



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

INERCIÁLNÍ NAVIGAČNÍ JEDNOTKA

INERTIAL NAVIGATION UNIT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Dvořák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Šebesta, Ph.D.

BRNO 2016

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**
Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Jan Dvořák

ID: 133242

Ročník: 2

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Inerciální navigační jednotka

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte rozbor řešení inerciální navigační jednotky s moderními MEMS senzory pro aplikace v personální a automobilové navigaci. Uvažujte sběr dat ze senzorů v reálném čase a jejich ukládání na vhodné médium. Zpracování a zhodnocení necht' je prováděno off-line, např. v Matlabu. Přenos dat ze senzorů do počítače proveďte v reálném čase pomocí vhodného komunikačního rozhraní (např. Bluetooth). Navrhněte obvodové schéma, mechanické uspořádání a desku plošných spojů. Inerciální jednotku sestavte a oživte ji. Připravte program nebo skripty pro zpracování dat ze senzorů inerciální jednotky. Proveďte soubor vhodných experimentů a výsledky vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] GROVES, P. D. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems. Boston: Artech House, 2008.

[2] BOSE, A., BHAT, K. N., KURIAN, T. Fundamentals of Navigation and Inertial Sensors. Delhi: PHI Learning Private Limited, 2014.

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 19.5.2016

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Šebesta, Ph.D.

Konzultant diplomové práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D., předseda oborové rady

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

Tato diplomová práce je zaměřena na návrh a realizaci inerciální navigační jednotky INS. Daná jednotka je schopná měřit, zaznamenávat a odesílat data do počítače v reálném čase pro pozdější „offline“ zpracování. První část práce seznamuje čtenáře se základní problematikou akcelerometrů, gyroskopů a MEMS snímačů. Nechybí úvod do používaných systémů souřadnic a chyb měření. Druhá a třetí část diplomové práce pojednává o rozboru řešení a následném praktickém návrhu. Zde jsou popsány možné varianty realizace včetně realizace samotné. Čtvrtá část obsahu práce je věnována softwarovému vybavení INS. Poslední texty práce se zabývají úvodem do zpracování dat včetně jejich vyhodnocení.

KLÍČOVÁ SLOVA

MEMS senzor, gyroskop, akcelerometr, ARM, SD karta, FatFS, Bluetooth

ABSTRACT

This thesis is focused on the design and realisation of inertial navigation unit INS. The unit is capable to measure, store and send data to a PC in real-time for a later offline processing. The first part of the thesis introduces the reader with the basic principles of accelerometers, gyroscopes and MEMS sensors. An introduction to coordinate systems and measuring errors is also included. The second and third part of the thesis deals with the analysis of the solution and the implementation of the INS unit. The fourth part of the document is dedicated to the software for the INS unit. This thesis concludes with explanation how the gathered data are processed.

KEYWORDS

MEMS sensors, accelerometer, gyroscope, ARM, SD card, FatFS, Bluetooth

DVOŘÁK, J. *Inerciální navigační jednotka*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2016. 86 s. diplomové práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Šebesta, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Inerciální navigační jednotka jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. ing. Jiřímu Šebestovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

OBSAH

Seznam obrázků	x
Seznam tabulek	xii
Úvod	1
1 Teoretický úvod	2
1.1 Využití inerciálních snímačů polohy	2
1.2 Inerciální snímače	3
1.3 Lineární akcelerometry	3
1.3.1 Dělení akcelerometrů dle provedení	6
1.3.2 Dělení akcelerometrů dle principu snímání zrychlení	6
1.4 Gyroskopy	8
1.4.1 Dělení gyroskopů dle provedení	9
1.5 MEMS technologie	10
1.5.1 MEMS akcelerometry	11
1.5.2 MEMS gyroskopy	12
1.6 Chyby inerciálních snímačů	13
1.7 Orientace v prostoru	15
1.7.1 Počátek soustavy souřadnic	15
1.7.2 Soustavy souřadnic	16
1.7.3 Převod mezi kartézskou a geodetickou soustavou	17
1.7.4 Vztažné soustavy	17
1.8 Potlačení chyb měření	18
1.8.1 Korekce deterministických chyb MEMS senzorů	18
1.8.2 Korekce stochastických chyb MEMS senzorů	18
1.8.3 Kalmanův filtr	19
2 Rozbor řešení inerciální navigační jednotky	20
2.1 Koncept návrhu regulátoru	20
2.2 Volba vodné platformy pro realizaci	21
2.3 Vývojový kit STM32F3Discovery	22

2.3.1	Mikroprocesor.....	23
2.3.2	Periferie.....	24
2.4	Ukládání dat.....	25
2.4.1	Standard SD.....	25
2.4.2	Souborový systém, FAT16, FAT32, NTFS.....	26
2.5	Odesílání dat.....	27
2.5.1	Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth.....	27
2.6	Napájení.....	30
2.6.1	Baterie.....	30
2.6.2	Nabíjení.....	31
2.6.3	Implementace bateriového napájení.....	33
2.7	Zobrazovací jednotka.....	34
3	Návrh praktické realizace	35
3.1	Nabíjecí obvod.....	35
3.2	LCD displej.....	36
3.3	Návrh struktury přípojných HW modulů.....	37
3.4	Sumarizace HW návrhu.....	38
4	Návrh softwarového vybavení	39
4.1	Použitý software.....	39
4.1.1	Softwarový model.....	39
4.2	Návrh obslužného firmwaru s ohledem na požadavky INS.....	40
4.2.1	Pojednání o konkrétním směru uplatnění.....	40
4.3	Struktura zdrojového kódu a obsažené funkce.....	40
4.3.1	Běh programu – úvod, uživatelské rozhraní.....	41
4.3.2	Běh programu - záznam a zpracování dat.....	43
4.4	Obsluha jednotlivých periférií.....	44
4.4.1	Obsluha gyroskopu.....	44
4.4.2	Obsluha akcelerometru.....	46
4.4.3	Obsluha LCD displeje.....	47
4.4.4	Obsluha SD karty.....	48
5	Realizace a výsledky praktického řešení	49
5.1	Praktická realizace - hardwarová část.....	49
5.2	Praktické realizace - softwarová část.....	51

5.3	Výsledky experimentálního měření.....	52
5.3.1	Akcelerometr	52
5.3.2	Gyroskop.....	56
5.3.3	Zhodnocení měření	57
6	Závěr	58
	Literatura	59
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	63
	SEZNAM PŘÍLOH	64

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Inerciální navigační systém, převzato z [1].....	3
Obr. 1.2: Princip akcelerometru, převzato z [2]	4
Obr. 1.3: Amplitudová frekvenční charakteristika akcelerometru, převzato z [7]	5
Obr. 1.4: Akcelerometr s povrchovou akustickou vlnou, převzato z [3].....	6
Obr. 1.5: Princip piezoelektrického akcelerometru, převzato z [4]	7
Obr. 1.6: Konstrukce kapacitních akcelerometrů, převzato z [4]	7
Obr. 1.7: Směr výstřelu ovlivněný C. silou na severní polokouli, převzato z [15]	8
Obr. 1.8: Mechanický gyroskop, převzato z [5]	9
Obr. 1.9: Optický gyroskop (FOG) , převzato z [13]	9
Obr. 1.10: Zvětšená struktura rezonátoru MEMS, převzato z [11]	10
Obr. 1.11: Kapacitní struktura MEMS akcelerometru, převzato z [18]	11
Obr. 1.12: Princip činnosti MEMS gyroskopu, převzato z [14].....	12
Obr. 1.13: Constant bias error, převzato z [18]	13
Obr. 1.14: Scale Factor error, převzato z [18]	14
Obr. 1.15: Chyba asymetrie (a), chyba linearity (b), dead zone (c) , převzato z [18]	14
Obr. 1.16: Elipsoid, geoid, reliéf Země, převzato z [19] a [20].....	15
Obr. 1.17: Definice souřadnic kartézských (a), geodetických (b)	16
Obr. 1.18: Princip Kalmanova filtru, převzato z [28].....	19
Obr. 2.1: Návrh blokového schématu INU	20
Obr. 2.2: Vývojový kit STM32F3Discovery, převzato z [30].....	22
Obr. 2.3: Rozmístění pinů na (micro) SD kartě.....	25
Obr. 2.4: Popis pinů u BT modulu HC-05	29
Obr. 2.5: Vybíjecí charakteristika jednoho článku Li-Pol konst. proudem	31
Obr. 2.6: Zdroj proudu s bipolárním tranzistorem.....	32
Obr. 2.7: Napájecí část STM32F3DISCOVERY, převzato z [30]	33
Obr. 3.1: Schéma zapojení napájecí části	35
Obr. 3.2:Zadní pohled na LCD displej 1602A (V2.0)	36
Obr. 3.3: Návrh struktury přípojného modulu	37
Obr. 4.1: Struktura nově podporovaných knihoven STM, převzato z [45]	39
Obr. 4.2: Vývojový diagram hlavního programu INS	41
Obr. 4.3: Běh programu „Record“ a „Demo“	43
Obr. 4.4: Struktura knihoven pro obsluhu gyroskopu	45
Obr. 4.5: Struktura knihoven pro obsluhu akcelerometru	46
Obr. 4.6: Struktura knihoven pro obsluhu SD karty	48
Obr. 5.1: Vrchní přípojný modul v sestaveném stavu – horní pohled	49
Obr. 5.2: Vrchní přípojný modul v sestaveném stavu - spodní pohled	50
Obr. 5.3: Spodní bateriový přípojný modul v sestaveném stavu - horní pohled	50
Obr. 5.4: Trajektorie pohybu při experiment. měření.....	52
Obr. 5.5: Měření č.1, grafy zrychlení a rychlosti.....	53
Obr. 5.6: Měření č. 1, trajektorie pohybu x-y	54
Obr. 5.7: Měření č.2, grafy zrychlení a rychlosti.....	55
Obr. 5.8: Měření č. 2, trajektorie pohybu x-y	56

Obr. 5.9: Měření č. 1, rotace podle osy y 56

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1: Vlastní spotřeba STM32F303VC [29]	23
Tab. 2.2: Popis pinů micro SD karty [34]	26
Tab. 2.3: Třídy BT modulu udávající maximální povolený výkon Tx [36]	27
Tab. 2.4: Verze BT modulů [36]	28
Tab. 2.5: Tolerovaná napájecí napětí periférií [29], [17], [33], [37], [34], [38],	30
Tab. 2.6: Popis vývodů LCD displeje, převzato z [42]	34
Tab. 3.1: Sumarizace využití pinů MCU	38

ÚVOD

Cílem této diplomové práce je popsat, navrhnout a sestavit inerciální navigační jednotku (neboli inerciální navigační systém) s využitím MEMS senzorů. Dalším z cílů je realizovat zařízení schopné ukládat naměřená data na paměťové médium se současným odesláním do počítače v reálném čase. Zpracování dat v reálném čase ale probíhat nemusí.

Tato navigační jednotka bude použitelná pro vzdělávací účely s možností použití pro automobilový průmysl. Tím je míněna funkce automobilové černé skříňky se záznamem naměřených dat z inerciálních senzorů.

Práce se ve své první kapitole snaží poskytnout čtenáři základní, ale podrobné informace z oblasti akcelerometrů a gyroskopů s možnostmi jejich praktických využití. Dále jsou v práci z důvodu uvedení do problematiky popsány využívané systémy souřadnic sloužící k orientaci v prostoru. Nechybí úvod do možnosti potlačování chyb měření a jejich eliminaci.

Součástí obsahu této diplomové práce je podrobný rozbor praktického hardwarového řešení, který je popsán ve druhé kapitole. Praktické řešení pojímá výběr vhodné platformy pro realizaci s možností bateriového napájení. Dále jsou zde rozebrány možnosti odesílání dat a jejich ukládání na paměťové médium. Samotný hardwarový návrh, inspirovaný na základě teoretických poznatků, je rozebrán v kapitole třetí.

Kapitola čtvrtá se systematicky a detailně zabývá softwarovým řešením. Je zde popsána struktura obslužného firmwaru, ale také jednotlivé použité knihovny. Závěrem práce je čtenář seznámen s praktickými výsledky.

Při postupu vypracování této diplomové práce byl kladen důraz na ucelenost, systematickост a výstižnost.

1 TEORETICKÝ ÚVOD

1.1 Využití inerciálních snímačů polohy

Gyroskopy, akcelerometry a magnetometry jsou snímače, které se využívají k detekování pohybu a orientace tělesa v prostoru. Od jejich vzniku (z jejich fyzické podstaty) již uplynula dlouhá doba, ovšem dnes se využívají především v elektronické podobě. S plynoucím časem jejich obliba neustále roste, jelikož se stávají finančně dostupnější. To přináší rozšíření použití do mnoha dříve nemyslitelných aplikací, jako například fotoaparáty, dálkové ovladače, aj.

Obecně se těmito senzory dá měřit zrychlení, náklon, pohyb, vibrace, orientace, apod. Jejich běžné využití se dříve nacházelo ve vojenském průmyslu, například pro navádění balistických raket, kde gyroskop pomáhal udržovat směr letu. Jiné použití mohlo sloužit v aplikacích leteckého průmyslu, nebo třeba k detekci seismické aktivity.

V posledních letech se jejich uplatnění běžně vyskytuje a využívá v automobilovém průmyslu, kde zastávají roli v elektronických stabilizačních systémech (systémy ESP, EZS, ABS), nebo v systémech odpalující airbagy.

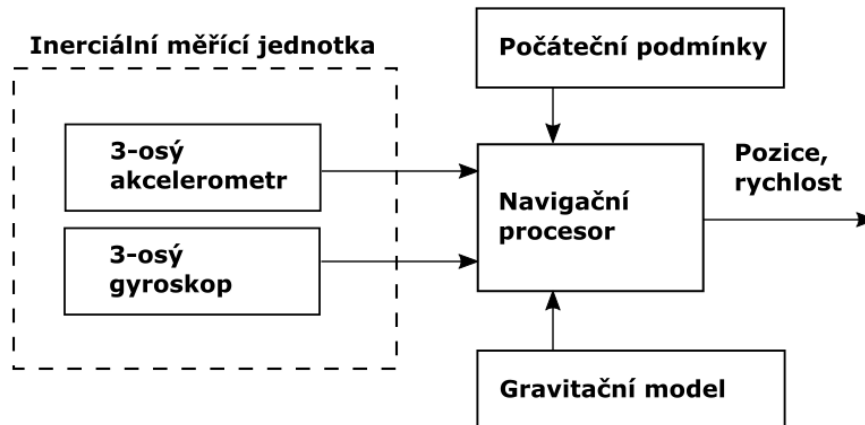
V dnešní době se akcelerometry, gyroskopy a magnetometry staly standardem každé GPS navigace, kde tyto elektronické mikrosnímače slouží společně s GPS přijímačem k upřesňování pohybu, tedy i pozice. Ilustrativním příkladem použití v oblasti navigací může být případ, kdy GPS přijímač ztrácí například v tunelu signál. Poté tuto přibližnou polohu určují pomocí výpočtu akcelerometry, gyroskopy a magnetometry pomocí techniky označované jako „dead reckoning“.

Dále se dnes tyto snímače polohy nejčastěji vyskytují v mobilních telefonech, kde slouží jako doplněk k GPS navigacím, ale převážně k zábavě. Neméně často jsou zastoupeny v digitálních fotoaparátech a kamerách, kde hrají zásadní roli při stabilizaci obrazu.

1.2 Inerciální snímače

Inerciálním snímačem se rozumí snímač využívající setrvačných vlastností. Jsou to již zmíněné akcelerometry a gyroskopy.

Tyto dva snímače se při určování polohy často využívají společně, kdy tvoří inerciální měřicí jednotku (IMU). Inerciální navigační systém (INS) je potom celek složený z inerciální měřicí jednotky a mikroprocesoru zpracovávajícího naměřená data, viz Obr. 1.1. [1]



Obr. 1.1: Inerciální navigační systém, převzato z [1]

Ovšem každý z těchto dvou snímačů má odlišnou funkci. Popis jejich odlišné funkce je specifikován v následujících kapitolách.

1.3 Lineární akcelerometry

Akcelerometr snímá zrychlení přímočarého pohybu. Pro zrychlení platí definiční vztah (1.1)

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2s_x}{dt^2}, \quad (1.1)$$

kde a_x je zrychlení podél osy x v $[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$, v_x je rychlost podél osy x v $[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ a s_x je dráha podél osy x v $[\text{m}]$. Z tohoto vztahu je možné odvodit si rychlost, kterou dostaneme první integrací zrychlení podle času t [s], případně dráhu, kterou dostaneme s pomocí druhé integrace zrychlení, podle času t .

Toto zrychlení je možné měřit buď jako statické, nebo dynamické.

Statické zrychlení

Je přítomné v soustavě, na kterou působí gravitační zrychlení (na Zemi $g = 9,81\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$). Výsledné tíhové zrychlení je vypočteno jako superpozice gravitačního zrychlení a odstředivého zrychlení (s opačnou orientací) způsobeného rotací Země. Toto odstředivé zrychlení je závislé na zeměpisné šířce a na nadmořské výšce. Na rovníku je největší a na pólech nejmenší, stejně tak ve větší nadmořské výšce je větší, než v menší nadmořské výšce. Kromě odstředivého zrychlení působí na tělesa i další síly jako přitažlivá síla Měsíce. Pro aplikaci této diplomové práce stačí posuzovat vliv pouze tzv. normálního tíhového zrychlení, bez ostatních vlivů, které jsou téměř zanedbatelné. Pomocí statického zrychlení je možné měřit například náklon [6], [8].

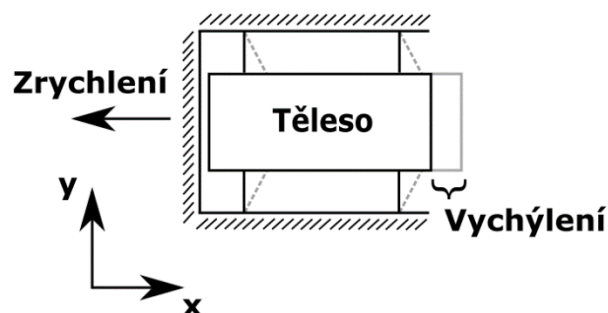
Dynamické zrychlení

Dalším typem zrychlení je zmíněné zrychlení dynamické. Dynamické zrychlení na rozdíl od statického je způsobeno jinými vlivy než tíhovým zrychlením. Zde se jedná pouze o zrychlení způsobená změnou rychlosti pozorovaného tělesa (nebo IMU). Pro získání dynamického zrychlení je nutné provést filtraci statického zrychlení. Tato filtrace spočívá v odečtu korekční konstanty rovné gravitační konstantě. Je zde ovšem nutné dodržet správnou orientaci pro odečet [8].

Konstrukce akcelerometrů

Gyroskopy a akcelerometry jsou v dnešní době dostupné ve vícero typech provedení, lišící se v konstrukci. Tyto odlišné konstrukce jsou způsobené postupným vývojem, kdy se během vývoje akcelerometrů vyvíjela také technika, technologie a materiály. V dnešní době jsou akcelerometry vyráběny v různých typech pouzder, různých velikostech, různé hmotnosti, různé ceně a různé přesnosti. Jejich fyzikální princip zůstává ovšem podobný [2].

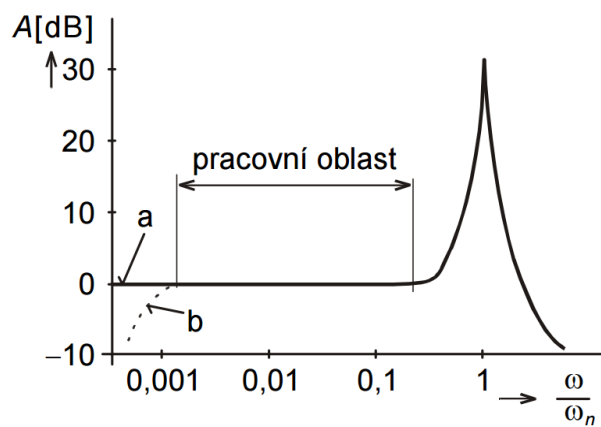
Základem akcelerometru je seismická hmotnost (setrvačný prvek) o hmotnosti m , dále pružina, na které je seismická hmotnost připevněna. Výchylka seismické hmotnosti je poté vůči základně akcelerometru vyhodnocována. Základní konstrukce akcelerometru je vyobrazena na Obr. 1.2.



Obr. 1.2: Princip akcelerometru, převzato z [2]

Tlumení akcelerometrů

Jednou z dalších součástí akcelerometru bývá určitý tlumící mechanismus, který má za úkol potlačit vlastní rezonanční kmitočet setrvačného prvku o hmotnosti m . Rezonance nastává za situace, kdy nucené kmity mají shodnou frekvenci s vlastními kmity seismické hmotnosti. Toto tlumení bývá realizované pomocí fyzických tlumičů, případně je využíváno tlumení vzduchem při pohybu hmoty. V případě malého tlumení se objevují překmity neúměrné budícím kmitům a zároveň dochází ke klesání maximální měřitelné frekvence zrychlení. Naopak v případě velkého tlumení dochází k neúměrnému zvyšování fázového posuvu. V praxi je ovšem toto tlumení do značné míry neúčinné, proto jsme při měření kmitavého pohybu omezeni na určitý rozsah frekvencí. Znázorněno na Obr. 1.3 [7].



Obr. 1.3: Amplitudová frekvenční charakteristika akcelerometru, převzato z [7]

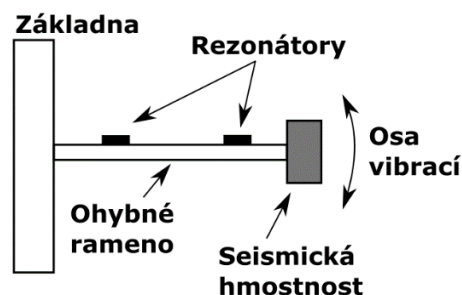
1.3.1 Dělení akcelerometrů dle provedení

Mechanické

Mechanické akcelerometry jsou charakteristické tím, že je tvoří vždy určité hmotné těleso umístěné na pružině. Měření poté spočívá ve vychylování hmotného tělesa, které je přímo úměrné velikosti zrychlení. V tomto případě je zde k výpočtu zrychlení možné využít druhý Newtonův pohybový zákon $F = ma$, kde F je síla v [N], m je hmotnost v [kg] a a je zrychlení v [m.s⁻²] [3], [6].

Solid-state

Solid-state akcelerometry mohou být děleny do mnoha podskupin, jako třeba vibrační, křemíkové, nebo využívající povrchovou akustickou vlnu (SAW). Jejich výhodou jsou malé rozměry, spolehlivost a odolnost [3].



Obr. 1.4: Akcelerometr s povrchovou akustickou vlnou, převzato z [3]

SAW akcelerometry jsou tvořené ohebným ramenem (z piezoelektrického substrátu), na kterém jsou napařeny rezonátory. Na jednom z konců ramene se nachází základna a na opačném konci seismická hmotnost. Princip činnosti spočívá v tom, že při vibracích v požadovaném směru dochází k ohybu ramena, čímž se mění frekvence vybuze akustické vlny mezi rezonátory. Poté už jen stačí měřit a zpracovávat naměřenou frekvenci. Popisovaný SAW akcelerometr je znázorněn na Obr. 1.4 [3].

MEMS

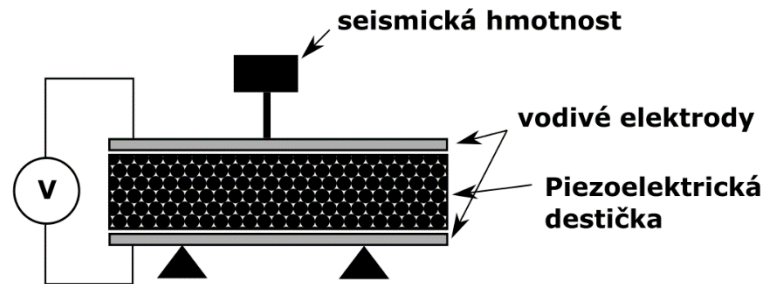
Rozebráno v kapitole 1.5.1.

1.3.2 Dělení akcelerometrů dle principu snímání zrychlení

Piezoelektrické akcelerometry

Jedná se o akcelerometry využívající piezoelektrický materiál. Tento materiál, jak je již známo, vykazuje při své deformaci elektrický náboj. Zmíněný jev se nazývá piezoelektrický jev. Piezoelektrická destička je na jedné své straně připevněná k základně akcelerometru, a na druhé své straně obsahuje napařenou seismickou hmotu o hmotnosti m , která způsobuje setrvačnost (viz Obr. 1.5). Otřesy akcelerometru způsobují vlivem

setrvačnosti tlak na popisovanou piezoelektrickou destičku, která následně na svém povrchu generuje elektrický náboj úměrně velký své deformaci. Vygenerovaný náboj se následně pomocí zesilovačů zesiluje. Poté mohou následovat další obvody zpracovávající naměřené napětí. Důležité přitom je, aby vstup převodníku měl vysokou vstupní impedanci, jelikož piezoelektrický krystal je měkkým zdrojem napětí [4], [9].



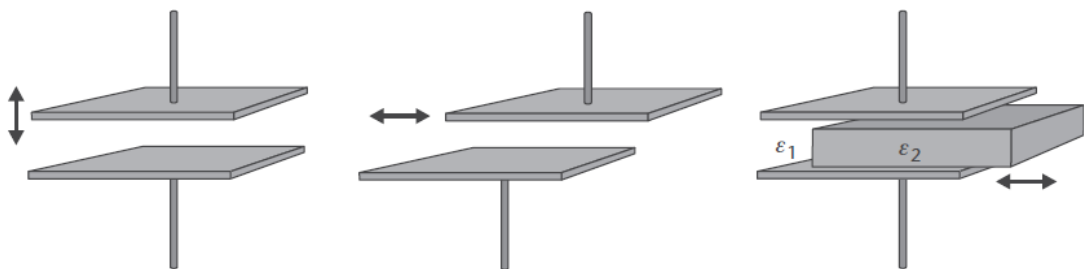
Obr. 1.5: Princip piezoelektrického akcelerometru, převzato z [4]

Piezorezistivní akcelerometry

U tohoto typu akcelerometrů se nevyužívá piezoelektrického náboje vygenerovaného v důsledku deformace piezoelektrického krystalu. Zde se využívá především vlastnosti, kdy krystal vykazuje piezorezistivní jev. K tomuto jevu dochází v případě deformace krystalu a projevuje se změnou odporu na napařených elektrodách. Změna odporu se detekuje například pomocí Wheastonova mostu. Výhodou toho typu snímače je možnost měřit kmity s velmi malým kmitočtem (řádově od 0 Hz) nebo velký frekvenční rozsah [9].

Kapacitní akcelerometry

Existuje více typů konstrukcí kapacitních akcelerometrů. Prvním typem je případ, kdy akcelerometr obsahuje sadu jedné nebo i více pevných elektrod, fixovaných k pouzdru součástky. Druhá elektroda je pohyblivá a slouží ke snímání otřesů. Jiným typem může být akcelerometr, u kterého se využívá pohyblivého dielektrika. Jednotlivé konstrukce popisovaných principů s pohyblivou deskou a pohyblivým dielektrikem jsou znázorněny na Obr. 1.6 [4].



Obr. 1.6: Konstrukce kapacitních akcelerometrů, převzato z [4]

1.4 Gyroskopy

Jak již bylo naznačeno v kapitole 1.1, gyroskopy sehrály výraznou roli v oblasti navigace. Na rozdíl od akcelerometrů, které měří zrychlení podél určité osy, gyroskopy měří úhlovou rychlost. Úhlová rychlost udává informaci o tom, jak se objekt rychle otáčí. Definice úhlové rychlosti je následující (1.2):

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}, \quad (1.2)$$

kde ω je okamžitá úhlová rychlost v [rad.s⁻¹], θ je úhlová poloha v [rad] a t je čas v [s]. Tato úhlová rychlost se vztahuje ke konkrétním osám rotace, obdobně jako je to u akcelerometrů (kde se zrychlení posuzuje podél konkrétní osy) [6], [1].

Aplikace gyroskopů [12] je nejběžnější u:

- gyrokompasů
- umělých horizontů
- zatačkoměrů
- stabilizace raket a torpéd
- stabilizace kamer
- a mnoha dalších aplikací

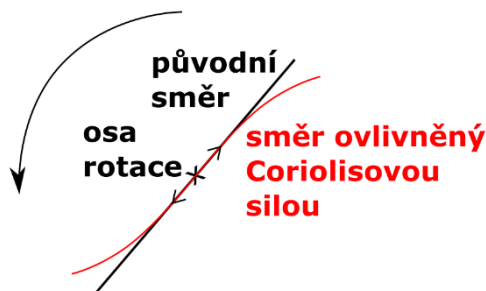
Coriolisova síla (Coriolisovo zrychlení)

Coriolisova síla je tzv. virtuální síla, která působí na libovolný hmotný předmět či objekt, který se pohybuje rychlostí v v soustavě rotující kolem osy rotace úhlovou rychlostí ω [14]. Pro Coriolisovu sílu platí vztah

$$\vec{F}_c = 2m\vec{v} \times \vec{\omega}, \quad (1.3)$$

kde F_c je Coriolisova síla, m je hmotnost tělesa [kg], v je vektor rychlosti tělesa [m.s⁻¹] a ω je vektor úhlové rychlosti otáčící se soustavy [rad.s⁻¹] [14].

V praktickém životě je možné se s Coriolisovou silou setkat například u vodního (větrného) víru, u kterého dochází vlivem této síly k pravotočivé rotaci (na severní polokouli Země), případně k levotočivé rotaci (na jižní polokouli Země). Grafické znázornění vlivu popisované síly se nachází na Obr. 1.7.

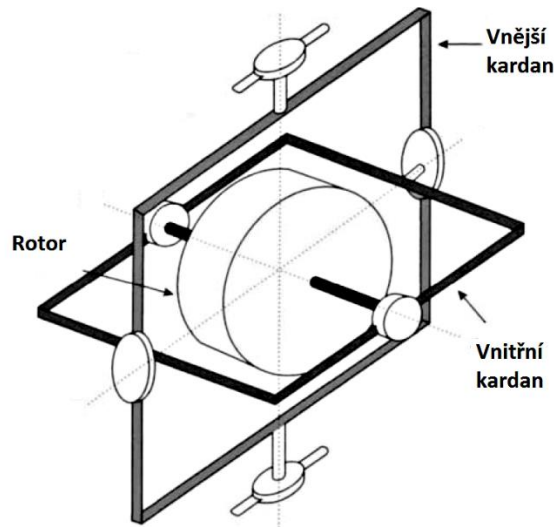


Obr. 1.7: Směr výstřelu ovlivněný C. silou na severní polokouli, převzato z [15]

1.4.1 Dělení gyroskopů dle provedení

Mechanické

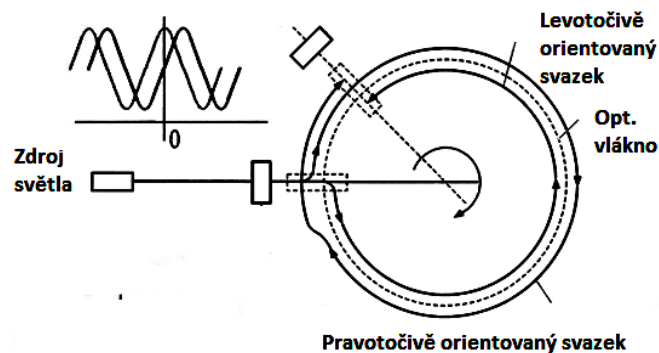
Konvenční mechanický gyroskop se skládá z rotoru (o určité hmotnosti m), zavěšeného na kardanových závěsech (znázorněno na Obr. 1.8). Roztočený rotor má tendenci zachovat si polohu své osy rotace, vůči prostoru. Toto zachování osy rotace při pohybu mechanického gyroskopu umožňují právě kardanové závěsy, které jsou uloženy pohyblivě [1].



Obr. 1.8: Mechanický gyroskop, převzato z [5]

Optické (FOG)

Jedná se o skupinu gyroskopů využívajících k měření úhlové rychlosti interferenci světla. Skládá se z cívky optického vlákna a světelného zářiče (laseru). Laserový svazek je rozdělen do dvou cest, přičemž každá z cest je vedena optickým vláknem z opačného konce. Mechanická rotace cívky z optického vlákna způsobuje fázový posuv mezi oběma svazky laseru. Následně se tyto dva laserové svazky opět promítnou na společné stínítko. Jejich fázový rozdíl způsobuje interferenční obrazce, ze kterých se dále vyhodnocuje žádaná úhlová rychlost, viz Obr. 1.9.



Obr. 1.9: Optický gyroskop (FOG) , převzato z [13]

MEMS

Rozebráno v kapitole 1.5.2.

1.5 MEMS technologie

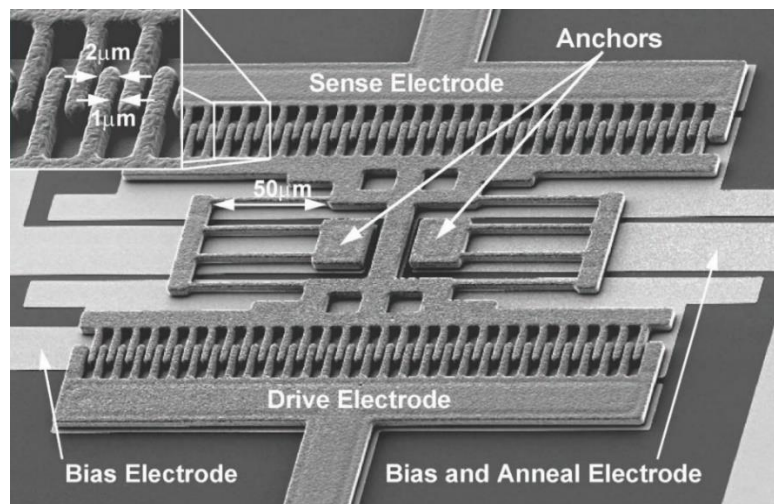
Zkratka MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) s sebou nese současně označení technologie výroby a současně označení produktů touto technologií vytvořených. Jedná se poměrně o novou technologii, kterou v dnešní době podpořila úroveň miniaturizace, úroveň technologických postupů a znalost materiálů. Její vývoj se ovšem zdaleka neblíží konci. Tato technologie je implementací miniaturních mechanických struktur do jediného pouzdra společně s elektronikou. Tato elektronika většinou slouží k digitalizaci naměřené analogové veličiny, filtraci, případně dalšímu zpracování.

MEMS senzory se staly v dnešní době velmi oblíbenou elektromechanickou součástí. Její obliba je způsobena zejména širokou rozmanitostí různých typů senzorů, určených převážně ke snímání různých typů fyzikálních veličin. Tím hlavním důvodem její oblíbenosti je ovšem miniaturizace soustav měřící fyzikální veličiny, jejich výsledná cena (v poslední době) a malá spotřeba elektrické energie [4], [10]. Své uplatnění nacházejí v následujících odvětvích:

- elektroprůmysl
- strojírenství, medicína
- letectví
- automobilový průmysl
- vojenský průmysl

Jejich typické aplikace mohou být například [4], [10]:

- tlakové senzory
- senzory proudění
- inerciální snímače
- rezonátory (vyobrazeno na Obr. 1.10)



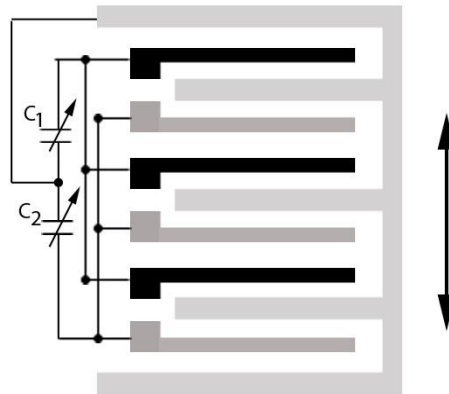
Obr. 1.10: Zvětšená struktura rezonátoru MEMS, převzato z [11]

1.5.1 MEMS akcelerometry

Princip měření MEMS akcelerometrů je založen na proměnlivé kapacitě tříelektrového deskového kondenzátoru, u kterého dielektrikum tvoří vzduch. Využívá se zde nelineární závislosti kapacity na vzdálenosti elektrod [16]. Tuto kapacitu je možné popsat vzorcem (1.4)

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d}, \quad (1.4)$$

kde C je kapacita ve [F], ε_0 je permitivita vakua [$\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$], ε_r je relativní permitivita [$\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$], S je plocha elektrod [m^2] a d je vzdálenost elektrod [m]. Konstrukce měřících kapacitorů je taková, že středová elektroda je ukotvena pohyblivě a tedy i závislá na zrychlení, viz Obr. 1.11 [17].



Obr. 1.11: Kapacitní struktura MEMS akcelerometru, převzato z [18]

Výše popisovaný akcelerometr měří zrychlení pouze v jednom směru (v jedné ose). Pro vznik akcelerometru, který měří ve dvou osách, je nutné přidat další dílčí strukturu akcelerometru, tentokrát pootočenou o 90° . Dnešní akcelerometry jsou běžně tříosé. U nich je nutné aplikovat jednu strukturu výškově pohyblivou.

Podstatnou úlohou je zajistit lineární a nezbytně citlivý převod zrychlení na mechanický posuvný pohyb. Ten totiž určuje výslednou měřitelnou dynamiku akcelerometru. Nosníková struktura (společně s pružnými elementy) je tvořena za pomoci leptání polykrystalického křemíku. Postupem času dochází k protahování délky elektrod, což má za následek zvyšování odstavu signálu od šumu, a tedy i zvyšování citlivosti.

Naměřená kapacita bývá převáděna na napětí pomocí metody spínaných kondenzátorů, řízených číslicovou logikou a generátorem spínacího hodinového signálu. Napětí je následně filtrováno a linearizováno (s ohledem na kompenzaci teploty). Výsledkem je definovaná převodní konstanta, která udává poměr změny mezi výstupním napětím a změnou zrychlení (jednotka [g/V]).

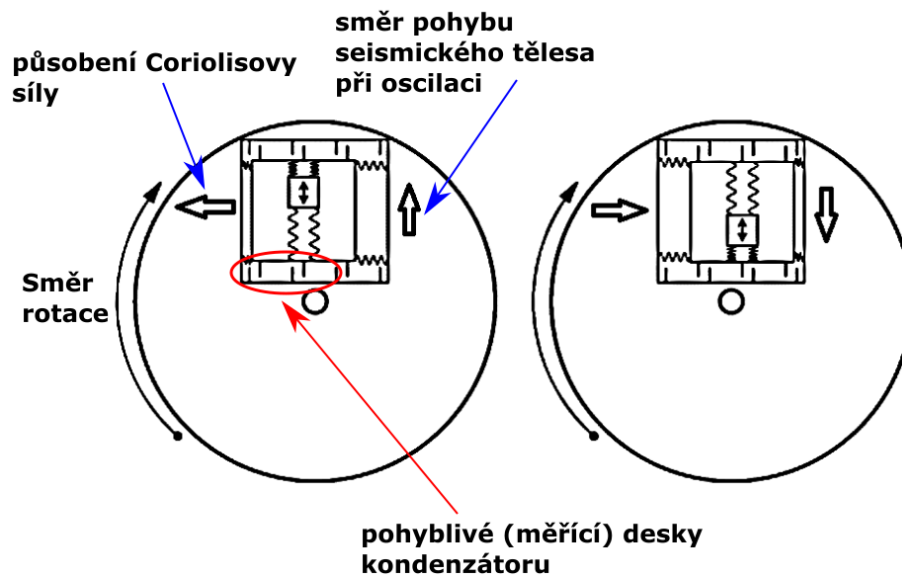
1.5.2 MEMS gyroskopy

Co gyroskopy měří a jak se dělí, bylo již popsáno v kapitole 1.4. Následující kapitola je zaměřena na gyroskopy tvořené technologií MEMS. Předem je dobré zmínit, že jednotlivé konstrukce gyroskopů se u různých výrobců mohou mírně lišit, ovšem princip zůstává velmi podobný.

Vibrační (CVG) gyroskopy

Obecně se využívá mechanicky rezonující struktura (těleso) o určité hmotnosti umístěná pomocí pružin v pevném mechanickém rámu (pouzdrě). Pokud se začne s takovou strukturou otáčet, ovšem kolmo vůči vibracím, začne na toto pohybující se těleso působit Coriolisova síla. Ta je úměrná úhlové rychlosti otáčení. Jak je vidět na Obr. 1.12, tak při pohybu (vibrující) soustavy od vnitřního okraje kružnice směrem k vnějšímu okraji a současnému otáčení celého systému doprava, dochází k působení Coriolisovy síly směrem doleva. Tuto polohu zaznamenává snímač pracující na principu deskového kondenzátoru. [14], [4]

V opačném případě, pohybuje-li se (vibrující) soustava z vnějšího kraje, směrem k vnitřnímu okraji kružnice, ovšem se zachovaným směrem otáčení (tedy doprava) tohoto snímače, dochází k působení Coriolisovy síly směrem doprava.



Obr. 1.12: Princip činnosti MEMS gyroskopu, převzato z [14]

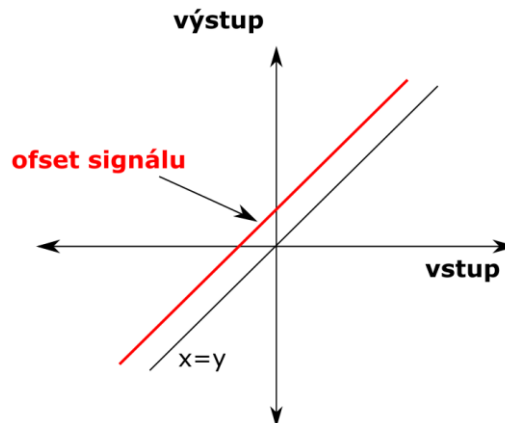
Princip měření polohy (kapacity) je podobný jako v případě MEMS akcelerometrů (popsáno v kapitole 1.5.1).

1.6 Chyby inerciálních snímačů

Oba typy snímačů (akcelerometr i gyroskop) podléhají zdrojům chyb. Nevýhodou u inerciální navigace je to, že se jednotlivé zdroje chyb obou snímačů sčítají a výsledná velikost chyby roste s časem (měří relativně). Právě pro aplikace navigace hrají tyto chyby nejpodstatnější roli. Zde je nutné chyby identifikovat a zohlednit při výpočtech. Kvalitním řešením je k INS doplnění GPS přijímače. V případě využití inerciálních snímačů k účelům detekce, kde nehraje roli kumulativní chyba, není třeba věnovat těmto chybám takovou pozornost.

Ofset nuly, stabilita nuly (Constant Bias, Bias Stability)

Bias (posunutí nuly, ofset) gyroskopu nebo akcelerometru odpovídá průměrné výstupní hodnotě v případě, kdy na gyroskop nebo akcelerometr nepůsobí žádná rotace, příp. zrychlení. Tato chyba se přičítá v celém měřicím rozsahu, jedná se tedy o deterministickou (popsatelnou) chybu (viz Obr. 1.13) [1], [3].



Obr. 1.13: Constant bias error, převzato z [18]

Poznačíme-li velikost této chyby písmenem řecké abecedy ε , můžeme napsat, že platí následující vztah

$$\theta(t) = \varepsilon \cdot t, \quad (1.5)$$

kde $\theta(t)$ je odchylka (úhlu/polohy) způsobená chybou constant bias po určitém čase t . Je zřejmé, že uvedenou chybu, pokud ji ovšem známe, můžeme při výpočtu kompenzovat odečtem, nebo kalibrací. [1], [3]

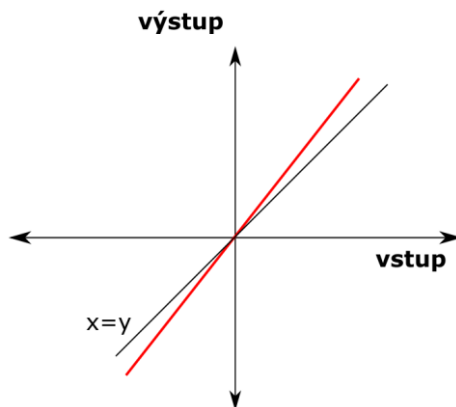
V případě gyroskopu se bias vyjadřuje pomocí jednotky ($^{\circ}/h$), příp. ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$). U akcelerometru se vyjadřuje obdobně pomocí jednotky ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$), nebo (mg). [1]

V některých případech, pokud je vyžadována informace o dynamickém zrychlení, můžeme označovat za chybu constant bias tíhové zrychlení Země.

Bias stability popisuje „proměnnost“ chyby constant bias.

Scale Factor

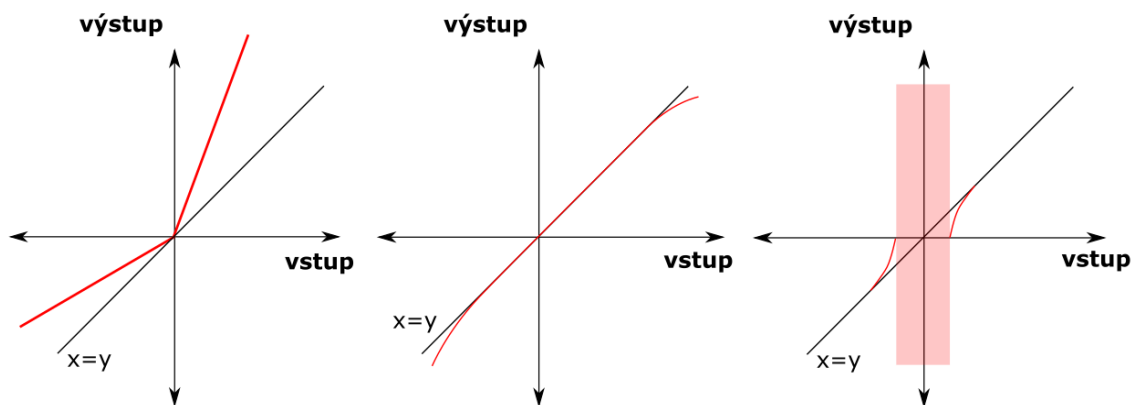
Jedná se o chybu měřítka projevující se nepoměrnou hodnotou mezi vstupem a výstupem. Mění strmost přímky převodní charakteristiky (Obr. 1.14). Jelikož se jedná jako v případě chyby „constant bias“ o deterministickou chybu, je možné ji opět eliminovat pomocí korekce. [1]



Obr. 1.14: Scale Factor error, převzato z [18]

Obdobnou chybou by mohla být chyba asymetrie. Ta se může projevovat při průchodu nulou převodní charakteristiky. Strmost křivky pro záporné vstupní hodnoty má potom jiný úhel sklonu, než strmost pro kladné hodnoty (viz Obr. 1.15). [18]

Další projevy chyby „scale factor“ mohou být chyby linearity, případně „dead zone“ (viz Obr. 1.15). [18]



Obr. 1.15: Chyba asymetrie (a), chyba linearity (b), dead zone (c) , převzato z [18]

Šum

Jedná se o aditivní šum, který na rozdíl od předchozích případů chyb inerciálních snímačů není deterministický, ale stochastický. To znamená, že je obtížnější ho potlačit, jelikož není zcela popsitelný. Pokud má nulovou střední hodnotu, je možné jej průměrovat [3]. Tyto chyby snímačů jsou významné pouze při měření velmi nízkých hodnot v určitém měřícím rozsahu. Při této situaci může šumové pozadí překrývat užitečné vibrace (nebo natočení), které chceme detekovat.

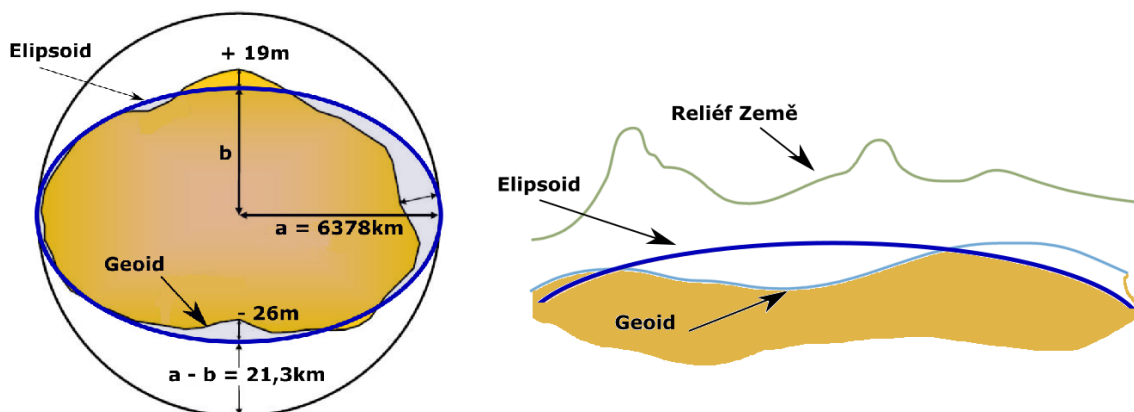
1.7 Orientace v prostoru

Proto, aby bylo možné přesně definovat polohu (případně i orientaci) libovolného bodu v prostoru, je nutné zavést pojem souřadnicové systémy. Aby měly souřadnicové systémy nějaký smysl, je třeba zvolit určitý referenční bod (někdy označovaný jako počátek soustavy souřadnic), ke kterému se budou vztahovat.

První možností umístění referenčního bodu je do středu Země. Druhou volbou je umístění počátku soustavy souřadnic do libovolného bodu prostoru a následně zvolenou polohu popisovat vůči němu. Toto řešení je v rámci inerciální navigace vhodné pouze pro plochy menších ploch, u kterých se tolik neuplatňuje zakulacení země.

Tělesa nahrazující Zemi

V případě aplikace souřadnicového systému na Zemi (s počátkem umístěným jejího středu) je nutné si uvědomit, že Země není přesně kulatá, ale zploštělá na pólech. Pro co nejvyšší přesnost lokalizace se nahrazuje matematickým modelem. Zde je žádoucí, aby se matematicky popsatelný model co nejvěrněji podobal jejímu skutečnému tvaru. Takovému tvaru odpovídá nejvíce geoid (vyobrazen na Obr. 1.16). Geoid je definován v každém bodě Země jako množství plošek kolmých k tíhovému zrychlení. Zjednodušeně řečeno, geoid odpovídá klidné střední hladině oceánů [21].



Obr. 1.16: Elipsoid, geoid, reliéf Země, převzato z [19] a [20]

Ovšem popisovaný geoid je velmi těžce matematicky popsatelný, proto se pro souřadnicové systémy nahrazuje rotačním elipsoidem (trojrozměrný). Ten vzniká rotací elipsy (dvojměrné) kolem jedné z její poloos (malá poloosa), přičemž tato poloosa se překrývá s rotační osou země. Velká poloosa je přitom totožná s rovinou rovníku [22].

1.7.1 Počátek soustavy souřadnic

Jak již bylo zmíněno v předchozích odstavcích, pro popis poloh v prostoru je nezbytné určit počátek soustavy souřadnic. Může jím být střed Země, nebo libovolný bod v prostoru. V případě volby jiného počátku soustavy souřadnic než ve středu Země, nazveme tento systém za lokální souřadnicový systém.

1.7.2 Soustavy souřadnic

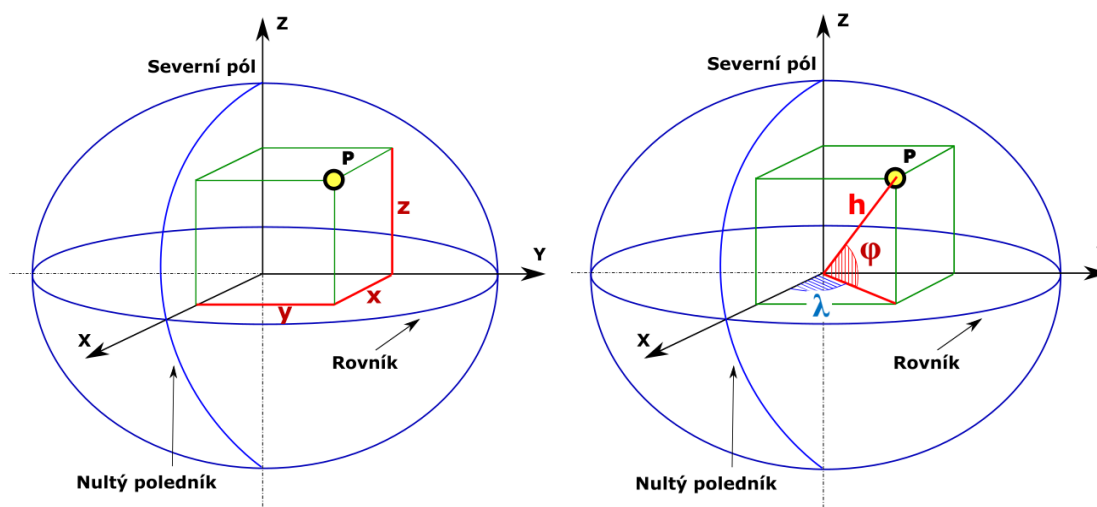
Kartézská soustava souřadnic

Jedná se pravouhlý pravotočivý systém se třemi navzájem kolnými přímkami (osami x , y , z) s jedním společným bodem v počátku. V případě aplikace soustavy na Zemi je osa z rovnoběžná s osou rotace Země a osa x prochází základním nultým poledníkem. Osa y je poté volena tak, aby systém byl pravouhlý, přičemž počátek se volí ve středu Země (viz Obr. 1.17 (a)). Bod P se nachází na $P = [x, y, z]$.

Geodetické souřadné soustavy

Tato soustava vychází z polární souřadnicové soustavy (2D), kde polohu bodu určuje vzdálenost od počátku, společně s úhlem měřeným od zvolené osy. Její 3D obdobou je sférická souřadnicová soustava (definovaná dvěma úhly určující polohu na kulové ploše a vzdáleností od středu), zobrazeno na Obr. 1.17 (b). Bod P se nachází na $P = (h, \varphi, \lambda)$, kde:

- h (altitude) - značí nadmořskou výšku
- φ (latitude) - značí zeměpisnou šířku
- λ (longitude) - značí zeměpisnou délku



Obr. 1.17: Definice souřadnic kartézských (a), geodetických (b)

1.7.3 Převod mezi kartézskou a geodetickou soustavou

Mezi kartézskými a polárními souřadnicemi pro polohu platí následující převodní vztahy:

$$x_P = (\rho_P + H_P)\cos\varphi_P\cos\lambda_P, \quad (1.6)$$

$$y_P = (\rho_P + H_P)\cos\varphi_P\sin\lambda_P, \quad (1.7)$$

$$z_P = [(1 - e^2)\rho_P + H_P]\sin\varphi_P, \quad (1.8)$$

kde e je excentricita (výstřednost) referenčního elipsoidu, ρ_P je příčný poloměr křivosti elipsoidu závisující na zeměpisné šířce dané polohy pro bod. H_P je vzdálenost bodu od počátku (pro Obr. 1.16 (b) platí $H_P = h$). Úhel φ [°] a λ [°] je zřejmý z Obr. 1.16 (b).

Pro excentricitu platí:

$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \quad (1.9)$$

Kde b v [m] značí vedlejší poloosu a a v [m] značí hlavní poloosu.

Pro příčný poloměr křivosti platí:

$$\rho_P = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2\varphi_P}} \quad (1.10)$$

Převzato z: [22], [23]

1.7.4 Vztažné soustavy

Vztažná soustava slouží nejčastěji k označení takové soustavy, vůči které budeme tělesa pozorovat (nebo jiné objekty), a současně která jsou v klidu nebo v pohybu. Jinak řečeno, vztažné soustavy slouží k určení referenčního bodu (prostoru), vůči kterému je sledovaný objekt nebo bod pozorován. Proto se také často označuje jako referenční soustava.

1.8 Potlačení chyb měření

1.8.1 Korekce deterministických chyb MEMS senzorů

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.6, jedná se o chyby dobře matematicky popsitelné. Mohou to být chyby constant bias (chyba offsetu), chyba lineariry, chyba převodní charakteristiky, chyba ortogonaliry (vyosení snímače vůči DPS), atd.

Způsobů jak potlačit zmíněné chyby existuje mnoho. Nejjednodušším způsobem jak tento typ chyb eliminovat je kalibrace. Ta spočívá ve vystavení senzorů různým testům, které mají za cíl tyto deterministické chyby odhalit a jednoznačně charakterizovat.

Kalibraci gyroskopů je možné (a dobré) provádět na rotačním stole, u kterého je známa přesná hodnota úhlové rychlosti (rychlosti otáčení) a natočení. Tento test se vykonává pro levotočivý i pravotočivý směr otáčení.

U akcelerometrů je situace obdobná. Zde je typická aplikace šestipozičního statického testu. Zmíněný test se zakládá na umístění senzoru na vodorovný povrch, při všech konfiguracích orientace. V případě jednoosého akcelerometru se akcelerometr umístí na vodorovný povrch tak, aby jeho osa byla podélně orientovaná vůči orientaci vektoru gravitačního zrychlení. Tato kalibrace se provede pro kladnou i zápornou orientaci osy. Je zřejmé, že pro tříosý senzor je poloh celkem šest.

Dalším typickým příkladem deterministických chyb je teplotní závislost snímačů. Ta může u levnějších variant způsobovat drift až 1 m/s (v případě akcelerometrů), nebo 5 °/s (v případě gyroskopů). V praxi se aplikují dva nejčastější testy, které mají za úkol tyto teplotní závislosti dokumentovat. Prvním z nich je test označovaný jako „Soak Method“. Při této metodě se snímač umístí do teplotní komory s ustálenou teplotou a měří se hodnota na výstupu (měření závislosti chyb Constant Bias a Bias Stability na teplotě). Druhou metodou je „Ramp Method“, při které se snímač vloží do teplotní komory a lineárně se mění jeho teplota. Výsledkem může být charakteristika závislosti zrychlení na teplotě [24], [25], [26], [40].

Následně se provádí samotná korekce chyb. Tyto korekce je nejvýhodnější řešit softwarově pomocí matematického přepočtu.

1.8.2 Korekce stochastických chyb MEMS senzorů

Stochastické (nahodilé a nepředvídatelné) chyby, které lze popsat pouze pomocí pravděpodobností, jsou na rozdíl od deterministických chyb hůře odstranitelné. Zde není možné provádět přepočty podle předem daných pravidel jako v předchozí situaci. Stochastické chyby je možné eliminovat opakovaným měřením a průměrováním (v případě takových chyb, které mají svojí povahou nulovou střední hodnotu). Toto řešení je ovšem v aplikaci inerciální navigace nevýhodné, jelikož měření v praktických aplikacích nebývá opakovatelné.

Další způsob korekce takto poškozeného signálu může být filtrace. Cílem je potlačení chyb pomocí odhadu aktuálního stavu. Odhadem může být chápána volba nejlepšího (optimálního) bodu v prostoru s ohledem na určitá kritéria. Odhad může vycházet z fúze dat přídavných senzorů.

1.8.3 Kalmanův filtr

V roce 1960 byl prezentován R. E. Kalmanem, ovšem od té doby je stále mnohokrát zdokonalován. Kalmanův filtr je jeden z hlavních nejpoužívanějších filtračních algoritmů využívající se v oblasti navigace. Je využíván v oblasti satelitní navigace k upřesňování polohy a vyhlazování pohybu, dále například v oblasti inerciálních snímačů ke kalibraci a filtraci naměřeného signálu, nebo třeba k integraci (fúzi) mezi INS a GNSS, atp.

Kalmanův filtr se dá považovat spíše za predikční (estimační) algoritmus. Zásadní roli při filtraci signálů hraje totiž odhad stavu dynamického systému směrem do budoucnosti. Filtr je určený zejména pro systémy, ve kterých je možné modelovat šum bílým Gaussovským šumem. [1]

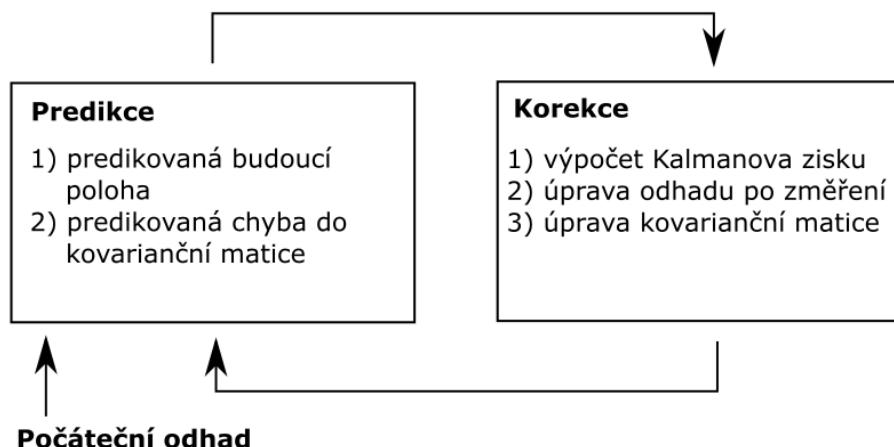
Kalmanův filtr pracuje ve dvou krocích [27]:

1. Predikce
2. Korekce

V prvním kroku predikuje příští pravděpodobnou (očekávanou) hodnotu měřeného modelu (odhad stavu).

Ve druhém kroku je odečtená reálná naměřená hodnota, kterou následně algoritmus porovnává s predikovanou hodnotou (z prvního kroku).

Na základě tohoto porovnání je stanovena důvěryhodnost (kvalita) odhadu a vypočtena nová hodnota. Z důvěryhodnosti je vypočten Kalmanův zisk. Cílem je predikovat hodnoty, které budou co nejbližší k naměřeným hodnotám. Pokud se již stane a hodnoty jsou si velmi blízké, tak je vysoce pravděpodobné, že naměřený stav odpovídá realitě. Výsledkem je potom odhad polohy (trajektorie) získaný na základě změřených zašuměné hodnoty a její predikce. Podrobněji znázorněno na Obr. 1.18: Princip Kalmanova filtru.



Obr. 1.18: Princip Kalmanova filtru, převzato z [28]

2 ROZBOR ŘEŠENÍ INERCIÁLNÍ NAVIGAČNÍ JEDNOTKY

2.1 Koncept návrhu regulátoru

Před realizací praktického řešení HW části je nutné zvážit všechny požadavky, které vyplývají ze zadání této diplomové práce a také z teoretického úvodu. Pro připomenutí se jedná o vyčítání dat z MEMS senzorů, ukládání naměřených hodnot na vhodné paměťové médium (pro pozdější offline zpracování) a současné odesílání naměřených dat do počítače v reálném čase.

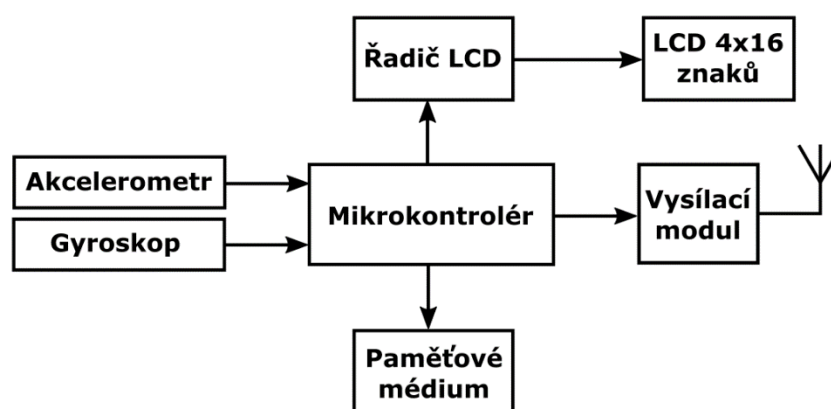
Při rozboru řešení bylo rozhodnuto, že by bylo dobré, kdyby mimo požadavky ze zadání projektu byla inerciální navigační jednotka schopna bateriového napájení. Toto bateriové napájení způsobí patřičnou unifikaci celého zařízení, jelikož zařízení nebude nutné napájet přes kabel s omezeným dosahem.

Dále bylo uvažováno o užitečnosti nějakého optického indikátoru, který by sloužil k zobrazování naměřených a případně vypočtených hodnot.

Navrhovaná inerciální navigační jednotka musí obsahovat následující komponenty:

- MEMS senzory (akcelerometr a gyroskop) měřící zrychlení
- obvody zpracovávající tyto naměřené fyzikální veličiny
- mikrokontrolér realizující obsluhu MEMS senzorů, filtraci naměřených hodnot, zápis na paměťové médium, zápis na displej a obsluhu vysílacího modulu
- vysílací modul
- paměťové médium
- LCD displej s řadičem
- bateriové napájení s nabíjecím obvodem, viz další kapitoly

Takový koncept návrhu s jeho vnitřním propojením je vidět na Obr. 2.1.



Obr. 2.1: Návrh blokového schématu INU

2.2 Volba vodné platformy pro realizaci

Při volbě vhodného hardwaru je na výběr z několika variant.

První variantou je návrh a následná konstrukce jednoúčelového embedded systému, obsahující periferie vhodné pouze pro realizaci inerciálního navigačního systému. Výhodou takovéto realizace je nepochybně možnost volby vlastních komponent, kterých je dnes na trhu celá řada. Další výhodou je zajištění velikost výsledného provedení, výsledná účelnost a cena.

Dnešní trh poskytuje velké množství výrobců MEMS senzorů, jako jsou například poměrně dominantní Freescale Semiconductor, STMicroelectronics a Analog Devices. Z těch méně dominantních by to mohli být Kionix, aj. Přičemž každý výrobce vyrábí mnoho variant těchto senzorů, lišící se v parametrech a cenách.

Stejný případ nastává pro volbu mikrokontroléru. Tato volba by mohla být ještě obtížnější, jelikož zde je navíc možnost vybírat mezi různými architekturami. Pro účel konkrétní aplikace v inerciální navigační jednotce se spíše nabízí mikrokontrolér s architekturou ARM, který disponuje šířkou datové sběrnice 32 bitů. To zejména proto, že rychlé zpracování signálů a současná filtrace může být výpočetně náročné. V tomto případě se nabízejí dominantní výrobci vyrábějící 32 bitové procesory, jako např. Freescale, Atmel, nebo ST.

Druhou variantou je namísto konstrukce vlastního zařízení volba některého z vývojových kitů. Tyto vývojové kity se liší v obvodech periférií, které již bývají jejich běžnou součástí. Těmito perifériemi mohou být tlačítka, LED diody, displeje, integrované programátory/debugery, kapacitní snímače, různé převodníky a MEMS senzory.

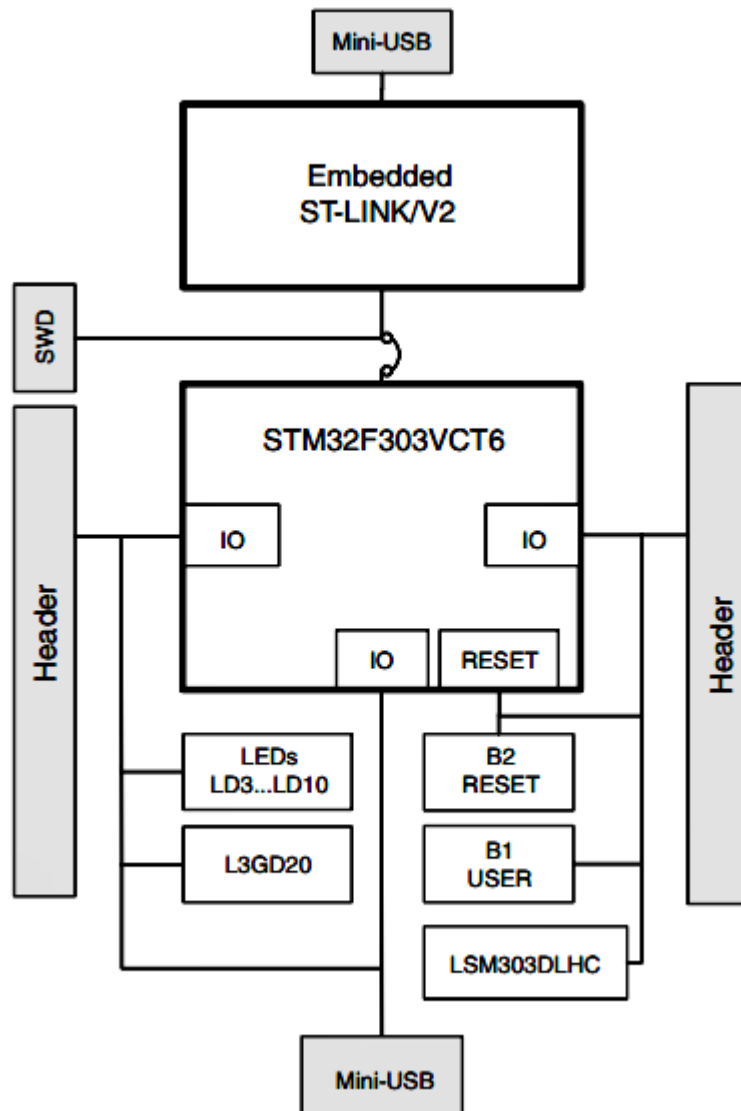
Toto řešení v sobě nese výhody v podobě univerzality a komplexnosti. Přidání dalších obvodů je velmi rychlé a jednoduché, možné pomocí vyvedených vstupně výstupních pinů. Ovšem spolu s výhodami je tato možnost postížena řadou nevýhod. Takovými je nadbytečnost některých (nevyužívaných) komponent (obvodů), nemožnost volby vlastních obvodů (další obvody pouze mimo desku), velikost samotného HW a cena.

Výrobců zabývajících se vývojovými kity s integrovanými MEMS senzory, je opět celá řada. Zde se nabízí velmi používané vývojové prostředí firmy Freescale FRDM-KL25Z. Vzhledem k tomu, že zmíněná vývojová deska neobsahuje MEMS senzory, je nutné tento kit opatřit jednou z nadstavbových destiček. Jedná se o FRDM-FXS-9AXIS, FRDM-FXS-MULTI a FRDM-FXS-MULTI-B. První z variant obsahuje minimum periférií (pouze gyroskop a akcelerometr), poslední z variant obsahuje navíc barometr, magnetometr, Bluetooth a mimo jiné i baterii určenou k bateriovému napájení. Další z možných výrobců vývojových kitů vhodných k realizaci práce je STMicroelectronics, který nabízí integrované MEMS senzory přímo na základním kitu.

Po konzultaci s vedoucím práce bylo zvoleno vývojové prostředí STM32F3 DISCOVERY. S ohledem na to, že tento vývojový kit neobsahuje všechny periferie vyžadované z požadavků zadání práce, je nutné vytvořit externí platformu s vhodnou konektivitou, obsahující ostatní vyžadované periferie.

2.3 Vývojový kit STM32F3Discovery

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole (2.2), pro realizaci INU byl vybrán vývojový kit od firmy STMicroelectronics, a to STM32F3Discovery (viz Obr. 2.2). Jeho součástí je programátor/debugger ST-LINK/V2 schopný programovat přes SWD rozhraní. Procesor, ostatní periferie a možnosti jeho napájení jsou rozebrány v následujících kapitolách.



Obr. 2.2: Vývojový kit STM32F3Discovery, převzato z [30]

2.3.1 Mikroprocesor

Zvolený kit je založen na procesoru STM32F303VC. Jedná se o 32-bitový mikroprocesor s architekturou ARM a jádrem Cortex-M4.

Jádro série F3 podporuje DSP a FPU instrukce, které mohou být výhodné při zpracování rychlých logických dějů, nebo také při výpočtech s čísly s plovoucí řadovou čárkou. Jako zdroj hodinového signálu je možné použít interní RC oscilátor s rezonanční frekvencí 8 MHz násobený PLL násobičem až 16x. Další možnost zdroje hodinového signálu je využití externího krystalového rezonátoru v rozsahu frekvencí 4 až 32 MHz. I v tomto případě je možné využít násobení taktu PLL (fázovým závěsem). Maximální taktovací kmitočet procesoru může být ale nanejvýše 72 MHz.

Napájení může probíhat v rozsahu napětí 2 až 3,6 V (v případě nevyužití DAC převodníku a PGA módu). Typická spotřeba je silně závislá na konkrétní konfiguraci procesoru. Ovlivňuje ji zejména běžící (neošetřené) periferie, taktovací kmitočet i volba rezonátoru (interní, externí). Vzhledem k tomu, že navrhovaná inerciální navigační jednotka má možnost bateriového napájení, je vhodné se zaměřit na typické hodnoty spotřeby. Ty jsou uvedené v následující tabulce (Tab. 2.1):

Tab. 2.1: Vlastní spotřeba STM32F303VC [29]

Veličina	Zdroj hodinového signálu	f_{HCLK}	Všechny periferie aktivní	Všechny periferie deaktivované
		[MHz]		
I_{DD} [mA] ⁽¹⁾	Externí hodinový signál	72	61,2	27,8
		48	41,7	19,2
		32	28,1	12,9
		24	21,4	10,0
		8	7,4	3,6
		1	1,3	0,8
	Interní hodinový signál	64	49,7	24,5
		48	37,9	18,9
		32	25,8	12,7
		24	19,7	6,7
		8	6,9	3,5

1. Typický napájecí proud v Run módu; čtení z Flash; $V_{DD}=3,6$ V;

Jak je vidět (v Tab. 2.1), tak průměrné hodnoty spotřeby proudu jsou menší při využití interního zdroje hodinového signálu. S ohledem na tento aspekt bude v práci upřednostňována volba interního hod. signálu.

Velikost flash paměti tohoto konkrétního typu je 256 KB a 40 KB SRAM paměti. Mikrokontrolér obsahuje 87 I/O pinů, přičemž na všechny je možné mapovat vektor externího přerušení a některé z nich tolerují 5 V logiku. [29]

2.3.2 Periferie

Vývojový kit obsahuje následující periferie, které jsou již připojené k vstupně/výstupním pinům mikrokontroléru:

L3GD20

Jedná se o digitální tříosý gyroskop vestavěný do pouzdra LGA-16. Kromě funkce gyroskopu obsahuje také vestavěný digitální teploměr a dva filtry (dolní a horní propust) určené k filtraci naměřeného signálu. Naměřené hodnoty je možné vyčítat dvěma způsoby. Prvním z nich je využití dvou vodičové sériové I²C sběrnice. Druhou možností je využití synchronního sériového rozhraní, realizovaného pomocí čtyř vodičů (SPI).

Popisovaný gyroskop umožňuje měřit do rozsahu až ± 2000 dps (stupeň za sekundu), ovšem se sníženou rozlišovací schopností (70 mdps/digit). Pro přesnější měření je vhodné zvolit měřicí rozsah do ± 250 dps, kdy rozlišovací schopnost vychází na 8,75 mdps/digit. S uvedenými parametry částečně souvisí chyba nuly, která je mimo jiné závislá na teplotě. Katalogový list uvádí při měřicím rozsahu 2000 dps chybu $\pm 0,04$ dps/°C, zatímco při rozsahu 250 dps chybu $\pm 0,03$ dps/°C. Všechny uvedené parametry a chyby se vztahují k napájecímu napětí $V_{dd} = 3$ V a referenční teplotě $T = 25$ °C.

Tuto součástku je možné napájet napájecím napětím v rozmezí 2,4 až 3,6 V. Pro úsporu energie v případě bateriového napájení je možné využít jedné ze dvou možností úsporného režimu, který umožňuje (power-down a sleep mode) [33].

LSM303DLHC

Zde se jedná o digitální tříosý akcelerometr s integrovaným tříosým magnetometrem a teplotním senzorem. Senzor umožňuje měřit pomocí více měřicích rozsahů od ± 3 g, až do ± 16 g. Opět platí, že rozlišovací schopnost je závislá na zvoleném měřicím rozsahu.

Komunikaci mezi senzorem a mikrokontrolérem je možné realizovat pouze pomocí I²C sběrnice, na rozdíl od gyroskopu, kde navíc byla možnost využít SPI.

Napájecí napětí se musí nacházet rozsahu od 2,16 do 3,6 V. Stejně, jako v předchozím případě, umožňuje akcelerometr využít některého ze dvou režimů úspory energie. [17]

Ostatní periferie

Kromě již zmíněných periferií obsahuje vývojový kit také dvě tlačítka a několik LED diod, připojených k I/O pinům mikrokontroléru. Součástí je i vyvedený uživatelský USB mini-B konektor napojený též na I/O piny.

2.4 Ukládání dat

S ohledem na zadání práce musí být jednotka schopná zaznamenávat (logovat) naměřená data. Toto by bylo možné realizovat ukládáním dat na vlastní flash paměť mikrokontroléru. Dané řešení s sebou nese nevýhody, jako například nepřenositelnost, omezená velikost a hlavně zásah do programové paměti. Efektivnějším řešením se nabízí zápis naměřených dat na některý z typů externích flash pamětí. Jelikož zvolený vývojový kit neobsahuje žádné příslušné rozhraní umožňující ukládání většího množství dat, je nutné paměť implementovat k vývojovému kitu externě.

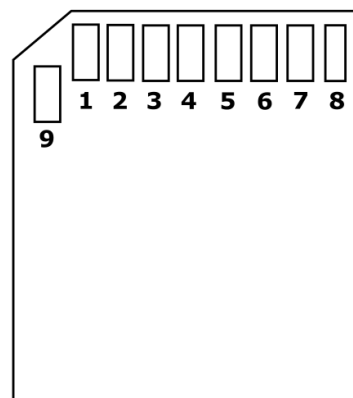
Nabízí se více možností, na jaké médium naměřená (případně i zpracovaná) data ukládat. Jednou z nich by bylo využití nabízených statických EEPROM, nebo flash pamětí v pouzdrech typu integrovaných obvodů (SO8, DIP8, apod.). Další a výhodnější způsob ukládání z pohledu přenositelnosti, kompatibility a kapacity je ukládání na paměťovou kartu. Dnešními nejrozšířenějšími a nejlevnějšími paměťovými kartami jsou bezesporu SD karty. Označují se také jako non-volatilní paměti, které se vyznačují tím, že po výpadku napájení udržují informaci.

V poslední době existuje mnoho variací těchto karet, lišící se rychlostí (třídy Class a UHS), ale také kapacitou (varianty HC a XC). Tato diverzita karet se dále již nebude probírat, jelikož není pro práci stěžejní.

2.4.1 Standard SD

Je to standard pro přenosné paměťové médium licencované organizací SD Card Association. Pro její malé nároky na vlastní spotřebu el. energie, malé rozměry, nízkou cenu a jednoduchost se stala nejpoužívanějším paměťovým úložištěm v oblasti spotřební elektroniky.

SD karty mohou komunikovat ve dvou módech. První mód se označuje jako režim SPI, a ten druhý jako SD režim. Na těchto dvou módech je závislé označení pinů na SD kartě (viz Tab. 2.2). Rozmístění pinů na SD kartě je vyobrazeno na Obr. 2.3.



Obr. 2.3: Rozmístění pinů na (micro) SD kartě

Tab. 2.2: Popis pinů micro SD karty [34]

Pin #	Micro SD karta			
	Režim SD		Režim SPI	
	Jméno pinu	Funkce	Jméno pinu	Funkce
1	DAT2	Data Line2	RSV(1)	Rezerva (1)
2	DAT3	Data Line3	CS	Chip Select
3	CMD	Command Line	DataIn	Data IN
4	VDD	Napájení	VDD	Napájení
5	CLK	Hodin. Signál	CLK	Hodin. Signál
6	VSS2	Zem	VSS2	Zem
7	DAT0	Data Line 0	DataOut	Data OUT
8	DAT1	Data Line 1	RSV(2)	Rezerva (2)
9	-	-	-	-

S ohledem na to, že mikrokontrolér osazený na vývojovém kitu (STM32F3DISCOVERY) nedisponuje SDIO rozhraním (ve srovnání s STM32F4), o využití konkrétního komunikačního režimu bude zvažováno v dalších postupech.

Režim SD

Jedná se o primární komunikační mód, který SD karty nabízí. Jeho komunikace je založena na command-response protokolu, přičemž příkazy a data jsou odesílány po odlišných vodičích. Pro příkazy je vyhrazen jediný vodič (CMD), a pro data je využit jeden vodič, nebo čtyři vodiče (DAT0, DAT1, atd.). Komunikace poté probíhá tak, že uživatel vyšle příkaz na CMD sběrnici s adresou SD karty (případně broadcastem adresující všechny připojené karty). Karta poté odpovídá pomocí tzv. odpovědních tokenů (nebo datových tokenů). Celá komunikace je zabezpečena CRC kódem.

Režim SPI

SPI režim je sekundárním komunikačním protokolem využívající SPI kanál. Karta je defaultně přednastavena ke komunikaci v SD režimu. Pokud je vyžadována komunikace v SPI režimu, je nutné tento režim během prvního resetovacího příkazu aktivovat (nezapomenout na CRC, které je v SD režimu defaultně zapnuto). Samotná komunikace přes SPI kontrolu dat nevyžaduje, je možné ji ale zapnout.

Podrobný popis komunikačního protokolu SPI a SD se nachází v [34].

2.4.2 Souborový systém, FAT16, FAT32, NTFS

Souborový systém souvisí s organizací a strukturou místa v paměťovém prostoru. Umožňuje snadno přistupovat k uloženým informacím pomocí složek a adresářů s konkrétními názvy. K tomuto účelu je možné využít některého ze souborových systémů. Může jím být například FAT16, nebo FAT32 (File Allocation Table). Příslušný FAT souborový systém obsluhuje navíc také rutiny sloužící k organizaci paměti.

Pro ukládání a čtení dat z SD karty je vhodné implementování a dodržování určitého souborového systému.

2.5 Odesílání dat

Způsobů jak bezdrátově odesílat data existuje celá řada. Mohou to být bezdrátové moduly využívající k přenosu informace infračerveného světla (IrDA) nebo moduly využívající k přenosu radiové vlny. Z praktických důvodů se bude tato kapitola věnovat pouze přenosu dat za pomoci radiových vlny.

Vzhledem k tomu, že existuje celá řada možností jak odesílat data, budou zmíněny jen ty nezákladnější.

2.5.1 Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth

Jednou z možností by mohlo být využití modulů Wi-Fi, které jsou zajímavé z hlediska rychlosti a kompatibility k počítačovým sítím, ovšem nevýhodné z hlediska programátorské náročnosti a ceny. Zajímavějším komunikačním standardem pro požadovanou aplikaci by mohly být moduly ZigBee (podporující standard IEEE 802.15.4 platný od roku 2004), které jsou poměrně mladé, a u kterých poslední dobou roste jejich popularita. Levnějším řešením je využití modulů Bluetooth (podporující standard IEEE 802.15.1).

Oba výše zmíněné standardy spadají do osobních počítačových sítí WPAN, oba jsou určeny pro spojení nízkovýkonových zařízení na malé vzdálenosti a oba spadají do bezlicenčních pásem ISM.

ZigBee tvoří dle [35] mezičlánek mezi standardem Wi-Fi (IEEE 802.11a/n/g/n/ac), který je orientovaný především na velké přenosové rychlosti a topologii sítě a mezi standardem Bluetooth, který je orientovaný zejména na jednoduchou síť s ohledem na napájení a cenu. S ohledem na menší přenosové rychlosti se ZigBee stává robustnějším a odolnějším vůči chybám, než Bluetooth. Možnost tvorby rozsáhlé topologie sítě dělá ZigBee ideálním řešením pro použití v průmyslu k monitoringu nebo řízení.

Parametry BT modulů

Při srovnání všech stanovisek bylo rozhodnuto pro realizaci odesílání dat pomocí některého z Bluetooth modulů. Těch ovšem existuje velmi mnoho, lišících se ve výrobci a v následujících základních parametrech uvedené v tabulce Tab. 2.3 a Tab. 2.4.

Tab. 2.3: Třídy BT modulu udávající maximální povolený výkon Tx [36]

Class	Maximální povolený výkon		Přibližný dosah
	[mW]	[dBm]	[m]
Class 1	100	20	100
Class 2	2,5	4	10
Class 3	1	0	1

Tab. 2.4: Verze BT modulů [36]

Verze	Rychlost přenosu dat
	[Mbit/s]
1.2	1
2.0 + EDR	3
3.0 + HS	24
4	24

Pro aplikaci inerciálního navigačního systému bylo vybíráno mezi BT moduly firmy connectBlue, která nabízí hned několik verzí standardu BT a moduly čínských výrobců. Mezi ty patří zejména starší řady HC-05 a HC-06, a řady novější HC-07, HC-08 a HC-09.

Vzhledem k pořizovací ceně a požadavkům byl výběr omezen pouze na čínské moduly. Všechny výše uvedené obsahují sériové rozhraní UART (pozor na logické úrovně), pomocí kterého je možné sériový tok dat jednoduše odesílat.

Základní rysy výše vybraných modulů:

- HC-05 – umožňuje se chovat jako slave i master
- HC-06 – umožňuje se chovat pouze jako slave
- HC-07 – totožný s HC-06 ovšem jiný HW (vybavený flash), pouze role slave
- HC-08 – podporuje low-power komunikační protokol (verze 4.0 BLE), umožňuje slave i master

Bluetooth modul HC-05

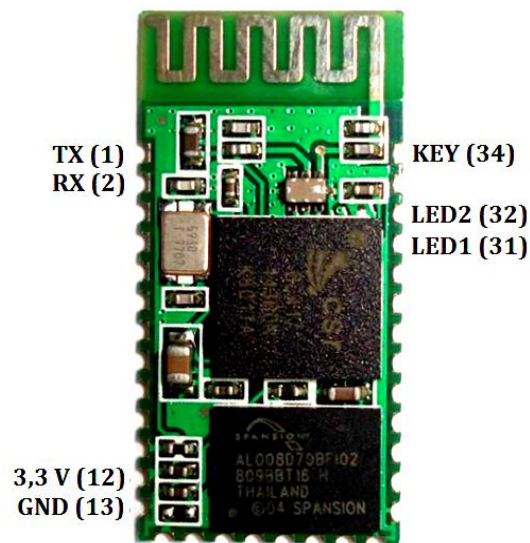
K praktické realizaci byl vybrán starší modul HC-05, který je stále velmi oblíbený, a který se hojně využívá společně s platformou Arduino.

Jeho základní parametry jsou:

- Standard Bluetooth v2 + DR
- Class 2 – vysílací výkon 4dBm (2,5 mW)
- Citlivost -80 dBm
- UART rozhraní s logikou 3,3 V
- Programovatelná bitová rychlost a paritní bit
- Napájecí napětí 3,1 – 4,2 V
- Integrovaná anténa

Pouzdro, osazení

Samotný BT modul je implementován na desku plošných spojů již s integrovanou anténou. Koncepce je taková, že zmíněná destička se samotným čipem je lehce zapájitelná do jakéhokoliv komplexnějšího HW řešení. Uspořádání pinů je vyobrazeno na Obr. 2.4.



Obr. 2.4: Popis pinů u BT modulu HC-05

AT příkazy

Jedná se o příkazy, které jsou podporované v programovacím režimu zvoleného modulu (vyvolaného přivedením log. 1 na pin KEY při současném přivedení napájecího napětí na modul). Ty slouží především k nastavení komunikačního protokolu UART, hesla pro spárování, nebo jen dotazování se na stav či specifikaci HW.

Důležité přitom je, aby všechny nastavovací příkazy byly odesílané s datovou rychlostí 38400 b/s, jedním stop bitem a bez paritního bitu. Dále je důležité, aby každý příkaz končil znaky „\r\n“, které modul vyhodnocuje jako konec příkazu. V případě správně přijatého příkazu odesílá BT modul odpověď se zprávou „OK“. Pokud modul příkaz nerozezná, nebo se bude jednat o chybný příkaz, modul vrátí odpověď s konkrétní chybovou hláškou.

2.6 Napájení

Jelikož v minulých kapitolách bylo rozhodnuto o výhodnosti bateriového napájení celého zařízení, je proto nutné provést rozbor, jakým způsobem celý modul INS napájí.

2.6.1 Baterie

Při výběru vhodného typu baterie je nutné zejména dodržet požadavky na napájecí napětí všech periférií obsažené v celém modulu, viz Tab. 2.5.

Tab. 2.5: Tolerovaná napájecí napětí periférií [29], [17], [33], [37], [34], [38],

Komponenta	Napájecí napětí		Proud ⁽¹⁾
	Min [V]	Max [V]	Typ [mA]
MCU	2	3,6	20 ⁽²⁾
LSM303DLHC	2,16	3,6	0,11 ⁽³⁾
L3GD20	2,4	3,6	6,1
HC-05	1,8	3,6	40
SD karta	2,7	3,6	0,01
LCD s HD44780	3	5,5	0,3

1. Hodnoty proudu jednotlivých periférií jsou závislé na napájecím napětí a provozních stavech, proto jsou pouze orientační
2. Při $f_{clk} = 20\text{MHz}$, int. osc.
3. ODR = 50Hz

Li-Ion, Li-Pol

Pokud budou pomínuty primární a zastaralé typy sekundárních článků, nabízí se (s ohledem na Tab. 2.5) možnost využít baterie typu Li-Ion nebo novější Li-Pol.

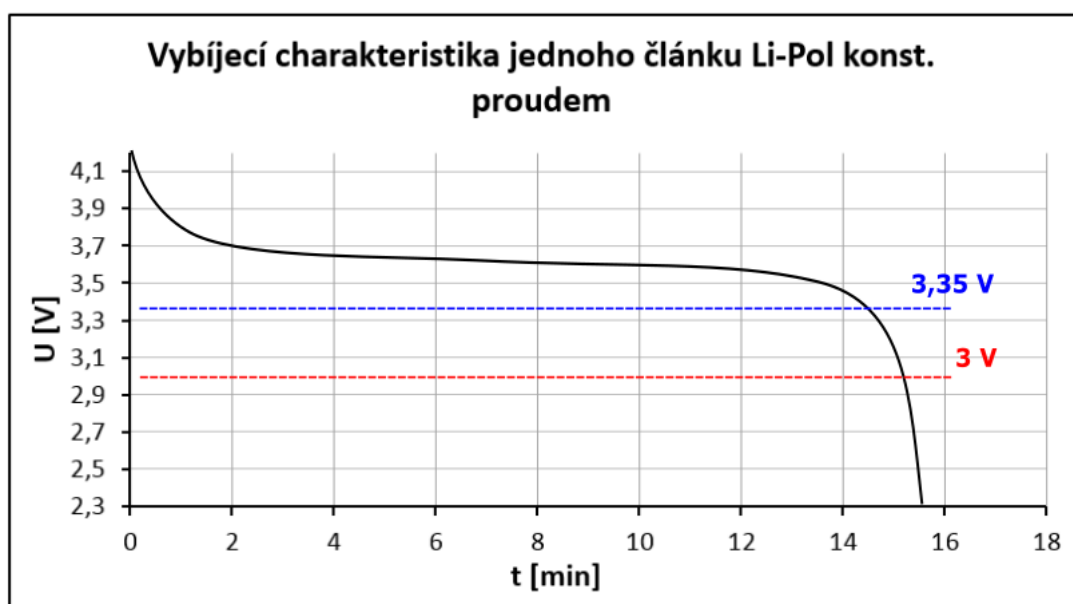
V dnešní době se tyto baterie využívají například v mobilních telefonech a tabletech, kde je jejich oblíbenost zapříčiněna velmi kompaktními rozměry spolu s velkou kapacitou.

Nominální skladovací napětí těchto baterií (jednoho článku) činí přibližně 3,7 V. Rozsah provozního napětí se pohybuje od 3 V do 4,2 V, přičemž nedodržení tohoto rozsahu (s nulovou tolerancí) způsobuje nenávratné změny ve článku. Těmito změnami se rozumí ztráta kapacity, zvyšování vnitřního odporu a chemická degradace. Toto omezení je zvláště kritické při přebíjení, kdy dochází k nafukování a ohřívání článku, které může skončit až explozí. Proto je při návrhu HW nutné dbát zvýšené pozornosti této části. Samotný návrh nabíjecí a regulační části se nachází v dalších kapitolách.

2.6.2 Nabíjení

Nabízí se velmi mnoho možností, jak toto nabíjení realizovat. Jednotlivé možnosti se liší zejména cenou a složitostí. Dále musí vycházet z požadavků kladených na baterii, ale také z požadavků jako je dostupné napájecí napětí. Neméně důležitá je znalost vybíjecí charakteristiky (Obr. 2.5), ze které je patrné na jaké napětí má baterii smysl nabíjet a vybíjet. Jak již bylo zmíněno v předešlé podkapitole 2.6.1, je bezpodmínečně nutné dodržení maximálního a minimálního napětí.

Z obrázku je jasné vidět, že nabíjení na maximální povolené napětí 4,2 V nemá příliš velký smysl, protože velikost uloženého náboje je nepřímoúměrné napětí. Šlo by pouze o zbytečnou zátěž baterie.



Obr. 2.5: Vybijecí charakteristika jednoho článku Li-Pol konst. proudem

Při návrhu nabíjecího obvodu bylo uvažováno nad několika možnými způsoby realizace.

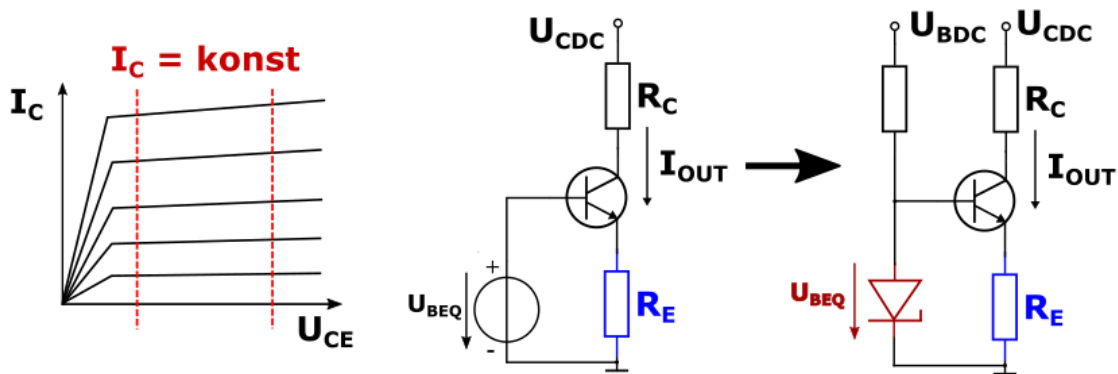
První z nich spočívá v konstrukci zdroje napětí s konstantním výstupním napětím 4,2 V a sériově řazeným odporem. Samotný zdroj může být tvořen lineárním stabilizátorem napětí s vhodně zvoleným předpětím. Takový zdroj je výhodný zejména z pohledu na jednoduchost a cenu. Nevýhoda je především v nesouměrné rychlosti nabíjení (snižující se s rostoucím napětím článku).

Druhou možností, jak nabíjet baterii, je využití proudového zdroje. Opět se zde nabízí několik podmnožností, jak tento zdroj proudu konstruovat. Mezi jednotlivé podmnožnosti se mohou řadit: zdroje proudu s bipolárním tranzistorem (příp. proudová zrcadla), zdroje proudu s využitím stabilizátoru (LM317, 7805 a jím podobné).

Poslední možností je využití specializovaných obvodů.

S ohledem na nevýhodu první varianty (pomocí zdroje napětí) byla provedena důkladnější studie zaměřená na zdroje proudu. Ty je totiž možné realizovat pomocí několika přístupů (jak již bylo naznačeno v předchozím odstavci).

Prvním přístupem jsou zapojení využívající bipolárních tranzistorů (příp. proudových zrcadel). V tomto případě se využívá na výstupní charakteristice tranzistoru oblast, kde proud kolektorem je přibližně konstantní (při $U_{BE} = \text{konst}$). Princip činnosti je nastíněn na Obr. 2.6. Pro lepší stabilizaci proudu (zejména omezení teplotní závislosti) může být na emitoru připojený rezistor, který se chová jako zpětná vazba (vzniká emitorový sledovač). Na něm se vytváří takový úbytek napětí, aby mezi emitorem a bází, bylo kolem 0,7 V). Baterie, kterou chceme dobíjet, by se zapojila místo rezistoru R_C . Hlídaní maximálního napětí by se dalo vytvořit pomocí vhodného zapojení s komparátorem. Problém u této realizace spočívá v tom, že takovéto připojení baterie neumožňuje její záporný pól uzemnit. Její následné připojení k napájecí větvi vývojového kitu by muselo být realizované pomocí dalších obvodů, čímž by rostla nepřiměřeně složitost zapojení.



Obr. 2.6: Zdroj proudu s bipolárním tranzistorem

Druhým přístupem může být zapojení zdroje proudu, avšak s lineárním regulátorem napětí (pevným nebo nastavitelným). Tím jsou typicky součástky jako LM317, či 78xx. Pomocí nich je možné vytvořit zdroje proudu s napěťovým omezením. Zde se ovšem vyskytuje další problém, spojený s nutností minimálního napájecího přepětí vůči výstupu. U LM317 musí být napájecí napětí minimálně o 3 V vyšší, než napětí na výstupu. Tomuto požadavku není v případě aplikace na zvolený vývojový kit možno vyhovět (viz kapitola 2.6.3). Řešením by mohlo být využití některých modernějších regulátorů napětí, které jsou specifikované jako „Very Low-drop Voltage Regulator“. U nich je typická hodnota úbytku napětí 0,2 – 0,4 V při odběru 100 mA.

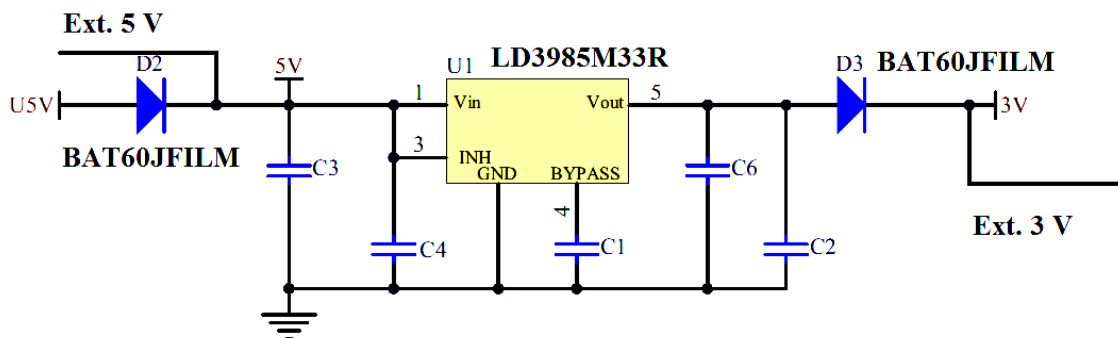
Třetím přístupem je využití specializovaných obvodů určených přímo pro nabíjení Li-Pol (Li-Ion) článků. Zástupci těchto obvodů jsou například LTC4054-4.2 (Linear Technology), nebo MC34673AEP (Freescale Semiconductor). Jejich výhodou je jednoduchá implementace. Obsahují totiž všechny potřebné obvody zajišťující proudové a napěťové omezení (proud nastavitelný ext. rezistorem). V případě obvodu LTC4054-4.2 je požadované napájecí napětí v rozmezí mezi 4,25 a 6,5 V, což je v žádané aplikaci splnitelné. [39]

2.6.3 Implementace bateriového napájení

Napájení je dle katalogového listu zvoleného vývojového kitu možné provádět třemi způsoby. Prvním nejběžnějším způsobem je přivedení napětí (5 V) na mini-USB konektor programátoru ST-LINK/V2. Dalšími dvěma možnostmi je využití externího napájení o napětí 3 nebo 5 V. Vzhledem k tomu, že mikrokontrolér a ani ostatní periferie nejsou na vývojovém kitu kompatibilní k napájecímu napětí 5 V, proto obsahuje nízkošumový stabilizátor LD3985M33R, stabilizující na výstupní napětí 3,3 V.

Napětí 3 V, kterým jsou napájené všechny periferie je dosaženo umístěním Schottkyho diody (BAT60JFILM) sériově za stabilizátor. Její úbytek napětí je dle katalogového listu maximálně 0,4 V při procházejícím proudu 100 mA v průchozím směru. Tato dioda je zde obsažena zejména za účelem ochrany (oddělení) při externím napájení třemi volty. Schéma zapojení napájecí části kitu je znázorněno na Obr. 2.7. [30], [31], [32]

Stejně tak je dle katalogového listu [30] umístěna stejná Schottkyho dioda před stabilizátorem. Ta je zde zastoupena ze stejného důvodu jako v předchozím případě, a to za účelem ochrany při připojení ext. napájení 5 V (viz Obr. 2.7).



Obr. 2.7: Napájecí část STM32F3DISCOVERY, převzato z [30]

Regulace napájecího napětí z baterie

Vzhledem k tomu, že všechny periferie jsou provozuschopné na napětí v rozmezí 3 – 3,6 V (Tab. 2.5), musí být výstupní napětí z baterie (3 – 4,2 V) stabilizováno. Ke stabilizaci je opět možno využít některý z dostupných lineárních stabilizátorů. Vzniká zde přirozeně problém související s napájecím napětím tohoto stabilizátoru. Ten musí být schopný v ideálním případě stabilizovat minimální povolené napětí Li-Pol baterie (3 V) a současně jej dodávat na výstup. Tohoto požadavku pomocí reálných součástek není možné dosáhnout (vlivy ztrát a úbytků napětí). Jediná možnost jak se tomuto stavu alespoň přiblížit, je opět použití stabilizátoru označeného jako „Low-Dropout“. Jelikož se tímto stabilizátorem budou napájet i citlivé MEMS senzory, které v případě nevhodného napájení mohou produkovat více zašuměné změřené hodnoty, je dobré zvolit nízkošumový stabilizátor. Toto opatření očekává eliminaci nekvalitního měření. Pro tuto aplikaci byl zvolen stabilizátor LP3985 (TI), který dle katalogového listu slibuje úbytek napětí při odběru proudu 150 mA pouze 100 mV. Nevýhodou uvedeného řešení je malý dostupný výstupní proud, který je stabilizátor schopný dodat. S ohledem na Tab. 2.5 by měl být max. výstupní proud dostačující.

2.7 Zobrazovací jednotka

S ohledem na nízké požadavky zobrazení dat byl pro účel IMU zvolen dvouřádkový alfanumerický displej se šestnácti znaky na řádcích. Trh nabízí tento displej s mnoha různými typy kompatibilních řadičů, vzhledem k původnímu „originálnímu“ řadiči HD44780 od firmy Hitachi. Ten obsahuje poměrně jednoduchou instrukční sadu sloužící ke komunikaci, nastavení a práci s displejem. Mezi vybranými instrukcemi může být například instrukce pro nastavení šířky komunikační sběrnice, nastavení automatického posuvu, nastavení kurzoru, zapnutí displeje, nebo smazání displeje.

Popisovaný displej umožňuje komunikovat ve dvou režimech. Prvním z nich využívá plnou šířku sběrnice (8 bitová komunikace), druhý z nich využívá redukovanou šířku sběrnice (4 bitová komunikace). Redukovaná šířka sběrnice pracuje v časovém multiplexu, kdy se jedno datové slovo (jeden byte) odesílá ve dvou taktech, přičemž se nejdříve odesílají čtyři více významné bity a následně čtyři méně významné bity. Tato multiplexace s sebou nese nevýhodu pomalejšího zobrazení, avšak pro zvolenou aplikaci INS není rychlost stěžejní. Součástí řadiče displeje je paměť RAM paměť obsahující řadu základních ASCII znaků.

Fyzické rozhraní LCD displeje tvoří 16 vývodů popsanych v následující (Tab. 2.6).

Tab. 2.6: Popis vývodů LCD displeje, převzato z [42]

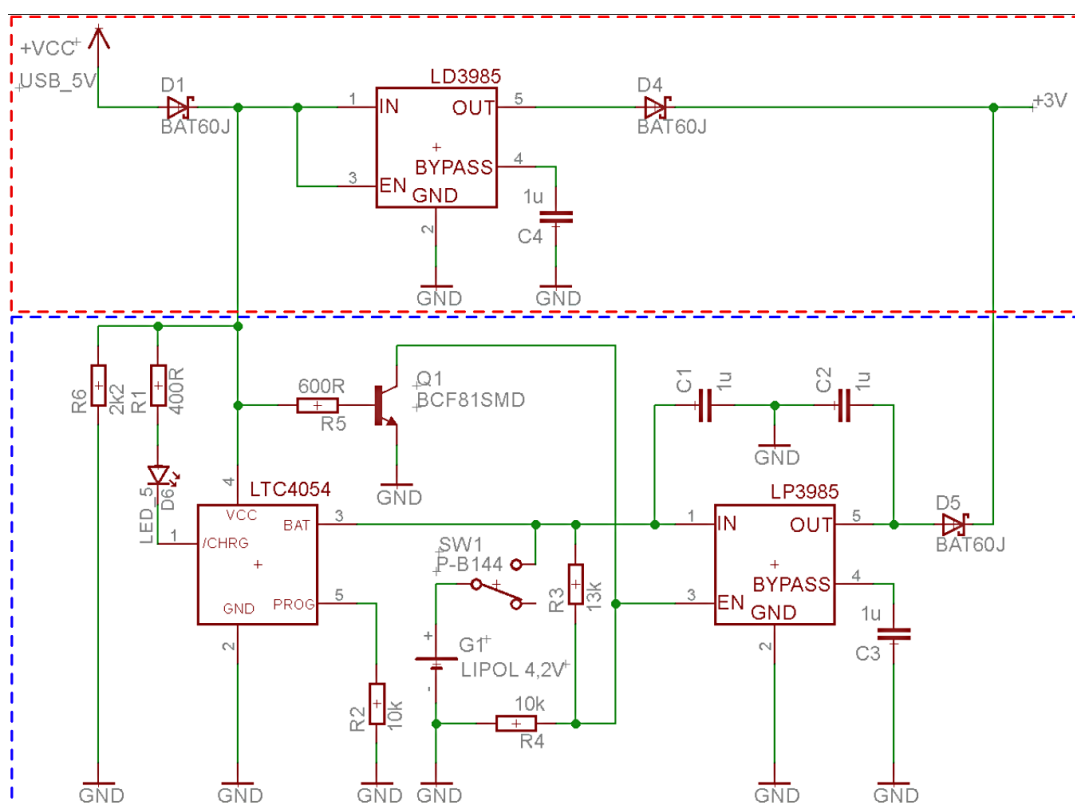
Č. vývodu	Název	Funkce
1	Vss	Zem, GND
2	Vdd	Napájení
3	Vo	Nastavení kontrastu
4	RS	H/L - data/instrukce
5	R/W	H/L - čtení/zápis
6	E	Povolení vstupu, start čtení/zápisu
7	DB0	Datová sběrnice pro 8-bitovou komunikaci
8	DB1	
9	DB2	
10	DB3	
11	DB4	Datová sběrnice pro 4-bitovou a 8-bitovou komunikaci
12	DB5	
13	DB6	
14	DB7	
15	A/Vee	Napájení led, 4,2 V
16	K	GND

3 NÁVRH PRAKTICKÉ REALIZACE

3.1 Nabíjecí obvod

S ohledem na předešlou kapitolu (2.6) bylo vytvořeno schéma zapojení napájecí části (Obr. 3.1). V červeném ohraničujícím rámečku se nachází zjednodušené schéma zapojení, vycházející z katalogového listu vývojového kitu (viz Obr. 2.7). V modrém rámečku se vyskytuje přídatný nabíjecí obvod s Li-Pol baterií a pomocnými obvody. Z obrázku je patrné, že je k nabíjecímu obvodu LTC4054 připojena LED dioda indikující stav nabití. Jelikož v napájecím bateriovém okruhu je umístěn stabilizátor, umožňující aktivovat či deaktivovat svůj výstup pomocí inhibičního vstupního pinu ENABLE, byl doplněn obvod obsahující tranzistor s odporovým děličem na výstupu, který slouží k odpojení stabilizátoru napětí v případě, kdy je napájecí napětí dodávané přes USB port. Současně s tím je tento odporový dělič vypočítán tak, aby deaktivoval svůj výstup při dosažení minimálního povoleného napětí baterie (voleno včetně rezervy, tedy 3,3 V).

Pro možnost jednoduchého odpojení bateriového napájení je ve schématu umístěn přepínač odpojící baterii.



Obr. 3.1: Schéma zapojení napájecí části

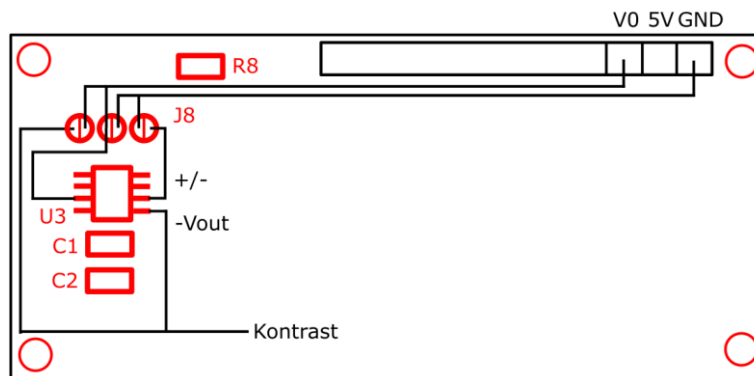
3.2 LCD displej

S ohledem na to, že zvolený LCD displej (1602A V1.2) není dle katalogového listu [42] kompatibilní k napájecímu napětí okolo 3 V, ale pouze na rozsah napětí 4,7 – 5,5 V, byly zde prováděny experimentální kroky. Tyto experimentální kroky byly motivované zejména z důvodu internetových diskuzí, kde se oživení displeje na nižší napájecí napětí často probírá. Je ovšem ještě nutno dodat, že práce se opírá o překládaný katalogový list do anglického jazyka, který se svým obsahem nejeví jako zcela kompletní. I tak je to jediný dohledatelný katalogový list, jež budí alespoň minimální důvěru, a jež se přímo odkazuje na zvolený (čínský) LCD displej.

I když výrobce tohoto displeje udává nominální napájecí napětí okolo 5 V tak se zdá, že na kompatibilitu pro nižší napájecí napětí myslel. Ze zadní strany displeje se totiž nachází neosazené pájecí plošky součástek U3, C1 a C2 (viz Obr. 3.2), které se zde evidentně nachází za účelem osazení nábojovou pumpou, sloužící ke kompenzaci (zvýšení) napájecího napětí. To je možné získat pomocí připojení záporného napětí vůči VSS (GND) pinu displeje (původně připojeného na zem). Poté se stává z tohoto pólu (0 V) pól se záporným napětím a velikost celkového rozdílu napájecího napětí se zvýší. Stejný postup je možné dohledat na [43]. Autor článku uvádí osazení DC/DC měničem, dvěma kapacitami, záměnou jednoho z odporů a propojení propojky J3 ($U3 = ICL7660$, $C1 = C2 = 10 \mu\text{F}$, $R8 = 330 \Omega$).

Popsaný postup se jeví jako zcela funkční, ale pouze za předpokladu nepřipojení trimru (o hodnotě 10 k Ω) k pinu displeje V0, sloužícího k nastavování kontrastu. Tímto způsobem úpravy není možné kontrast jakkoliv korigovat. Po důkladnějším rozboru bylo zjištěno, že tato celá úprava slouží pouze pro úpravu napětí nastavující kontrast. Napájecí napětí logiky zůstává nepozměněné (tedy na hodnotě 3 V). Zjištěné vnitřní propojení struktury displeje obsahující měnič napětí je naznačeno na Obr. 3.2.

Pro konkrétní způsob připojení displeje v popisované diplomové práci bylo rozhodnuto, že měnič napětí ICL7660 bude obsažen přímo na navrhované desce plošných spojů INS. Tam bude sloužit pro změnu rozsahu dělicího poměru, nastavující kontrast. Kontrast bude tím pádem nastavitelný potenciometrem. Po experimentech se zdají být oba tyto způsoby připojení srovnatelně funkční i při nižším napájecím napětí, jako při připojení k nominálnímu napětí 5 V. U obou předešlých způsobů se upravuje pouze napětí nastavující kontrast displeje, nikoliv napájecí napětí logiky. Dle experimentu, by měla změna velikosti napájecího napětí logiky negativní vliv na rozhodovací úroveň logických signálů.



Obr. 3.2:Zadní pohled na LCD displej 1602A (V2.0)

3.3 Návrh struktury přípojných HW modulů

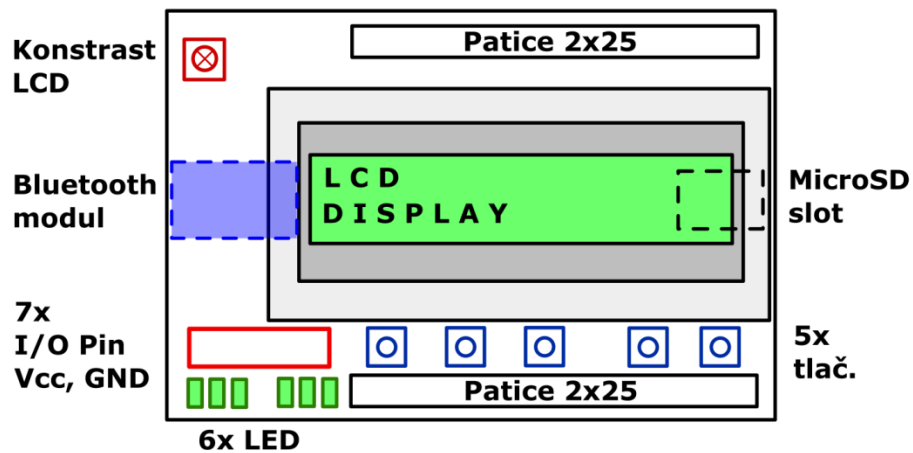
Po rozboru řešení byl proveden návrh hardwarové struktury přípojného modulu. Ten na sobě musí nést všechny výše uvedené periferie. Těmi jsou slot na SD kartu, BT modul, LCD displej, baterie, ale také požadované podpůrné obvody (přizpůsobení napájecího napětí k požadavkům LCD displeje, příp. nabíjecí obvod baterie).

Za účelem maximální minimalizace bylo vytvořeno několik návrhů rozmístění. Všechny návrhy byly realizované na dvouvrstvé desky plošných spojů. V žádném z nich se ovšem nepovedlo docílit takové optimalizace, která by dovolovala všechny periferie aplikovat na jednu jedinou nosnou DPS. Z tohoto důvodu bylo nutné přistoupit k rozšíření návrhu o další přípojný modul. Jednou z výhod zvoleného vývojového kitu je možnost připojení rozšiřujících modulů z obou jeho stran (ze své spodní i vrchní strany). Tento aspekt nabízí nové možnosti při návrhu daného řešení.

Jako nejvhodnější možností se nabízí separace baterie s nabíjecím obvodem od ostatních vyžadovaných periférií. Tímto řešením je možné využít bateriovou část i na jiných aplikacích, než na aplikaci pro INS. Současně s tím umožňuje nevyužívat bateriového napájení v případech, kde není třeba. Z předchozího textu je vyplývající, že tímto návrh získává na univerzálnosti.

Jelikož se rozšířením na dva přípojné moduly získalo více místa na hlavním (horním) modulu, byl tento modul doplněn o sadu šesti tlačítek a šestici barevných LED diod. V poslední řadě bylo doplněno sedm pájecích plošek se vstupně-výstupními piny MCU, společně s vyvedenými pájecími ploškami pro napájení 3 V a GND.

Celý návrh struktury hlavní nosné desky je znázorněn na Obr. 3.3.



Obr. 3.3: Návrh struktury přípojného modulu

Spodní volitelný přípojný modul obsahuje pouze nabíjecí elektroniku a místo vyhrazené pro Li-Pol baterii.

3.4 Sumarizace HW návrhu

Celý hardwarový návrh byl vytvořen s ohledem na doporučení katalogových listů jednotlivých použitých komponent. Jedná se zejména o napájecí požadavky exponovaných periférií. Těmi je zcela jistě SD karta, která vyžaduje ve své blízkosti blokovací kondenzátory, které zde hrají poměrně důležitou roli pro dodávku nezvlněného a stálého napájecího napětí, při všech jejích provozních režimech.

Tyto blokovací kondenzátory byly stejně jako k SD kartě přidány také do blízkosti BT modulu. Jeho složitost je v porovnání s SD kartou mnohem menší. Bluetooth modul může být ovšem mnohem více zatížen kolísáním napájecího napětí z důvodu vysílání a přijímání. To je hlavní důvod, který zde vedl k rozhodnutí o užitečnosti ošetření napájecího napětí.

V následující tabulce (Tab. 3.1) se nalézá seznam všech využitých pinů mikrokontroléru, včetně jejich využití, popisu, nebo omezení.

Tab. 3.1: Sumarizace využití pinů MCU

Pin	Využití	Pozn.	Pin	Využití	Popis
PA3	Rx_BT		PC4	BTN0	
PA2	Tx_BT		PB0	BTN1	
PA4	Key_BT		PD8	BTN2	
			PD10	BTN3	
PE15	CS_CARD		PD12	BTN4	
PB15	MOSI_CARD		PD14	BTN5	
PB14	MISO_CARD		PC7	BTN6	
PF9	CLK_CARD				
PC6	DETECT_CARD	(3)	PC12	LED1	
			PF6	LED2	
PA5	SCL/SPC_L3GD20		PA12	LED3	(1)
PA6	SAO/SDO_L3GD20		PA10	LED4	
PA7	SDA/SDI_L3GD20		PA8	LED5	
			PC8	LED6	
PB6	SCL_LSM303DLHC				
PB7	SDA_LCM303DLHC		PD8	PIN1	
			PC11	PIN2	
PD1	E_LCD		PC10	PIN3	
PD2	RW		PA15	PIN4	
PD3	RS		PA11	PIN5,	(2)
PD4	D4		PA9	PIN6	
PD5	D5		PC9	PIN6	
PD6	D6				
PD7	D7				

- (1) Sdíleno s USB USER, pro správnou funkci je nutné propájet propojku SB21
- (2) Sdíleno s USB USER, pro správnou funkci je nutné propájet propojku SB22
- (3) Zachováno pro použití v dalších projektech, nutno externě propojit s GND

4 NÁVRH SOFTWAREOVÉHO VYBAVENÍ

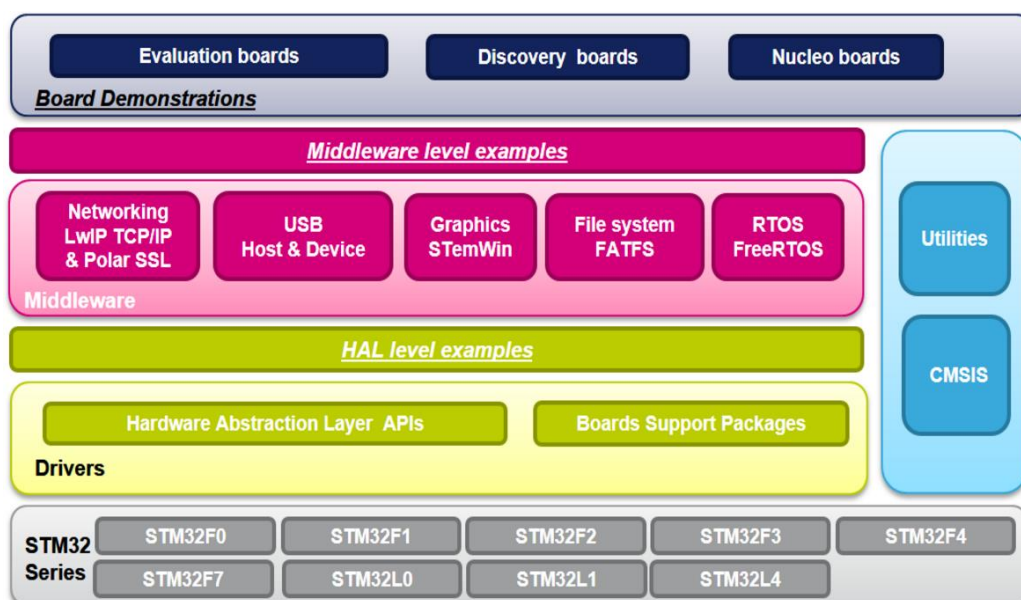
4.1 Použitý software

4.1.1 Softwarový model

Program je psán ve vývojovém prostředí EmBitz (původně EmBlock) a kompilován příloženým kompilátorem ARM GCC. Pro samotný projekt bylo využito poměrně nových HAL knihoven uvedených (a hojně podporovaných) výrobcem mikroprocesoru. Ty jsou více abstraktně orientované, než dosud používané SPL knihovny. U těchto knihoven není nutné nastavovat periférie (čítače / časovače, komunikační rozhraní, AD převodníky, atd.) na úrovni bitů, ale za pomoci již definovaných funkcí obsažených v dodaných ovladačích. Například přerušení a jiné rutiny se zde realizují a volají pomocí „callbacků“, namísto klasických vektorů přerušení (jako u 8-bitových mikrokontrolérů, nebo SPL ovladačů). Výhodou této struktury je méně nutná znalost HW. Nevýhodou je v současné době méně realizovaných (vzorových) projektů.

Programátor kromě HAL knihoven od STM může využívat také CMSIS knihovny, které STM standardně nabízí k HAL knihovnám. Tyto dvě vrstvy mohou na sobě být v některých případech závislé. CMSIS knihovny slouží opět k větší softwarové abstrakci s menšími nároky na znalost hardwaru. CMSIS knihovny jsou hardwarově přenositelné mezi jádry Cortex-M a měly by být nezávislé na výrobci. Struktura použitých knihoven včetně HW vrstvy je vyobrazena na Obr. 4.1.

K založení projektu je výhodné využít utilitu STM Cube, která volitelně obsahuje všechny základní knihovny, a která současně slouží pro asistované nastavení mikrokontroléru.



Obr. 4.1: Struktura nově podporovaných knihoven STM, převzato z [45]

4.2 Návrh obslužného firmware s ohledem na požadavky INS

4.2.1 Pojednání o konkrétním směru uplatnění

Jednou z klíčových vlastností navigační jednotky je její softwarová výbava. Ta totiž udává, jakými směry může být jednotka použitelná. Zde se nabízí velmi mnoho rozličných příkladů uplatnění. V předchozích textech některá konkrétní použití zaznívala. Pouze pro připomenutí byla zde řeč ohledně automobilových černých skříněk a zaznamenávání trasy pohybu pouze pomocí inerciálních snímačů.

Po důkladném zvážení všech pro a proti bylo rozhodnuto, pro vývoj univerzálnějšího obslužného programu. Tím se myslí takový program, který nebude zaměřený pouze na jediný účel, ale na více možných způsobů využití.

Mezi tyto možnosti je zahrnuto prosté a jednoduché zaznamenávání naměřených dat (zrychlení a úhel natočení) na SD kartu, s co největší vzorkovací frekvencí (v dalších textech označována jako „Record“). Toto rychlé vzorkování může být upotřebitelné ve funkci černých skříněk, měření vibrací (pochopitelně nižších frekvencí) a dalších aplikací vyžadující rychlé vzorkování.

Další funkcí, kterou bude INS disponovat je funkce označená jako „Demo“. U této funkce nebude kladen takový požadavek na rychlost vzorkování, ale spíše na možnost použití pro vzdělávací a další vývojářské potřeby. Jejím hlavním úkolem bude zobrazovat aktuální naměřené hodnoty, ty současně odesílat pomocí BT modulu, a nakonec reagovat na „thresholdy“. Konkrétní příklad použití by mohl být nalezen pro zaznamenávání a vyhodnocování seismické aktivity. Samozřejmě s odpovídající sníženou přesností na rozdíl od rychlých a přesných seismografů využívaných profesionálně.

4.3 Struktura zdrojového kódu a obsažené funkce

Celý firmware navigační jednotky je strukturován do množství složek, ve kterých se odděleně nalézají hlavičkové a zdrojové soubory. Současně jsou všechny knihovny odděleny dle jejich funkcí: systémové funkce, funkce obsluhy gyroskopu a akcelerometru, obsluhy SD karty, a nakonec periférií. Ve složce periferie se nachází zdrojové soubory pro obsluhu LCD displeje, tlačítek, nebo výstupních pinů.

Software obsluhy INS využívá jeden časovač, který volá přerušení (přesněji tzv. „callback“) s periodou 1 ms.

V obsluze „callbacku“ se nachází krátký kód, který testuje tlačítka na jejich stav. Toto testování je součástí „debouncingu“ tlačítek – tedy vyhodnocení logické úrovně vč. ošetření proti jejich zákmity. Stav tlačítek je vyhodnocen po šestnácti dotazech na stav tlačítka. V případě, že šestnáct následujících dotazů se neliší, je adekvátně vyhodnocen logický stav tlačítka.

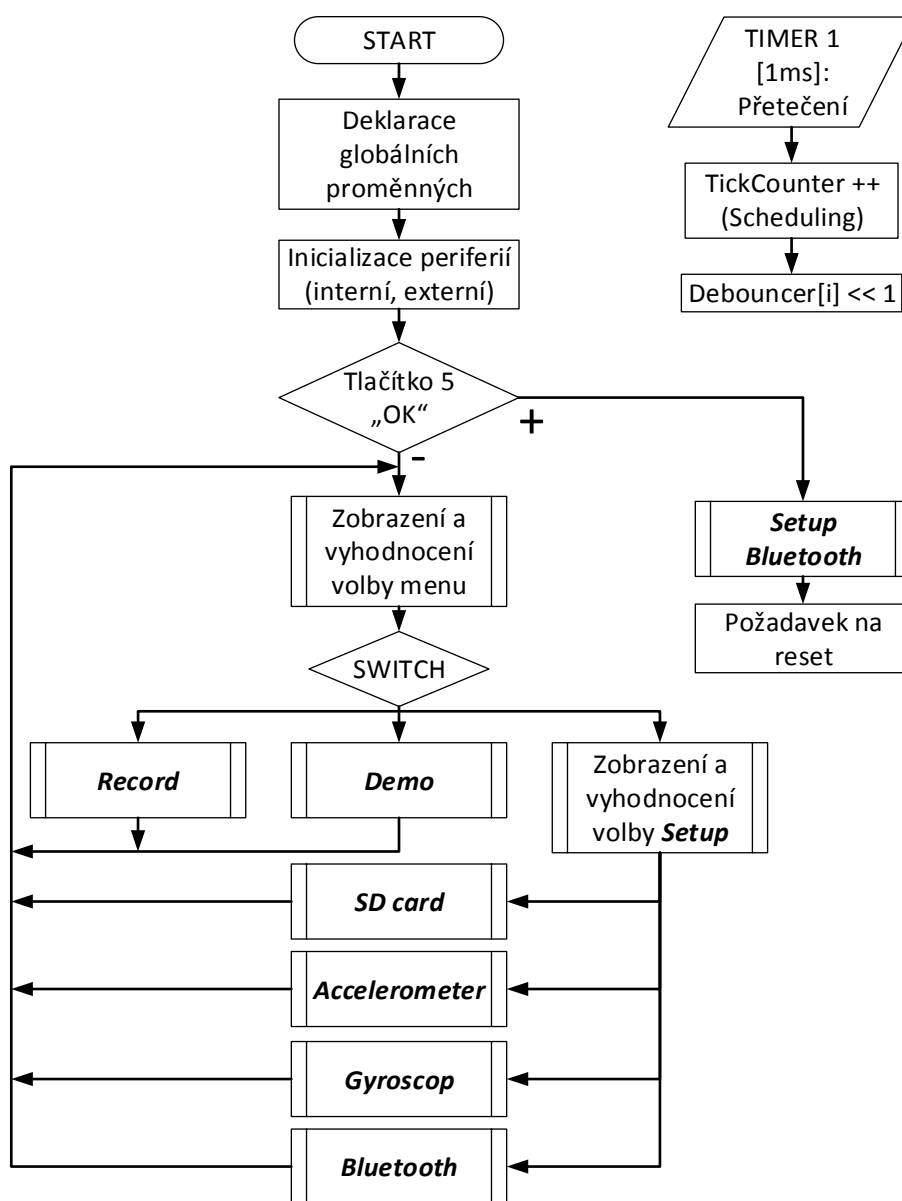
Další rutinou obsaženou v obsluze „callbacku“ je inkrementace proměnné *TicketCounter*, která hraje roli hodin pro „scheduling“ (plánování procesů). Plánování procesů je důležité zejména pro jednoduché určení četnosti volání funkcí, nebo také pro minimalizaci blokujících čekání („delay“).

4.3.1 Běh programu – úvod, uživatelské rozhraní

Pro INS byl napsán obslužný firmware, jehož vývojový diagram je znázorněn na Obr. 4.2.

Hned po spuštění navigační jednotky dochází k linkování všech potřebných hlavičkových souborů, které jsou požadovány dále používanými funkcemi. Tyto hlavičkové soubory obsahují zejména některé definice, proměnné a prototypy funkcí, které jsou vyžadovány kompilátorem.

Následují inicializace interních periferií v mikrokontroléru. Těmi mohou být obvody pro vytváření a úpravu hodinového signálu, vstupní a výstupní piny, hardwarové komunikační rozhraní (I₂C, UART, atd.) a časovače. Po inicializaci interních periferií dochází k inicializaci (případně konfiguraci) externích periferií, jakými jsou MEMS senzory, SD karta, nebo LCD displej.



Obr. 4.2: Vývojový diagram hlavního programu INS

S ohledem na čitelnost a přehlednost kódu je struktura a zejména souslednost jednotlivých kroků vykonávající inicializace trochu odlišná, než je zde popisováno. Její podstata je ovšem zachována.

Ohledem na čitelnost a přehlednost kódu je struktura a zejména souslednost jednotlivých kroků vykonávající inicializace trochu odlišná, než je zde popisováno. Její podstata je ovšem zachována.

Ohledem na čitelnost a přehlednost kódu je struktura a zejména souslednost jednotlivých kroků vykonávající inicializace trochu odlišná, než je zde popisováno. Její podstata je ovšem zachována.

V situaci, kdy není při spuštění navigační jednotky zmáčknuto žádné tlačítko, dojde k inicializaci a zobrazení základního ovládacího menu. Toto menu obsahuje tři položky. První je „Record“, druhou „Demo“ a třetí „Setup“.

Význam prvních dvou nabídek byl popsán v kapitole 4.2.1. Třetí nabídka, jak napovídá její název, slouží k nastavení periférií. Jak je vidět na Obr. 4.2 jedná se o nastavení SD karty, ve které je možné SD kartu naformátovat se současným vytvořením souborového systému. Dále je zde podprogram sloužící k nastavení akcelerometru a gyroskopu.

U akcelerometru jsou možné nastavit následující parametry:

- měřicí rozsah
- rychlost měření
- integrovaný filtr typu HP
- průměrování pomocí exponenciálního zapomínání

U gyroskopu jsou možné nastavit následující parametry:

- datová rychlost
- šířku pásma měření
- integrovaný filtr typu HP
- průměrování pomocí exponenciálního zapomínání

Otázky může vyvolat nastavení gyroskopu. U nastavení gyroskopu je nutné využít jeho katalogový list [33], jelikož popisované parametry není možné nastavit přímo. Parametry nastavení jsou navzájem závislé a je nutné je odečítat z tabulek právě katalogového listu. Pro lepší představu, datová rychlost spolu se šířkou pásma určují rychlost měření. Podobný postup má i nastavení mezního kmitočtu filtru typu HP.

Nastavení akcelerometru je cejchované přímo v jednotkách, takže nevyžaduje další komentář.

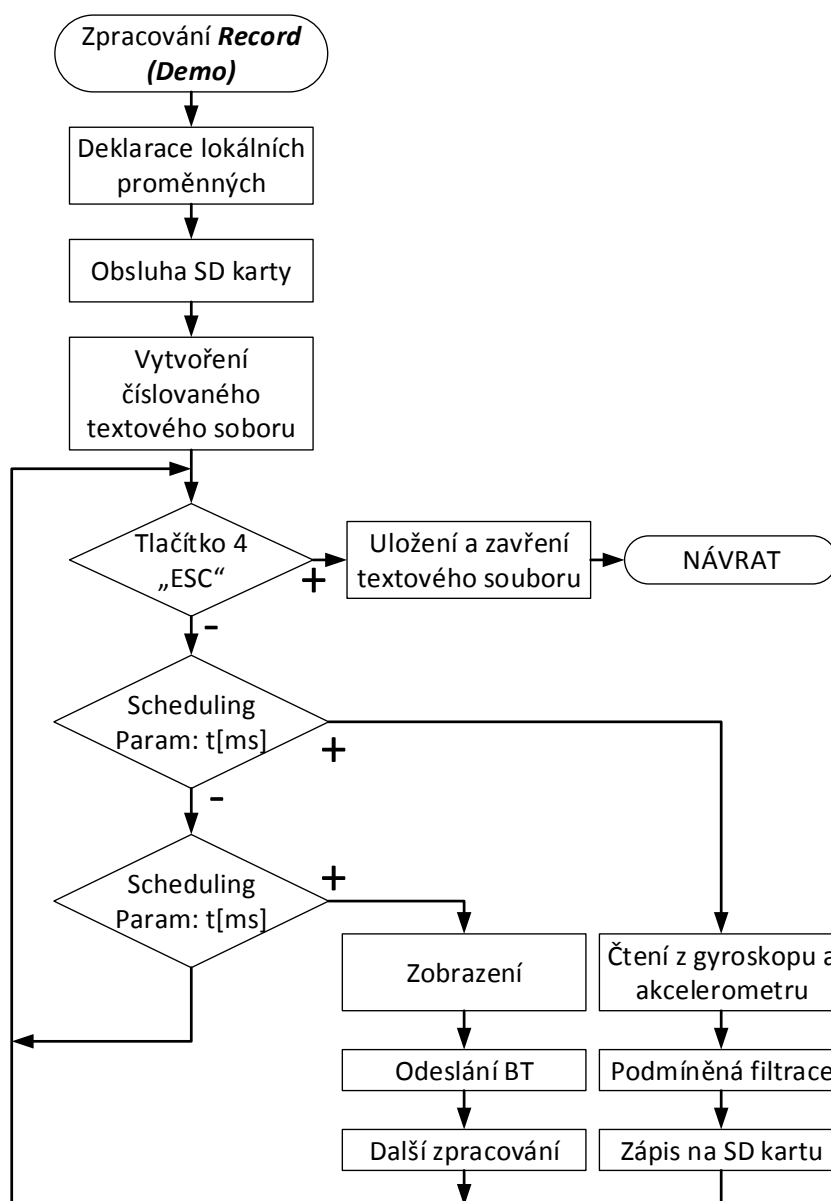
Po vyvolání nabídky Bluetooth z nabídky „Setup“ bude uživatel naveden pro další postup. Ten je takový, jak bylo uvedeno v předchozích textech (odpojení napájení, zmačknutí OK, a současné připojení napájení).

4.3.2 Běh programu - záznam a zpracování dat

Ihned po vyvolání nabídky „Record“ nebo „Demo“, dochází k inicializaci všech potřebných lokálních proměnných a struktur, které jsou pro další práci potřeba (Obr. 4.3). Následuje obsluha SD karty, pod kterou se skrývá linkování SD karty a alokace objektu souborového systému. Následuje vytváření číslovaného textového souboru, do kterého se budou ukládat naměřená data.

Hned poté se program dostane do hlavní smyčky, ve které je aplikováno plánování procesů („scheduling“). Plánování procesů volá jednotlivé programové větve s předem nastavenou periodou. V tomto bodě se současně liší podprogramy „Record“ a „Demo“. Cyklus „Record“ je ochuzen o větev zobrazení, odeslání BT a další zpracování.

Po zmáčknutí tlačítka „ESC“ dochází k opuštění hlavní smyčky, následné uložení, zavření textového souboru a odlinkování SD karty.



Obr. 4.3: Běh programu „Record“ a „Demo“

4.4 Obsluha jednotlivých periferií

Původním záměrem byl vývoj vlastních knihoven pro oba MEMS senzory, nicméně po určitém čase zkoušení a experimentování byla zvolena taktika použití již napsaných a dostupných knihoven. Za tímto účelem byla využita vzorová řešení od STM [46]. Tato vzorová řešení obsahují již poměrně pěkně napsané knihovny, ovšem struktura a jejich zřetězení pro obsluhu jednotlivých snímačů byla téměř žalostná. Z tohoto důvodu byly knihovny pro oba snímače upraveny s ohledem na univerzálnost a větší přehlednost. Struktura upravených knihoven je popsána v následujících kapitolách.

4.4.1 Obsluha gyroskopu

Původní vzorová řešení [46] pro obsluhu gyroskopu využívá následující zdrojové (.c) a hlavičkové (.h) soubory knihoven:

stm32f3_discovery.c (.h)

- definice (inicializace) tlačítek, LED diod, SPI komunikace (gyroskop), I²C (akcelerometr), atd.

stm32f3_discovery_gyroscope.c (.h)

- definice inicializace gyroskopu, konfigurace a čtení změřených hodnot

l3gd20.c (.h)

- mapování registrů gyroskopu, adresace funkcí, adresace konfiguračních bitů, inicializace, konfigurace a čtení hodnot

gyro.c (.h)

- definice struktur využívaných pro konfiguraci gyroskopu

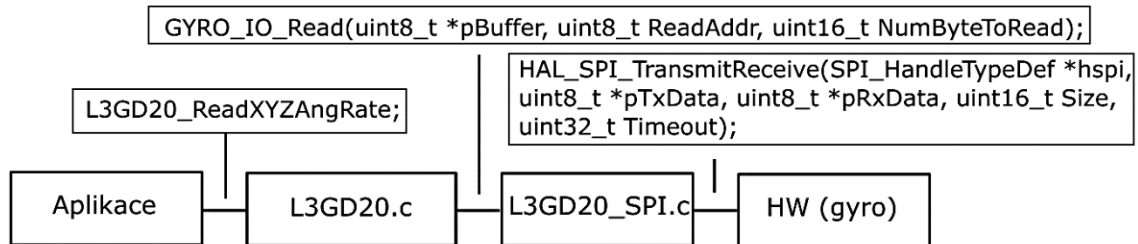
mems.c (.h)

- knihovny nejvyšší vrstvy obsahující funkce pro vyčítání naměřených hodnot

Funkce všech výše uvedených knihoven (nabízených v rámci vzorových řešení od výrobce) jsou nejrůzněji propletené a do značné míry nepřehledné. Zejména pro nezávislého programátora, využívajícího knihovny poprvé. Takto situované knihovny, tzn. nepřehledné volání funkcí napříč knihovnami a práce s proměnnými, rozhodně nepřidávají ani na univerzálnosti. Ovšem možnosti konfigurace snímače a jeho následná obsluha jsou na výborné úrovni.

Z popisovaných důvodů bylo rozhodnuto, pro editaci těchto knihoven. Editací se v tomto případě rozumí restrukturalizace, jež má za úkol přizpůsobit již napsané a plně funkční knihovny. Jejím cílem je knihovny zpřehlednit a vytvořit je více univerzální.

Na následujícím obrázku (Obr. 4.4) je znázorněna nová struktura a pojmenování knihoven. Původních pět na sobě závislých knihoven bylo redukováno na knihovny pouze dvě. Z jejich pojmenování se dá předvídat, co která knihovna má za úkol. Jedná se o L3GD20.c (.h), která obsahuje veškerý kód vykonávající kompletní obsluhu snímače, včetně jeho nastavení a inicializaci. Druhou knihovnou je L3GD20_SPI.c (.h), jež má za úkol inicializovat komunikační rozhraní a následně jeho řízení. Nové (upravené) knihovny jsou situované hierarchicky, tedy od vyšších vrstev k těm nižším.



Obr. 4.4: Struktura knihoven pro obsluhu gyroskopu

Vzorová řešení od výrobce neobsahovala výpočetní rutinu, která by přepočítala naměřená data na hodnoty v odpovídajících skutečných jednotkách. Tento fakt je málo pochopitelný s ohledem na kvalitu a komplexnost původních knihoven.

Po zjištění tohoto nedostatku (nekorretní naměřené hodnoty) byla napsána níže naznačená funkce. Ta má za úkol přepočítat naměřené hodnoty s ohledem na zvolený měřicí rozsah snímače. Naměřené hodnoty tedy nejsou přímo ocejchovány v příslušných jednotkách. Musí se tedy dopočítat jako hodnota z celkového měřicího rozsahu. Výstupem gyroskopu jsou poté hodnoty úhlové rychlosti v [°/s].

```
void GYRO_ReadAng(void)
{
    //pomocne datove typy pro prepocet
    float RawData [3] = {0x00, 0x00, 0x00}; //hodnoty z gyra
    float pfData[3] = {0x00, 0x00, 0x00}; //hodnoty z gyra
    uint8_t i = 0;

    //gyroskop vrati namer. hodnoty do prom. buffer
    BSP_GYRO_GetXYZ(RawData);

    //prepocet mericiho rozsahu
    for(i=0; i<3; i++)
    {
        pfData[i]=(float) (RawData[i] * sensitivity); //puvodni
        pfData[i] =pfData[i] * 250000/286720; //dopocet
        pfData[i] =pfData[i] / 1000; //mdps->dps
    }
}
```

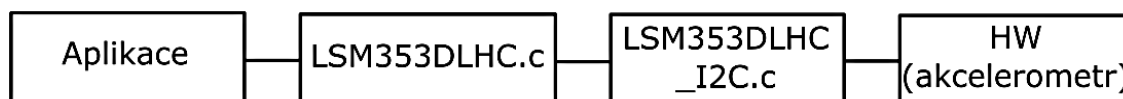
Ve funkci jsou pro předání vstupních hodnot dodrženy datové typy (float) deklarované v originálních knihovnách. Hodnota 250000 je hodnota měřicího rozsahu v jednotkách [mdps]. Hodnota 286720 vychází z výpočtu $32768 \times 8,75$, kde číslo 32768 představuje počet hodnot výstupního registru (16 bitů) a číslo 8,75 představuje citlivost snímače na nejnižší rozsah. Při přenastavení měřicího rozsahu dochází v rámci funkce k úpravě proměnné „sensitivity“, zbytek výpočtu zůstává stejný.

4.4.2 Obsluha akcelerometru

V případě obsluhy akcelerometru je situace velmi podobná jako v předchozím případě u gyroskopu. Byly zde opět využity knihovny zveřejněné výrobcem vývojové desky [46]. Struktura knihoven osbluhující periferii je prakticky stejná:

- stm32f3_discovery.c (.h)
- stm32f3_discovery_gyroscope.c (.h)
- lsm303dlhc.c (.h)
- accelero.h
- mems.c (.h)

Nová struktura knihoven je i v tomto případě opět obdobná. Znázorněno na Obr. 4.5.



Obr. 4.5: Struktura knihoven pro obsluhu akcelerometru

Stejně tak i v případě akcelerometru byl problém s vracením hodnot v příslušných jednotkách. I v případě akcelerometru jsou dodrženy příslušné datové typy. Přepočítání na konkrétní jednotky je stejné s ohledem na použitý měřicí rozsah. Ten je v tomto případě 2000 mg. Hodnota 32767 zůstává totožná s předchozím případem.

```

void ACCELERO_ReadAcc(void)
{
    //pomocne datove typy pro prepocet
    int16_t buffer[3] = {0};
    static int16_t xval_akceler, yval_akceler, zval_akceler = 0x00;

    //akcelerometr vrati namer. hodnoty do prom. buffer
    BSP_ACCELERO_GetXYZ(buffer);

    //prepocet mericiho rozsahu
    xval_akceler = (buffer[0] * sensitivity * 2000) / 32767;
    yval_akceler = (buffer[1] * sensitivity * 2000) / 32767;
    zval_akceler = (buffer[2] * sensitivity * 2000) / 32767;
}
  
```

4.4.3 Obsluha LCD displeje

Jak již bylo avizováno v kapitole 3.2, byl vybrán čínský alfanumerický LCD displej označený jako 1602A (V1.2) s cenou okolo 40 Kč. Dle katalogového listu obsahuje řadič ST7066U (derivát od HD44780). Ten pracuje v souladu s velkým, již napsaným, množstvím knihoven v jazyce C, určené pro 8-bitové mikrokontroléry.

S ohledem na velmi dobré zkušenosti s knihovny `lcd.c` a `lcd.h` dostupnými pro mikroprocesory Atmel AVR [43], byly tyto knihovny pouze upraveny k použití na platformě STM pracující s HAL ovladači. Tato úprava spočívala v přizpůsobení kódu pro práci s odlišnými I/O periferiemi, které jsou obsaženy na této platformě. Jednou z dalších výhod popisované úpravy je možnost připojení displeje ke zcela libovolným pinům na libovolných portech mikrokontroléru. Po uživateli je poté knihovnou vyžadováno pouze namapování jednotlivých řídicích a komunikačních pinů pomocí definic, jak je ukázáno na následujícím kódu.

```
#define LCD_RS_Pin          GPIO_PIN_3    //definice pinu
#define LCD_RS_GPIO_Port  GPIOD          //definice portu
...
```

Součástí úpravy knihovny je také doplněná rutina vykonávající inicializaci zvolených pinů na úrovni mikrokontroléru. Tuto rutinu je možné volat pomocí volání funkce `lcd_bus_init()`. To ovšem za předpokladu předešlého namapování požadovaných pinů.

Samotný zápis dat do displeje probíhá pomocí maskování každého bitu proměnné *data*. Pokud bude bit vyhodnocen jako `log1`, proběhne zápis do pinu. Ukázka takového kusu kódu je znázorněna pod odstavcem (je zřejmý časový multiplex).

```
lcd_e_high() ;
WritePinLCD(D4, (data & 0b00010000) && 1 );
WritePinLCD(D4, (data & 0b00010000) && 1 );
WritePinLCD(D5, (data & 0b00100000) && 1 );
WritePinLCD(D6, (data & 0b01000000) && 1 );
WritePinLCD(D7, (data & 0b10000000) && 1 );
lcd_e_low(); // prvni polovina dat. slova, !!striktne bez delaye!!

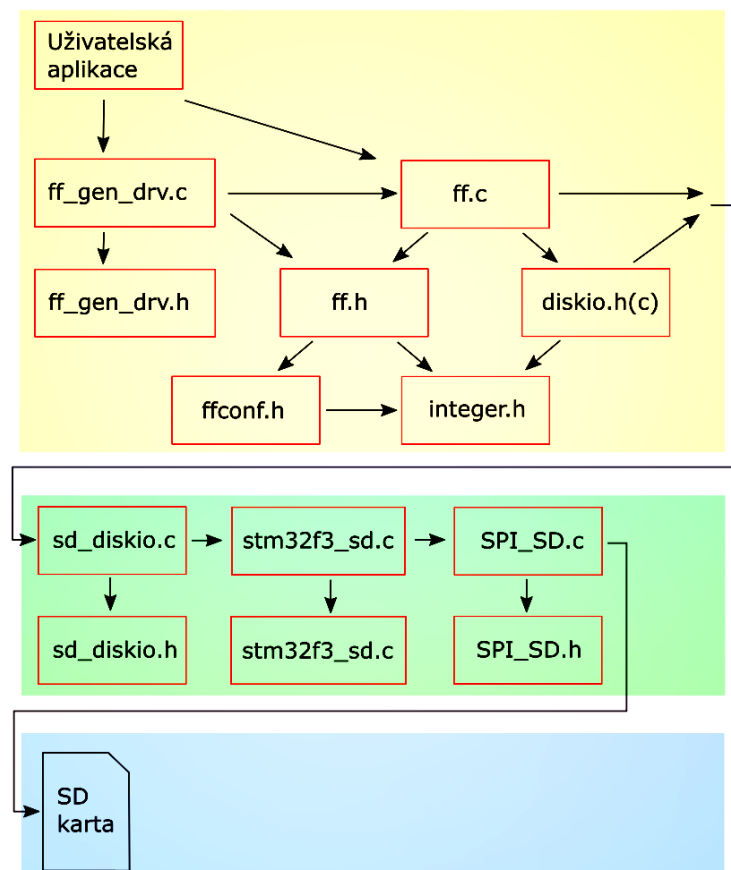
lcd_e_high() ;
WritePinLCD(D4, (data & 0b00000001) && 1);
WritePinLCD(D5, (data & 0b00000010) && 1);
WritePinLCD(D6, (data & 0b00000100) && 1);
WritePinLCD(D7, (data & 0b00001000) && 1);
lcd_e_low(); // druha polovina dat. slova)
lcd_delay(); //delay min. 1200us
```

V průběhu úpravy knihovny vznikla nepozorností chyba, v podobně nedodržení minimální doby periody $T_{C,min} = 1200$ ns (perioda trvání impulsu enable). Toto nedodržení periody způsobovalo problém při inicializaci displeje. Displej se povedlo inicializovat s pravděpodobností kolem 1:5. Dále bylo vyzorováno, že s popisovaným časem zpoždění měly problém zejména zápisy instrukcí, nikoliv dat. Rychlost zápisu na displej (i když je rychlost na dvouřádkovém displeji dostatečná) by šla teoreticky zrychlit pomocí oddělení „pomalejšího“ zápisu instrukcí a „rychlejšího“ zápisu dat. Ovšem toto tvrzení není zcela jednoznačné, vyžadovalo by si další pozorování a testování.

4.4.4 Obsluha SD karty

Požadavkem plynoucím ze zadání je možnost ukládání dat na paměťové médium. Jako paměťové médium byla zvolena micro SD karta. Pro přenositelnost naměřených dat mezi INS a počítačem, je kladen požadavek na zvolenou kartu implementovat souborový systém (viz. kapitola 2.4.2). Vytvoření souborové struktury a její následné využívání s respektováním všech jejích požadavků je poměrně programátorsky náročné. Vyžaduje znalost jak samotného hardwaru (strukturu SD karty), tak i velké množství parametrů a rutin, nutných pro její využívání.

V současné době existují již napsané a odladěné knihovny, sloužící ke zmíněné implementaci a dodržování všech pravidel pro vytvoření a správnou funkci souborového systému. Jedná se o volně dostupné knihovny FatFS [41]. Ty jsou kompatibilní k velkému množství mikrokontroléru (různých platforem), umožňují velmi mnoho možností konfigurací (různé souborové systémy, různé délky názvů, atd.), ale také obsahují spoustu předpřipravených funkcí určených k práci s daty na SD kartě.



Obr. 4.6: Struktura knihoven pro obsluhu SD karty

Autor těchto knihoven se primárně zaměřuje na souborový systém a práci s paměťovými kartami, nikoliv na implementace na různých architekturách. Nicméně na svém webu vybrané vzorové projekty pro různé platformy uveřejňuje.

Popisované knihovny přepoužila i společnost STM pro realizaci souborového systému na svých mikrokontrolérech [46]. Tato vzorová řešení byla převzata pro realizaci souborového systému na INS. Struktura využitých knihoven je zobrazena na Obr. 4.6.

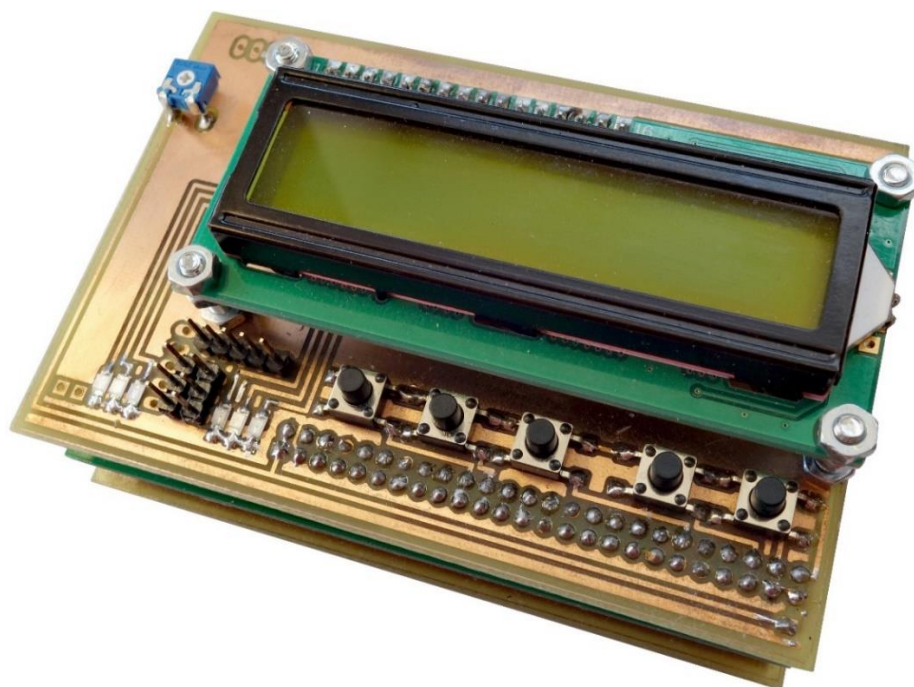
5 REALIZACE A VÝSLEDKY PRAKTICKÉHO ŘEŠENÍ

Ze systematických důvodů byla hardwarová realizace ponechána až po kompletním oživení softwarové části. To zejména z důvodu neznalosti všech technických detailů a úskalí zvoleného mikrokontroléru. Těma by teoreticky mohla být omezení možnosti využití pinů, případně interních periférií, za určitých podmínek. Při prvotní konstrukci hardwaru by výskyt takového omezení mohl způsobit jeho nepoužitelnost. V průběhu softwarového návrhu se ovšem takovéto hardwarové omezení nevyskytlo.

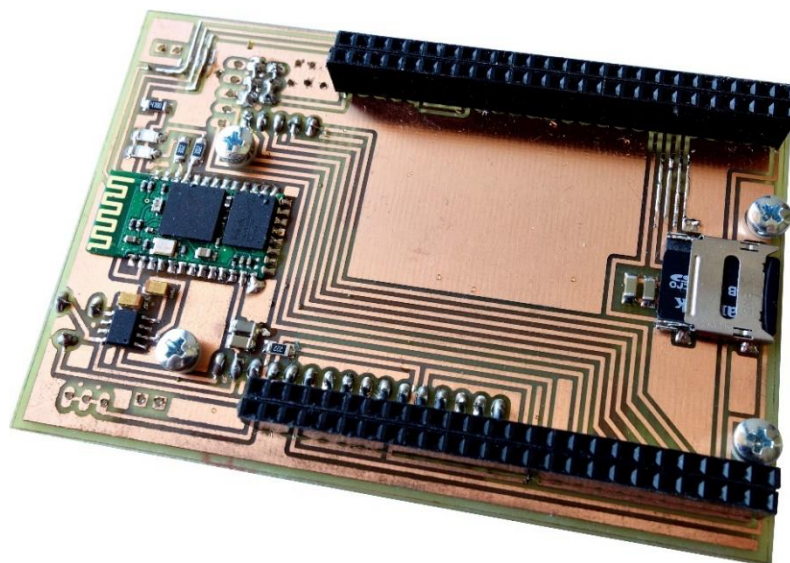
Samotná výroba desek plošných spojů byla realizována v domácích podmínkách. Předloha vodivého motivu byla vytištěna na transparentní fólii, ta byla následně oboustranně přiložena na cuprexit s fotocitlivou vrstvou. Takto přiložená a přitlačená pomocí skel byla vložena do osvitové komory. Po důkladném osvětlení následovalo vyvolání v hydroxidu sodném a následně finální očištění. Na tímto způsobem připravenou desku byla aplikována vrstva kalafuny rozpuštěné v ředidle. V lepším případě, namísto kalafuny by bylo vhodnější vyrobenou DPS natřít nepájivým lakem, a aplikovat stejný postup osvětlení a vyvolání, jako tomu bylo při výrobě vodivých cest (pouze s rozdílnou maskou).

5.1 Praktická realizace - hardwarová část

Při sestavení modulu a jeho ožívování nevznikly žádné neočekávané komplikace. Fotografie výsledného a sestaveného vrchního přípojného modulu je vyobrazena na Obr. 5.1. a Obr. 5.2



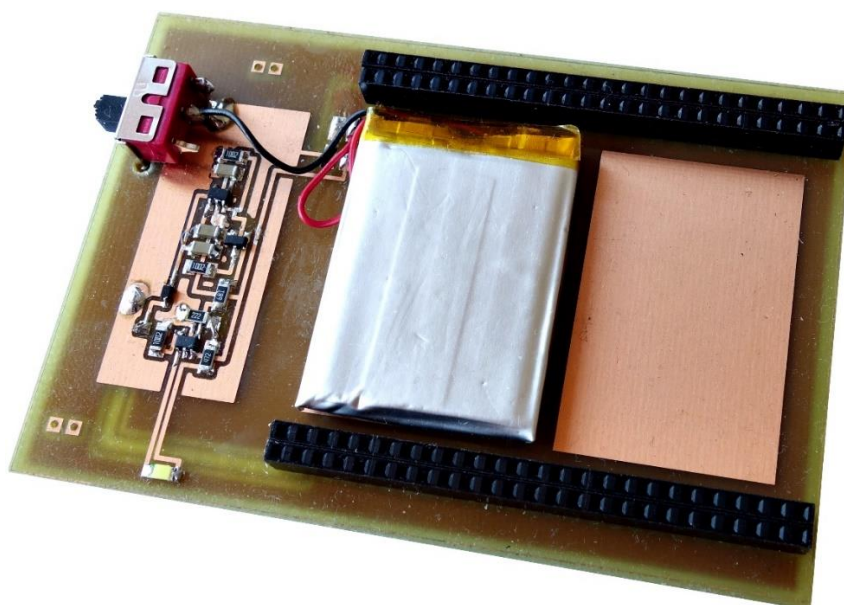
Obr. 5.1: Vrchní přípojný modul v sestaveném stavu – horní pohled



Obr. 5.2: Vrchní přípojný modul v sestaveném stavu - spodní pohled

Sestavení a oživení napájecího bateriového modulu (Obr. 5.3) také proběhlo bez problémů. Pouze byl nalezen nedostatek v podobě nemožnosti odpojení bateriového napájení bez nutnosti odpojení celého modulu. Tento problém byl později v samotné návrhu vyřešen (přidán přepínač).

Na bateriově napájecí modul je možné připevnit až dvě Li-Pol baterie, přičemž jejich ukotvení je řešené pomocí oboustranné lepicí pásky. Při paralelním spojování dvou baterií je ovšem nutné zajistit jejich stejný napěťový potenciál. Případné řešení může být jejich propojení pomocí rezistoru tak, aby došlo k rovnoměrnému a pomalému přelití náboje mezi sebou a vyrovnání jejich napětí.



Obr. 5.3: Spodní bateriový přípojný modul v sestaveném stavu - horní pohled

5.2 Praktické realizace - softwarová část

Inerciální navigační jednotka umožňuje měřit a zaznamenávat naměřená data. To v doprovodu současného odesílání pomocí Bluetooth. Záznamy se ukládají na SD kartu do očíslovaných textových souborů. Každý textový soubor má na svém prvním řádku textovou hlavičku, pod kterou se do sloupců naměřená data ukládají. Odesílání a zobrazení dat v reálném čase je v rámci aplikace volitelné a je možné jej vyvolat pomocí zvolení konkrétní nabídky.

Součástí softwaru je i možnost nastavení. Pomocí nastavení je možné upravovat vybrané vlastnosti obou inerciálních snímačů. Stejně tak lze v rámci nastavení formátovat SD kartu a měnit nastavení rychlosti BT přenosu.

Drobný nedostatek se objevil v možnosti nastavení vysílací rychlosti Bluetooth modulu. Pro jeho nastavení je nutné odpojit destičku od napájení. Další a závažnější problém nastane v případě, upraví-li datovou rychlost uživatel. Tato změna nastavení datové rychlosti vysílacího modulu, nezpůsobí změnu nastavení rychlosti odesílání dat v MCU periférii UART. To znamená, že změna nastavení rychlosti odesílání Bluetooth neprovede automaticky změnu v inicializaci UART periférie odesílající data. Problém je vyřešen tak, že uživatel je nucen v případě přenastavení datové rychlosti BT modulu vždy nastavit i datovou rychlost vysílání z MCU. Nevýhodou tohoto způsobu řešení je nutnost nastavovat rychlost komunikace na dvou místech v programu. Zvláště nastavení samotného modulu a zvláště nastavení MCU.

Druhým a elegantnějším způsobem řešení by mohlo být dotazování se rychlosti BT modulu, ze strany MCU. BT modul by uvedl svoji nastavenou rychlost a této rychlosti by se přizpůsobila i rychlost na straně MCU. Opět musí být připomenut problém s nutností odpojení napájení pro nastavovací režim BT modulu. Druhý způsob nápravy vyžaduje změnu HW návrhu. Tato změna by umožňovala spínání napájení BT modulu pomocí tranzistoru ovládaného z řídicího MCU.

Třetí možností řešení by mohlo být, vůbec neupravovat vysílací rychlost (ani u samotného modulu a ani u UART periférie MCU) a nechat ji nastavenou na přednastavené hodnotě (115200 Bd). V takovém případě se nabízí tuto možnost nastavení z firmwaru MCU úplně odstranit.

Ze softwarového hlediska se dá firmware INS považovat za zcela kompletní. Je doplněný o nadstandardní funkce, které si původní zadání nevyžaduje. To zejména proto, aby bylo možné tuto jednotku konvertovat i na další softwarové projekty založené na využití inerciálních snímačů, se záznamem dat.

5.3 Výsledky experimentálního měření

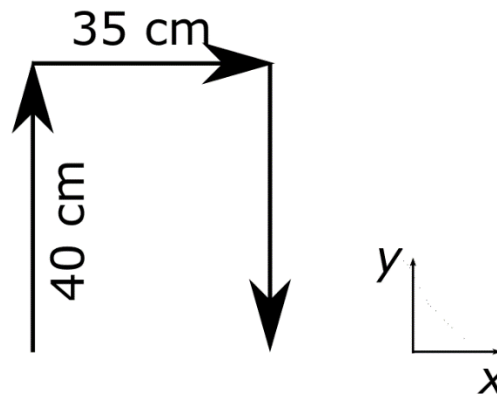
5.3.1 Akcelerometr

Jako součást diplomové práce vznikla jednoduchá aplikace v programu Matlab pro offline zpracování. Tato aplikace umožňuje z naměřených hodnot akcelerometru vykreslit trajektorii pohybu. Pro jeho výpočet byl využit jednoduchý vzorec z teoretického úvodu (kapitola 1.3). Jelikož vzorec využívá integrování podle času, je nutné znát periodu vzorkování (tzn. periodu odečítání hodnot akcelerometru a gyroskopu). Ta je v inerciální navigační jednotce nastavena na přibližně 10 ms, proto je i v aplikaci Matlabu nastavena jako konstanta. Bez této znalosti by výsledná vypočtená trajektorie neodpovídala skutečné délce.

Jelikož takto zjednodušený výpočet postrádá jakékoliv filtrování signálu, je výsledná zaznamenaná trajektorie velmi nepřesná.

Testová měření probíhala na stole za předem stanovených podmínek. První podmínkou bylo co nejvíce vyrovnat INS do roviny. To z toho důvodu, aby se chyba způsobená gravitačním zrychlením soustředila co nejvíce na osu z (kolmou k rovině stolu). Druhou podmínkou bylo, pohybovat INS stále ve stejné orientaci (tzn. v průběhu měření INS nenatáčet). V případě jakéhokoliv potočení by se změnila orientace os a měření by tím bylo znehodnocené.

Při experimentálním měření se pohybovalo jednotkou dle Obr. 5.4. Celkem proběhlo několik měření, přičemž do výsledků DP jsou promítnuta ty nejvíce ilustrativní.

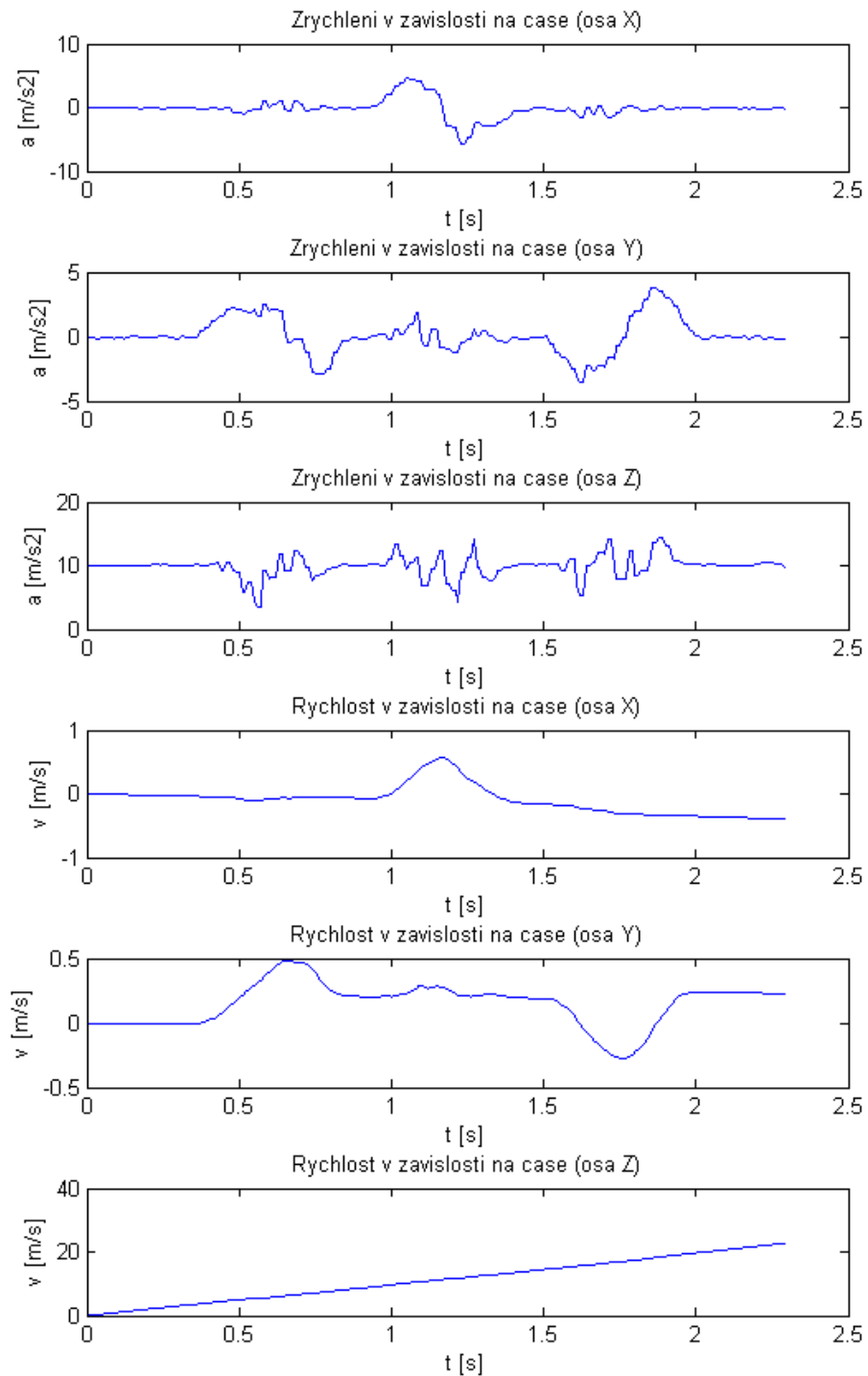


Obr. 5.4: Trajektorie pohybu při experiment. měření

Na testování měla největší vliv chyba způsobená neodfiltrovaným gravitačním zrychlením. Díky tomu, že se inerciální navigační jednotku nepodařilo umístit přesně vodorovně, prosakovala tato chyba do všech os snímače. Dalším zdrojem chyb je bez pochyby drift, způsobený samotným snímačem (a jeho teplotní závislostí). Zde by teoreticky částečně pomohla kalibrace na nulu.

Bez filtrace

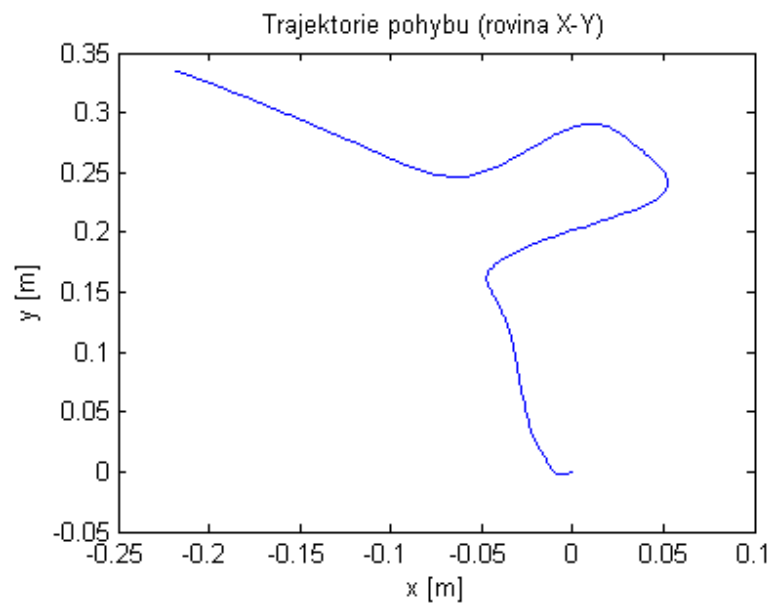
Zobrazená zrychlení a rychlosti prvního měření jsou znázorněna na Obr. 5.5. Na třetím grafu (osa z) je promítnuta velikost gravitačního zrychlení. Současné jsou zde vidět záškuby způsobené pohybem jednotkou po stole (stůl není dokonale hladký). Je dobré si povšimnout rychlostí po druhé vteřině měření u grafů č. 4 a 5.



Obr. 5.5: Měření č.1, grafy zrychlení a rychlosti

Rychlost na konci měření u grafu č. 4 se po odečtení rovná $-39,4$ cm/s. V případě osy y se tato hodnota rovná $+22$ cm/s. Tyto chyby jsou, jak již zaznělo, způsobené posunutou nulou snímače se superponovanou hodnotou gravitačního zrychlení, pronikajícího z osy z (nedokonale vyrovnaná jednotka). Její velikost je umocněná vlivem integrování, tzn. neustálého přičítání chyby. Závislost rychlosti na čase (graf č. 6) je dle předpokladů lineární.

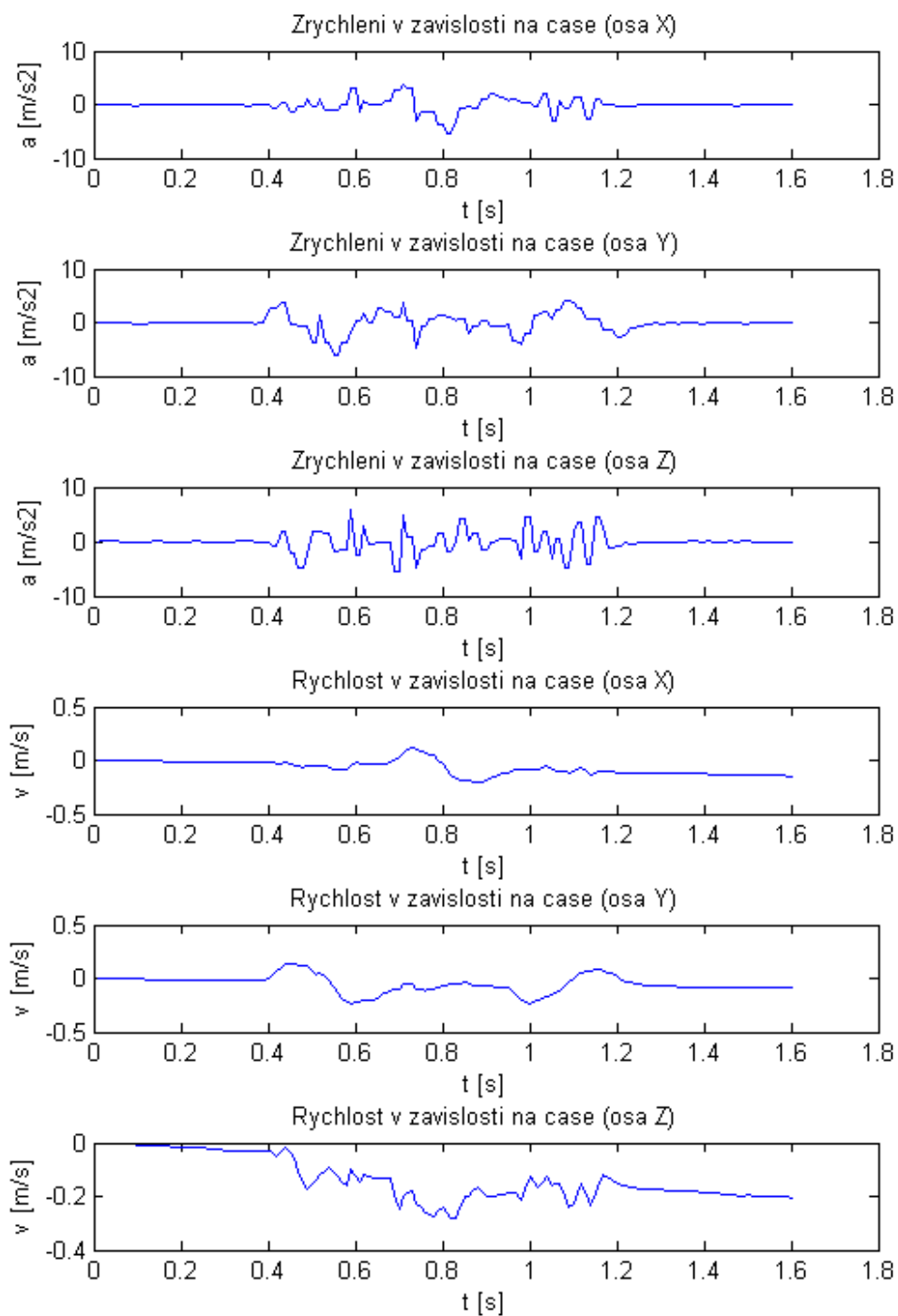
Výsledná naměřená trajektorie pohybu zobrazená ve dvou osách (x a y) se nachází na Obr. 5.6.



Obr. 5.6: Měření č. 1, trajektorie pohybu x - y

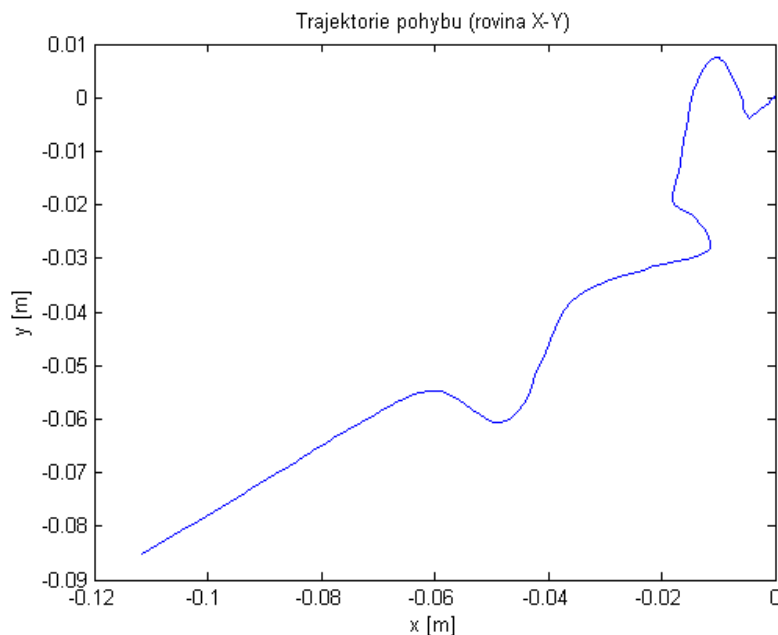
S filtrací (aktivovaný filtr typu HP)

V nastavení samotného snímače je možné aktivovat vnitřní filtr typu HP, který má za úkol potlačit vliv gravitačního zrychlení. Po experimentech bylo zjištěno, že gravitační zrychlení opravdu účinně potlačí, ale znehodnotí samotné měření. Zobrazené grafy zrychlení a rychlosti takto upraveného nastavení snímače se nachází na Obr. 5.7.



Obr. 5.7: Měření č.2, grafy zrychlení a rychlosti

Výsledná spočítaná trajektorie se nachází na Obr. 5.8.

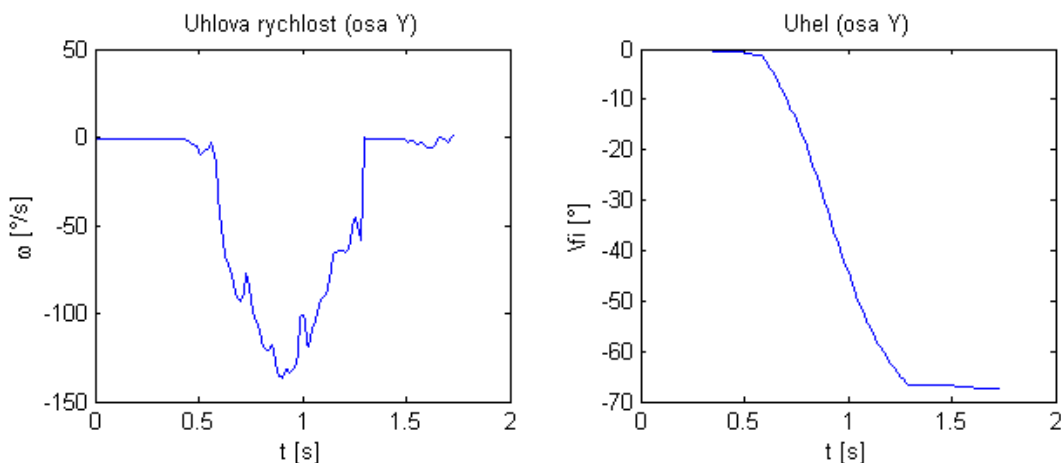


Obr. 5.8: Měření č. 2, trajektorie pohybu x - y

Dále bylo zjištěno, že nastavení mezního kmitočtu integrovaného filtru (typ HP) nemá na konečný výsledek téměř žádný vliv.

5.3.2 Gyroskop

U měření pomocí gyroskopu vzniká chyba pouze vlivem posunutí nuly a nelinearity. Výpočet probíhá opět pomocí integrace, při které chyba narůstá s počtem opakování. Výsledky jsou oproti výsledkům z akcelerometru lepší. Ilustrace otáčení (o 90°) podle osy y se nachází na Obr. 5.9



Obr. 5.9: Měření č. 1, rotace podle osy y

5.3.3 Zhodnocení měření

Z praktických výsledků experimentálních měření je zřejmé, že pro účel vykreslování trasy by bylo nutné sestavit mnohem sofistikovanější algoritmus výpočtu než pouhé aplikování integrace na naměřená data v surovém nefiltrovaném tvaru. Takový výpočet by měl být schopný naměřená data filtrovat, přičemž jednou z částí filtrace by bylo odstranění vlivu gravitačního zrychlení. Další částí zpracování naměřených dat by měl být přepočet zrychlení s využitím hodnot získaných pomocí gyroskopu. Tato úprava by měla za následek udržování stále stejné orientace os i při otáčení s inerciální jednotkou.

Filtrování pomocí jednodušších filtrů, případně integrovaných filtrů ve snímačích, dochází ke ztrátě užitečných informací. K dosažení zcela optimálních výsledků by bylo nezbytné na naměřená aplikovat Kalmanovu filtraci, která umí počítat s predikčními hodnotami v doprovodu s výpočtem pravděpodobností.

6 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo provést rozbor řešení a praktickou realizaci inerciální navigační jednotky s moderními MEMS senzory pro aplikace v personální a automobilové navigaci.

První část řešení práce obsahuje stručný motivační úvod do oblastí inerciálních snímačů. Následuje teoretický úvod, který se podrobně zabývá problematikou konvenčních i MEMS akcelerometrů a gyroskopů. Jsou zde popsány principy měření, principy snímání naměřených veličin, zdroje chyb měření a jejich eliminace. K ucelení informací, nutných pro zdárnou realizaci, nechybí popsání běžně používané souřadnicové systémy.

Následuje kapitola druhá a třetí, ve kterém jsou probrány možnosti realizace inerciální navigační jednotky s ohledem na zadání práce. Tento rozbor je podepřen na základě studia teoretických poznatků, obsažených v teoretickém úvodu. Jeho obsahem je návrh koncepce celého zařízení, výběr vhodné platformy, paměťového média a možnosti umožňující odesílat naměřená data. Poslední texty této kapitoly jsou věnovány možnostem bateriového napájení s integrovaným nabíječem a jeho praktické realizaci (doplněno mimo základní požadavky plynoucí ze zadání).

Kapitola čtvrtá se podrobně věnuje softwarovému vybavení, inerciální jednotky. Jsou zde rozepsány služby knihoven jednotlivých snímačů, SD karty i obsluha LCD displeje.

Kapitola pátá se zabývá praktickými výstupy, úskalími návrhu i samotným zpracováním naměřených dat. Vše je završeno souborem ukázkových měření a zhodnocením jejich výsledků.

Při návrhu zařízení byl zvolen systematický postup, kdy byla nejdříve naprogramována softwarová část a na základě ní byl přizpůsoben a vyroben hardware.

Veškeré softwarové vybavení navigační jednotky bylo psáno ve snaze maximální přehlednosti spolu s kladeným důrazem na dodržení nepsaných programátorských pravidel a funkcionální správnosti. Vzhledem k těmto tvrzením se dá napsaný firmware považovat za dobrý základ pro snadno přenositelný kód na další projekty.

Ze softwarového hlediska se dá firmware INS považovat za zcela kompletní. Je doplněný o nadstandardní funkce, které si původní zadání nevyžaduje. To zejména proto, aby bylo možné tuto jednotku konvertovat i na další softwarové projekty a další vývoj.

Zadání diplomové práce se povedlo z větší části zdárně splnit. Za částečně nesplněné se dá považovat zpracování naměřených dat offline, kde se nachází stále rezervy pro vylepšení algoritmů, provádějící výpočet trajektorie pohybu. Zde se jedná zejména o implementaci Kalmanova filtru a implementaci umělého horizontu (vč. fixace na referenční směr). Toto méně kvalitní zpracování naměřených dat bylo způsobeno celkovou časovou tísni, která přetrvávala po celou dobu vypracování DP.

LITERATURA

- [1] GROVES, P. D. *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. Boston: Artech House, 2008, xvi, 518 s. ISBN 978-1-58053-255-6.
- [2] KEMPE, V. *Inertial MEMS: Principles and Practice*. New York: Cambridge University Press, 2011, xiv, 497 s. ISBN 978-0-521-76658-6.
- [3] WOODMAN, O. *An introduction to inertial navigation* [online]. Cambridge: University of Cambridge, 2007 - [cit. 3.10.2015]. ISSN 1476-2986.
Dostupné z www: <<https://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR-696.pdf>>.
- [4] BEEBY, S., ENSELL, G., KRAFT, M., WHITE, N. *MEMS Mechanical Sensors*. Boston: Artech House, Inc., 2004. 282 s. ISBN 1-58053-536-4.
- [5] TITTERTON, D. H., WESTON, J. L. *Strapdown Inertial Navigation Technology – 2nd Edition*. United Kingdom: The Institution of Electrical Engineers, 2004. 549 s., ISBN 0-86341-358-7.
- [6] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. české vyd., 2. dotisk. Překlad Jan Obdržálek, Bohumila Lencová, Petr Dub. Brno, Praha: VUTIUM, Prometheus, 2000. ISBN 80-214-1868-0, 81-7196-213-9.
- [7] HUSÁK, M. Micro.feld.cvut.cz: *Akcelerometry* [online]. [cit. 5.10.2015].
Dostupné na www: <<http://www.micro.feld.cvut.cz/home/x34ses/prednasky/>>.
- [8] DIMENSION ENGINEERING Inc. *A beginner's guide to accelerometers* [online] [cit. 8. 10. 2015].
Dostupné na www: <<http://www.dimensionengineering.com/info/accelerometers>>.
- [9] Katedra leteckej technickej prípravy. *Akcelerometre* [online]. [cit. 8. 10. 2015].
Dostupné na www: <<http://www.senzorika.leteckafakulta.sk/?q=node/175>>.
- [10] VOJÁČEK, A. HW.cz: *MEMS - díl 1. - Co to je a jak to vypadá ?* [online]. 19.11.2006 - [cit. 2. 11. 2015]. Dostupné na www: <<http://www.hw.cz/clanek/2006111901>>
- [11] Katedra leteckej technickej prípravy. *Akcelerometre* [online]. [cit. 8. 10. 2015].
Dostupné na www: <<http://www.senzorika.leteckafakulta.sk/?q=node/175>>.
- [12] Wikipedie: Otvřená encyklopedie. *Gyroskop* [online]. c2015 [citováno 3. 11. 2015].
Dostupný z WWW:
<<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Gyroskop&oldid=12674569>>
- [13] neubrex.com. *Fiber Optic Gyroscope development: FOG principle* [online]. [cit. 3. 11. 2015].
Dostupné na www: <<http://www.neubrex.com/htm/applications/gyro-principle.htm>>

- [14] VOJÁČEK, A. automatizace.hw.cz: *Integrované MEMS GYROSKOPY* [online]. 11.10.2009 - [cit. 6.11.2015]. Dostupné na www: <<http://automatizace.hw.cz/integrované-mems-gyroskopy>>
- [15] REICHL, J., VŠETIČKA, M. Encyklopedie fyziky. ****Coriolisova síla* [online]. [citováno 3. 11. 2015]. Dostupné na www: <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/43-coriolisova-sila>>
- [16] VOJÁČEK, A. HW.cz: *Jak pracují nové 3D MEMS akcelerometry Freescale ?* [online]. 30.4.2007 - [cit. 3. 11. 2015]. Dostupné na www: <<http://www.hw.cz/soucastky/jak-pracuji-nove-3d-mems-akcelerometry-freescale.html>>
- [17] ST life.augmented. *LSM303DLHC Ultra-compact high-performance eCompass module: 3D accelerometer and 3D magnetometer, Revision 2 Datasheet* [online]. 5. 11. 2013 - [cit. 7. 11. 2015]. Dostupné na www: <http://www.st.com/web/catalog/sense_power/FM89/SC1449/PF251940>.
- [18] NORIEGA-MANEZ, R. J. Stanford University: *Inertial Navigation* [online]. 21. 10. 2007 – [cit. 7. 11. 2015]. Dostupné na www: <<http://large.stanford.edu/courses/2007/ph210/noriega1/>>
- [19] GFZ Potsdam, BMI. lexikon.info: *Geoid* [online]. [cit.10.11.2015]. Dostupné z WWW: <<http://www.fe-lexikon.info/lexikon-g.htm>>
- [20] FRACEK, W. esri.com: *Mean Sea Level, GPS, and the Geoid* [online]. 9. 2003-[cit.10.11.2015]. Dostupné z WWW: <<http://www.esri.com/news/arcuser/0703/geoid1of3.html>>
- [21] geologie.vsb.cz: *Tvar Země* [online]. [cit.10.11.2015]. Dostupné z WWW: <<http://geologie.vsb.cz/jelinek/tc-zem.htm>>
- [22] ŠEBESTA, J. *Globální navigační systémy*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2006, 132 s. ISBN 978-80-214-4500-0.
- [23] HRDINA, Z. *Transformace souřadnic ze systému WGS-84 do systému S-JTSK*. Elektronické skriptum. Praha: ČVUT v Praze, 2007, 21 s.
- [24] HAMADA, V. *Automatická kalibrace inerciálních senzorů*. Diplomová práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2014.
- [25] AGGARWAL, P., Z. SYED, Z. NOURELDIN a N. EL-SHEIMY. *MEMS-Based Integrated Navigation*. Norwood (USA): Artech House, 2010. ISBN 978-1-60807-043-5.
- [26] ŠIMANDL, M. *Odhad stavu stochastických systému*. Učební texty k semináři [Online]. 8. 12. 2010 - [cit. 10. 11. 2015]. Dostupné z: <http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_07_1012.pdf>
- [27] KLEINBAUER, R. *Kalman Filtering Implementation with Matlab*. Study Report in the Field of Study. Stuttgart: Geodesy and Geoinformatics at University Stuttgart, 2004.

- [28] TUCK, K. EDN Network: *Using adaptive filtering to enhance capacitive sensing of buttons/sliders* [Online]. 4. 5. 2013 - [cit. 18. 11. 2015].
Dostupné z: <<http://www.edn.com/design/analog/4413345/2/Using-adaptive-filtering-to-enhance-capacitive-sensing-of-buttons-sliders>>
- [29] STMicroelectronics: *STM32F303xB STM32F303xC: ARM®-based Cortex®-M4 32b MCU+FPU, up to 256KB Flash+48KB SRAM, 4 ADCs, 2 DAC ch., 7 comp, 4 PGA, timers, 2.0-3.6 V Datasheet rev.11* [online]. 4. 2015 – [cit. 20.11.2015].
Dostupné na www: <<http://www.st.com> >
- [30] STMicroelectronics: *UM1570 User manual STM32F3DISCOVERY Discovery kit for STM32F303xx microcontrollers* User manual [online]. 2. 2013 – [cit. 20.11.2015].
Dostupné na www: <<http://www.st.com> >
- [31] ST life.augmented. *LD3985 Ultra low drop and low noise BiCMOS voltage regulators* Datasheet [online]. 1. 2014 - [cit. 27. 11. 2015]. Dostupné na www:
< <http://www.st.com/> >
- [32] ST life.augmented. *BAT60J SMALL SIGNAL SCHOTTKY DIODE* Datasheet [online]. 1. 2003 - [cit. 27. 11. 2015]. Dostupné na www:
< <http://www.st.com/> >
- [33] ST life.augmented. *L3GD20 MEMS motion sensor: three-axis digital output gyroscope* Datasheet [online]. Únor 2013 - [cit. 27. 11. 2015]. Dostupné na www:
< <http://www.st.com/> >
- [34] SanDisk. *SanDisk SD Card Product Manual*. Version 2.2, Document No. 80-13-00169, listopad 2004, 116 s.
- [35] REDAKCE HW SERVERU. HW.cz: *ZigBee - novinka na poli bezdrátové komunikace* [online]. 6.2005 - [cit. 1. 12. 2015]. Dostupné na www:
<<http://vyvoj.hw.cz/navrh-obvodu/rozhrani/zigbee-novinka-na-poli-bezdratove-komunikace.html>>
- [36] IEEE Computer Society. *IEEE Std 802.15.1™-2005 (Revision of IEEE Std 802.15.1-2002). Part 15.1: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for wireless personal area networks (WPANs)*. ISBN 0-7381-4708-7.
Dostupné z WWW: <<https://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.1-2005.pdf>>
- [37] ITEad Studio. *HC-05 Bluetooth to Serial Port Module* Datasheet [online]. 18. 6. 2010 – [cit. 3. 12. 2015]. Dostupné na WWW:
<http://www.robotshop.com/media/files/pdf/rb-ite-12-bluetooth_hc05.pdf>
- [38] Hitachi, Ltd. *HD44780U (LCD-II) ADE-207-272(Z) '99.9 Rev. 0.0* Datasheet [online]. 1998 – [cit. 3. 12. 2015]. Dostupné na WWW:
<http://www.robotshop.com/media/files/pdf/rb-ite-12-bluetooth_hc05.pdf>

- [39] Linear Technology. *LTC4054-4.2/LTC4054X-4.2 Standalone Linear Li-Ion Battery Charger with Thermal Regulation in ThinSOT Datasheet* [online].
Dostupné na WWW:
< <http://www.gme.cz/img/cache/doc/935/066/ltc4054es5-4-2-trmpbf-datasheet-1.pdf>>
- [40] XIAOJI, N., YOU, L., HONGPING, Z., QINGJIANG, W., YALONG, B. *Fast Thermal Calibration of Low-Grade Inertial Sensors and Inertial Measurement Units*. *Sensors*. [odborný časopis online]. China: Wuhan University, publikováno: 12. 9. 2013, 26 s. ISSN: 1424-8220. Dostupné z WWW: < <http://www.mdpi.com/journal/sensors>>
- [41] <http://elm-chan.org>: *FatFs - Generic FAT File System Module*. [online]. [cit. 2013-03-12]. Dostupný z www: <http://elm-chan.org/fsw/ff/00index_e.html>
- [42] EONE ELECTRONICS CO.,LTD. *Specification for LCD Module 1602A-1 (V1.2)* Datasheet [online]. [cit. 3. 1. 2016]. Dostupné na WWW:
< <https://www.openhacks.com/uploadsproductos/eone-1602a1.pdf>>
- [43] Fleury, P., LCD library for HD44780 based LCD's [online], editoval Tomáš Frýza pro předmět BMPT. 2012
- [44] Orangkucking Lab. *Utilize Unused Footprints on 5V LCD Modules* [online]. 13. 12. 2014 – [cit. 15. 2. 2016]. Dostupné na WWW:
<<http://mewpro.cc/2014/12/13/utilize-unused-footprints-on-5v-lcd-modules/#lightbox/2/>>
- [45] ST life.augmented. *STM32Cube firmware examples for STM32F3 Series* Application note AN4734 [online]. DocID028047 Rev 3. [cit. 15. 2. 2016]. Dostupné na WWW:
<http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/application_note/DM00210617.pdf>
- [46] ST life.augmented. *STM32CubeMXSTM32Cube initialization code generator*. Reopository examples *STM32Cube_FW_F3_V1.3*. [cit. 1. 1. 2016]. Dostupné na WWW:
<<http://www.st.com/web/catalog/tools/FM147/CL1794/SC961/SS1743/PF259242?sc=microexplorer>>
- [47] ATTEND. *Micro SD Socket 112C-TBAR-R02* Datasheet [online]. 4.8.2015 – [cit. 15. 2. 2016]. Dostupné na WWW:
<https://cctupload.s3.amazonaws.com/attend.com.tw/upload/2015Oct/pdf/20151014103524886_1.pdf>

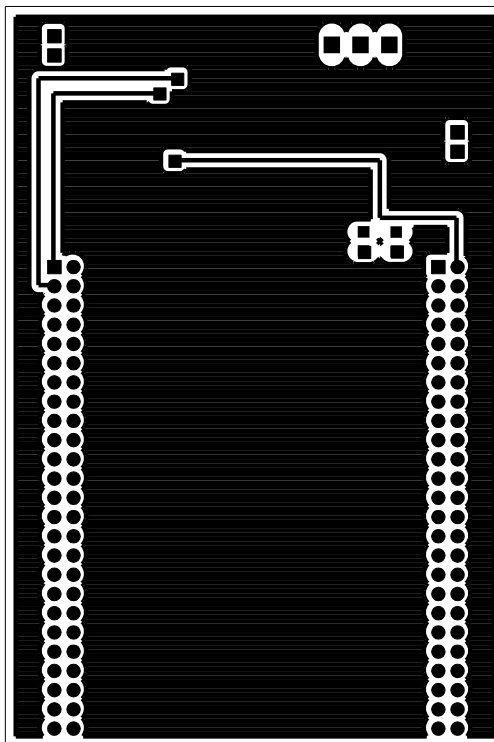
SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

a	zrychlení
s	dráha
t	čas
v	rychlost
F	síla
m	hmotnost
ω	úhlová rychlost
θ	úhlová poloha
C	kapacita
S	plocha
d	vzdálenost
ε	velikost chyby
θ	velikost způsobená chybou
e	excentricita
ρ_p	příčný poloměr křivosti
h	vzdálenost od středu
g	gravitační zrychlení
ε_0	relativní permitivita
IMU	inertial measure unit
INS	inertial navigation system
SAW	surface acoustic wave
MEMS	Micro-Electro-Mechanical systems
DPS	deska plošného spoje
GNSS	Global Navigation Satellite System
FPU	floating-point unit
PLL	Phase-Locked Loop
SWD	Serial Wire Debug
I ₂ C	Inter-Integrated Circuit
SD	Secure Digital
CRC	Cyclic redundancy check
IrDA	Infrared Data Association
Wi-Fi	standard bezdrátového přenosu
PAN	personal area network
ISM	pásmo Industrial, Scientific, Medical
Li-Ion	Lithium-iontová baterie
Li-Pol	Lithium-polymerová baterie
GPS	Global Positioning System
MCU	Microcontroller Unit
SPI	Serial Peripheral Interface
ARM-GCC	překladač zdrojového kódu v jazyku C pro procesory ARM
HAL	Hardware Abstraction Layer
SPL	Standard Peripheral Libraries
CMSIS	Cortex Microcontroller Software Interface Standard
BT	Bluetooth

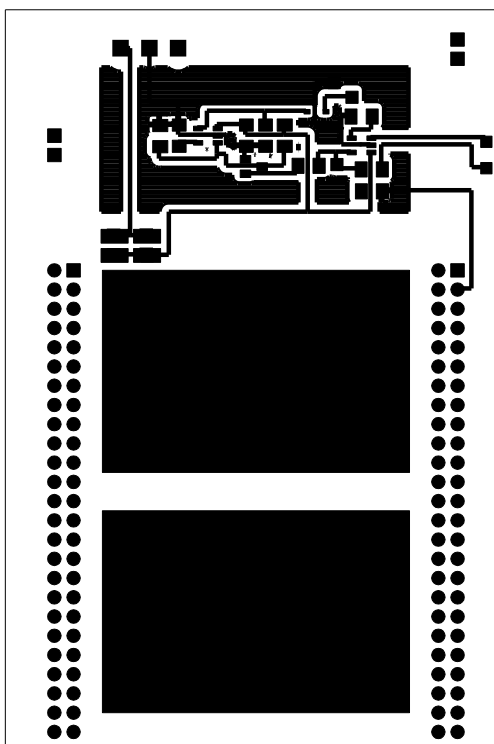
SEZNAM PŘÍLOH

A	Návrh zařízení	65
A.1	Obvodové zapojení spodního nabíjecího modulu	65
A.1.1	Motiv desky plošného spoje – bottom (strana spojů)	66
A.1.2	Motiv desky plošného spoje – top (strana součástek)	66
A.1.3	Rozložení součástek – bottom (strana spojů)	67
A.1.4	Rozložení součástek – top (strana součástek).....	67
A.2	Obvodové zapojení vrchního přípojného modulu	68
A.2.1	Motiv desky plošného spoje – bottom (strana spojů)	69
A.2.2	Motiv desky plošného spoje – top (strana součástek)	69
A.2.3	Rozložení součástek – bottom (strana spojů)	70
A.2.4	Rozložení součástek – top (strana součástek).....	70
B	Seznam součástek	71
B.1	Spodní nabíjecí modul	71
B.2	Vrchní přípojný modul	72
C	Digitální příloha	74

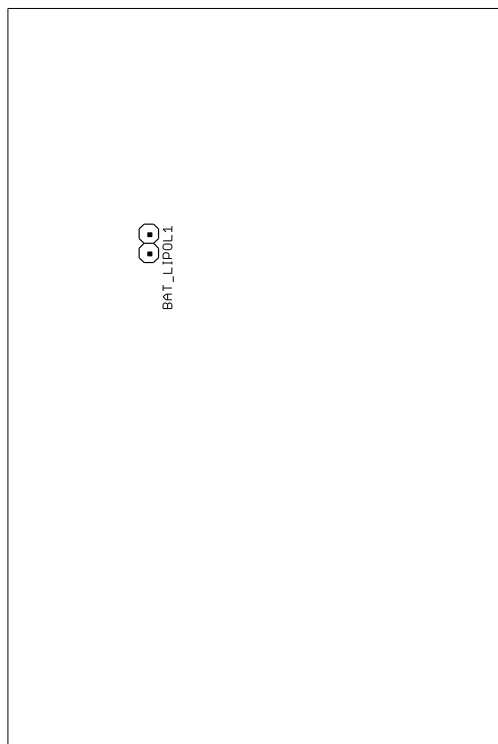
A.1.1 Motiv desky plošného spoje – bottom (strana spojů)



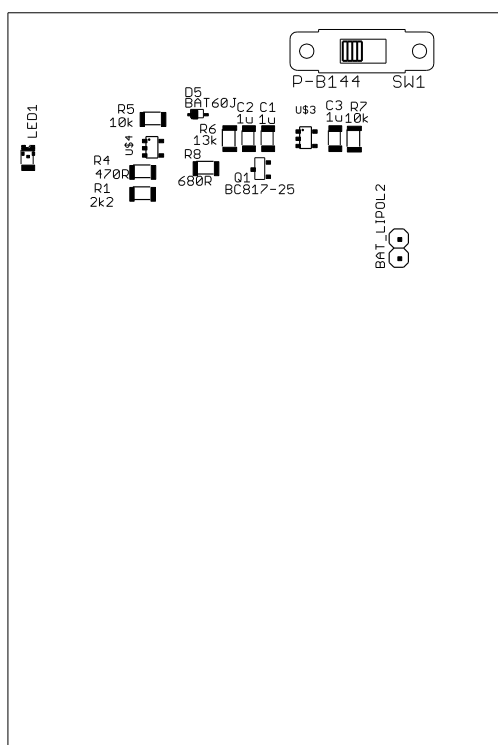
A.1.2 Motiv desky plošného spoje – top (strana součástek)



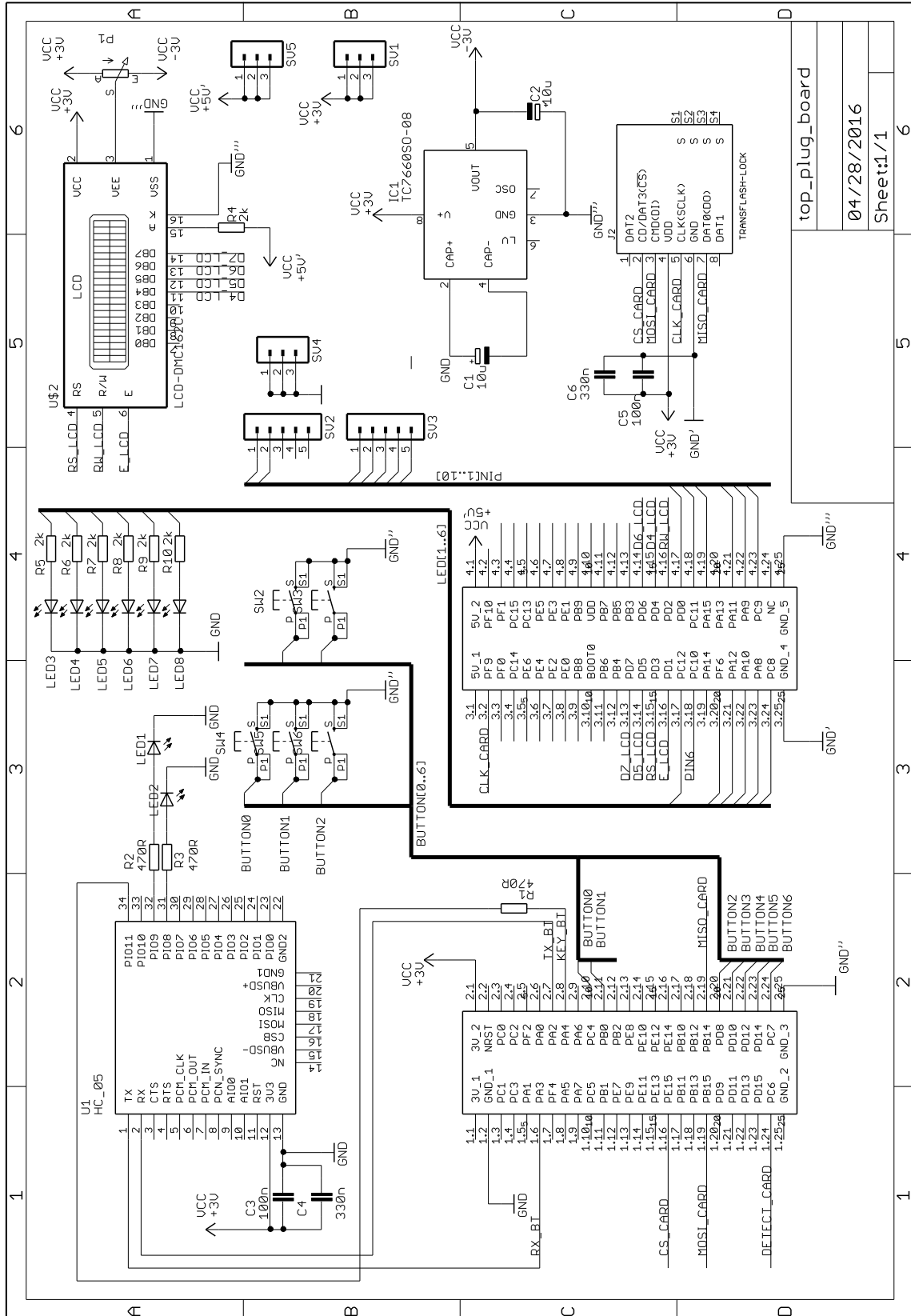
A.1.3 Rozložení součástek – bottom (strana spojů)



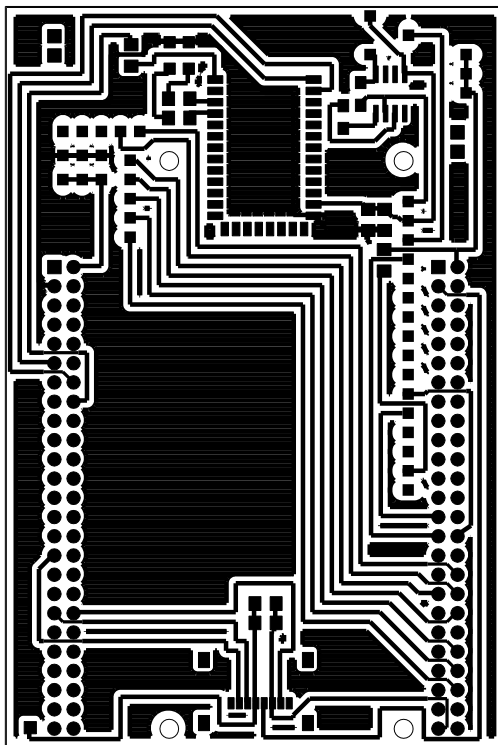
A.1.4 Rozložení součástek – top (strana součástek)



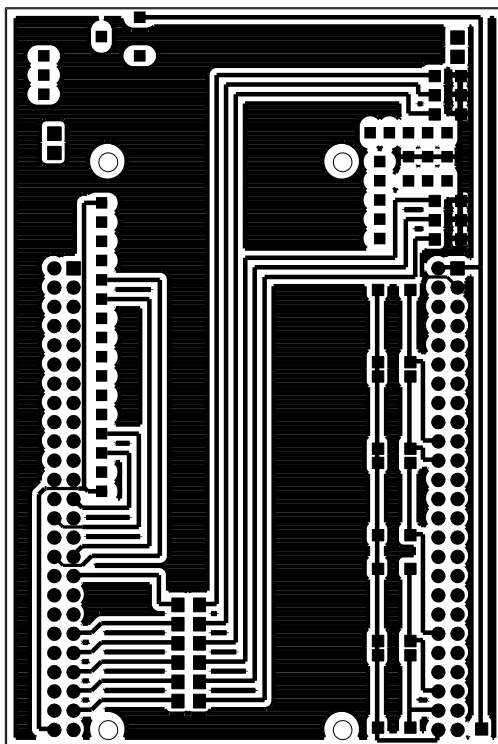
A.2 Obvodové zapojení vrchního přípojného modulu



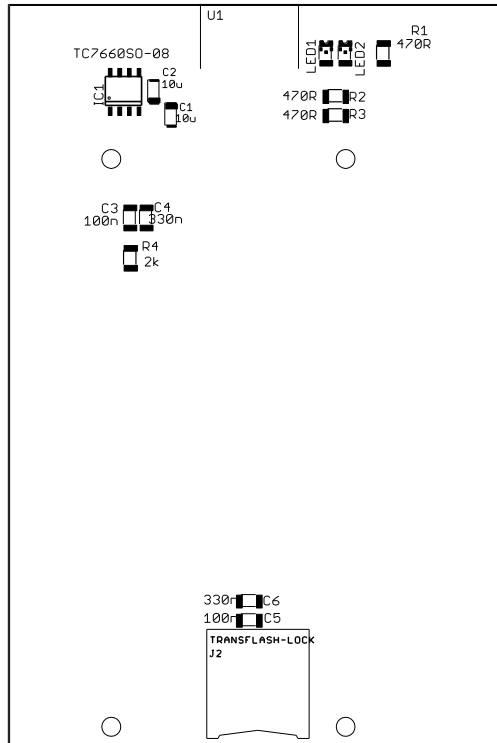
A.2.1 Motiv desky plošného spoje – bottom (strana spojů)



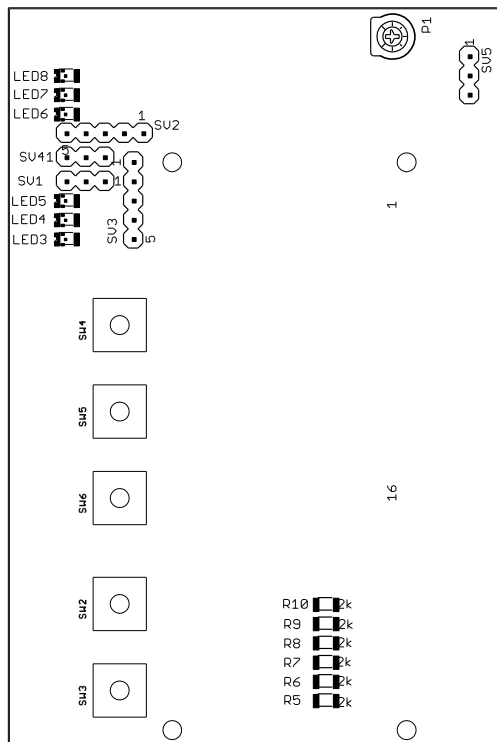
A.2.2 Motiv desky plošného spoje – top (strana součástek)



A.2.3 Rozložení součástek – bottom (strana spojů)



A.2.4 Rozložení součástek – top (strana součástek)



B SEZNAM SOUČÁSTEK

B.1 Spodní nabíjecí modul

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
BAT_LIPOL1	4,2V	-	Li-Pol baterie
C1	1u	C1206	Keramický kondenzátor
C2	1u	C1206	Keramický kondenzátor
C3	1u	C1206	Keramický kondenzátor
D5	BAT60J	SOD323_ST	Schottkyho dioda
LED		CHIPLED 1206	LED dioda
Q1	BC817-25	SOT23-BEC	NPN tranzistor
R1	2k2	M1206	Uhlíkový rezistor
R4	470R	M1206	Uhlíkový rezistor
R5	10k	M1206	Uhlíkový rezistor
R6	13k	M1206	Uhlíkový rezistor
R7	10k	M1206	Uhlíkový rezistor
R8	680R	M1206	Uhlíkový rezistor
SW1	P-B144	P-B144	Přepínač
U\$4	LTC4054	LTC4054	Nabíjecí obvod

B.2 Vrchní přípojný modul

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	10u	SMC A	Tantalový kondenzátor
C2	10u	SMC A	Tantalový kondenzátor
C3	100n	C1206	Keramický kondenzátor
C4	330n	C1206	Keramický kondenzátor
C5	100n	C1206	Keramický kondenzátor
C6	330n	C1206	Keramický kondenzátor
IC1	TC7660SO-08	SO-08	Keramický kondenzátor
J2	-	TRANSFLASH-LOCK	Slot na SD kartu
LED1	-	LED 1206	LED dioda
LED2	-	LED 1206	LED dioda
LED3	-	LED 1206	LED dioda
LED4	-	LED 1206	LED dioda
LED5	-	LED 1206	LED dioda
LED6	-	LED 1206	LED dioda
LED7	-	LED 1206	LED dioda
LED8	-	LED 1206	LED dioda
P1	10k	PT6V	Trimr
R1	470R	R1206	Uhlíkový rezistor
R2	470R	R1206	Uhlíkový rezistor
R3	470R	R1206	Uhlíkový rezistor
R4	2k	R1206	Uhlíkový rezistor
R5	2k	R1206	Uhlíkový rezistor
R6	2k	R1206	Uhlíkový rezistor
R7	2k	R1206	Uhlíkový rezistor
R8	2k	R1206	Uhlíkový rezistor
R9	2k	R1206	Uhlíkový rezistor
R10	2k	R1206	Uhlíkový rezistor
SV1	-	MA03-1	Hřebínková lišta
SV2	-	MA05-1	Hřebínková lišta
SV3	-	MA05-1	Hřebínková lišta
SV4	-	MA03-1	Hřebínková lišta
SV5	-	MA03-1	Hřebínková lišta
SW2	TD-03XBT	BT4.5X4.5	Tlačítko
SW3	TD-03XBT	BT4.5X4.5	Tlačítko
SW4	TD-03XBT	BT4.5X4.5	Tlačítko
SW5	TD-03XBT	BT4.5X4.5	Tlačítko
SW6	TD-03XBT	BT4.5X4.5	Tlačítko

U1	BLUETOOTH HC-05	-	Bluetooth modul
----	--------------------	---	-----------------

C DIGITÁLNÍ PŘÍLOHA

Příložený CD disk obsahuje:

- Diplomovou práci – soubor DP.pdf
- Zdrojový kód firmware INS – soubor firmware.zip
- Zdrojový kód zpracování v matlabu – soubor zprac_matlab.zip
- Ukázka záznamu naměřených dat – soubor data.zip
- Předlohy pro tisk předloh DPS (.eps) – soubor predlohy.zip