



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

### ÚSTAV RADIOTELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## MĚŘENÍ POLOHY UVNITŘ BUDOV POMOCÍ INERCIÁLNÍ JEDNOTKY

INDOOR POSITIONING BASED ON INERCIAL MEASUREMENT UNIT

### SEMESTRÁLNÍ PRÁCE

SEMESTRAL THESIS

#### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Coufal

#### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Král, Ph.D.

BRNO 2023



# Semestrální práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

**Student:** Marek Coufal

**ID:** 240598

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2023/24

## NÁZEV TÉMATU:

### Měření polohy uvnitř budov pomocí inerciální jednotky

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

BP(K)C-SEP: Seznamte se s dostupnými jednotkami pro měření inerciální polohy. Navrhněte a realizujte vhodný hardware samostatně bezdrátové jednotky, která bude umět zaznamenávat interně své údaje do paměti a na konci měření tato data přenést do počítače.

BP(K)C-BAP: Realizujte ovládací SW a FW a skripty v Matlabu nebo Pythonu pro určení polohy uvnitř budov. Funkci demonstrejte. Všechny programy realizujte tak, aby byly vhodné a použitelné v rámci laboratorní úlohy předmětu MPC-RAR. Navrhněte koncept této laboratorní úlohy.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] MALÝ, Martin. Hradla, volty, jednočipy: Úvod do bastlení. Praha: CZ.NIC, 2017. ISBN 978-80-88168-26-3.
- [2] RITCHIE, Dennis M., KERNIGHAN, Brian W. The C Programming Language, Second Edition. New Jersey: Prentice Hall, 1988. ISBN 9780133086249.

**Termín zadání:** 22.9.2023

**Termín odevzdání:** 2.1.2024

**Vedoucí práce:** Ing. Jan Král, Ph.D.

**doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální 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 semestrální práce se zabývá inerciální navigací pro použití uvnitř budov. Je rozebrán algoritmus zpracování dat akcelerometrů a gyrokopů, a jejich zpracování pomocí pohybových rovnic. Jsou také definovány různé vztažné soustavy pro potřeby manipulace s vektorovými fyzikálními veličinami a jejich převody a rotace mezi soustavami. Práce se také věnuje návrhu hardwaru inerciální jednotky, minimálním požadavkům pro rychlý záznam dat a následně samotnému návrhu desky plošných spojů.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

IMU, inerciální navigace, poloha, připevněný, vztažné soustavy, euler, gravitace, gyroskop, akcelerometr, magnetometr, GNSS, STM32, ESP32

## **ABSTRACT**

This semestral thesis deals with inertial navigation intended for indoor usage. The algorithm for processing of accelerometer and gyro data is described, along with their position in equations of motion. Various reference frames are defined for ease of manipulation of vector quantities, including conversions and rotations between frames. The hardware design of the inertial navigation unit is also discussed including minimum requirements for fast data recording and the design of the printed circuit board.

## **KEYWORDS**

IMU, inertial navigation, position, strapdown, reference frames, euler, gravity, gyro, accelerometer, magnetometer, GNSS, STM32, ESP32

COUFAL, Marek. *Měření polohy uvnitř budov pomocí inerciální jednotky*. Semestrální práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2024. Vedoucí práce: Ing. Jan Král, Ph.D.

# Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení autora:</b>	Marek Coufal
<b>VUT ID autora:</b>	240598
<b>Typ práce:</b>	Semestrální práce
<b>Akademický rok:</b>	2023/24
<b>Téma závěrečné práce:</b>	Měření polohy uvnitř budov pomocí inerciální jednotky

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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 autorského 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.

Brno .....  
.....  
podpis autora\*

---

\*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské/diplomové/disertační práce panu Ing. XXX YYY, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>11</b>
<b>1 Algoritmus inerciální navigace</b>	<b>12</b>
1.1 Využití inerciální navigace . . . . .	12
1.2 Princip fungování inerciální navigace . . . . .	12
1.2.1 Zavedení vztažných soustav . . . . .	13
1.3 Vztažné soustavy a rotace Země . . . . .	13
1.4 Tíhové pole Země . . . . .	14
1.4.1 Gravitační modely Země . . . . .	15
1.5 Rotace měření akcelerometru . . . . .	16
1.6 Diagram algoritmu inerciální navigace . . . . .	17
<b>2 Inerciální senzory</b>	<b>18</b>
2.1 MEMS akcelerometry . . . . .	18
2.2 MEMS gyroskopy . . . . .	19
<b>3 Hardware inerciální jednotky</b>	<b>20</b>
3.1 Akcelerometr a gyroskop . . . . .	21
3.2 Magnetometr . . . . .	23
3.3 GNSS . . . . .	23
3.4 Paměť . . . . .	24
3.5 Uživatelské rozhraní . . . . .	25
3.6 Napájení . . . . .	25
3.7 Hlavní procesor . . . . .	27
3.8 ESP32 . . . . .	28
3.9 Testování s vývojovými stavebnicemi . . . . .	28
<b>4 Realizace hardwaru</b>	<b>30</b>
<b>Závěr</b>	<b>32</b>
<b>Literatura</b>	<b>33</b>
<b>Seznam symbolů a zkratek</b>	<b>36</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>38</b>
<b>A Schéma zapojení inerciální jednotky</b>	<b>39</b>

<b>B Výkres DPS</b>	<b>46</b>
B.1 Pohled osazení součástek	46
B.2 Vrchní vrstva mědi DPS	47
B.3 Vnitřní vrstva mědi DPS In1	48
B.4 Vnitřní vrstva mědi DPS In2	49
B.5 Spodní vrstva mědi DPS	50

# **Seznam obrázků**

1.1	Výškový reliéf geoidu. [3] . . . . .	16
1.2	Blokové schéma algoritmu strapdown inerciální navigace, převzato z [8] [9] . . . . .	17
2.1	Struktura MEMS akcelerometru [2] . . . . .	18
2.2	Mikroskopický snímek MEMS akcelerometru [1] . . . . .	19
2.3	Struktura MEMS gyroskopu [2] . . . . .	19
3.1	Blokové schéma inerciální jednotky . . . . .	20
3.2	Fotografie grafického OLED displeje . . . . .	25
3.3	Testovací přípravek s vývojovými deskami . . . . .	29
4.1	3D model navržené DPS . . . . .	30

# **Seznam tabulek**

3.1	Porovnání základních parametrů gyroskopů [18] [19] . . . . .	22
3.2	Podporované družicové systémy [15] . . . . .	24
3.3	Odhad celkového bitratu pro záznam dat . . . . .	25
3.4	Odhad spotřeby proudu 3,3V větve . . . . .	26
3.5	Minimální požadavky na periferie mikroprocesoru . . . . .	27
4.1	Signálové uspořádání vrstev na DPS . . . . .	31
4.2	Uspořádání měděných a izolačních vrstev DPS JLC04161H-7628 . . .	31

# Úvod

Tato práce se zabývá poměrně komplexní problematikou inerciální navigace pro použití uvnitř budov a jejím sestrojením, tedy určováním polohy pomocí „black boxu“ který své údaje o pohybu určí primárně z údajů o lineárním zrychlení z akcelerometru a úhlové rychlosti z gyroskopu pro omezení potřeby neustálé dostupnosti signálu z globálních navigačních systémů.

Jsou popsány algoritmy pro zpracování dat šestiosé inerciální jednotky s nehybně umístěnými *Micro-ElectroMechanical Systems - mikro-elektromechanické systémy* (MEMS) gyroskopy a akcelerometry, což umožňuje značnou miniaturizaci a snížení ceny, v porovnání s osvědčenými systémy využívajícími velké a složité mechanické konstrukce gimbalů a gyroskopů. Přestože se přesnost senzorů stále zlepšuje, i díky malé odchylce měřených dat může rychle narůstat chyba odhadované polohy díky integraci úhlové rychlosti a dvojitě integraci lineárního zrychlení. Z tohoto důvodu je jednotka opatřena i magnetometrem a *Global navigation satellite system - globální družicový polohový systém* (GNSS) modulem pro možnost fúze dalších dat pro co největší zmenšení chyby, tomuto se ovšem bude věnovat až navazující bakalářská práce.

Jsou také věnovány kapitoly samotnému návrhu inerciální jednotky, minimálním požadavkům na komunikace a jejich počtům a rychlostem, způsobu zaznamenávání dat a celkovému blokovému konceptu. V Poslední kapitole je také popsán návrh desky plošných spojů inerciální jednotky.

# 1 Algoritmus inerciální navigace

## 1.1 Využití inerciální navigace

Možnost navigace a znalost polohy je pro lidstvo již dlouhou dobu důležitá jak v průmyslu, tak i v každodenním životě. Pravděpodobně nejrozšířenějším druhem navigace jsou tzv. globální navigační systémy, například *Global Positioning System - globální polohový systém* (GPS). Ovšem pro některé aplikace nemusí být použití GNSS, ať už z politických, či technických důvodů ideální. Pro navigaci v oblasti letectví a námořnictví se začala inerciální navigace využívat kolem roku 1960 a je stále využívána dodnes. [8]

Díky stále přesnějším a levnějším inerciálním senzorům se rozšiřují možnosti využití inerciální navigace i do běžných průmyslových aplikacích, například v oblastech robotiky, automobilové techniky, nebo i pro údržbu podzemních infrastruktur, mapování kanalizací a další. [8] Tato práce se zabývá využitím inerciální navigace pro účely určení polohy uvnitř budov, kde je pokrytí signálem globálních navigačních systémů velmi slabé, nebo žádné.

## 1.2 Princip fungování inerciální navigace

Inerciální navigační systémy pracují na principu nepřímého měření z dat, které poskytuje akcelerometr a gyroskop. Akcelerometry poskytují informaci o lineárním zrychlení v prostoru pomocí měření síly  $F$  na definovanou jednotku hmotnosti  $m$  a pomocí 2. Newtonova zákona určí zrychlení  $a$  [8]

$$a = \frac{F}{m} \quad (1.1)$$

Síla  $F$  představuje síly působící na senzor vůči jeho tělu ve volném pádu, skládá se tedy ze statické (tíhové) a dynamické síly způsobené zrychlením vůči Zemi. [8] Z tohoto důvodu, pokud je akcelerometr v klidu na povrchu Země, změří zrychlení o velikosti zhruba  $9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ .

Akcelerometry zpravidla měří hodnoty lineárního zrychlení ve třech navzájem pravoúhlých osách. Znalostí počáteční rychlosti  $v(t_0)$  a polohy  $x(t_0)$  v čase  $t_0$  můžeme pomocí zrychlení  $a$  v časech  $s > t_0$  určit rychlosť  $v(t)$  a následně polohu  $x(t)$  pomocí dvou integrací [9]

$$v(t) = v(t_0) + \int_{t_0}^t a(s) ds \quad (1.2)$$

$$x(t) = x(t_0) + \int_{t_0}^t v(s) ds \quad (1.3)$$

Aby bylo možné s inerciální jednotkou volně pohybovat v prostoru, je potřeba kromě znalosti polohy měřit, nebo kompenzovat její natočení. Jednou z možností jak kompenzovat rotaci jednotky je připevnění akcelerometrů na gimbal, který bude udržovat jejich natočení vůči zemi konstantní. Tohoto principu se často využívá v letectví, zejména kvůli jejich vysoké přesnosti, ovšem velkou nevýhodou bývá mechanická složitost a velikost. [9] [7]

Druhou možností, jak kompenzovat natočení je měřit jeho úhel a následně zrychlení z akcelerometru rotovat vůči referenčnímu systému.[9] [7] K tomuto účelu slouží gyroscopy, které měří úhlovou rychlosť  $\omega$  otáčení jednotky kolem osy. Podobně jako se zrychlením u akcelerometru, znalostí počátečního úhlu  $\varphi(t_0)$  v čase  $t_0$  můžeme pomocí úhlové rychlosti  $\omega$  v časech  $s > t_0$  určit úhel natočení  $\varphi(t)$ , ovšem tentokrát pouze jednou integrací.

$$\varphi(t) = \varphi(t_0) + \int_{t_0}^t \omega(s) \, ds \quad (1.4)$$

Díky tomu můžou být gyroscopy a akcelerometry nepohyblivě připevněny na mechanickou konstrukci. Jde o tzv. „Strapdown“ typ inerciální navigace.

### 1.2.1 Zavedení vztažných soustav

Pro účely přehlednosti a exaktnosti bývá v oblastech inerciální navigace zavedeno několik kartézských vztažných soustav. Každá soustava je ortogonální a pravotočivá. [6] [8]

- Inertial frame (i-frame) má počátek ve středu Země. Její osy jsou pevné vůči nepohybujícím se hvězdám. Osa  $z_i$  prochází zemskou osou.
- Earth frame (e-frame) má také počátek ve středu Země, její osy jsou pevně vztažené vůči Zemi, tedy rotují kolem i-frame. Osa  $z_e$  prochází zemskou osou.
- Navigation frame (n-frame) má počátek ve výchozím bodě navigace. Osy jsou natočené ve směrech *North East Down - sever východ dolů* (NED).
- Body frame (b-frame) má počátek v inerciální jednotce a její osy jsou natočené ve směrech náklonu, stáčení a vychýlení jednotky.č

S následnými měřenými a vypočtenými daty je často manipulováno jako s vektorom označeným indexem odpovídajícím soustavě, ke které jsou vztaženy (i, e, n, b).

## 1.3 Vztažné soustavy a rotace Země

Pokud budeme chtít provozovat navigaci vztaženou k pevnému počátečnímu bodu v prostoru (i-frame), bude možné používat klasické pohybové rovnice, tedy pro zrychlení  $\vec{a}_i$ , polohu  $\vec{r}$  a čas  $t$  platí: [8]

$$\vec{a}_i = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} \Big|_i \quad (1.5)$$

a obdobně pro rychlosť  $\vec{v}_i$  platí:

$$\vec{v}_i = \frac{d\vec{r}}{dt} \Big|_i \quad (1.6)$$

Ovšem v mnoha případech použití inerciální navigace potřebujeme jako počátek zvolit nějaký bod na Zemi, která se neustále otáčí kolem své osy, v tomto případě tedy budeme využívat e-frame. Akcelerometr ale může poskytnout pouze data ze vztažné soustavy i-frame, je tedy potřeba započít úhlovou rychlosť Země  $\omega_{ie}$  [8]

$$\omega_{ie} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \Omega \end{pmatrix} \quad (1.7)$$

Kde  $\Omega = 7,292 \times 10^{-5} \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$  je rychlosť rotace Země kolem své osy, vztaženo vůči nejbližší hvězdě (Slunci). Poté můžeme rychlosť  $\vec{v}_e$  v e-framu definovat jako: [8] [9]

$$\vec{v}_e = \frac{d\vec{r}}{dt} \Big|_e = \vec{v}_i - \omega_{ie} \times \vec{r} \quad (1.8)$$

S přepočty mezi i a e frame je potřeba nakládat zejména při navigaci letadel a raket, kdy je potřeba započít i rotaci Země, vzhledem k dlouhým úsekům času i vzdálenosti. V této práci se ovšem zabýváme navigací uvnitř budov, kdy doba měření může být řádově v jednotkách minut a vzdálenost ve stovkách metrů. Vliv rotace Země tedy bude velmi malý.

## 1.4 Tíhové pole Země

Jak již bylo popsáno v kapitole 1.2, zrychlení měřené inerciální jednotkou v i-frame je složené ze statické tíhové síly a dynamické síly způsobené zrychlením na jednotku hmotnosti. Působení této dynamické síly je často označováno jako tzv. „Specific force“  $\vec{f}$  představující sílu na jednotku hmotnosti, tedy zrychlení. Pomocí ní můžeme rovnici 1.5 rozepsat na: [8] [9]

$$\vec{a}_i = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} \Big|_i = \vec{f} + \vec{g} \quad (1.9)$$

Kde  $\vec{g}$  je tíhové zrychlení pole Země.

Z tohoto poznatku vyplývá, že pro správné fungování inerciální navigace je potřeba přesně znát velikost a směr  $\vec{g}$ .

Vzhledem k tomu, že Země: [5]

- Rotuje kolem své osy
- Není koule
- Není homogení

není možné považovat velikost tříhového zrychlení za konstantní a jeho směr vždy do středu Země.

Rotace Země kolem své osy vyvolává dostředivé zrychlení.<sup>1</sup> Toto zrychlení má vždy kolmý směr k ose otáčení Země. Vektorovým součtem s gravitačním zrychlením  $\vec{a}_g$ , které má vždy směr do středu Země dostaneme tříhové zrychlení  $\vec{g}$ , proto se v závislosti na zeměpisné šířce tříhové zrychlení odchyluje od středu Země. [5]

Pro kompenzaci rotace Země bychom mohli vyjádřit tříhové zrychlení  $\vec{g}$  v závislosti na gravitačním zrychlení  $\vec{a}_g$  následovně využít v rovnici 1.9 [8]

$$\vec{g} = \vec{a}_g - \vec{\omega}_{ie} \times (\vec{\omega}_{ie} \times \vec{r}) \quad (1.10)$$

Díky tomu, že Země není koule, ale přibližně elipsoid jsou body na pólech blíž středu Země než body na rovníku, to nám tedy ovlivňuje velikost gravitačního zrychlení. Tento vliv by šel analyticky vypočítat, pokud bychom předpokládali, že Země je elipsoid a zanedbali vliv reliéfu povrchu Země. [5]

Vzhledem k tomu, že tato práce se zabývá zpracováním dat z inerciální navigace až tzv. offline, tedy ne v reálném čase, můžeme pro řešení problémů s nekonzistentním tříhovým polem Země použít některý z dostupných gravitačních modelů *Earth Gravitational Model - gravitační model Země* (EGM).

#### 1.4.1 Gravitační modely Země

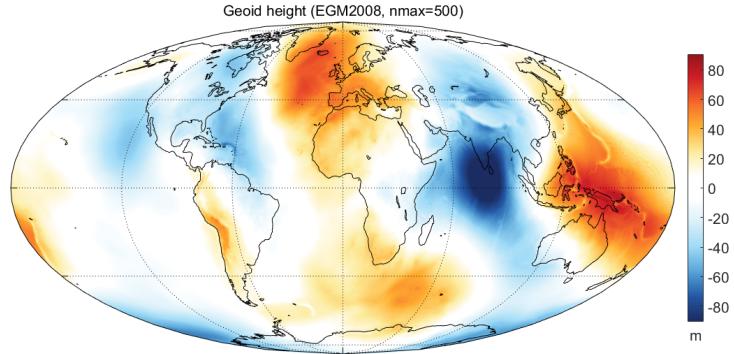
EGM jsou modely popisující geoid Země, s velmi širokou škálou použití v oblastech fyziky, geodézie, oceánografie, navigace a dalších. Spravuje je *National Geospatial-Intelligence Agency - americká geoprostorová agentura* (NGA) a jsou volně dostupné. Nejnovější věřejně dostupný EGM je z roku 2008 (EGM2008), který byl vytvořen na základě několika pozemních a výškových měření. [4]

Vytvořená mapa s výškou geoidu modelu EGM2008 publikovaného NGA je znázorněna na obrázku 1.1

Takovýto model je poté možné použít například pomocí funkcí z Matlab Aerospace Toolbox, který vypočítá vektor gravitačního zrychlení  $a_g$  se správným směrem i velikostí na základě dodaný souřadnic systému WGS84. Poté pomocí rovnice 1.10 můžeme vypočítat tříhové zrychlení.

---

<sup>1</sup>Všude na Zemi, vyjma samotných zeměpisných pólů



Obr. 1.1: Výškový reliéf geoidu. [3]

## 1.5 Rotace měření akcelerometru

Vzhledem k tomu, že se tato práce zabývá Strapdown systémem inerciální navigace, jsou data akcelerometru vztažena k soustavě inerciální jednotky (tedy b-frame). Pro převedení dat do vztažné soustavy i-frame je potřeba rotovat vektor specific force  $\vec{f}$  maticí směrových kosínů  $\mathbf{C}_b^i$ . Tato rotace by se dala popsat jako 3 po sobě jdoucí natočení o tzv. Eulerovy úhly vůči referenčním osám (např. pro tento případ i-frame). Tyto úhly označíme  $\phi$ ,  $\theta$  a  $\psi$  [8]

- Rotaci o úhel  $\phi$  kolem osy x přiřadíme rotační matici  $\mathbf{C}_x$ : [8]

$$\mathbf{C}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

- Rotaci o úhel  $\theta$  kolem osy y přiřadíme rotační matici  $\mathbf{C}_y$ : [8]

$$\mathbf{C}_y = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

- Rotaci o úhel  $\psi$  kolem osy z přiřadíme rotační matici  $\mathbf{C}_z$ : [8]

$$\mathbf{C}_z = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

Součinem těchto tří matic získáme matici směrových kosínů  $\mathbf{C}_b^i$  pro převod z b-frame na i-frame: [8]

$$\mathbf{C}_b^i = (\mathbf{C}_i^b)^T = (\mathbf{C}_x \mathbf{C}_y \mathbf{C}_z)^T = \mathbf{C}_z^T \mathbf{C}_y^T \mathbf{C}_x^T \quad (1.14)$$

$$\mathbf{C}_b^i = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & -\cos \phi \sin \psi + \sin \phi \sin \theta \cos \psi & \sin \phi \sin \psi + \cos \phi \sin \theta \cos \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \cos \phi \cos \psi + \sin \phi \sin \theta \sin \psi & -\sin \phi \cos \psi + \cos \phi \sin \theta \sin \psi \\ -\sin \theta & \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

Toto poté můžeme použít k rotaci samotného vektoru specific force  $\vec{f}$  z b-frame na i-frame

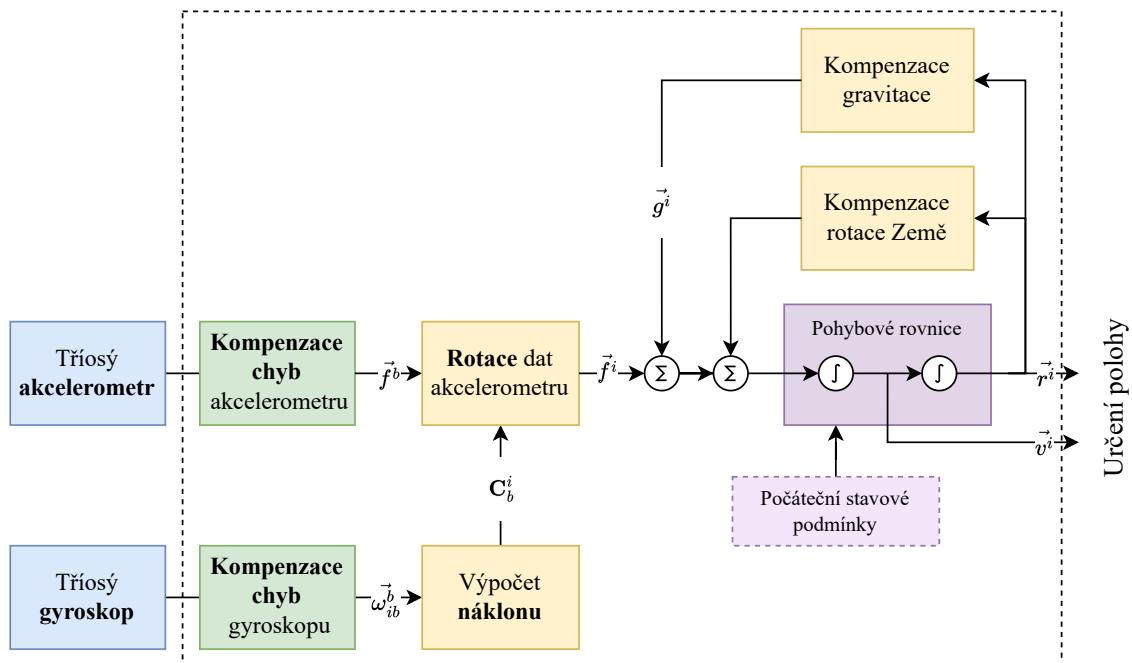
$$\vec{f}^i = \mathbf{C}_b^i \vec{f}^b \quad (1.16)$$

Kombinací s rovnicí 1.9 získáme rovnici popisující pohyb:

$$\vec{a}_i = \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \Big|_i = \vec{f}^i + \vec{g}^i = \mathbf{C}_b^i \vec{f}^b + \vec{g}^i \quad (1.17)$$

## 1.6 Diagram algoritmu inerciální navigace

Pro přehlednější znázornění algoritmu základní formy inerciální navigace pro 6 *Degrees of Freedom - stupně volnosti* (DoF) *Inertial Measurement Unit - inerciální měřicí jednotka* (IMU) byl vytvořen blokový diagram (obrázek 1.2).



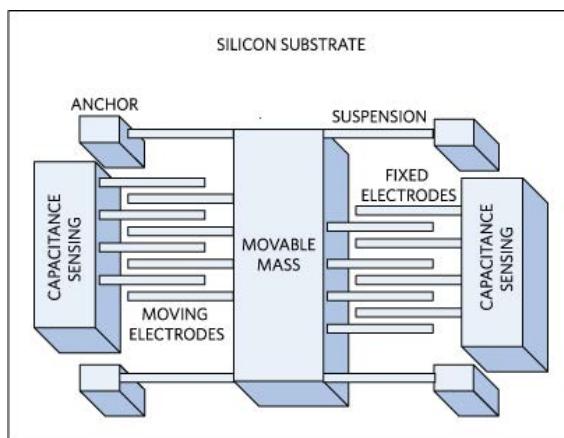
Obr. 1.2: Blokové schéma algoritmu strapdown inerciální navigace, převzato z [8] [9]

## 2 Inerciální senzory

Ke sběru dat pro účely inerciální navigace se jako první začaly používat a stále používají např. v letectví složité, velké a drahé mechanické přístroje se setrvačníky poháněnými motory využívající gyrokopický efekt. Jejich natočení os vůči referenčnímu rámu je poté možné měřit například laserem, či jiným způsobem. Tyto senzory jsou díky jejich přesnosti stále využívány v aplikacích, kde je kladen důraz na opravdu velkou spolehlivost a přesnost. Ovšem díky zlepšujícím se technologiím se začínají hojně využívat i MEMS IMU v oblastech inerciální navigace, zejména v oblastech, kde nejsou kladený velmi přísné požadavky na přesnost a spolehlivost, jako je například navigace uvnitř budov. Díky MEMS technologiím je možné sestrojit celou inerciální jednotku bez jakýchkoliv pohyblivých částí, velmi malou a poměrně levnou.

### 2.1 MEMS akcelerometry

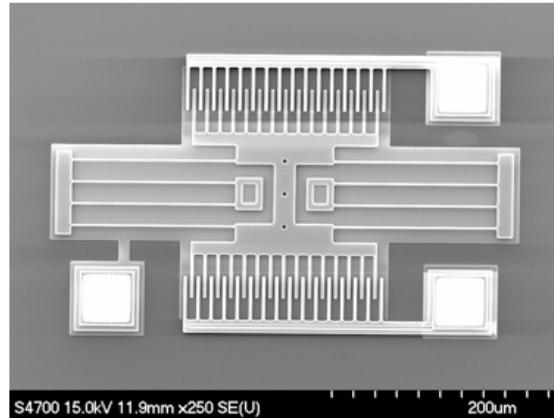
Akcelerometr měří lineární zrychlení nepřímo díky 2. Newtonovu zákonu (rovnice 1.1). Přímo na struktuře křemíku je tělesko známé hmotnosti, kterému je umožněno pružný pohyb v nějaké z os. Pokud na akcelerometr působí nějaké zrychlení, je tělesko vychylováno silou, která je následně měřena. Tato síla je často měřena jako kapacity mechanické struktury znázorněné na obrázku 2.1 a 2.2, převedena na napětí, zesílena a vyfiltrována a následně převedena *Analog to Digital Convertor - analogově-digitální převodník* (ADC) převodníkem. Tyto struktury jsou následně uspořádány ortogonálně, aby vytvořily tříosý akcelerometr. [2]



Obr. 2.1: Struktura MEMS akcelerometru [2]

Za povšimnutí stojí rozdílné parametry např. biasu pro různé osy IMU v tabulce 3.1, to může být způsobené vrstvením struktury během výroby čipu, kdy dvě z os

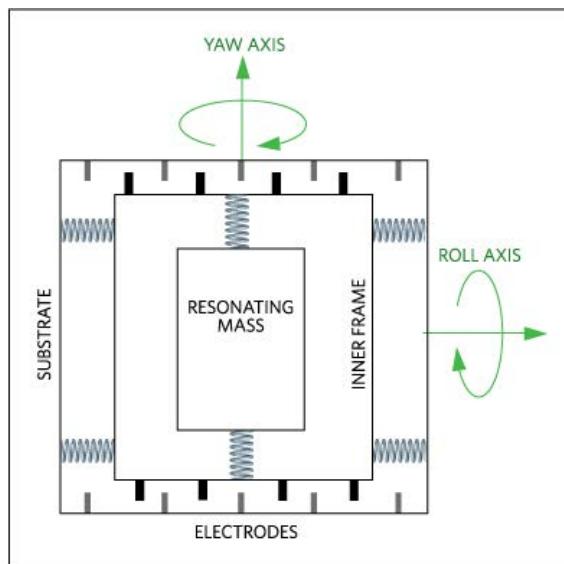
akcelerometru mají osy vychýlení hmoty rovnoběžnou se směry vrstev, zatímco třetí osa je na tyto vrstvy kolmá.



Obr. 2.2: Mikroskopický snímek MEMS akcelerometru [1]

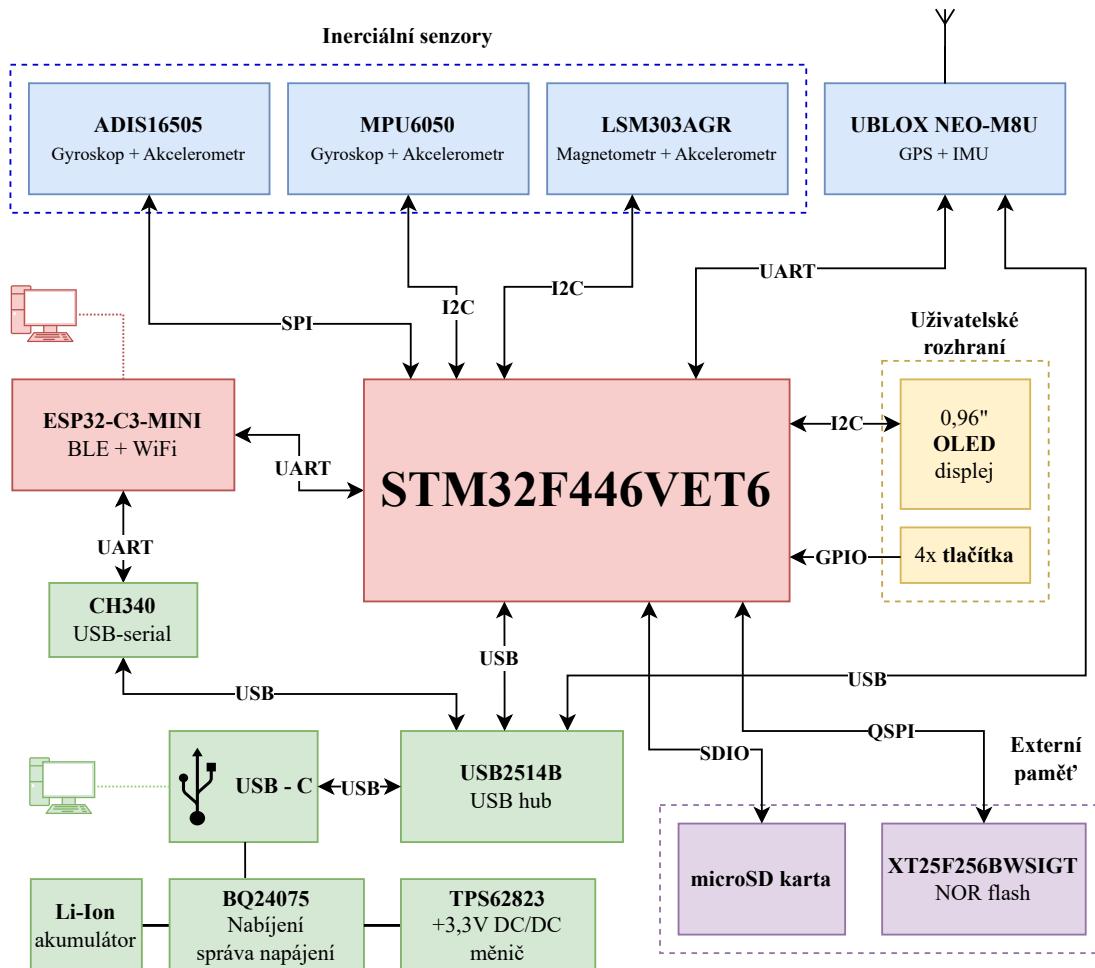
## 2.2 MEMS gyroskopy

Gyroskopy jsou senzory, které měří úhlovou rychlosť. Uspořádání mechanické struktury (na obrázku 2.3) je rozdílné v porovnání s akcelerometry. Zde je tělisku definované hmotnosti umožněno kmitat v jedné z os. Při působení úhlové rychlosti na gyroskop je vnitřní struktura díky Coriolisově síle vychýlena, což způsobí změnu kapacity. Ta je dále zpracována obdobně jako v akcelerometru (kapitola 2.1). [8] [2]



Obr. 2.3: Struktura MEMS gyroskopu [2]

### 3 Hardware inerciální jednotky



Obr. 3.1: Blokové schéma inerciální jednotky

Hardware inerciální jednotky je realizován tak, aby umožňoval zaznamenávat hodnoty změřené inerciálními senzory a poskytovat dohromady data o rozměru 9 DoF (akcelerometr, gyroskop a magnetometr). Jednotka také obsahuje GPS modul s vestavěným IMU, jehož použití by mohlo být vhodné například v prostorech s alespoň částečným pokrytím signálu GPS.

Naměřená data je možné uložit do externí NOR Flash paměti připojené k *Microcontroller Unit - mikrokontrolér* (MCU), popřípadě lze využít i kartu typu microSD. K přenosu dat pro jejich následné zpracování v PC primárně slouží ESP32-C3, umožňující bezdrátovou komunikaci přes Wifi, nebo Bluetooth. Konektor *Universal Serial Bus - univerzální sériová sběrnice* (USB) typu C umožňuje nabíjení vestavěného Li-Ion akumulátoru jednotky a komunikaci mezi PC a ESP32, GPS modulem a hlavním MCU skrze vestavěný USB rozbočovač. Toto rozhraní je plánované pro použití např. ke konfiguračním, nebo ladícím účelům.

Pro jednoduchou volnost pohybu je jednotka napájena jedním Li-Ion akumulátorem velikosti 18650, při záznamu dat tedy nebude potřeba externího zdroje energie. Grafický *Organic Light-Emitting Diode - organický LED* (OLED) displej a 4 tlačítka slouží jako uživatelské rozhraní při používání jednotky.

### 3.1 Akcelerometr a gyroskop

Jednotka obsahuje dvě 6 DoF IMU (gyroskop s akcelerometrem) rozdílných parametrů a řádově rozdílné ceny. Takto odlišné součástky byly vybrány proto, aby bylo možné porovnat vliv přesnosti, šumu, biasu a driftu senzorů na následně zpracovaná data. V tabulce 3.1 jsou porovnány důležité parametry senzorů MPU6050 a ADIS16505-2. Pro účely inerciální navigace je důležitý zejména nízký bias a drift senzorů, aby při integraci dat k vyhodnocení polohy nebyla integrována i driftová chyba, což má za výsledek velmi nepřesné zpracování hodnot. [22]

Integrovaný obvod MPU6050 je standardní 6 osé MEMS IMU, vhodné mimo jiné pro použití v mobilních zařízeních a dalších podobných aplikacích. Jeho vnitřní gyroskop a akcelerometr má softwarově přepínatelné rozsahy měřených veličin. Kromě inerciálních senzorů má i vestavěný signálový procesor pro fúzi a filtrování dat přímo v integrovaném obvodu. Tato funkce může být vhodná pro odlehčení výpočetního výkonu hlavního procesoru, ovšem pro účely této práce nebude signálový procesor využit, jelikož se měřená data budou zpracovávat až po jejich naměření v PC, ne v reálném čase. Vzorkovací frekvence gyroskopu je 8 kHz a akcelerometru 1 kHz, oba senzory mají 16bitové rozlišení. [18]

MPU6050 disponuje rozhraním *Inter-Integrated Circuit - mezi obvodová komunikace* (I2C) s maximální frekvencí hodinového signálu 400 kHz. [18] Pokud bychom chtěli vyčítat ze senzoru data při maximální možné vzorkovací frekvenci, byla by potřeba minimální přenosová rychlosť sběrnice:

$$f_{\text{clk}} = 3 \text{ osy} \times (f_{\text{gyro}} + f_{\text{acc}}) \times (16\text{bitů} + 2 \times \text{ACK}) = 3 \times (8000 + 1000) \times (16 + 2) = 486 \text{ kHz} \quad (3.1)$$

Při vyčítání dat o maximální vzorkovací frekvenci jsme omezeni samotným I2C rozhraním senzoru (využití maximální vzorkovací frekvence je teoreticky možné krát-kodobě, pomocí interního 1kB FIFO zásobníku).[18]

Jelikož pro účely inerciální navigace stačí vzorkovací frekvence dat v řádu stovek Hz [17], tak není tato limitace omezující. Senzor je propojen s hlavním MCU

---

<sup>1</sup>Pro porovnání citlivosti byl vybrán dynamický rozsah  $500^{\circ}/\text{s}$  senzoru MPU6050 pro možnost porovnání hodnoty s druhým senzorem

<sup>2</sup>Pro porovnání citlivosti byl vybrán dynamický rozsah  $78,4 \text{ m/s}^2$  senzoru MPU6050 pro možnost porovnání hodnoty s druhým senzorem

Model IMU	MPU6050	ADIS16505-2	jednotka
Parametry gyroskopů			
Dynamický rozsah	programovatelný, ±250, ±500, ±1000, ±2000	±500	°/s
Citlivost <sup>1</sup>	65, 5	2621440	LSB/(°/s)
Bias v ose x a z	±20	±0, 14	°/s
Bias v ose y	±20	±1, 4	°/s
Efektivní hodnota hustoty šumu při 10Hz pro osy x a y	0,005	0,0043	°/s/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Efektivní hodnota hustoty šumu při 10Hz pro osu z	0,005	0,0034	°/s/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Parametry akcelerometrů			
Dynamický rozsah	programovatelný, ±19, 6, ±39, 2, ±78, 4, ±156, 8	±78, 4	m/s <sup>2</sup>
Citlivost <sup>2</sup>	418	26756268	LSB/(m/s <sup>2</sup> )
Bias v ose x a y	±0, 491	±0, 0196	m/s <sup>2</sup>
Bias v ose z	±0, 785	±0, 0196	m/s <sup>2</sup>
Efektivní hodnota hustoty šumu při 10Hz pro osy x a y	3924	167	$\mu\text{m}/\text{s}^2/\sqrt{\text{Hz}}$
Efektivní hodnota hustoty šumu při 10Hz pro osu z	3924	243	$\mu\text{m}/\text{s}^2/\sqrt{\text{Hz}}$

Tab. 3.1: Porovnání základních parametrů gyroskopů [18] [19]

přes I2C sběrnici s frekvencí hodinového signálu 400 kHz a není sdílena s žádným jiným zařízením, aby bylo možné, v případě potřeby, využít maximální dostupný potenciál senzoru (i přestože je reálná potřeba vzorkovací frekvence nižší).

Integrovaný obvod ADIS16505-2 je precizní 6 osé MEMS IMU, vhodné pro použití v průmyslových a navigačních aplikacích s poměrně nízkým driftem a vysokou přesností. Na rozdíl od MPU6050 nemá přepínatelný dynamický rozsah, je fixně daný variantou součástky. Vzorkovací frekvence gyroskopu i akcelerometru je 2 kHz, oba senzory mají 32bitové rozlišení. S hlavním MCU komunikuje přes sběrnici *Serial Peripheral Interface - sériové periferní rozhraní (SPI)* s maximální frekvencí hodinového signálu 2,1 Mhz. [19] Pokud budeme chtít vyčítat data ze senzoru při maximální možné vzorkovací frekvenci, bude potřeba minimální přenosová rychlos

sběrnice:

$$f_{\text{clk}} = 3 \text{ osy} \times (f_{\text{gyro}} + f_{\text{acc}}) \times 32 \text{ bitů} = 3 \times (2000 + 2000) \times 32 = 384 \text{ kHz} \quad (3.2)$$

Nejsme tedy omezeni maximální frekvencí hodinového signálu a můžeme teoreticky využívat senzor i při nejvyšší možné rychlosti.

Výrobce prodává tento obvod ve variantě 100 pinového *Ball Grid Array - pouzdromatice kuliček* (BGA) čipu, ale i jako vývojovou desku osazenou senzorem a kolíkovou lištou pro jednodušší práci s osazením *Deska Plošných Spojů* (DPS). [19] Hardware jednotky byl navržen tak, aby bylo možné využít jak samotný BGA čip, tak i hotový modul s konektorem.

## 3.2 Magnetometr

Vzhledem k tomu, že výběr komerčně dostupných 9 DoF (akcelerometr, gyroskop a magnetometr) je značně omezený, popřípadě součástky prodávané jako 9osé IMU jsou ve skutečnosti moduly více součástek na jedné desce, tak je ve výsledném obvodovém zapojení použit senzor magnetické indukce jakožto samostatná součástka.

Přestože fúze dat z magnetometru může mít pozitivní dopady na zmenšení chyby trajektorie [16], jeho použití uvnitř budov je značně omezené vzhledem k jednoduché ovlivnitelnosti měření blízkými feromagnetickými látkami, silovými rozvody elektřiny a pod. Proto nebyly na výběr magnetometru kladený vysoké požadavky a slouží spíše pro porovnání vlivu přítomnosti / absence naměřených dat z tohoto senzoru.

K tomuto účelu byl vybrán běžně dostupný obvod LSM303AGR, který kromě magnetometru v pouzdře obsahuje i akcelerometr, ten ovšem nebude pro potřeby práce využit, jelikož tuto funkci obstarávají součástky z kapitoly 3.1.

Magnetometr komunikuje s hlavním MCU přes sběrnici I2C s maximální vzorkovací frekvencí 150 Hz, dynamickým rozsahem  $\pm 4,915$  mT a 16bitovým rozlišením. [20]

## 3.3 GNSS

Zajímavou a uživatelsky přívětivou kombinaci GNSS a inerciální navigace poskytuje například firma u-blox s řadou modulů podporující funkci „dead reckoning“. Jedná se o navigační moduly s vestavěným IMU, určené zejména do oblasti automotive. Jejich typický příklad použití, dle výrobce, je navigace aut, kdy při běžném provozu je zafixovaný signál z GNSS a při výpadku signálu (vjezd do garáže, tunelu apod.) je navigace modulem stále poskytována na základě dat z IMU. [15]

Navigační modul u-blox NEO-M8U byl vybrán a implementován do obvodového zapojení inerciální navigační jednotky. Výrobce udává, že modul zvládne odhadovat polohu po ztrátě signálu GNSS po dobu 60 s s typickou odchylkou 10 % trajektorie. Dále také modul při zapnutí odpovídající funkce umí využít interní IMU ke zvýšení maximální rychlosti aktualizace polohy až na 30 Hz. Jeho využití v rámci této práce může být různé, například pro navigaci v místech s alespoň částečným pokrytím signálu GNSS. [15]

NEO-M8U umí využívat všechny světové navigační systémy (uvedeny v tabulce 3.2) Tento modul komunikuje s hlavním MCU přes sběrnici *Universal Asynchronous*

GNSS systém	Pásma	Frekvence (MHz)
GPS	L1C/A	1575,42
GLONASS	L1OF	1602
BeiDou	B1	1561,098
Galileo	E1-B/C	1575,42

Tab. 3.2: Podporované družicové systémy [15]

*Receiver-Transmitter - univerzální asynchronní přijímač-vysílač* (UART), pomocí standardizovaných *National Marine Electronics Association - americká organizace námořní elektroniky* (NMEA) příkazů v textové podobě, nebo pomocí binárního protokolu *UBloX message - zpráva formátu UBLOX* (UBX), který je specifikován výrobcem. Použití protokolu NMEA je omezené pouze na standardní funkce GNSS modulů, pokud chceme využít speciálních funkcí, například inerciální navigace, je nutné použít proprietární protokol UBX. [15] NEO-M8U také disponuje USB portem, skrz který je možné modul ovládat a konfigurovat pomocí PC aplikace výrobce. Tento port je připojen na integrovaný USB rozbočovač a lze jej využít například pro vývojové účely.

## 3.4 Paměť

V případě, že bychom chtěli zaznamenávat data ze všech senzorů při jejich maximálních vzorkovacích frekvencích, nebude množství změrených dat zanedbatelné. V tabulce 3.3 je hrubý odhad potřebné rychlosti záznamu dat pro tento krajní případ. Pokud bude měření trvat např. 2 minuty, vygenerujeme dohromady 12 MB dat, což převyšuje velikost paměti většiny dostupných MCU.

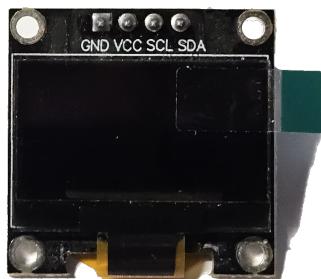
Z tohoto důvodu je v obvodovém zapojení inerciální jednotky implementována 32MB NOR Flash paměť, propojená s hlavním MCU přes sběrnici QUADSPI s maximální možnou hodinovou frekvencí 120 Mhz, měla by tedy být pro potřeby této aplikace dostačující. [14]

Senzor	Odhadovaný bitrate
ADIS16505-2	375 kbit/s
MPU-6050	422 kbit/s
LSM303AGR	7 kbit/s
NEO-M8U	1 kbit/s
Celkem	805 kbit/s (0,1MB/s)

Tab. 3.3: Odhad celkového bitratu pro záznam dat

Kromě výše popsané Flash paměti jednotka obsahuje i slot na microSD kartu, která by z uživatelského hlediska mohla být jednodušší k použití, ovšem při zápisu může latence SD karty být (krátkodobě) až stovky ms [13]. To by mohlo znemožnit její použití v případě, že by hlavní MCU měl nedostatek volné paměti RAM pro krátkodobé uchování dat, proto bude o její využití rozhodnuto až později.

### 3.5 Uživatelské rozhraní



Obr. 3.2: Fotografie grafického OLED displeje

Pro ovládání uživatelem disponuje jednotka grafickým OLED displejem s úhlopříčkou 0,96 palce a rozlišením  $128 \times 64$  pixelů, který je připojený přes sběrnici I2C. Společně s 4 tlačítky by měl poskytnout dostatečně univerzální a pohodlné uživatelské rozhraní.

### 3.6 Napájení

Inerciální jednotka je napájena z jednoho Li-Ion akumulátoru velikosti 18650. Nabíjení je realizováno obvodem BQ24075RGT, který monitoruje nabíjecí odebíraný proud jednotkou. Proud, kterým je nabíjen akumulátor je regulován tak, aby nepřekročil maximální hranici 900 mA z USB portu. [11]

Všechny součásti inerciální jednotky (až na *Real Time Clock - obvod reálného času* (RTC) a zálohovací registry hlavního MCU a GPS modulu) jsou napájeny skrz DC/DC měnič z výstupního vývodu tohoto nabíjecího obvodu. V případě, že je připojena jednotka do USB a nabíjí se, na výstupním pinu nabíjecího obvodu je napájecí napětí USB portu. Díky tomu nedochází k velkým ztrátám pokud je jednotka zapnuta a nabíjí se zároveň. Jestliže je USB odpojeno, skrz interní tranzistor je jednotka napájena z akumulátoru. [11]

Nabíjecí obvod také umožňuje kompletní odpojení napájení jednotky přes jeden z vývodů. Toho je využito pro ochranu akumulátoru proti podvybití pomocí zapojení S/R klopného obvodu na napájení USB a jednoho z výstupů procesoru. Napětí akumulátoru je měřeno pomocí ADC mikrokontroléru. Jestliže klesne pod definovanou úroveň, pomocí pulzu bude celý obvod odpojen od napájení až do té doby, dokud uživatel znova nepřipojí jednotku do USB portu.

Součástka	Odhadovaný proud (mA)
STM32F446	50
ESP32	150
USB2514	135
ADIS16505	50
NEO-M8U	30
OLED displej	10
microSD karta	50
Celkem	475

Tab. 3.4: Odhad spotřeby proudu 3,3V větve

Vzhledem k většímu počtu součástek není odebírány proud z 3,3V napájecí větve malý (zhruba 0,5 A, viz. tabulka 3.4). Budeme-li uvažovat rozsah výstupního napětí nabíjecího obvodu 3,5 V (vybitý akumulátor) až 5 V (zařízení připojené do USB) zjistíme, že pro napájení 3,3V větve není vhodný lineární regulátor, zejména kvůli vysokému ztrátovému výkonu. Ten je v krajním případě:

$$P_{\text{ztrátový}} = (U_{\text{USB}} - U_{\text{IO}}) \times I_{\text{IO}} = (5 - 3,3) \times 0,5 = 0,85 \text{ W} \quad (3.3)$$

Proto byl na napájení hlavní 3,3V větve vybrán spínaný regulátor TPS62823. Jedná se o buck (snižující) měnič s integrovaným výkonovým tranzistorem pracujícím na frekvenci 2,2 MHz. Díky vyšší spínací frekvenci je možné využít menší komponenty, zejména cívku a filtrační kondenzátory na výstup, ovšem je potřeba

dodržet doporučovaná pravidla při návrhu desky pro omezení rušení a velkých prourových smyček. Rozsah napájecího napětí čipu je 2,4 až 5 V, maximální výstupní proud 3 A. [10]

Minimální napětí, na které můžeme nechat akumulátor vybit je dáno odpory přechodů D-S vnitřních tranzistorů nabíjecího obvodu, DC/DC měniče a stejnosměrným odporem cívky. V tomto případě bude regulátor pracovat v módu s minimální střídou. [10] Toto napětí je:

$$\begin{aligned} U_{\text{batMin}} &= U_{\text{out}} + I_{\text{out}} \times (R_{\text{DS(charge)}} + R_{\text{DS(conv)}} + R_{\text{DC(L)}}) = \\ &= 3,3 + 0,5 \times (0,05 + 0,026 + 0,014) = 3,345 \text{ V} \end{aligned} \quad (3.4)$$

### 3.7 Hlavní procesor

Požadavky na výběr hlavního procesoru byly z velké části dané počtem a druhem potřebných periferií, které jsou popsány v tabulce 3.5. Dále byly z podskupiny procesorů disponujících všemi periferiemi z tabulky 3.5 vybrány takové, které mají velikost vnitřní FLASH paměti alespoň 512 kB, abychom nebyli při vývoji Firmwaru jednotky omezeni velikostí programu. Pouzdra procesorů byla vybrána taková, aby se s nimi dalo jednoduše pracovat, z toho důvodu byla vyloučena pouzdra typu BGA. V neposlední řadě byla zvážena i dostupnost vybíraných procesorů u nejobvyklejších distributorů elektronických součástek, aby bylo možné v případě potřeby výrobu jednotky opakovat.

Druh periferie	Minimální požadovaný počet	Použití periferie
I2C	3	OLED displej, LSM303AGR, MPU6050, USB2514B
SPI	1	ADIS16505
UART	2	NEO-M8U, ESP32
QUADSPI	1	NOR FLASH paměť
SDIO	1	microSD karta
ADC	1	měření napětí akumulátoru

Tab. 3.5: Minimální požadavky na periferie mikroprocesoru

Na základě těchto požadavků byl vybrán mikrokontrolér *STM32F446VET6*. Jedná se 32bitový Arm Cortex-M4 procesor z portfolia „high performance“ mikrokontrolérů výrobce STMicroelectronics. Splňuje všechny výše zmíněné minimální požadavky, v obvodovém zapojení byla použita i USB periferie procesoru, která může mít různá využití. Procesor obsahuje 512 kB paměti Flash a 128 kB paměti RAM, maximální hodinová frekvence je 180 MHz a disponuje matematickým koprocesorem pro operace s plovoucí desetinou čárkou. Vzhledem k počtu *General Purpose Input/Output*

- *univerzální vstupní/výstupní pin* (GPIO) v zapojení inerciální jednotky byla vybrána varianta procesoru v pouzdře LQFP100. [21]

## 3.8 ESP32

Pro splnění požadavků zadání práce je potřeba, aby mohla inerciální jednotka komunikovat bezdrátově s PC zpracovávajícím data. Pro tento úkol byl vybrán bezdrátový modul ESP32-C3-Mini. Jedná se o jeden z novějších produktů portfolia bezdrátových modulů firmy Espressif. Podporuje standard WiFi 802.11 b/g/n a Bluetooth LE 5. [12]

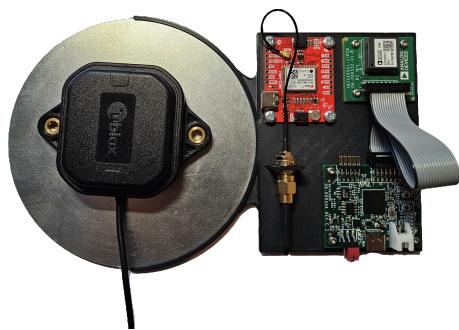
Tento modul je v obvodovém zapojení použit čistě jako bezdrátové rozhraní, neobsahuje žádné další GPIO kromě 2 UART sběrnic. První sběrnice UART je připojena pomocí USB-serial převodníku CH340 na USB rozbočovač v inerciální jednotce. Toto rozhraní slouží pro nahrávání, popřípadě aktualizaci vestavěného AT firmwaru výrobce. V případě, že by poskytovaný firmware výrobce nedostačoval, nebo nebyl vhodný pro potřeby naší aplikace, bude možné pomocí tohoto rozhraní nahrát vlastní obslužný firmware pro ESP32.

Druhá sběrnice UART je připojena k hlavnímu MCU inerciální jednotky. Kromě standardních pinů Rx a Tx jsou propojeny i piny pro řízení toku, které by bylo možné použít na zjednodušení časování komunikace.

## 3.9 Testování s vývojovými stavebnicemi

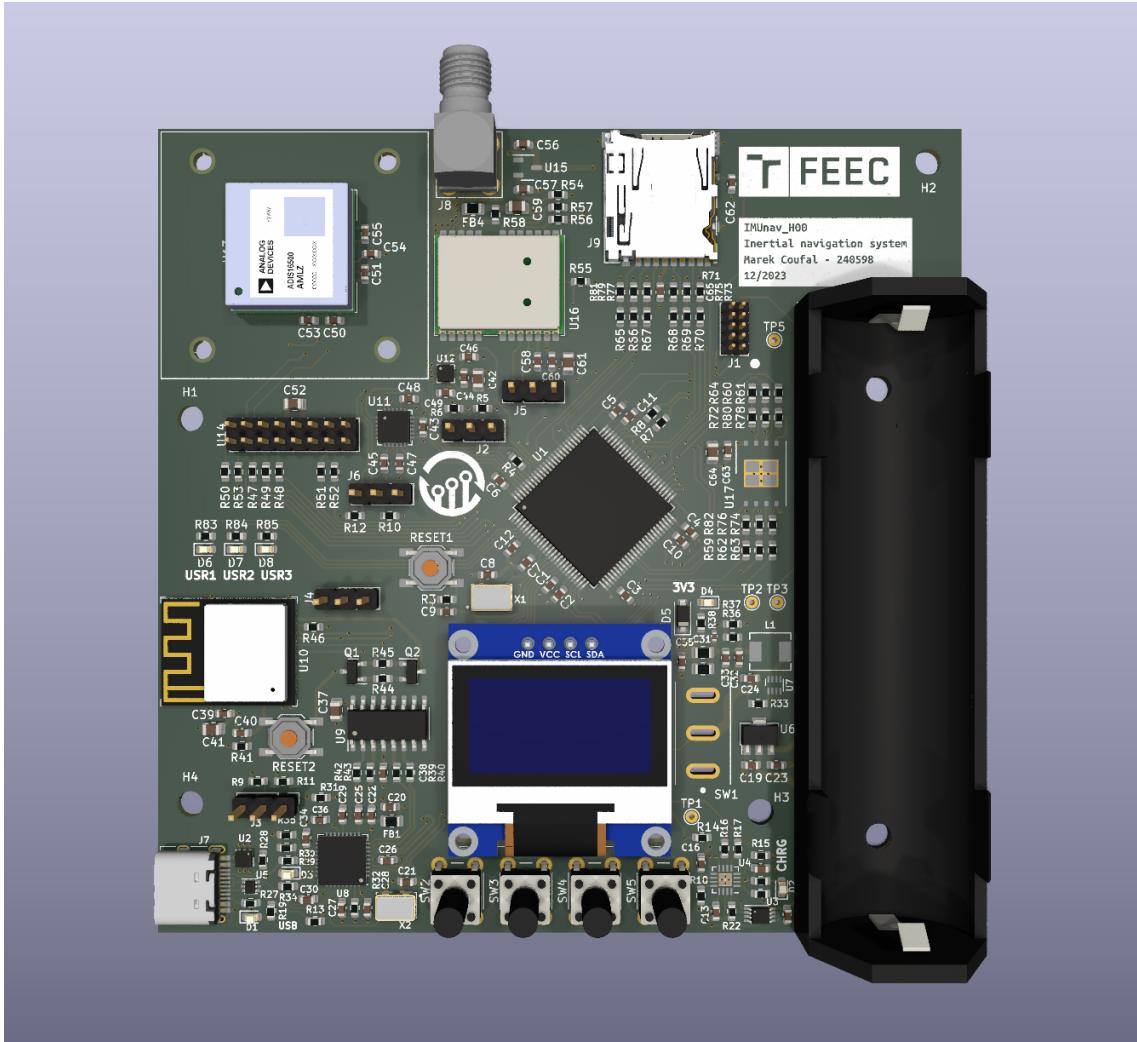
Pro účely vyzkoušení fúze dat z GNSS modulu a inerciálních senzorů byl navržen 3D tištěný držák (na obrázku 3.3) pro upevnění vývojových stavebnic osazených NEO-M8U a ADIS16505 s potřebnými periferními obvody na připojení k PC přes USB. Pomocí skriptů v Pythonu je možné ukládat data z obou senzorů do csv souborů a ty následně spojit.

Vzhledem k asynchronnosti USB komunikace bylo složité udržet definované vzorkovací kmitočty, popřípadě vzorkovat data z GNSS a IMU zároveň. Z tohoto důvodu byly desky použity na základní otestování a rozsáhlejší zpracování dat bude provedeno až s vlastní deskou hardwaru popsáném v kapitole 4.



Obr. 3.3: Testovací přípravek s vývojovými deskami

## 4 Realizace hardwaru



Obr. 4.1: 3D model navržené DPS

Schéma i DPS byla navržena v programu KiCad. V příloze A je schéma inerciální jednotky rozdělené do několika logických bloků. Příloha B.1 obsahuje pohled na osazení součástek vrchní vrstvy a přílohy B.2 až B.5 obsahují nákres jednotlivých vrstev mědi. Na obrázku 4.1 je vygenerovaný 3D model DPS.

Inerciální jednotka je realizována jako 4vrstvá deska plošných spojů o velikosti  $100 \times 100$  mm s uspořádáním vrstev popsaném v tabulce 4.1.

Typ a tloušťky substrátu DPS byly vybrány v konfiguraci JLC04161H-7628, jejich mechanické uspořádání a dielektrické vlastnosti jsou popsané v tabulce 4.2. Pomocí kalkulačky výrobce byly vypočteny potřebné hodnoty požadovaných šířek a mezer spojů mikropáskového vedení pro impedanci  $50\Omega$  a  $90\Omega$ . Hodnoty pro vedení o impedanci  $50\Omega$  byly použity při návrhu cest mezi GPS modulem a Sub-

Vrstva mědi	Využití
Horní	Vysokorychlostní signály
1. vnitřní	Společná zem
2. vnitřní	Napájení
Dolní	Signály

Tab. 4.1: Signálové uspořádání vrstev na DPS

*Miniatuure version A - subminiaturení verze A* (SMA) anténou. Šírka a vzdálenost diferenciálního páru o impedanci  $90\Omega$  byla použita při návrhu USB části zapojení.

Typ materiálu	Tloušťka (mm)	Relativní permitivita $\epsilon_r(-)$
Vrchní vrstva mědi	0,0350	1
Prepreg 7628	0,2104	4,4
1. vnitřní vrstva mědi	0,0152	1
Jádro	1,065	4,6
2. vnitřní vrstva mědi	0,0152	1
Prepreg 7628	0,2104	4,4
Spodní vrstva mědi	0,0350	1

Tab. 4.2: Uspořádání měděných a izolačních vrstev DPS JLC04161H-7628

Většina pouzder pasivních součástek byla vybrána o velikosti 0603, což by mělo poskytovat dostatečný kompromis mezi velikostí výsledné desky a možností ruční výměny součástky pro případné opravy na prvním prototypu. Prototypová deska je také opatřena měřícími body na napájecích větvích a konektorovými hřebínky na digitálních komunikacích pro možnost připojení osciloskopu, nebo logického analyzátoru na odposlouchávání komunikace mezi MCU a jednotlivými senzory.

# Závěr

V rámci semestrální práce jsme popsali kinematiku pohybu a nakládání s veličinami změrenými IMU pro potřeby výpočtu polohy. Také jsme definovali několik vztažných soustav a postupy pro převod mezi nimi. Je rozebráno těhové pole Země, gravitační modely a jejich význam v inerciální navigaci.

Byl popsán funkční princip IMU a společně s GNSS modulem s možností inerciální navigace byly vyzkoušeny a otestovány pomocí běžně dostupných vývojových stavebnic.

Práce se také věnuje návrhu obvodového zapojení inerciální jednotky, definováním minimálních požadavků na hlavní MCU tak, abychom nebyli v budoucnu omezeni některým z rozhodnutí při návrhu hardwaru. Inerciální jednotka byla osazena i jinými senzory než gyroskopy a akcelerometry pro možnou senzorickou fúzi v bakalářské práci.

V neposlední řadě se také věnujeme návrhu samotné DPS v programu KiCad, jejíž výkresy a schéma jsou v příloze. Deska je v čase psaní této práce buď vyráběna, nebo již čeká na doručení.

# Literatura

- [1] MNX. *What is Mems Technology?* Online. MEMS and Nanotechnology Exchange. Dostupné z: <https://www.mems-exchange.org/MEMS/what-is.html>. [cit. 2023-12-27].
- [2] DADAFSHAR, Majid. *APPLICATION NOTE 5830: ACCELEROMETER AND GYROSCOPES SENSORS: OPERATION, SENSING, AND APPLICATIONS.* Online aplikační poznámka. 1. 2014. Dostupné z: <https://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN5830.pdf>. [cit. 2023-12-27].
- [3] BEZDĚK, Aleš a SEBERA, Josef. Matlab script for 3D visualizing geodata on a rotating globe. Online. *Computers and Geosciences*. 2013, roč. 56, s. 127-130. ISSN 00983004. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.03.007>. [cit. 2023-12-26].
- [4] PAVLIS, Nikolaos K.; HOLMES, Simon A.; KENYON, Steve C. a FACTOR, John K. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). Online. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2012, roč. 117, č. B4, s. 1-38. ISSN 0148-0227. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2011JB008916>. [cit. 2023-12-26].
- [5] HALLIDAY, David; RESNICK, Robert a WALKER, Jearl. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Překlady vysokoškolských učebnic. Brno: VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1869-9.
- [6] PEKÁREK, David. *Přesné meření vlastní trajektorie vozidla*. Online, Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2020. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/90221>. [cit. 2023-12-25].
- [7] POLÁK, Luboš. *Navigační jednotka s modifikovanou soustavou akcelerometrů*. Online, Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2018. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/74430>. [cit. 2023-12-25].
- [8] TITTERTON, D. H. a WESTON, J. L. *Strapdown inertial navigation technology*. Second edition. Progress in astronautics and aeronautics, 207. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, c2004. ISBN 1-56347-693-2.

- [9] GREWAL, Mohinder S.; ANDREWS, Angus P. a BARTONE, Chris. *Global navigation satellite systems, inertial navigation, and integration*. Third edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley, 2013. ISBN 978-1-118-44700-0.
- [10] TEXAS INSTRUMENTS. *TPS6282x: 5.5-V, 1-A, 2-A, 3-A Step-Down Converter Family with 1% Accuracy*. Online katalogový list. C. 2019. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/gpn/tps62823>. [cit. 2023-12-21].
- [11] TEXAS INSTRUMENTS. *BQ2407x: Standalone 1-Cell 1.5-A Linear Battery Chargers with Power Path*. Online katalogový list. N. 2021. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/gpn/bq24075>. [cit. 2023-12-21].
- [12] ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32C3MINI1: Smallsized 2.4 GHz WiFi (802.11 b/g/n) and Bluetooth® 5 module*. Online katalogový list. 2022. Dostupné z: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3-mini-1\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3-mini-1_datasheet_en.pdf). [cit. 2023-12-21].
- [13] KRÄWINDEL, R.W. *The effect of writing and transmitting SD card data on the consistency of SD card write performance*. Online, bakalářská. Enschede, Holandsko: University of Twente, 2020. Dostupné z: [http://essay.utwente.nl/82256/1/Krawinkel\\_BA\\_EEMCS.pdf](http://essay.utwente.nl/82256/1/Krawinkel_BA_EEMCS.pdf). [cit. 2023-12-17].
- [14] XTX TECHNOLOGY LIMITED. *XT25F256BWSIGT: Quad IO Serial NOR Flash Datasheet*. Online katalogový list. 2020. Dostupné z: <http://www.txtxtech.com/download/?AId=287>. [cit. 2023-12-17].
- [15] U-BLOX. *NEO-M8U: u-blox M8 untethered dead reckoning module including 3D inertial sensors*. Online katalogový list. R13. 2022. Dostupné z: [https://content.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8U\\_DataSheet\\_UBX-15015679.pdf](https://content.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8U_DataSheet_UBX-15015679.pdf). [cit. 2023-12-17].
- [16] TKHORENKO, M. Yu.; PAVLOV, B. V.; KARSHAKOV, E. V. a VOLKOVITSKY, A. K. On integration of a strapdown inertial navigation system with modern magnetic sensors. Online. In: *2018 25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*. IEEE, 2018, s. 1-4. ISBN 978-5-91995-057-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.23919/ICINS.2018.8405845>. [cit. 2023-12-17].
- [17] WEI, Y. a LI, Y. IMPACT OF SENSOR DATA SAMPLING RATE IN GNSS/INS INTEGRATED NAVIGATION WITH VARIOUS SENSOR

- GRADES. Online. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2022, roč. XLVI-3/W1-2022, s. 205-211. ISSN 2194-9034. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-3-W1-2022-205-2022>. [cit. 2023-12-16].
- [18] TDK INVENSENSE. *MPU6050: Product specification*. Online katalogový list. 3.4. 2013. Dostupné z: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>. [cit. 2023-12-12].
- [19] ANALOG DEVICES. *ADIS16505: Precision, Miniature MEMS IMU*. Online katalogový list. C. 2020. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adis16505.pdf>. [cit. 2023-12-12].
- [20] ST MICROELECTRONICS. *LSM303AGR: Ultracompact high-performance eCompass module*. Online katalogový list. 11. 2022. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lsm303agr.pdf>. [cit. 2023-12-12].
- [21] ST MICROELECTRONICS. *STM32F446xC/E: Arm® Cortex®-M4 32-bit MCU+FPU, 225 DMIPS, up to 512 KB Flash/128+4 KB RAM, USB OTG HS/FS, seventeen TIMs, three ADCs and twenty communication interfaces*. Online katalogový list. 10. 2021. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f446ve.pdf>. [cit. 2023-12-14].
- [22] BLOCHER, Lukas; MAYER, Wolfram; ARENA, Marco; RADOVIC, Dusan; HILLER, Tobias et al. Purely Inertial Navigation with a Low-Cost MEMS Sensor Array. Online. In: *2021 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*. IEEE, 2021, s. 1-4. ISBN 978-1-7281-5099-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/INERTIAL51137.2021.9430468>. [cit. 2023-12-09].

# Seznam symbolů a zkratek

<b>ADC</b>	Analog to Digital Convertor - analogově-digitální převodník
<b>BGA</b>	Ball Grid Array - pouzdro matice kuliček
<b>DoF</b>	Degrees of Freedom - stupně volnosti
<b>DPS</b>	Deska Plošných Spojů
<b>EGM</b>	Earth Gravitational Model - gravitační model Země
<b>FIFO</b>	First In First Out - první dovnitř, první ven
<b>GNSS</b>	Global navigation satellite system - globální družicový polohový systém
<b>GPIO</b>	General Purpose Input/Output - univerzální vstupní/výstupní pin
<b>GPS</b>	Global Positioning System - globální polohový systém
<b>I2C</b>	Inter-Integrated Circuit - mezi obvodová komunikace
<b>IMU</b>	Inertial Measurement Unit - měřící inerciální jednotka
<b>IMU</b>	Inertial Measurement Unit - inerciální měřící jednotka
<b>MCU</b>	Microcontroller Unit - mikrokontrolér
<b>MEMS</b>	Micro-ElectroMechanical Systems - mikro-elektromechanické systémy
<b>NED</b>	North East Down - sever východ dolů
<b>NGA</b>	National Geospatial-Intelligence Agency - americká geoprostorová agentura
<b>NMEA</b>	National Marine Electronics Association - americká organizace námořní elektroniky
<b>OLED</b>	Organic Light-Emitting Diode - organický LED
<b>RAM</b>	Random Access Memory - paměť pro náhodný přístup
<b>RTC</b>	Real Time Clock - obvod reálného času
<b>SMA</b>	SubMiniature version A - subminiaturní verze A
<b>SPI</b>	Serial Peripheral Interface - sériové periferní rozhraní

**UART** Universal Asynchronous Receiver-Transmitter - univerzální asynchronní přijímač-vysílač

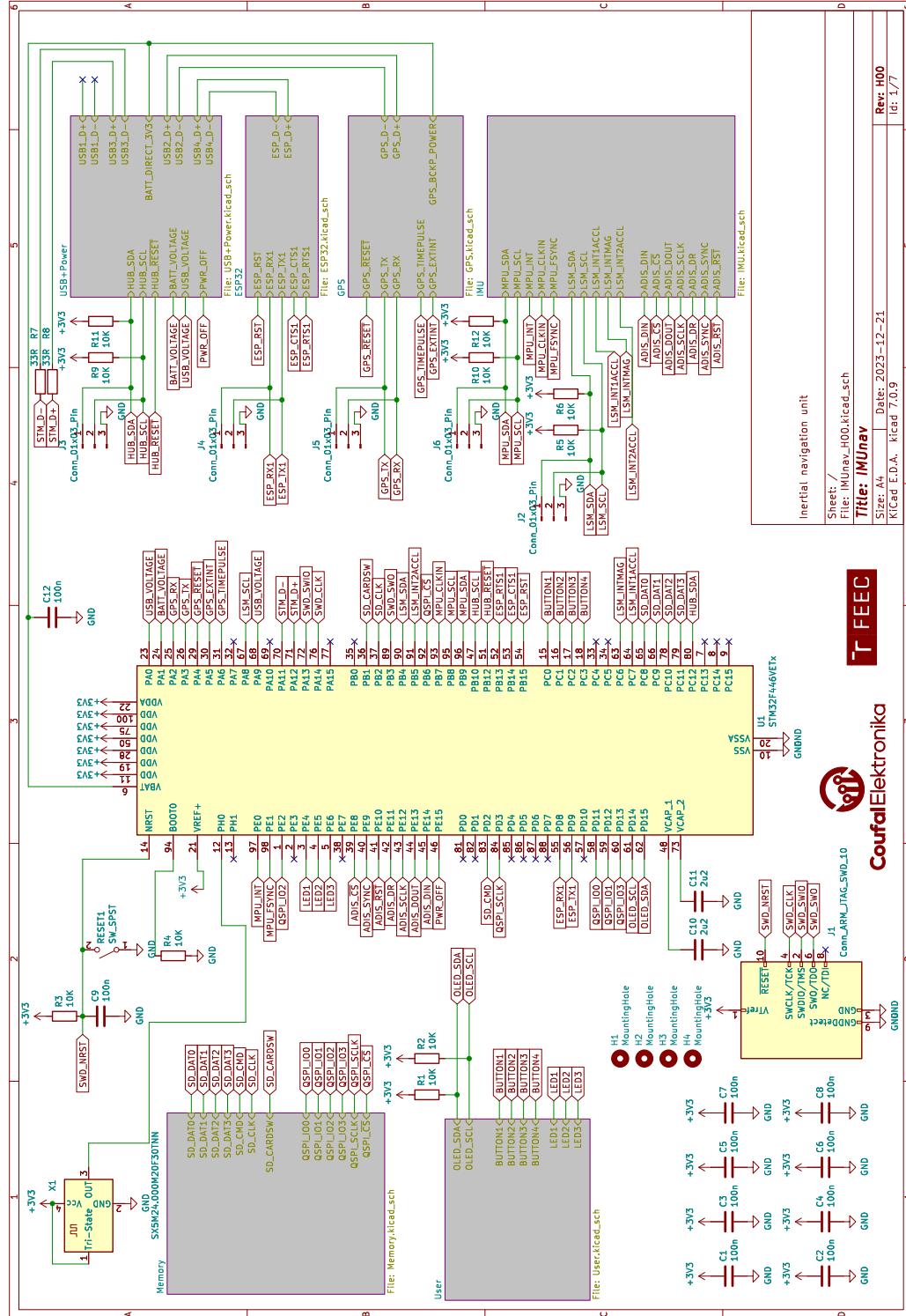
**UBX** UBLoX message - zpráva formátu UBLOX

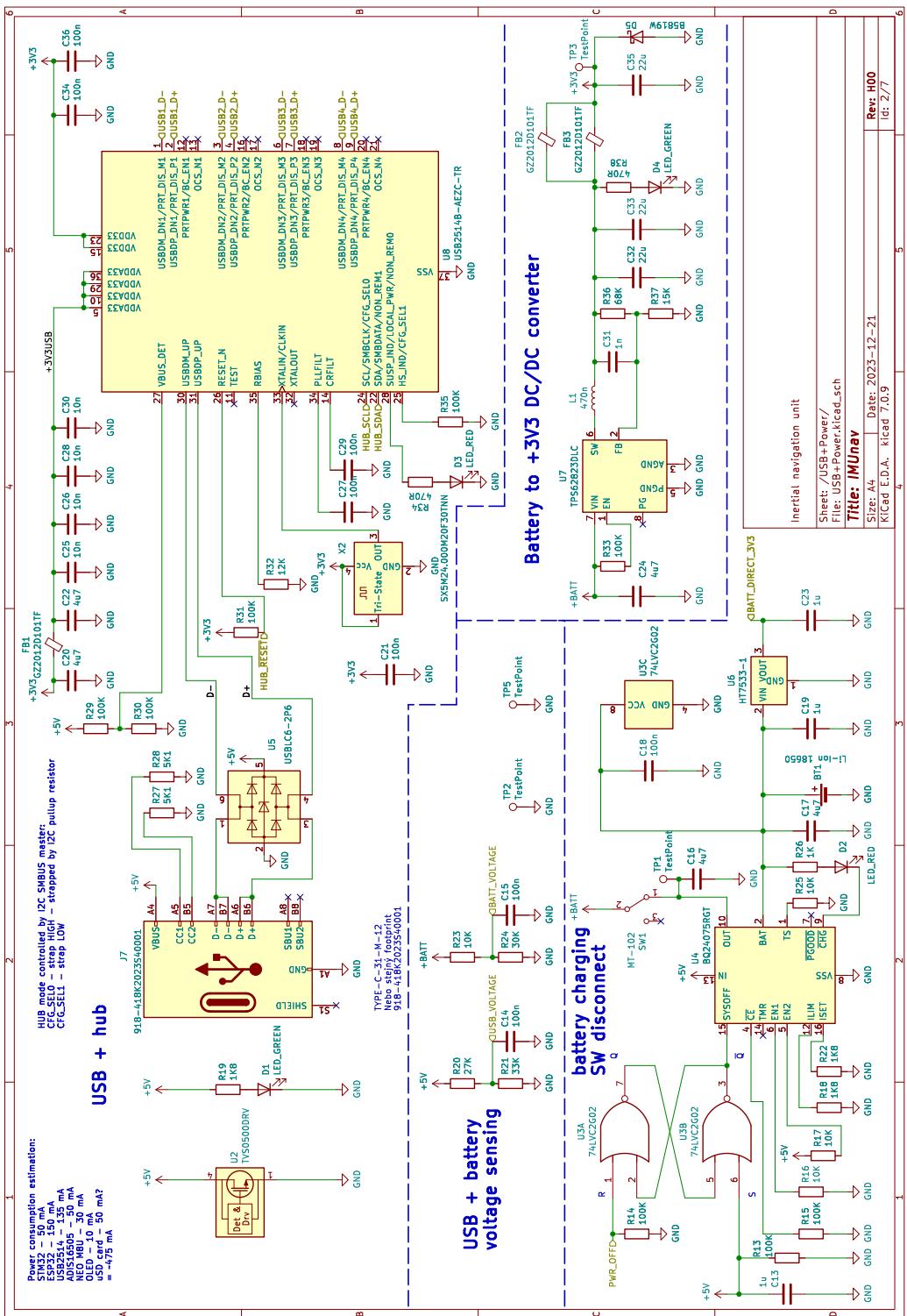
**USB** Universal Serial Bus - univerzální sériová sběrnice

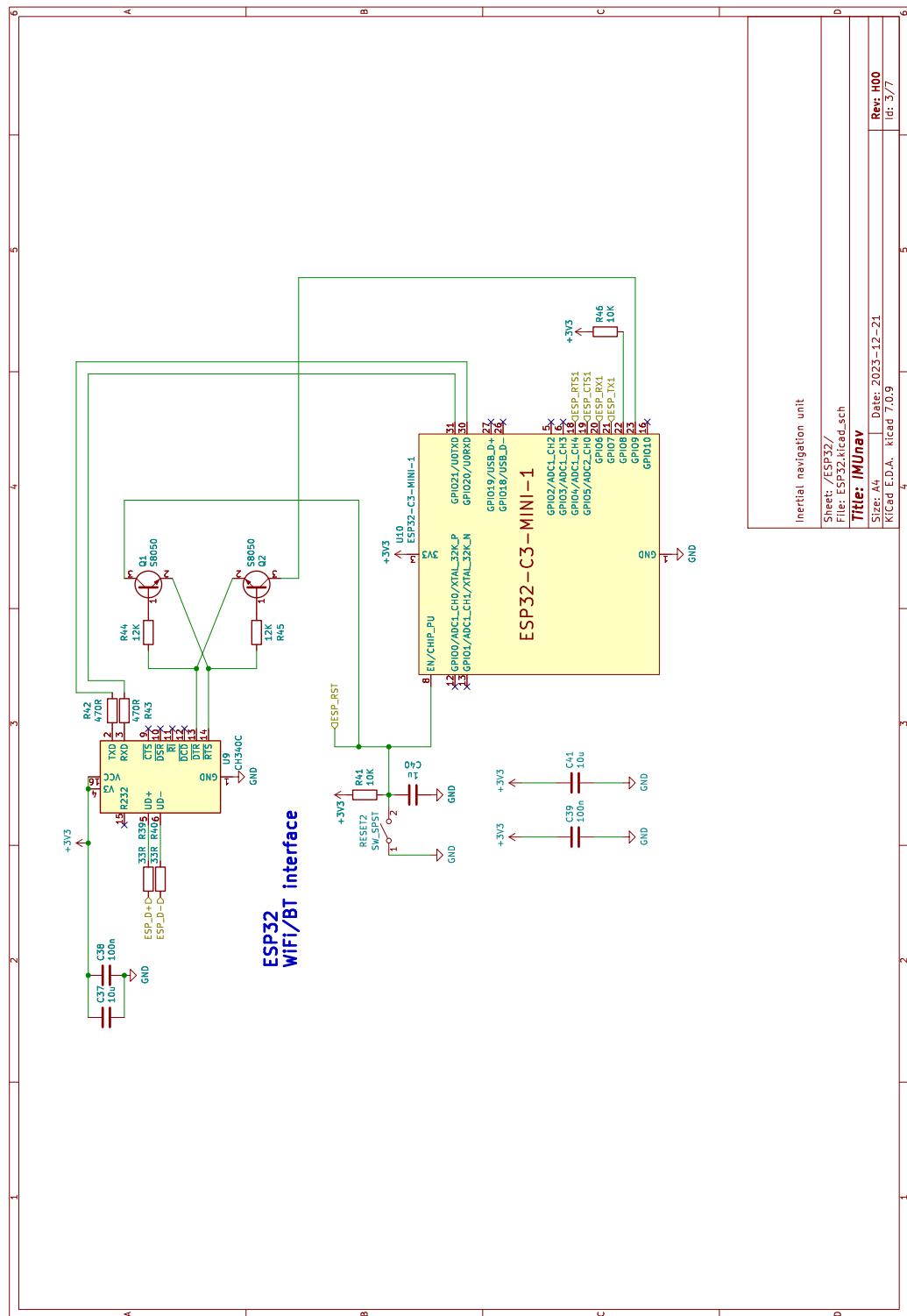
# **Seznam příloh**

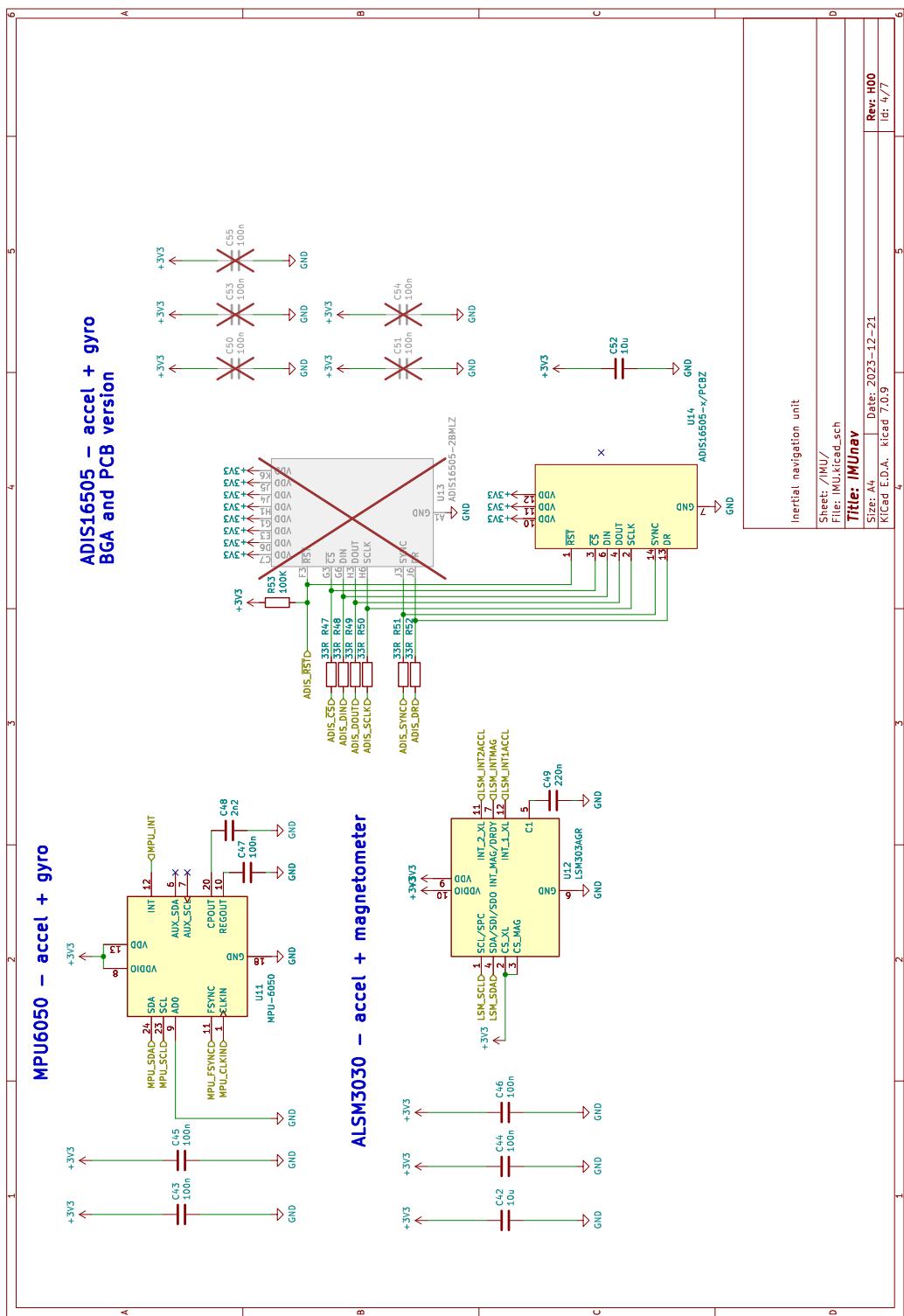
<b>A Schéma zapojení inerciální jednotky</b>	<b>39</b>
<b>B Výkres DPS</b>	<b>46</b>
B.1 Pohled osazení součástek . . . . .	46
B.2 Vrchní vrstva mědi DPS . . . . .	47
B.3 Vnitřní vrstva mědi DPS In1 . . . . .	48
B.4 Vnitřní vrstva mědi DPS In2 . . . . .	49
B.5 Spodní vrstva mědi DPS . . . . .	50

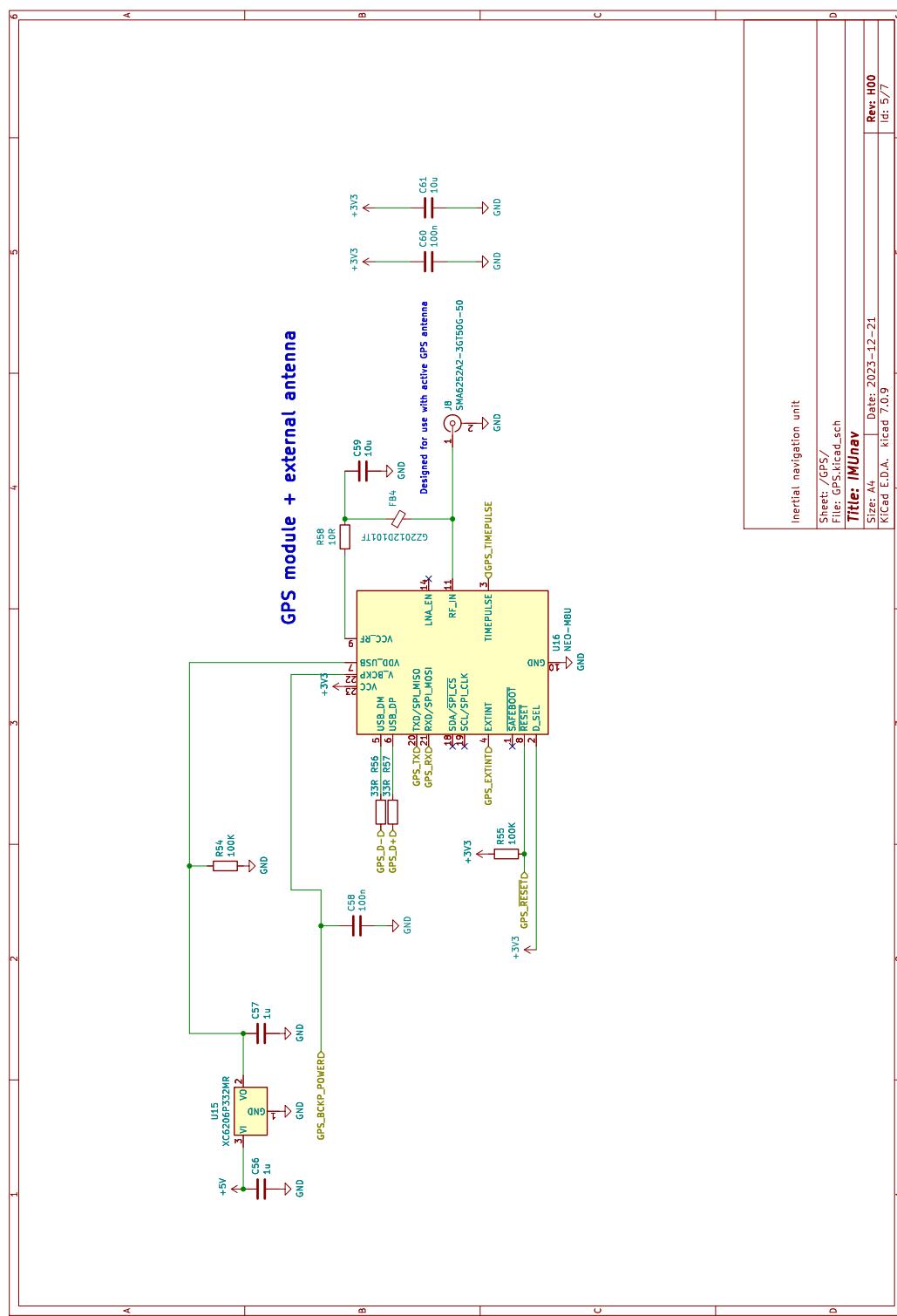
## A Schéma zapojení inerciální jednotky

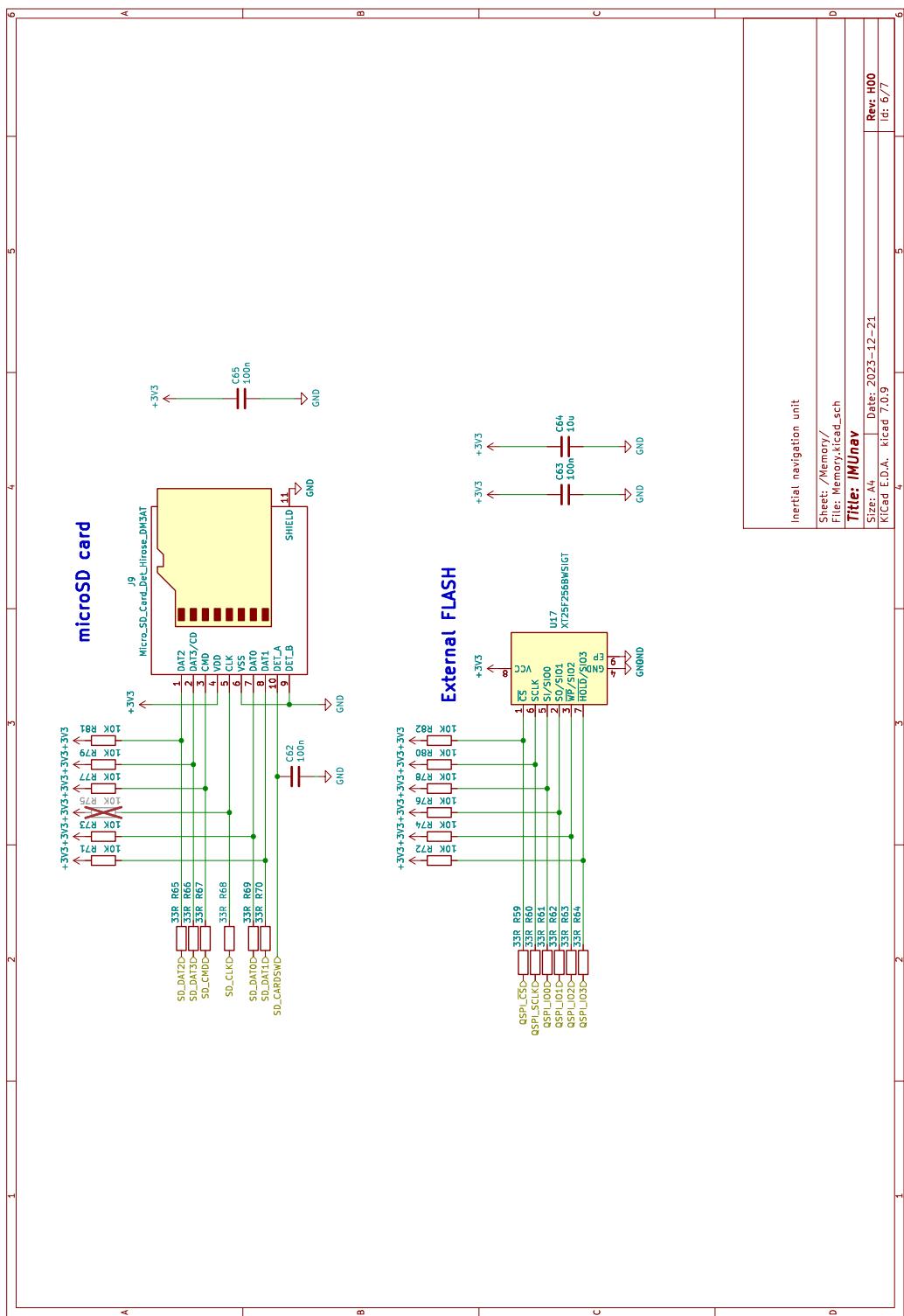


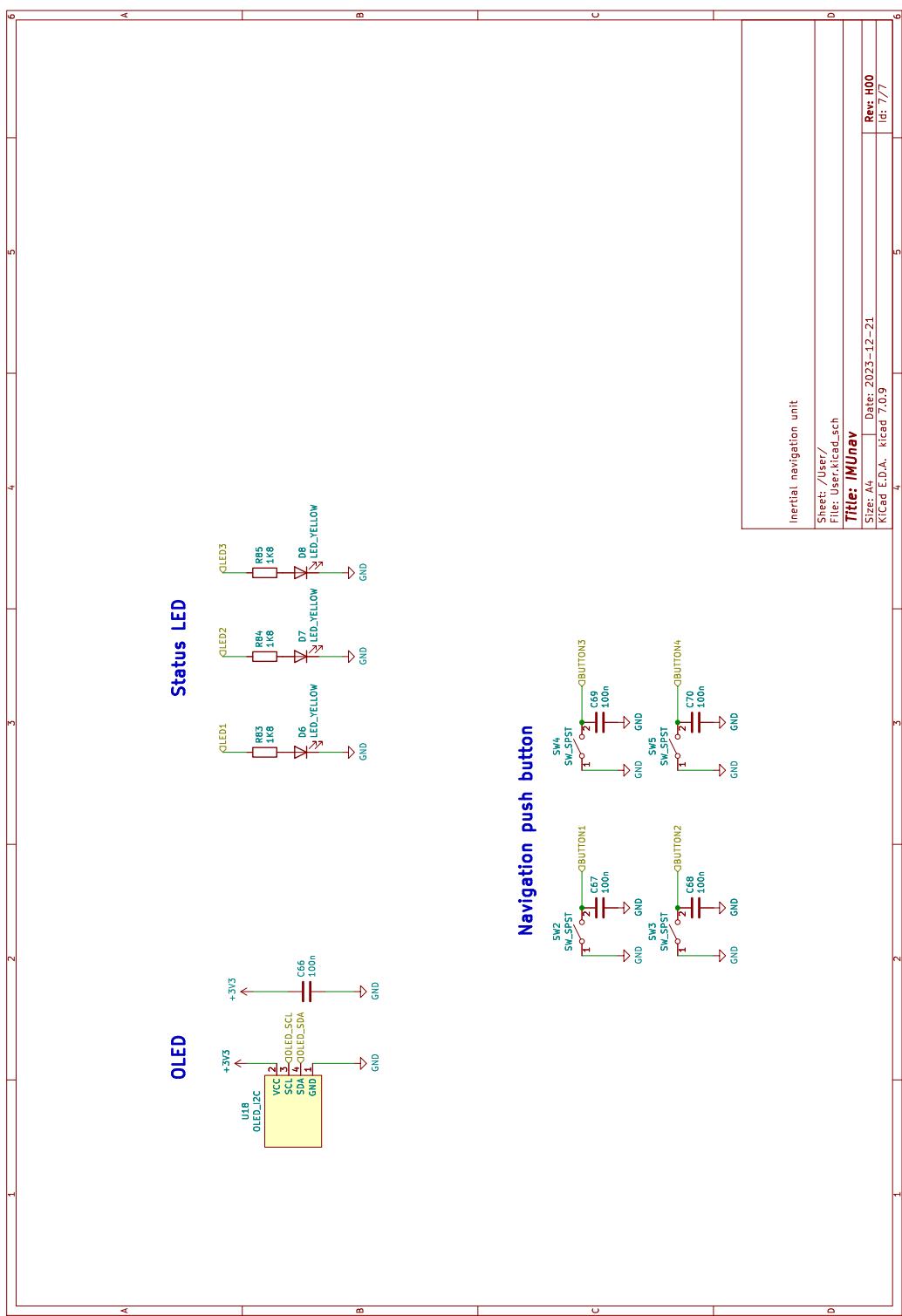






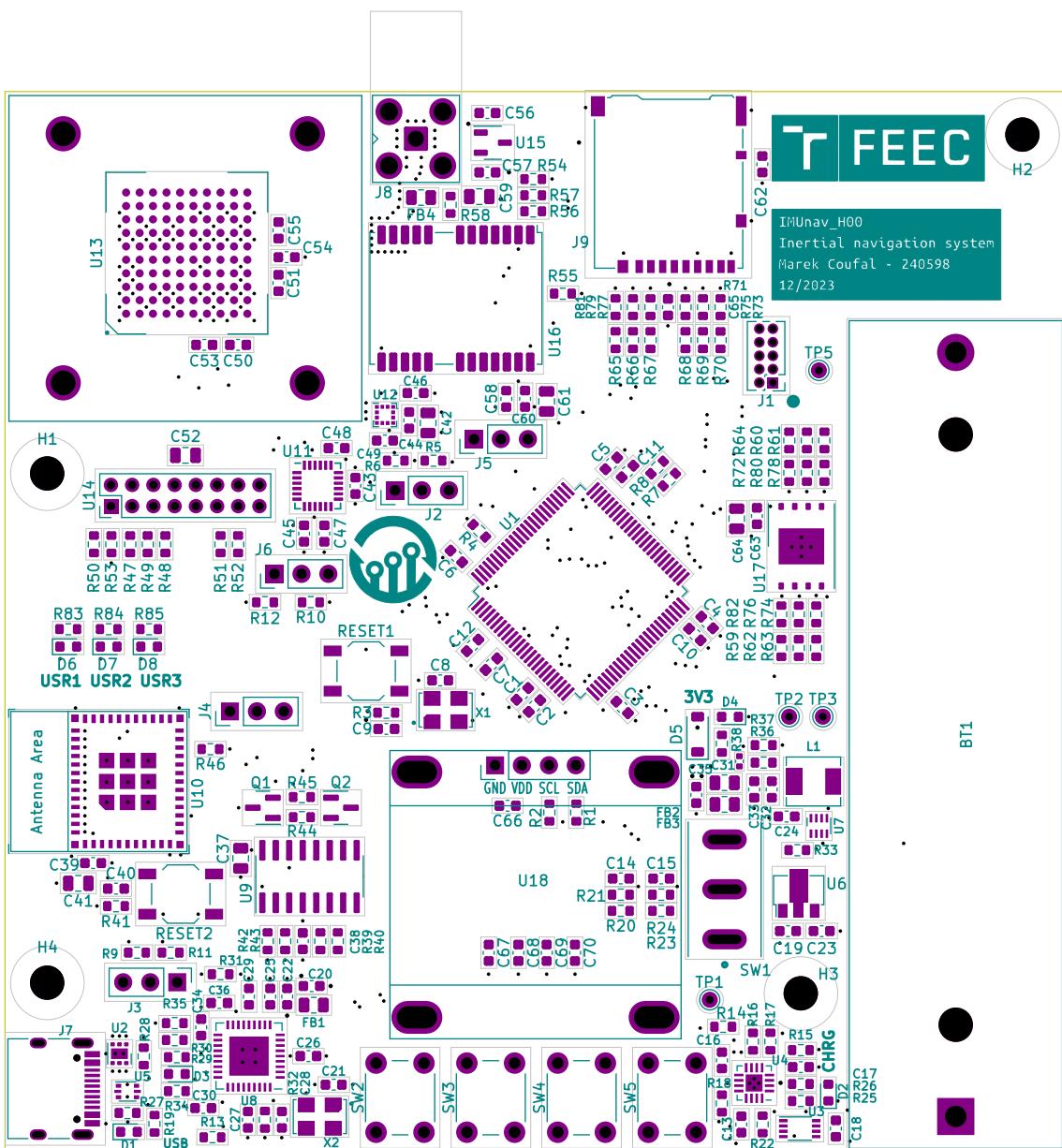




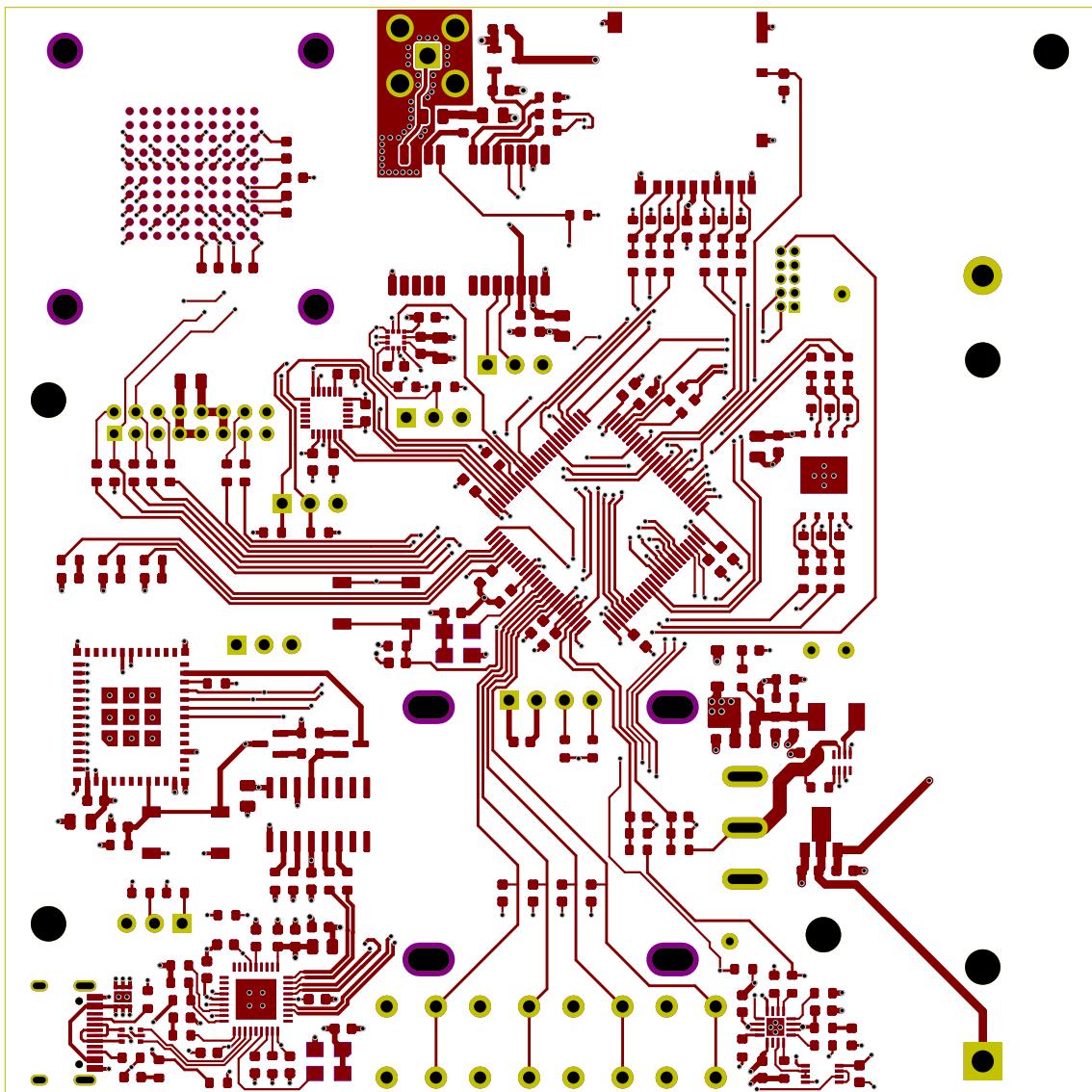


# B Výkres DPS

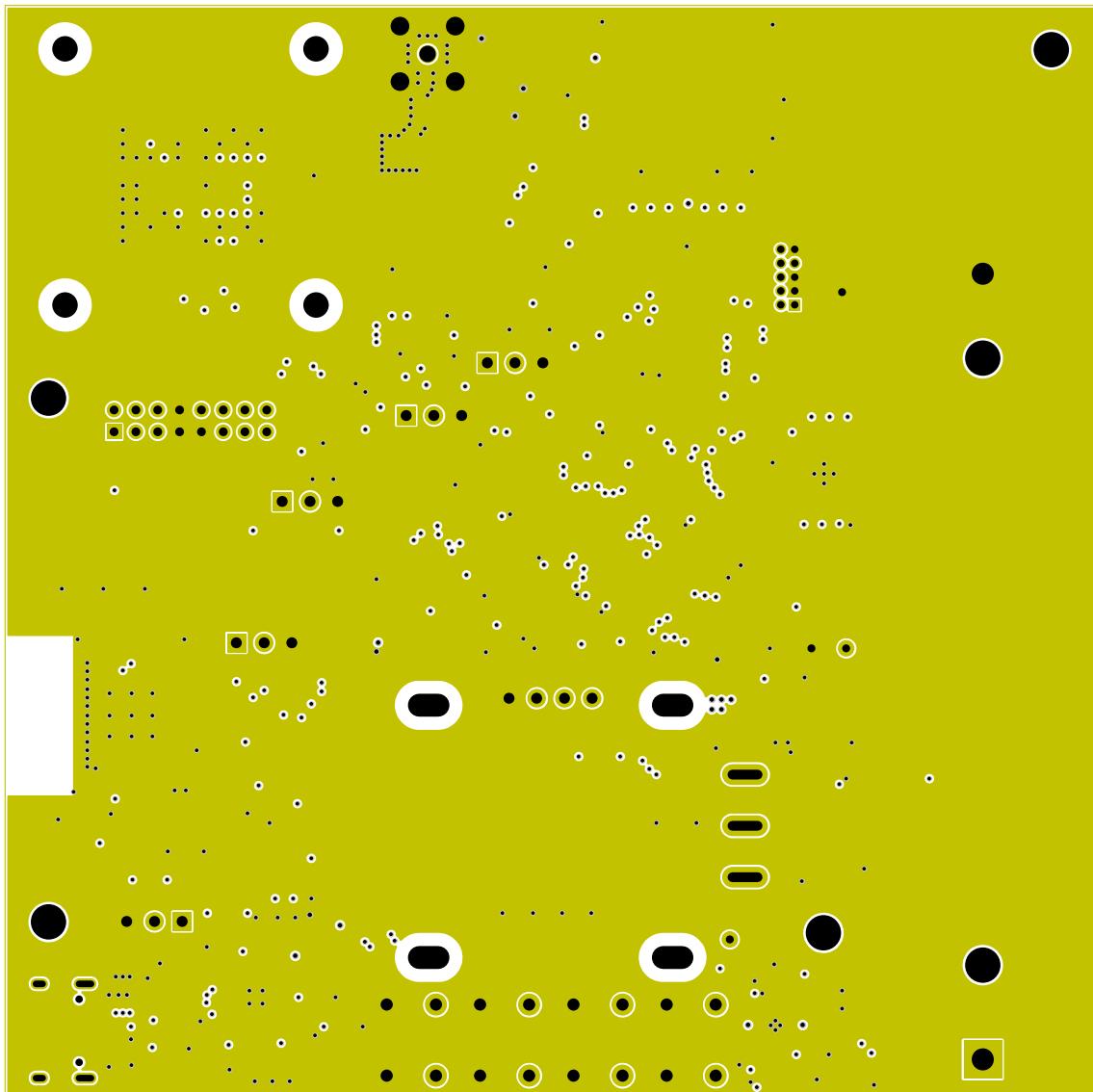
## B.1 Pohled osazení součástek



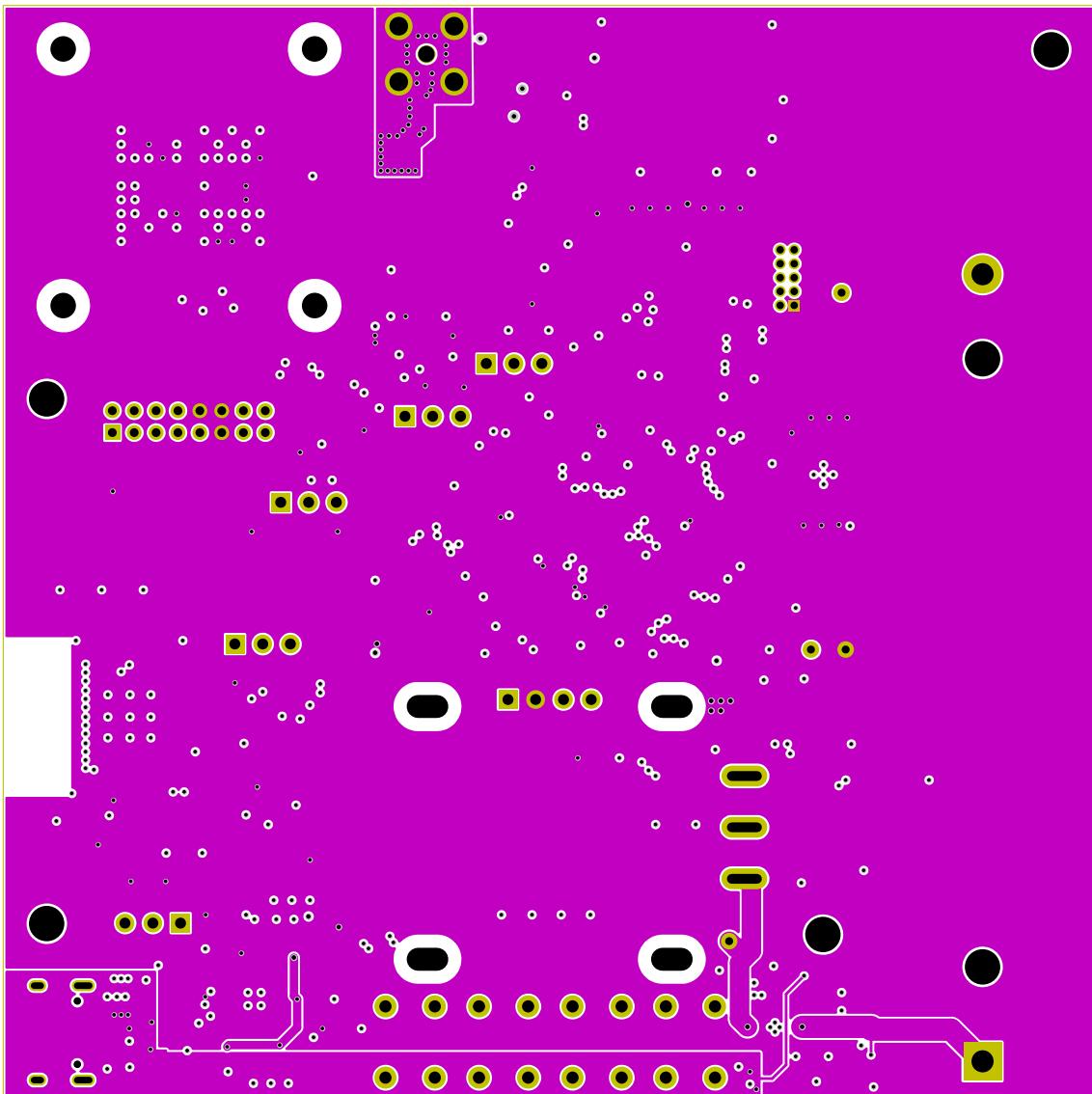
## B.2 Vrchní vrstva mědi DPS



### B.3 Vnitřní vrstva mědi DPS In1



## B.4 Vnitřní vrstva mědi DPS In2



## B.5 Spodní vrstva mědi DPS

