



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIODELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

MĚŘENÍ POLOHY UVNITŘ BUDOV POMOCÍ INERCIÁLNÍ
JEDNOTKY

INDOOR POSITIONING BASED ON INERTIAL MEASUREMENT UNIT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Marek Coufal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Král, Ph.D.

BRNO 2024



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Marek Coufal

ID: 240598

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Měření polohy uvnitř budov pomocí inerciální jednotky

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s dostupnými jednotkami pro měření inerciální a neinerciální 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.

Realizujte ovládací SW a FW a skripty v Matlabu nebo Pythonu pro určení polohy uvnitř budov za pomocí GPS. 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: 16.2.2024

Termín odevzdání: 27.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Jan Král, Ph.D.

doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.

předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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 gyroskopů 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, gyro-skop, akcelerometr, magnetometr, GNSS, STM32, ESP32

ABSTRACT

This semestral thesis deals with inertial navigation intended for indoor usage. The algorithm for processing 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*. Bakalářská 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

Jméno a příjmení autora: Marek Coufal

VUT ID autora: 240598

Typ práce: Bakalářská práce

Akademický rok: 2023/24

Téma závěrečné práce: 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 semestrální práce panu Ing. Janu Královi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost, vstřícnost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	11
1 Algoritmus inerciální navigace	12
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
2 Inerciální senzory	18
2.1 MEMS akcelerometry	18
2.2 MEMS gyroskopy	19
3 Hardware inerciální jednotky	20
3.1 Akcelerometr a gyroskop	21
3.2 Magnetometr	23
3.3 GNSS	24
3.4 Paměť	25
3.5 Uživatelské rozhraní	25
3.6 Napájení	26
3.7 Hlavní procesor	27
3.8 ESP32	28
3.9 Testování s vývojovými stavebnicemi	28
4 Realizace hardwaru	30
4.1 Konstrukce	31
4.2 Ověření základních funkcí hardwaru jednotky	33
5 Firmware inerciální jednotky	35
5.1 HAL	35
5.2 FreeRTOS	35
5.3 Vývojové diagramy firmwaru	36
5.3.1 KeepaliveTask	36
5.3.2 hubTask	38
5.3.3 powerTask	38

5.3.4	gpsTask	38
5.3.5	lsmTask	38
5.3.6	mpuTask	38
5.3.7	adisTask	38
5.3.8	loggerTask	38
5.3.9	oledTask	38
Závěr		41
Literatura		42
Seznam symbolů a zkratek		45
Seznam příloh		47
A Schéma zapojení inerciální jednotky		48
B Výkres DPS		55
B.1	Pohled osazení součástek	55
B.2	Vrchní vrstva mědi DPS	56
B.3	Vnitřní vrstva mědi DPS In1	57
B.4	Vnitřní vrstva mědi DPS In2	58
B.5	Spodní vrstva mědi DPS	59

Seznam obrázků

1.1	Výškový reliéf geoidu. [6]	16
1.2	Blokové schéma algoritmu strapdown inerciální navigace, převzato z [11] [12]	17
2.1	Struktura MEMS akcelerometru [5]	18
2.2	Mikroskopický snímek MEMS akcelerometru [4]	19
2.3	Struktura MEMS gyroskopu [5]	19
3.1	Blokové schéma inerciální jednotky	20
3.2	IMU verze ADIS16505-2/PCBZ	23
3.3	Fotografie grafického OLED displeje	26
3.4	Testovací přípravek s vývojovými deskami	29
4.1	3D model navržené DPS	30
4.2	Izolační podložka IMU	32
4.3	3D model krabičky	32
4.4	Fotografie zařízení	33
4.5	Dodatečná oprava RTC oscilátoru	34
5.1	Konfigurace MCU v STM32CubeIDE	36
5.2	Vývojový diagram KeepaliveTask	37
5.3	Vývojový diagram HubTask	37
5.4	Vývojový diagram PowerTask	38
5.5	Vývojový diagram GpsTask	38
5.6	Vývojový diagram LsmTask	39
5.7	Vývojový diagram MpuTask	39
5.8	Vývojový diagram AdisTask	40

Seznam tabulek

3.1	Porovnání základních parametrů gyroskopů [21] [22]	22
3.2	Podporované družicové systémy [18]	24
3.3	Odhad celkového bitratu pro záznam dat	25
3.4	Odhad spotřeby proudu 3,3V větve	27
3.5	Minimální požadavky na periferie mikroprocesoru	28
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 z 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 využívána dodnes. [11]

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. [11] 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 [11]

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

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. [11] 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 [12]

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

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

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. [12] [10]

Druhou možností, jak kompenzovat natočení je měřit jeho úhel a následně zrychlení z akcelerometru rotovat vůči referenčnímu systému.[12] [10] K tomuto účelu slouží gyroskopy, které měří úhlovou rychlosť ω otáčení jednotky kolem osy. Podobně jako se zrychlením u akcelerometru, znalostí počátečního úhlu $\varphi(t_0)$ v čase t_0 můžeme pomocí úhlové rychlosti ω 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 gyroskopy 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. [9] [11]

- 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.

S následnými měřenými a vypočtenými daty je často manipulováno jako s vektory označenými indexy odpovídajícími 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: [11]

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

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. Pokud máme data pouze ze vztažné soustavy i-frame, bude potřeba započít úhlovou rychlosť Země $\vec{\omega}_{ie}$ [11]

$$\vec{\omega}_{ie} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \Omega \end{pmatrix} \quad (1.7)$$

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: [11] [12]

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

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. „specifická síla“ \vec{f} představující sílu na jednotku hmotnosti, tedy zrychlení. S její pomocí můžeme rovnici 1.5 rozepsat na: [11] [12]

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

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: [8]

- 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.¹ 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. [8]

Pro kompenzaci rotace Země bychom mohli vyjádřit tříhové zrychlení \vec{g} v závislosti na gravitačním zrychlení \vec{a}_g a následně využít v rovnici 1.9 [11]

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

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. [8]

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).

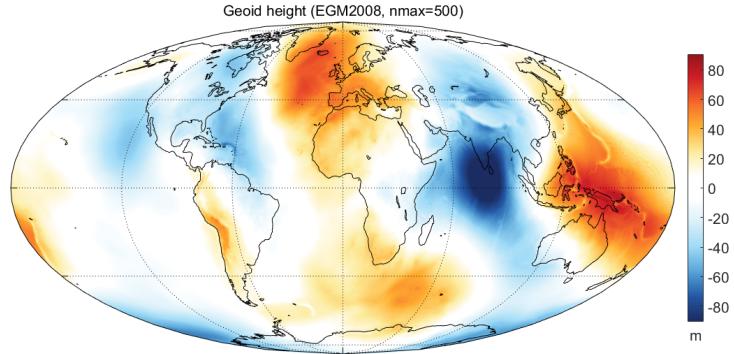
1.4.1 Gravitační modely Země

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. [7]

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.

¹Všude na Zemi, vyjma samotných zeměpisných pólů



Obr. 1.1: Výškový reliéf geoidu. [6]

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 specifické síly \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 ϕ , θ a ψ [11]

- Rotaci o úhel ϕ kolem osy x přiřadíme rotační matici \mathbf{C}_x : [11]

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

- Rotaci o úhel θ kolem osy y přiřadíme rotační matici \mathbf{C}_y : [11]

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

- Rotaci o úhel ψ kolem osy z přiřadíme rotační matici \mathbf{C}_z : [11]

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

Součinem těchto tří matic získáme matici směrových kosínů \mathbf{C}_b^i pro převod z b-frame na i-frame: [11]

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

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

Toto poté můžeme použít k rotaci samotného vektoru specifické sily \vec{f} z b-frame na i-frame

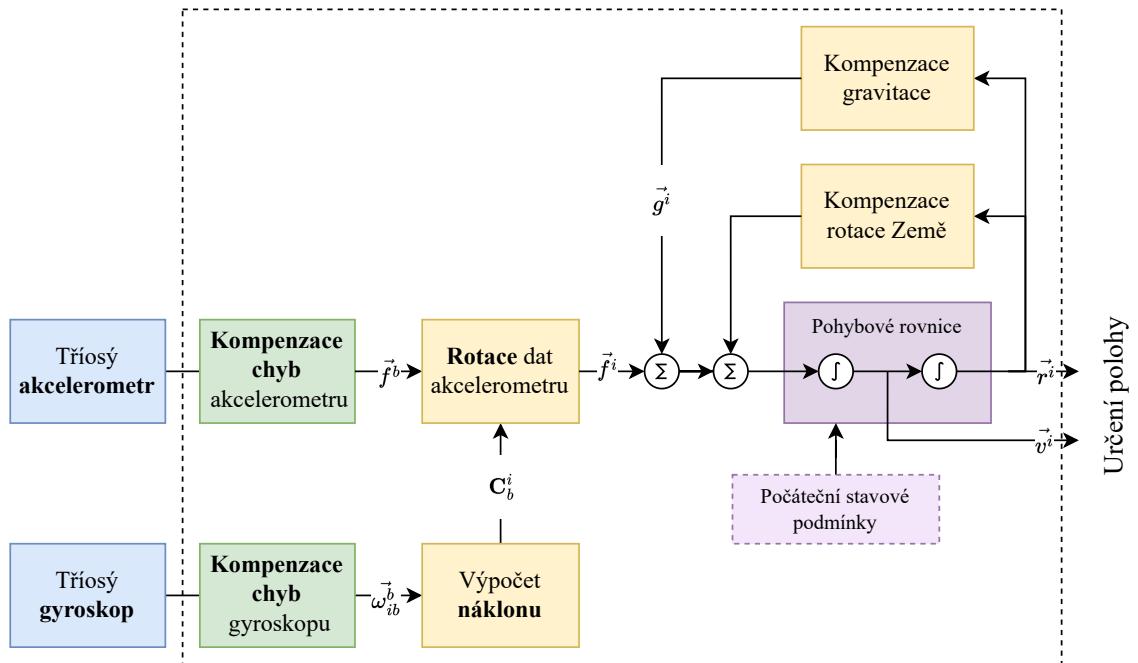
$$\vec{f}^i = \mathbf{C}_b^i \vec{f}^b \quad (1.16)$$

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).



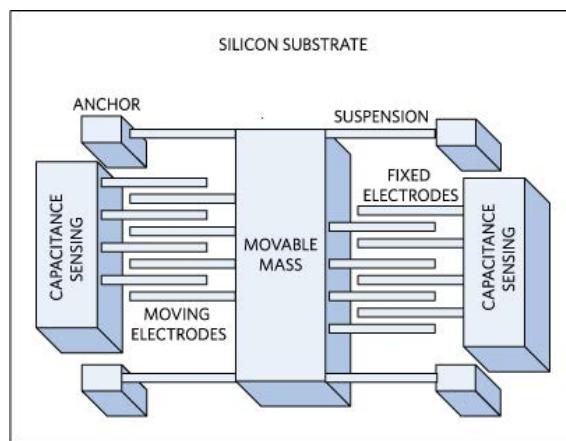
Obr. 1.2: Blokové schéma algoritmu strapdown inerciální navigace, převzato z [11] [12]

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 gyroskopický 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 tam, 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. [11] [12]

2.1 MEMS akcelerometry

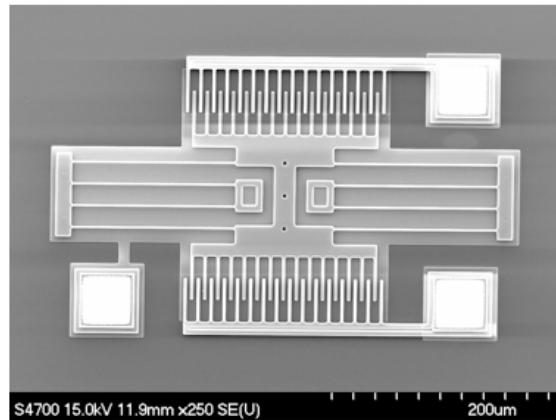
Akcelerometr měří lineární zrychlení nepřímo díky 2. Newtonovu zákonu (rovnice 1.1). Přímo na struktuře krémíku je těleso známé hmotnosti, kterému je umožněn pružný pohyb v nějaké z os. Pokud na akcelerometr působí zrychlení, je těleso vyhloveno silou, která je následně měřena. Tato síla je často měřena jako změna kapacity mechanické struktury znázorněné na obrázku 2.1 a 2.2, převedena na napětí, zesílena, vyfiltrována a následně převedena *Analog to Digital Convertor - analogově-digitální převodník* (ADC) převodníkem. Tyto struktury jsou následně uspořádány ortogonálně, aby vytvořily tříosý akcelerometr. [5]



Obr. 2.1: Struktura MEMS akcelerometru [5]

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

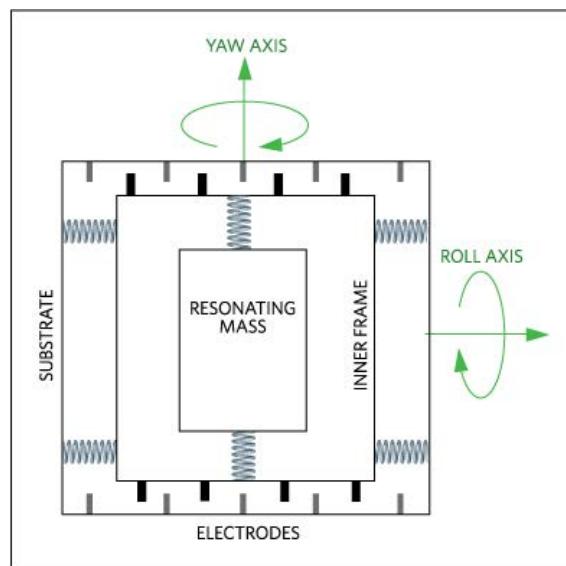
akcelerometru mají osy vychýlení hmoty rovnoběžnou se směry vrstev, zatímco třetí osa je na tyto vrstvy kolmá.



Obr. 2.2: Mikroskopický snímek MEMS akcelerometru [4]

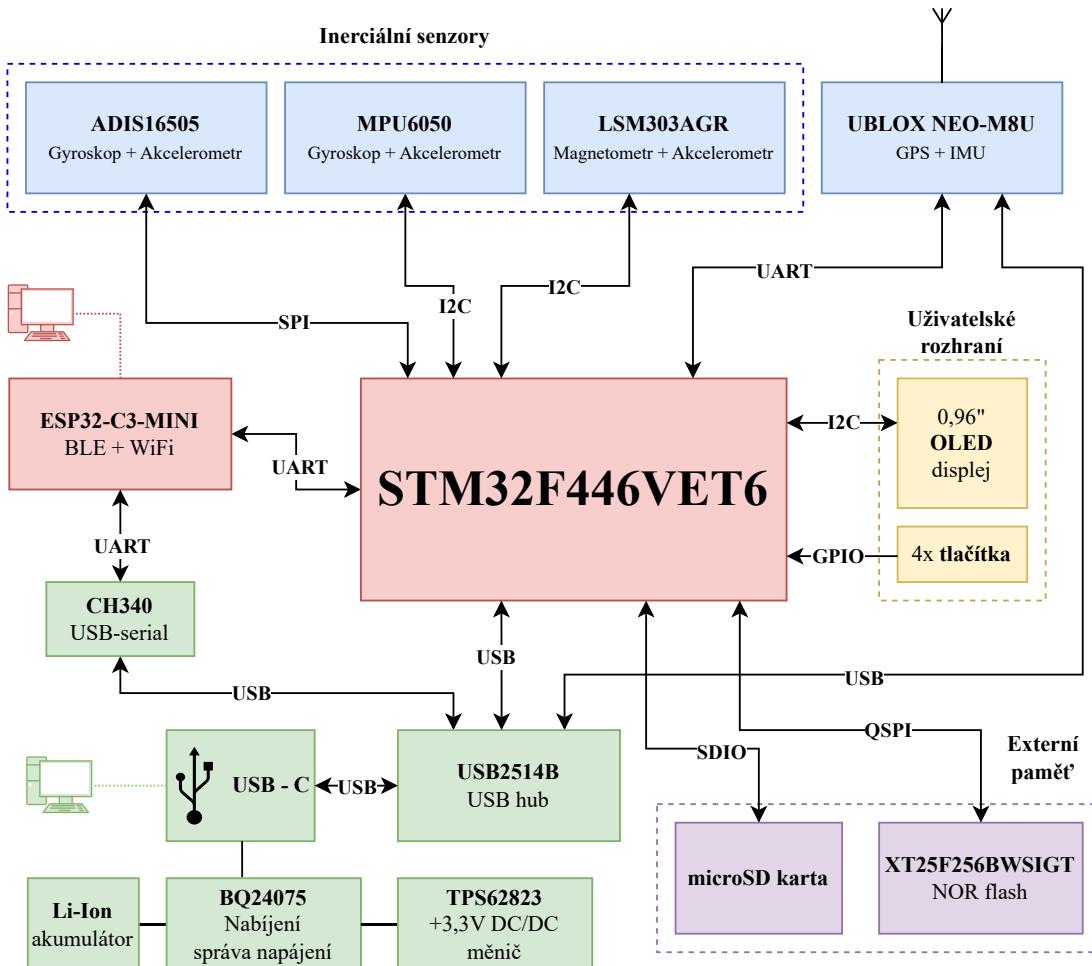
2.2 MEMS gyroskopy

Gyroskopy jsou senzory, které měří úhlovou rychlosť. Uspořádání mechanické struktury (na obrázku 2.3) je rozdílné v porovnání s akcelerometry. Zde je tělesu 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). [11] [5]



Obr. 2.3: Struktura MEMS gyroskopu [5]

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. [25]

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. [21]

MPU6050 disponuje rozhraním *Inter-Integrated Circuit - mezi obvodová komunikace* (I2C) s maximální frekvencí hodinového signálu 400 kHz. [21] Pokud bychom chtěli vyčítat ze senzoru data při maximální možné vzorkovací frekvenci, byla by potřeba minimální přenosová rychlosť sběrnice:

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

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).[21]

Jelikož pro účely inerciální navigace stačí vzorkovací frekvence dat v řádu stovek Hz [20], tak není tato limitace omezující. Senzor je propojen s hlavním MCU

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

²Pro 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 ¹	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 ²
Citlivost ²	418	26756268	LSB/(m/s ²)
Bias v ose x a y	±0, 491	±0, 0196	m/s ²
Bias v ose z	±0, 785	±0, 0196	m/s ²
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 [21] [22]

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. [22] Pokud budeme chtít vyčítat data ze senzoru při maximální možné vzorkovací frekvenci, bude potřeba minimální přenosová rychlos

sběrnice:

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

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 (obrázek 3.2) pro jednodušší práci s osazením *Deska Plošných Spojů* (DPS). [22] Hardware jednotky byl navržen tak, aby bylo možné využít jak samotný BGA čip, tak i hotový modul s konektorem.



Obr. 3.2: IMU verze ADIS16505-2/PCBZ

3.2 Magnetometr

Vzhledem k tomu, že výběr komerčně dostupných 9 DoF (akcelerometr, gyroskop a magnetometr) je značně omezený, popřípadě součástky prodávané jako devítiosé 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 [19], 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. [23]

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 automobilového průmyslu. 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. [18]

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. [18]

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	Pásmo	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 [18]

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. [18] 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

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

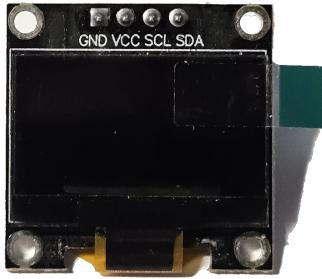
V případě, že bychom chtěli zaznamenávat data ze všech senzorů při jejich maximálních vzorkovacích frekvencích, nebude množství změrených dat zanedbatelné. V tabulce 3.3 je hrubý odhad potřebné rychlosti záznamu dat pro tento krajiní případ. Pokud bude měření trvat např. 2 minuty, vygenerujeme dohromady 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. [17]

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 [16]. 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

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



Obr. 3.3: Fotografie grafického OLED displeje

3.6 Napájení

Inerciální jednotka je napájena z jednoho Li-Ion akumulátoru velikosti 18650. Nabíjení je realizováno obvodem BQ24075RG, který monitoruje nabíjecí odebíraný proud jednotkou. Proud, kterým je nabíjen akumulátor je regulován tak, aby nepřekročil maximální hranici 900 mA z USB portu. [14]

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. [14]

Nabíjecí obvod také umožnuje 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.

Vzhledem k většímu počtu součástek není odebíraný 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:

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

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

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

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. [13]

Minimální napětí, na které můžeme nechat akumulátor vybit je dáno odpory přechodů Drain-Source vnitřních tranzistorů nabíjecího obvodu, DC/DC měniče a stejnosměrným odporem cívky. V tomto případě bude regulátor pracovat v módu s minimální střídou. [13] Toto napětí je:

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

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.

Na základě těchto požadavků byl vybrán mikrokontrolér *STM32F446VET6*. Jedná se o 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,

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

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. [24]

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. [15]

Tento modul je v obvodovém zapojení použit čistě jako bezdrátové rozhraní, neobsluhuje 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.

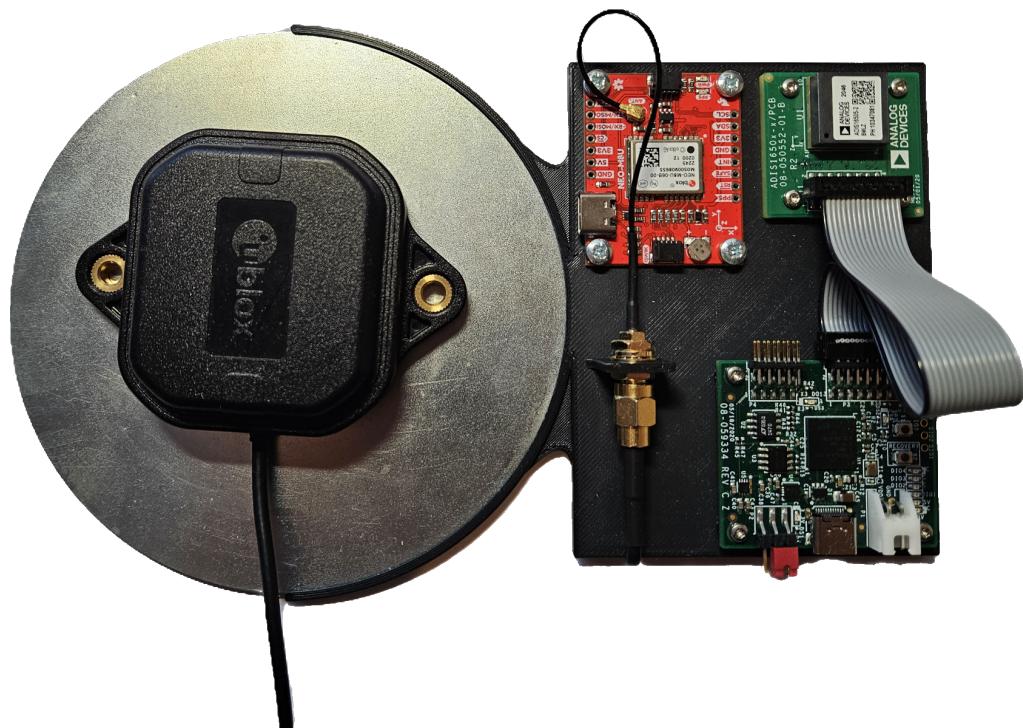
Druhá sběrnice UART je připojena k hlavnímu MCU inerciální jednotky. Kromě standardních pinů Rx a Tx jsou propojeny i piny pro řízení toku, které by bylo možné použít na zjednodušení časování komunikace.

3.9 Testování s vývojovými stavebnicemi

Pro účely vyzkoušení fúze dat z GNSS modulu a inerciálních senzorů byl navržen 3D tištěný držák (na obrázku 3.4) pro upevnění vývojových stavebnic osazených NEO-

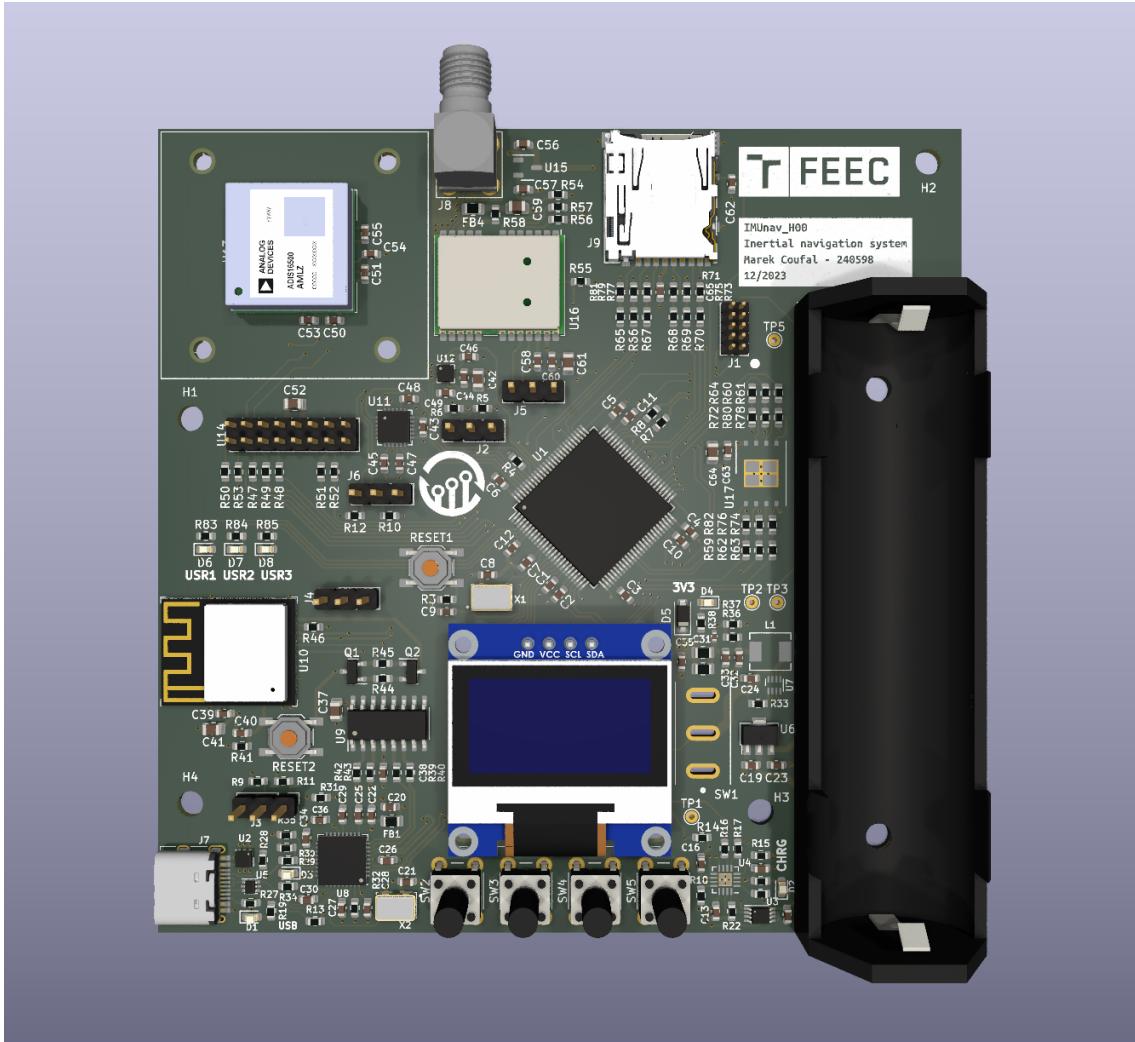
M8U a ADIS16505 s potřebnými periferními obvody na připojení k PC přes USB. Pomocí skriptů v Pythonu je možné ukládat data z obou senzorů do csv souborů a ty následně spojit.

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 rozsáhlější zpracování dat bude provedeno až s vlastní deskou hardwaru popsáném v kapitole 4.



Obr. 3.4: 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 čtyřvrstvá deska plošných spojů o velikosti 100×100 mm s usporádáním vrstev popsaném v tabulce 4.1.

Typ a tloušťka substrátu DPS byla vybrána v konfiguraci JLC04161H-7628, jejich mechanické usporádání a dielektrické vlastnosti jsou popsány v tabulce 4.2. Pomocí kalkulačky výrobce byly vypočteny potřebné hodnoty požadovaných šířek a mezer spojů mikropáskového vedení pro impedanci 50Ω a 90Ω . Hodnoty pro vedení o impedanci 50Ω 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

Miniature version A - subminiaturení verze A (SMA) anténou. Šírka a vzdálenost diferenciálního páru o impedanci 90Ω byla použita při návrhu USB části zapojení.

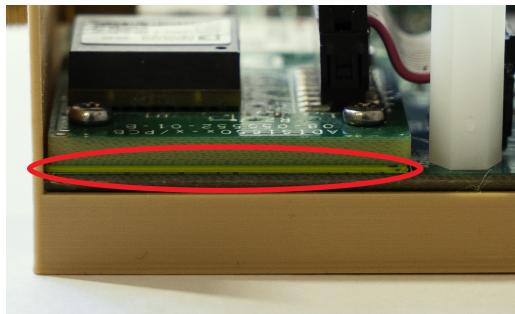
Typ materiálu	Tloušťka (mm)	Relativní permitivita $\epsilon_r(-)$
Vrchní vrstva mědi	0,0350	1
Prepreg 7628	0,2104	4,4
1. vnitřní vrstva mědi	0,0152	1
Jádro	1,065	4,6
2. vnitřní vrstva mědi	0,0152	1
Prepreg 7628	0,2104	4,4
Spodní vrstva mědi	0,0350	1

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

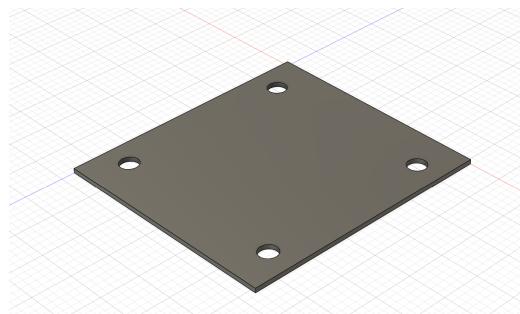
Většina pouzder pasivních součástek byla vybrána o velikosti 0603, což by mělo poskytnout dostatečný kompromis mezi velikostí výsledné desky a možností ruční výměny součástky pro případné opravy na prvním prototypu. Prototypová deska je také opatřena měřícími body na napájecích větvích a konektorovými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

4.1 Konstrukce

Všechny SMD součástky, kromě GNSS a IMU modulu byly osazeny strojově, zbylé součástky a konstrukční prvky ručně. Vzhledem k tomu, že deska byla navržena pro možnost výběru použití BGA, nebo PCB varianty ADIS16505, tak v případě použití hotového modulu je potřeba použít izolační desku, která zamezí nežádoucím zkratům mezi odkrytými ploškami neosazeného BGA pouzdra a PCB varianty inerciálního modulu. K tomuto účelu byl navržen jednoduchý 3D tištěný izolační prvek, který je vložen mezi jednotlivé desky, znázorněn na obrázku 4.2.

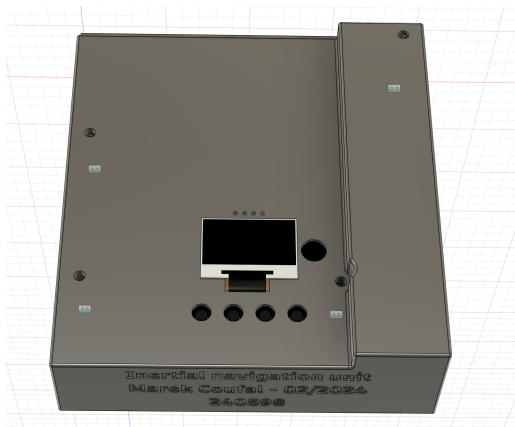


(a) Fotografie umístěného izolátoru

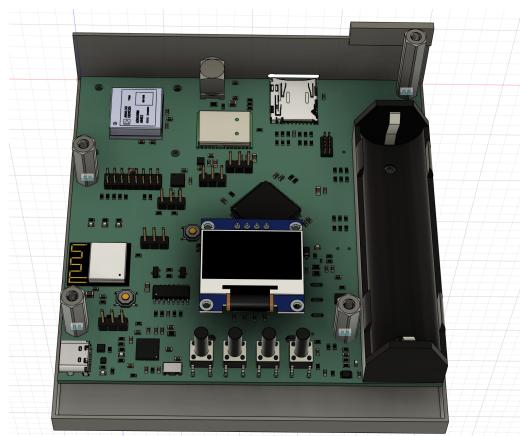


(b) 3D model izolátoru

Obr. 4.2: Izolační podložka IMU



(a) 3D model krabičky bez víka



(b) 3D model krabičky s víkem

Obr. 4.3: 3D model krabičky

Obdobné izolační podložky byly také navrženy a použity ze spodní strany distančních sloupek držící OLED displej.

Dále byla navržena a vyrobena 3D tištěná montážní krabička pro ochranu citlivých komponent zařízení při běžném užívání a manipulaci. Veškeré modely v této práci jsou navrženy pomocí 3D *Computer-Aided Design - počítačem podporované projektování* (CAD) programu Fusion 360 od firmy Autodesk. Ve spodní části krabičky jsou přidané závitové vložky, které byly teplem vlisovány do plastového dílu pomocí mikropájky. DPS je připevněna k tomuto dílu pomocí čtverice nylonových distančních sloupek, které zároveň slouží jako vzpěry pro vrchní díl krabice. Sestavené zařízení je na obrázku 4.4.



(a) Spodní díl krabičky s deskou



(b) Hotová sestava

Obr. 4.4: Fotografie zařízení

4.2 Ověření základních funkcí hardwaru jednotky

Při prvním zapnutí desky byl k napájení použit laboratorní zdroj s proudovým omezením místo Li-Ion akumulátoru, aby v případě chyby v zapojení byla šance poškození co nejvíce omezena. Zařízení při použití napájecího napětí 4 V odebíralo proud zhruba 198 mA, což je v tolerovaných mezích. Dále bylo zkонтrolováno, zdali 3,3V snižující měnič, který napájí všechny citlivé komponenty pracuje správně. Bylo změřeno napětí 3,313 V na jeho výstupu, je tedy v pořádku.

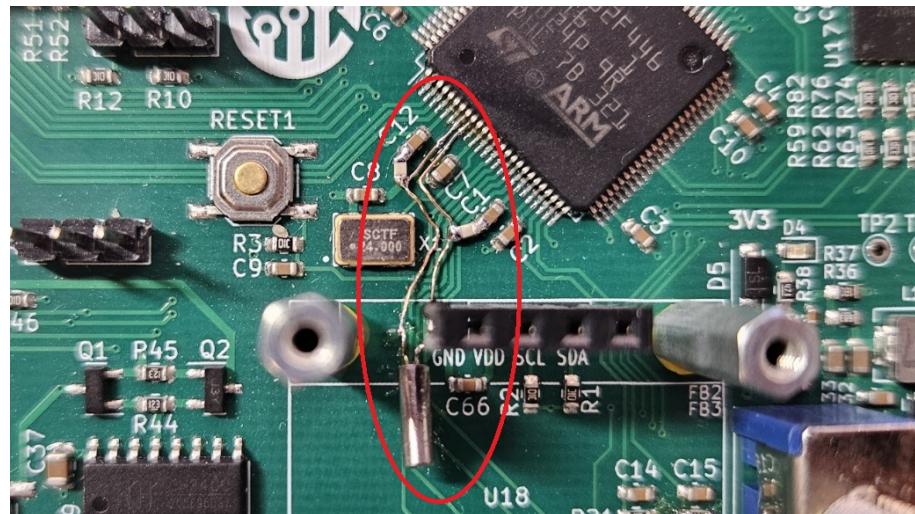
Jako další důležitý blok byla zkонтrolována funkčnost S/R klopného obvodu, která poskytuje ochranu proti podvybití, popsána v kapitole 3.6. K tomuto byl vytvořen jednoduchý firmware procesoru, který průběžně měří napětí akumulátoru pomocí ADC a v případě, že klesne pod úroveň 3,5 V přepne pin na vstupu KO do stavu log. 1. Tento stav byl simulován postupným snižováním výstupního napětí laboratorního zdroje. K vypnutí zařízení došlo při 3,54 V a ve vypnutém stavu zařízení odebíralo proud 19,73 μ A, což je spotřeba samotných klopných obvodů a RTC zálohovacích registrů MCU a GNSS modulu. Při tomto napětí zbývá v akumulátoru zhruba 10 % energie [3], můžeme tedy vypočítat jak dlouho je možné ponechat zařízení softwarově vypnuté se sepnutým hlavním vypínačem, aniž by došlo k degradaci akumulátoru:

$$t = \frac{C \cdot 0,1}{I} = \frac{2,9 \cdot 0,1}{19,73 \cdot 10^{-6}} = 1,68 \text{ roku} \quad (4.1)$$

Kde C je kapacita akumulátoru v Ah a I je proudový odběr vypnutého zařízení.

Při připojení zařízení ke zdroji pomocí USB bylo napájení obnoveno, což je žádoucí. Také byla zkontozrovaná proudová spotřeba při nabíjení akumulátoru pomocí orientačního USB měřicího přístroje, ta byla 751 mA v případě, že je zařízení zapnuté a akumulátor se nabíjí.

Další části zařízení jsou úzce vázány na software, jejich funkčnost byla tedy postupně testována při vývoji. Později byl odhalen drobný nedostatek co se hardwarového návrhu týče, a to v oblasti RTC periferie hlavního procesoru. Ta slouží k udržení aktuálního času, který je možné synchronizovat například pomocí GNSS. Z tohoto důvodu výrobce MCU umožňuje napájet periferii pomocí separátního pinu *VBAT* který je využíván při vypnutém hlavním napájení a má velice malý proudový odběr, jehož zdrojem je lineární napěťový regulátor s malým klidovým proudem připojeným přímo k akumulátoru. Vzhledem k tomu, že tato funkctionalita není pro aplikaci inerciální navigace klíčová a jedná se pouze o možnost zvýšení pohodlí uživatele, tak nebyly kladený vysoké nároky na její přesnost, proto nebyl zapojen externí nízkofrekvenční krystalový oscilátor *LSE* s domněním, že bude postačovat pouze interní oscilátor *LSI RC*. Ukázalo se ovšem, že z napájecí domény *VBAT* je poskytováno napájení pouze externímu nízkofrekvenčnímu oscilátoru, nikoliv internímu [24]. Z tohoto důvodu byl dodatečně přidán 32,768kHz krystal, společně se zatěžovacími kondenzátory (viz. obrázek 4.5), který byl po otestování připevněn lepidlem.



Obr. 4.5: Dodatečná oprava RTC oscilátoru

5 Firmware inerciální jednotky

Firmware hlavního MCU byl vyvíjen pomocí volně dostupného *Integrated Development Environment - vývojové prostředí* (IDE) poskytovaného výrobcem - *STM32CubeIDE*. Jedná se o nástroj určený pro práci s jazyky C/C++, GCC kompilátorem založeném na Eclipse [2]. Zároveň poskytuje grafické rozhraní pro konfiguraci a generování knihoven založených na *Hardware Abstraction Layer - vrstva abstrakce hardware* (HAL), možnost použití *Real Time Operating System - Operační systém reálného času* (RTOS) a ladící prostředí.

V této práci byly použity poskytované knihovny HAL a FreeRTOS pro ulehčení a urychlení vývoje firmwaru. Jejich použití často s sebou nese nevýhody, jako je například horší využití paměti, nebo výpočetního výkonu, z tohoto důvodu byl zvolen takový MCU, aby měl dostatečné rezervy pro jejich použití.

5.1 HAL

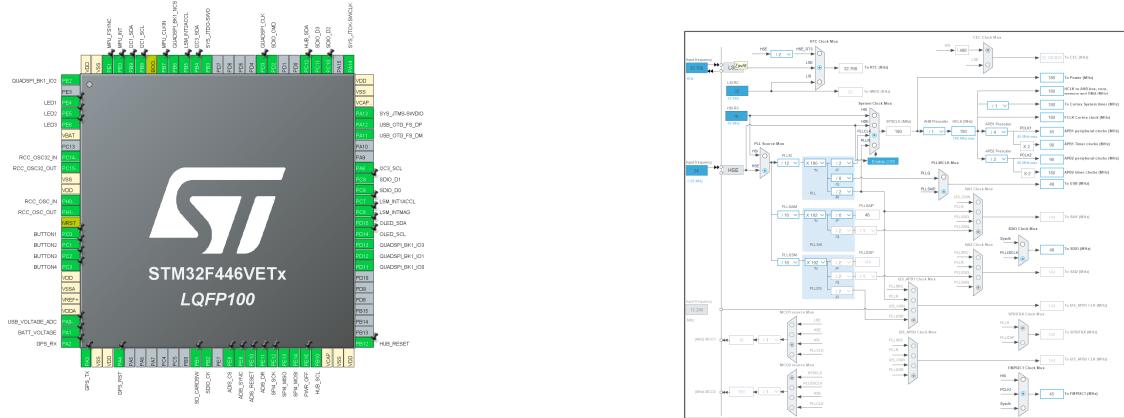
Generování kódu HAL v STM32CubeIDE je možné pomocí grafického rozhraní, které poskytuje uživateli možnost nastavení jednotlivých pinů, periferií, komunikačních rozhraní a vnitřních hodin (obrázek 5.1). Vygenerované knihovny následně umožňují uživateli pracovat s MCU s jistou mírou abstrakce, například není nutné znát a pracovat s názvy jednotlivých registrů. Typickým příkladem můžou být komunikační sběrnice (SPI, I2C ...), pro které jsou dostupné obslužné funkce na čtení a vysílání dat, jak v blokujícím režimu, tak i v neblokujícím (například pomocí *Direct Memory Acces - přímý přístup k paměti* (DMA)). [2]

Dále je možné pomocí stejného grafického rozhraní importovat rozšiřující softwarové balíčky, i když už se nejedná přímo o HAL. V této práci byly použity *FATFS* pro manipulaci se soubory na microSD kartě, *FreeRTOS* jakožto jeden z dostupných RTOS a *USB_DEVICE* pro práci s USB rozhraním třídy *Mass Storage Class - třída paměťového média* (MSC).

5.2 FreeRTOS

V této aplikaci je potřeba vyčítat, převádět a zapisovat data z několika různých senzorů které nemají přesně stejný hodinový signál, zároveň obsluhovat *Graphical User Interface - grafické uživatelské rozhraní* (GUI) a provádět záznam dat zároveň. Pro potřeby synchronizace několika úloh, které nemají stejné periody, nebo například čekají na vstup od uživatele se hodí RTOS.

Byla vybrána jedna z variant operačních systémů reálného času, a to FreeRTOS. Jedná se o jednoduchý open-source systém, který je hojně využíván ve vestavěných



(a) Konfigurace pinů

(b) Konfigurace hodin

Obr. 5.1: Konfigurace MCU v STM32CubeIDE

aplikacích. Umožňuje aplikaci virtuálně rozdělit na několik samostatných vláken (tzv. *tasků*) s různými prioritami. Časování tasků je možné například pomocí neblokujících prodlev, nebo semaforů. FreeRTOS také plní funkci správy a alokace paměti. Předávání informací mezi jednotlivými tasky se provádí pomocí tzv. *Queues*, díky tomu je možné se vyvarovat použití globálních proměnných. [1]

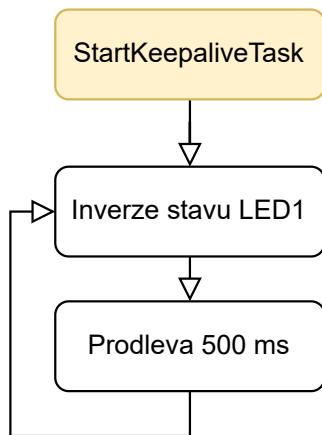
Práce s FreeRTOS je v STM32CubeIDE zjednodušená také díky poměrně dobré možnosti ladit aplikace pomocí již vestavěného RTOS-aware debuggeru, díky kterému můžeme například analyzovat využití paměti jednotlivých tasků, využití času, nebo kontrolovat stavy semaforů a velikost obsazených Queues.

5.3 Vývojové diagramy firmwaru

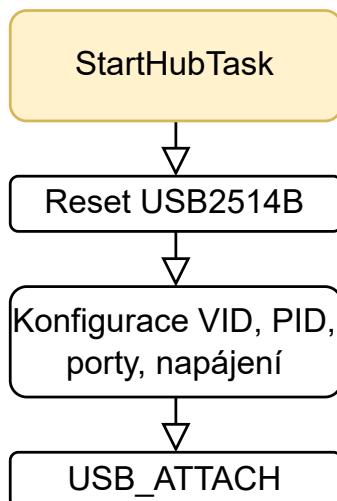
Popsat chování a funkcionalitu firmwaru této aplikace dohromady by bylo poměrně nepřehledné. Proto budou jednotlivé funkce rozděleny do několika samostatných logických bloků, kde každý blok reprezentuje jeden task operačního systému.

5.3.1 KeepaliveTask

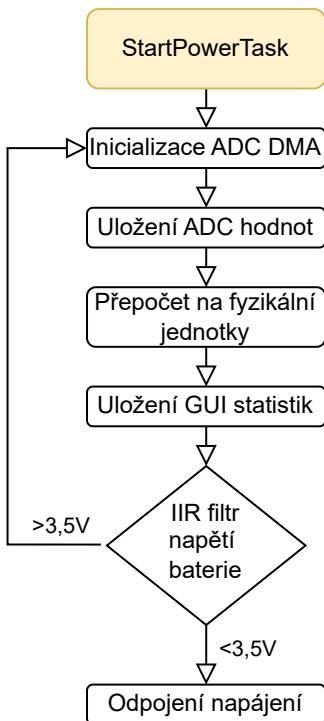
Jedná se o úlohu s nejnižší prioritou...



Obr. 5.2: Vývojový diagram KeepaliveTask



Obr. 5.3: Vývojový diagram HubTask



Obr. 5.4: Vývojový diagram PowerTask

5.3.2 hubTask

5.3.3 powerTask

5.3.4 gpsTask

5.3.5 lsmTask

5.3.6 mpuTask

5.3.7 adisTask

5.3.8 loggerTask

5.3.9 oledTask

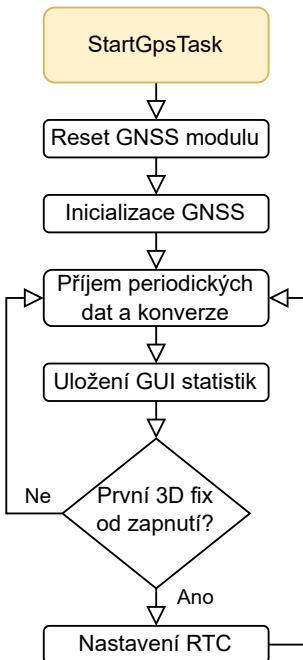
...jednotlivé sekce a subsekce vývojových diagramů, hlavní vývojový diagram

gui

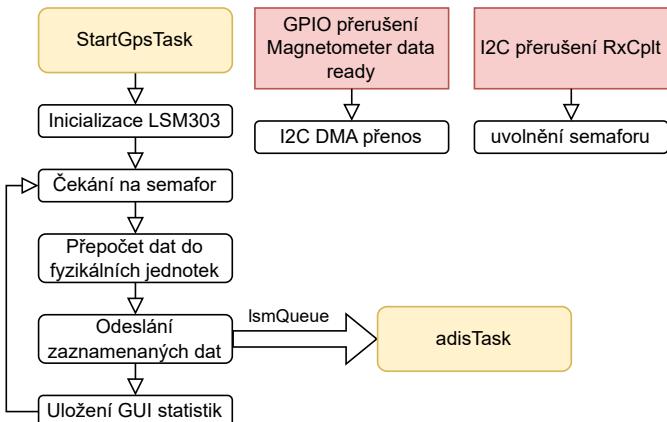
kalibrace

testy

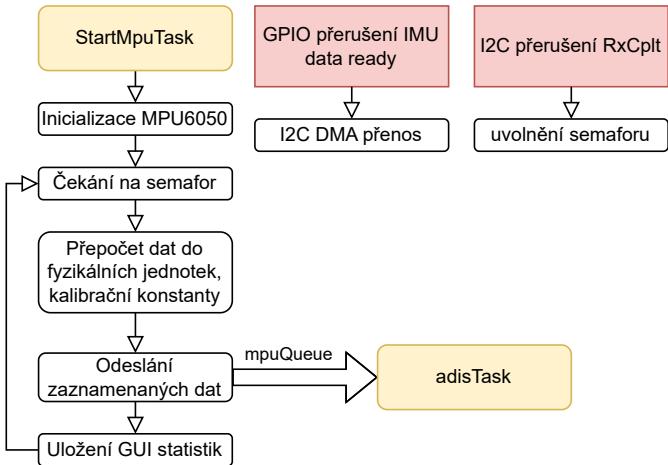
zarovnávání bytů v paměti



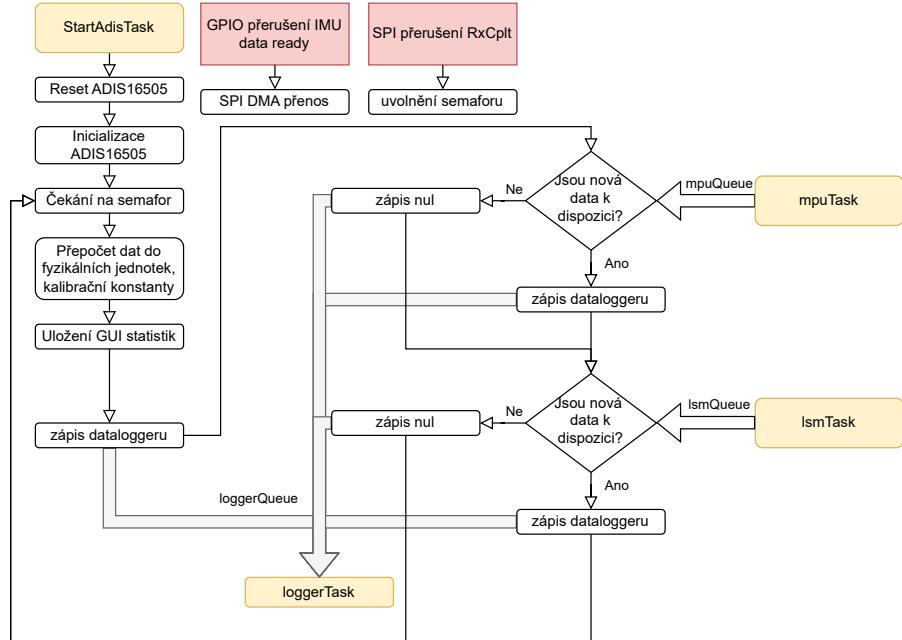
Obr. 5.5: Vývojový diagram GpsTask



Obr. 5.6: Vývojový diagram LsmTask



Obr. 5.7: Vývojový diagram MpuTask



Obr. 5.8: Vývojový diagram AdisTask

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] ZHU, Ming-Yuan. *Understanding FreeRTOS: A Requirement Analysis*. Online. ResearchGate, 2011. Dostupné z: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12419.09767>. [cit. 2024-05-14].
- [2] ST MICROELECTRONICS. *UM2609: STM32CubeIDE user guide*. Online uživatelský návod. 11. 2024. Dostupné z: https://www.st.com/resource/en/user_manual/um2609-stm32cubeide-user-guide-stmicroelectronics.pdf. [cit. 2024-05-14].
- [3] CHERUIYOT, Fabian; SEGERA, Davies a OSORIO DE LA ROSA, Edith. A Master-Slave Salp Swarm Algorithm Optimizer for Hybrid Energy Storage System Control Strategy in Electric Vehicles. Online. *Journal of Energy*. 2022, roč. 2022, s. 1-20. ISSN 2314-615X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2022/1648433>. [cit. 2024-05-13].
- [4] 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].
- [5] DADAFSHAR, Majid. *APPLICATION NOTE 5830: ACCELEROMETER AND GYROSCOPES SENSORS: OPERATION, SENSING, AND APPLICATIONS*. Online aplikační poznámka. 2014. Dostupné z: <https://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN5830.pdf>. [cit. 2023-12-27].
- [6] 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].
- [7] 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].
- [8] HALLIDAY, David; RESNICK, Robert a WALKER, Jearl. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Překlady vysokoškolských učebnic*. Brno: VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1869-9.

- [9] 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].
- [10] POLÁK, Luboš. *Navigační jednotka s modifikovanou soustavou akcelerometru*. 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].
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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].
- [14] 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].
- [15] 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. [cit. 2023-12-21].
- [16] 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. [cit. 2023-12-17].
- [17] 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].
- [18] 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. [cit. 2023-12-17].
- [19] 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].
- [20] 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].
- [21] 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].
- [22] 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].
- [23] 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].
- [24] 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].
- [25] 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

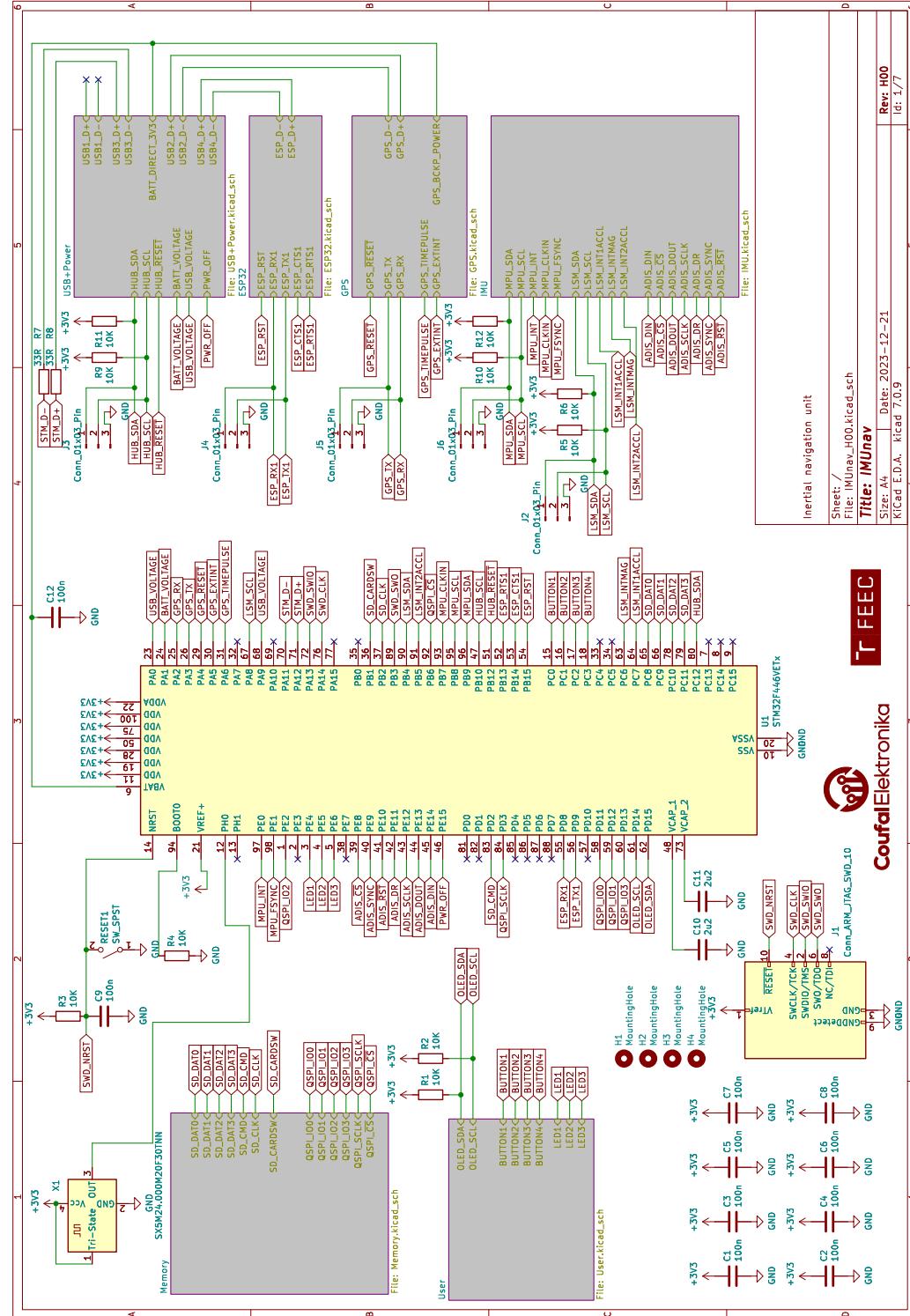
ADC	Analog to Digital Convertor - analogově-digitální převodník
BGA	Ball Grid Array - pouzdro matice kuliček
DoF	Degrees of Freedom - stupně volnosti
DPS	Deska Plošných Spojů
EGM	Earth Gravitational Model - gravitační model Země
FIFO	First In First Out - první dovnitř, první ven
GNSS	Global navigation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

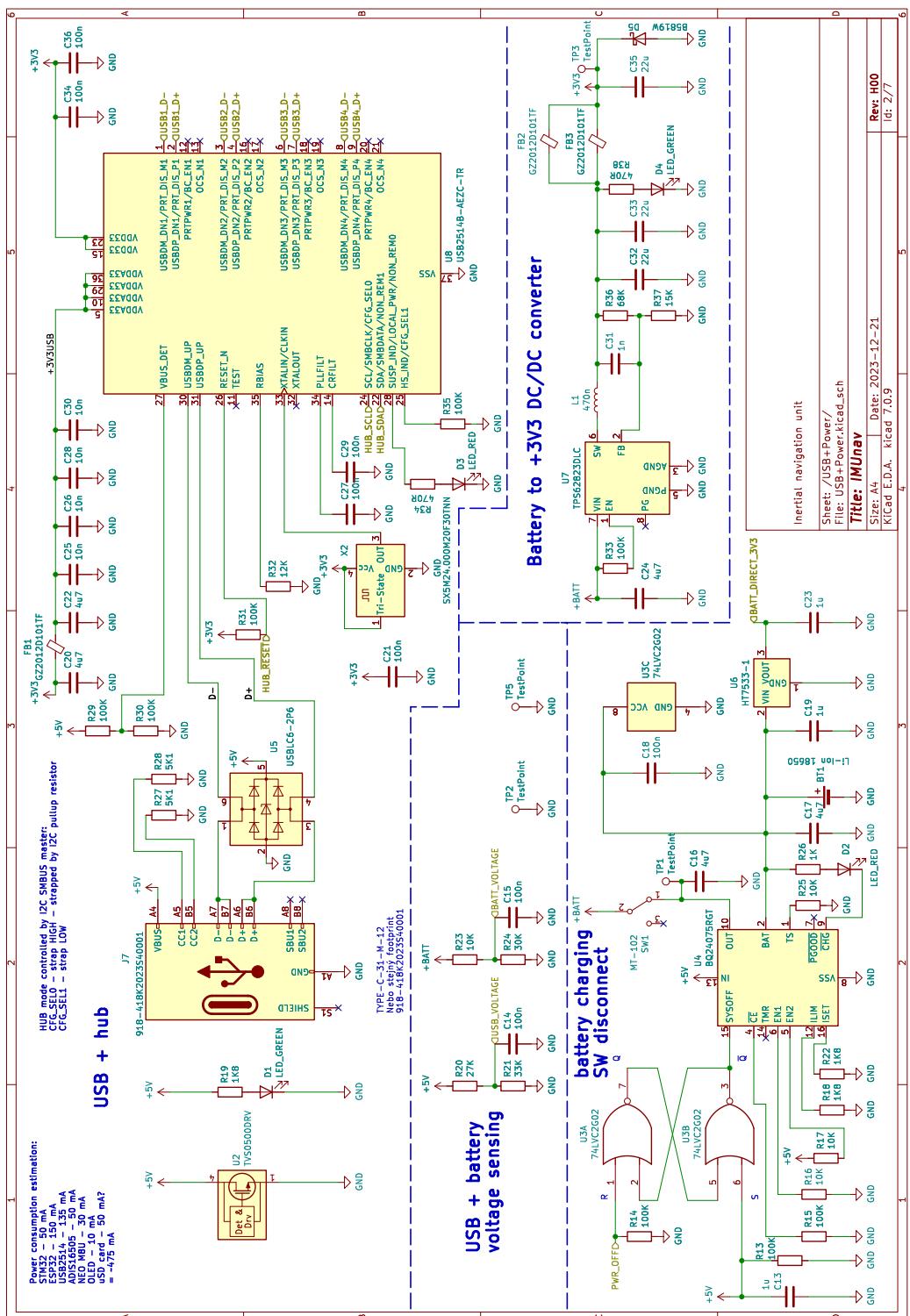
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter - univerzální asynchronní přijímač-vysílač
UBX	UBloX message - zpráva formátu UBLOX
USB	Universal Serial Bus - univerzální sériová sběrnice
CAD	Computer-Aided Design - počítačem podporované projektování
IDE	Integrated Developement Enviroment - vývojové prostředí
HAL	Hardware Abstraction Layer - vrstva abstrakce hardwaru
RTOS	Real Time Operating System - Operační systém reálného času
DMA	Direct Memory Acces - přímý přístup k paměti
MSC	Mass Storage Class - třída paměťového média
GUI	Graphical User Interface - grafické uživatelské rozhraní

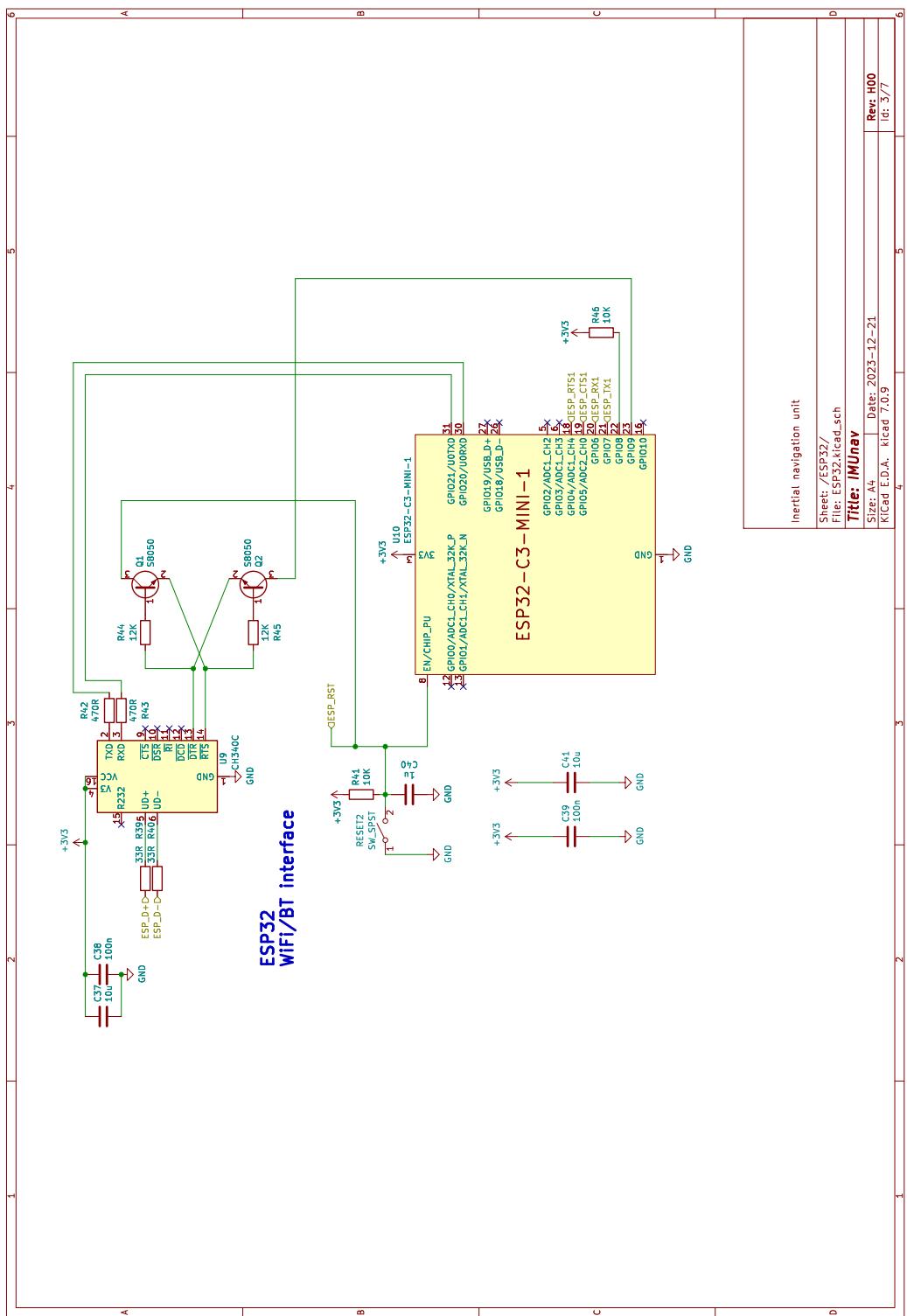
Seznam příloh

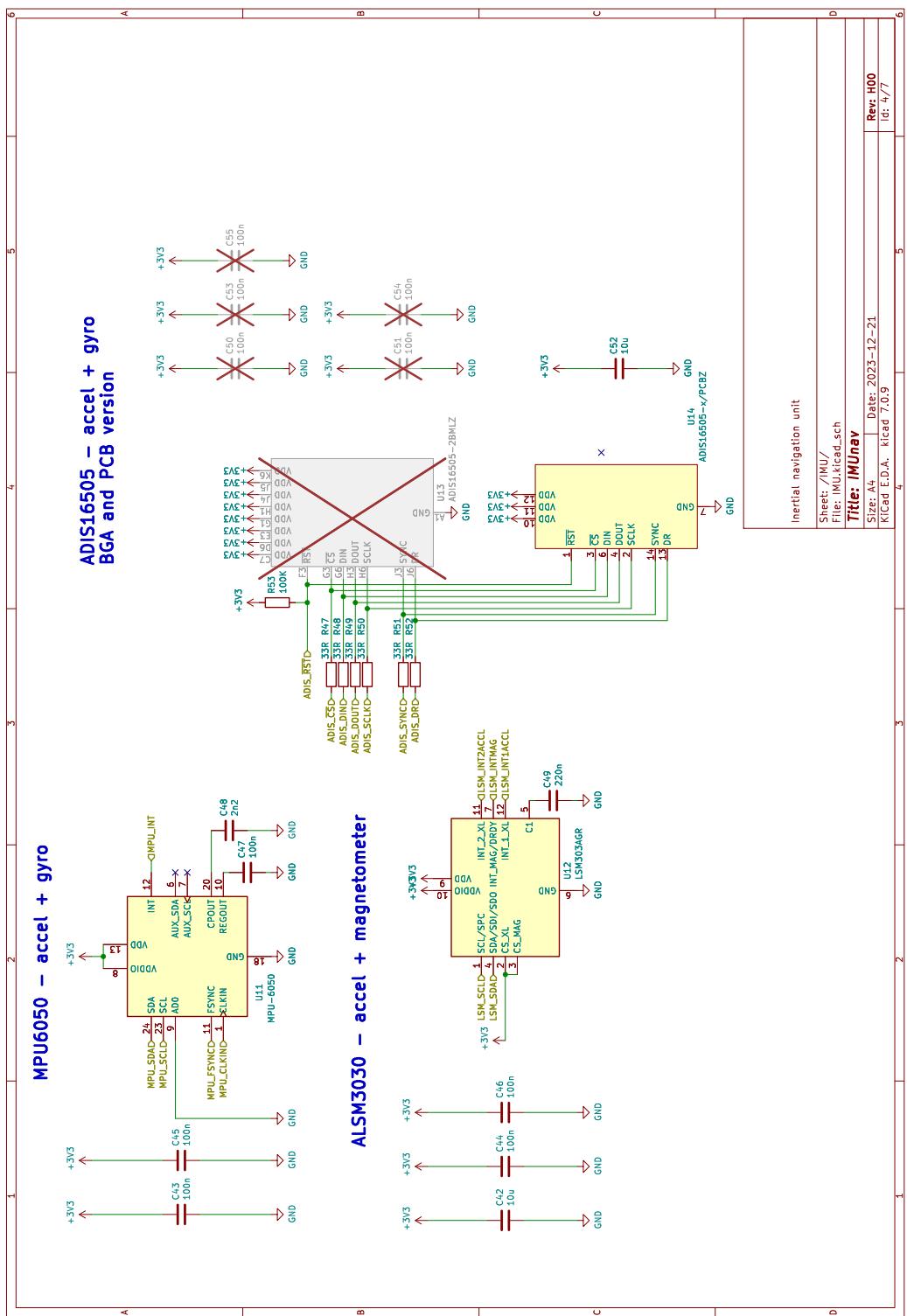
A Schéma zapojení inerciální jednotky	48
B Výkres DPS	55
B.1 Pohled osazení součástek	55
B.2 Vrchní vrstva mědi DPS	56
B.3 Vnitřní vrstva mědi DPS In1	57
B.4 Vnitřní vrstva mědi DPS In2	58
B.5 Spodní vrstva mědi DPS	59

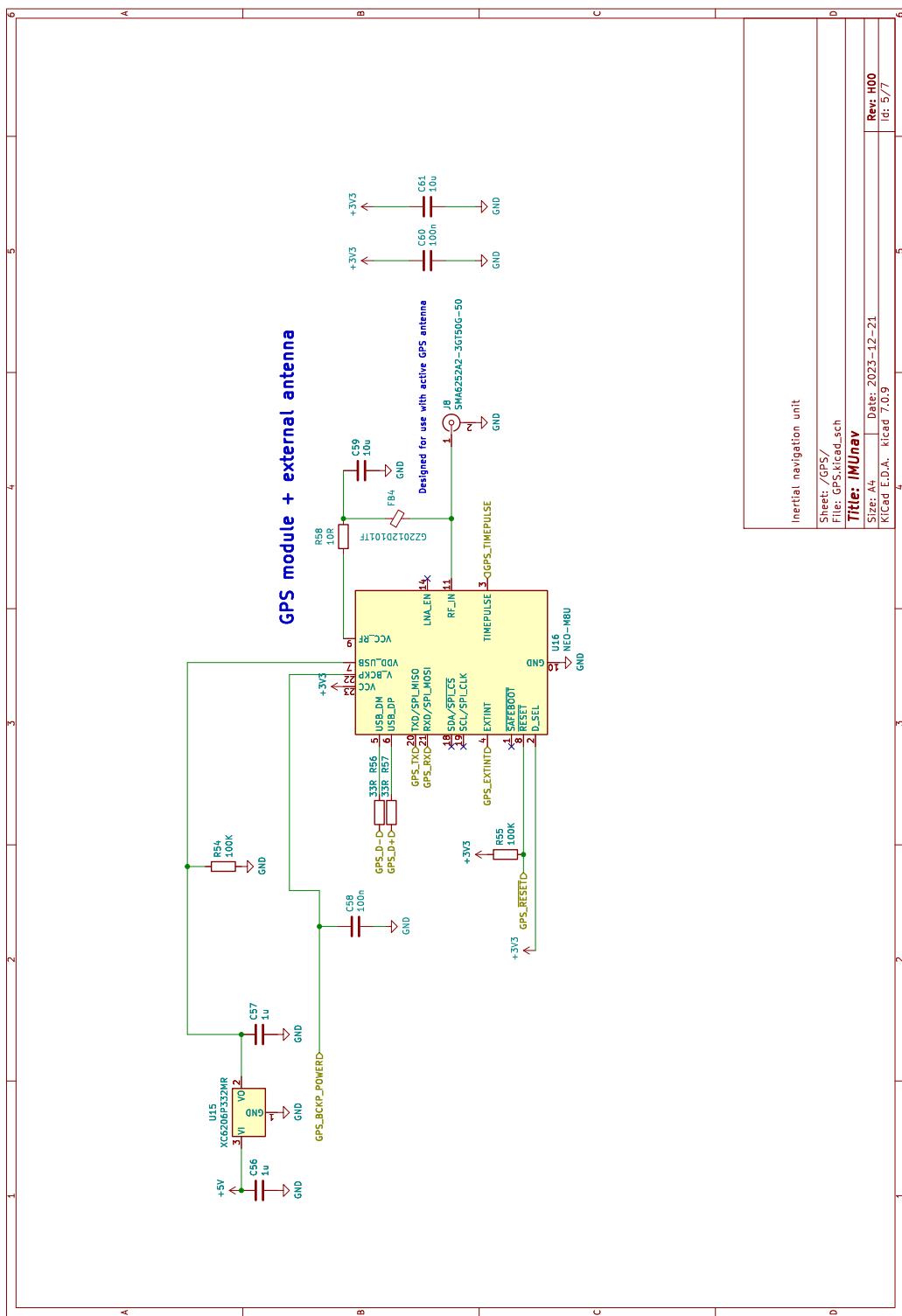
A Schéma zapojení inerciální jednotky

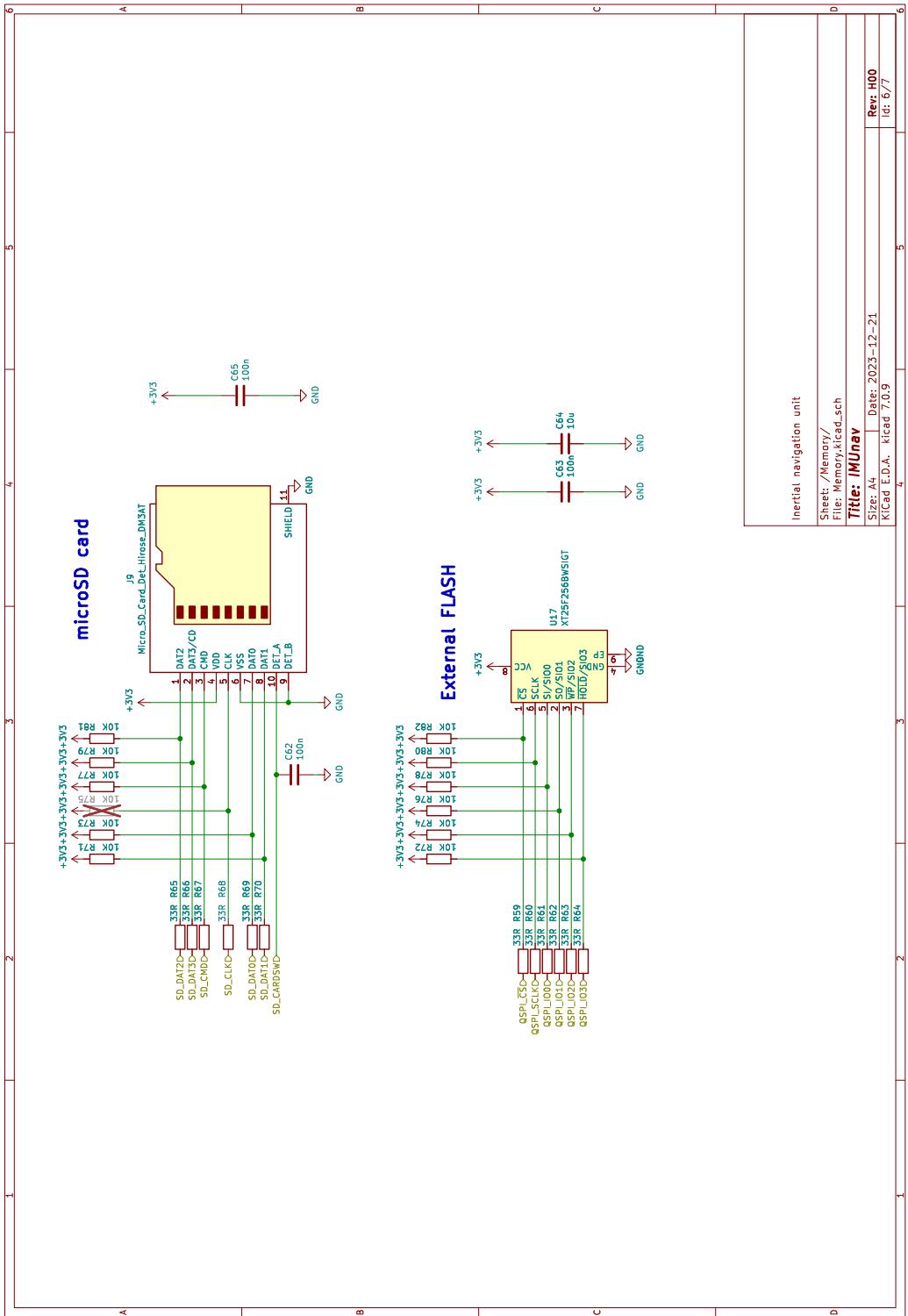


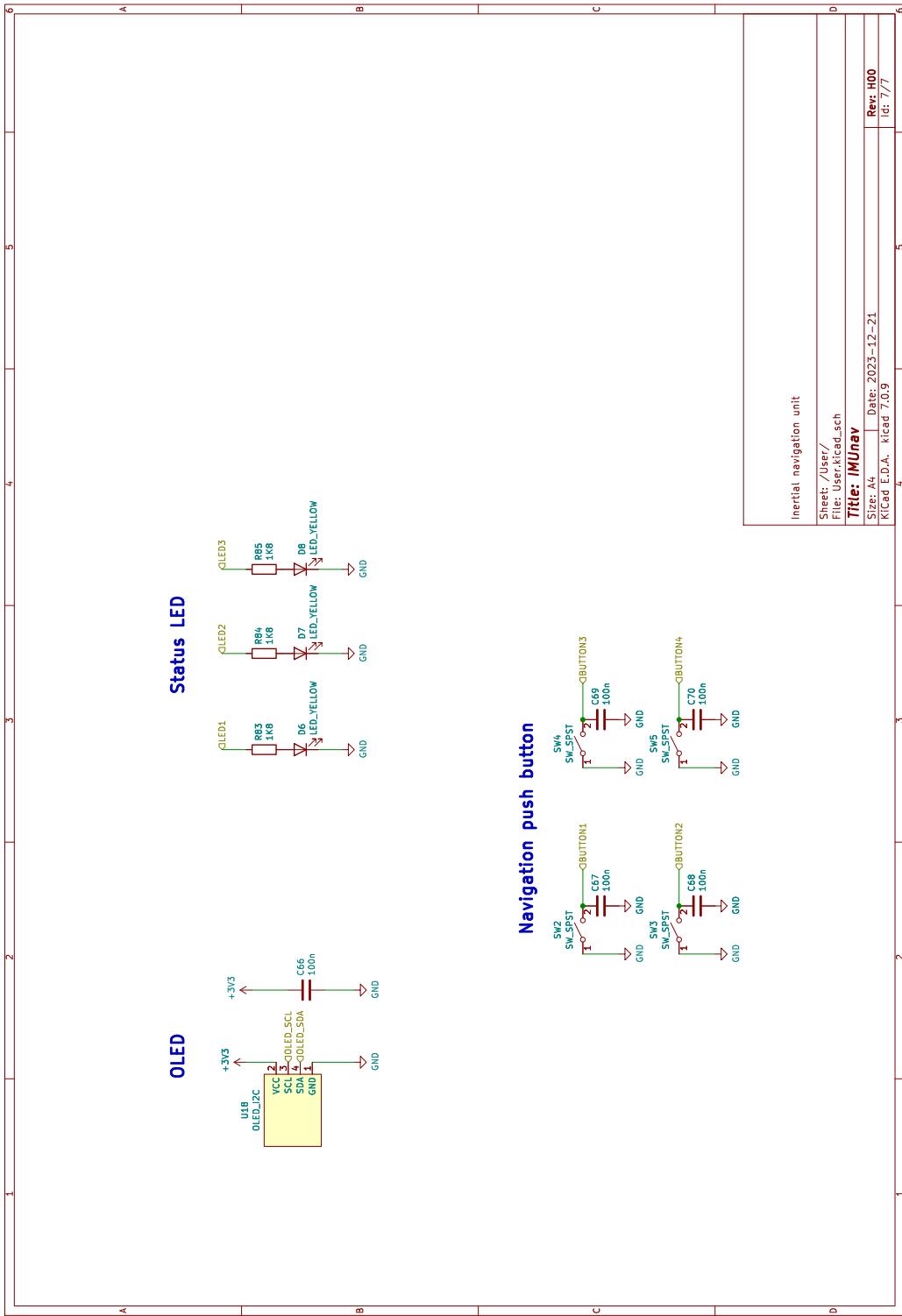






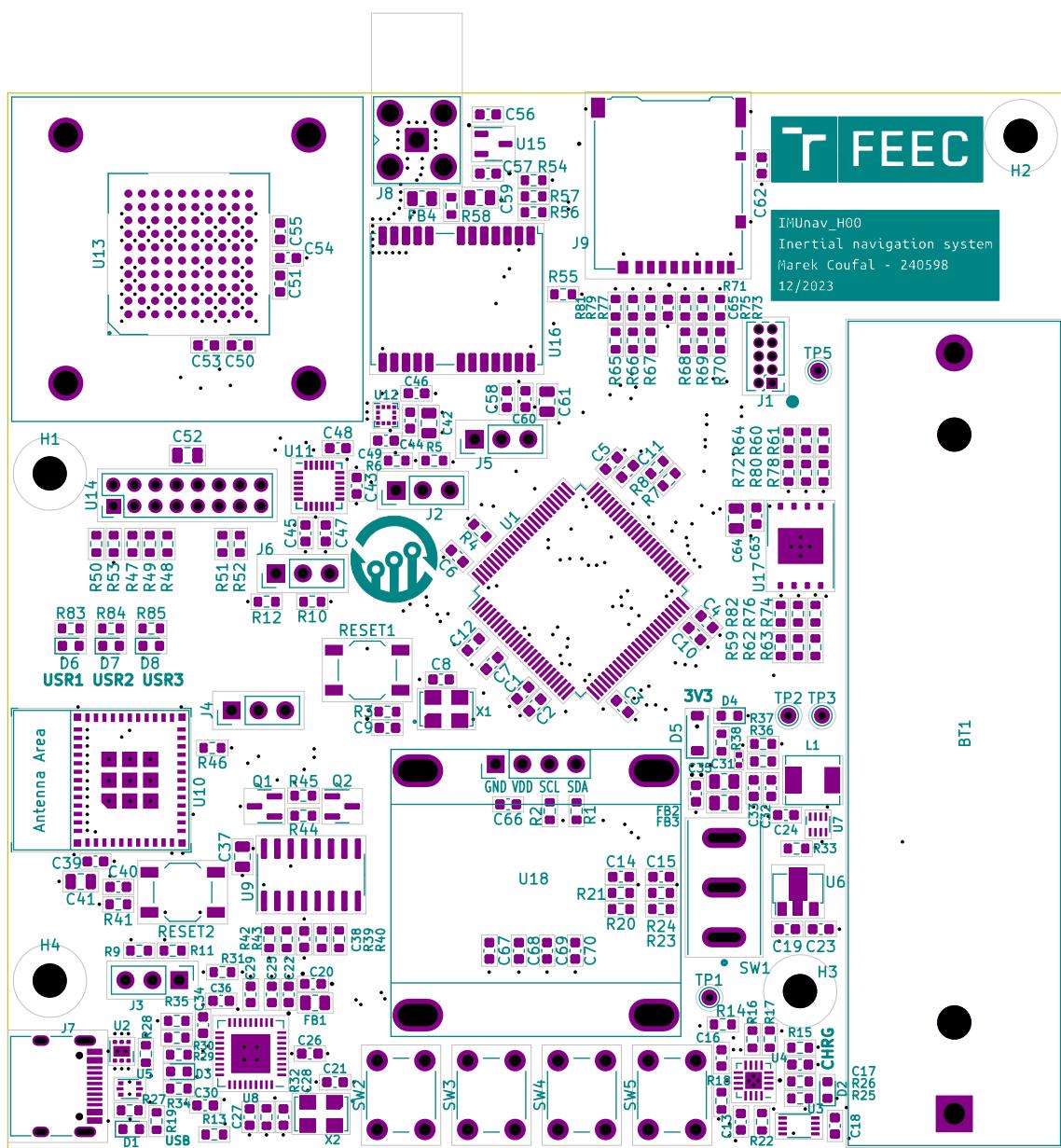




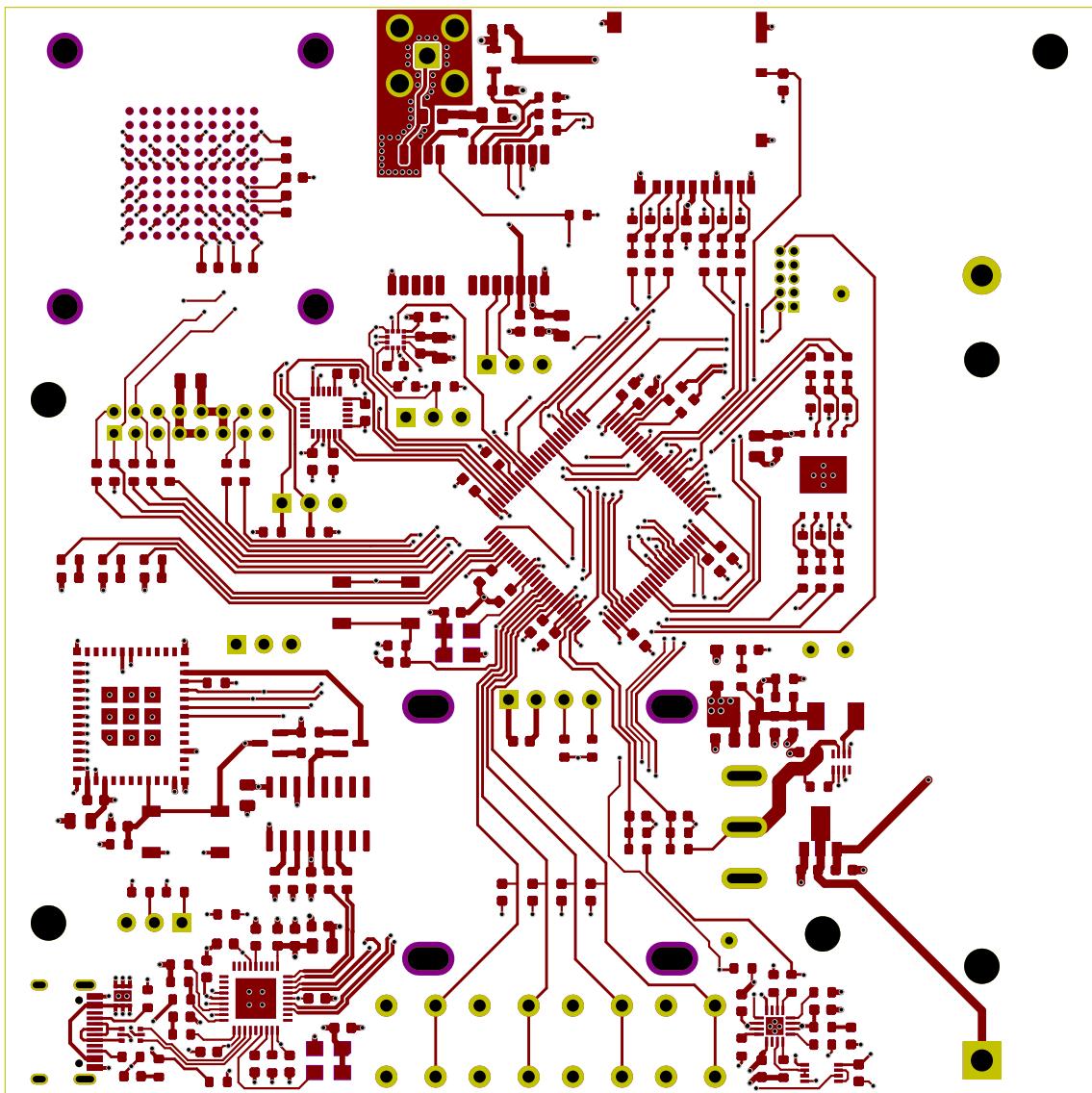


B Výkres DPS

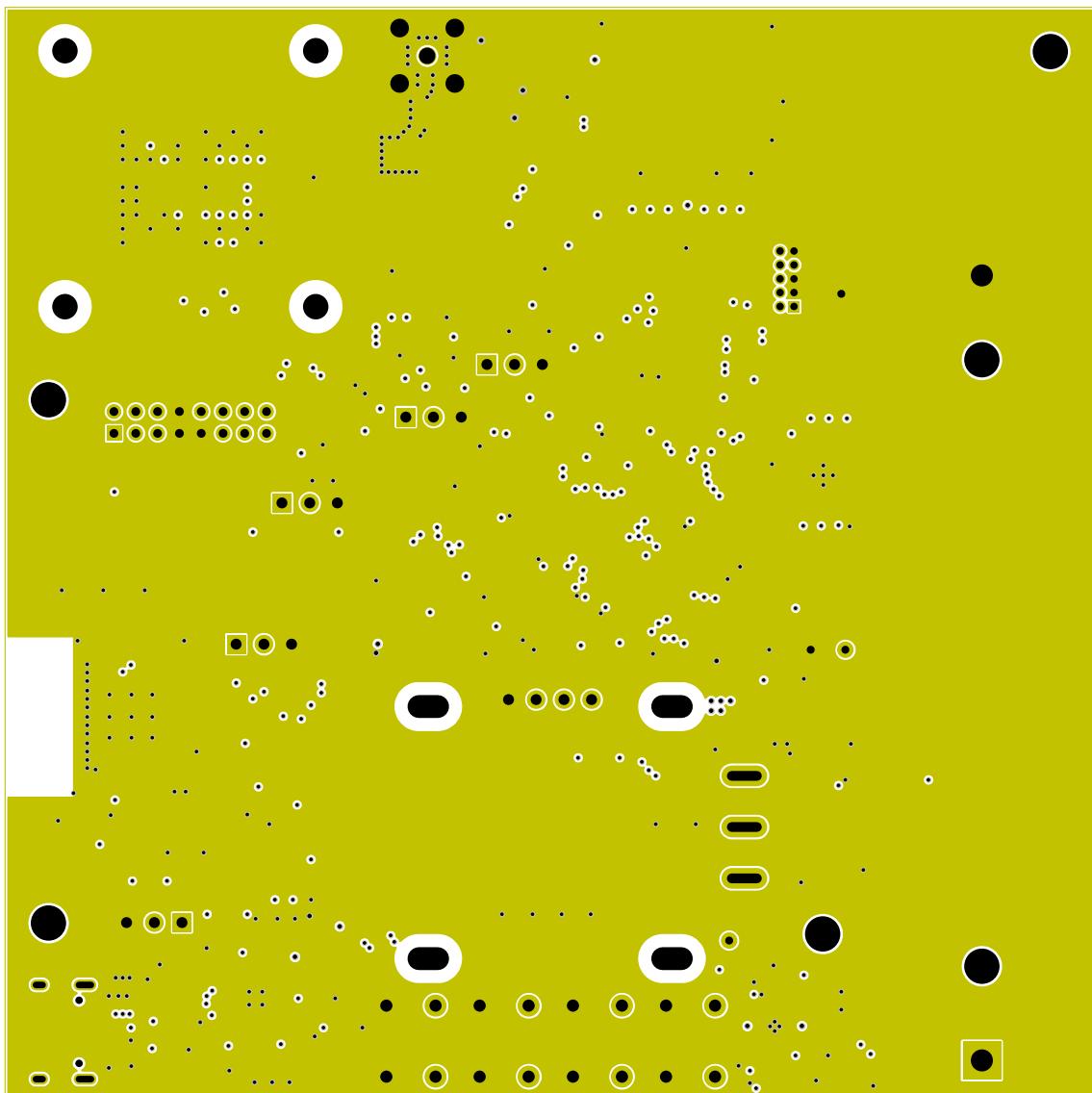
B.1 Pohled osazení součástek



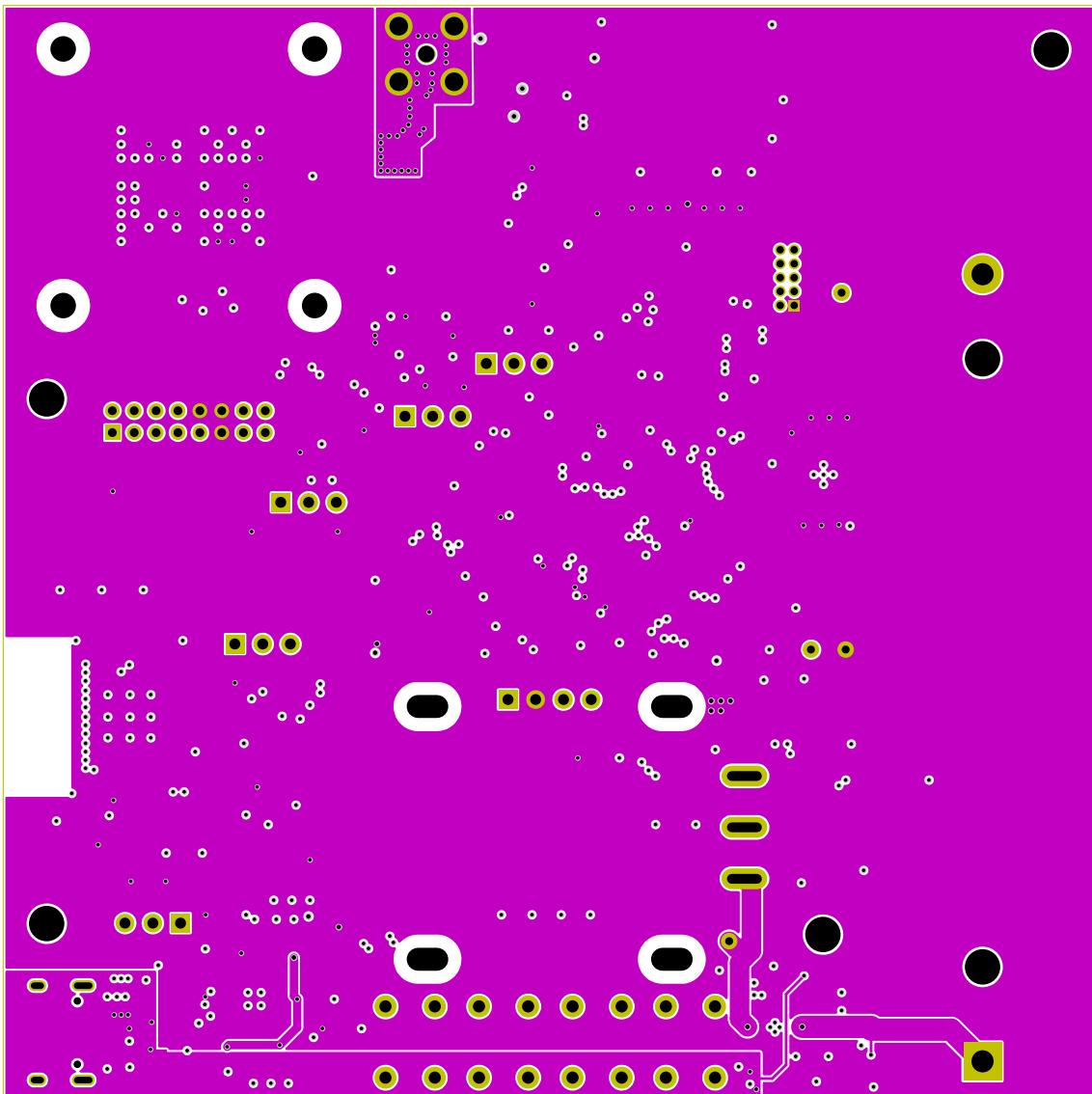
B.2 Vrchní vrstva mědi DPS



B.3 Vnitřní vrstva mědi DPS In1



B.4 Vnitřní vrstva mědi DPS In2



B.5 Spodní vrstva mědi DPS

