



## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

Student: **Luboš Polák**

Studijní program: **Kybernetika a robotika**  
Obor: **Systémy a řízení**

Název tématu česky: **Navigační jednotka s modifikovanou soustavou akcelerometrů**

Název tématu anglicky: **Navigation unit with a modified accelerometer measuring frame**

### **Pokyny pro vypracování:**

Seznamte se s aktuální podobou hardwaru inerciální měřicí jednotky (IMU) skládající se z klasické 3D soustavy senzorů úhlové rychlosti ADIS16137 třídy „tactical grade“ a modifikované soustavy akcelerometrů 4x ADXL337 a 6x ADXL203 s diferenčním zapojením. Výstupy akcelerometrů jsou diskretizovány AD převodníkem s 16b rozlišením, jehož výstupní údaje jsou společně s výstupy senzorů úhlové rychlosti vedeny do mikrokontroléru STM32F405. Tuto základní konfiguraci zprovozněte a následně rozšířte o externí desku plošných spojů s řídicí výpočetní jednotkou/mikrokontrolérem řady STM32F4xx či STM32F7xx. Nadřazený výpočetní a řídicí systém by měl umožnit výpočet navigačních údajů, tj. pozice, rychlosti a orientace na základě inerciálních dat, GNSS dat, absolutního snímače tlaku a příp. externě připojeného magnetometru. GNSS přijímač a snímač tlaku by měl být součástí návrhu desky. Vzniklá navigační jednotka by měla být připojitelná z vnějšku přes RS232/RS485/RS422 a CAN. Danou jednotku realizujte, realizaci prakticky ověřte a analyzujte z pohledu vzorkovací frekvence inerciálních senzorů.

### **Seznam odborné literatury:**

- [1] Groves P.D.: Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems, ARTECH HOUSE, ISBN-13: 978-1-58053-255-6
- [2] Rogers R. M.: Applied mathematics in integrated navigation systems, 3rd edition, AIAA 2007, ISBN: 978-1-56347-927-4
- [3] Ripka P., Tipek A.: Modern sensors handbook, ISTE Ltd. 2007, ISBN: 978-1-905209-66-8
- [4] Záhlava V.: Návrh a konstrukce desek plošných spojů, Principy a pravidla praktického návrhu. BEN - technická literatura, Praha 2011

Vedoucí bakalářské práce:

Doc. Ing. Jan Roháč, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce:

Platnost zadání do<sup>1</sup>:

L.S.

Doc. Ing. Jan Holub, Ph.D.  
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne

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



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ  
KATEDRA ŘÍDÍCÍ TECHNIKY



Bakalářská práce

## Navigační jednotka s modifikovanou soustavou akcelerometrů

*Luboš Polák*

Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Roháč, Ph.D.

9. ledna 2018



---

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Janu Roháčovi, Ph.D. za přípomínky, návrhy a možnost pracovat na této práci. Dále bych rád poděkoval Ing. Martinu Šipošovi, Ph.D. za rady a velkou trpělivost při práci v laboratoři. Děkuji také své rodině za podporu v době studia.



---

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona, ve znění pozdějších předpisů. V souladu s ust. § 46 odst. 6 tohoto zákona tímto uděluji nevýhradní oprávnění (licenci) k užití této mojí práce, a to včetně všech počítačových programů, jež jsou její součástí či přílohou, a veškeré jejich dokumentace (dále souhrnně jen „Dílo“), a to všem osobám, které si přejí Dílo užít. Tyto osoby jsou oprávněny Dílo užít jakýmkoli způsobem, který nesnižuje hodnotu Díla, a za jakýmkoli účelem (včetně užití k výdělečným účelům). Toto oprávnění je časově, teritoriálně i množstevně neomezené. Každá osoba, která využije výše uvedenou licenci, se však zavazuje udělit ke každému dílu, které vznikne (byť jen zčásti) na základě Díla, úpravou Díla, spojením Díla s jiným dílem, zařazením Díla do díla souborného či zpracováním Díla (včetně překladu), licenci alespoň ve výše uvedeném rozsahu a zároveň zpřístupnit zdrojový kód takového díla alespoň srovnatelným způsobem a ve srovnatelném rozsahu, jako je zpřístupněn zdrojový kód Díla.

V Praze dne 9. ledna 2018

.....

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

© 2018 Luboš Polák. Všechna práva vyhrazena.

*Tato práce vznikla jako školní dílo na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě elektrotechnické. Práce je chráněna právními předpisy a mezinárodními úmluvami o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským. K jejímu užití, s výjimkou bezúplatných zákonných licencí a nad rámec oprávnění uvedených v Prohlášení na předchozí straně, je nezbytný souhlas autora.*

Polák, Luboš. *Navigační jednotka s modifikovanou soustavou akcelerometrů*. Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2018.

---

# Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je zprovoznění existující inerciální navigační jednotky a její následné rozšíření o nadřazený výpočetní systém obsahující GNSS přijímač a barometr. Komunikace mezi jednotkami je zajištěna pomocí sběrnice CAN. Práce obsahuje popis současného stavu jednotky, nastavení komunikace, jejího naprogramování a PCB návrh nadřazeného systému.

**Klíčová slova** IMU, gyroskop, akcelerometr, MEMS, GNSS, STM32F4, STM32F7, ublox

---

# Abstract

The main task of this bachelor thesis is to put an inertial navigational unit into operation and to extend it with a superior computational system, which consists of a GNSS sensor and a barometric pressure sensor. The communication between the units is realized using a CAN bus. The project includes the programming of the unit, designing a PCB of the superior system and describing its current state.

**Keywords** IMU, gyroscope, accelerometer, MEMS, GNSS, STM32F4, STM32F7, ublox



---

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Inerciální navigace</b>	<b>3</b>
1.1 Systémy s pohyblivou základnou . . . . .	3
1.2 Systémy typu Strapdown . . . . .	4
<b>2 Inerciální senzory</b>	<b>7</b>
2.1 Senzory zrychlení . . . . .	7
2.2 Senzory úhlové rychlosti . . . . .	8
2.3 Využití technologie MEMS v inerciální navigaci . . . . .	10
2.4 Chybové a šumové vlastnosti inerciálních senzorů . . . . .	10
<b>3 Globální družicový polohový systém</b>	<b>15</b>
3.1 GPS . . . . .	15
3.2 Korekční systém RTK . . . . .	15
<b>4 Inerciální měřicí jednotka</b>	<b>17</b>
4.1 Senzory použité v IMU . . . . .	18
4.2 AD převodník AD7689 . . . . .	21
<b>5 Zprovoznění a testování IMU</b>	<b>23</b>
5.1 Programování IMU . . . . .	23
5.2 Měření na IMU . . . . .	26
<b>6 Návrh a realizace rozšiřující desky</b>	<b>29</b>
6.1 Požadavky . . . . .	29
6.2 Použité součástky . . . . .	29
6.3 Realizace rozšiřující desky . . . . .	31
<b>Závěr</b>	<b>33</b>

<b>Literatura</b>	<b>35</b>
<b>A Schéma rozšiřující desky</b>	<b>39</b>
<b>B Seznam použitých zkratek</b>	<b>43</b>
<b>C Obsah přiloženého CD</b>	<b>45</b>

---

# Seznam obrázků

1.1	Algoritmus systému s pohyblivou základnou [2] . . . . .	3
1.2	Algoritmus systému strapdown [2] . . . . .	4
1.3	Tělesový souřadný systém [3] . . . . .	4
1.4	Zemský a navigační NED souřadnicový systém . . . . .	5
2.1	Princip akcelerometru [4] . . . . .	7
2.2	Kapacitní MEMS akcelerometr [6] . . . . .	8
2.3	Gyroskop s optickým vláknem [10] . . . . .	9
2.4	Laserový kruhový gyroskop [11] . . . . .	9
2.5	Princip senzoru úhlové rychlosti s vibrujícím elementem [13] . . . . .	10
2.6	Průběh AVAR[15] . . . . .	12
3.1	Ukázka spojení mezi pozemní stanicí a vozidlem [20] . . . . .	16
4.1	Základní deska s bočnicemi IMU. . . . .	17
4.2	Zjednodušené blokové schéma IMU. . . . .	18
4.3	Koncept IMU s rozmístěnými senzory. Převzato z [21]. . . . .	18
4.4	Blokové schéma akcelerometru ADXL203 [23] . . . . .	20
4.5	Blokové schéma akcelerometru ADXL337 [24] . . . . .	20
4.6	Blokové schéma gyroskopu ADIS16136 [25] . . . . .	21
5.1	Nastavení hodin pro jednotlivé periferie v STM32Cube. . . . .	24
5.2	Konfigurace pinů z programu STM32Cube. . . . .	24
5.3	Tabulka pro převod dat na úhlovou rychlosť [25] . . . . .	25
5.4	Zjednodušený vývojový diagram čtení hodnot IMU . . . . .	26
5.5	Změřená Allan deviation pro senzor ADIS16136 . . . . .	27
5.6	Rentgen konektoru bočnice B se zobrazeným zkratem . . . . .	27
6.1	Blokové schéma rozšiřující desky . . . . .	31
6.2	3D model z Altium designer. . . . .	31
6.3	Vyrobená deska ve fázi osazování. . . . .	32

6.4 Konfigurace pinů v programu STM32Cube. . . . .	32
--	----

---

## **Seznam tabulek**

2.1	Typy šumů a jejich parametry . . . . .	13
4.1	Základní parametry ADXL203 [23] . . . . .	19
4.2	Základní parametry ADXL337 [24] . . . . .	19
4.3	Základní parametry ADIS1636 [25] . . . . .	20
6.1	Základní parametry snímače MS5611-01BA03[34] . . . . .	30



---

# Úvod

Inerciální měřicí jednotky (IMU - Inertial Measurement Unit) jsou nezávislé systémy, které pomocí akcelerometrů a gyroskopů, měří úhlovou rychlosť a zrychlení. Tyto měřicí jednotky jsou obvykle vybaveny trojicí gyroskopů a akcelerometrů, sloužících k měření ve třech osách. Cílem bakalářské práce bylo právě takovou jednotku zprovoznit, otestovat a navrhnout rozšiřující výpočetní desku. Nadřazená výpočetní deska společně s IMU tvoří Inerciální navigační systém (Inertial Navigation System - INS), jehož výstupem je aktuální poloha.

Spolehnout se pouze na určení pozice z družicového navigačního není v některých aplikacích vhodné a není všude zaručeno, že bude dostatečně volný prostor pro příjem signálu. Stačí rozlehlejší zástavba a již dochází ke ztrátě signálu z družic. Právě při těchto výpadcích zaujmají inerciální měřicí jednotky hlavní roli a zprostředkovávají data o pozici.

V teoretické části jsou uvedeny druhy používaných senzorů, jejich princip a důležité parametry. V seznámení se s aktuální podobou inerciální měřicí jednotky jsou uvedeny informace o senzorech a jejich zapojení. Rozebrán je i výběr součástek pro rozšíření jednotky. Praktická část je rozdělena na hlavní dvě části, kde v první je rozebrán postup naprogramování desky s popisem nastavení komunikace se senzory a v druhé části je popsán návrh rozšiřující desky společně s konečným návrhem.



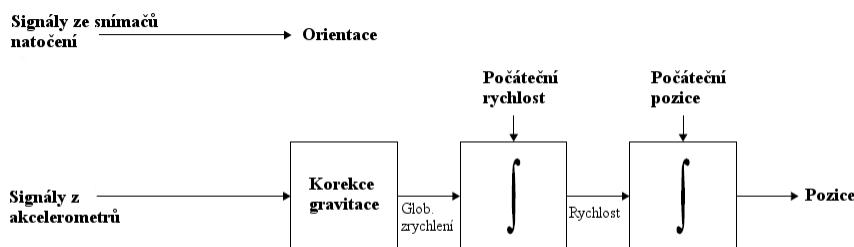
# KAPITOLA 1

## Inerciální navigace

Inerciální navigace slouží k získání pozice a orientace objektu, vzhledem k počáteční pozici, rychlosti a orientaci. Tento způsob navigace patří do skupiny navigačních technik označovaných jako Relativní měření polohy (Dead reckoning), které měří uraženou vzdálenost a směr od počáteční pozice. Druhou technikou je „Position fixing“, která určuje pozici vzhledem k externím referenčním bodům[1]. K určení pozice a orientace slouží inerciální měřicí jednotky obsahující senzory k měření zrychlení a úhlové rychlosti[2].

### 1.1 Systémy s pohyblivou základnou

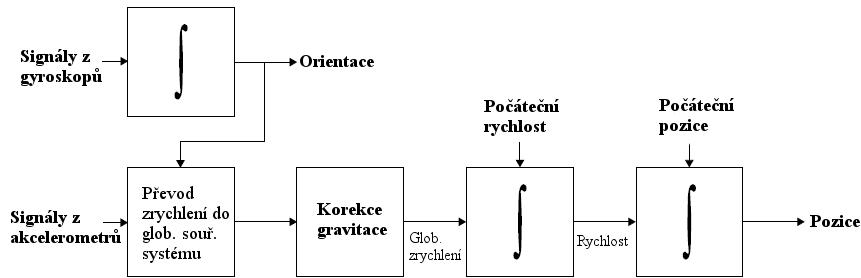
Systémy s pohyblivou základnou mají inerciální senzory připevněné na stabilní platformě, díky které na senzory nepůsobí rotační pohyb objektu. Je tak zachován referenční (globální) souřadnicový systém. Tyto systémy dosahují vysoké přesnosti, ale na úkor složitosti mechanické konstrukce[2]. Obrázek 1.1 popisuje algoritmus získání pozice.



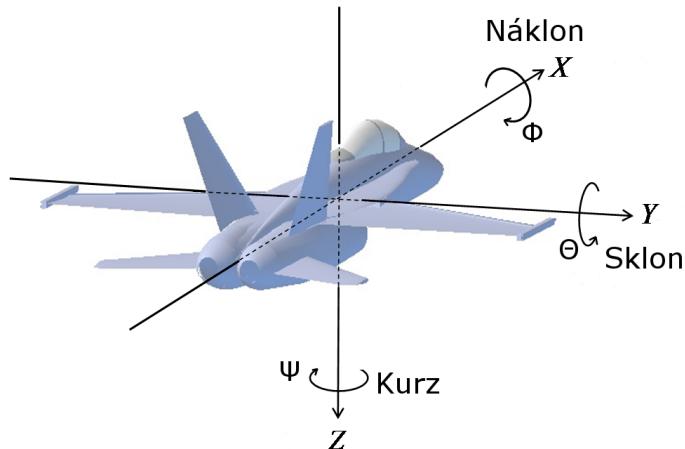
Obrázek 1.1: Algoritmus systému s pohyblivou základnou [2]

## 1.2 Systémy typu Strapdown

Systémy typu Strapdown mají inerciální senzory připevněny přímo k pohybujícímu se objektu a měří tedy v tělesovém souřadnicovém systému (obrázek 1.3). Je tedy nutné provést přepočet do referenčního souřadnicového systému. Algoritmus tohoto přepočtu a následného získání pozice popisuje obrázek 1.2.



Obrázek 1.2: Algoritmus systému strapdown [2]



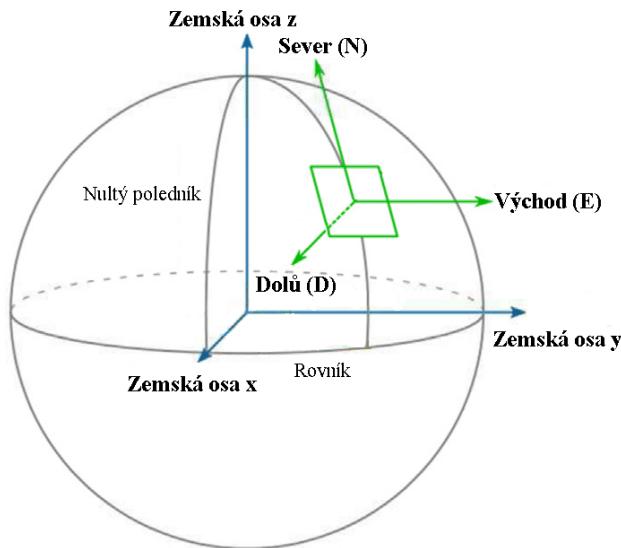
Obrázek 1.3: Tělesový souřadný systém [3]

Jako referenční souřadnicový systém se nejčastěji používá Zemský souřadnicový systém (Earth-centered Earth-fixed frame) a Navigační souřadnicový systém (Navigation frame).

## 1.2. Systémy typu Strapdown

Zemský souřadnicový systém je definován tak, že osa  $x$  protíná průsečík nultého poledníku a rovníku, osa  $z$  je totožná s osou zemské rotace směřující k Severnímu pólu a osa  $y$  je zvolena tak, aby dávala s osami  $x$  a  $z$  dohromady pravotočivý ortogonální souřadnicový systém [1].

Navigační souřadnicový systém má svůj počátek na povrchu Země, a proto je také označován za lokální souřadnicový systém. Nejčastěji se používá ve variantě, kdy osa  $x$  směřuje na Severní pól (North), osa  $y$  na východ (East) a osa  $z$  do středu Země (Down). Tato varianta je také označována jako NED, vycházející z prvních písmen anglických názvů stran.



Obrázek 1.4: Zemský a navigační NED souřadnicový systém

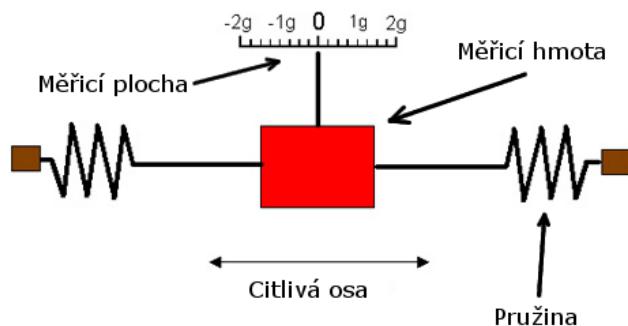


# KAPITOLA 2

## Inerciální senzory

### 2.1 Senzory zrychlení

Senzory zrychlení, neboli akcelerometry, slouží k měření specifické síly (zrychlení) ve směru citlivé osy. Ve své nejjednodušší podobě (obrázek 2.1) se akcelerometr skládá z měřicí hmoty uchycené pružinami k pouzdru akcelerometru. Měřicí plocha zaznamenává změnu polohy měřicí hmoty vzhledem k pouzdru. Pokud dojde ke zrychlení ve směru citlivé osy, měřicí hmota bude setrvávat ve své původní rychlosti a to způsobí, že se jedna pružina stlačí a druhá natáhne. Tento posun z klidové polohy odpovídá zrychlení působící na akcelerometr.

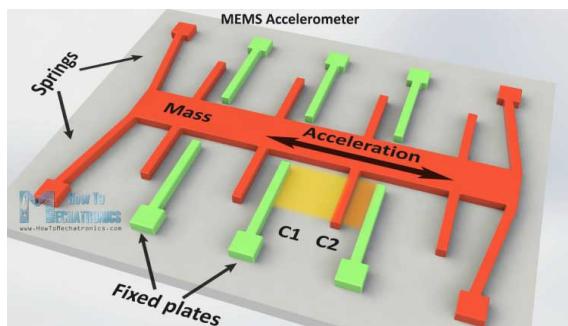


Obrázek 2.1: Princip akcelerometru [4]

## 2. INERCIÁLNÍ SENZORY

Dalším ze způsobů měření zrychlení je využití piezoelektrického jevu, kdy při deformaci piezoelektrického krystalu (nebo piezoelektrického materiálu) dochází ke vzniku elektrického napětí. Krystal je umístěn mezi referenční hmotou a pouzdro senzoru. Působením zrychlení dochází k deformaci krystalu a síla, působící na krystal, je přímo úměrná zrychlení a hmotnosti referenční hmoty. Existují také vibrační, tenzometrické a kapacitní akcelerometry.

Poslední zmíněné kapacitní snímaní je nejčastěji používané v akcelerometrech založených na technologii MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) [5]. U těchto akcelerometrů je k měření výchylky použit princip tříelektrodového kondenzátoru. Dvě krajní elektrody jsou pevně spojeny s pouzdrem a prostřední pohyblivá elektroda je připevněna k měřicí hmotě. Změna polohy měřicí hmoty odpovídá změně kapacity kondenzátoru. Na obrázku 2.2 je zobrazen princip MEMS akcelerometru s využitím více elektrod, které slouží ke zvýšení citlivosti.



Obrázek 2.2: Kapacitní MEMS akcelerometr [6]

### 2.2 Senzory úhlové rychlosti

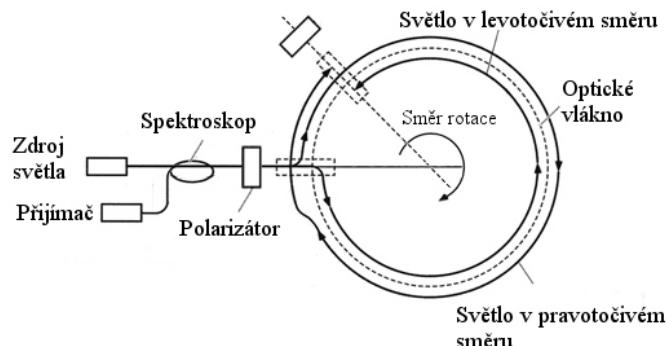
Senzory úhlové rychlosti měří úhlovou rychlosť vzhledem ke své citlivé ose. V inerciální navigaci se používají k určení sklonu, náklonu a kurzu. K nejběžnějším senzorům úhlové rychlosti patří optické gyroskopy a senzory využívající vibrujícího elementu.

Do skupiny optických gyroskopů patří gyroskopy s optickým vláknem (Fibre Optic Gyroscope - FOG) a laserové kruhové gyroskopy (Ring Laser Gyroscope - RLG). Všechny optické gyroskopy pracují na principu Sagnacova jevu. Pokud jsou dva světelné paprsky vyslány do uzavřené smyčky, ale každý v opačném směru, je rozdíl jejich uražených drah ovlivněn rotací v ose kolmé k uzavřené smyčce[7]. V případě FOG (obrázek 2.3) je využita smyčka z optického vlákna a výsledný rozdíl druh je vyhodnocen jako fázový posuv. Tento způsob se nazývá interferometrický, protože se vyhodnocuje interferencí obou svazků.

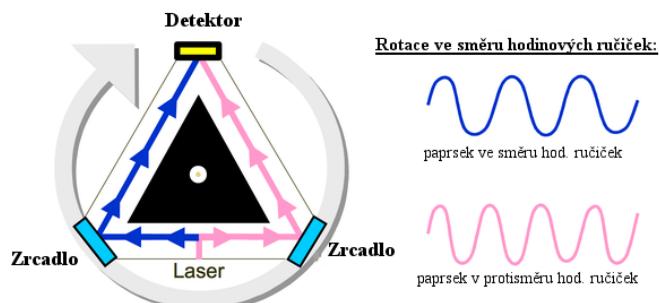
RLG (obrázek 2.4) se konstrukčně liší od FOG tím, že využívá třech zrcadel, z nichž jedno je polopropustné, k šíření paprsku v trubici.

## 2.2. Senzory úhlové rychlosti

Oproti FOG se změna délky drah detekuje pomocí rezonátorového principu, kde se vyhodnocuje frekvenční rozdíl. RLG patří mezi nejpřesnější senzory úhlové rychlosti[8][9].

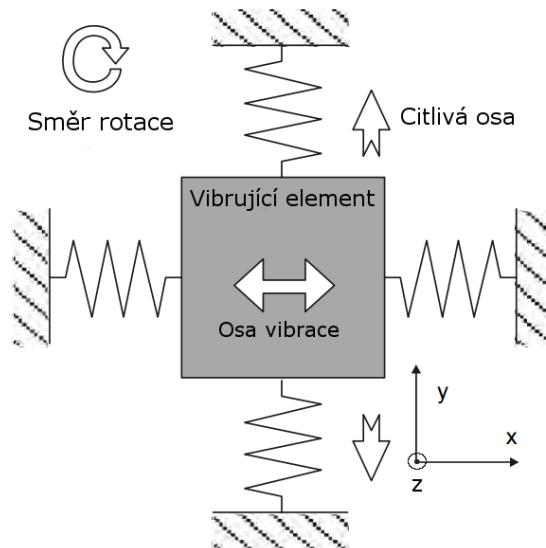


Obrázek 2.3: Gyroskop s optickým vlákном [10]



Obrázek 2.4: Laserový kruhový gyroskop [11]

Další skupinou jsou vibrační senzory úhlové rychlosti, které využívají detekci Coriolisovy síly působící na vibrující element (struna, kruh, „tuning fork“). Na obrázku 2.5 je znázorněn princip detekce. Jestliže dojde k rotaci v ose kolmé k ose vibrace (rotace v ose  $z$ ), vibrující element bude vychýlen působením Coriolisovy síly ve směru citlivé osy  $y$ . Tohoto principu využívají nejčastěji gyroskopy založené na technologii MEMS [12].



Obrázek 2.5: Princip senzoru úhlové rychlosti s vibrujícím elementem [13]

### 2.3 Využití technologie MEMS v inerciální navigaci

Senzory založené na technologii MEMS, v porovnání s jinými typy snímačů, nedosahují takové přesnosti, ale díky malým rozměrům a nízké spotřebě jsou vhodné pro aplikace, kde cena hraje klíčovou roli. Je tak možné využít více MEMS senzorů najednou a zvýšit tak spolehlivost měření. Pro zvýšení přesnosti určení polohy se společně s MEMS senzory využívá dalších pomocných systémů, mezi které patří především Globální družicový polohový systém (GNSS). Ke korekci slouží také údaje ze senzorů magnetického pole Země (magnetometry), či senzory absolutního tlaku vzduchu[2].

### 2.4 Chybové a šumové vlastnosti inerciálních senzorů

Všechny typy inerciálních senzorů jsou ovlivněny chybovými vlastnostmi, které způsobují nepřesnosti v určení pozice a orientace. Tyto chybové vlastnosti je možno zařadit do skupiny deterministických chyb, které se kalibrací dají kompenzovat, nebo do skupiny chyb stochastických (náhodných), které se odhadují analyticky [14].

#### 2.4.1 Deteministické chyby

- Nestabilita biasu (offset)
  - senzor v klidu snímá nenulovou hodnotu
- Vstupní citlivost (Scale factor)
  - poměr změny výstupu ke změně vstupu
- Neortogonalita (Nonorthogonality)
  - nepřesnost umístění senzorů vůči ortogonálnímu souřadnicovému systému
- Opakovatelnost biasu/vstupní citlivosti (Run-to-run Bias/Scale factor)
  - opakovatelnost hodnot biasu/vstupní citlivosti při každém zapnutí senzoru
- In-Run stabilita biasu/vstupní citlivosti
  - změna hodnot biasu/vstupní citlivost v průběhu měření
- Teplotně závislý bias/vstupní citlivost
  - se změnou teploty se mění bias/vstupní citlivost

#### 2.4.2 Stochastické chyby

- Kvantizační šum (Quantization noise - Q)
- Náhodná procházka (Angular/Velocity Random Walk - ARW)
- Nestabilita biasu (Bias Instability - BIN)
- Náhodná procházka v úhlové rychlosti/zrychlení (Rate/Acceleration Random Walk - RRW)
- Rampa (Rate Ramp Noise - RR)

#### 2.4.3 Metoda Allan Variance

Chyby způsobené stochastickými vlastnostmi se nedají odstranit kalibrací a je třeba je korigovat pomocí statistických metod. K určení parametrů šumu potřebných pro tyto metody slouží Allan Variance (AVAR), která analyzuje signál v časové oblasti. Tato metoda může být použita k analýze šumových vlastností jakéhokoliv signálu. Ke správnému určení stochastických vlastností, tato metoda vyžaduje několikahodinové měření, které probíhá na senzoru v klidové poloze[2, 14, 15, 16].

## 2. INERCIÁLNÍ SENZORY

---

AVAR je založená na principu shlukové analýzy. Data jsou rozdělena na shluky definované časové délky. Je dán celkový počet naměřených vzorků  $N$  při vzorkovací frekvenci  $T_s$ . Délky shluků jsou definovány jako  $\tau = m \cdot T_0$ , kde pro počet vzorků  $m$  platí  $m < \frac{N}{2}$ . Celkový počet shluků je tedy  $M = \frac{N}{m}$  [7]. Základní šumové vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 2.1.

Vzorec pro výpočet  $AVAR^2$  je následující:

$$AVAR^2(\tau) = \frac{1}{2 \cdot (M - 1)} \sum_{i=1}^{M-1} (y_{i+1} - y_i)^2$$

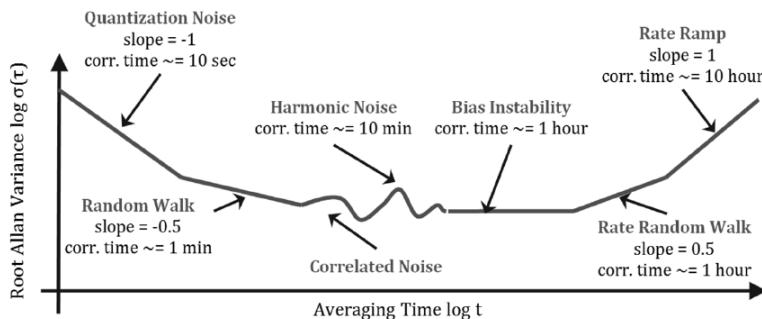
kde  $\tau$  je délka shluku,  $M$  je celkový počet shluků a  $y_i$  je střední hodnota v shluku  $i$ . Průběh Allan Variance popisuje obrázek 2.6.

Allanova odchylka (Allan Deviation - AD) je definována jako druhá odmocnina z  $AVAR$  pro vybrané  $\tau$ .

$$AD(\tau) = \sqrt{AVAR(\tau)}$$

Pro zjištění procentuální chyby  $AVAR$  platí rovnice:

$$\sigma(\% chyba) = \frac{100}{\sqrt{2(M - 1)}}.$$



Obrázek 2.6: Průběh AVAR[15]

## 2.4. Chybové a šumové vlastnosti inerciálních senzorů

---

Typ šumu	Zkratka	Sklon křivky	Hodnota koeficientů
Kvantizační šum	Q	-1	$Q = \sigma(\sqrt{3})$
Bílý šum na vstupu senzoru	ARW	-1/2	$N = \sigma(1)$
Nestabilita biasu	BIN	0	$B = \sigma_{min}/0.664$
Šum s dlouhým korelačním časem	RRW	+1/2	$K = \sigma(3)$
Rampa	RR	+1	$R = \sigma(\sqrt{2})$

Tabulka 2.1: Typy šumů a jejich parametry

Hodnoty pro jednotlivé typy šumu jsou nekorelované a celkový rozptyl je tedy součet rozptylů jednotlivých šumů[17]. Lze tedy napsat:

$$\sigma_{celkem}^2 = \sigma_Q^2 + \sigma_{ARW}^2 + \sigma_{BIN}^2 + \sigma_{RRW}^2 + \sigma_{RR}^2.$$



## Globální družicový polohový systém

Globální družicový navigační systém (Global Navigation Satellite System - GNSS) je služba, umožňující určení polohy v prostoru pomocí signálů z družic. Poloha je určena přímo přijímačem uživatele, který nevysílá žádné signály. Mezi hlavní navigační systémy patří americký GPS a ruský GLONASS. V současné době probíhá spuštění evropského navigačního systému Galileo a vývoj čínského BeiDou[1].

### 3.1 GPS

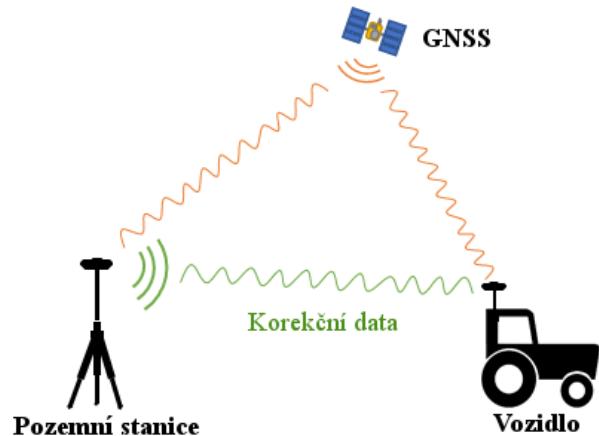
Globální poziční systém (Global Position System - GPS), provozovaný Ministerstvem obrany Spojených států amerických, tvoří v základu 24 obíhajících satelitů (v současné době 31). Satelity jsou rozmístěny tak, že uživatel by měl kdekoliv na planetě zachytit signál alespoň ze čtyř satelitů. Americká vláda do roku 2000 poskytovala civilní sféře nižší přesnost určení polohy z důvodů národní bezpečnosti. V dnešní době je Standardní služba navigace (Standard Positioning Service - SPS) dostupná všem a poskytuje určení pozice s chybou nižší než 7,8 metrů. Měření, které proběhlo 11. Května 2016, stanovilo, že globální průměr chyby určení polohy je v 95 % případů menší než 0,715 metrů [18].

### 3.2 Korekční systém RTK

Technologie kinematického měření v reálném čase (Real-time Kinematic - RTK) umožňuje zlepšit přesnost přijímače (rover) na centimetry vzhledem k přesnému umístění pozemní stanice (base station), od které získává korekční data a porovnává je s daty přijatými ze satelitu. Na obrázku 3.1 je princip RTK, kde pozemní stanice odesílá korekční data přijímači umístěném na vozi-

### 3. GLOBÁLNÍ DRUŽICOVÝ POLOHOVÝ SYSTÉM

dle a zvyšuje se tak přesnost určení jeho pozice. Využití je omezeno dosahem vysílání pozemní stanice a členitostí terénu[19].

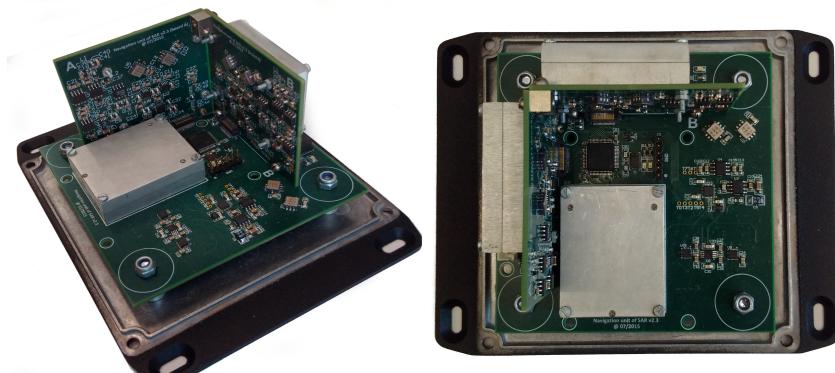


Obrázek 3.1: Ukázka spojení mezi pozemní stanicí a vozidlem [20]

## KAPITOLA 4

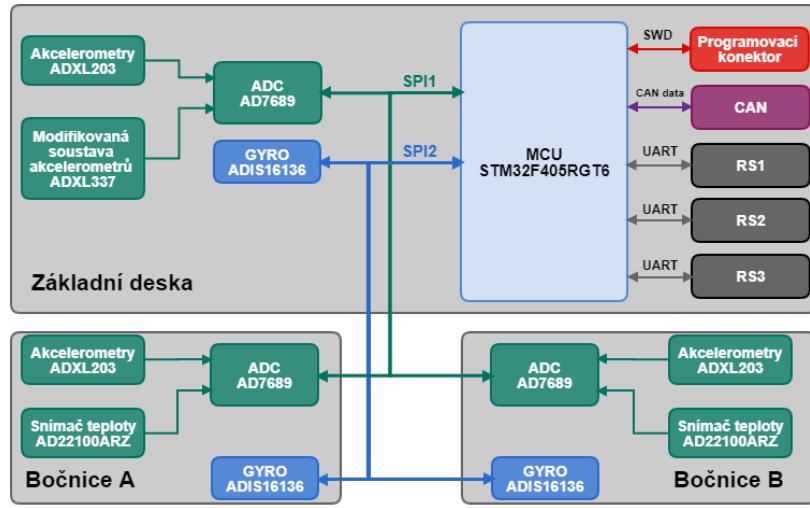
# Inerciální měřicí jednotka

Tato kapitola se zabývá popisem inerciální měřicí jednotky dodané pro realizaci této bakalářské práce. IMU (4.1) se skládá ze tří desek plošných spojů jejichž vzájemné propojení reprezentuje zjednodušené blokové schéma 4.2. Hlavní částí je základní deska vybavená hlavním napájecím obvodem, mikroprocesorem STM32F405RGT6, soustavou senzorů a komunikačním rozhraním. Nachází se zde čtverečice akcelerometrů ADXL337, dvojice akcelerometrů ADXL203, senzor úhlové rychlosti ADIS16136, AD převodník AD7689 sloužící pro převod signálů akcelerometrů, programovací konektor pro SWD (Serial Wire Debug), rozhraní sběrnice CAN (Control Area Network) a sériové RS232 rozhraní. K této základní desce se připojují dvě kolmé senzorové desky (bočnice), které jsou identické a pouze zrcadlově otočené. Na každé této senzorové desce se také nachází senzor úhlové rychlosti ADIS16136, dvojice akcelerometrů ADXL203, senzor teploty AD22100ARZ a AD převodník.



Obrázek 4.1: Základní deska s bočnicemi IMU.

#### 4. INERCIÁLNÍ MĚŘICÍ JEDNOTKA

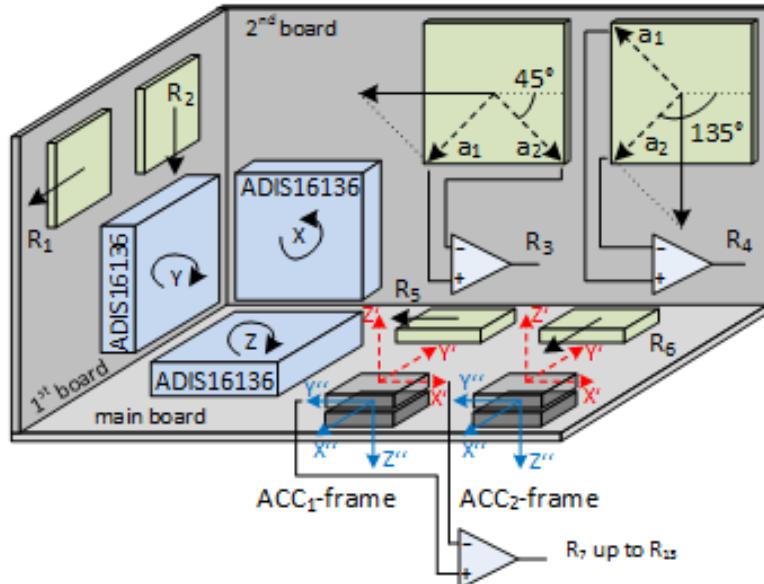


Obrázek 4.2: Zjednodušené blokové schéma IMU.

### 4.1 Senzory použité v IMU

#### 4.1.1 Akcelerometry ADXL203 a ADXL337

Modifikovanou soustavu tvoří šestice dvouosých ADXL203 (Obrázek 4.4) a čtveřice tříosých ADXL337 (Obrázek 4.5) analogových akcelerometrů. Obrázek 4.3 popisuje způsob osazení IMU senzory.



Obrázek 4.3: Koncept IMU s rozmištěnými senzory. Převzato z [21].

Akcelerometry ADXL203 jsou umístěny po dvou na každé desce tak, aby jejich citlivé osy byly pootočeny o  $45^\circ$  vůči k hlavním osám měření. Výstupy pro jednotlivé osy jsou vedeny do rozdílových zesilovačů AD8226 v zapojení  $X - Y$ , tedy rozdílu zrychlení v ose X a Y akcelerometru. Výsledná zrychlení jsou na obrázku 4.3 označená  $R_1 - R_6$ . Tímto zapojením se užitečný signál zvýší dvakrát, zatímco šum se zvýší méně než dvakrát, co má za následek, že poměr signál-šum (SNR) se zvýší (více [21]). Princip tohoto zapojení vychází z patentu „Measurement Unit of an Artificial Horizon“ [22].

Čtveřice tříosých akcelerometrů ADXL337 je zapojena tak, že každá dvojice (označená  $ACC_i - frame$ ) je umístěna na opačné straně desky proti sobě. Výstupy pro jednotlivé osy akcelerometrů jsou vedeny do rozdílových zesilovačů AD8226 v zapojení:  $X_1 - Y_2$ ,  $Y_1 - X_2$  a  $Z_1 - Z_2$ , kde  $X_1, Y_1, Z_1$  jsou výstupy z akcelerometru na horní části desky a  $X_2, Y_2, Z_2$  výstupy akcelerometru ve spodní části desky. Výsledná zrychlení jsou na obrázku 4.3 označena  $R_7 - R_{12}$ .

Přenosová funkce zesilovače AD8226 je:

$$V_{out} = G(V_{IN+} - V_{IN-}) + V_{REF}$$

kde  $V_{out}$  je výstupní napětí, zesílení  $G = 1$ ,  $V_{IN+}$  napětí na neinvertujícím vstupu,  $V_{IN-}$  napětí na invertujícím vstupu a referenční napětí  $V_{REF} = 2,5V$ .

Parametr	Hodnota	Jednotka
Rozsah měření	$\pm 1,7$	g
Nelinearity	$\pm 0,2$	%
Citlivost	1000	mV/g
Šířka pásmá	50	Hz

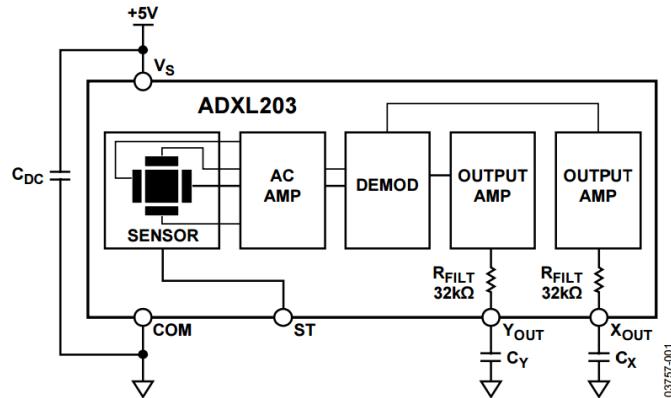
Tabulka 4.1: Základní parametry ADXL203 [23]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Rozsah měření	$\pm 3,6$	g
Nelinearity	$\pm 0,3$	%
Citlivost	330	mV/g
Šířka pásmá	50	Hz

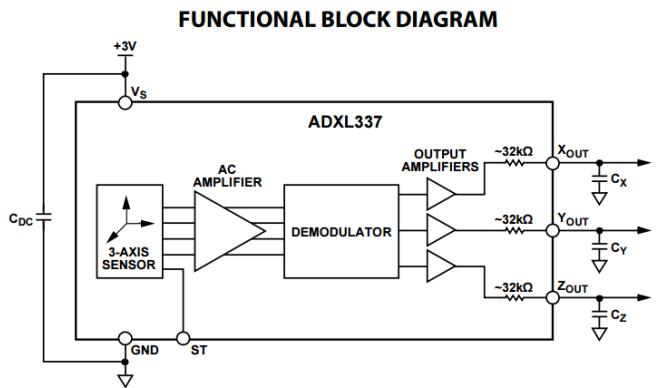
Tabulka 4.2: Základní parametry ADXL337 [24]

#### 4. INERCIÁLNÍ MĚŘICÍ JEDNOTKA

---



Obrázek 4.4: Blokové schéma akcelerometru ADXL203 [23]



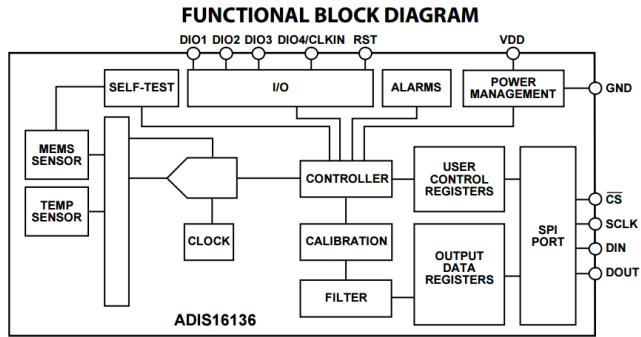
Obrázek 4.5: Blokové schéma akcelerometru ADXL337 [24]

##### 4.1.2 Senzor úhlové rychlosti ADIS16136

IMU je kromě akcelerometrů vybavena také třemi senzory úhlové rychlosti ADIS16136 (obrázek 4.6) třídy Tactical Grade připojené pomocí SPI (Serial Peripheral Interface) k mikroprocesoru. Senzory jsou jednotlivě umístěny na každé desce v ortogonálním uspořádání.

Parametr	Hodnota	Jednotka
Dynamický rozsah	$\pm 450$	$^{\circ}/\text{sek}$
Opakovatelnost biasu	$\pm 0,15$	$^{\circ}/\text{sek}$
In-Run stabilita biasu	4	$^{\circ}/\text{hod}$
Bílý šum na vstupu senzoru	0,167	$^{\circ}/\sqrt{\text{hod}}$

Tabulka 4.3: Základní parametry ADIS1636 [25]



Obrázek 4.6: Blokové schéma gyroskopu ADIS16136 [25]

#### 4.1.3 Senzor teploty AD22100ARZ

Na každé kolmé senzorové desce se nachází také senzor teploty AD22100ARZ, pracující v rozsahu teplot -50°C až do 150°C [26]. Převod výstupního napětí na teplotu se získá z následující rovnice:

$$V_{out} = (V_+/5V) \times [1.375V + (22.5mV/\text{ }^{\circ}\text{C}) \times T_A].$$

Kde  $V_{out}$  je výstupní napětí,  $V_+$  je napájecí napětí a  $T_A$  je teplota okolí. Vzorec pro výpočet teploty je tedy:

$$T_A = \frac{(V_{out} - 1.375)}{0.0225}$$

## 4.2 AD převodník AD7689

Na každé desce se nachází 16-bitový analog/digitální převodník (Analog-to-Digital Converter - ADC) AD7689 s osmi vstupními kanály. Jedná se o AD převodník využívající postupnou approximaci a schopen převádět 250 000 vzorků za sekundu (250 kSPS)[27]. Na základní desce jsou na prvních šest vstupů AD převodníku přivedeny výstupy z rozdílových zesilovačů, které pracují s akcelerometry ADXL337. Na zbylé dva vstupy jsou přivedeny výstupy zesilovačů pracující s ADXL203. Na každé bočnici jsou využity pouze tři vstupy, dva pro akcelerometry ADXL203 a jeden pro senzor teploty AD22100ARZ. K mikroprocesoru je AD převodník připojen pomocí sběrnice SPI.



# KAPITOLA **5**

---

## Zprovoznění a testování IMU

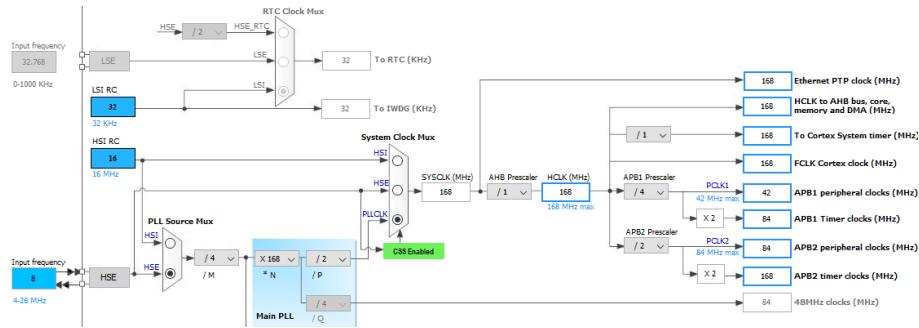
### 5.1 Programování IMU

V rámci bakalářské práce byla oživena a naprogramována jednotka IMU, která byla popsána v předchozí kapitole.

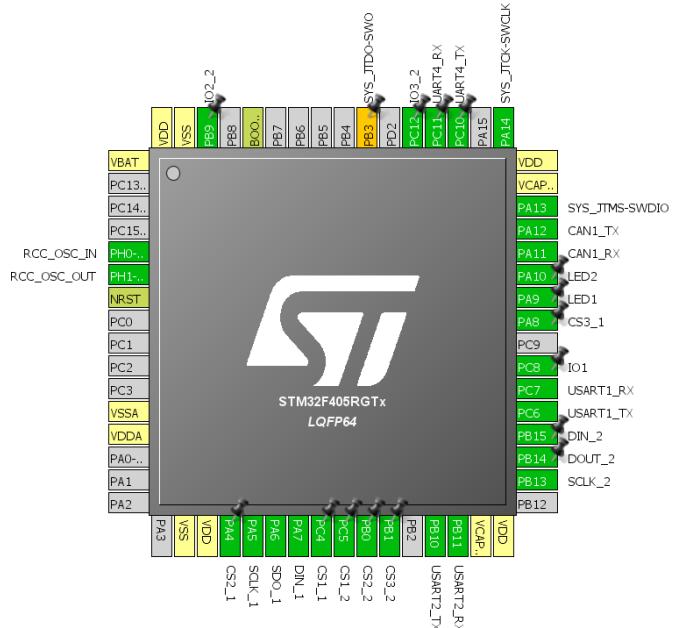
Pro vytvoření projektu byl využit software STM32Cube od společnosti STMicroelectronics [28]. Tento software umožňuje přehledná nastavení vlastností procesoru, mezi které patří nastavení pinů, frekvence hodinového signálu, konfigurace periferií v grafickém prostředí a následné vygenerování celého projektu pro vybrané vývojové prostředí (Integrated Development Environment - IDE). Vygenerovaný projekt využívá Hardware Abstraction Layer (HAL) knihovny, které momentálně společnost STMicroelectronics vyuvíjí jako náhradu za Standard Peripheral Libraries (SPL) [29].

STM32F405RGT6 je 32 bitový ARM procesor architektury Cortex M4. Vstupní frekvence mikroprocesoru je generována SMD krystalem o frekvenci 8 MHz. Hlavní frekvence procesoru je nastavena pomocí PLL (Phase Locked Loop) obvodů na maximální frekvenci 168 MHz. Celkové nastavení hodin popisuje obrázek 5.1 z programu STM32Cube. K programování jednotky byl využit software Keil *μVision*, který obsahuje ARM kompilátor a nástroje pro ladění. Jako programátor byl použit STM32F4 Discovery kit, který umožňuje programování MCU přes rozhraní SWD. Na přiloženém CD se nachází celý projekt v *μVision* společně se soubory z STM32Cube.

## 5. ZPROVOZNĚNÍ A TESTOVÁNÍ IMU



Obrázek 5.1: Nastavení hodin pro jednotlivé periferie v STM32Cube.



Obrázek 5.2: Konfigurace pinů z programu STM32Cube.

### 5.1.1 Nastavení AD7689

Komunikace s AD převodníky probíhá na sběrnici SPI1 a pracuje v základním módu SPI, tedy „Clock Polarity (CPOL) = Low“, „Clock Phase (CPHA) = 1Edge“ a velikost datového bloku je 16 bitů. Získání dat probíhá přepsáním 14 bitového konfiguračního registru CFG. Tento registr obsahuje konfiguraci vstupních kanálů, výběr kanálu a dalších nastavení (více [27]). Všechny kanály jsou nastaveny do bipolárního režimu s referencí  $V_{REF}/2$ . Výjimkou je senzor teploty, jenž je nastaven na unipolární režim. Při napájení 5V odpovídá nejméně významný bit (Least Significant Bit - LSB) hodnotě 76, 29  $\mu V$ .

### 5.1.2 Nastavení ADIS16136

Pro senzory ADIS16136 je vyhrazena sběrnice SPI2 pracující v SPI mode 3. Nastavení je tedy CPOL = High, CPHA = 2Edge a velikost datového bloku 16 bitů. Čtení dat ze senzoru probíhá ve dvou cyklech, kdy v prvním cyklu probíhá žádost o obsah registru na odeslané adresu a v druhém cyklu probíhá čtení obsahu tohoto registru. Výstupní data jsou reprezentována pomocí dvojkového doplňku. Pro převod slouží tabulka na obrázku 5.3. Nejméně významný bit odpovídá hodnotě  $0,018275^{\circ}/\text{sek}$ .

<b>Rotation Rate</b>	<b>Decimal</b>	<b>Hex</b>	<b>Binary</b>
+450°/sec	+24,623	0x602F	0110 0000 0010 1111
+0.03655°/sec	+2	0x0002	0000 0000 0000 0010
+0.018275°/sec	+1	0x0001	0000 0000 0000 0001
0°/sec	0	0x0000	0000 0000 0000 0000
-0.018275°/sec	-1	0xFFFF	1111 1111 1111 1111
-0.03655°/sec	-2	0xFFFFE	1111 1111 1111 1110
-450°/sec	-24,623	0x9FD1	1001 1111 1101 0001

Obrázek 5.3: Tabulka pro převod dat na úhlovou rychlosť [25]

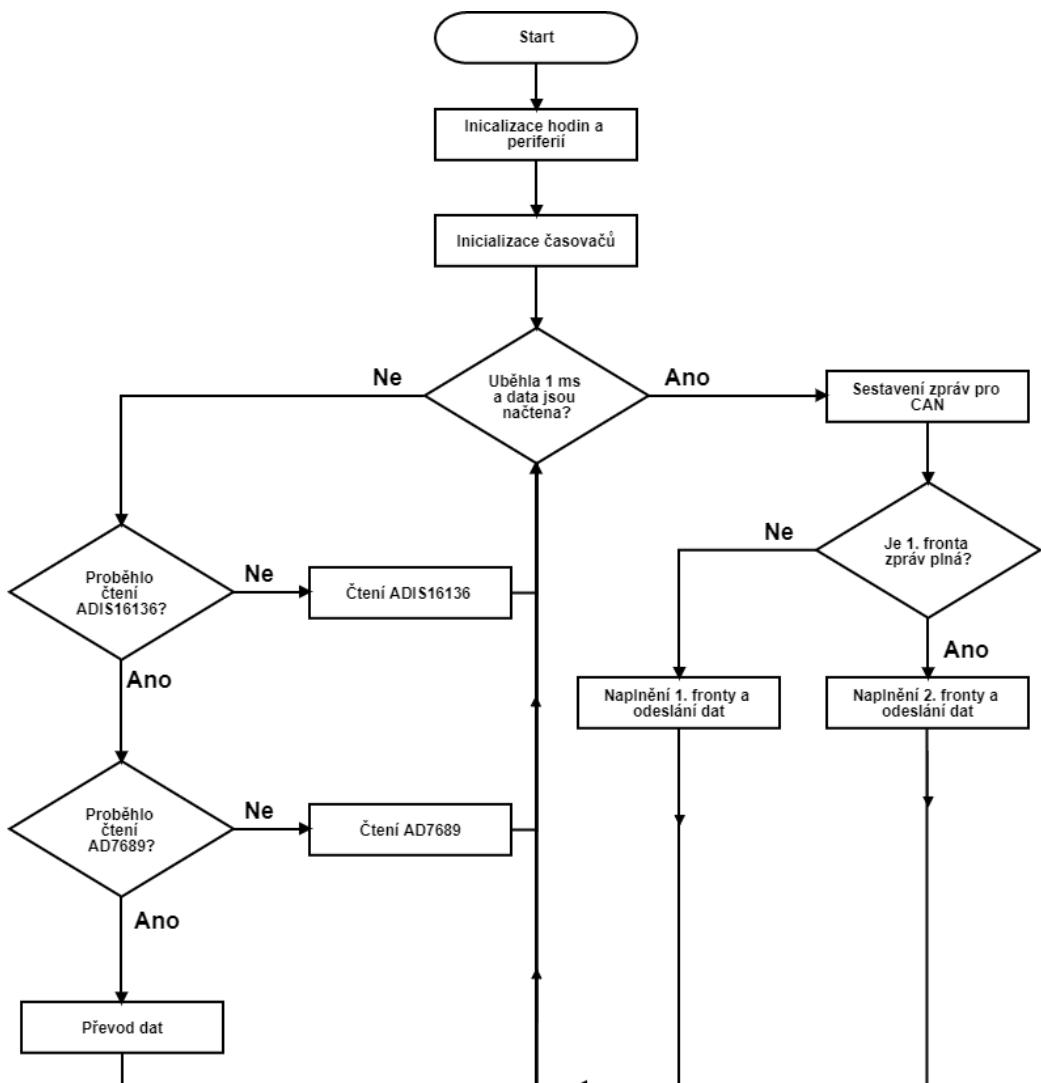
### 5.1.3 Struktura programu

Nejprve dojde k nastavení systémových hodin, inicializaci bran, rozhraní pro komunikaci, časovačů a inicializačnímu nastavení senzorů. Poté se spustí časovač nastavený na 1 ms, který řídí vyčítání dat ze senzorů a jejich následné odesílání. Průchod programu popisuje diagram na obrázku 5.4. Program se chová jako stavový automat, který v nekonečné smyčce vyčítá data ze senzorů.

V první části dojde k načtení údajů ze všech senzorů úhlové rychlosti ADIS16136, následuje čtení hodnot z AD převodníků AD7689 a převod dat z dvojkového doplňku na datový typ float. Po načtení všech dat a uplynutí 1 ms, jsou data vložena do fronty pro odesílání po sběrnici CAN. Obsluhu správného odesílání dat zajišťují dvě fronty, které se neustále střídají v odesílání a je tedy zaručeno, že v průběhu odesílání nedojde k pokusu o přepsání dat ve frontě. Po odeslání jedné zprávy je zavoláno přerušení, ve kterém dojde k posunu na další zprávu ve frontě. Data jsou odesílána formou čtyř bajtů, které reprezentují hodnotu float. Sběrnice CAN je nastavena na 1 MHz a zprávy jsou odesílány ve formátu CANaerospace.

## 5. ZPROVOZNĚNÍ A TESTOVÁNÍ IMU

---

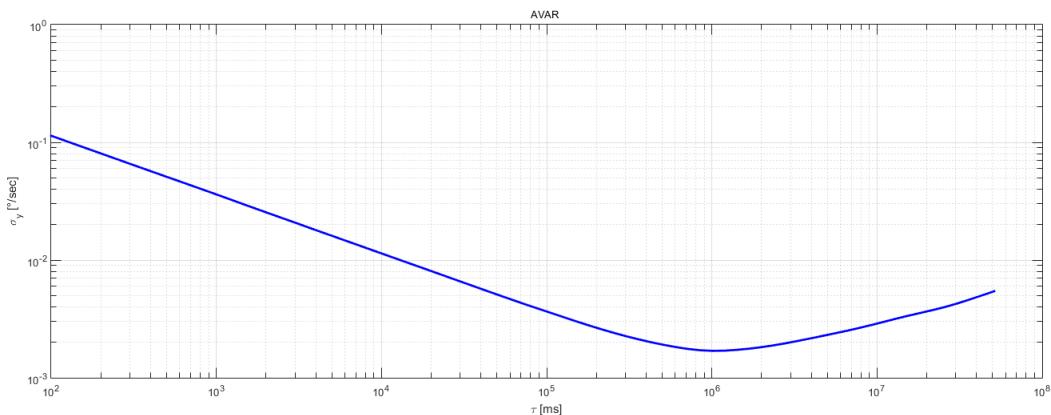


Obrázek 5.4: Zjednodušený vývojový diagram čtení hodnot IMU

## 5.2 Měření na IMU

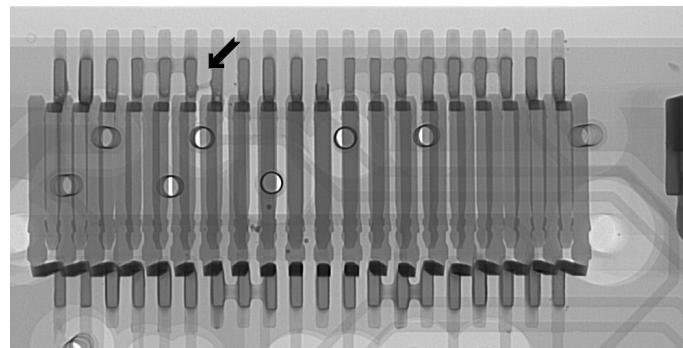
Pro senzor úhlové rychlosti ADIS16136 byla provedena analýza Allan Variance. Měření probíhalo po dobu přibližně 15-ti hodin se vzorkovací frekvencí 100 Hz. Výsledný graf AVAR je na obrázku 5.5.

## 5.2. Měření na IMU



Obrázek 5.5: Změřená Allan deviation pro senzor ADIS16136

V průběhu oživování IMU nastal problém v komunikaci se senzory úhlové rychlosti ADIS16136, která probíhá po sběrnici SPI2. Problém byl odhalen ve 40-ti pinovém konektoru, kterým se připojovala bočnice B k základní desce IMU. Pomocí rentgenu byl odhalen zkrat (obrázek 5.6) na hodinovém signálu SPI2 a po výměně konektoru byla komunikace úspěšně zprovozněna.



Obrázek 5.6: Rentgen konektoru bočnice B se zobrazeným zkratem



# KAPITOLA **6**

---

## **Návrh a realizace rozšiřující desky**

### **6.1 Požadavky**

Jedním z cílů bakalářské práce byl návrh a realizace rozšiřující desky, která umožňuje výpočet navigačních údajů na základě inerciálních dat, GNSS dat a absolutního snímače tlaku. Výpočetní jednotkou této desky by měl být mikroprocesor řady STM32F4XX nebo STM32F7XX. Komunikace s okolím by měla být zajištěna pomocí CAN a RS232. V této kapitole je rozebrán výběr komponent společně s jejich základním popisem.

### **6.2 Použité součástky**

#### **6.2.1 Mikroprocesor**

Pro výběru mikroprocesoru byly hlavními parametry dostatečný výpočetní výkon a podpora komunikačních rozhraní uvedených v zadání. Výpočetní výkon je udáván hodnotou DMIPS (Dhrystone Million Instructions Per Second), která určuje kolik dokáže procesor spočítat operací Dhrystone při zadané frekvenci [30]. U řady STM32F4 je tato hodnota 225 DMIPS při 180 MHz, zatímco u řady STM32F7 462 DMIPS při 216 MHz [31] [32]. Přepočtu na 1 MHz je výpočetní výkon řady STM32F7 téměř dvojnásobný oproti předchozí řadě STM32F4. Řada STM32F7 rovněž nabízí maximální frekvenci 216 MHz. Vybrán byl tedy mikroprocesor z řady STM32F7, konkrétně STM32F746VG. Tento mikroprocesor obsahuje jednotku umožňující operace s plovoucí desetinou čárkou (Floating Point Unit) a navíc umožňuje také připojení pomocí Ethernetu.

### 6.2.2 GNSS přijímač

Dalším zařízením na desce je GNSS přijímač. Vybrán byl modul NEO-M8P-2 od výrobce u-blox. Tento modul poskytuje nejenom hrubá data, ale také umožňuje navigaci v režimu RTK (Real Time Kinematic). Výhodou je také podpora více GNSS systémů (GPS, GLONASS, BeiDou)[33]. K mikroprocesoru je tento modul připojen pomocí sériového rozhraní UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter).

### 6.2.3 Absolutní snímač tlaku MS5611-01BA03

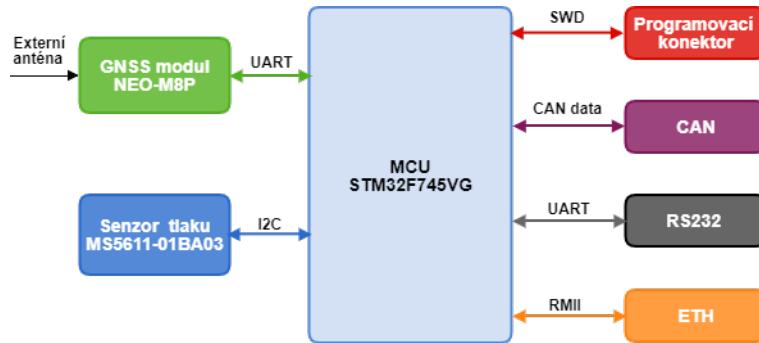
Jako senzor tlaku byl použit MS5611-01BA03 jehož výhodou je, že měří nejen tlak, ale také teplotu. O převod se stará 24-bitový  $\Delta\Sigma$  AD převodník [34]. Základní parametry jsou uvedeny v tabulce 6.1. Pro připojení k mikroprocesoru je využita sběrnice  $I^2C$ .

Parametr	Hodnota	Jednotka
Měřící rozsah	10 - 1200	mbar
Rozlišení (oversampling 4096)	0,012	mbar
Přesnost (25 °C, 750 mbar)	±1,5	mbar
Teplotní rozsah	-40 → +85	°C

Tabulka 6.1: Základní parametry snímače MS5611-01BA03[34]

Z důvodu využití pouze jednoho přívodu napájení, je napájení celé jednotky (IMU a rozšiřující desky) přivedeno nejprve na nově navrženou desku a až následně je přes kaskádu kondenzátorů vyvedeno na výstupní konektor. Napájení nové desky zajišťuje spínaný zdroj LMZ12001 se vstupním rozsahem 4,5 - 20 V a výstupem 3,3 V. K programování mikroprocesoru pomocí SWD je určen šesti-pinový konektor. Přidáno bylo také připojení do sítě Ethernet, jehož komunikaci zajišťuje kontrolér LAN8720A, připojený k mikroprocesoru přes rozhraní RMII (Reduced Media-Independent Interface). Výsledný návrh zapojení je zobrazen na obrázku 6.1 ve své zjednodušené podobě.

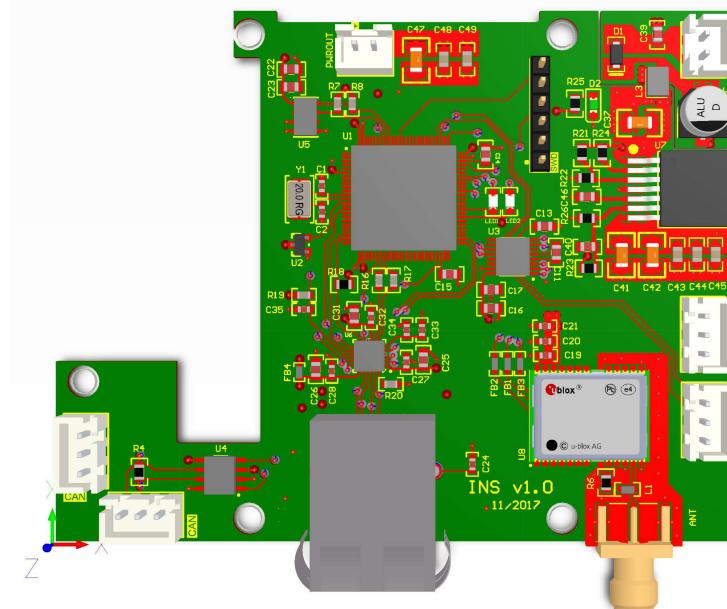
### 6.3. Realizace rozšiřující desky



Obrázek 6.1: Blokové schéma rozšiřující desky

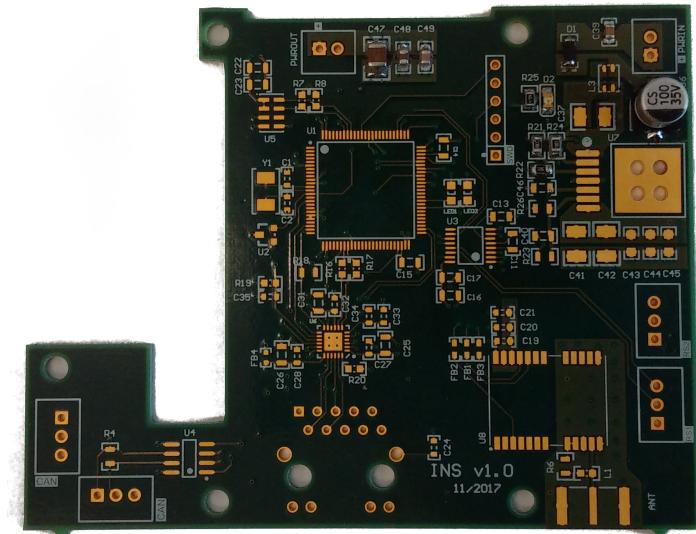
## 6.3 Realizace rozšiřující desky

Celý návrh probíhal v prostředí Altium Designer pod studentskou licencí. Deska je tvarována tak, aby bylo možné ji upevnit pomocí distančních sloupků k základní desce IMU. Z důvodu co nejkratšího spojení mezi novou deskou a IMU, je část s CAN konektorem vyvedena za bočnici IMU. Pro návrh bylo zvoleno čtyřvrstvé PCB (Printed Circuit Board) s rozdělením vrstev Top-Power-Ground-Bottom. Celé schéma nové desky je uvedeno v příloze A. Výsledný návrh PCB (obrázek 6.2) je společně s celým projektem součástí přílohy na CD. zobrazen na 3D modelu z Altium Designer 6.2.

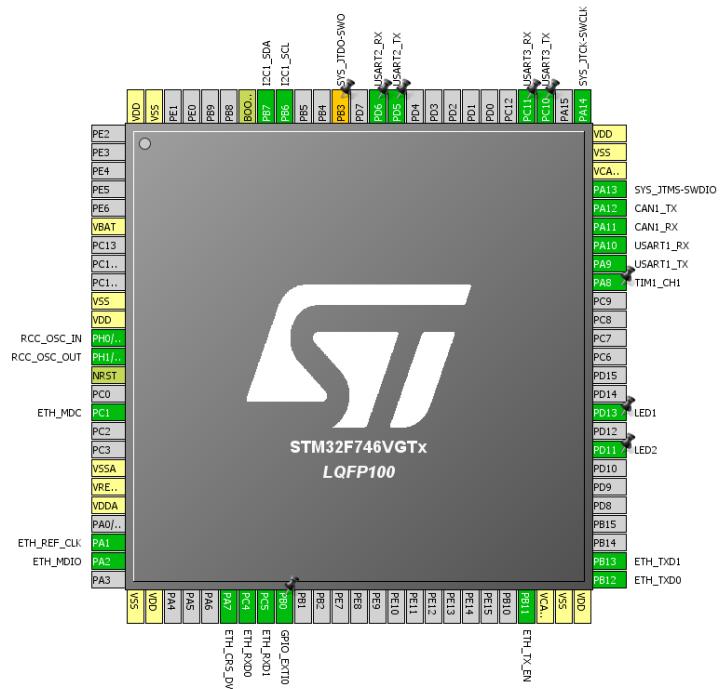


Obrázek 6.2: 3D model z Altium designer.

## 6. NÁVRH A REALIZACE ROZŠIŘUJÍCÍ DESKY



Obrázek 6.3: Vyrobená deska ve fázi osazování.



Obrázek 6.4: Konfigurace pinů v programu STM32Cube.

---

# Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo zprovoznění inerciální měřicí jednotky a rozšíření o externí desku plošných spojů umožňující výpočet navigačních údajů, tj. pozice, rychlosti a orientace na základě inerciálních dat, GNSS dat a absolutního snímače tlaku. Pro IMU byl navržen software sloužící k vyčítání dat z AD převodníků AD7689, které zpracovávají signály z modifikované soustavy akcelerometrů. Společně s údaji o zrychlení jsou sbírána data ze senzorů úhlové rychlosti ADIS16136. Tyto údaje jsou následně odesílány s frekvencí 1 kHz po sběrnici CAN.

Rozšiřující deska byla navržena v souladu se zadáním a byla rozšířena o Ethernetové připojení. Vyřešen byl také problém s upevněním této desky na základní desku IMU. Navržená deska byla v době odevzdání bakalářské práce osazována a nemohlo tak proběhnout ověření praktické realizace.



---

## Literatura

- [1] Groves, P. D.: *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. Artech House Publishers, 2013.
- [2] Woodman, O. J.: An introduction to inertial navigation. 2007, [cit. 2012-12-05]. Dostupné z: <http://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR-696.pdf>
- [3] CHRobotics: Understanding Euler Angles. Dostupné z: <http://www.chrobotics.com/library/understanding-euler-angles>
- [4] Heitmann, J.: The Automobile and American Life. Dostupné z: <https://automobileandamericanlife.blogspot.cz/2011/04/engineering-ride-ford-engineering-1952.html>
- [5] A. Albarbar, S. H. T.: *MEMS Accelerometers: Testing and Practical Approach for Smart Sensing and Machinery Diagnostics*. Springer, Cham, 2016.
- [6] MEMS Accelerometer Gyroscope Magnetometer Arduino. 2015. Dostupné z: <http://howtomechatronics.com/how-it-works/electrical-engineering/mems-accelerometer-gyroscope-magnetometer-arduino/>
- [7] Pupo, L. B.: Characterization of Errors and Noises in MEMS Inertial Sensors Using Allan Variance Method. 2016. Dostupné z: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/103849/MScLeslieB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [8] Skalský, M.: MĚŘENÍ ÚHLOVÉ RYCHLOSTI POMOCÍ VLÁK-NOVÉHO INTERFEROMETRU. 2014. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=82877](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=82877)

## LITERATURA

---

- [9] Shamir, A.: An overview of Optical Gyroscopes Theory, Practical Aspects, Applications and Future Trends. 2006. Dostupné z: [http://www.angelfire.com/planet/adi\\_shamir/Optical%20Gyroscopes%5B1%5D.pdf](http://www.angelfire.com/planet/adi_shamir/Optical%20Gyroscopes%5B1%5D.pdf)
- [10] Fiber Optic Gyroscope development. Dostupné z: <http://www.neubrex.com/htm/applications/gyro-principle.htm>
- [11] Frost, R.: Why did NASA use a ring laser gyro in the OSIRIS-REX mission? 2017. Dostupné z: <https://www.quora.com/Why-did-NASA-use-a-ring-laser-gyro-in-the-OSIRIS-REX-mission>
- [12] Brož, B. P.: Navigační systémy pro bezpilotní prostředky a ultralehká letadla. 2016. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/61697/F3-DP-2016-Broz-Pavel-Broz\\_Navigacni\\_system\\_pro\\_bezpilotni%20prostredky\\_a\\_ultralehka\\_letadla.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/61697/F3-DP-2016-Broz-Pavel-Broz_Navigacni_system_pro_bezpilotni%20prostredky_a_ultralehka_letadla.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [13] Ripka, P.; Tipek, A.: *Modern Sensors Handbook*. ISTE Ltd., 2007, ISBN:978-1-905209-66-8.
- [14] Trličík, B. J.: MODELOVÁNÍ INERCIÁLNÍCH SNÍMAČŮ. 2013. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=64301](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=64301)
- [15] Hansen, J. M.; Roháč, J.; Šipoš, M.; aj.: Validation and Experimental Testing of Observers for Robust GNSS-Aided Inertial Navigation. *InTech*, September 2016, dOI: 10.5772/63575. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/recent-advances-in-robotic-systems/validation-and-experimental-testing-of-observers-for-robust-gnss-aided-inertial-navigation>
- [16] Allan Variance: Noise Analysis for Gyroscopes. 2015. Dostupné z: [http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/app\\_note/AN5087.pdf](http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN5087.pdf)
- [17] Bílý, B. M.: Přesný inerciální navigační systém kategorie Tactical grade. 2015. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/61542/F3-DP-2015-Bily-Marek-DP\\_Marek\\_Bily\\_v4.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/61542/F3-DP-2015-Bily-Marek-DP_Marek_Bily_v4.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [18] Space Segment. Dostupné z: <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>
- [19] NovAtel: An Introduction to GNSS. Dostupné z: <https://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-5-resolving-errors/real-time-kinematic-rtk/>

- [20] Satellite Navigation. Dostupné z: <http://www.fsd.mw.tum.de/research-sensors-data-fusion-and-navigation/research-and-competence-areas/satellite-navigation/>
- [21] Alam, M.; Sipos, M.; Rohac, J.; aj.: Calibration of a Multi-sensor Inertial Measurement Unit with Modified Sensor Frame. *CTU*, March 2015, 10.1109/ICIT.2015.7125387. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7125387/>
- [22] Rohac, J.: Measurement Unit of an Artificial Horizon.
- [23] Analog Devices Accelerometer ADXL203 Datasheet. Dostupné z: [http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL103\\_203.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL103_203.pdf)
- [24] Analog Devices Accelerometer ADXL337 Datasheet. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL337.pdf>
- [25] Analog Devices Angular Rate Sensor ADIS16136 Datasheet. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADIS16136.pdf>
- [26] Analog Devices Voltage Output Temperature Sensor Datasheet. Dostupné z: <http://www.mouser.com/ds/2/609/AD22100-877082.pdf>
- [27] Analog Devices AD7689 Datasheet. Dostupné z: [http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7682\\_7689.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7682_7689.pdf)
- [28] STM32Cube. Dostupné z: <http://www.st.com/en/embedded-software/stm32cube-embedded-software.html?querycriteria=productId=LN1897>
- [29] STM32fF4 HAL and LL User Manual. Dostupné z: [http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user\\_manual/2f/71/ba/b8/75/54/47/cf/DM00105879.pdf/files/DM00105879.pdf/jcr:content/translations/en.DM00105879.pdf](http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/2f/71/ba/b8/75/54/47/cf/DM00105879.pdf/files/DM00105879.pdf/jcr:content/translations/en.DM00105879.pdf)
- [30] Dhrystone Benchmarking for ARM Cortex Processors. 2011. Dostupné z: [http://infocenter.arm.com/help/topic/com.arm.doc.dai0273a/DAI0273A\\_dhrystone\\_benchmarking.pdf](http://infocenter.arm.com/help/topic/com.arm.doc.dai0273a/DAI0273A_dhrystone_benchmarking.pdf)
- [31] STM32F4 Series. Dostupné z: <http://www.st.com/en/microcontrollers/stm32f4-series.html?querycriteria=productId=SS1577>

## LITERATURA

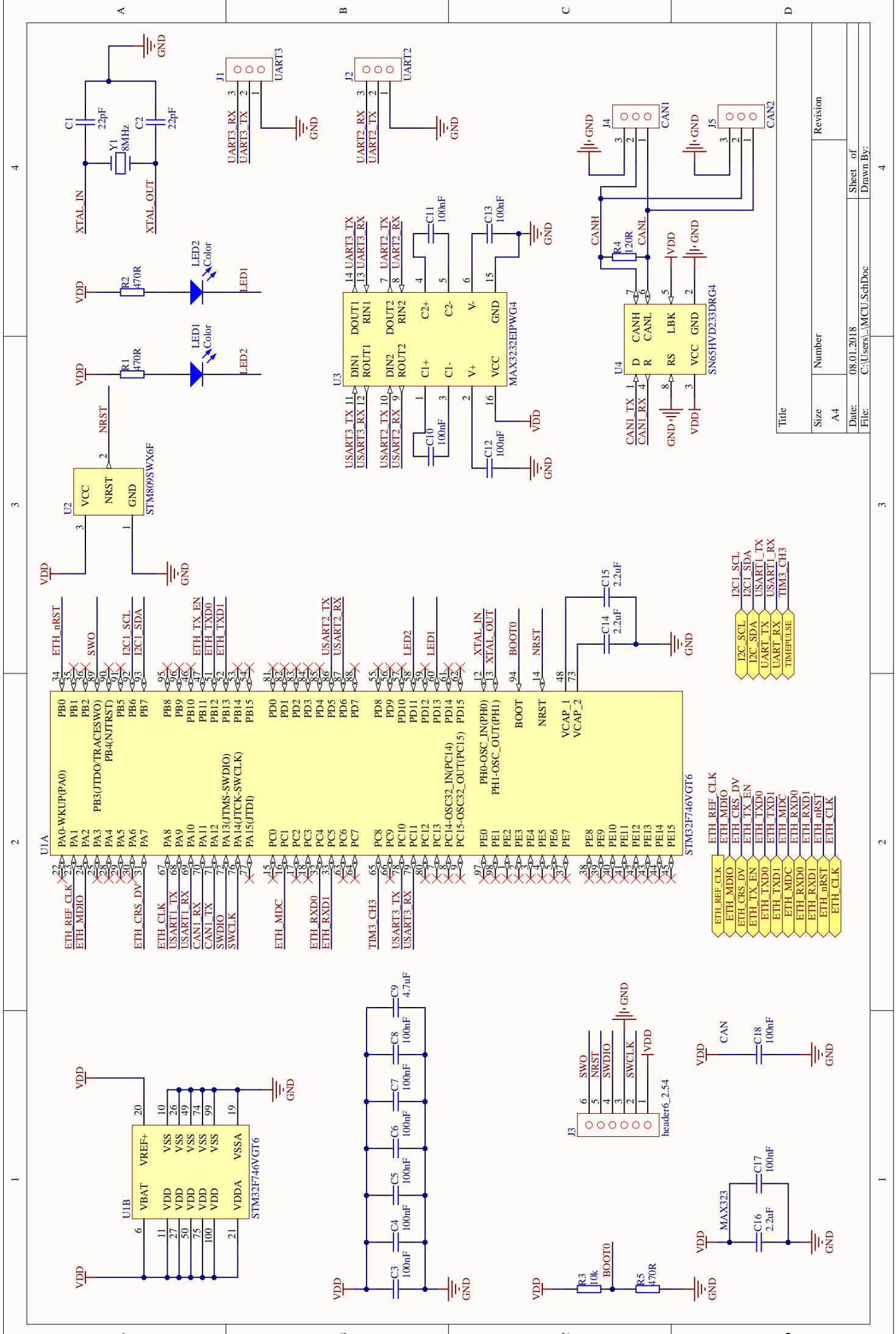
---

- [32] STM32F7 Series. Dostupné z: <http://www.st.com/en/microcontrollers/stm32f7-series.html?querycriteria=productId=SS1858>
- [33] NEO-M8P Datasheet. Dostupné z: [https://www.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8P\\_DataSheet\\_%28UBX-15016656%29.pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8P_DataSheet_%28UBX-15016656%29.pdf)
- [34] MS5611-01BA03 Datasheet. Dostupné z: <http://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=srchrtrv&DocNm=MS5611-01BA03&DocType=Data+Sheet&DocLang=English>

PŘÍLOHA **A**

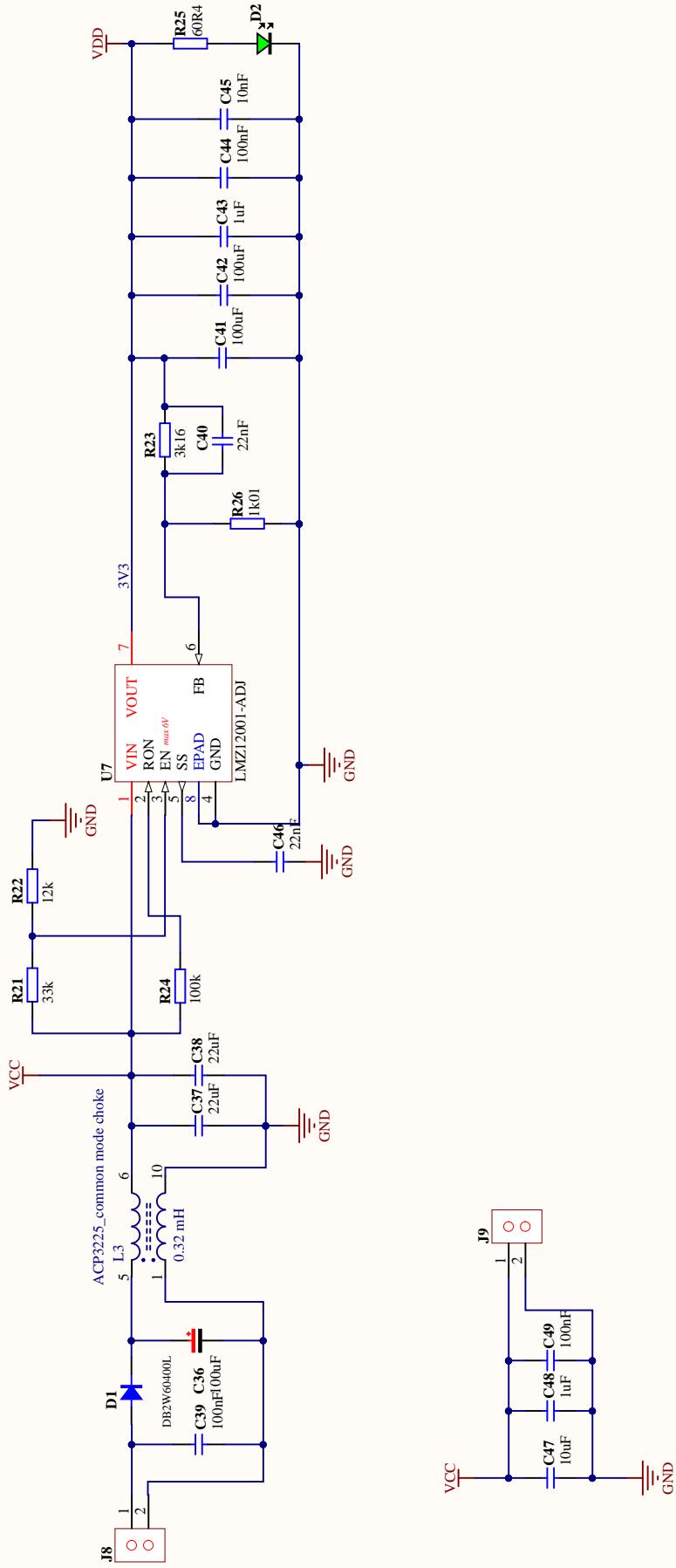
---

## **Schéma rozšiřující desky**



A 1 2 3 4

A



B

B

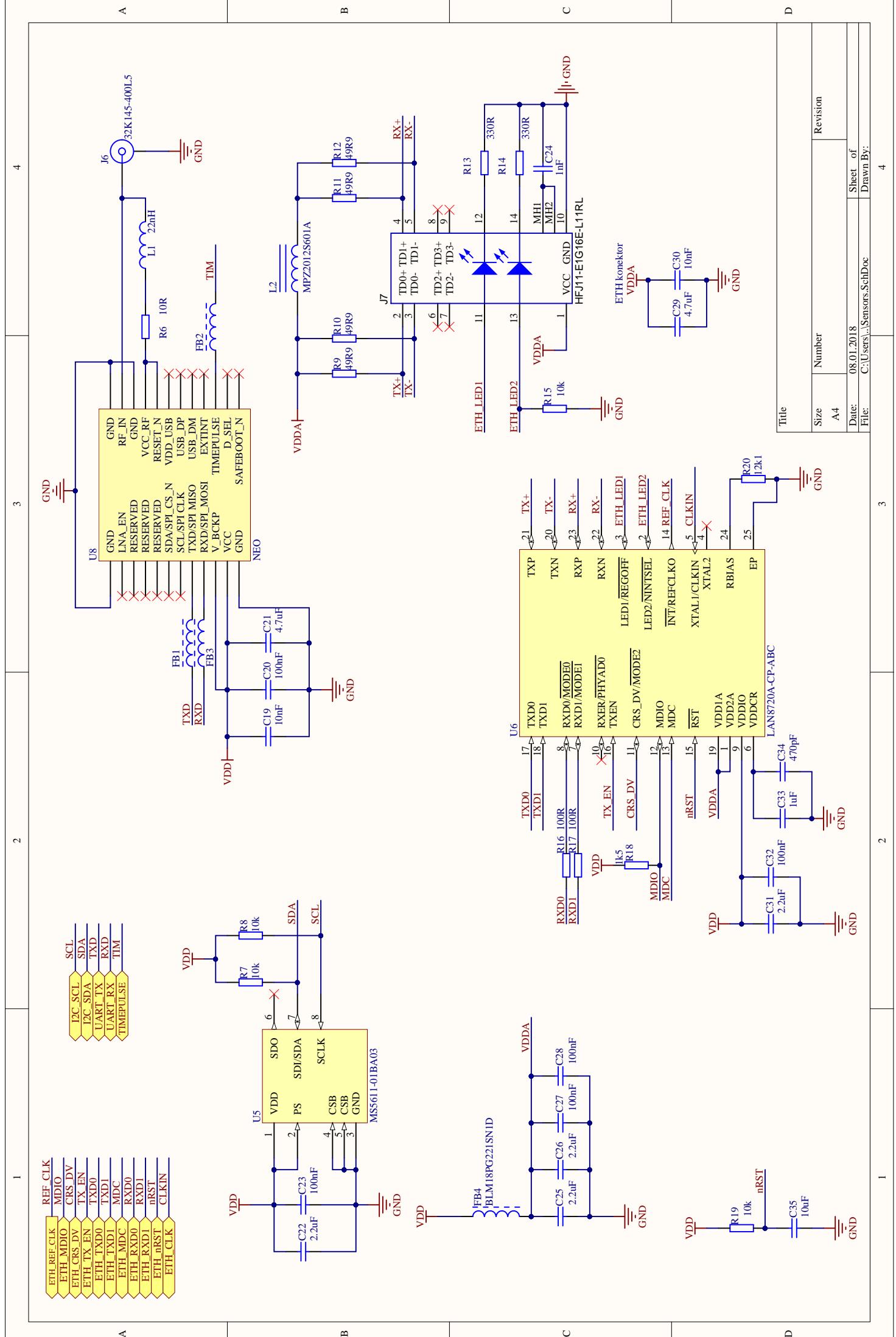
C

C

D

D

Title		Revision
Size	Number	
A4		
Date:	08.01.2018	Sheet of
File:	C:\Users...\Power.SchDoc	Drawn By:
		4



## Seznam použitých zkrátek

**AD** Analog Digital

**ARW** Angular Random Walk

**AVAR** Allan Variance Analysis

**BIN** Bias Instability

**CAN** Control Area Network

**CPHA** Clock Phase

**CPOL** Clock Polarity

**DMIPS** Dhystone Millions Instructions Per Second

**EMI** Electromagnetic Interference

**FOG** Fibre Optic Gyroscope

**FPU** Floating Point Unit

**GNSS** Global Navigation Satellite System

**GPS** Global Position System

**HAL** Hardware Abstraction Layer

**I<sup>2</sup>C** Inter-Integrated Circuit

**IDE** Integrated Development Environment

**IMU** Inertial Measurement Unit

**INS** Inertial Navigation System

**MEMS** Micro Electro-Mechanical Systems

## B. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

---

**NED** North-East-Down

**PCB** Printed Circuit Board

**RLG** Ring Laser Gyroscope

**RMII** Reduced Media Independent Interface

**RR** Rate Ramp Noise

**RRW** Rate Random Walk

**RTK** Real Time Kinematic

**SCL** Synchronous Clock

**SDA** Synchronous Data

**SNR** Signal to Noise Ratio

**SPI** Serial Peripheral Interface

**SWD** Serial Wire Debug

PŘÍLOHA C

---

## Obsah přiloženého CD

```
readme.txt.....stručný popis obsahu CD
Altium.....adresář s projektem v Altium designer
src
  Navigation Unit.....zdrojové kódy implementace
  STM32Cube.....projekty pro STM32Cube
text
  BP Polák Luboš.pdf .....text práce ve formátu PDF
```