoduchšej manipulácie pri meraní je prítomná batéria, prípadne je možné napájať zariadenie pomocou USB rozhrania. Funkčné bloky navrhnutého meracieho prípravku sú znázornené na obrázku 3.1.

Na vstupe je možná zapnutie a vypnutie napájania za pomoci prepínača. Napájanie môže byť zabezpečené batériou, alebo môže byť odoberané z USB. Ak je USB pripojené k externému zdroju napätia berie sa ako primárny zdroj energie, ak pripojené nie je ako zdroj funguje batéria. Prostredníctvom USB je zabezpečené aj nabíjanie batérie, pričom proces nabíjania je indikovaný pomocou LED (z ang. *Light Emitting Diode*) a dostatočné nabitie je kontrolované softvérovo procesorom.

Použité senzory snímajú požadované parametre, ktorých zaznamenávanie a spracovanie je ovládané mikroprocesorom. Následne sa informácie ukladajú do externej pamäte a v prípade pripojeného USB je možné ich preniesť do počítača. Užívateľské rozhranie, pozostávajúce z tlačidla prepínajúceho medzi meraniami a LED indikujúcej aktuálne nastavené meranie.



Obrázok 3.1 Kompletná bloková schéma meracieho prípravku

Riadenie zabezpečuje mikroprocesor, ktorý komunikuje so senzormi, pamäťou a prostredníctvom USB rozhrania aj s počítačom. Riadi užívateľské rozhranie, ukladanie do pamäte, nastavuje meranie inerciálnych senzorov, vykonáva výpočtové operácie na získanie hodnôt azimutu a tiltu. Nakoľko sa prípravok skladá z časti s inerciálnymi senzormi, napájacej časti a riadiacej časti, budú popisované samostatne.

3.1 Napájacia časť prípravku

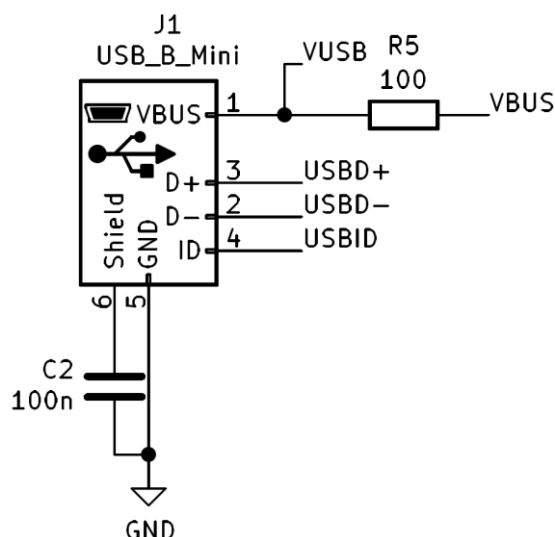
Napájanie je zabezpečené dvomi spôsobmi, a to batériou, alebo prostredníctvom USB pripojeného k externému zdroju. Dodávané napätie je upravované lineárnym znižujúcim stabilizátorom na 3,3 V, ktorým sú napájaná riadiaca časť a časť prípravku so senzormi.

V zariadení je zakomponované nabíjanie batérie po pripojení napájania USB, pričom toto nabíjanie je riadené a kontrolované procesorom. Proces nabíjania je indikovaný LED diódou, ktorá po nabití batérie zhasne.

3.1.1 USB rozhranie

Napätie na nabíjanie batérie, napájanie obvodu, komunikácia s počítačom je zabezpečená pomocou USB konektora USB mini-B. Ten dodáva napätie označené signálom VUSB (z ang. *USB Voltage*) s nominálnou hodnotou napätia 5 V.

USB rozhranie je možné pripojiť priamo k mikroprocesoru, ktorý má zabudovaný pull-up rezistor na D+ (z ang. *USB Data High*) a D- (z ang. *USB Data Low*), takže nie je nutné ho tam hardvérovo pridávať. Vývod VUSB je podľa odporúčania pripojený k mikrokontroléru skrz rezistor s hodnotou 100 Ω [37]. Zapojenie USB rozhrania je vidieť na obrázku 3.2.



Obrázok 3.2 Schéma zapojenia USB rozhrania

Dané hodnoty odporu rezistoru a kapacity kondenzátora sú bežne dostupné v použitom SMD (z ang. *Surface Mount Device*) puzdre veľkosti 0603, preto nie je nutné ich bližšie špecifikovať.

3.1.2 Batéria s nabíjacím obvodom

Batéria funguje ako zdroj energie v dobe, kedy prípravok nie je pripojený k napájaniu. Pre jednoduchšiu prácu s ňou zariadenie obsahuje nabíjací obvod, ktorý je spolu s batériou vidieť na obrázku 3.3. Po pripojení na napájanie sa začne nabíjanie, ktorého priebeh indikuje LED dióda, je možné ho kontrolovať aj prostredníctvom mikrokontroléra. Ten sleduje vybíjanie batérie v priebehu jej používania a pri nízkej hodnote napätia na jej výstupe prejde prípravok režimu zníženej spotreby.

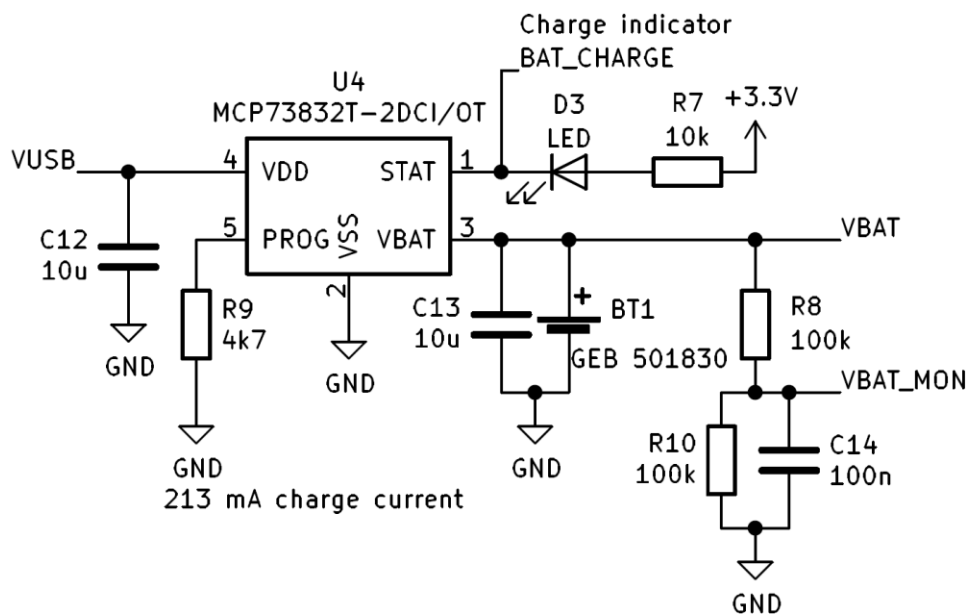
Na batériu bolo viacero požiadaviek, a to malé rozmery, vhodné nominálne napätie VBAT (z ang. *Battery Voltage*) a dostatočná kapacita. Potrebná kapacita batérie bola určená pomocou približného výpočtu spotreby obvodu. Odoberaný prúd vybranými súčiastkami s najzásadnejšou spotrebou je vypísaný v tabuľke 3.1. Tieto hodnoty boli získané z katalógových listov týchto súčiastok, pričom niektoré hodnoty boli zámerne vynechané, nakoľko spôsobia zanedbateľne malý odber prúdu, ako napríklad kontrolér nabíjania, regulátor napätia alebo rezistory *R8* a *R10*.

Tabuľka 3.1 Prúdový odber vybraných súčiastok prípravku

	<i>I</i> [mA]
IMU	0,88
Magnetometer BM	0,30
Magnetometer MMC	4,00
MCU	5,86
LED	5,91
Pamäť	0,50
<i>I</i>_{celkový}	17,45

Celkový prúd spočítaný v tabuľke 3.1 je približný stály odber, ktorý sa môže vyskytnúť. Udané hodnoty jednotlivých prúdov však nebudú platiť úplne presne, nakoľko výrobcovia udávali prúdový odber iba pri špecifických podmienkach. S ohľadom na toto bola zvolená batéria s kapacitou ako 11,9 mAh a pri výbere sa do úvahy bral rozmer, dostupnosť, nominálne napätie.

Vybraná je lítiová batéria LiPol 501830 značky GeB s nominálnym napätím 3,7 V, nominálnou kapacitou 230 mAh a rozmermi 30 mm x 18 mm x 5 mm [38]. Na jej pripojenie sa použije konektor JST-PH s rozstupom vývodov 2 mm. Batéria má zainegrovaný ochranný obvod, ktorý kontroluje napätie na batérii a chráni ju pred skratom. Je tu zabezpečená ochrana voči prebitiu, ktorá sa aplikuje pri napätí 4,26 V a ochrana proti úplnému vybitiu pri napätí na batérii 2,9 V, kedy ochranný obvod batériu vypne. Odporúčaný nabíjací prúd je 46 mA až 230 mA.



Obrázok 3.3 Batéria s nabíjaciím obvodom

V obvode nabíjania je využitý kontrolér MCP73832T – 2DCI/OT od firmy MICROCHIP TECHNOLOGY, ktorý je vhodný na napájanie napätím 5 V [39]. Obsahuje automatické ukončenie nabíjania vo vývode s označením STAT (z ang. *Charge Status*), ktorý pri nabíjaní nastaví nízke napätie, kedy indikačná LED dióda svieti a po nabití nastaví vysoké napätie, čím LED dióda zhasne. Stav tohto vývodu je prinášaný aj do MCU na prídavnú kontrolu.

Rezistorom $R9$ pripojenom k vývodu PROG (z ang. *Current Regulation Programming*) sa nastavuje nabíjací prúd. V špecifikáciách batérie sa odporúča hodnota nabíjacieho prúdu medzi 46 mA až 230 mA. Vzhľadom na toto bola zvolená hodnota odporu rezistoru $R9$ 4,7 k Ω , čomu prislúcha nabíjací prúd približne 213 mA.

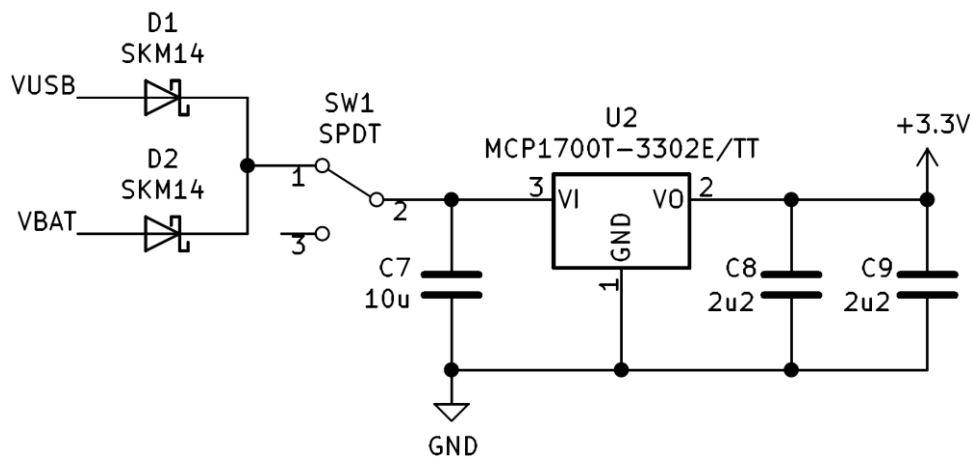
Deličom $R8$, $R10$ sa zisťuje napätie na batérii pomocou monitorovacieho signálu privádzaného do mikroprocesoru. Ak toto napätie klesne pod hodnotu 3 V, mikrokontrolér nastaví vypnutie senzorov, čím obmedzí prevádzku aby zabránil ďalšiemu rýchlemu vybíjaniu batérie. Kondenzátor $C14$ pripojený paralelne k rezistoru $R10$ sa nabíja na hodnotu napätia na rezistore a procesor pri meraní odoberie náboj z neho, čo zamedzí zvýšeniu prúdu rezistormi a vzniku chyby merania.

Všetky použité rezistory a kondenzátory zo zapojenia na obrázku 3.3 sú bežne dostupné v puzdre SMD 0603, preto nie je nutnosť určovať ich konkrétny typ. Použitá LED je zelenej farby a je obdobne ako kondenzátory a rezistory v puzdre SMD 0603. Použitá dióda je RF – GNB191TS – CF od firmy REFOND [40]. Typická hodnota jej priepustného napätia je 2 V a pri hodnote odporu 10 k Ω rezistoru $R7$ ňou potečie prúd 130 μ A. Dióda má čisto signalizačnú funkciu, vzhľadom na čo je hodnota rezistoru $R7$ primeraná.

3.1.3 Lineárny stabilizátor LDO

Napätie je možné odoberať z USB, ak je pripojené, alebo z batérie. Ak je pripojené USB prednostne sa odoberá napätie z neho, pričom toto nastaví diódový OR. Prepínačom je možné vyberať medzi zapnutím, respektíve vypnutím napájania. Na stabilizovanie napätia pre zvyšok obvodu sa používa lineárny stabilizátor. Celé toto zapojenie je vidieť na obrázku 3.4.

Napätie VUSB je 5 V, nominálne napätie batérie VBAT je 3,7 V. Diódový OR je logický a tu funguje na veľkosť amplitúdy. Na svoj výstup pustí väčšie z napätí VUSB a VBAT. V tomto prípade je napätie z USB väčšie a takýmto spôsobom sa nastaví jeho priorita voči batérii. Boli zvolené Schottkyho diódy SKM14 od firmy DIOTEC SEMICONDUCTOR, kvôli ich malému priepustnému napätiu, ktoré je menšie ako 0,35 V pri prúde 1 A [41]. Nakoľko použitým zapojením potečie výrazne menší prúd, bude aj hodnota priepustného napätia ešte menšia.



Obrázok 3.4 Schéma diódovej logiky výberu napájania a zapojenie LDO

Na stabilizáciu napätia sa používa nízkoúbytkový stabilizátor LDO (z ang. *Low Dropout Regulator*) MCP1700T – 3302E/TT od firmy MICROCHIP TECHNOLOGY s pevným výstupným napätím 3,3 V, ktorý napája mikroprocesor, jeho periférie a inerciálne senzory [42]. Pracuje pri vstupnom napätí od 2,3 V do 6,0 V, takže je schopný stabilizovať napätie 3,3 V na výstupe pri napájaní z USB aj batérie.

Zapojenie LDO na obrázku 3.4 obsahuje blokovacie keramické kondenzátory podľa odporúčania výrobcu, ktoré sú v daných hodnotách bežne dostupné, rovnako ako tlačidlo a preto nie je potrebné ich presne špecifikovať.

3.2 Riadiaca časť prípravku

Bloky riadiacej časti prípravku zaisťujú správne fungovanie prípravku, v ktorom procesor riadi funkcie vykonávané v obvode, zabezpečuje komunikáciu a spracovanie dát zaznamenaných inerciálnymi senzormi. Do riadenia obvodu je možné vstupovať tlačidlom, ktoré zároveň indikujú tri LED rôznych farieb. LED popri tom indikujú aktuálny stav prípravku.

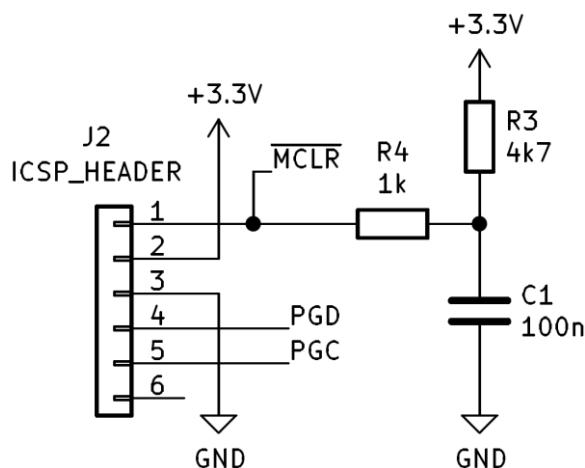
3.2.1 Mikrokontrolér MCU

Mikroprocesor, označovaný aj skratkou MCU (z ang. *Microprocessing Control Unit*), bol zvolený podľa niekoľkých požiadaviek, a to dostatočný počet vývodov, možnosť priamej komunikácie cez USB a schopnosť spracovávanía dodávaných nameraných veličín. Celkovo je potrebných šesť vývodov na riadenie senzorov a užívateľského rozhrania, dva vývody na nabíjanie batérie, tri vývody na naprogramovanie, na komunikáciu prostredníctvom zbernice I²C dva vývody, prostredníctvom SPI štyri vývody a prostredníctvom USB štyri vývody. Bol zvolený 16-bitový procesor PIC24FJ64GU202 od firmy MICROCHIP s 28 vývodmi [37].

Zapojenie mikroprocesora a priradenie signálov príslušným vývodom je znázornený na obrázku 3.5. MCU je možné napájať napätím v rozmedzí od 2,0 V do 3,6 V. Kondenzátory C4, C5 a C6 by mali byť podľa odporúčania výrobcu keramické s hodnotou kapacity 100 nF, nízkym ESR (z ang. *Equivalent Series Resistance*) a menovitým napätím 10 V až 20 V. Na vývod VCAP (z ang. *Voltage Regulator Pin for External Capacitor*), má byť podľa odporúčaná výrobcu pripojený keramický alebo tantalový kondenzátor s nízkym ESR s hodnotou kapacity 10 µF.

V mikroprocesore sa využíva jedna zbernica I²C, jedna zbernica SPI, USB. Je k nemu privádzaný externé prerušenie INT1 (z ang. *Interrupt 1*) z IMU, kontrolné signály nabíjania, ktoré sú pripojené k vývodom s AD prevodníkom a tlačidlo s diódami. Význam jednotlivých signálov pripojených k MCU je vysvetlený pri popise príslušných blokov.

Zbernica I²C potrebuje na správnu funkciu pull-up rezistory, kvôli open-drain výstupom na strane senzorov aj mikroprocesoru. Vzhľadom ku kapacite zbernice, vstupnej kapacite pamäti a frekvencii I²C postačia veľkosti odporov pull-up rezistorov 10 kΩ. Rezistory sú v puzdre SMD 0603 a ide o bežne dostupné hodnoty, preto nie sú bližšie špecifikované.

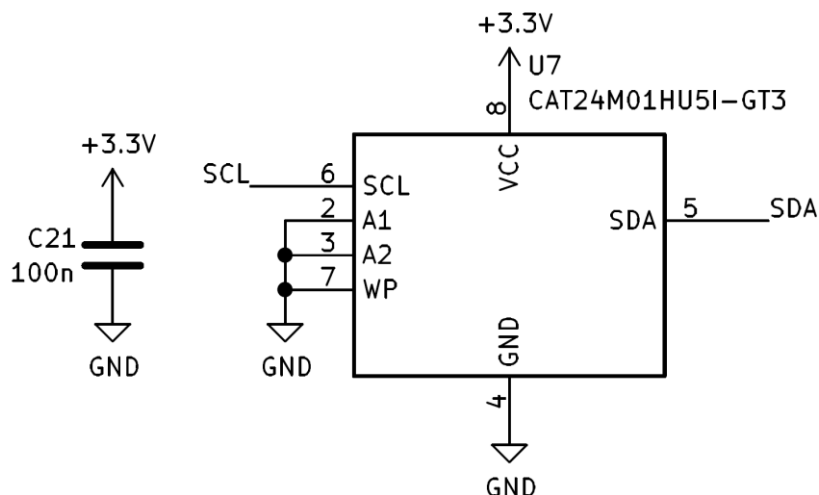


Obrázok 3.6 Schéma zapojenia konektoru na programovanie MCU

Pre potreby programovania sa pripájajú vývody 1,2 a 26 mikroprocesoru, pričom je potrebné dodržať aj návrhové pravidlá pri vytváraní DPS dané výrobcom v katalógovom liste.

3.2.2 Externá pamäť

Na ukladanie spracovaných záznamov je do prípravku zaradená externá pamäť, ktorá bola zvolená tak, aby sa do nej zmestili všetky dáta spracované v priebehu času, po ktorý vydrží byť batéria nabitá. Bola vybraná 1 Mb pamäť CAT24M01HU5I – GT3 od firmy ONSEMI, ktorej zapojenie je na obrázku 3.7 a riadi sa odporúčaním výrobcu [43].



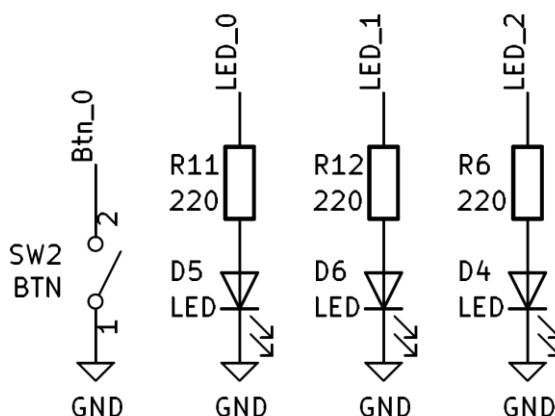
Obrázok 3.7 Schéma zapojenia externej pamäti EEPROM

Zvolená pamäť je typu EEPROM (z ang. *Electrically Erasable Programmable Read-only Memory*), ktorá komunikuje s procesorom prostredníctvom sériovej zbernice I²C, čomu odpovedajú vývody 5 a 6. Zapojením adresových vývodov zariadenia A1 a A2 na napájacie napätie alebo na zem je určená adresa pamäte pri komunikácii

prostredníctvom zbernice. Kondenzátor C21 je blokovací kondenzátor v SMD puzdre rozmeru 0603, ktorý je bežne dostupný, vzhľadom na čo nie je nutnosť vybrať konkrétny druh.

3.2.3 Uživatelské rozhranie

Užívateľ môže do funkcie zariadenia vstupovať prostredníctvom tlačidla, pričom aktuálny stav prípravku je indikované LED diódami. Ich zapojenie a označenie príslušných signálov, ktorými sú spojené s MCU, je vidieť na obrázku 3.8. Tlačidlo slúži na prepínanie medzi meraním kompasu s využitím gyroskopu s magnetometrom v komplementárnom filtri, azimutu prostredníctvom gyroskopu a meraním inklinácie pomocou akcelerometra. LED rôznej farby prislúchajú daným meraniam, aby mal užívateľ prehľad o aktuálne nastavenom meraní.



Obrázok 3.8 Zapojenie LED diód a tlačidla

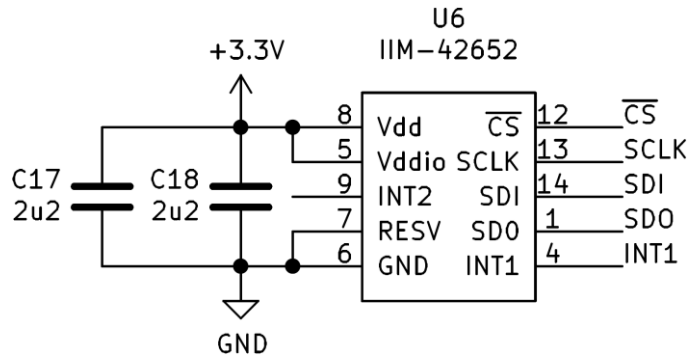
Rezistory a LED diódy sú v SMD puzdre veľkosti 0603, tlačidlo je bežné stláčacie tlačidlo rozmeru 6 mm x 6 mm. Rezistory ani tlačidlá nie je nutné presne špecifikovať, nakoľko sú bežne dostupné. LED diódy zelená, červená, respektíve modrá sú RF – GNB191TS – CF, RF – RUB190TS – CA , respektíve RF – YUB191TS – AE, všetky od firmy REFOND [40; 44; 45]. Diódy majú indikačnú funkciu a stačí, aby svietili natoľko, aby bolo vidieť, že sú zapnuté. Podľa výrobcu majú všetky diódy priepustné napätie typicky 2 V, a pri zvolenom odpore 220 Ω rezistorov R11, R12, R6 diódami tečie prúd 5,91 mA, ktorý je dostatočný na signalizačnú funkciu.

3.3 Časť prípravku s inerciálnymi senzormi

Bloky tejto časti zariadenia sú riadené mikroprocesorom a poskytujú všetky náležité informácie na zistenie požadovaných druhov pohybu. Nachádza sa tu akcelerometer s gyroskopom a dva magnetometre, pričom ich konkrétny výber sa odrážal od rozpracovaného projektu, z ktorého práca vychádza. Aby sa nerozširovala súčiastková základňa sú použité senzory aplikované v iných častiach projektu.

3.3.1 Akcelerometer a gyroskop

Zrýchlenie a rotácia sú merané prostredníctvom IMU, ktoré obsahuje trojosový akcelerometer, trojosový gyroskop a senzor na meranie teploty. Zariadenie komunikuje s mikroprocesorom prostredníctvom zbernice SPI a programovateľného prerušenia na vývode označenom INT1, ako je vidieť zo zapojenia na obrázku 3.9.



Obrázok 3.9 Schéma zapojenia IMU obsahujúca akcelerometer a gyroskop

Použitá je inerciálna meracia jednotka IIM-42652 od firmy TDK INVENSENSE, v ktorej je už smerovo zosúladený akcelerometer a gyroskop [46]. Obsiahnutý gyroskop má osem programovateľných rozsahov ($\pm 15,625$ °/s až ± 2000 °/s) a akcelerometer štyri ($\pm 2g$ až $\pm 16g$), čo umožňuje v prípade nedostatočného rozsahu zariadenie prestaviť bez nutnosti výmeny súčiastky. Výhodou je prítomnosť programovateľných digitálnych filtrov pre gyroskop, akcelerometer aj teplotný senzor.

Je použitý kapacitný MEMS akcelerometer, ktorý je digitálny. Jeho architektúra znižuje závislosť merania na výrobnom procese a teplote. Gyroskop je vibračný MEMS gyroskop založený na Coriolisovom jave, zmeraný signál je prevedený na analógové napätie, ktoré je digitalizované. Na prevod zmeraného analógového signálu na digitálny sú v IMU vstavané 16-bitové AD prevodníky pre každú os akcelerometra aj gyroskopu.

Informácie sa predávajú do MCU prostredníctvom SPI, ale pre prípad potreby sa tu nachádza zabudovaná 2 kB pamäť FIFO (z ang. *First In, First Out*). Tá zároveň napomáha zníženiu spotreby, pretože sa dáta nemusia čítať neustále, ale stačí pri spustení prerušenia vyčítať namerané hodnoty z pamäte. Gyroskop aj akcelerometer umožňujú nízko-výkonový mód, čo je výhodné pri odoberaní napájania z batérie.

Súčiastka funguje stabilne pri napájacom napätí od 1,71 V do 3,6 V. Pri napájacom napätí 1,8 V a nízkošumovom móde akcelerometra a gyroskopu dosahuje odoberaný prúd typicky 0,88 mA. Citlivosť obidvoch inerciálnych senzorov sa líši so zvoleným rozsahom, vo všetkých prípadoch je však citlivosť dostatočná na potreby tohto prípravku.

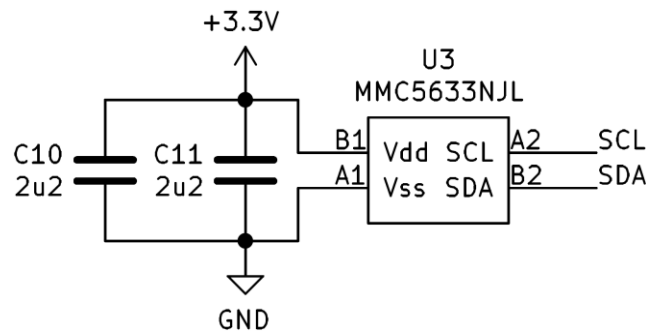
Kapacita kondenzátorov vychádza z katalógového listu výrobcu a kondenzátory sú v SMD puzdre veľkosti 0603, ktoré sú bežne dostupné a nie je nutné vyberať konkrétny typ.

3.3.2 Magnetické senzory

V prípravku sa nachádzajú dva magnetometre na zlepšenie optimalizácie merania. Hlavnými požiadavkami na magnetometre bolo, aby boli trojosové a aby fungovali na napájacom napätí 3,3 V.

Magnetometer MMC5633NJL od firmy MEMSIC je trojosový digitálny magnetický senzor s integrovaným elektrickým obvodom, vďaka čomu jeho zapojenie vyžaduje prídanie iba kondenzátorov [47]. Jeho zapojenie je vidieť na obrázku 3.10 a odpovedá odporúčaniam výrobcu. Súčiastka môže byť napájaná napätím od 1,62 V do 3,6 V, pričom pri napätí 1,8 V a 100 meraniach za sekundu odoberá maximálne 4 mA.

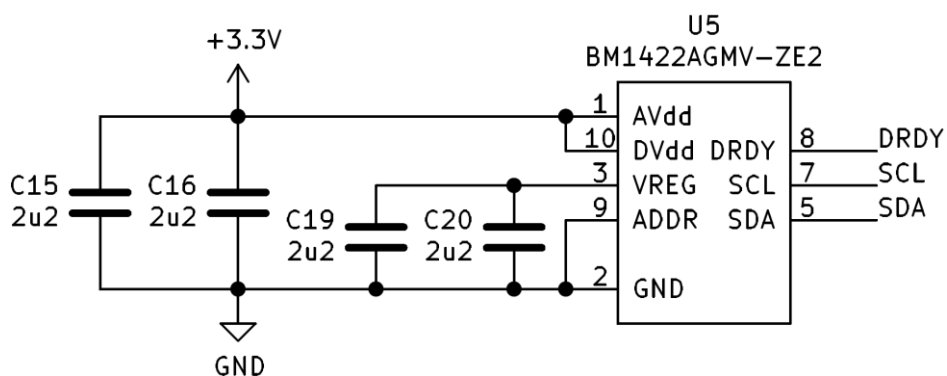
Zmienovaný magnetometer má vstavanú elimináciu chyby zmeny nulového poľa spôsobenej teplom a odstraňovanie zvyšnej magnetizácie spôsobenej silným magnetickým poľom, čím je vhodný práve pre aplikáciu v tomto projekte. Dokáže pracovať v 16-bitovom, 18-bitovom alebo 20-bitovom móde.



Obrázok 3.10 Schéma zapojenia magnetometru MMC5633NJL

Druhým magnetometrom je trojosový digitálny BM1422AGMV od firmy ROHM SEMICONDUCTOR, ktorého zapojenie na obrázku 3.11 sa riadi katalógom výrobcu [48]. Napájacie napätie má byť v rozsahu 1,7 V až 3,6 V a maximálna hodnota odoberaného prúdu pri 100 meraniach za sekundu je 0,3 mA. AD prevodník pracuje v 12-bitovom alebo 14-bitovom režime.

V zapojení na obrázku 3.11 je vidieť, že okrem komunikácie s procesorom cez zbernicu je zapojený aj výstupný vývod DRDY (z ang. *Data Ready*), ktorý informuje o tom, že je zmeraná požadovaná informácia.



Obrázok 3.11 Schéma zapojenia magnetometru BM1422AGMV

Kondenzátory v zapojeniach na obrázkoch 3.10 a 3.11 majú blokovaciu funkciu, všetky majú rovnakú hodnotu kapacity a použité sa SMD puzdra 0603, ktoré sú bežne dostupné na trhu a preto nie je nutné určovať konkrétny typ.

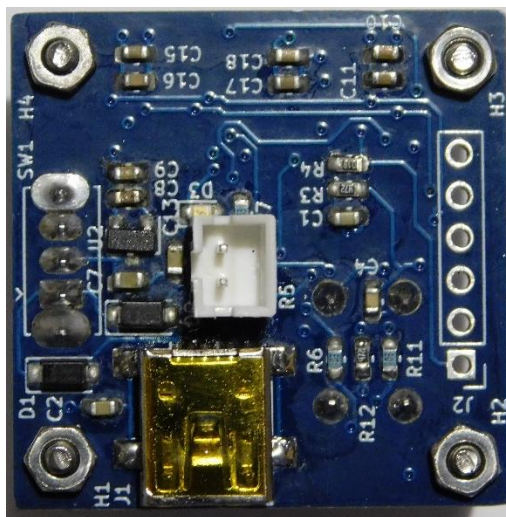
4. REALIZÁCIA A OŽIVENIE PRÍPRAVKU

V tejto časti diplomovej práce sa nachádza popis návrhu DPS, charakteristika jej realizácie a oživenie navrhnutého meracieho prípravku. Súčasťou tejto časti práce bolo vytvorenie programu na zabezpečenie funkcie, uskutočnenie série meraní na skalibrovanie senzorov a optimalizáciu. Zároveň prebehlo celkové testovanie zariadenia.

4.1 Realizácia a výroba DPS

Schematický návrh celého prípravku sa nachádza v prílohe A.1. Prostredníctvom programu KiCad 5.1.4. bol vytvorený návrh schém všetkých blokov a ich realizácia na štvorvrstvovej DPS. V prílohe B.1, B.2, B.3, B.4 sa nachádzajú motívy dosky z hornej strany (*top*), prvej vnútornej vrstvy, druhej vnútornej vrstvy a spodnej strany (*bottom*) v tomto poradí. Servisná potlač z hornej, respektíve spodnej strany dosky je zobrazená v prílohe B.5, respektíve B.6.

Na hornej strane prípravku sú umiestnené konektory na USB a batériu, obvod s LDO, diódový OR, obvod na pripojenie programátora. Z obrázku 4.1 je vidieť, že konektor na USB je umiestnený na okraj dosky tak, aby sa bez problémov dal pripojiť príslušný kábel a konektor na pripojenie programátora nie je osadený, pretože pri programovaní bol použitý nástavec na pripojenie k príslušným vývodom. Na tejto strane je zároveň umiestnená signalizačná LED z obvodu nabíjania, ktorá slúži na indikáciu v procese nabíjania.



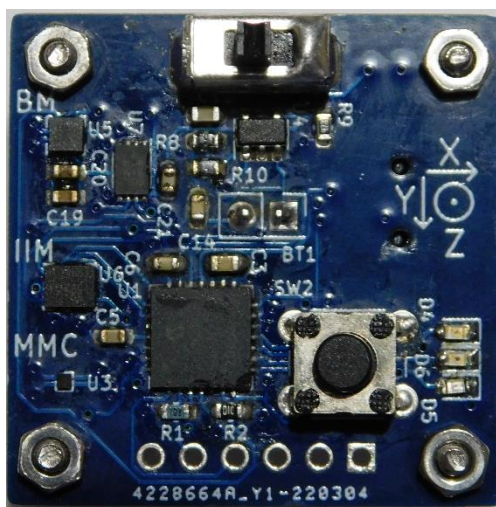
Obrázok 4.1 Horná strana meracieho prípravku

Prvá vnútorná vrstva má vyliatu plochu s potenciálom zeme a druhá vnútorná vrstva plochu s potenciálom napájania z LDO s hodnotou 3,3 V. Vďaka pridaniu týchto

dvoch vrstiev bolo možné zmenšiť rozmery výsledného prípravku a vytvoriť tak kompaktnejší návrh, s ktorým sa jednoducho manipuluje pri meraní.

Spodná strana predstavuje stranu so senzormi a s užívateľským rozhraním. Zároveň sa tu nachádza procesor, pamäť a regulátor nabíjania. Z bloku logického diódového výberu a LDO je na tejto strane umiestnený prepínač umožňujúci zapnutie, respektíve vypnutie zariadenia.

Orientácia senzorov je naznačená prostredníctvom servisnej potlače, ktorá ukazuje smerovanie jednotlivých osí. Pri návrhu bolo dbané na natočenie senzorov takým smerom, aby mali súhlasné, pre používateľa evidentné, smerovanie osí. Strana senzorov aj s popisovanou servisnou potlačou je zachytená na obrázku 4.2.



Obrázok 4.2 Spodná strana meracieho prípravku so senzormi

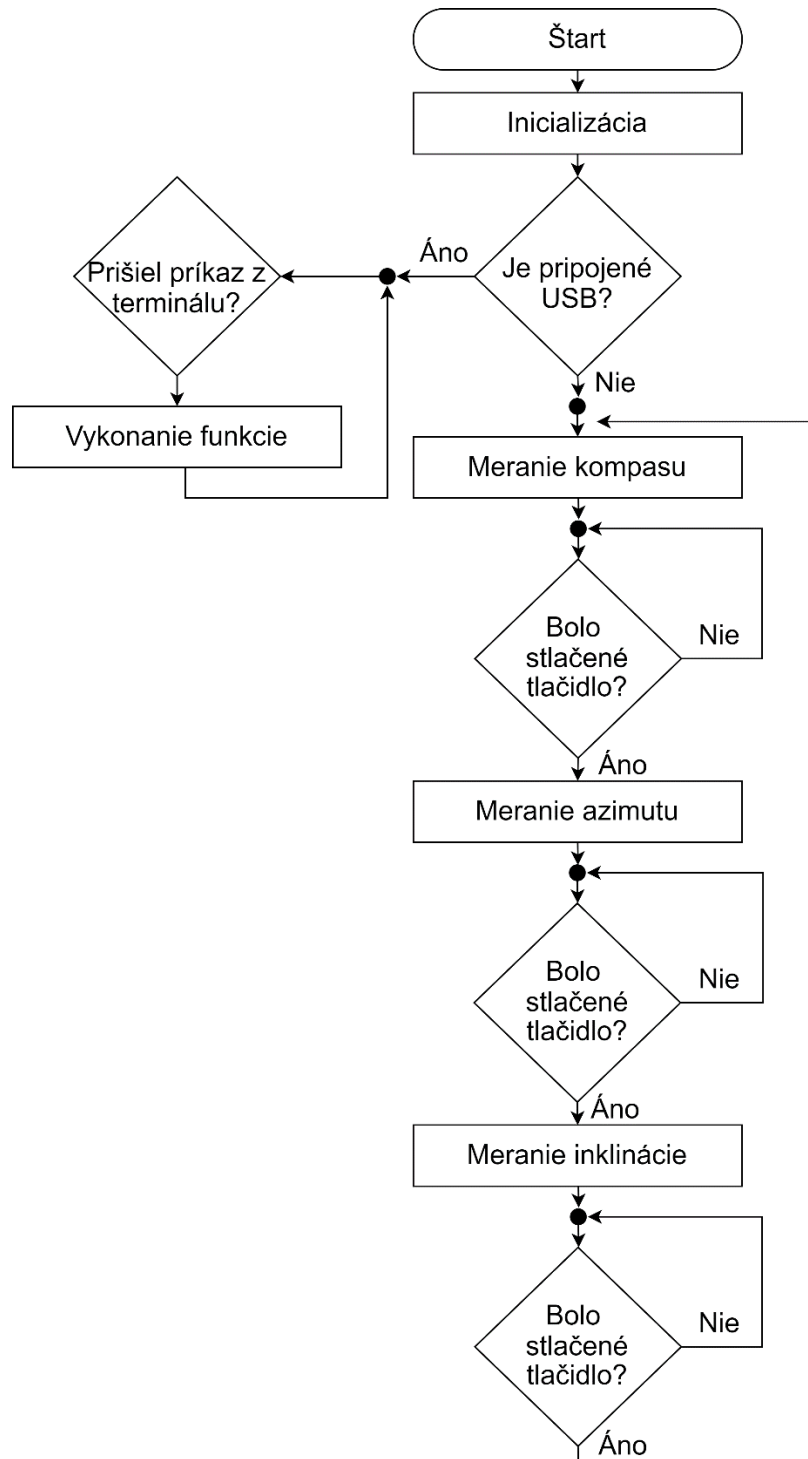
V návrhu sú použité prevažne SMD súčiastky, s výnimkou tlačidla, prepínača, konektoru na batériu a konektoru na pripojenie programátora. Prípravok obsahuje na rohoch diery pripravené na upevnenie dosky do krabičky alebo pripevnenie distančných stĺpikov.

Výsledná navrhnutá doska má tvar štvorca so stranou dlhou 30 mm. Jej výroba bola zabezpečená spoločnosťou JLCPCB. Zariadenie bolo ručne osadené a zospájkované, pričom na procesor, senzory, a pamäť bolo kvôli ich puzdrám potrebné použiť spodný ohrev.

4.2 Programové vybavenie

Ovládací program meracieho prípravku bol napísaný v jazyku C v programe MPLAB X IDE v6.00 a na kompiláciu bol aplikovaný kompilátor XC16 v1.41. Obslužný program sa nachádza v elektronickej prílohe k práci a okrem hlavného programu obsahuje aj vytvorené knižnice s príkazmi na ovládanie jednotlivých súčiastok. Jedná sa konkrétne o samostatné knižnice pre každý senzor a pamäť. Súčasťou sú knižnice vygenerované prostredím MPLAB Code Configurator v5.1.1.

Vývojový diagram obslužného programu zariadenia je na obrázku 4.3. Prevádzka zariadenia sa mierne líši podľa toho, či je prípravok pripojený na USB alebo na batériu. Ak je pripojené USB merací prípravok vykonáva príkazy zadávané do terminálu. Pri pripojení zariadenia iba k batérii sa dané meranie sa vyberá stláčaním tlačidla, pričom merania sa cyklicky prepínajú.



Obrázok 4.3 Vývojový diagram meracieho prípravku

Blok inicializácie obsahuje inicializáciu nie len procesoru a jeho periférií, ale aj inicializáciu oboch použitých magnetometrov a IMU. Tento blok sa uskutoční automaticky v prevádzke s pripojeným USB aj bez neho. Ak je pripojené USB zariadenie čaká na príkaz z terminálu, ak nie je pripojené automaticky uskutoční kalibráciu a po nej spustí meranie kompasom.

Terminálom je možné vyvolať väčšie množstvo funkcií, ktoré zároveň umožňujú väčšiu variabilitu. Nakoľko množstvo dát odoslaných do terminálu nie je obmedzené funkcie do terminálu odosielať aj priebežné hodnoty merania a nie len konečný výsledok. To umožňuje zo získaných dát vykresľovať grafy a meranie optimalizovať. Všetky dostupné funkcie sú zhrnuté v tabuľke 4.1. Vďaka funkciám v tejto podobe boli výsledky tejto práce postupne optimalizované do konečnej podoby.

Tabuľka 4.1 Príkazy zadávané do terminálu a funkcie nimi vyvolané

Zadaný príkaz	Súčiastka	Funkcia
a	MMC5633NJL	Kalibrácia skreslenia magneticky tvrdými materiálmi na 500 vzorkách
b		Kalibrácia skreslenia magneticky mäkkými materiálmi na 500 vzorkách
c		Zmeranie hodnôt skalibrovaných voči skresleniu magneticky tvrdými materiálmi na 500 vzorkách
d		Zmeranie plne skalibrovaných hodnôt na 500 vzorkách
e		Meranie kompasu
f	BM1422AGMV	Kalibrácia skreslenia magneticky tvrdými materiálmi na 500 vzorkách
g		Kalibrácia skreslenia magneticky mäkkými materiálmi na 500 vzorkách
h		Zmeranie hodnôt skalibrovaných voči skresleniu magneticky tvrdými materiálmi na 500 vzorkách
i		Zmeranie plne skalibrovaných hodnôt na 500 vzorkách
j		Meranie kompasu
k	IIM - 42652	Kalibrácia akcelerometra a gyroskopu na 500 vzorkách
l		Zmeranie plne skalibrovaných hodnôt na 500 vzorkách
m		Meranie tiltu
n		Meranie azimutu
o	EEPROM	Vyčítanie zapísaných hodnôt z celej pamäte
p		Vymazanie celej pamäte

Príkazy 'a' až 'e' prislúchajúce magnetometru MMC5633NJL, ďalej označovanom MMC, majú zhodnú funkciu ako príkazy 'f' až 'j' magnetometra BM1422AGMV, ďalej

označovanom BM. Príkazy 'k' až 'n' obsahujú funkcie na kalibráciu a meranie pomocou IMU. Posledné dve dostupné funkcie s príkazmi 'o' a 'p' sú venované práci s pamäťou. Funkcie vykonávajúce kalibráciu alebo meranie určitého počtu vzoriek sú indikované červenou LED, ktorá sa zapne tesne pre započatím merania a vypne po jeho dokončení, čo užívateľovi poskytuje informácie o aktuálnom stave.

Príkaz 'a', respektíve 'f', vyvolá funkciu kalibrácie voči skresleniu magneticky tvrdými materiálmi, v ktorej sa zmeria 500 vzoriek za čas približne 6 s. Tento typ kalibrácie vyžaduje otočiť zariadením o 360° okolo osi z, aby sa zistil offset v jednotlivých osiach, ktorý sa následne odčítava od nových meraní. Využívajú sa tu vzťahy (1.11) a (1.12). Počas merania sa do terminálu vypisujú priebežne merané hodnoty, aby sa s nimi v prípade potreby dalo pracovať. Výstupom funkcie sú zmerané offsety v jednotlivých osiach a nájdené maximá, minimá, z ktorých program offsety určil.

Kalibrácia skreslenia magneticky mäkkými materiálmi sa vyvolá príkazom 'b', respektíve 'g', ktorá funguje obdobne ako pri magneticky tvrdých materiáloch. Zariadením sa otočí o 360° za čas 6 s pričom sa zmeria 500 vzoriek, z ktorých sa určí faktor skreslenia podľa vzťahov (1.19) až (1.21) a ním sa násobia merania s vykompenzovaným offsetom. Výstupom funkcie sú priebežne merané hodnoty v jednotlivých osiach, ktoré sú v tomto bode skalibrované iba voči magneticky tvrdým materiálom, zistené minimá, maximá, ich delty a výsledné faktory skreslenia.

Funkcia s príkazom 'c', respektíve 'h', umožňuje namerať 500 nových hodnôt v jednotlivých osiach daného magnetometra a vypísať ich skalibrované voči skresleniu magneticky tvrdým materiálom. Je vhodné otočiť zariadením aspoň o 360° okolo danej osi, aby sa namerali a následne do terminálu vypísali hodnoty vo všetkých smeroch danej roviny, vďaka čomu je možné vykresliť graf čiastočne skalibrovaných hodnôt, a skontrolovať, či kalibrácia po odčítaní offsetu prebehla správne.

Správnosť kompletnej kalibrácie magnetometra je možné skontrolovať príkazmi 'd', respektíve 'i', v ktorej zariadenie meria 500 vzoriek po dobu 6 s. Do terminálu sú posielané hodnoty, ktoré skalibrované ako voči magneticky tvrdým, tak aj magneticky mäkkým materiálom. Obdobne ako vo všetkých predchádzajúcich príkazoch aj tu je vhodné otočiť prípravkom aspoň o 360° , na zaznamenanie dát z rôznych smerov danej roviny a z nich vytvoriť graf vhodného na vyhodnotenie správnosti kalibrácie.

Posledné príkazy magnetometrov 'e' a 'f' vyvolajú meranie azimutu pre dané magnetometre. Azimut je v prípade magnetometrov označovaný aj ako kompas, pretože nesie informáciu o magnetickom severe. Funkcia meria ľubovoľné množstvo dát dokiaľ sa terminálom neodošle rovnaký príkaz, ktorý meranie ukončí. Výstupom sú priebežne merané skompenzované dáta v ose x, y a výsledný azimut určený prostredníctvom vzťahu (2.12). Výsledok výpočtu je nastavený tak, aby udával hodnoty od 0° do 360° .

Kalibrácia akcelerometra a gyroskopu v IMU s názvom IIM-42652 je realizovaná po zadaní príkazu 'k' do terminálu. Obdobne ako pri magnetometroch sa nameria 500 vzoriek za čas 6 s. Počas kalibrácie je nutné aby bol prípravok v pokoji položený

na rovnej podložke s osou z smerujúcou k zemi. Výstupom funkcie sú priebežne namerané nevykompenzované hodnoty a offset v každej ose zariadenia pre akcelerometer aj gyroskop, ktorý program určí na základe výpočtov (1.4) a (1.8).

Kontrolu skalibrovaných hodnôt akcelerometra a gyroskopu umožňuje príkaz 'l', ktorý do terminálu odošle 500 vzoriek zmeraných za čas 6 s. V termináli sa vypíšu namerané hodnoty pred kalibráciou, po kalibrácii. Na konci funkcie sa vypíšu offsety pre všetky osi akcelerometra aj gyroskopu, ktoré boli zistené počas kalibrácie a s ktorými sa počas kalibrácie pracuje.

Zariadenie dokáže merať tilt s využitím hodnôt z IMU po zadaní príkazu 'm', ktorý vyvolá funkciu na meranie hodnôt, ich prepočet na tilt a vypísanie do terminálu. Meranie prebieha dovtedy, kým užívateľ znova neodošle príkaz 'm', vďaka čomu je možné merať ľubovoľnú dobu. Výstupom funkcie sú priebežne merané skompenzované hodnoty v ose x, y, z a výsledný je náklon od zvislice určený využitím výstupov akcelerometra podľa vzťahu (2.7).

Príkaz 'n' zabezpečuje meranie azimutu s využitím IMU. Meranie prebieha ľubovoľný počet cyklov, kým sa príkaz nepošle terminálom druhýkrát. Azimut je získaný obdĺžnikovou aj lichobežníkovou integráciou aplikovaním vzťahu (2.9) a (2.10) na dáta z gyroskopu. Meranie kompasu je zaistené využitím azimutu získaného magnetometrom MMC a azimutu získaného obdĺžnikovou integráciou výstupu gyroskopu v komplementárnom filtri. Terminál vypisuje najskôr kompas z komplementárneho filtra, potom azimut získaný obdĺžnikovou a nakoniec lichobežníkovou integráciou.

Pamäť EEPROM sa využíva pri napájaní zariadenia z batérie, kedy nie je dostupný terminál a získané zmerané alebo vypočítané parametre sa ukladajú do nej. Príkaz 'o' slúži na stiahnutie všetkých dát z pamäte a ich výpis. Príkaz 'p' vyvolá funkciu na zmazanie celej pamäte, aby bola pripravená na zápis nových informácií v ďalšom meraní.

Vymenované funkcie sa nepoužívajú v prevádzke bez pripojeného USB k počítaču. Prípravok vtedy umožňuje zaznamenať iba vybrané meranie popísané vo funkciách vyššie. Ide konkrétne o meranie kompasu prostredníctvom gyroskopu s magnetometrom spojených v komplementárnom filtri, azimut získaný obdĺžnikovou integráciou z výstupu gyroskopu a tilt získaný z výstupu akcelerometra. Opakovaným stláčaním tlačidla sa cyklicky prepína medzi meraniami v poradí, v akom sú vymenované a každé z nich je indikované LED inej farby.

Prevádzka s napájaním z batérie je vidieť aj vo vývojovom diagrame na obrázku 4.3. Po štarte prebehne automaticky inicializácia a nasleduje meranie. Potrebné hodnoty kalibrácií sú získané v prevádzke pri pripojenom USB k počítaču, kedy sú zavolané funkcie kalibrácií a následne je možné zistené parametre zapísať do príslušných miest v programe.

Prvým meraním po inicializácii je meranie kompasu, ktoré je indikované zelenou LED. Toto meranie sa získava kombináciou zaznamenaného azimutu z magnetometra

a gyroskopu v komplementárnom filtri. Do pamäte sa v tomto prípade ukladá informácia o odklone od severu v stupňoch, pričom sever predstavuje hodnota 180° . Meranie azimutu funguje pri otáčaní v rovine xy , čím zodpovedá funkcii kompasu.

Červená LED označuje meranie azimutu gyroskopom a nastaví sa prvým stlačením tlačidla. Meraná hodnota je získavaná iba z gyroskopu pomocou obdĺžnikovej metódy integrácie. Zaznamenáva hodnoty od 0° do 360° s tým, že na rozdiel od merania kompasom toto meranie nenesie informácie o severe.

Posledným meraním, ktoré zariadenie v tejto prevádzke umožňuje je meranie inklinácie, čiže odklonu od zvislice, indikované modrou LED a nastaví sa ďalším stlačením tlačidla. Zvislicou sa v tomto meraní vníma os z a výsledná hodnota ukladaná do pamäte predstavuje odklon práve od nej. Ak by bolo stlačené tlačidlo v tomto momente, prešlo by sa meranie do funkcie kompasu.

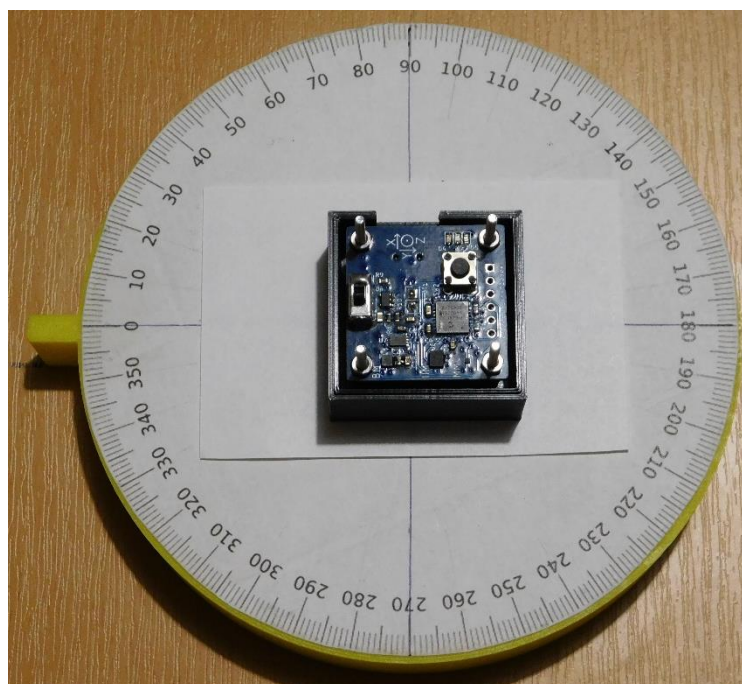
4.3 Meranie a testovanie prípravku

Táto podkapitola obsahuje informácie o oživení všetkých použitých inerciálnych senzoroch, meraní ich výstupov a testovaní ich aplikácií. Nachádza sa tu popis ich kalibrácie a výstupy z meraní zvolených druhov pohybu, konkrétne azimutu a tiltu.

Všetky merania sú podložené grafmi a nachádzajú sa tu odkazy na vzťahy z teoretickej časti, ktoré sú aplikované v obslužnom programe. Ide o výpočty, ktoré sa používajú na získanie skalibrovaných výstupov alebo konkrétny prepočet nameraných skalibrovaných hodnôt na zisťovaný tilt a azimut. V častiach venujúcim sa kalibrácii sú zobrazené grafy pred a po kalibrácii, aby bolo možné vyhodnotiť ich účinok.

Meranie prebiehalo s využitím terminálu, do ktorého boli zadávané príslušné príkazy popísané v podkapitole Programové vybavenie. Dané príkazy zabezpečili vypísanie dát použitých na vykreslenie grafov a výpočet zisťovaných číselných parametrov, ktoré sú uvedené v tabuľkách. Výpočty vychádzajú zo vzťahov uvedených v teoretickej časti a v nasledujúcich podkapitolách je na nich v príslušných častiach konkrétne odkazované.

Pri meraniach, v ktorých bolo potrebné otáčať prípravkom, bol využitý kruhový podstavec s vyznačenými stupňami, ktorý je znázornený na obrázku 4.4. Vďaka nemu bolo možné minimalizovať vplyv nerovnomerného pohybu otáčania rukou.



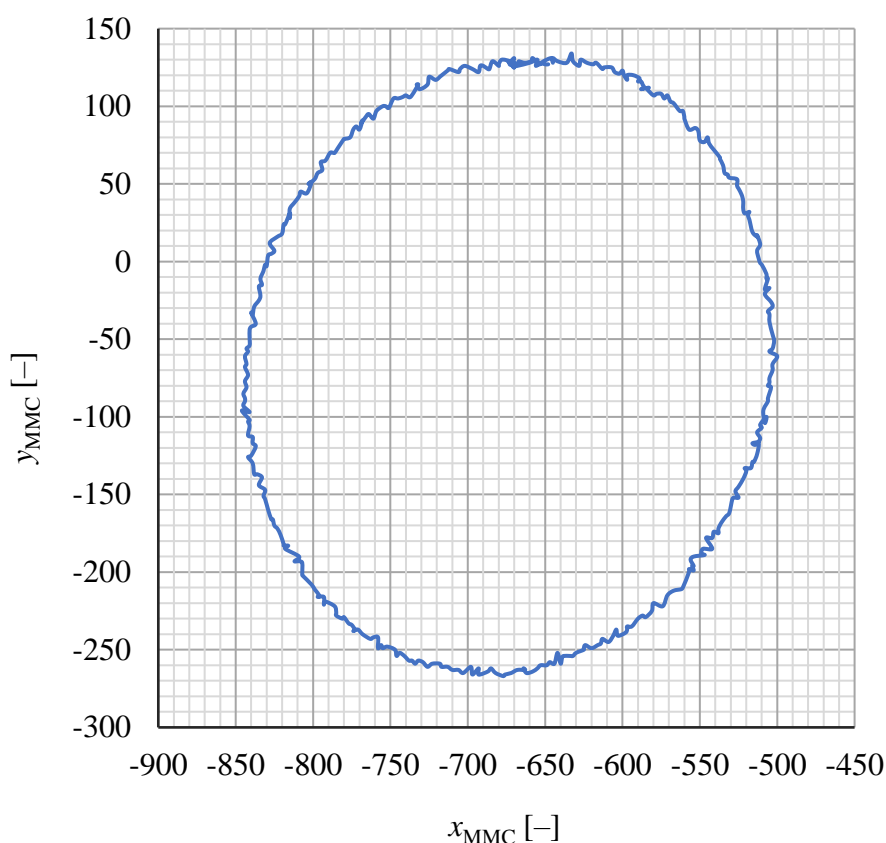
Obrázok 4.4 Kruhový podstavec na meranie otáčaním okolo osi z

Na kruhovom podstavci sú vyznačené uhly v rozsahu 0° až 360° , čo uľahčovalo kalibráciu magnetometrov, meranie azimutu a optimalizáciu niektorých meraní.

4.3.1 Kalibrácia magnetometrov

Magnetometre MMC a BM majú rovnaký spôsob kalibrácie, ktorých funkcie v programe už v práci boli popísané. Pri meraní bolo otáčané kruhovým podstavcom s pripevneným zariadením o 360° . Pre obidva použité magnetometre boli vytvorené rozmiestnenia ich výstupov pred a po kalibrácii. Offsety a faktory skreslenia magnetometrov uvedené v tabuľkách boli získané príslušnými funkciami programu, ktorý majú v sebe zaintegrované ich vypísanie.

Rozmiestnenie nameraných dát v rovine xy magnetometra MMC je vidieť na obrázku 4.5. Ide o namerané hodnoty ešte pred ich konverziou do jednotiek Gauss, v celom procese kalibrácie sa pracuje s hodnotami pred konverziou. Je zjavné, že hodnoty mali nenulový offset a rozmiestnenie malo tvar elipsy a nie požadovanej kružnice. To potvrdzuje aj maximum, minimum a offset v osiach x , y vyhodnotený programom po dokončení merania 500 hodnôt kalibrácie, ktoré sú zhrnuté v tabuľke 4.2.



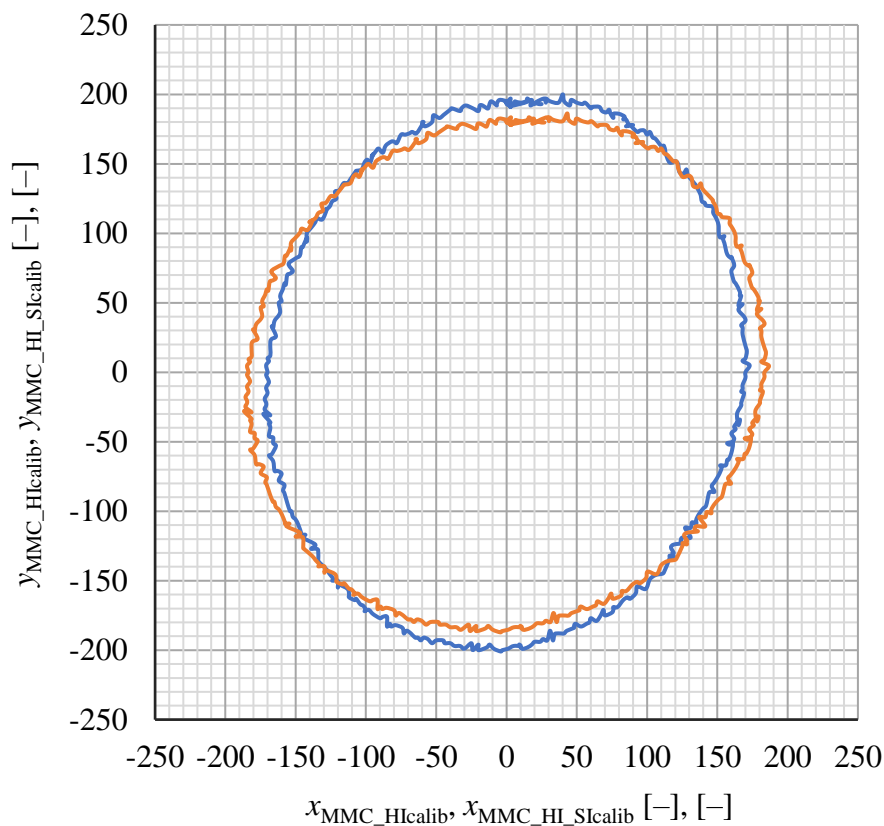
Obrázok 4.5 Rozmiestnenie nameraných hodnôt v priestore z magnetometra MMC pri otáčaní okolo osi z pred kalibráciou

Získaný offset bol vypočítaný programom podľa vzťahu (1.11) a následne bol odčítavaný od každého ďalšieho merania spôsobom, aký je napísaný vo vzťahu (1.12). Z maxima a minima je možné určiť, že ich vzdialenosť bola v ose y väčšia ako v ose x , pričom toto elipsovité rozloženie hodnôt potvrdzuje aj obrázok 4.5.

Tabuľka 4.2 Parametre merania magnetometrom MMC na kalibráciu skreslenia magneticky tvrdými materiálmi

	x [-]	y [-]
Maximum	-500	134
Minimum	-846	-267
Vzdialenosť	346	401
Offset	-673	-66

Rozmiestnenie merania v rovine xy po kompenzácii skreslenia magneticky tvrdými materiálmi, označených ako x_{MMC_Hcalib} , je vykreslené na obrázku 4.6 (modrá). Je vidieť, že rozmiestnenie malo stred v nule, ale nezmenil sa jeho elipsový tvar. Preto nasledovala kompenzácia skreslenia magneticky mäkkými materiálmi, ktorej výsledné rozloženie je na tom istom obrázku vykreslené oranžovou farbou.



Obrázok 4.6 Rozmiestnenie hodnôt v priestore z magnetometra MMC pri otáčaní okolo osi z po kalibrácii skreslenia magneticky tvrdými materiálmi (modrá závislosť) a po kompletnej kalibrácii (oranžová závislosť)

Čiastočne skompenzované hodnoty boli použité na vykompenzovanie skreslenia magneticky mäkkými materiálmi pomocou vzťahov (1.19) až (1.21). Z nich sa určil faktor skreslenia, ktorý je spolu s maximom, minimom čiastočne vykompenzovaných hodnôt a ich rozdielom v osiach x , y zapísaný v tabuľke 4.3.

Tabuľka 4.3 Parametre merania magnetometrom MMC na kalibráciu skreslenia magneticky mäkkými materiálmi

	x [-]	y [-]
Maximum	173	200
Minimum	-173	-201
Vzdialenosť	346	401
Faktor skreslenia	1,0748	0,9314

Faktor skreslenia využil program vo vzťahu (1.22), ktorým sa prepočítavajú všetky nové hodnoty, aby boli kompletne skalibrované. Z maxím a miním z tabuľky 4.3, ako aj z kompletne vykompenzovaného rozloženia, označeného ako $x_{MMC_HI_Sscalib}$, (oranžová na obrázku 4.6) je evidentné, že rozloženie nadobudlo požadovaný kružnicový priebeh

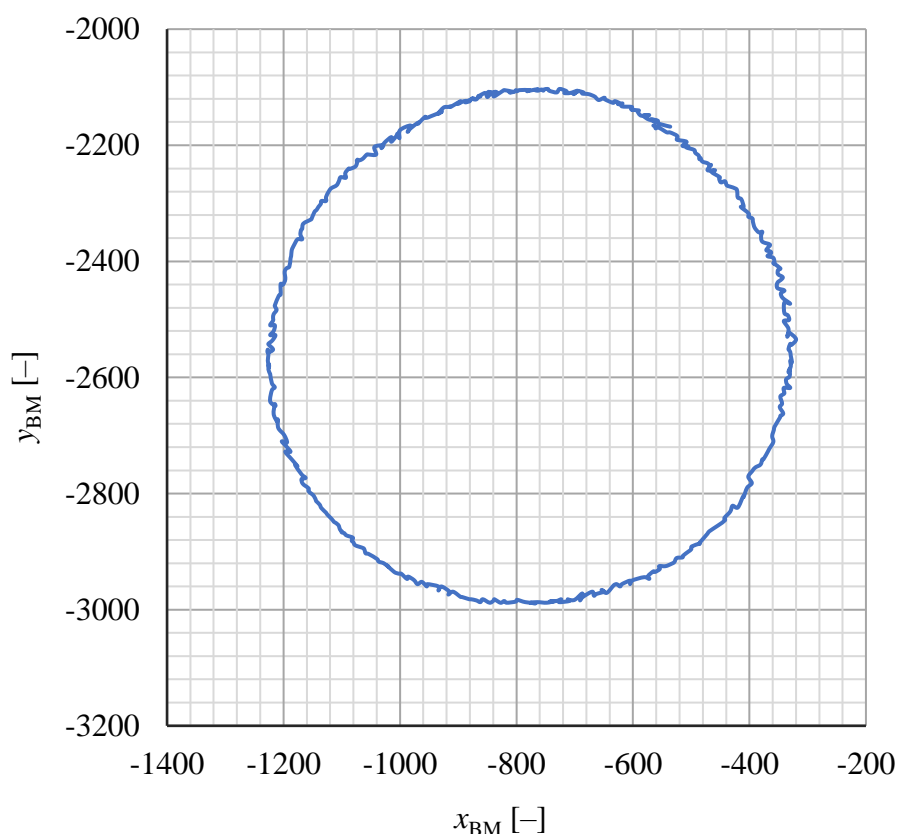
a má stred v nule. To potvrdzujú aj hodnoty v tabuľke 4.4 získané programom počas kalibrácie skreslenia magneticky mäkkých materiálov.

Tabuľka 4.4 Parametre merania magnetometrom MMC po dokončení kalibrácie

	x [-]	y [-]
Max	186,75	186,28
Min	-186,75	-187,22
Vzdialenosť	373,50	373,50
Stred	0	-0,47

Po dokončení kalibrácie bol stred rozloženia takmer v nule a vzdialenosť maxima od minima bol pre obidve osi rovnaký. Z toho vyplýva, že kalibrácia úspešne dosiahla požadovaný cieľ.

Rovnaký postup kalibrácie bol aplikovaný aj na magnetometer BM, pričom aj v tomto prípade sú všetky uvedené hodnoty a grafy pred prevodom do jednotiek Gauss. Prevod sa v programe aplikuje vždy až po uskutočnení kalibrácie pri nasledujúcich meraniach. Na obrázku 4.7 sú namerané hodnoty magnetometrom BM pred kalibráciou, ktoré vyšli, rovnako ako v prípade MMC, s nenulovým offsetom. Rozdielom bol však tvar rozloženia, ktorý vyšiel v tomto konkrétnom meraní kružnicový.



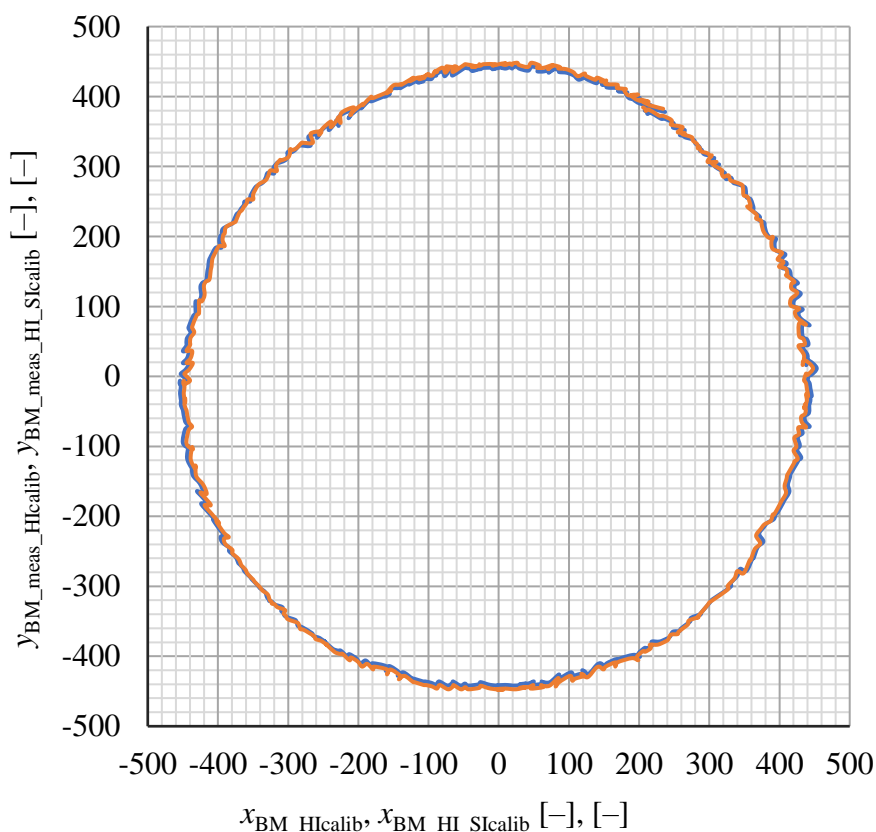
Obrázok 4.7 Rozmiestnenie nameraných hodnôt v priestore z magnetometra BM pri otáčaní okolo osi z pred kalibráciou

Programom zistený offset podľa vzťahu (1.11), maximum, minimum a ich vzdialenosť v osiach x a y sú zhrnuté v tabuľke 4.5. Rozdiel vzdialeností pre osi x a y bol vzhľadom na namerané hodnoty minimálny, vplyvom čoho sa rozloženie javí kružnicové.

Tabuľka 4.5 Parametre merania magnetometrom BM na kalibráciu skreslenia magneticky tvrdými materiálmi

	x [-]	y [-]
Maximum	-320	-2103
Minimum	-1227	-2989
Vzdialenosť'	907	886
Offset	-773	-2546

Rozmiestnenie merania v rovine xy po kompenzácii skreslenia magneticky tvrdými materiálmi, označených ako $x_{BM_HIcalib}$, je vykreslené na obrázku 4.8 (modrá). Rozmiestnenie malo stred v nule a už v tomto bode sa javilo dostatočne kružnicovo. Napriek tomu nasledovala kompenzácia skreslenia magneticky mäkkými materiálmi, ktorej výsledné rozloženie je na tom istom obrázku vykreslené oranžovou farbou.



Obrázok 4.8 Rozmiestnenie hodnôt v priestore z magnetometra BM pri otáčaní okolo osi z po kalibrácii skreslenia magneticky tvrdými materiálmi (modrá závislosť) a po kompletnej kalibrácii (oranžová závislosť)

Rovnako ako pri magnetometri MMC boli čiastočne skompenzované hodnoty použité na vykompenzovanie skreslenia magneticky mäkkými materiálmi pomocou vzťahov (1.19) až (1.21). Následne programom vypočítaný faktor skreslenia je spolu s maximom, minimom čiastočne vykompenzovaných hodnôt a ich rozdielom v osiach x , y zapísaný v tabuľke 4.6.

Tabuľka 4.6 Parametre merania magnetometrom BM na kalibráciu skreslenia magneticky mäkkými materiálmi

	x [-]	y [-]
Maximum	453	443
Minimum	-454	-443
Vzdialenosť	907	886
Faktor skreslenia	0,9884	1,0119

Faktor skreslenia pre obidve osi je blízky 1, takže kompenzácia ním mala pomerne malý účinok. Tento fakt iba potvrdzuje znanie, že rozmiestnenie bolo už od počiatku kružnicové. Kompletne vykompenzované rozloženie, označeného ako $x_{BM_HI_Sscalib}$, (oranžová na obrázku 4.8) nadobudlo po kalibrácii stred v nule a malo kružnicové rozmiestnenie zmeraných hodnôt. To potvrdzujú aj hodnoty v tabuľke 4.7 získané programom po dokončení kalibrácie skreslenia magneticky mäkkých materiálov.

Tabuľka 4.7 Parametre merania magnetometrom BM po dokončení kalibrácie

	x [-]	y [-]
Max	447,76	448,25
Min	-448,74	-448,25
Vzdialenosť	896,50	896,50
Stred	-0,99	0

Po dokončení kalibrácie v prípade magnetometra BM bol stred rozloženia takmer v nule a vzdialenosť maxima od minima bol pre obidve osi totožný. Kalibrácia prebehla úspešne na obidva aplikované magnetometre.

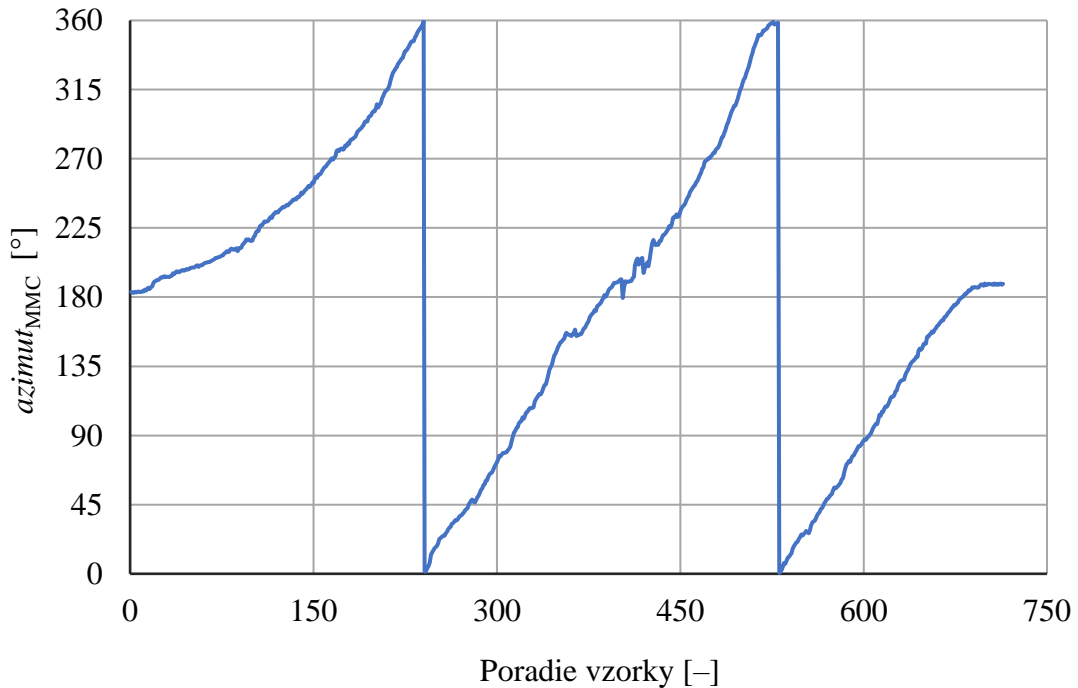
4.3.2 Testovanie merania azimutu magnetometrami

Na meranie azimutu akcelerometrami sa používal kruhový podstavec predstavený na obrázku 4.4 a na výpočet sa využil vzťah (2.12), ktorý bol implementovaný do programu.. Pri meraní sa otáčalo okolo osi z prípravku a pri výpočtoch sa využívali skalibrované hodnoty merania. Výstup bol nastavený tak, aby výsledný uhol bol v rozsahu 0° až 360° a sever predstavoval uhol 180° . Takto boli nastavené všetky merania magnetického azimutu v praktickej časti.

Na obidva magnetometre boli aplikované dve rôzne merania. Prvým bolo pomalé plynulé točenie okolo osi z , pričom sa opísali dve kružnice a sledovalo sa ako na meranie reaguje daný magnetometer. Začínalo sa na severe a predpokladom bolo, že pri pomalom

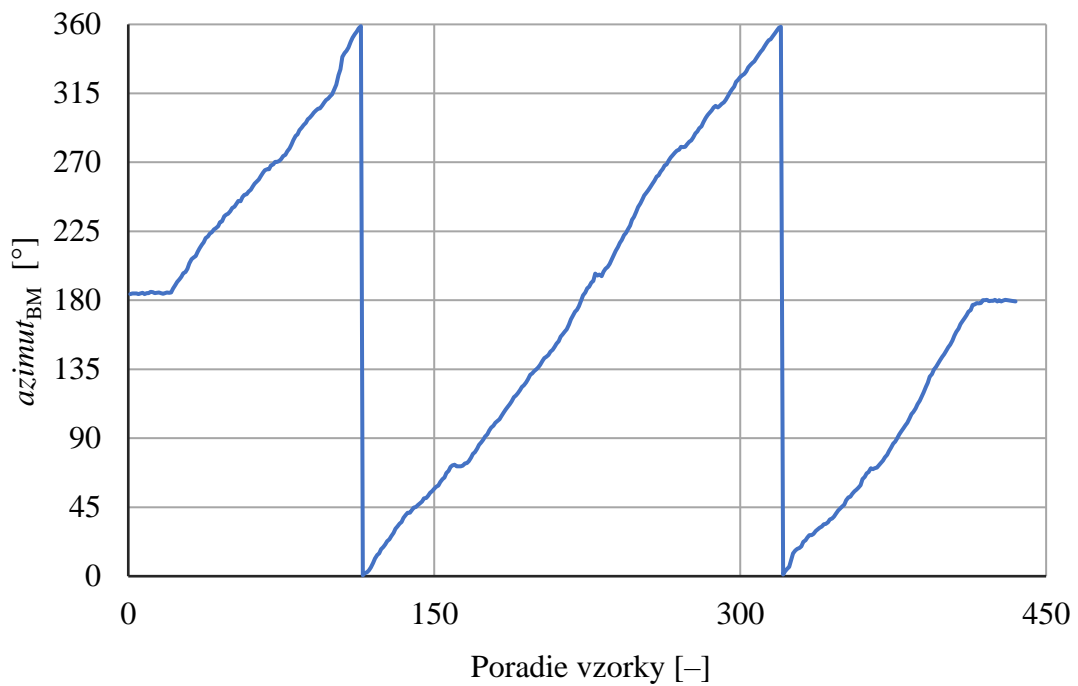
otáčaní magnetometer skončí v rovnakej polohe, v ktorej začal. Týmto meraním sa zároveň overovalo, či sa magnetometer preklápa v požadovanej polohe.

Magnetometrom MMC sa pri pomalom otáčaní zaznamenalo cez 700 vzoriek. Zaznamenané uhly sú vykreslené na obrázku **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.** a je z nich vidieť, že uhol pomerne plynule narastal od počiatočných 180° (sever) na 360° (juh), pri ktorom sa preklopil do uhlu 0° . Je zjavné, že magnetometer zaznamenával uhly adekvátne a jeho základná funkcionálna bola správna.



Obrázok 4.9 Meranie azimutu magnetometrom MMC pri pomalom otáčaní

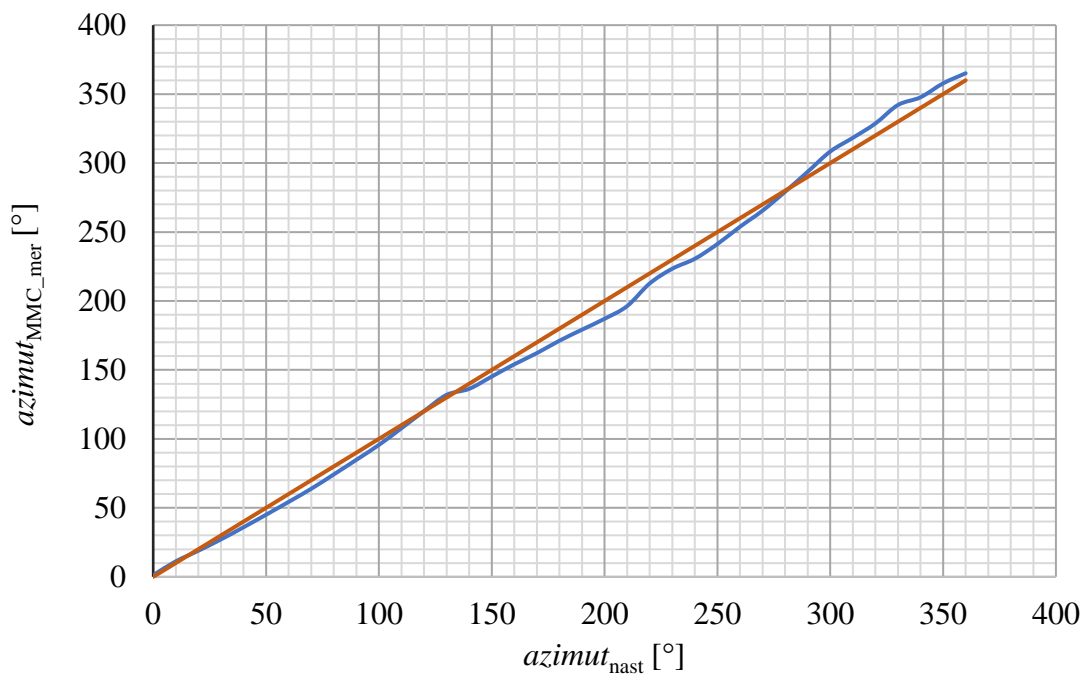
Pri pomalom otáčaní prípravku sa magnetometrom BM zaznamenalo cez 400 vzoriek. Jeho otáčanie bolo teda rýchlejšie ako otáčanie magnetometrom MMC, ale z obrázku **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.** plynule, že zaznamenávanie prebehlo korektné. Azimut plynulo rástol z 180° (sever) do uhlu 360° (juh), kde sa bez problémov a zákmitov preklopil do 0° .



Obrázok 4.10 Meranie azimutu magnetometrom BM pri pomalom otáčaní

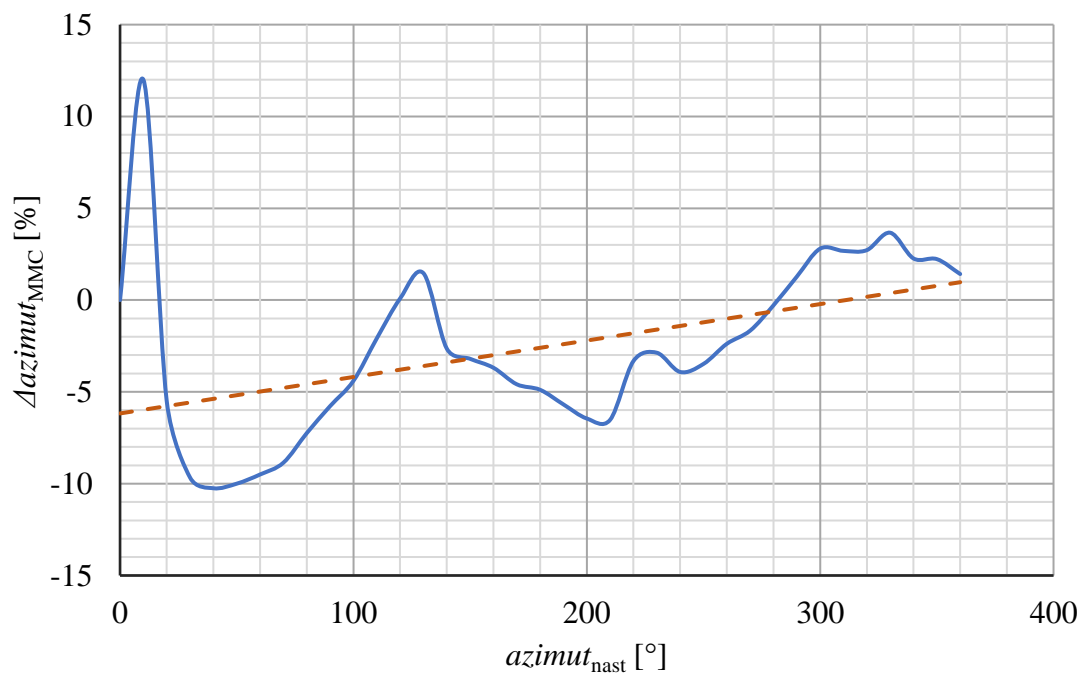
Základná funkcia oboch magnetometrov bol zmieneným meraním overená a bolo možné pristúpiť k meraniu chyby obidvoch magnetometrov. V tomto meraní sa prípravok nastavoval do uhlov v rozsahu od 0° do 360° s krokom 10° podľa kruhového podstavca a uhlov na ňom vyznačených. V nastavených uhloch sa odčítaval zmeraný azimut a následne sa porovnal s teoretickou hodnotou.

Magnetometer MMC má zmerané uhly $azimut_{MMC_mer}$ vykreslené v závislosti na nastavovanom uhle $azimut_{nast}$ na obrázku 4.11 modrou. Oranžový priebeh predstavuje ideálnu závislosť, ktorá mala byť dosiahnutá



Obrázok 4.11 Závislosť zmeranej hodnoty uhlu azimutu magnetometrom MMC na nastavovanom uhle

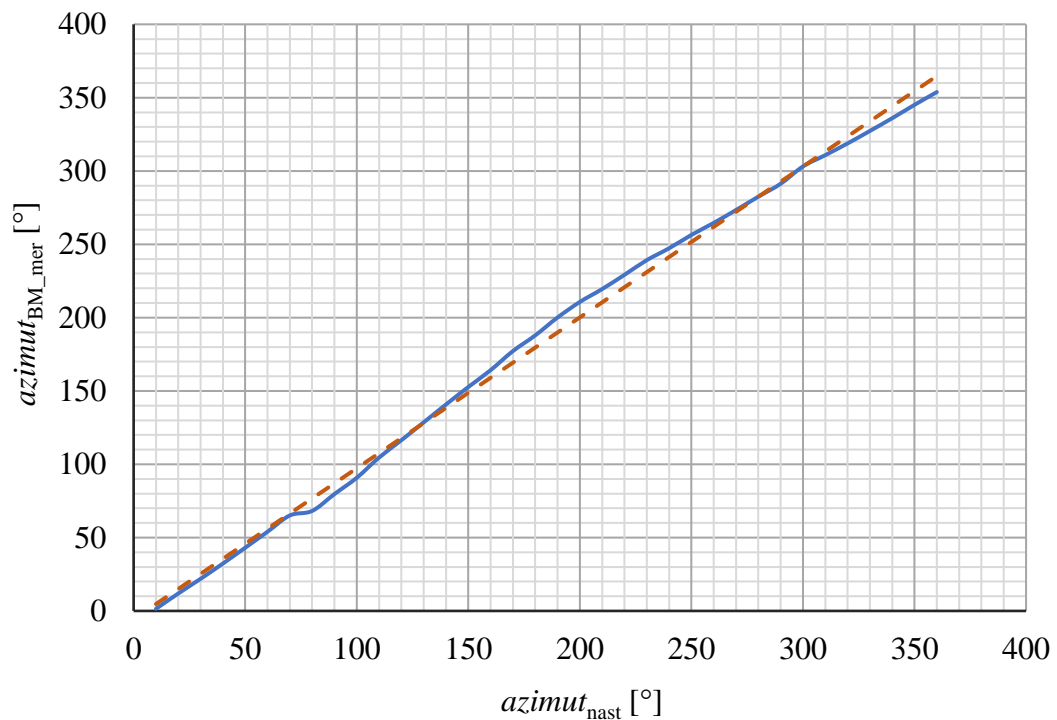
Na základe zmeraných hodnôt azimutu bola určená relatívna odchýlka merania $\Delta azimut_{MMC}$. Jej závislosť na nastavovanom uhle azimutu je znázornená na obrázku 4.12 modrou farbou. Oranžovou farbou je zobrazený lineárny trend relatívnej odchýlky.



Obrázok 4.12 Závislosť relatívnej odchýlky azimutu magnetometra MMC na nastavovanom uhle

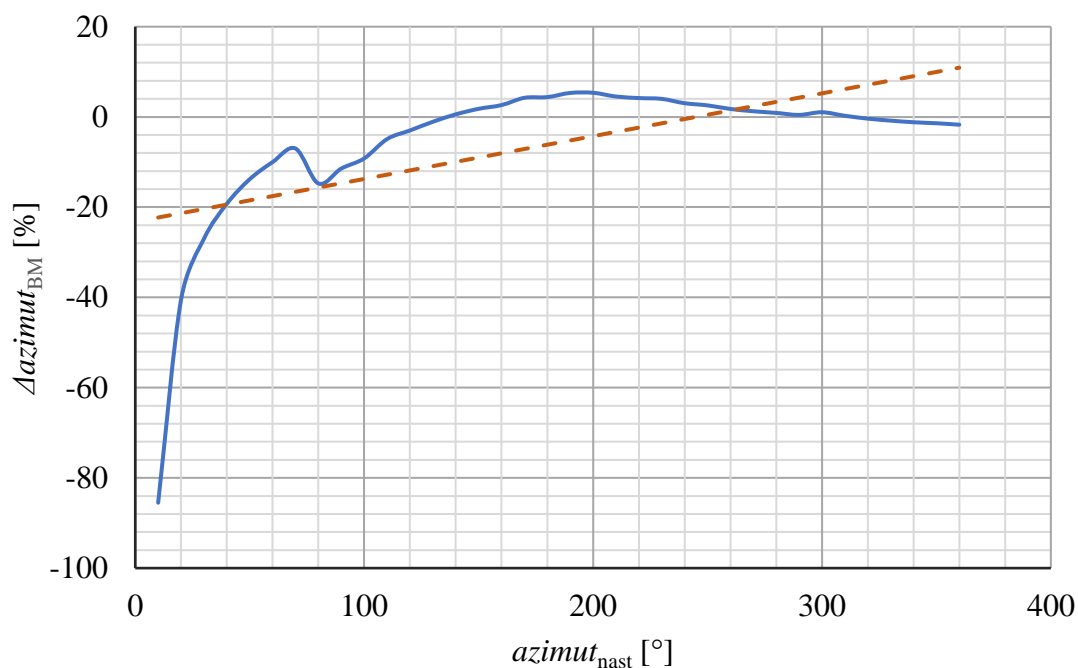
Z obrázku 4.12 je evidentné, že meranie azimutu magnetometrom MMC dosiahlo relatívnu odchýlku maximálne 12 %. Najväčšie odchýlky od nastavovanej hodnoty sa vyskytli na začiatku rozsahu merania a chyba sa postupne zmenšila. Je teda zjavné, že s rastúcim uhlom chyba meranie klesala. Priemerná relatívna odchýlka dosiahla hodnotu 2,6 %.

Závislosť zmeraných uhlov $azimut_{BM_mer}$ na nastavovanom uhle $azimut_{nast}$ sa nachádza na obrázku 4.13 vykreslená modrou farbou. Oranžový priebeh predstavuje ideálny priebeh nameraných uhlov.



Obrázok 4.13 Závislosť zmeranej hodnoty uhlu azimutu magnetometrom BM na nastavovanom uhle

Rovnako ako pri magnetometri MMC aj pri magnetometri BM bola na základe zmeraných hodnôt azimutu vyhodnotená relatívna odchýlka merania $\Delta azimut_{BM}$. Jej závislosť na nastavovanom uhle azimutu je na obrázku 4.14 modrou farbou. Lineárny trend relatívnej odchýlky je znázornený oranžovou farbou.

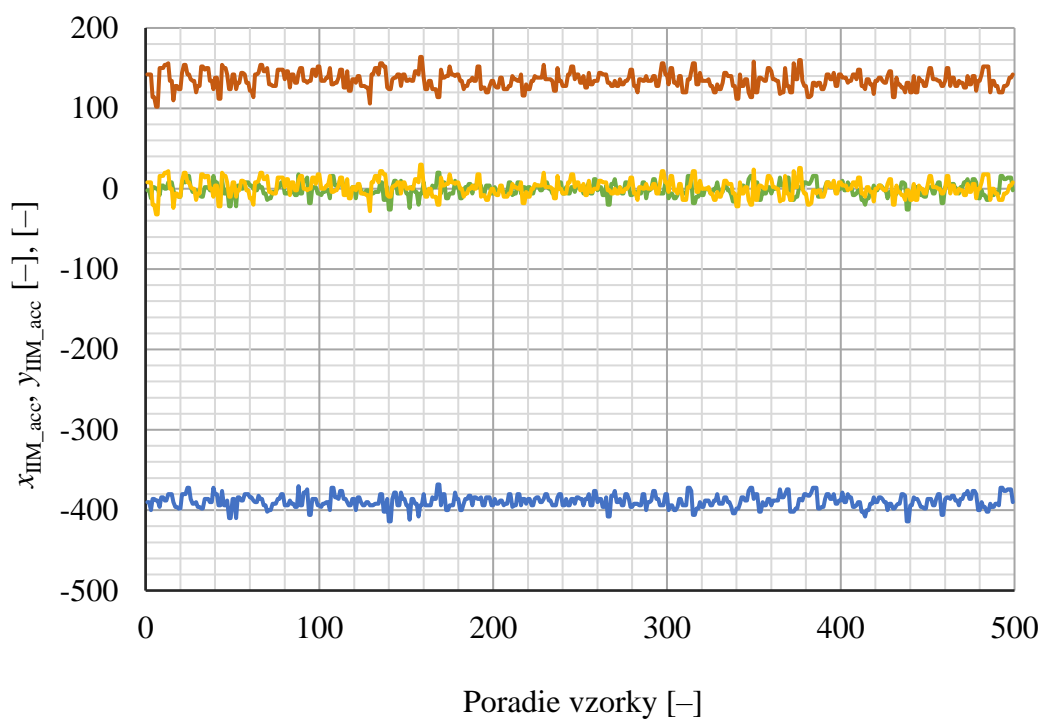


Obrázok 4.14 Závislosť relatívnej odchýlky azimutu magnetometra BM na nastavovanom uhle

Meranie azimutu magnetometrom BM dosiahlo na základe vyhodnotení relatívnu odchýlku maximálne -85% a tú dosiahlo obdobne ako MMC na začiatku rozsahu merania. Postupne však s rastúcim nastavovaným uhlom klesala. Priemerná hodnota relatívnej odchýlky vyšla $-5,5\%$. Spojnica trendu mala pri magnetometri BM vyššiu strmosť ako pri magnetometri MMC. Zo všetkých uvedených údajov vychádza, že magnetometer MMC by mal byť na rozsahu merania od 0° do 360° presnejší.

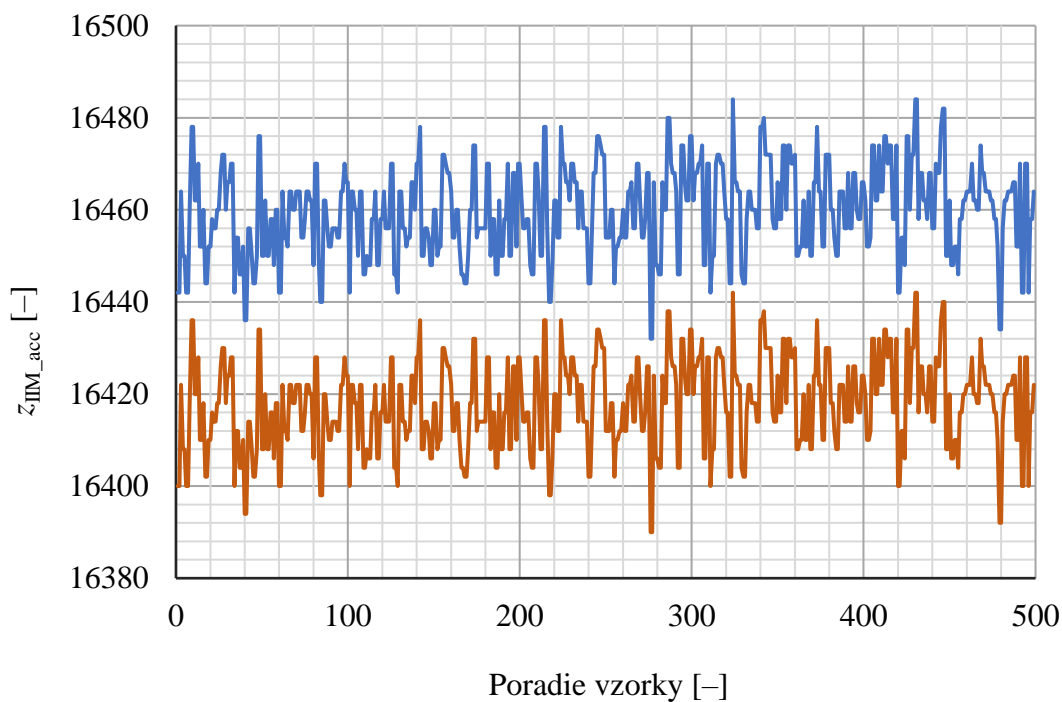
4.3.3 Kalibrácia akcelerometra a gyroskopu

Kalibrácia akcelerometra a gyroskopu prebiehala simultánne zmeraním 500 vzoriek pri nehybnom stave zariadenia. Pri kalibrácii sa určoval aritmetický priemer z nameraných vzoriek a týmto spôsobom sa určil offset. Kompenzácia akcelerometra sa riadila vzťahom (1.5). Na obrázku 4.15 sú vidieť zmerané hodnoty výstupu z akcelerometra pred kompenzáciou pre osi x (modrý priebeh), y (oranžový priebeh) a po ich kompenzácii pre osi x (zelený priebeh), y (žltý priebeh).



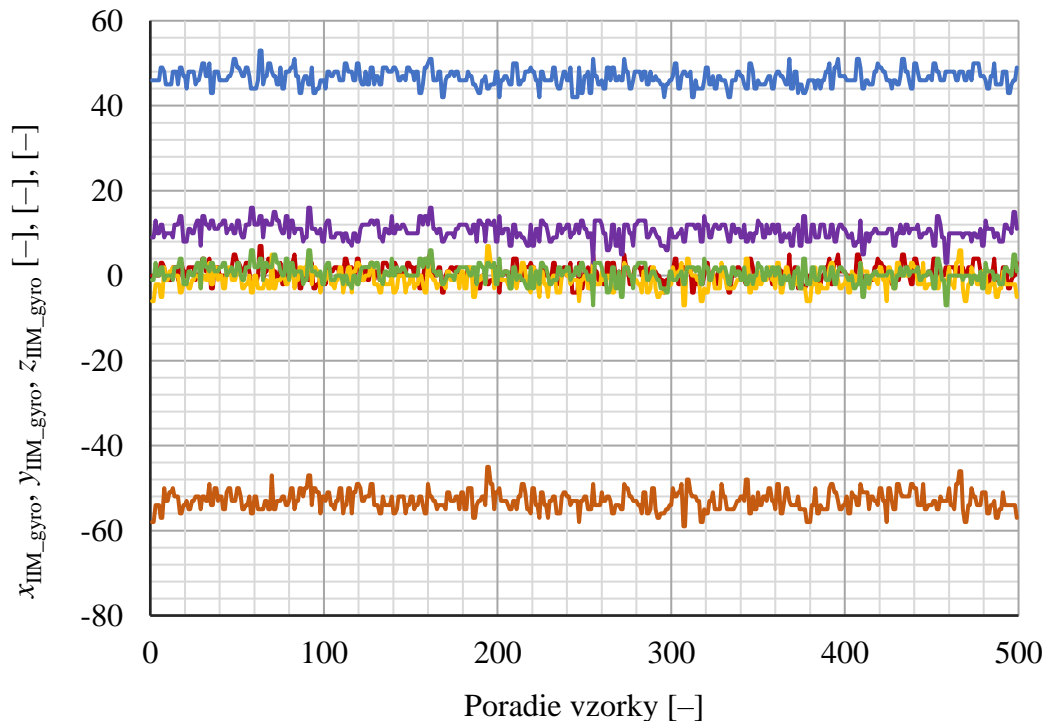
Obrázok 4.15 Zmerané a vykompenzované hodnoty akcelerometra pre osi x a y

Nakoľko os z akcelerometra snímala tiažové zrýchlenie je vhodnejšie namerané hodnoty pred kompenzáciou a po kompenzácií vyčleniť do samostatného grafu. Na obrázku 4.16 je modrou farbou priebeh pred kalibráciou a oranžovou po nej.



Obrázok 4.16 Zmerané a vykompenzované hodnoty akcelerometra pre osi z

Obrázok 4.17 obsahuje namerané hodnoty gyroskopu pred kalibráciou pre osi x (modrý priebeh), y (oranžový priebeh), z (fialový priebeh) a po kompenzácii pre osi x (červený priebeh), y (žltý priebeh), z (zelený priebeh).



Obrázok 4.17 Zmerané a vykompenzované hodnoty gyroskopu pre osi x , y , z

Programom získané hodnoty offsetov pre všetky osi akcelerometra a gyroskopu sú zhrnuté v tabuľke

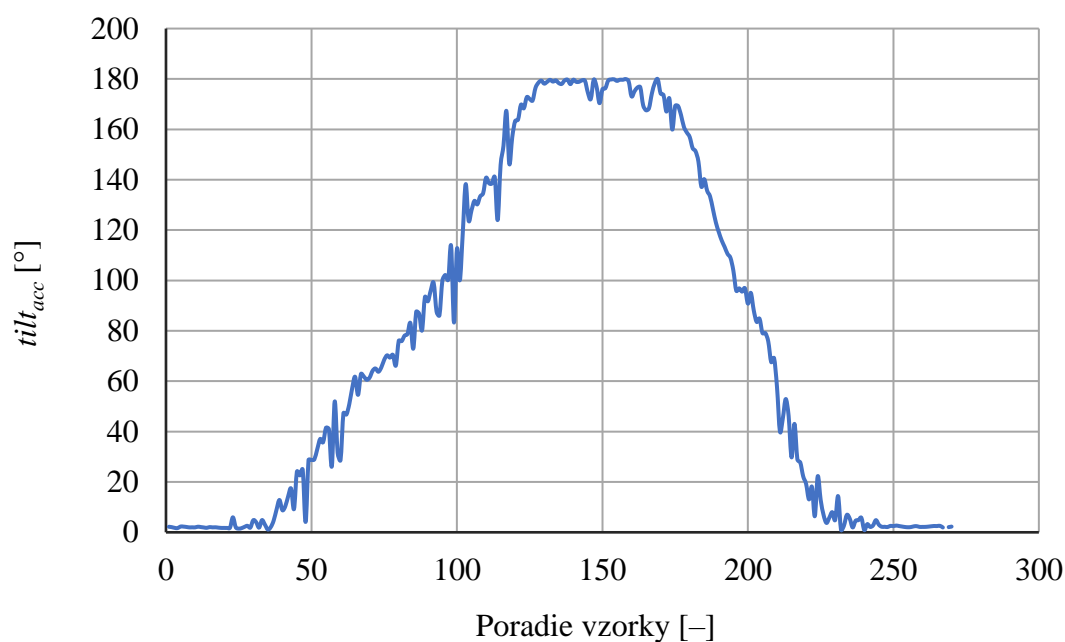
Tabuľka 4.8 Hodnoty offsetu akcelerometra a gyroskopu pre osi x , y , z

Offset	x [-]	y [-]	z [-]
Akcelerometer	-388	134	16459
Gyroskop	46	-52	10

Z uvedených priebehov pred kompenzáciou a po nej je evidentné, že prebehla úspešne, všetky osi akcelerometra aj gyroskopu sú vhodne skompenzované a zariadenie je pripravené na meranie.

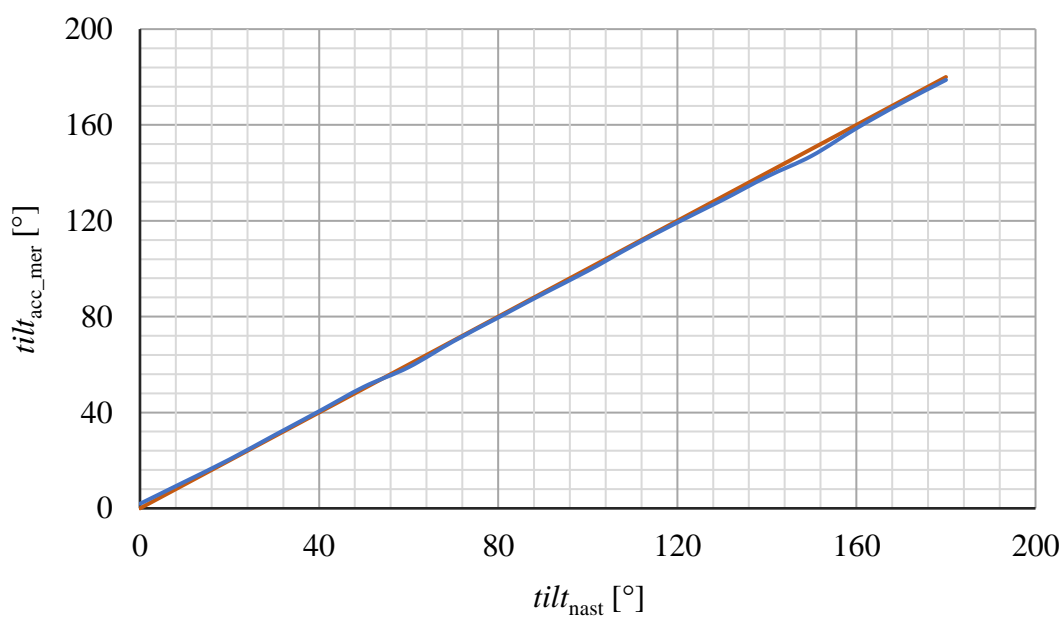
4.3.4 Testovanie merania inklinácie

Na určenie inklinácie bol do programu aplikovaný vzťah (2.7), ktorý udáva odklon od osi z . Pri testovaní funkčnosti merania bolo zariadením otočené o 360° a boli zaznamenávané hodnoty tiltu. Tento priebeh je vidieť na obrázku 4.18 a je zjavné, že meranie je správne, pretože merané hodnoty rástli z nulového odklonu po maximálny tilt 180° , a potom znova klesli na 0° , ako sa zariadenie vracalo do počiatočnej polohy.



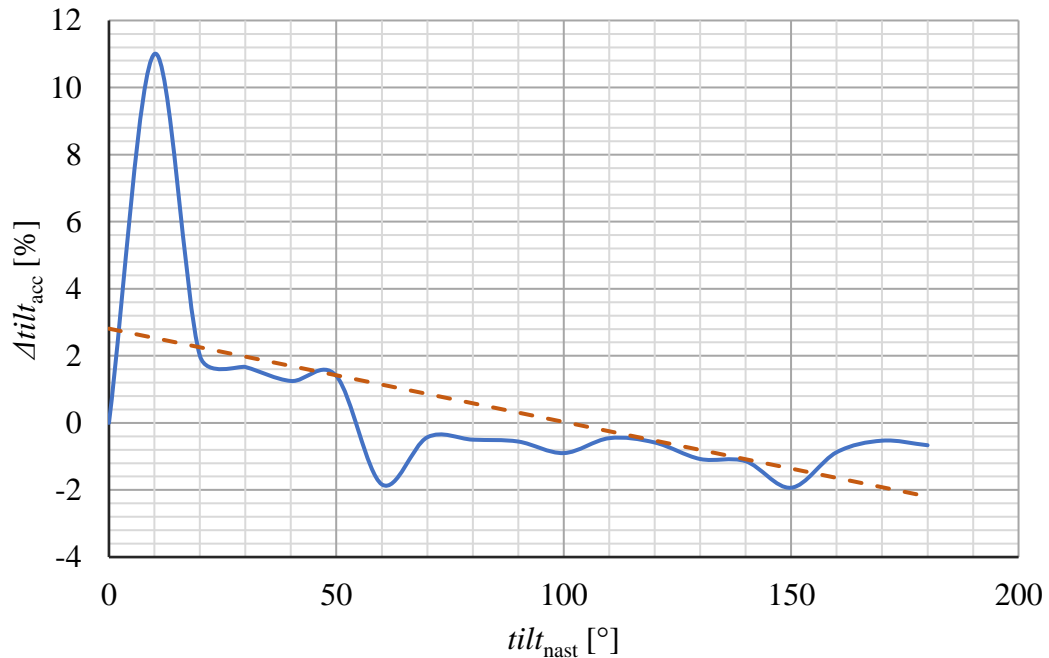
Obrázok 4.18 Meranie tiltu akcelerometrom pri odklone od osi z

Po overení funkčnosti merania bola, podobne ako pri meraní azimutu, otestovaná presnosť merania. Prípravkom sa otáčalo v rozsahu 0° až 180° s krokom 10° a odčítavali sa namerané hodnoty. Pri meraní bol použitý kruhový podstavec, ktorý bol postavený zvislo a podľa uhlov na ňom bolo zariadením natáčané. Výsledná závislosť inklinácie $tilt_{acc_mer}$ na nastavovanom odklone $tilt_{nast}$ sa nachádza na obrázku 4.19 vyznačená modrou farbou a oranžovou farbou je naznačený ideálny priebeh tiltu.



Obrázok 4.19 Závislosť zmeranej hodnoty uhlu tiltu akcelerometrom na nastavovanom uhle

Na základe zmeraných hodnôt tiltu bola vyhodnotená relatívna odchýlka merania $\Delta tilt_{acc}$. Jej závislosť na nastavovanom uhle azimutu je na obrázku 4.20 vyznačená modrou farbou. Závislosť trendu relatívnej odchýlky je znázornená oranžovou farbou.

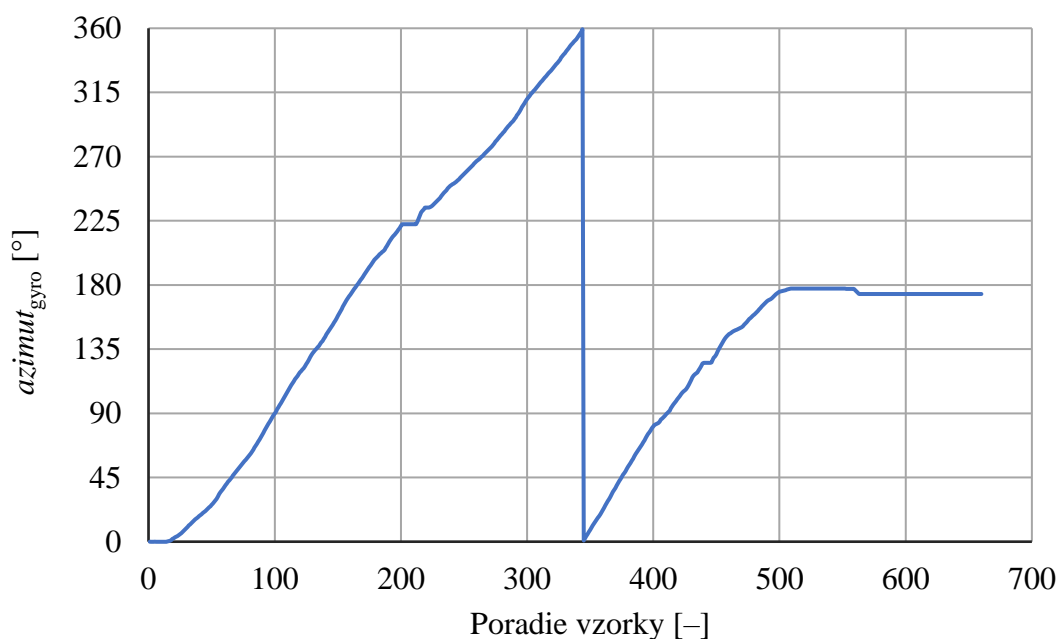


Obrázok 4.20 Závislosť relatívnej odchýlky tiltu na nastavovanom uhle

Meranie tiltu akcelerometrom malo relatívnu odchýlku maximálne 11 %, pričom túto hodnotu dosiahol na začiatku rozsahu merania. S rastúcim nastavovaným uhlom odklonu postupne klesala. Priemerná hodnota relatívnej odchýlky vyšla 0,15 %, z čoho je evidentné, že meranie bolo značne presné.

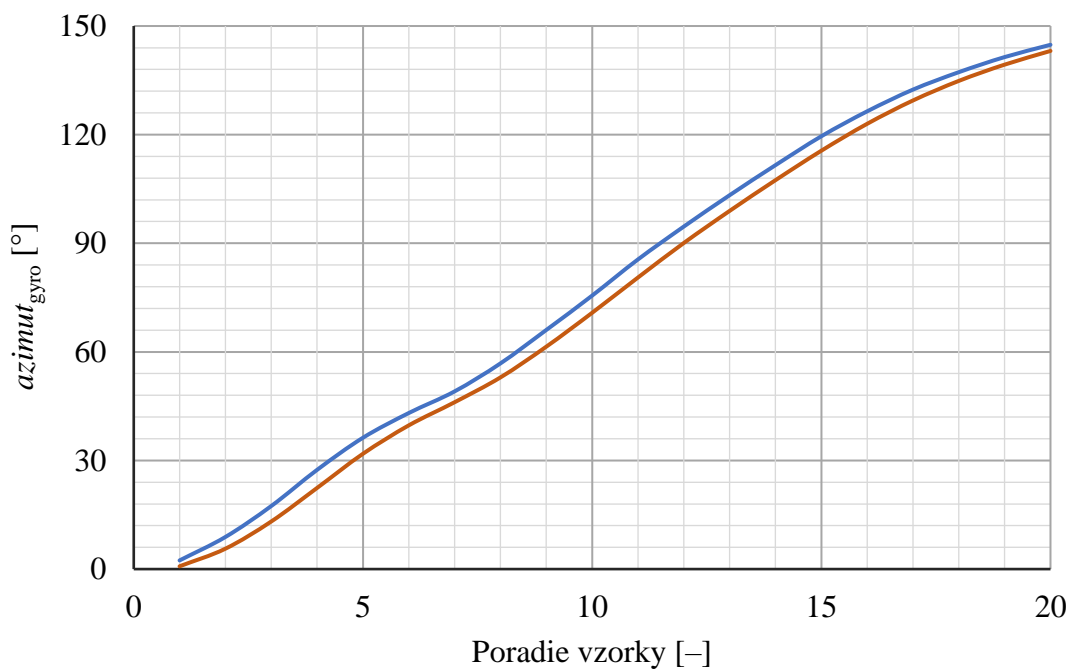
4.3.5 Testovanie merania azimutu gyroskopom

Meranie azimutu gyroskopom bolo do programu zaintegrované dvomi metódami, a to prostredníctvom obdĺžnikovej a lichobežníkovej metódy integrácie vychádzajúcimi zo vzťahov (2.9), respektíve (2.10). Správna funkčnosť merania azimutu gyroskopom bola overená otočením o 1,5 otáčky na kruhovom podstavci a priebeh zmeny azimutu sa nachádza na obrázku 4.21. Azimut správne narastá od 0° do 360°, kedy sa preklopí do 0° a narastá znova.



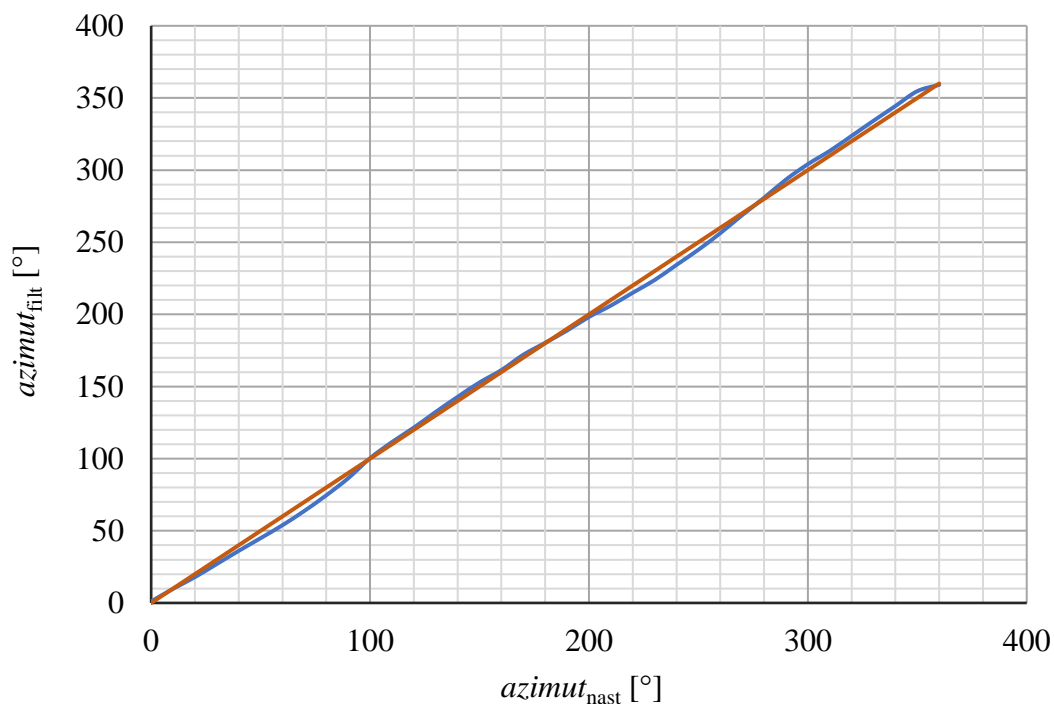
Obrázok 4.21 Meranie azimutu gyroskopom otáčaním okolo osi z

Pri uvedenom meraní nebolo možné vidieť rozdiel medzi jednotlivými metódami integrácie, pretože otáčanie bolo pomalé. Bol preto zmeraný azimut pri rýchlom natočení, ktorý je vidieť na obrázku 4.22 modrou farbou pre obdĺžnikovú metódu a oranžovou lichobežníkovú metódu integrácie. Prípravok sa využíva prevažne na pomalé pohyby, takže obdĺžniková metóda je v tomto prípade dostatočujúca.



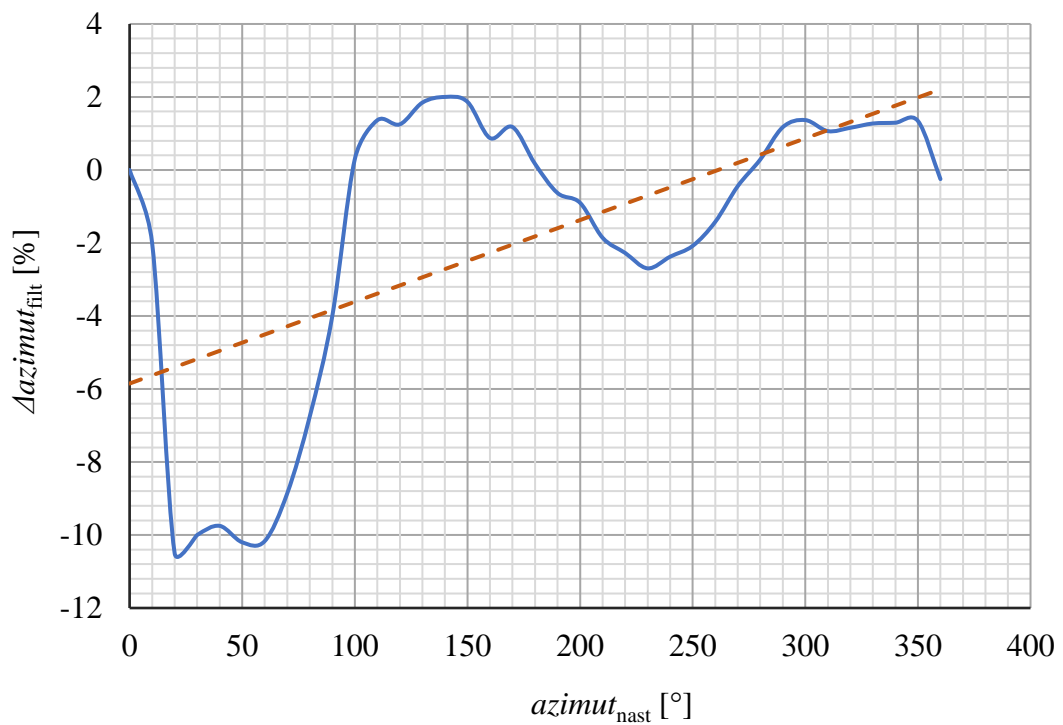
Obrázok 4.22 Meranie azimutu gyroskopom pri rýchlom otočení

Nasledujúcim krokom bolo spojenie magnetometra MMC a gyroskopu v komplementárnom filtri. V ňom sa na rýchle signály použil gyroskop a na pomalé magnetometer. Takýmto spôsobom sa zabezpečilo, že magnetický azimut dokáže byť zmeraný s dostatočnou presnosťou pri pomalých aj rýchlych zmenách. Závislosť uhlu azimutu $azimut_{filt_mer}$ na nastavovanom uhle $azimut_{nast}$ je na obrázku 4.23 modrou. Oranžový priebeh predstavuje ideálnu závislosť, ktorá mala byť dosiahnutá



Obrázok 4.23 Závislosť zmeranej hodnoty uhlu azimutu magnetometrom MMC na nastavovanom uhle

Zo zmeraných hodnôt azimutu bola určená relatívna odchýlka merania $\Delta azimut_{filt}$. Jej závislosť na nastavovanom uhle azimutu je vykreslená na obrázku 4.24 modrou farbou. Oranžový priebeh znázorňuje lineárny trend relatívnej odchýlky.



Obrázok 4.24 Závislosť relatívnej odchýlky azimutu magnetometra MMC na nastavovanom uhle

Maximálna relatívny odchýlka meranie azimutu s aplikáciou komplementárneho filtra bola približne -11% a bola dosiahnutá na začiatku rozsahu merania. S rastúcim nastavovaným uhlom klesala. Priemerná hodnota relatívnej odchýlky vyšla $-1,8\%$, čo znamená, že vďaka komplementárnemu filtru bola dosiahnutá lepšia presnosť merania magnetického azimutu ako použitím samostatného magnetometra.

ZÁVER

V rámci diplomovej práce bola preštudovaná rozsiahla problematika merania určitých druhov pohybu, bol vytvorený návrh a došlo k realizácii meracieho prípravku s niekoľkými inerciálnymi senzormi. Úlohou práce bolo vytvoriť funkčné zariadenie schopné merať azimut a inklináciu, ktoré má byť podrobne otestované a má optimalizované merania pomocou vybraných metód.

Vytvorené zariadenie obsahuje štyri inerciálne senzory, ktorými sú akcelerometer s gyroskopom spojené v inerciálnej meracej jednotke a dva rôzne magnetometre. Zariadenie umožňuje meranie azimutu a inklinácie viacerými spôsobmi, pričom si užívateľ môže vybrať z širokej ponuky funkcií, ktoré boli vytvorené v rámci optimalizácie merania prípravku. Merací prípravok je navyše prispôbený na prevádzku s batériou a vďaka kompaktným rozmerom sa s ním jednoducho manipuluje.

V úvodnej časti práce je zaradený rozbor teórie zameraný na inerciálne senzory. Popísané sú akcelerometre, gyroskopy a magnetometre, pričom každý z nich je podrobne popísaný z hľadiska funkcionality a matematického aparátu. Všetky zmienené inerciálne senzory majú svoj vlastný spôsob kalibrácie, ktorý je na príslušných miestach dôkladne popísaný.

Druhá kapitola sa zaoberá všeobecnou charakteristikou filtrov, ktoré sa typicky v obdobných aplikáciách využívajú. Za nimi je zaradený podrobný matematický popis meraní s používanými senzormi, pričom zreteľ je obzvlášť kladený na meranie inklinácie akcelerometrom, azimutu magnetometrom a gyroskopom. Všetky potrebné výpočty na získanie požadovaných veličín sa nachádzajú v tejto časti.

Návrh meracieho prípravku je precízne popísaný v tretej kapitole práce. Je rozdelený na napájaciu časť, riadiacu časť a časť prípravku s inerciálnymi senzormi. Na začiatku každej podkapitoly sú obsiahnuté všeobecné vlastnosti popisovaného bloku, požiadavky navrhovanej súčasti a príslušná schéma zapojenia. Zvolené súčiastky majú uvedené nároky na ne a sú podrobne popísané.

Záver práce sa venuje realizácii prípravku, jeho oživením, následným meraním a testovaním. Najskôr je popísaný návrh dosky plošných spojov, spôsob jej výroby a nachádza sa tu aj jej výsledný vzhľad. Nasleduje charakteristika programu a možnosti, ktoré užívateľovi ponúka. Posledná časť sa zaoberá meraním so senzormi, optimalizáciou ich výsledkov a testovaním výsledných funkcií. Nachádza sa tu aplikácia kalibrácií všetkých sensorov, meranie inklinácie a viaceré spôsoby vyhodnocovania azimutu.

Merací prípravok je možné pomerne presne skalibrovať a takto zoptimalizovať výsledky merania, čo je v práci doložené niekoľkými grafmi a tabuľkami. Je možné s ním merať inklináciu, azimut prostredníctvom gyroskopu aj magnetometru. Meranie magnetického azimutu bolo optimalizované pomocou komplementárneho filtra, ktorý prepojil výhody merania jednotlivých sensorov. Vo výsledku sa týmto krokom dosiahlo precíznejších výsledkov.

Vytvorená práca spĺňa vytýčené ciele a vďaka podrobným popisom postupov môže uľahčiť iným záujemcom o skúmanie pohybu preniknúť do tejto rozsiahlej problematiky. Práca pre nich prináša teoretický prehľad aj praktickú ukážku možností aplikácie inerciálnych senzorov. Svoje uplatnenie môže meracích prípravok nájsť aj v možnosti zaintegrovania ďalších optimalizačných metód.

LITERATÚRA

- [1] PAO, Charles. *Motion Sensors: How Many Axes Do You Need?* [online]. CEVA's Experts blog [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: <https://www.ceva-dsp.com/ourblog/motion-sensors-how-many-axes-do-you-need/>
- [2] FRADEN, Jacob. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. 5th ed. San Diego: Springer International Publishing, 2016. ISBN 978-3-319-19302-1.
- [3] *Jak funguje a k čemu slouží akcelerometr?* [online]. TME Electronic Components [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/news/library-articles/page/22568/jak-funguje-a-k-cemu-slouzi-akcelerometr/>
- [4] FISHER, Christopher. *Using An Accelerometer for Inclination Sensing* [online]. Digi-Key Electronics, 2011 [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://www.digikey.com/en/articles/using-an-accelerometer-for-inclination-sensing>
- [5] MATHAS, Carolyn. *What You Need to Know to Choose an Accelerometer* [online]. Digi-Key Electronics, 2013 [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://www.digikey.com/en/articles/what-you-need-to-know-to-choose-an-accelerometer>
- [6] *A Guide To using IMU (Accelerometer and Gyroscope Devices) in Embedded Applications* [online]. Starlino Electronics, 2009 [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: http://www.starlino.com/imu_guide.html
- [7] VOJÁČEK, Antonín. *Principy akcelerometrů: 1. díl - Piezoelektrické* [online]. HW server, 2007 [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>
- [8] JADON, Vijay. *How Accelerometer and Gyroscope work* [online]. 2020 [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: https://vijayonline.in/?print-my-blog=1&post-type=post&statuses%5B0%5D=publish&rendering_wait=0&columns=1&font_size=normal&image_size=medium&links=include&show_site_title=1&show_site_tagline=1&show_site_url=1&show_date_printed=1&show_title=1&show_date=1&show_categories=1&show_featured_image=1&show_content=1&format=pdf&pmb-post=2184
- [9] *Piezoresistive Sensor Applications* [online]. TransducerSensors, 2017 [cit. 2021-12-31]. Dostupné z: <https://transducersensors.com/piezoresistive-sensor-applications/>
- [10] *Akcelerometre* [online]. Katedra leteckej technickej prípravy, 2009 [cit. 2021-12-31]. Dostupné z: <http://www.senzorika.leteckafakulta.sk/?q=node/175>

- [11] *Accelerometer* [online]. ETS Solutions Asia, 2021 [cit. 2022-03-23]. Dostupné z: <https://www.etsolution-asia.com/blog/accelerometer>
- [12] *Gyroscope* [online]. Britannica, 2021 [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/gyroscope>
- [13] WATSON, Jeff. *MEMS Gyroscope Provides Precision Inertial Sensing in Harsh, High Temperature Environments* [online]. Analog Devices, 2016 [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/technical-articles/mems-gyroscope-provides-precision-inertial-sensing.html>
- [14] VOJÁČEK, Antonín. *Integrované MEMS GYROSKOPY* [online]. HW server, 2009 [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/integrované-mems-gyroskopy>
- [15] BAKER, Bonnie. *Apply Sensor Fusion to Accelerometers and Gyroscopes* [online]. Digi-Key Electronics, 2018 [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: <https://www.digikey.com/en/articles/apply-sensor-fusion-to-accelerometers-and-gyroscopes>
- [16] *Accelerometer vs Gyroscope sensor, and IMU, how to pick one?* [online]. Magazine 7, 2020 [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: <https://www.seeedstudio.com/blog/2019/12/24/what-is-accelerometer-gyroscope-and-how-to-pick-one/>
- [17] WOODMAN, Oliver J. *An introduction to inertial navigation* [online]. Cambridge, 2007 [cit. 2022-01-03]. ISSN 1476-2986. Dostupné z: <https://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR-696.pdf>. Technická správa. University of Cambridge.
- [18] TITTERTON, David a John WESTON. *Strapdown Inertial Navigation Technology*. 2nd Edition. Stevenage: The Institution of Electrical Engineers, 2004. ISBN 0 86341 358 7.
- [19] *HIGH-PERFORMANCE GYROSCOPES* [online]. VECTORNAV, 2022 [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: <https://www.vectornav.com/resources/inertial-navigation-primer/theory-of-operation/theory-gyros>
- [20] LÓPEZ REVUELTA, Álvaro. *Orientation estimation and movement recognition using low cost sensors* [online]. Karlskrona, 2017 [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1127455/FULLTEXT02.pdf>. Diplomová práce. Blekinge Institute of Technology. Vedoucí práce Benny Löfvström.
- [21] *Magnetometers: Types & Applications like Metal detectors and Geographical Surveys* [online]. Elprocus, 2013 [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: <https://www.elprocus.com/magnetometers-types-applications/>

- [22] Magnetometers Information. *Engineering360* [online]. GlobalSpec [cit. 2022-03-03]. Dostupné z:
https://www.globalspec.com/learnmore/motion_controls/orientation_position_sensing/compasses_magnetometers
- [23] MOHDZAINI, Jefri. *The Characterization of the Analog Devices Inc. (ADI) Magnetometer* [online]. 2000 [cit. 2022-03-03]. Dostupné z:
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.981.1524&rep=rep1&type=pdf>. Diplomová práca. MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. Vedoucí práce Martin Schmidt.
- [24] TARÁBEK, Pavol. *Zmaturuj z fyziky. 2. dotlač.* Bratislava: Didaktis, 2006. ISBN 978-80-8166-011-5.
- [25] KÁDÁR, Zs., A. BOSSCHE, P.M. SARRO a J.R. MOLLINGER. Magnetic-field measurements using an integrated resonant magnetic-field sensor. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. Elsevier, 1998, 70(3), 225-232 [cit. 2022-03-03]. ISSN 09244247. Dostupné z:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424798001435>
- [26] CARUSO, Michael J. *Applications of Magnetoresistive Sensors in Navigation Systems* [online]. Plymouth: Honeywell, 1997 [cit. 2022-03-03]. Dostupné z:
https://aerospace.honeywell.com/content/dam/aerobt/en/documents/learn/products/sensors/technical-articles/ApplicationsofMagnetoresistiveSensorsinNavigationSystems_ta.pdf
- [27] HERRERA-MAY, Agustín, Francisco LÓPEZ-HUERTA a Luz AGUILERA-CORTÉS, ed., Agustín HERRERA-MAY, Francisco LÓPEZ-HUERTA, Luz AGUILERA-CORTÉS. MEMS Lorentz Force Magnetometers. GROSZ, Asaf, Michael HAJI-SHEIKH a Subhas MUKHOPADHYAY. *Smart Sensors, Measurement and Instrumentation* [online]. Vol. 19. Springer, Cham, 2017, s. 253-277 [cit. 2022-03-03]. ISBN 978-3-319-34070-8. Dostupné z:
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-34070-8_9
- [28] HERRERA-MAY, Agustín, Luz AGUILERA-CORTÉS, Pedro GARCÍA-RAMÍREZ, Nelly MOTA-CARRILLO, Wendy PADRÓN-HERNÁNDEZ a Eduard FIGUERAS, Agustín L. HERRERA-MAY, ed. *Development of Resonant Magnetic Field Microsensors: Challenges and Future Applications*. MININ, Oleg. *Microsensors* [online]. Londýn: InTechOpen, 2011, s. 65-84 [cit. 2022-03-03]. ISBN 978-953-51-6010-6. Dostupné z:
<http://www.intechopen.com/books/microsensors/development-of-resonant-magnetic-field-microsensors-challenges-and-future-applications>

- [29] MBAREK, Sofiane, Nouha *ALCHEIKH*, Hassen *OUAKAD* a Mohammad YOUNIS. Highly sensitive low field Lorentz-force MEMS magnetometer. *Scientific Reports* [online]. Springer Nature, 2021, 11(1) [cit. 2023-03-01]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-01171-z>
- [30] DE MENDIZÁBAL, Ignacio. *Types of Magnetometers* [online]. *All About Circuits*, 2021 [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/types-of-magnetometers/>
- [31] KONVALIN, Christopher. Compensating for Tilt, Hard-Iron, and Soft-Iron Effects. *FIERCE Electronics* [online]. Questex, 2009 [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://www.fierceelectronics.com/sensors/how-sensors-are-making-impact-iot-and-pandemic-era>
- [32] NARKHEDE, Parag, Shashi PODDAR, Rahee WALAMBE, George GHINEA a Ketan KOTECHA. *Cascaded Complementary Filter Architecture for Sensor Fusion in Attitude Estimation* [online]. MDPI, 2021 [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/6/1937/htm>
- [33] YOUNG, Trevor. *Performance of the Jet Transport Airplane: Analysis Methods, Flight Operations, and Regulations* [online]. 1st ed. Wiley, 2018 [cit. 2021-12-29]. ISBN 978-1-119-68278-3. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9781118534786.app3>
- [34] FAN, Allen. *How to Improve the Accuracy of Inclination Measurement Using an Accelerometer* [online]. Analog Devices [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/how-to-improve-the-accuracy-of-inclination-measurement-using-an-accelerometer.html>
- [35] KŘÍŽ, Zdeněk a Veronika ŠVANDOVÁ. *Numerická integrace* [online]. Masarykova univerzita, 2018 [cit. 2022-03-23]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/el/sci/jaro2018/C2140/um/ch07.pdf>
- [36] atan2(). In: Programiz [online]. Parewa Labs [cit. 2022-03-23]. Dostupné z: <https://www.programiz.com/c-programming/library-function/math/h/atan2>
- [37] *PIC24FJ64GP205/GU205 Family: 16-Bit eXtreme Low-Power Microcontrollers with USB in Low Pin Count Packages* [online]. Microchip Technology, 2020 [cit. 2022-01-02]. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/PIC24FJ64GP205-GU205-Family-Data-Sheet-DS30010221C.pdf>
- [38] *GeB LiPol Baterie 501830 230mAh 3.7V JST-PH 2.0*. In: Laskakit [online]. 2022 [cit. 2022-01-15]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/baterie-li-po-3-7v-230mah-lipo/#ratingTab>

- [39] *MCP73831/2: Miniature Single-Cell, Fully Integrated Li-Ion, Li-Polymer Charge Management Controllers* [online]. Microchip Technology, 2014 [cit. 2022-01-15]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/268/20001984g-846362.pdf>
- [40] *Specification: RF-GNB191TS-CF* [online]. REFOND, 2017 [cit. 2022-01-15]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/f3158d7a5bdeef96f1ac015c4467312d/RF-GNB191TS-CF.pdf>
- [41] *SKM14: SMD Schottky Barrier Rectifier Diodes* [online]. DIOTEC SEMICONDUCTOR, 2019 [cit. 2022-01-02]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/9d5b42a4202764b1cab3d3fae5cd922e/skm14.pdf>
- [42] *MCP1700: Low Quiescent Current LDO* [online]. Microchip Technology, 2020 [cit. 2022-01-15]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/268/MCP1700_Data_Sheet_20001826F-737536.pdf
- [43] *CAT24M01: EEPROM Serial 1-Mb I2C* [online]. Semiconductor Components Industries, 2018 [cit. 2022-01-15]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/cat24m01-d.pdf>
- [44] *Specification: RF-RUB190TS-CA* [online]. REFOND, 2017 [cit. 2022-01-15]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/4c2242d32efba3aaf1fc0c8cbf327f21/RF-RUB190TS-CA.pdf>
- [45] *Specification: RF-YUB191TS-AE* [online]. REFOND, 2017 [cit. 2022-01-15]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/2a371344ae86592ce44b4220e2b3c5c4/RF-YUB191TS-AE.pdf>
- [46] *IIM-42652 Datasheet: High-performance 6-Axis SmartIndustrial™ MotionTracking MEMS Device for Industrial Applications* [online]. TDK InvenSense, 2021 [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: <http://download.mikroe.com/documents/datasheets/IIM-42652%20Datasheet.pdf>
- [47] *±30 Gauss, Monolithic, High Performance, Low Cost 3-axis Magnetic Sensor: MMC5633NJL* [online]. MEMSIC, 2020 [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/821/Memsic_03272020_MMC5633NJL_Data_sheet_Rev_A-1823831.pdf
- [48] *3-Axis Digital Magnetometer IC: BM1422AGMV* [online]. ROHM Semiconductor, 2016 [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: <https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/ic/sensor/geomagnetic/bm1422agmv-e.pdf>

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratky:

IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>	Inerciálna meracia jednotka
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>	Pulzná šírková modulácia
I ² C	<i>Internal – Integrated Circuit</i>	Dvojvodičová I ² C zbernica
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>	Synchronne sériové periférne rozhranie
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver – Transmitter</i>	Univerzálny asynchrónny prijímač – vysielač zbernica
AD, ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>	Prevodník analógovej úrovne na digitálnu
MEMS	<i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i>	Mikro-elektromechanické systémy
DPS		Doska plošných spojov
KF	<i>Kalman Filter</i>	Kalmanov filter
CF	<i>Complementary Filter</i>	Komplementárny filter
LCF	<i>Linear Complementary Filter</i>	Lineárny komplementárny filter
NCF	<i>Non-linear Complementary Filter</i>	Nelineárny komplementárny filter
CKF	<i>Complementary – Kalman Filter</i>	Komplementárny Kalmanov filter
USB	<i>Universal Serial Bus</i>	Univerzálna sériová zbernica
LED	<i>Light Emitting Diode</i>	Elektroluminiscenčná dióda
VUSB	<i>USB Voltage</i>	Nominálne napätie z USB
D+	<i>USB Data High</i>	Vývod USB a MCU na prenos dát
D-	<i>USB Data Low</i>	Vývod USB a MCU na prenos dát
SMD	<i>Surface Mount Device</i>	Súčiastka pre povrchovú montáž
VBAT	<i>Battery Voltage</i>	Nominálne napätie z batérie
STAT	<i>Charge Status</i>	Vývod kontroléra nabíjania pre stav nabitia
PROG	<i>Current Regulation Programming</i>	Vývod kontroléra nabíjania na nastavenie nabíjacieho prúdu
LDO	<i>Low Dropout Regulator</i>	Nízkoúbytkový stabilizátor

MCU	<i>Microprocessing Control Unit</i>	Mikroprocesor
ESR	<i>Equivalent Series Resistor</i>	Ekvivalentný sériový odpor
VCAP	<i>Voltage Regulator Pin for External Capacitor</i>	Vývod MCU napäťovej regulácie s kondenzátorom
INT1	<i>Interrupt 1</i>	Vývod IMU prerušenia 1
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read-only Memory</i>	Elektricky zmazateľná programovateľná pamäť iba na čítanie
FIFO	<i>First In, First Out</i>	Pamäť typu prvý dovnútra, prvý von
DRDY	<i>Data Ready</i>	Vývod magnetometra o možnosti vyčítať hodnoty

Symbols:

g	[m.s ⁻²]	Tiažové zrýchlenie, $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$
a_{real}	[g]	Skutočná hodnota zrýchlenia zmeraná akcelerometrom
A_{AKC}	[g]	Hodnota zrýchlenia na výstupe akcelerometra
\vec{a}	[m.s ⁻²]	Vektor zrýchlenia zo zákona sily
\vec{F}	[N]	Vektor sily zo zákona sily
m	[kg]	Hmotnosť telesa
a_{AKC_x}	[g]	Zrýchlenie na výstupe akcelerometra pre os x
x	[-]	Os x senzoru
y	[-]	Os y senzoru
z	[-]	Os z senzoru
ADC_{AKC_x}	[-]	Digitálna hodnota zrýchlenia na výstupe ADC
V_{ref}	[V]	Referenčné napätie ADC
n	[-]	Počet bitov ADC
V_{AKC_0g}	[V]	Napätie akcelerometra pre 0 g
$sensitivity_{\text{AKC}}$	[V/g]	Citlivosť akcelerometra
C_1	[F]	Kapacita prvého kapacitora v MEMS akcelerometri
C_2	[F]	Kapacita druhého kapacitora v MEMS akcelerometri
$x_{\text{akc_offset}}$	[g], [-]	<i>Offset</i> pre os x akcelerometra
x_{akc_k}	[g], [-]	k -te namerané zrýchlenie pre os x akcelerometra
k	[-]	Sumačný index
i	[-]	Počet nameraných hodnôt

x_{akc_cal}	[g], [-]	Hodnota akcelerometra v ose x po kalibrácii
x_{akc_new}	[g], [-]	Nová nameraná hodnota akcelerometra v ose x
F_C	[N]	Coriolisova sila
v	[m.s ⁻¹]	Rýchlosť telesa
ω	[rad.s ⁻¹]	Uhlová rýchlosť telesa
v_{GYRx}	[°/s]	Uhlová rýchlosť za časť na výstupe gyroskopu pre os x
ADC_{GYRx}	[-]	Digitálna hodnota uhlovej rýchlosti za čas na výstupe ADC
V_{GYR_0}	[V]	Napätie gyroskopu pre nulové zrýchlenie
$sensitivity_{GYR}$	[V/°/s]	Citlivosť gyroskopu
n_{lom}	[-]	Index lomu svetla
R	[m]	Polomer kruhu v optickom gyroskope
Ω	[rad.s ⁻¹]	Uhlová rýchlosť rotácie v optickom gyroskope
x_{gyr_offset}	[°/s], [-]	<i>Offset</i> pre os x gyroskopu
x_{gyr_k}	[°/s], [-]	k -te namerané uhlové zrýchlenie pre os x gyroskopu
x_{akc_cal}	[°/s], [-]	Hodnota gyroskopu v ose x po kalibrácii
x_{akc_new}	[°/s], [-]	Nová nameraná hodnota gyroskopu v ose x
$sensitivity_{MAG}$	[V/G], [V/T]	Citlivosť magnetometra
V_{MAG_0}	[V]	Napätie magnetometra pre nulové magnetické pole
B_{MAGx}	[G], [T]	Magnetická indukcia na výstupe magnetometra pre os x
ADC_{MAGx}	[-]	Digitálna hodnota magnetickej indukcie na výstupe ADC
F_M	[N]	Sila magnetického poľa v Hallovom efekte
V_H	[V]	Hallovo napätie
v_e	[m.s ⁻¹]	Rýchlosť elektrónu
B	[T]	Indukcia magnetického poľa
F_L	[N]	Lorentzova sila
I_e	[A]	Prúd častíc s elektrickým nábojom
S	[G], [T], [-]	Stred kružnice, respektíve elipsy pri meraní magnetometrom
x_{mag_offset}	[G], [T], [-]	<i>Offset</i> pre os x magnetometra
x_{mag_max}	[G], [T], [-]	Maximum v ose x magnetometra vo výpočte kalibrácie skreslenia magneticky tvrdými materiálmi

$x_{\text{mag_min}}$	[G], [T], [-]	Minimum v ose x magnetometra vo výpočte kalibrácie skreslenia magneticky tvrdými materiálmi
$x_{\text{mag_HI_cal}}$	[G], [T], [-]	Hodnoty magnetometra v ose x po kalibrácii skreslenia magneticky tvrdými materiálmi
$x_{\text{mag_new}}$	[G], [T], [-]	Nová nameraná hodnota magnetometra v ose x
α	[°]	Uhol natočenia elipsy pri meraní magnetometrom
r	[G], [T], [-]	Hlavná polos elipsy
q	[G], [T], [-]	Vedľajšia polos elipsy
R	[G], [T], [-]	Konečný bod hlavnej polosi elipsy
x_1	[G], [T], [-]	Súradnica na osi x prislúchajúca bodu R
y_1	[G], [T], [-]	Súradnica na osi y prislúchajúca bodu R
Q	[G], [T], [-]	Konečný bod vedľajšej polosi elipsy
x_2	[G], [T], [-]	Súradnica na osi x prislúchajúca bodu Q
y_2	[G], [T], [-]	Súradnica na osi y prislúchajúca bodu Q
x_{rot}	[G], [T], [-]	Hodnoty magnetometra v ose x po natočení o uhol α pri kalibrácii skreslenia magneticky mäkkými materiálmi
$y_{\text{mag_HI_cal}}$	[G], [T], [-]	Hodnoty magnetometra v ose y po kalibrácii skreslenia magneticky tvrdými materiálmi
y_{rot}	[G], [T], [-]	Hodnoty magnetometra v ose y po natočení o uhol α pri kalibrácii skreslenia magneticky mäkkými materiálmi
σ	[-]	Faktor škálovania
$x_{\text{mag_HI_cal_max}}$	[G], [T], [-]	Maximum v ose x magnetometra vo výpočte kalibrácie skreslenia magneticky mäkkými materiálmi
$x_{\text{mag_HI_cal_min}}$	[G], [T], [-]	Minimum v ose x magnetometra vo výpočte kalibrácie skreslenia magneticky mäkkými materiálmi

$x_{\text{mag_delta}}$	[G], [T], [-]	Delta v ose x magnetometra vo výpočte kalibrácie skreslenia magneticky mäkkými materiálmi
$y_{\text{mag_delta}}$	[G], [T], [-]	Delta v ose y magnetometra vo výpočte kalibrácie skreslenia magneticky mäkkými materiálmi
$z_{\text{mag_delta}}$	[G], [T], [-]	Delta v ose z magnetometra vo výpočte kalibrácie skreslenia magneticky mäkkými materiálmi
avg_{mag}	[G], [T], [-]	Aritmetický priemer rozdielov miním a maxím jednotlivých osí vo výpočte kalibrácie skreslenia magneticky mäkkými materiálmi
$scale_{\text{mag_x}}$	[-]	Faktor skreslenia v ose x magnetometra spôsobený magneticky mäkkými materiálmi
$x_{\text{mag_cal}}$	[G], [T], [-]	Hodnota magnetometra v ose x po kalibrácii skreslenia magneticky mäkkými a tvrdými materiálmi
x_{ref}	[-]	Os x referenčnej sústavy súradníc
y_{ref}	[-]	Os y referenčnej sústavy súradníc
z_{ref}	[-]	Os z referenčnej sústavy súradníc
φ	[°]	Uhol rotácie osi x
θ	[°]	Uhol rotácie osi y
ψ	[°]	Uhol rotácie osi z
A_x	[g]	Výstup akcelerometra pre os x
A_y	[g]	Výstup akcelerometra pre os y
A_z	[g]	Výstup akcelerometra pre os z
G_x	[°/s]	Výstup gyroskopu pre os x
G_y	[°/s]	Výstup gyroskopu pre os y
G_z	[°/s]	Výstup gyroskopu pre os z
φ_{prev}	[°]	Uhol rotácie osi x z predchádzajúceho merania
Δt	[s]	Časový interval medzi dvomi meraniami gyroskopom
a	[-]	Ľavý okraj intervalu integrácie
b	[-]	Pravý okraj intervalu integrácie
v_o	[-]	Výška aproximačného obdĺžnika
h_o	[-]	Šírka aproximačného obdĺžnika
$f(x)$	[-]	Krivka, pod ktorou sa integruje
a_k	[-]	k -ty ľavý okraj intervalu
b_k	[-]	k -ty pravý okraj intervalu
$f(a)$	[-]	Funkčná hodnota v ľavom okraji intervalu

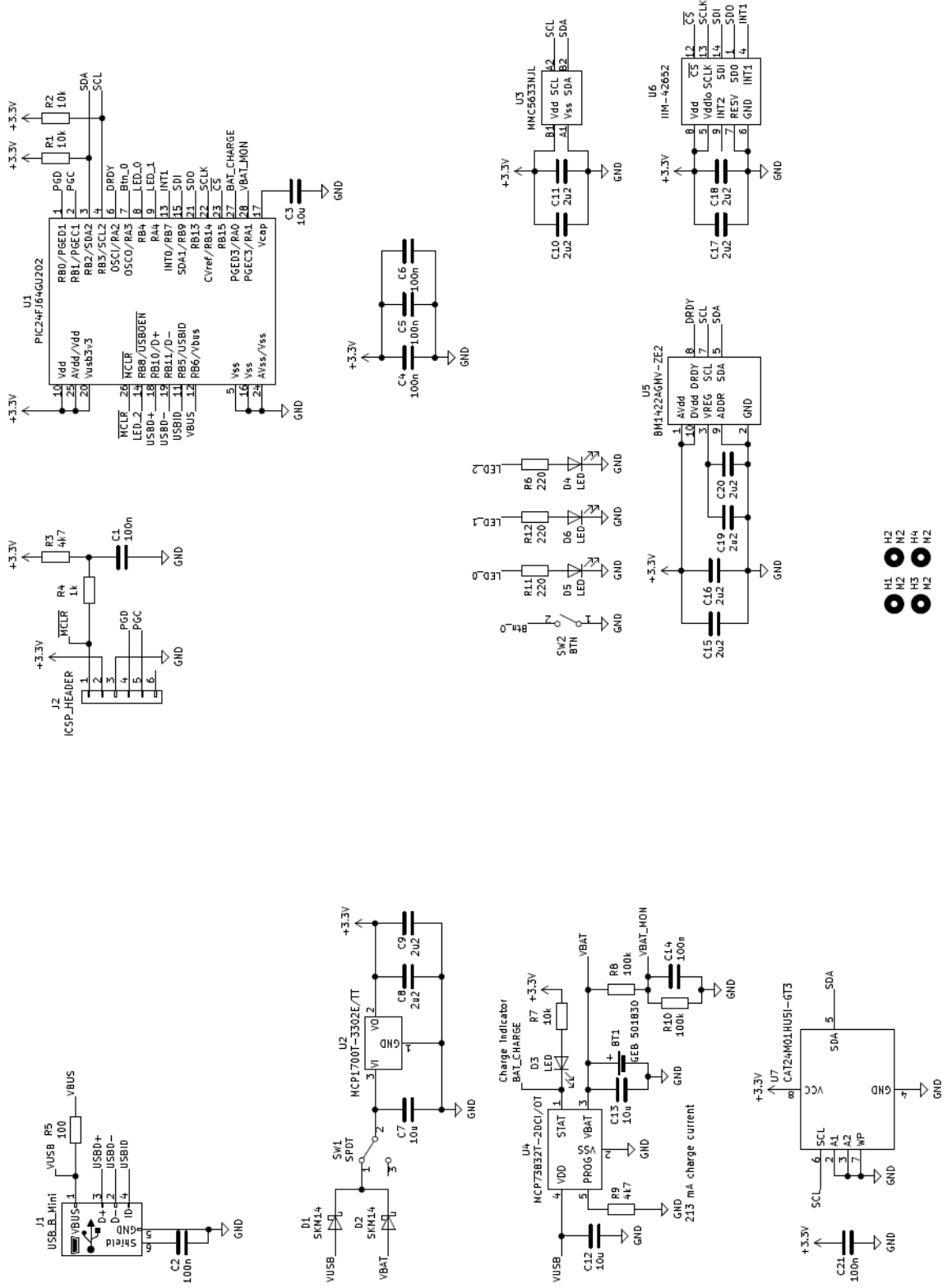
$f(b)$	[-]	Funkčná hodnota v pravom okraji intervalu
M_x	[G], [T]	Výstup magnetometra pre os x
M_y	[G], [T]	Výstup magnetometra pre os y
$x_{MMC_HIcalib}$	[-]	Namerané hodnoty v ose x magnetometra MMC po kalibrácii <i>hard ironing</i>
$x_{MMC_HI_SIcalib}$	[-]	Namerané hodnoty v ose x magnetometra MMC po kalibrácii <i>hard ironing</i> a <i>soft ironing</i>
$x_{BM_HIcalib}$	[-]	Namerané hodnoty v ose x magnetometra BM po kalibrácii <i>hard ironing</i>
$x_{BM_HI_SIcalib}$	[-]	Namerané hodnoty v ose x magnetometra BM po kalibrácii <i>hard ironing</i> a <i>soft ironing</i>
$azimut_{MMC_mer}$	[°]	Zmerané uhly azimutu magnetometrom MMC
$azimut_{nast}$	[°]	Nastavované uhly pri meraní azimutu
$\Delta azimut_{MMC}$	[%]	Relatívna odchýlka uhla azimutu magnetometra MMC
$azimut_{BM_mer}$	[°]	Zmerané uhly azimutu magnetometrom BM
$\Delta azimut_{BM}$	[%]	Relatívna odchýlka uhla azimutu magnetometra BM
$tilt_{acc_mer}$	[°]	Zmerané uhly tiltu akcelerometrom
$tilt_{nast}$	[°]	Nastavované uhly pri meraní tiltu
$\Delta tilt_{acc}$	[%]	Relatívna odchýlka uhla tiltu akcelerometrom
$azimut_{gyro_mer}$	[°]	Zmerané uhly azimutu gyroskopom
$\Delta azimut_{gyro}$	[%]	Relatívna odchýlka uhla azimutu gyroskopom
$azimut_{filt_mer}$	[°]	Zmerané uhly azimutu gyroskopom a magnetometrom MMC spojených v komplementárnom filtri
$\Delta azimut_{filt}$	[%]	Relatívna odchýlka uhla azimutu gyroskopom a magnetometrom MMC spojených v komplementárnom filtri

ZOZNAM PRÍLOH

PRÍLOHA A - SCHÉMA PRÍPRAVKU	89
PRÍLOHA B - DOSKA PLOŠNÝCH SPOJOV	90

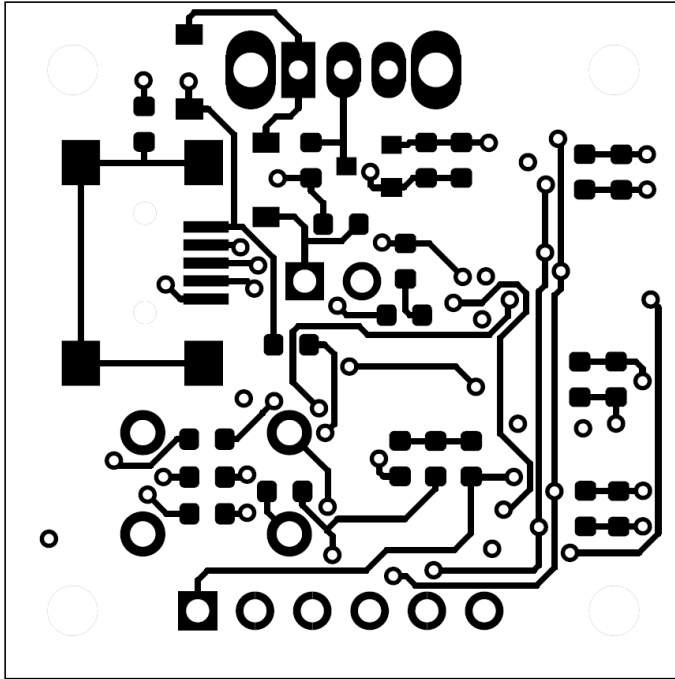
Príloha A - Schéma prípravku

A.1 Schéma zapojenia jednotlivých blokov



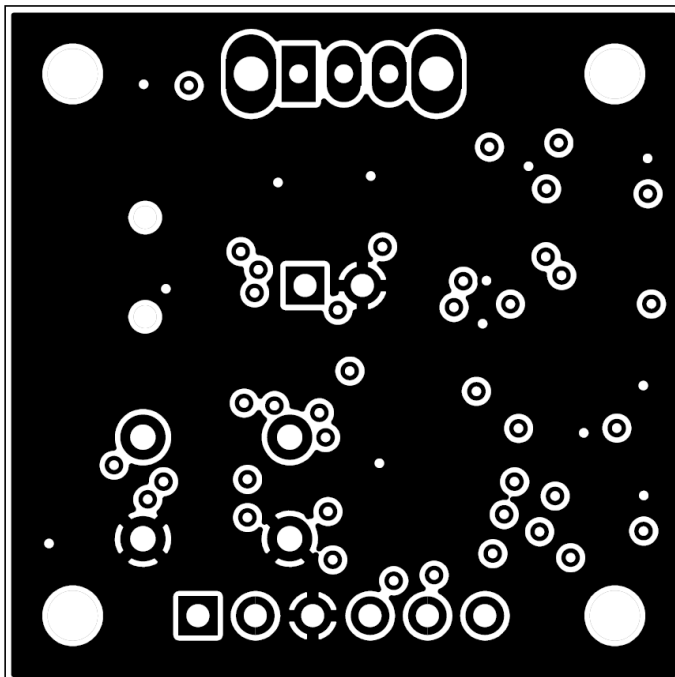
Príloha B - Doska plošných spojov

B.1 Motív DPS z hornej strany (*top*)



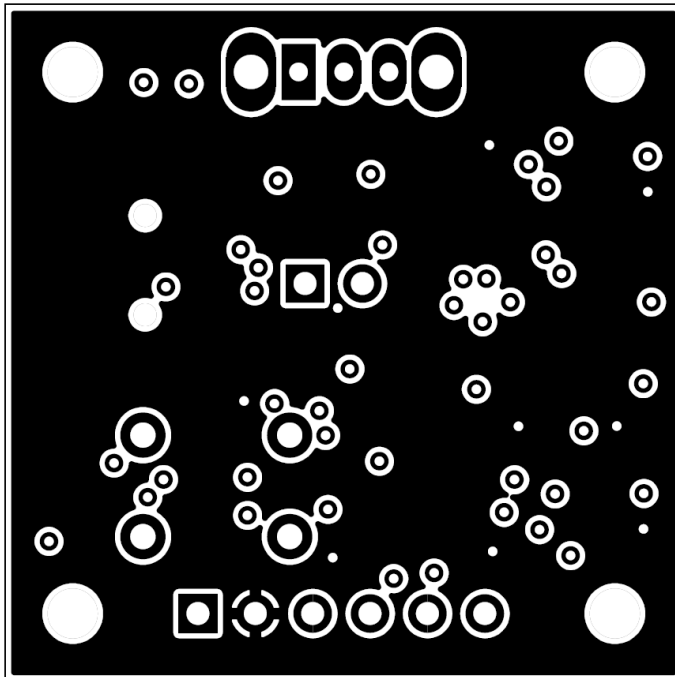
Rozmer dosky 30 x 30 mm, zobrazené v mierke M 3:1

B.2 Motív DPS prvej vnútornej vrstvy (GND)



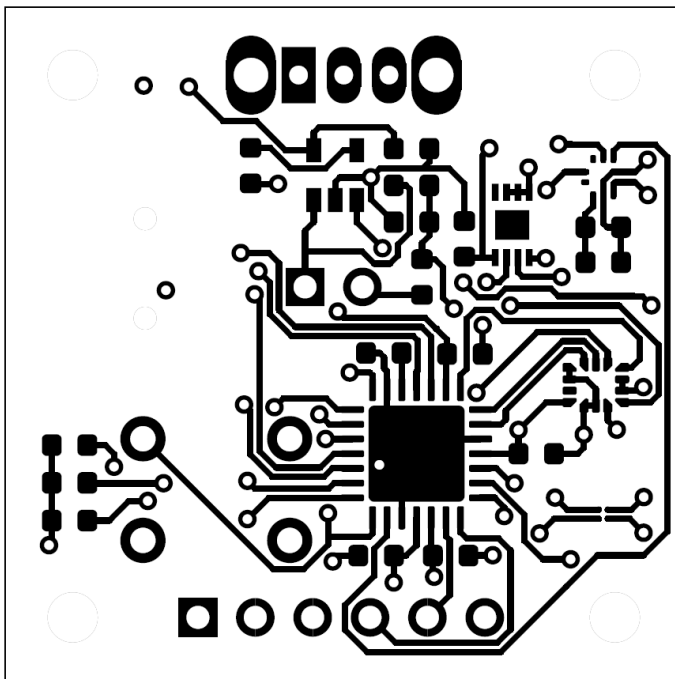
Rozmer dosky 30 x 30 mm, zobrazené v mierke M 3:1

B.3 Motív DPS druhej vnútornej vrstvy (+3,3 V)



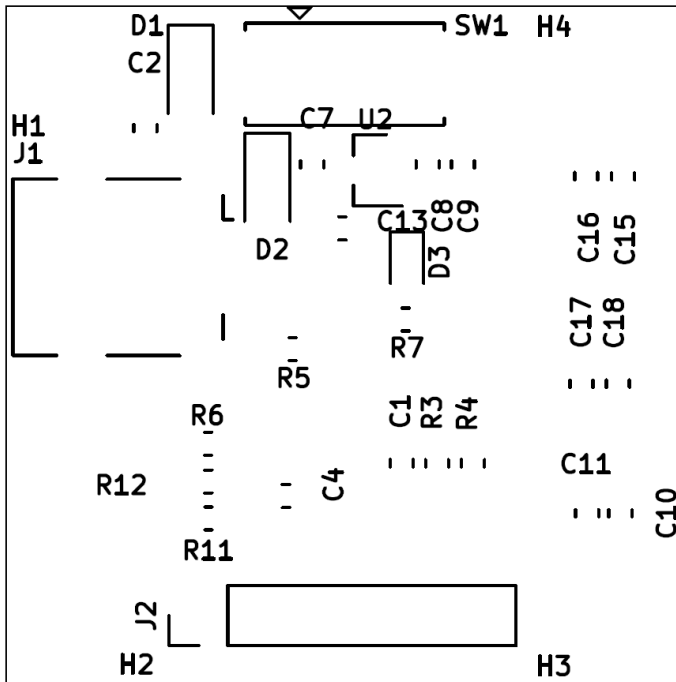
Rozmer dosky 30 x 30 mm, zobrazené v mierke M 3:1

B.4 Motív DPS zo spodnej strany (*bottom*)



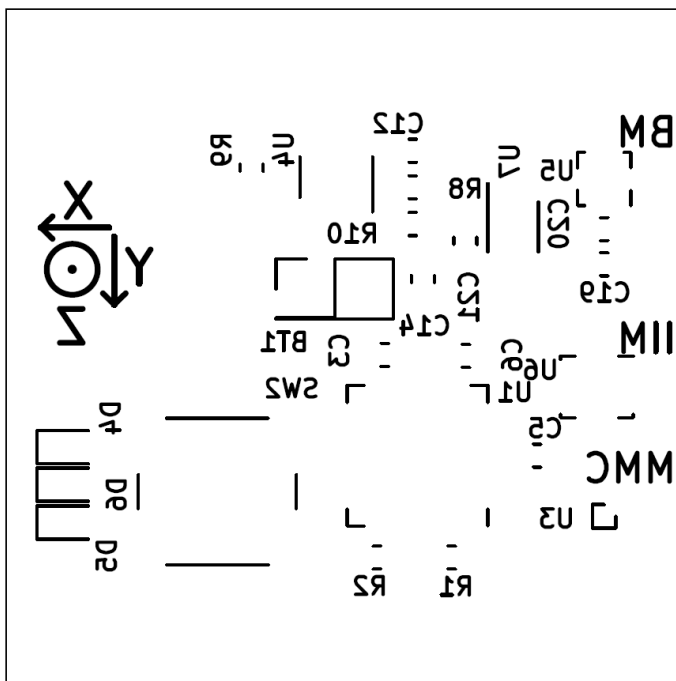
Rozmer dosky 30 x 30 mm, zobrazené v mierke M 3:1

B.5 Servisná potlač DPS z hornej strany (*top*)



Rozmer dosky 30 x 30 mm, zobrazené v mierke M 3:1

B.6 Servisná potlač DPS zo spodnej strany (*bottom*)



Rozmer dosky 30 x 30 mm, zobrazené v mierke M 3:1