

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrotechniky a počítačového modelování

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Monitorování letu padákového kluzáku

Autor práce: **Lukáš Třasák**
Vedoucí práce: **Lenka Šroubová**

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Lukáš TŘASÁK**
Osobní číslo: **E19B0122P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Téma práce: **Monitorování letu padákového kluzáku**
Zadávací katedra: **Katedra elektroniky a informačních technologií**

Zásady pro vypracování

1. Prostudujte kinematiku a dynamiku letu padákového kluzáku.
2. Navrhněte a realizujte zařízení pro měření parametrů letu padákového kluzáku.
3. Analyzujte a vizualizujte získaná data.
4. Zhodnoťte obdržené výsledky.



Rozsah bakalářské práce: **30 – 40**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- YOTOV, Nikolay a Nikolay TSAROV. Aerodynamics Theory for Beginners Paragliding Pilots. SkyNomad [online]. 2013 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <http://skynomad.com/articles/beginners-aerodynamics.html>
- Obergruber, Julian & Mehnen, Lars. (2016). Development of a Paraglide Control System for Automatic Pitch Stabilization to Increase the Passive Safety. Procedia Engineering. 147. 26-31. 10.1016/j.proeng.2016.06.184.
- How do paraglider controls work? [online]. Aviation, 2018, 14.1.2018 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://aviation.stackexchange.com/questions/47514/how-do-paraglider-controls-work>

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lenka Šroubová, Ph.D.**
Katedra elektrotechniky a počítačového modelování

Datum zadání bakalářské práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2022**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce řeší návrh a realizaci měřicího zařízení pro měření parametrů letu reálného padákového kluzáku. V rámci této práce byla zpracována řešení na téma kinematiky a dynamiky padákového kluzáku, následně je popsána problematika návrhu hardwaru a softwaru pro sběr dat.

Nejdříve práce seznamuje se základy dynamiky a kinematiky letu. Druhá část již představuje realizaci měřicího zařízení, pro které je navržen konkrétní hardware a software pro sběr dat. Třetí část se zabývá zpracováním získaných dat. Zpracovaná data jsou po té vizualizována a analyzována.

Klíčová slova

let, padákový kluzák, senzory, Arduino, aerodynamika a kinematika letu, deska plošných spojů

Abstract

This bachelor work solves a proposition and a realization of hardware for measuring real paragliding. There has been elaborated a recherche of Aerodynamic and kinematics paragliding. within the framework of this work. Then there is described a problematic of hardware and software for collecting data.

At first it is necessary to make an acquaintance with bases of flight dynamics and kinematics. The second part already presents a the implemantation of the measuring box for that it was proposed a needful hardware and software for data collection. The third part deals with the processing of the obtained data. The processed data are then visualized and analyzed.

Key Words

flight, paraglider, sensors, Arduino, aerodynamic and kinematic of flight, circuit board

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software použitý při řešení této bakalářské práce je legální, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury.



Podpis

V Plzni dne 25.5.2022

Lukáš Třasák

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí bakalářské práce Ing. Lence Šroubové Ph.D. a konzultantovi Ing. Petru Kropíkovi Ph.D. za cenné rady, připomínky a nápady vedoucí k realizaci této práce.

Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Proudění vzduchu kolem křídla a jeho aerodynamická síla	- 2 -
1.1 Zákon zachování energie pro proudění	- 4 -
1.2 Pohyb vpřed.....	- 5 -
1.3 Klouzavý let	- 7 -
1.4 Ovládání padákového kluzáku	- 8 -
2 Konstrukce měřicího zařízení	- 9 -
2.1 Senzory	- 9 -
2.2 Paměť	- 12 -
2.3 Arduino Nano	- 13 -
2.4 Napájecí zdroj	- 14 -
2.5 Návrh a výroba desky plošných spojů.....	- 15 -
2.6 Výroba krabičky	- 18 -
2.7 Software	- 19 -
3 Analýza a vizualizace změřených dat.....	- 21 -
3.1 Orientace os senzorů	- 21 -
3.2 Zpracování získaných dat.....	- 23 -
3.3 Analýza a vizualizace dat ze senzorů	- 24 -
Zhodnocení a závěr	- 30 -
Literatura.....	I
Seznam obrázků.....	III
Přílohy.....	III

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Popisek	Jednotka
α	úhel náběhu	[°]
ρ	hustota	[kg/m ³]
ω	úhlová rychlost	[rad/s]
a	tíhové zrychlení	[g]
B	magnetické pole	[G]
f	frekvence	[Hz]
I	proud	[A]
R	výsledná aerodynamická síla	[N]
S	průřez	[m ²]
t	čas	[s]
U	napětí	[V]
v	rychlost	[m/s]
V	objem	[m ³]

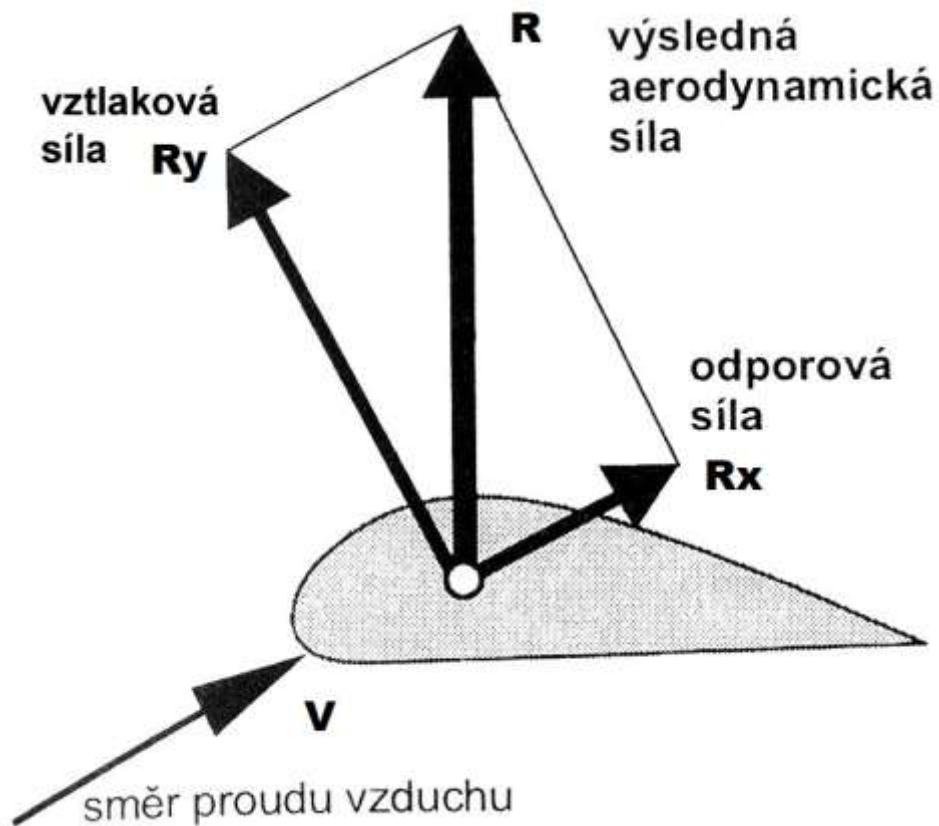
Úvod

Cílem bakalářské práce je získání dat reálného padákového kluzáku, realizace měřicího zařízení pro měření různých veličin, který zachytí pohyb padákového kluzáku. Důvodem k výběru daného tématu je získaná data implementovat do softwarové simulace padákového kluzáku. Simulátor letu kluzáku ve volném prostoru se vyvíjí proto, aby začínající i pokročilí piloti měli možnost bezpečně cvičit nestandardní letové stavy nebo přistání v neznámých letových terénech. Simulátor letu zvyšuje bezpečnost a snižuje rizika zranění pilotů padákových kluzáků. Aby simulátor dokázal věrně simulovat stavy způsobené pilotními chybami, je třeba získat data z reálného letu kluzáku.

V první kapitole bakalářské práce bude vypracována rešerše na téma dynamika a kinematika letu padákového kluzáku. V druhé kapitole bude popsán proces vývoje měřicího zařízení čili výběr senzorů, mikropočítače, zdroje a paměti. Po té je uvedena následná výroba plošného spoje včetně návrhu krabičky na zařízení. V závěru mé práce je popsáno vytvoření vhodného softwaru pro měřicí zařízení. V poslední kapitole budou změřená data zpracována a bude určena orientace a citlivost jednotlivých senzorů následně změřená data budou vizualizována.

1 Proudění vzduchu kolem křídla a jeho aerodynamická síla

U každého předmětu, který se pohybuje vzdušným prostředím, zpravidla dochází ke vzájemné interakci. To má za následek vznik aerodynamických sil, které působí na směr šíření. Každá síla může být rozdělena do složek v dané soustavě souřadnic. V aerodynamice je výsledná aerodynamická síla znázorněna přes směr pohybu (daného vektorem rychlosti v). Kolmice ke složce v se nazývá vztlaková síla R_y a na ní kolmá síla, rovnoběžná se směrem v , se nazývá odporová síla R_x , viz obr. 1.1. [1, 2, 11]

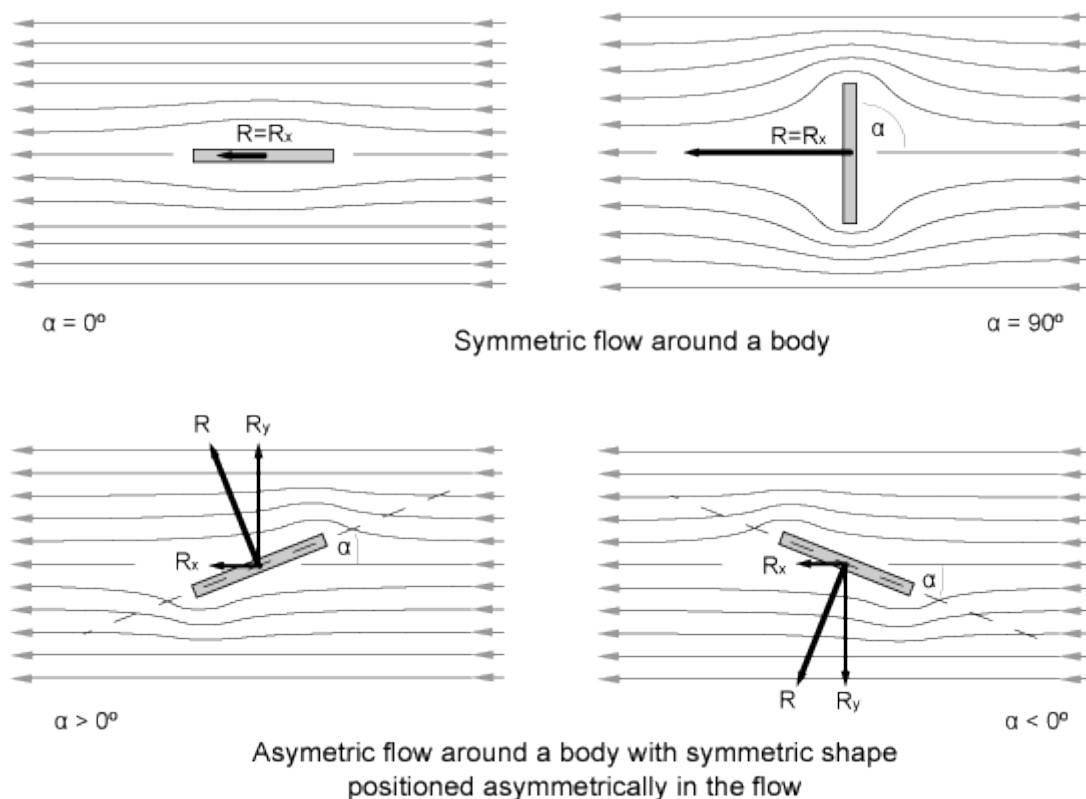


Obr. 1.1: Rozložení sil v aerodynamice [2]

Vztlak a odpor jsou vhodné pro popis, jak křídlo funguje. Křídlo má větší efektivitu, pokud produkuje větší vztlak a menší odpor. [1]

Vztlak lze vytvořit:

- prouděním vzduchu kolem asymetricky umístěného tělesa
- prouděním vzduchu kolem tělesa s asymetrickým tvarem.
- kombinací obojího – proudění vzduchu kolem asymetricky umístěného těla s asymetrickým tvarem.

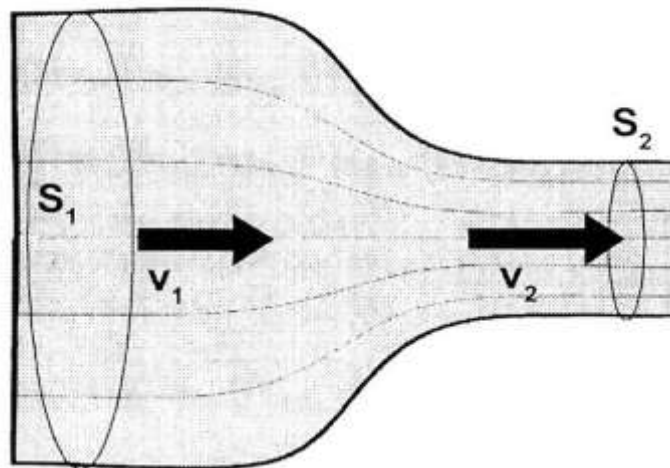


Obr. 1.2: Proudění vzduchu kolem těles [1]

Z obrázku 1.2 je vidět, že asymetricky umístěné těleso do proudu vzduchu způsobí vznik vztlaku a na jeho povrchu vytvoří aerodynamickou sílu, která je kolmá k jeho povrchu. Úhel mezi povrchem tělesa a směrem proudění se nazývá úhel náběhu α a je velice důležitým letovým parametrem, který určuje velikost a náklon plné aerodynamické síly. Se vzrůstajícím se úhlem náběhu roste vztlak. U většího úhlu náběhu ale zároveň roste odpor a tím se snižuje rychlost obtékání a následně klesá také vztlak. Úhel náběhu znamená velikost a poměr mezi její vztlakovou a klesající složkou. [1, 10]

1.1 Zákon zachování energie pro proudění

Pro určení velikost vztlaku vytvoření prouděním vzduchu kolem asymetricky tvarovaného tělesa, uvedeme zákon o zachování energie pro proudění. V důsledku, kde je proudění omezeno, zvyšuje svou rychlost v a naopak viz obr. 1.3. Tento zákon pro proudění vychází z Bernoulliho rovnice pro kapaliny [1, 2, 10].



Obr. 1.3: Zákon o zachování energie pro proudění [2]

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 \quad (1.1)$$

Klasické profily křídla mají konvexní horní plochu, která působí jako překážka. Dochází ke zmenšení průřezů a ke zvýšení rychlosti proudění. Vzniká prostředí sníženého tlaku. Rychlost pohybu křídla vzduchem se nazývá vzdušná rychlost v . Rychlost vzduchu a aerodynamická síla existují, pokud se křídlo pohybuje vzduchem nebo se vzduch pohybuje kolem stacionárního křídla. [1, 2, 10]

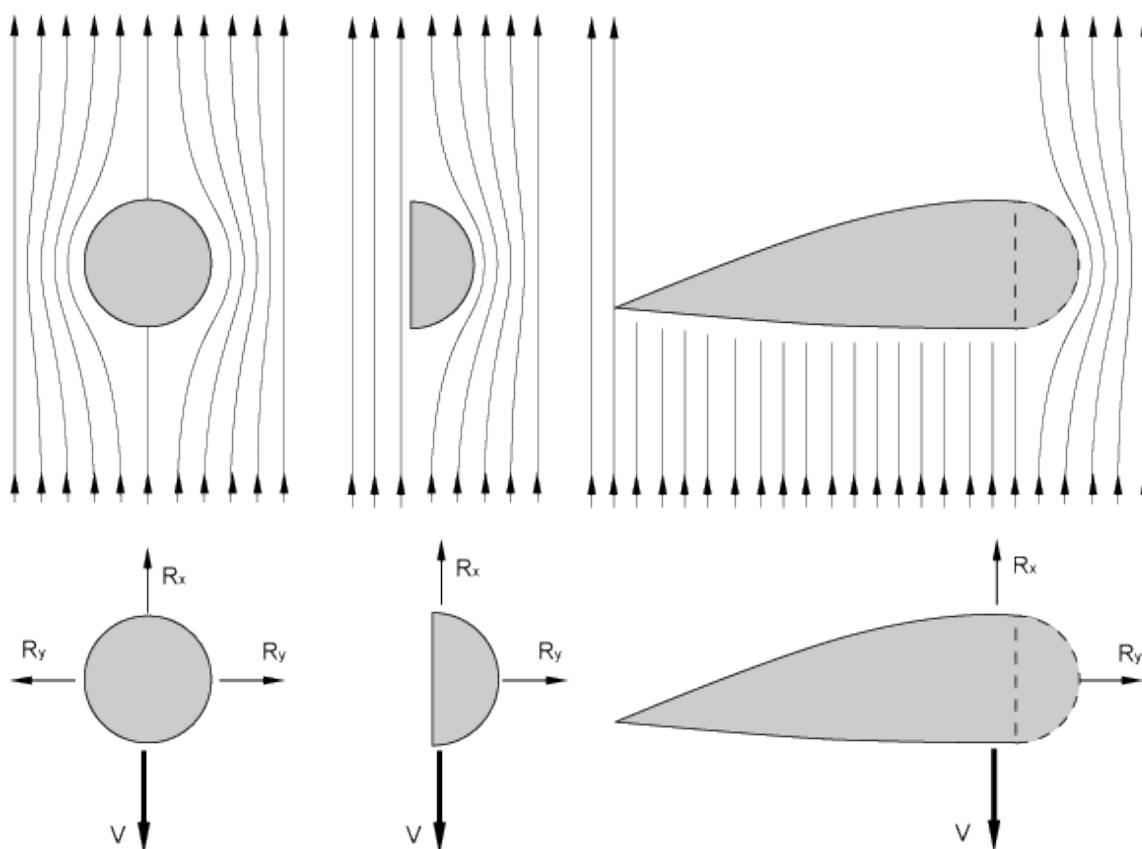
Aerodynamická síla R závisí na:

- tvaru profilu
- tvaru a rozměry křídla při pohledu shora
- povrch křídla S
- úhel náběhu α
- druhá mocnina vzdušné rychlosti v^2
- hustotě vzduchu ρ .

Zvýšení úhlu náběhu přímo zvyšuje produkci vztlaku, ale za určitým úhlem náběhu se proudění nad horním povrchem prudce odtrhne od křídla a křídlo ztratí většinu svého vztlaku. Dojde k zablokování a křídlo neletí, ale padá vysokou vertikální rychlostí dolů [1].

1.2 Pohyb vpřed

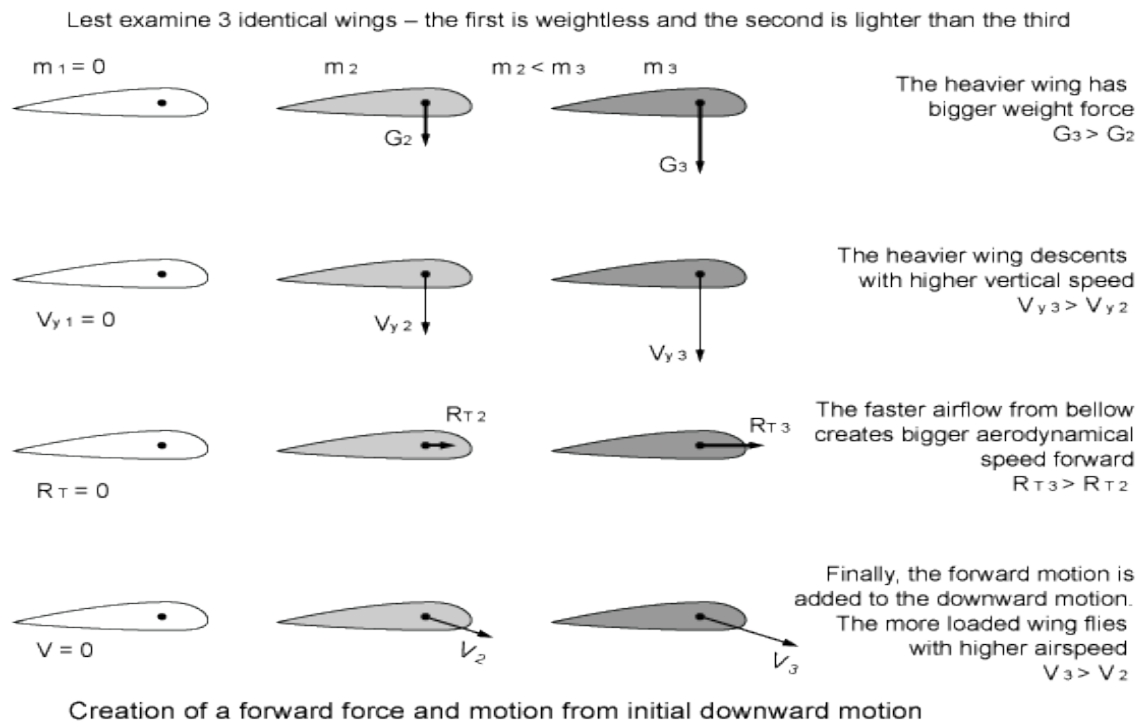
Nyní víme, jak proudění kolem křídla vytváří aerodynamickou sílu, která nás drží ve vzduchu. Důvodem, proč můžeme létat vpřed bez hnacího mechanismu (motor) je dáno křídlem. Křídlo má schopnost transformovat pohyb dolů na sílu pohybu dopředu. Pokud například vložíme do proudění těleso s kruhovým symetrickým profilem, jeho zrychlení proudění na jeho stranách vyvolá dvě vyvážené boční vztlakové síly R_y . Pokud je těleso s asymetrickým půlkruhovým profilem, bude boční síla R_y nevyvážená (Pohyb dolů vyrobí boční sílu a pohyb). Stejná analogie platí pro klasický profil křídla, kde zaoblení kolem náběžné hrany vytváří dopředné sání [1, 10].



Transformation of downward motion into sideways force R_y

Obr. 1.4: Transformace pohybu dolů na boční sílu R_y [1]

Pohyb dolů je obvykle řízen silou váhy, takže beztlížné křídlo nemůže letět dopředu a čím více je křídlo zatíženo, tím větší sílu a pohyb vpřed vytváří. [1]



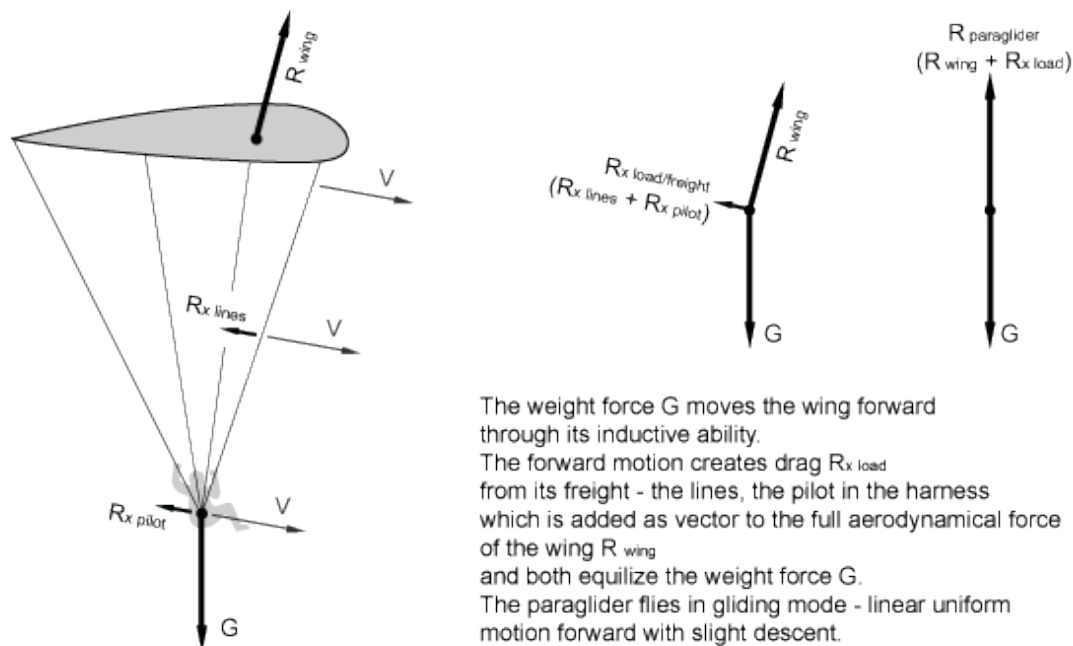
Obr. 1.5: Vytvoření dopředné síly a pohybu z počátečního pohybu dolů [1]

Křídlo má schopnost transformovat zpočátku kolmo k jeho povrchovému pohybu do dopředné síly. Tato takzvaná indukční schopnost závisí na: [1, 10]

- tvaru profilu, schopnost je výraznější s profily tickeru kolem náběžné hrany,
- rychlosti vzduchu, platí, čím vyšší tím větší síla,
- úhlu náběhu, příliš velké úhly náběhu nejsou dobré, protože zabírají pouze malou část plochy křídla.

1.3 Klouzavý let

Indukční schopnost nemůže zrychlit křídlo donekonečna. Čím více se přidá pohyb vpřed, tím více se zmenšuje úhel náběhu a tím i indukční schopnost. Nárůst rychlosti vzduchu také zvyšuje odpor prvků nesených křídlem (šňůry, tělo pilota, postroj). V určitém okamžiku je tak dosaženo silové rovnováhy a vytvořen klouzavý let – rovnoměrný lineární pohyb vpřed s mírným klesáním. [1, 11]



The weight force G moves the wing forward through its inductive ability. The forward motion creates drag $R_{x\ load}$ from its freight - the lines, the pilot in the harness which is added as vector to the full aerodynamical force of the wing R_{wing} and both equilibrate the weight force G . The paraglider flies in gliding mode - linear uniform motion forward with slight descent.

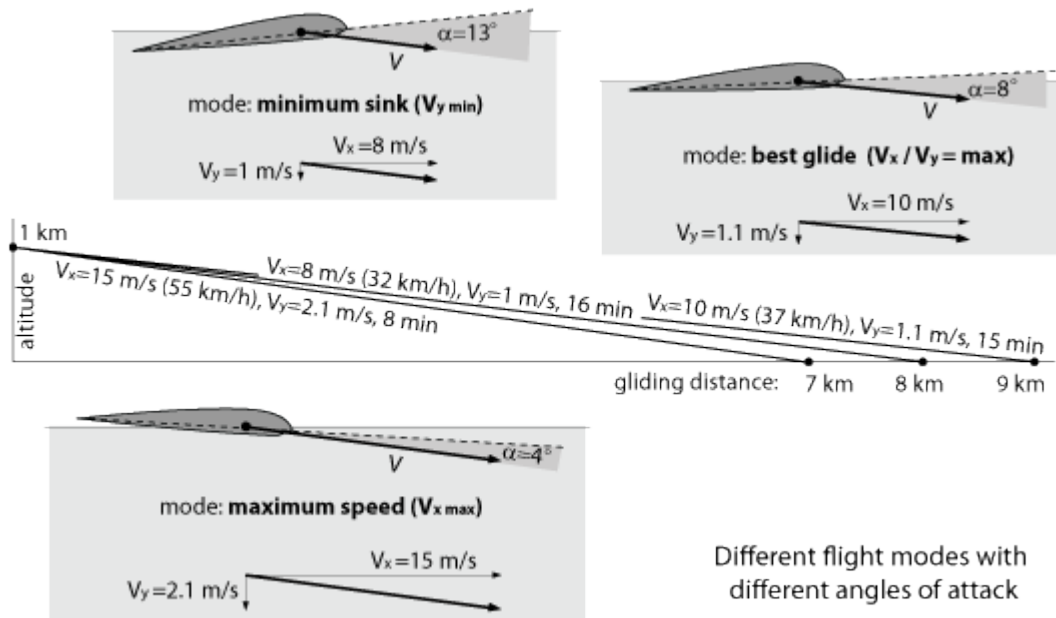
Obr. 1.6: Vznik klouzavého letu [1]

Obvykle kluzáky během klouzavého letu nemění svou hmotnost, a i když k tomu dojde (např. při odpadnutí zátěže), nemění to poměr mezi působícími silami. Poměry jsou určeny konstrukcí křídla a lze je změnit pouze změnou úhlu náběhu. [1, 11]

Úhel náběhu se zvyšuje přitážením brzd, které sklopí odtokovou hranu a zvětší křivku profilu. Kluzák přejde do nového letového režimu s nižší rychlostí a klesáním a strmější trajektorií klouzání. V určitém bodě je dosaženo režimu minimálního potopení (v_{ymin}), což dává maximální dobu letu t . Pokud budeme neustále přitahovat brzdy a zvyšovat úhel náběhu, dosáhneme minimální nebo pádové rychlosti. [1, 11]

Úhel náběhu lze zmenšit pomocí speed systému, kdy zatlačením na třmen nohama se táhne lano, které postupně stahuje stoupačky. Speed systém zvětší rychlost na úkor stability křídla. Křídlo přejde do nového letového režimu s vyšší rychlostí a klesáním a strmější

trajektorií klouzání. S plně aplikovaným speed systémem dosáhneme minimálního úhlu náběhu a režimu maximální rychlosti (v_{xmax}). Po úplném uvolnění brzd nebo speed systému se obnoví trimová rychlost. Vyvážený (trim) letový režim je obvykle režim nejlepšího klouzavého poměru. Poskytuje maximální klouzavou vzdálenost. [1, 10, 11]



Obr. 1.7: různé letové režimy s různými úhly náběhu [1]

Režim nejlepšího klouzavého poměru:

$$\frac{v_x}{v_y} = v_{max} \tag{1.2}$$

1.4 Ovládání padákového kluzáku

Padákový kluzák má aerodynamický a balanční typ řízení. Aerodynamickým řízením je aktivace (pohyb, ohnutí, složení) určité části plochy křídla, čímž se změní velikost a směrovost aerodynamické síly. [1, 10]

Vyvážené řízení vyrovnává síly G a aerodynamické síly R , dokud není dosaženo nového vyvážení. Nevyváženosti se dosáhne posunutím středu síly (posun váhy). [1]

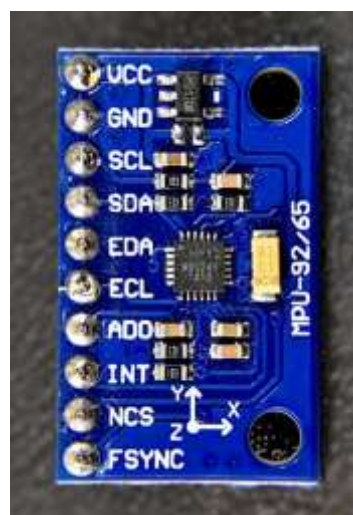
Brzdy padákového kluzáku jsou aerodynamické ovládací prvky, které fungují následujícím způsobem. Tah obou brzd rovnoměrně, sklopí odtokovou hranu a vytvoří odpor, který zpomalí kluzák vůči pilotovi a zvětší úhel náběhu. Zvětšený úhel náběhu dočasně zvýší vztlak, ale také zpomalí celý padákový kluzák. Pokud brzdy zůstanou stažené v konstantní poloze, po krátkém přechodu padákový kluzák nastaví nový letový režim se zvýšeným úhlem náběhu, sníženou rychlostí a strmější trajektorií klouzání. [1, 11, 12]

2 Konstrukce měřícího zařízení

Měřící zařízení musí zachytit co nejlépe reálný let padákového kluzáku. Zařízení bude obsahovat senzory pro změření veličin, která musí být zpracována pomocí mikrokontrolérů. Výsledná data se uloží do paměti. Potřebujeme napájecí zdroj, který bude dodávat dostatečnou energii pro senzory a obvody, které budou zpracovávat data ze senzorů.

2.1 Senzory

Pro zachycení pohybu bude vhodné použít několik senzorů. Bude potřeba akcelerometr, který bude udávat zrychlení v daných souřadnicích. Zrychlení se získá pomocí měření kapacity mezi pevnou a pohyblivou částí plotny. Pohyblivá část reaguje na změnu zrychlení. Změnu kapacity převádíme na zrychlení pomocí softwaru. Gyroskop obsahuje setrvačnick, který zachovává polohu osy své rotace v inerciálním prostoru. Gyroskop měří úhlovou rychlost tedy změna úhlu pootočení za určitý čas a využitím Coriolisovy síly. Při pohybu tělesa ve směru vektoru vystavení tělesa vnějšímu otáčení dochází k tomu, že na těleso působí Coriolisova síla. Tato změna působí na změnu kapacity, která se dá změřit a zpracovat podobně jako u akcelerometru. Magnetometr slouží pro měření velikosti a směru magnetické indukce nebo magnetického momentu. Tyto senzory dokážou určit směr a rychlost pohybu. Zmíněné tři veličiny dokáže změřit MPU-9250 modul (tříosý akcelerometr, tříosý gyroskop a tříosý magnetometr). [8]



Obr. 2.1: Modul MPU-9250 [9]

Třiosý akcelerometr MEMS v MPU-9250 zahrnuje širokou škálu funkcí:

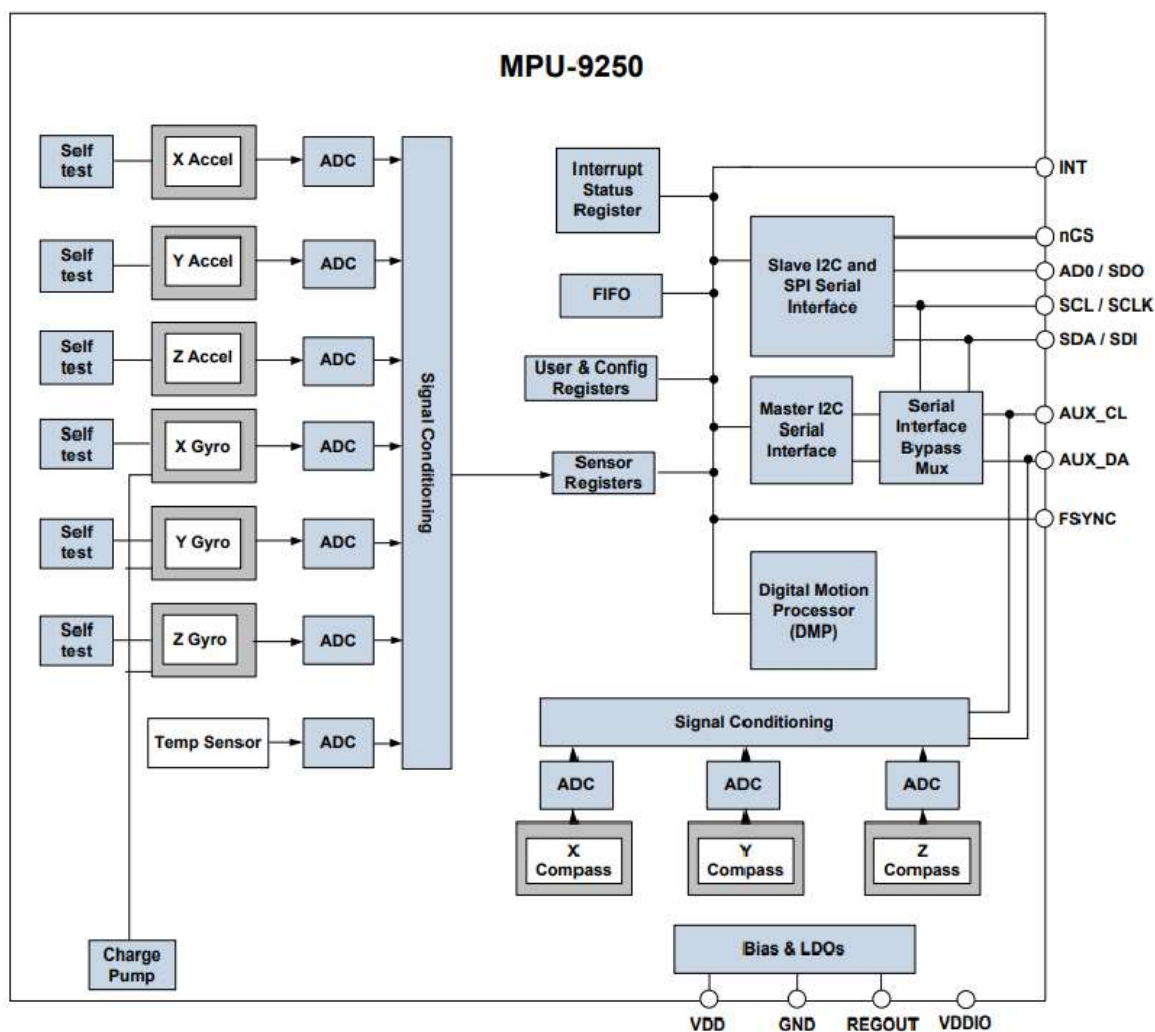
- Digitální výstup třiosý akcelerometr s programovatelným rozsahem $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ a $\pm 16g$ a integrované 16bitové ADC
- Normální provozní proud akcelerometru: $450 \mu A$
- Proud v režimu nízkoenergetického akcelerometru: $8,4 \mu A$ při $0,98 \text{ Hz}$, $19,8 \mu A$ při $31,25 \text{ Hz}$
- Proud v režimu spánku: $8 \mu A$
- Uživatelsky programovatelná přerušení
- Selftest

Třiosý gyroskop MEMS v MPU-9250 zahrnuje širokou škálu funkcí:

- Digitální výstupní snímače úhlové rychlosti osy X, Y a Z (gyroskop) s uživatelsky programovatelným rozsahem plného rozsahu ± 250 , ± 500 , ± 1000 a $\pm 2000 \text{ }^\circ/\text{s}$ a integrované 16bitové ADC
- Digitálně programovatelný dolní propust
- Provozní proud gyroskopu: $3,2 \text{ mA}$
- Proud v režimu spánku: $8 \mu A$
- Továrně kalibrovaný faktor stupnice citlivosti
- Selftest

Trojosý magnetometr MEMS v MPU-9250 zahrnuje širokou škálu funkcí:

- 3osý silikonový monolitický magnetický senzor s Hallovým efektem s magnetickým koncentrátorem
- Široký dynamický rozsah měření a vysoké rozlišení s nižší spotřebou proudu.
- Rozlišení výstupních dat 14 bitů ($0,6 \mu T/\text{LSB}$) nebo 16 bitů ($15 \mu T/\text{LSB}$)
- Rozsah měření v plném rozsahu je $\pm 4800 \mu T$
- Normální provozní proud magnetometru: $280 \mu A$ při opakovací frekvenci 8 Hz
- Selftest



Obr. 2.2: Blokové schéma MPU-9250 [3]

Nyní uvádím jednoduchý popis funkce blokového schématu MPU-9250, viz Obr. 3.2. Nejdříve popíši selftest, který umožňuje testování mechanických a elektrických částí senzorů. Když je selftest aktivován, elektronika způsobí aktivaci senzorů a vytvoří výstupní signál. Výstupní signály z měřených veličin jsou převedeny z analogového signálu na digitální signál pomocí 16bitového A/D převodníku. Signál se převádí na digitální, protože je odolnější vůči vnějšímu a vnitřnímu rušení. Převedení digitální signál jde do Registru dat senzorů, které jsou určeny pouze pro čtení a jsou přístupné přes sériové rozhraní. MPU-9250 komunikuje se systémovým procesorem pomocí sériového rozhraní SPI nebo I2C. MPU9250 vždy funguje jako slave při komunikaci se systémovým procesorem. Data z těchto registrů lze číst kdykoli. Rychlost komunikace I2C je 400 kHz Fast Mode a SPI při rychlosti 1 MHz pro sériové rozhraní pro komunikaci se všemi registry. Ve schématu se ještě nachází nábojová pumpa pro vytvoření potřebného napětí pro Mems. Ve schématu můžeme vidět také bezadresovou paměť Fifo. [3]

Změna nadmořské výšky padáku se dokáže nepřímo změřit pomocí barometru. Barometr je přístroj k měření atmosférického tlaku. Na základě změny výšky padáku dochází ke změně atmosférického tlaku, tudíž jsme pomocí změny tlaku schopni vyhodnotit výšku padáku. Zvolil jsem pro měření tlaku modul BME-280.



Obr. 2.3: BME-280 [3]

(Zdroj:)

BME-280 modul dokáže změřit tlak v rozsahu 300 až 1100 hPa s přesností ± 1 Pa. Rozsah provozních teplot je -40 až 85 °C. Modul dokáže změřit i vlhkost, ale ten není prozatím žádaný pro analýzu letu padákového kluzáku. [3]

BME 280 funguje podobně jako MPU9250. Nejdříve změřené hodnoty se převedou na digitální hodnoty. BME komunikuje se systémovým procesorem pomocí sériového rozhraní SPI nebo I2C.

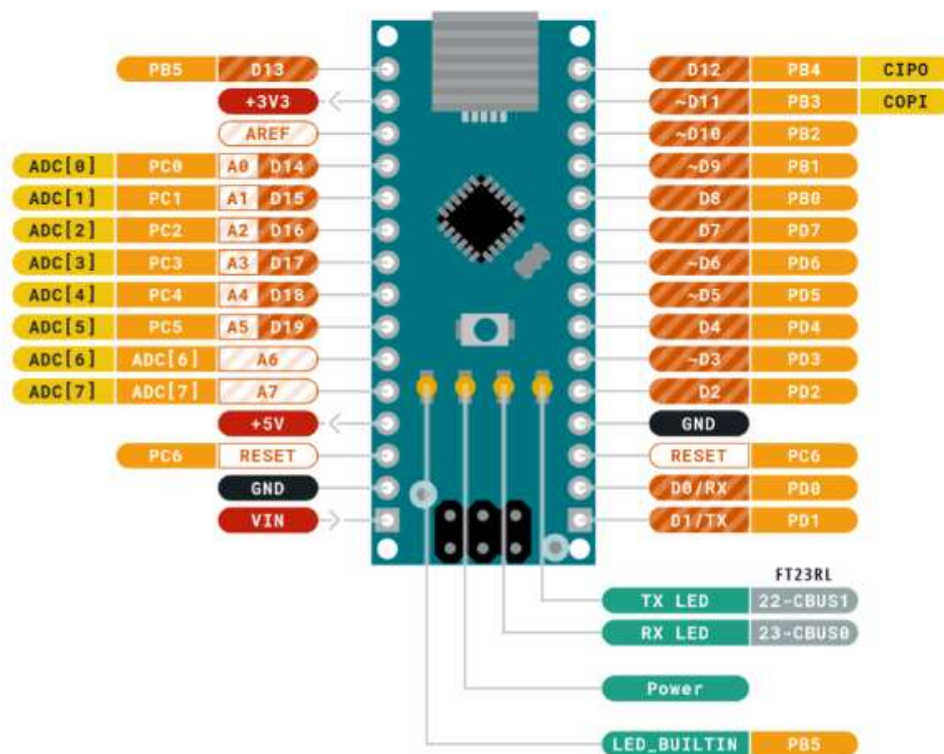
Oba moduly mají napájecí napětí 3 až 5 voltů dále součástí modulu je komunikace I2C a SPI v řádu stovek kHz. Rychlost je dostatečná pro přenos dat v reálném čase.

2.2 Paměť

Pro správné využití zařízení je třeba uložit změřená data do paměti. Musíme zvolit vhodnou paměť. Potřebujeme znát její zapisovací rychlost a velikost paměti, aby nedošlo ke ztrátě změřených dat. Původně jsem zvolil EEPROM, ale její zapisovací rychlost a velikost paměti byla nedostatečná. Proto jsem zvolil čtečku karty, kam se připojí SD karta. Čtečka karty umožňuje snadné vyjmutí SD karty, potom data jsou přečtena počítačem a analyzována.

2.3 Arduino Nano

Arduino Nano je elektronická platforma založená na jednoduchém hardwaru i softwaru. Jeho jádro je mikrokontrolér ATmega328 časovaným krystalem 16 MHz. Na Arduino se nachází 14 digitálních vstupních/výstupních pinů, 6 z nich generuje pulzy PWM (pulzně šířková modulace). Arduino Nano obsahuje 6 analogových vstupů osazenými 10-bitovými A/D převodníky.



Obr. 2.4: Arduino Nano [5]

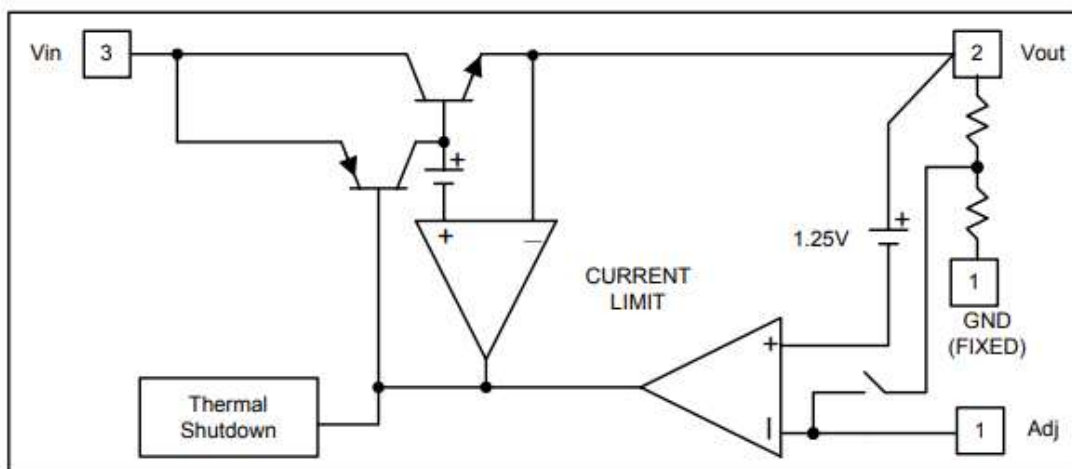
Na desce je umístění USB konektor sloužící pro sériovou komunikaci Arduina s počítačem. Napájení Arduino Nano je zajištěno dvěma možnými způsoby: pomocí USB konektoru nebo pomocí drátového propojení.

Technická data Arduina:

- Mikrokontrolér: ATmega328
- Takt procesoru: 16 MHz
- Pracovní napětí: 5 V
- Vstupní napětí (doporučené): 7 – 12 V
- Digitální I/O piny: 14 (6 s podporou PWM)
- Analogové vstupní piny: 8
- Proudové zatížení I/O pinu: 20 mA
- Flash paměť: 32 KB, z toho 2 KB zabírá bootloader
- SRAM: 2 KB
- EEPROM: 1 KB

2.4 Napájecí zdroj

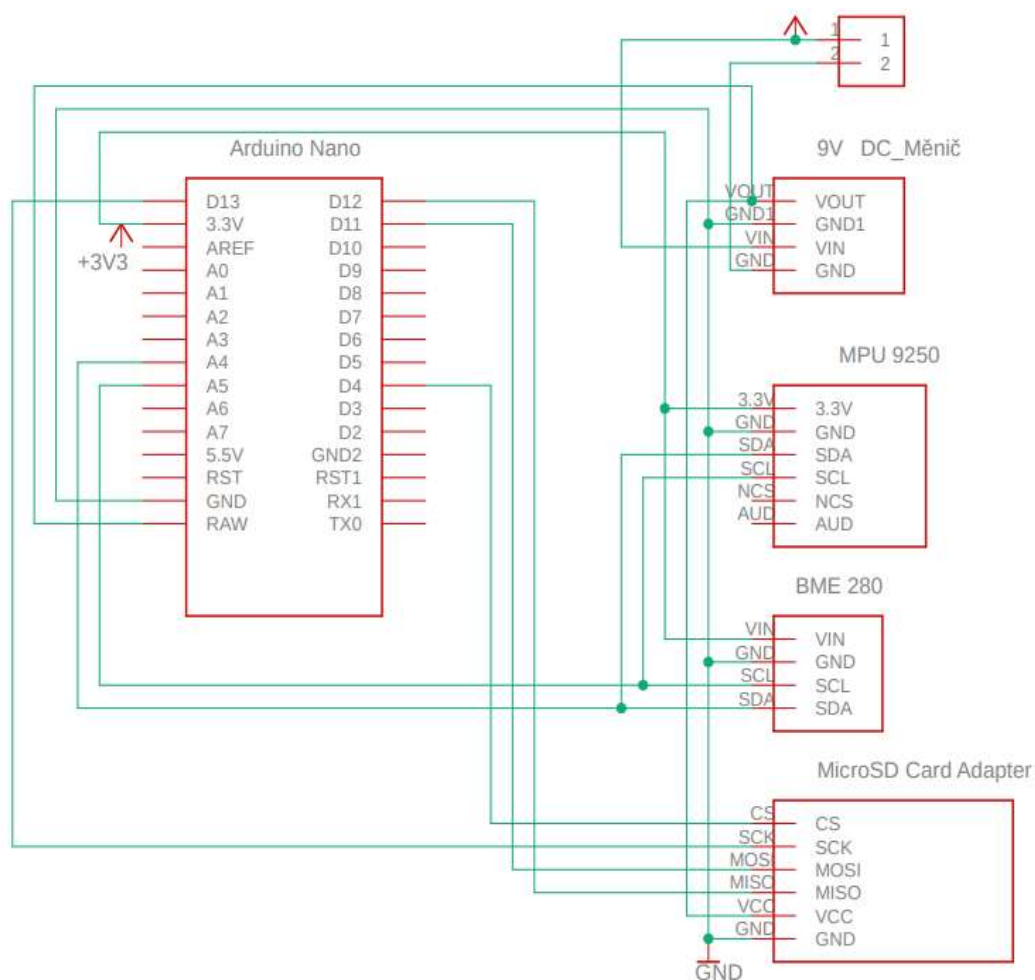
Napájecí úrovně modulů jsou 3 až 5 V. Bude vhodné použít stabilizátor, který snižuje výstupní napětí vzhledem ke vstupu. Zvolil jsem stabilizátor Ams1117. Princip je založen na porovnání požadovaného napětí s referenčním napětím pomocí komparátoru. Výstupní napětí komparátoru je přivedeno na bázi tranzistoru. Tranzistor reguluje výstupní napětí. Výhoda stabilizátoru je, že se snaží hlídat výstupní napětí s požadovaným referenčním napětím čili 5 V. Na výstupu máme hodnotu napětí 5 V a bude držet téměř konstantní napětí i při změně zátěže. Na vstup stabilizátoru musíme přivést větší napětí v rozsahu 6 až 12 Voltů. Použil jsem 9 V baterii, která odpovídá vstupnímu rozsahu.



Obr. 2.5: Blokové schéma Ams1117 [6]

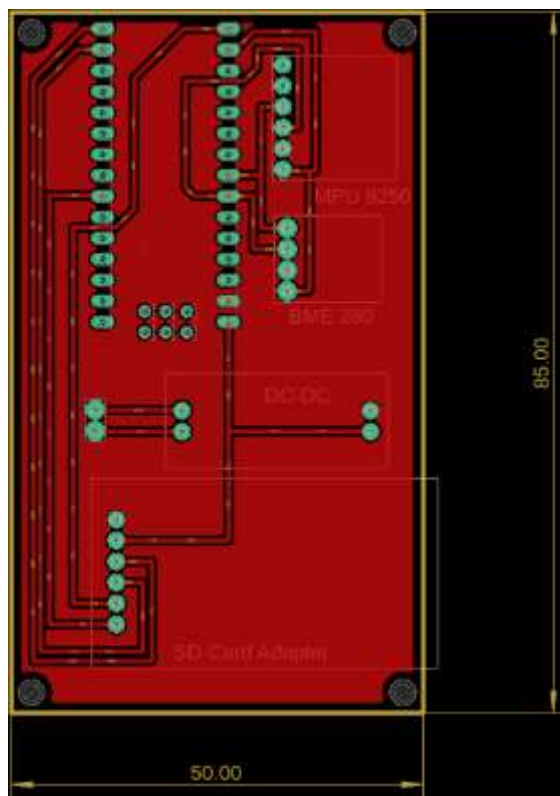
2.5 Návrh a výroba desky plošných spojů

Pro návrh desky plošných spojů (dále jen DPS) jsem zvolil program Eagle (Easily Applicable Graphical Layout Editor), editor schémat a návrhář DPS. Nejprve je proveden návrh schématu zapojení a poté je zapojení zrealizováno. Nejdříve připojíme napájení z konektoru na vstup měniče. Z výstupu měniče, dostaneme napětí 5 V, přivedeme napájení na vstup Arduina a ještě nezapomeneme ani na napájení čtečky SD karty, která má velký odběr proudu v řádu desítek mA. Arduino Nano dokáže vyrobít 3,3 V, což je v rozsahu doporučeného napájení pro moduly senzorů čili je připojíme na 3,3 V. Komunikace mezi Arduinem a moduly je realizovaná pomocí I2C linky. Tedy připojíme A4 na SDA a A5 na SCL. Jako poslední připojíme přes digitální piny čtečku karty pro zápis dat.



Obr. 2.6: Schéma pro měření veličin letu

Eagle umožňuje snadné navržení DPS, protože načte propojovací cesty ze schématu. Nejdříve si zvolíme velikost desky. Deska by měla být co nejmenší, aby krabička pro měřící zařízení byla malá. Navrhl jsem desku o rozměrech 50 mm šířky a 85 mm délky. Na okraji jsem uvažoval montážní otvory pro přichycení desky, potom jsem rozmístil všechny potřebné součástky do správných pozic a rozvedl vodivé cesty na DPS.



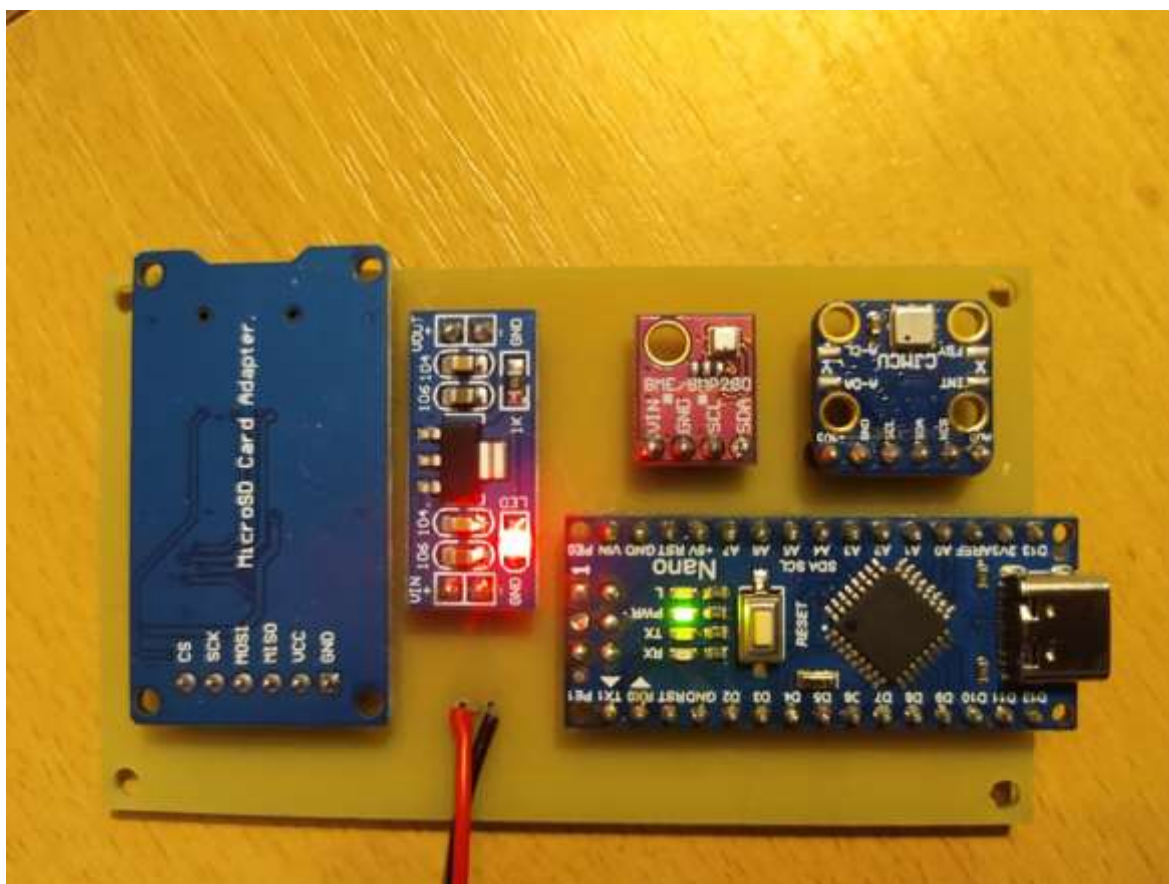
Obr. 2.7: Navržená DPS

Po kontrole desky plošných spojů vygeneruji Gerbery a Excellon, Všechny potřebné soubory byly odeslány do firmy PragoBoard s.r.o. kde byla vyrobena DPS. Zasláné požadavky na výrobu DPS jsou uvedeny v tabulce (1).

Tab. 1: Požadavky na výrobu DPS

Rozměr X	50 mm
Rozměr Y	85 mm
Počet vrstev	Jednovrstvá
Doba výroby	Týden
Síla materiálu	1,5 mm
Nepájíví maska	Zelená maska
Materiál	FR4
Plátování Cu	Ne
Vrtání	0,5 mm
Potisk/rezist	1x bílý
Způsob formátování	frézování

Po převzetí provedu kontrolu vyrobené desky pološných spojů. Po kontrole osadím a připájím moduly, Arduino Nano, měnič a adaptér na SD kartu. Použil jsem pájku FLUITIN 1532 1 mm 60% Sn 38% Pb 2% Cu. Po připájení všech součástek připojím napájení a nahraji software do Arduina a vyzkouším správnou činnost zařízení.

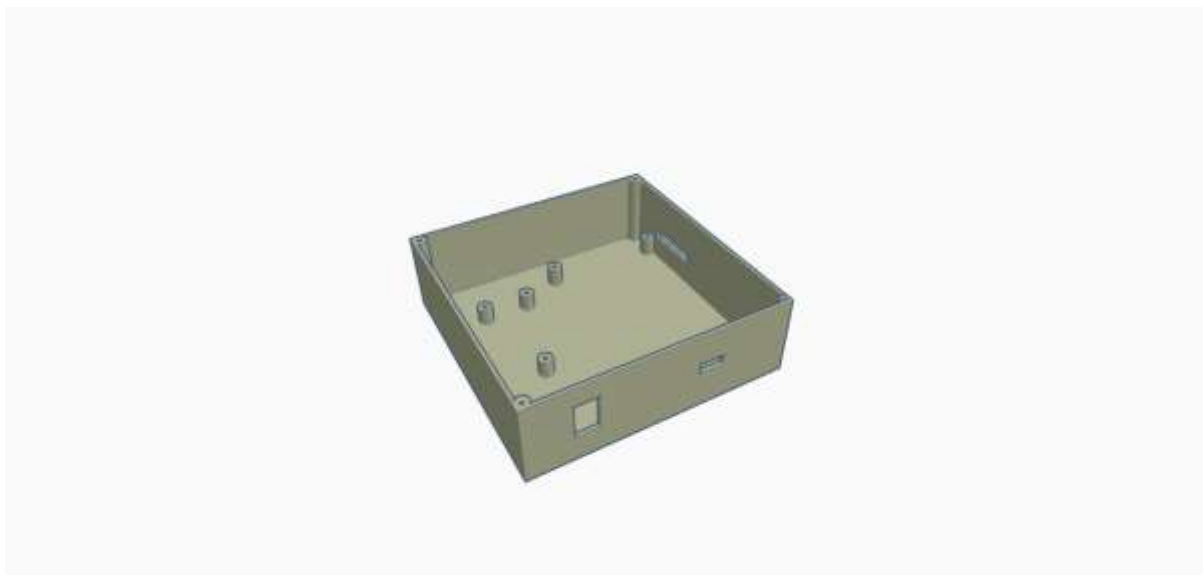


Obr. 2.8: Osazená DPS

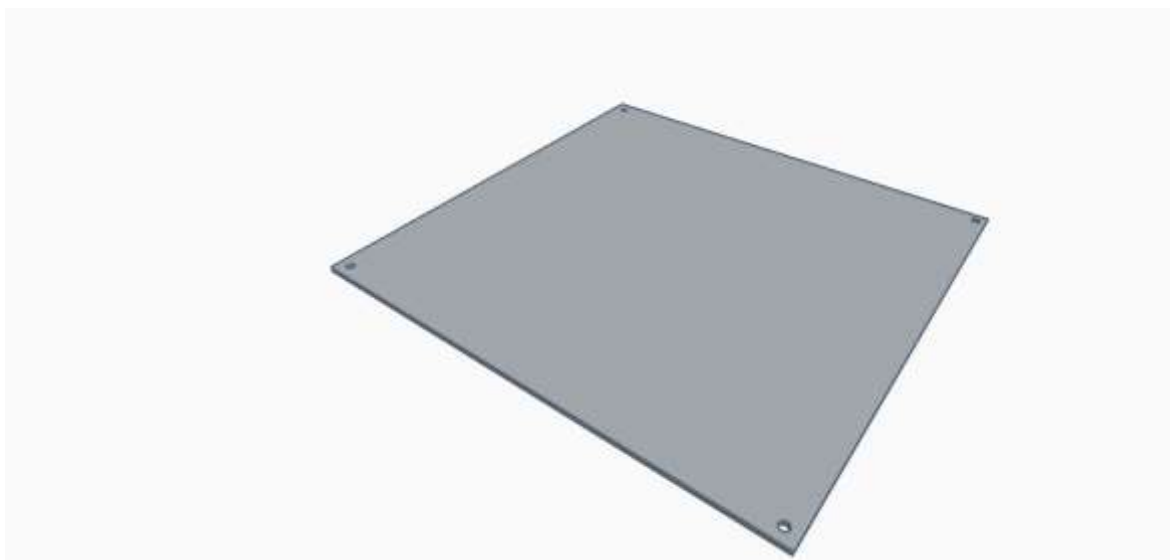
2.6 Výroba krabičky

Návrh krabičky byl realizován v Tinkercadu. Tento program je vhodný pro jednodušší 2D a 3D výkresy. Tento program ukládá soubory ve formátu stl, který je vhodný pro přípravu podkladů pro 3D tisk. Krabička je vytištěna na 3D tiskárně pomocí materiálu PETG.

Krabička na zařízení je složena ze dvou částí spodní a horní části. Horní část plní funkci víka na krajích jsou 4 otvory o průměru 2 mm pro uchycení se spodní částí pomocí šroubů. Spodní část obsahuje 7 konstrukčních otvorů pro uchycení DPS a baterky pomocí šroubů. Po stranách krabičky je vytvořený otvor pro USB konektor k Arduino Nano pro nahrání kódu nebo jeho úpravu. Na další straně je otvor pro vložení SD karty a spínač pro zapnutí či vypnutí zařízení. Celková velikost krabičky 104 x 104x 32 mm.



Obr. 2.9: Navrhnutá spodní část krabičky v Tinkercadu



Obr. 2.10: Navrhnutá Horní část krabičky v Tinkercadu

2.7 Software

Arduino nabízí velice jednoduché vývojové prostředí s názvem Arduino IDE (Integrated Development Environment). Jedná se o program, který poskytuje uživateli snadnou práci s deskou Arduino. Velká výhoda je jeho volná dostupnost. Arduino můžeme programovat v programovacích jazycích C, C++ a Wiring, což je nadstavba pro Arduino IDE.

Ještě, než přejdu k implementaci samostatného programu, je důležité se seznámit s použitými knihovnami, které jsou součástí kódu. Použil jsem knihovnu FaBo9Axis_MPU9250.h, která řeší sériovou komunikaci po I2C lince. Přečte z I2C linky změřená data akcelometru, gyroskopu a magnetometru. Knihovna Adafruit_BMP280.h, podobně jako u předchozí knihovny, řeší komunikace po I2C a čtení teploty a atmosférického tlaku. Další použití knihovny jsou SPI.h a SD.h, který umožňují čtení a zápis na SD kartu. Jakmile je paměťová karta SD připojena k rozhraní SPI desky Arduino Nano, můžeme vytvářet soubory a číst a zapisovat na ně. Arduino IDE umožňuje snadnou instalaci knihovny pomocí manažeru knihoven, kde se dají zmíněné knihovny lehce najít. Následně stáhnout a nainstalovat.



Obr. 4.1: Instalace knihoven v Arduino IDE

Program jsem napsal v prostředí Arduino IDE, viz příloha A. Je potřeba, aby program byl dobře optimalizovaný, protože je potřeba získat velké množství dat v reálném čase. To vyžaduje, aby ve smyčce kódu bylo nejlépe pouze čtení dat a jejich zápis do SD karty. Program pro sběr dat ze senzorů funguje jednoduše. Nejdříve se načtou knihovny pro sériovou komunikaci, k zápisu dat na SD kartu a k senzorům. Nastavíme vstupy a výstupy digitálních pinů a přiřadíme adresy k senzorům, aby mohli komunikovat po I2C lince. Adresy ke komunikaci získáme v datasheetu pro čtení dat ze senzorů. Adresa 0x76, napsaná hexidecimálně, odpovídá modulu BMP-280 a adresa 0x84 odpovídá MPU-9250. Dále přiřadíme proměnné typu int pro komunikaci s SD kartou. Pomocné proměnné typu float jsem přiřadil pro akcelometr, gyroskop, magnetometr pro zápis změřených hodnot.

V setupu nastavíme sériovou rychlost a inicializujeme senzory a SD kartu, jestli jsou zapojeny v pořádku. Pokud jsou špatně zapojeny nebo je na nich porucha objeví se warning a program nebude pokračovat dál v kódu. V případě poruchy je možno propojit počítač s Arduinem pomocí USB kabelu a zjistit danou poruchu. Při správné inicializaci se otevře na SD kartě textový dokument pro zápis dat.

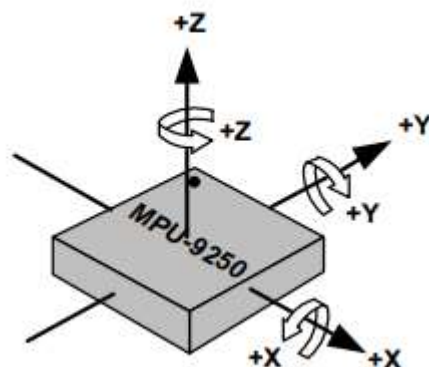
Nekonečná smyčka (loop) funguje na principu, že se neustále čte aktuální data na senzorech, tedy teplotu, výšku, zrychlení, údaj z gyroskopu a magnetické pole. Přčtená data se zapíše do textového souboru s mezerami, aby dále při zpracování dalším programem se dali snadno rozeznat. Na konci funkce je zavřený a znova otevřený souboru pro zápis. To je proto, aby se změřená uložila při náhlém vypnutí.

3 Analýza a vizualizace změřených dat

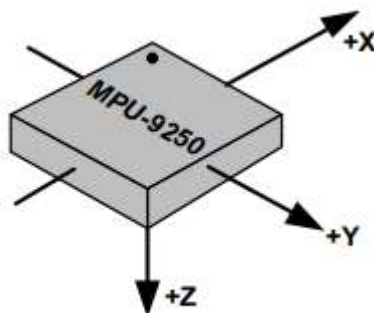
Změřená data je nutné analyzovat a zjistit, jestli naměřené hodnoty odpovídají realitě. Změřená data byla prozatím jednoduchého pohybu, protože bohužel do doby odevzdání práce neproběhlo měření dat přímo z letu padákového kluzáku. Vizualizace a analýza bude provedena v programu MATLAB, což je interaktivní programové prostředí a skriptovací programovací jazyk vhodný pro matematické operace.

3.1 Orientace os senzorů

Nejdříve potřebujeme zjistit, jakým směrem jsou senzory orientovány, abychom dokázali určit správný směr změřených vektorů magnetometru, gyroskopu a akcelerometru. Určený orientace lze zjistit z datasheetu k MPU-9250. Modul BMP-280 Barometr nemá žádnou orientaci, tudíž u této součásti orientaci není potřeba řešit.

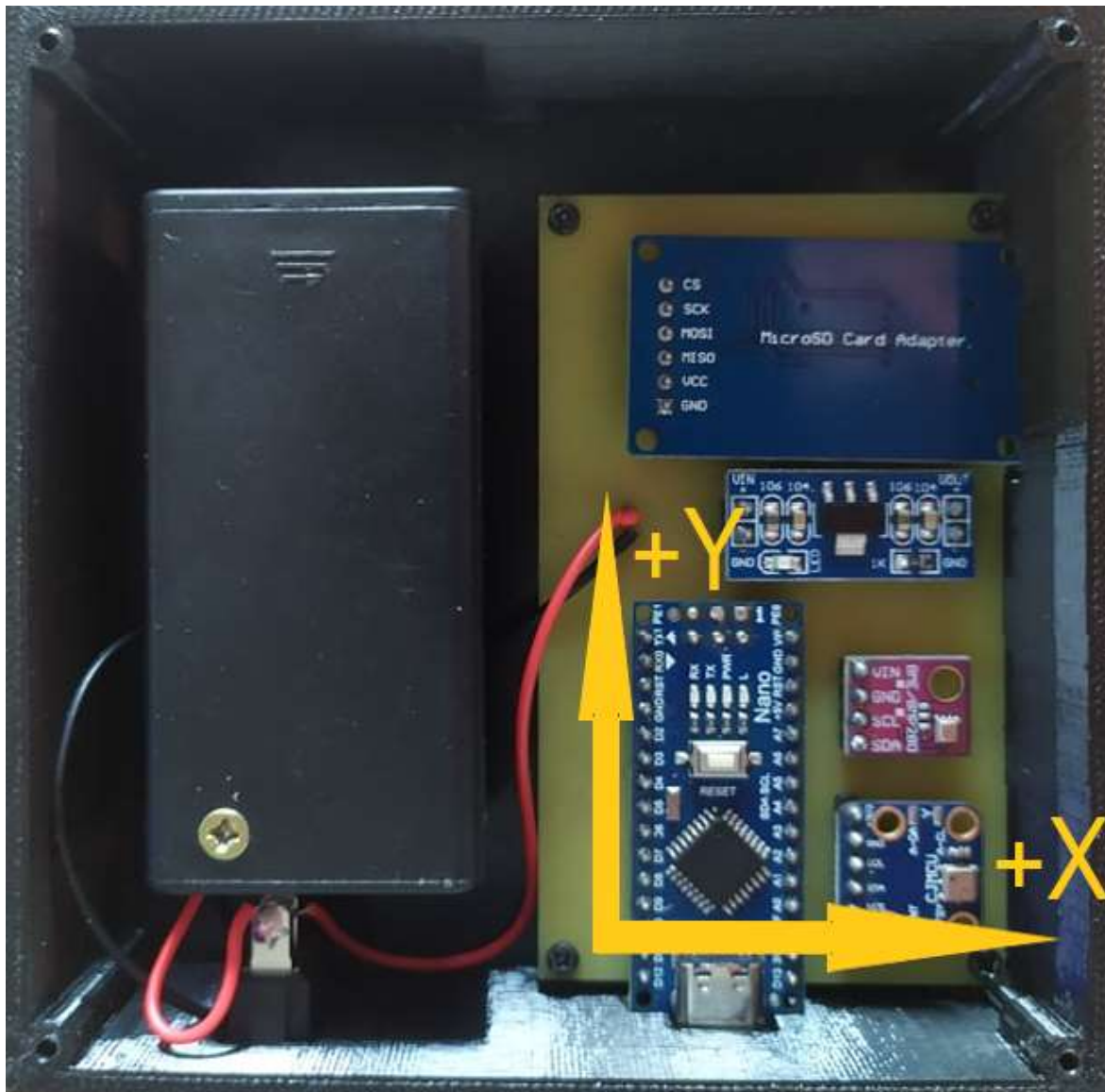


Obr. 3.1: Orientace os citlivosti a polarity rotace pro akcelerometr a gyroskop [3]



Obr. 3.2: Orientace os citlivosti pro magnetometr [3]

Z obrázku 3.1 lze vidět orientační tečku, která určuje orientaci a polaritu akcelometru a gyroskopu. Při porovnání orientace akcelometru a magnetometru, viz obrázek 3.2, lze vidět opačnou orientaci osy z a prohození os x a y .

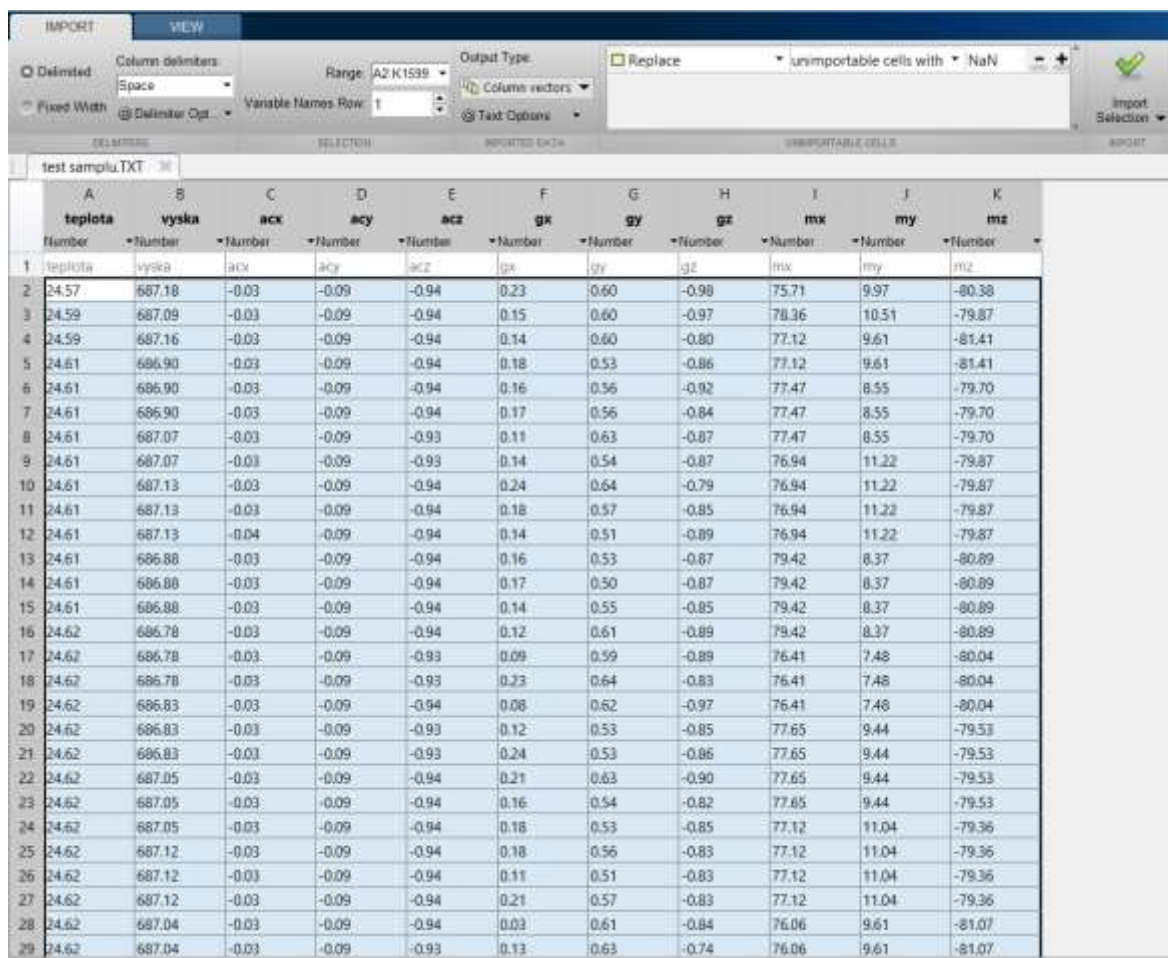


Obr. 3.3: Orientace citlivosti os pro akcelometr a gyroskop v měřícím zařízení

K určení orientace os citlivosti a polarity nám pomůže již určená polarita a citlivost z datasheetu k MPU-9250. Zobrazená osa x a y určuje orientaci citlivosti os akcelometru a gyroskopu viz obr. 3.3. Osa z je kolmá na osy x a y . Orientaci citlivosti pro osu x magnetometru odpovídá osa y a pro osu y magnetometru odpovídá osa x . Osa z magnetometru odpovídá opačné orientaci z akcelometru.

3.2 Zpracování získaných dat

Po skončení měření můžeme vyjmout SD kartu z měřícího zařízení a připojit ji do počítače. Změřená data jsou zaznamenána do csv souboru v tomto pořadí: teplota, nadmořská výška, akcelerometr, gyroskop a magnetometr. MATLAB umožňuje snadné nahrání dat ze csv souboru. V software zadáme oddělovač, např. že hodnoty jsou rozděleny podle mezer a načteme je jako vektory.



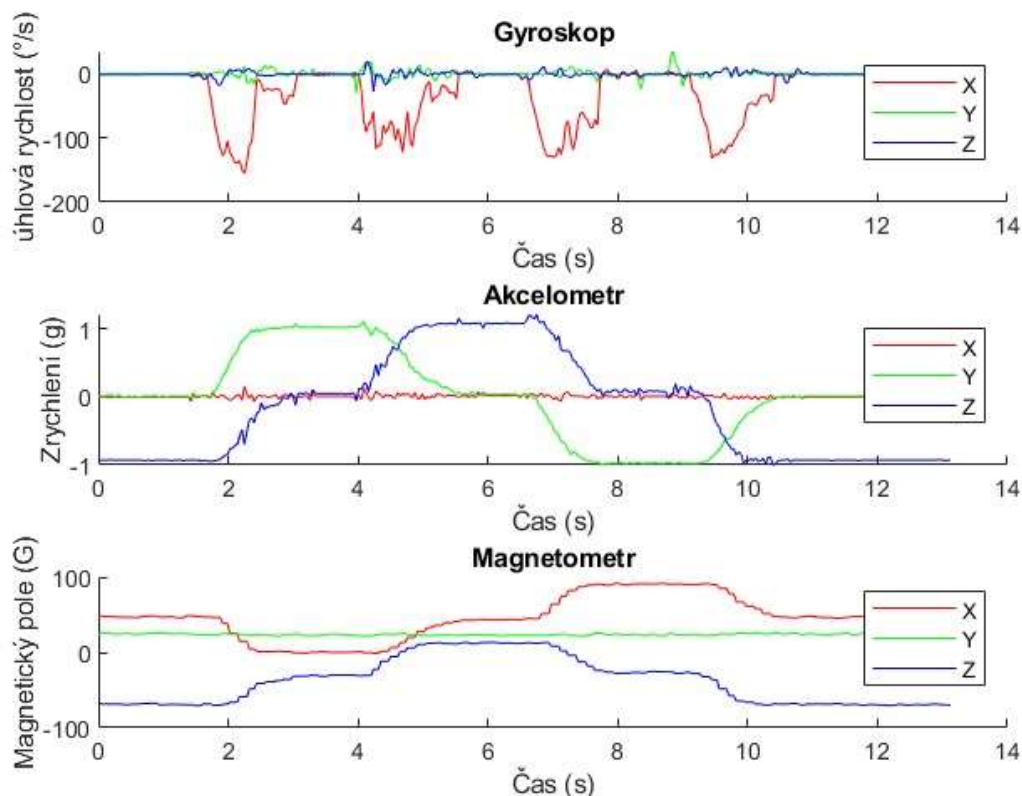
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
	teplota	vyska	acx	acy	acz	gx	gy	gz	mx	my	mz
Number	Number	Number	Number	Number	Number	Number	Number	Number	Number	Number	Number
1	24.57	687.18	-0.03	-0.09	-0.94	0.23	0.60	-0.98	75.71	9.97	-80.38
2	24.59	687.09	-0.03	-0.09	-0.94	0.15	0.60	-0.97	78.36	10.51	-79.87
4	24.59	687.16	-0.03	-0.09	-0.94	0.14	0.60	-0.80	77.12	9.61	-81.41
5	24.61	686.90	-0.03	-0.09	-0.94	0.18	0.53	-0.86	77.12	9.61	-81.41
6	24.61	686.90	-0.03	-0.09	-0.94	0.16	0.56	-0.92	77.47	8.55	-79.70
7	24.61	686.90	-0.03	-0.09	-0.94	0.17	0.56	-0.84	77.47	8.55	-79.70
8	24.61	687.07	-0.03	-0.09	-0.93	0.11	0.63	-0.87	77.47	8.55	-79.70
9	24.61	687.07	-0.03	-0.09	-0.93	0.14	0.54	-0.87	76.94	11.22	-79.87
10	24.61	687.13	-0.03	-0.09	-0.94	0.24	0.64	-0.79	76.94	11.22	-79.87
11	24.61	687.13	-0.03	-0.09	-0.94	0.18	0.57	-0.85	76.94	11.22	-79.87
12	24.61	687.13	-0.04	-0.09	-0.94	0.14	0.51	-0.89	76.94	11.22	-79.87
13	24.61	686.88	-0.03	-0.09	-0.94	0.16	0.53	-0.87	79.42	8.37	-80.89
14	24.61	686.88	-0.03	-0.09	-0.94	0.17	0.50	-0.87	79.42	8.37	-80.89
15	24.61	686.88	-0.03	-0.09	-0.94	0.14	0.55	-0.85	79.42	8.37	-80.89
16	24.62	686.78	-0.03	-0.09	-0.94	0.12	0.61	-0.89	79.42	8.37	-80.89
17	24.62	686.78	-0.03	-0.09	-0.93	0.09	0.59	-0.89	76.41	7.48	-80.04
18	24.62	686.78	-0.03	-0.09	-0.93	0.23	0.64	-0.83	76.41	7.48	-80.04
19	24.62	686.83	-0.03	-0.09	-0.94	0.08	0.62	-0.97	76.41	7.48	-80.04
20	24.62	686.83	-0.03	-0.09	-0.93	0.12	0.53	-0.85	77.65	9.44	-79.53
21	24.62	686.83	-0.03	-0.09	-0.93	0.24	0.53	-0.86	77.65	9.44	-79.53
22	24.62	687.05	-0.03	-0.09	-0.94	0.21	0.63	-0.90	77.65	9.44	-79.53
23	24.62	687.05	-0.03	-0.09	-0.94	0.16	0.54	-0.82	77.65	9.44	-79.53
24	24.62	687.05	-0.03	-0.09	-0.94	0.18	0.53	-0.85	77.12	11.04	-79.36
25	24.62	687.12	-0.03	-0.09	-0.94	0.18	0.56	-0.83	77.12	11.04	-79.36
26	24.62	687.12	-0.03	-0.09	-0.94	0.11	0.51	-0.83	77.12	11.04	-79.36
27	24.62	687.12	-0.03	-0.09	-0.94	0.21	0.57	-0.83	77.12	11.04	-79.36
28	24.62	687.04	-0.03	-0.09	-0.94	0.03	0.61	-0.84	76.06	9.61	-81.07
29	24.62	687.04	-0.03	-0.09	-0.93	0.13	0.63	-0.74	76.06	9.61	-81.07

Obr. 3.4: Nahrání csv souboru do programu MATLAB

Před vizualizací dat musíme zjistit, za jak dlouho se zapíše data do jednoho řádku. Provedl jsem měření po dobu 60 sekund a zjistil jsem, že měřící zařízení dokáže změřit 1600 řádku s hodnotami. Jejich podíl je výsledek doby pro uložení jednoho řádku dat, byla zjištěna doba 37,5 ms. Nyní jsem podle naměřených vzorků zjistil dobu měření, čili máme již časovou osu. Pro zpracování dat jsem si zapsal tříosá změřená data do matice pro snadnější rozeznání.

3.3 Analýza a vizualizace dat ze senzorů

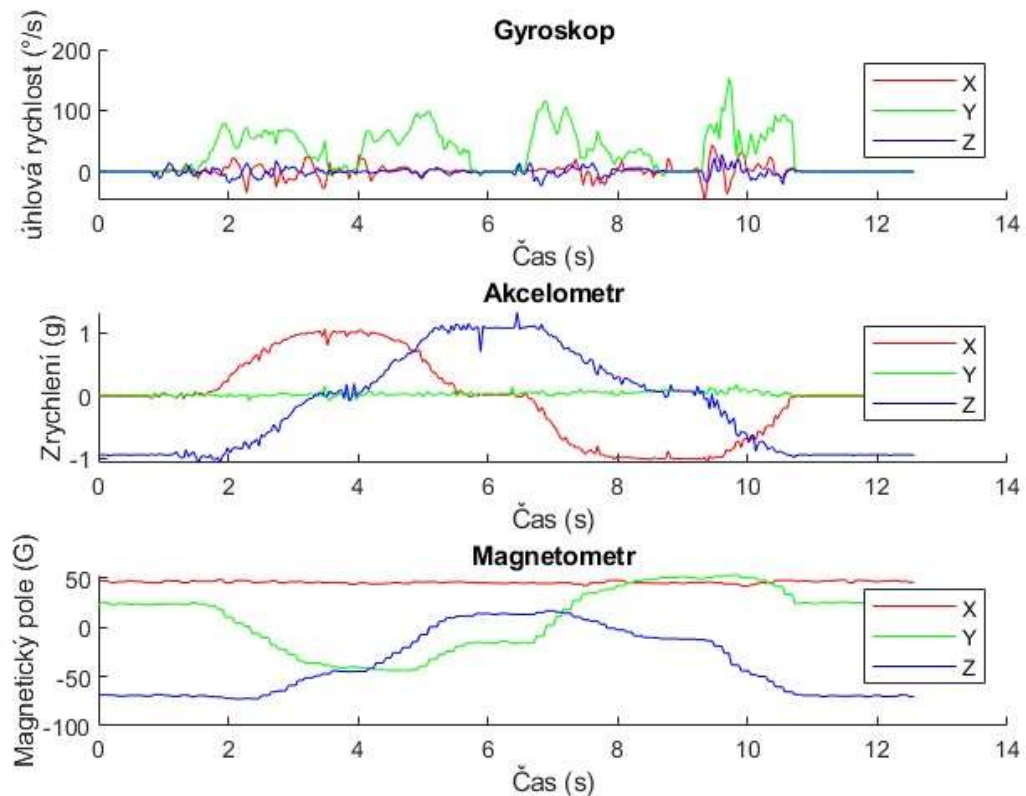
Uložená data v MATLABU jsem zpracoval a vizualizoval pomocí funkcí subplot a umístil jsem pod sebe grafy akcelometru, gyroskopu a magnetometru. Díky vhodnému umístění grafů lze sledovat pod sebou změny pohybu na všech měřených senzorech (akcelometr, gyroskop, magnetometr).



Obr. 3.5. Vizualizace změřených dat bočního otočení měřicího zařízení o 360 stupňů

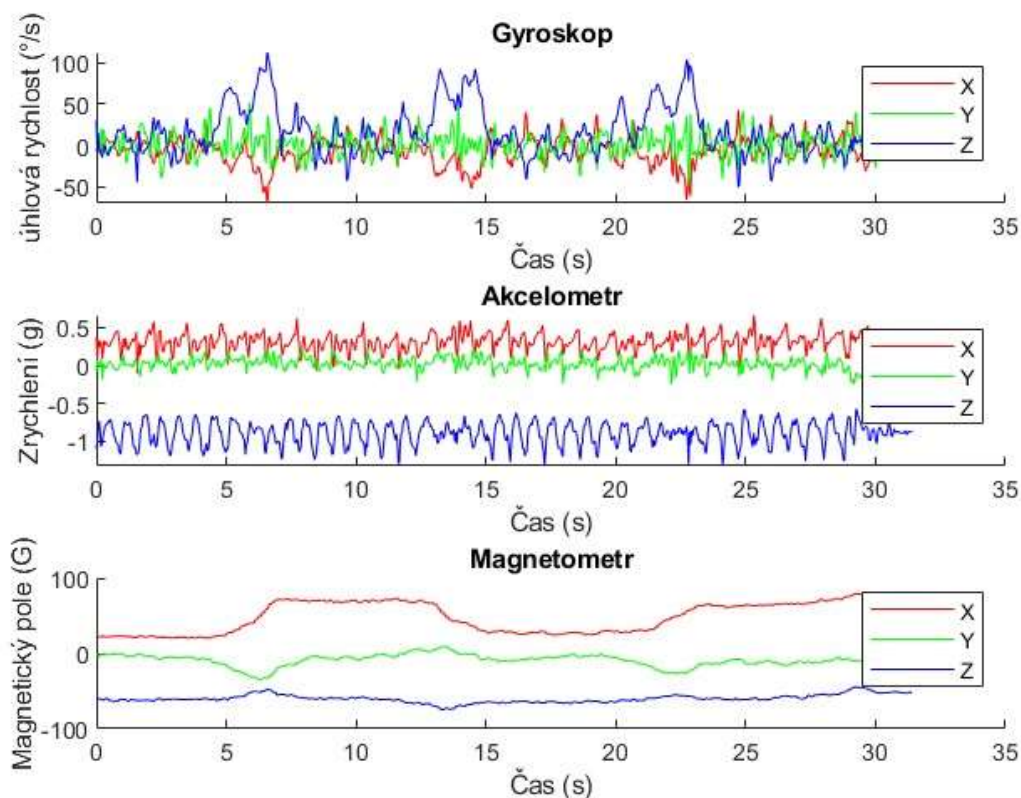
Provedl jsem měření na boční otočení zařízení o 360 stupňů, viz obr 3.5. Měření nebylo provedeno úplně rovnoměrně, což lze pozorovat na menších odchylkách například na akcelometru, kde na ose z je vidět menší krátkodobé vychýlení od očekávané hodnoty. Na začátku měření bylo měřicí zařízení v klidu. Můžeme si povšimnout, že zrychlení osy z odpovídá hodnotě $-1g$. To je způsobeno gravitací, která působí ve vertikální směru a je orientovaná směrem dolů. Magnetometr ukazuje hodnoty v rozmezí od -80 až do 100 G ve směrech x a y , což je aproximace síly magnetického pole (kde bylo provedeno měření). Lze také vypořadovat, že pokud je měřicí zařízení v klidu, tak změřené 3 složky gyroskopu jsou všechna nulová. Otáčení zařízení bylo otáčeno postupně po 90 stupních. V intervalu okolo druhé sekundy měření je vidět první otočení na ose x gyroskopu následuje klidový stav, až

okolo páté sekundy dojde k dalšímu otočení o 90 stupňů. Po dalších dvou otočení se zařízení dostane do původní polohy. Při otáčení polohy měřicí krabičky je zrychlení osy x nulové po celou dobu měření. Lze tím poznat stranu otáčení. Zrychlení os z a y se postupně mění gravitační zrychlení. Magnetické pole reaguje stejnou změnou na křivku zrychlení, pouze osy x a y jsou obrácené to již známe z datasheetu k MPU-9250.



Obr 3.6: Vizualizace změřených dat otočení vpřed otočení měřícího zařízení o 360 stupňů

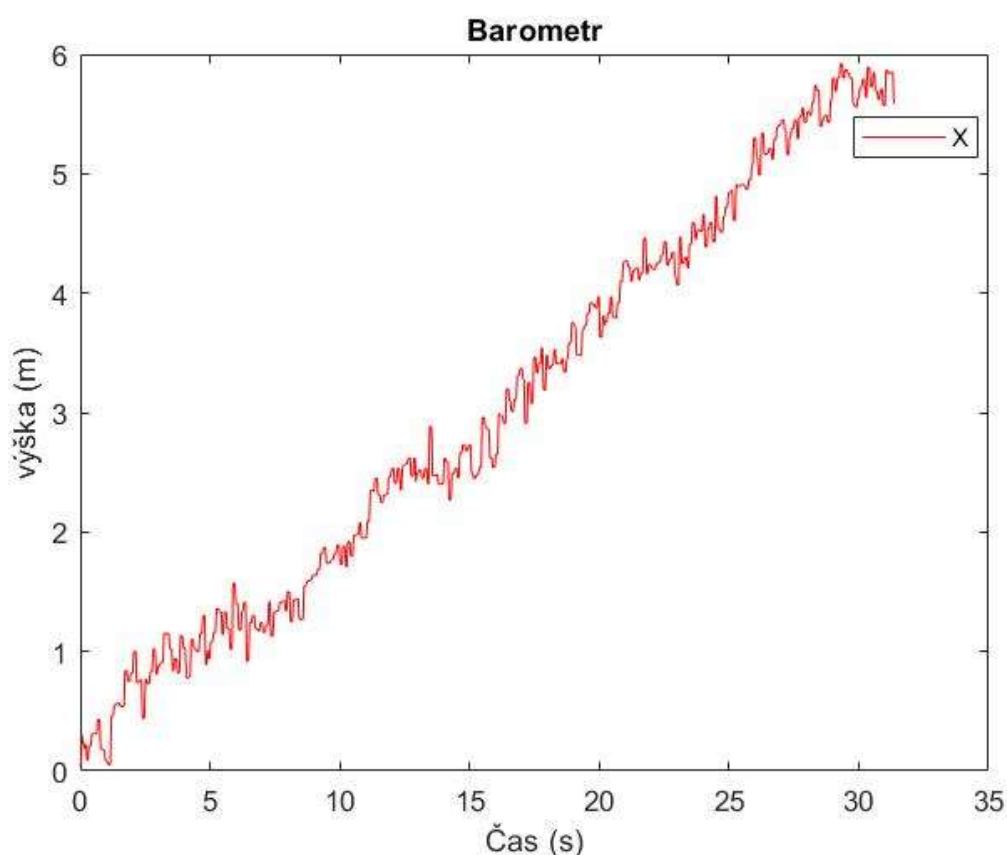
Provedl jsem ještě otočení vpřed o 360 stupňů, abych ověřil správnou funkčnost MPU-9250. Při pohledu na obr. 3.6 můžeme vidět odlišné grafy oproti předchozím grafům na obr. 3.5. V grafu gyroskopu jsou prohozené osy x a y a ještě se změněnou orientací, která jde do kladných hodnot. U akcelometru lze vidět také prohozené x a y zároveň u magnetometru dochází k samému prohození os. Podle teoretických předpokladů dle orientace MPU-9250 tento jev měl nastat, že při otáčení vpřed a v bok se změní osy.



Obr. 3.7: Vizualizace změřených dat cesta do druhého patra s měřícím zařízením

Změřil jsem cestu do druhého patra, viz obr. 3.7. Měřící zařízení bylo umístěno pořád stejně, aby nedocházelo náhodným vychýlením. Na grafu akcelometru v ose z si můžeme všimnout tří vrcholů, tyto vrcholy určují otočení na schodišti. Půl vlny na akcelometru značí kroky na schodech. Při změně orientace na schodišti dochází ke změně magnetického pole a určuje směr pohybu. S těmito ověřenými hodnotami můžeme konstatovat, že senzory v modulu MPU-9250 fungují správně.

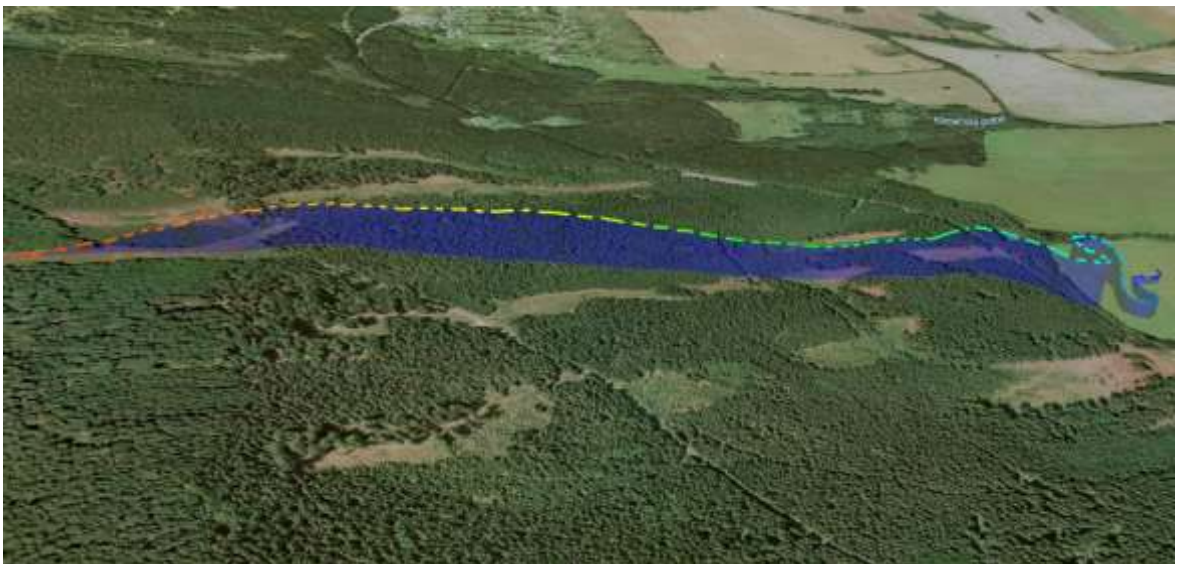
Změřené hodnoty barometru se musí převést z atmosférického tlaku na výšku. Tlak klesá přibližně o 0,21 hPa na metr, tedy 100 hPa na km. Při vyšších vrstvách atmosféry tlak klesá pomaleji, to je způsobeno nižší hustotou vzduchu. Dalším velkým problémem je změna atmosférického tlaku během dne, který může dosahovat několik desítek hPa. Změnu atmosférického tlaku je potřeba brát v úvahu. Pokud měření bude probíhat v krátkém časovém intervalu, atmosférický tlak se téměř nezmění a chyba bude zanedbatelná. Pro následující měření jsem využil funkci `readAltitude()`, která je součástí knihovny `BMP280.h`. Tato funkce převede rovnou tlak na nadmořskou výšku.



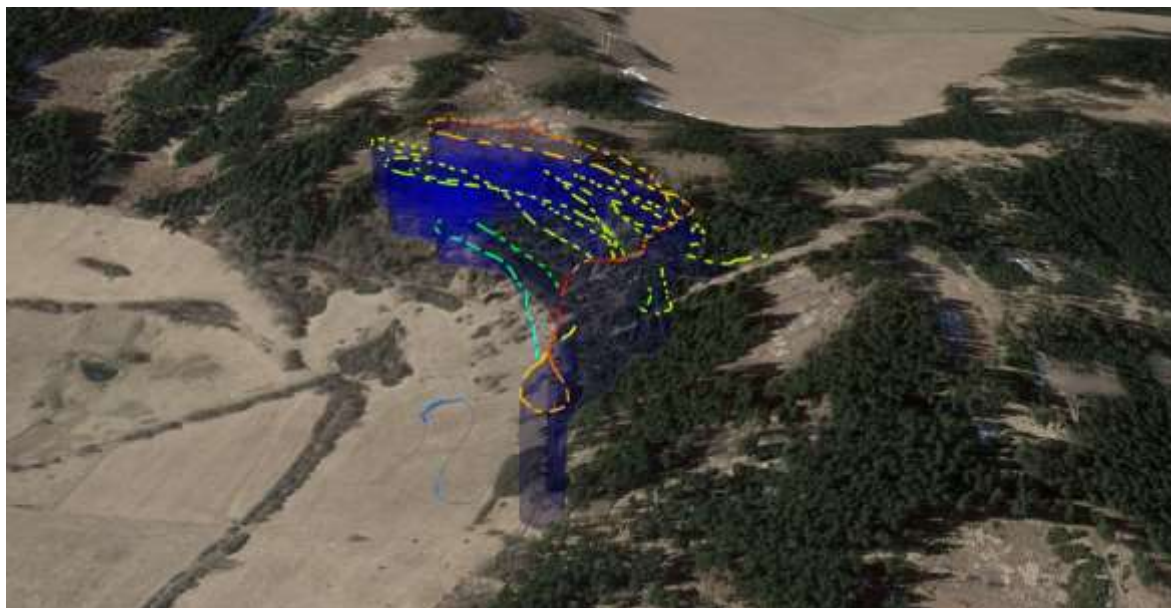
Obr. 3.8: Vizualizace změřených dat barometru cesty do druhého patra s měřícím zařízením

Při vizualizaci grafu jsem odečetl počáteční výšku, abychom viděli vyšlou výšku po schodech. Výška dvou pater byla změřena okolo 6 metrů, což odpovídá realitě. Při pohledu na graf viz. obr. 3.8 lze vidět šum, který je způsobený samotnou přesností barometru.

Změření reálného letu padákového kluzáku pomocí měřicí krabičky se nestihlo zrealizovat do termínu odevzdání práce. Před samotnou konstrukcí měřicího zařízení byla zaznamenána data letu pomocí mobilní aplikace. Měření přes aplikaci není ideální a nezachytí všechny pohyby, proto bylo mým úkolem navrhnout měřicí zařízení pro let padákového kluzáku. Aplikace zaznamenala let pomocí dat ve formátu KML. Tento formát se primárně používá pro publikaci a distribuci geografických dat. V souboru je zapsaná nadmořská výška a pomocí GPS jsou zjištěny aktuální souřadnice. V souboru KML je také aktuální čas změřených dat. Doba pro zápis dat byla 1,5 s. Vizualizaci jsem provedl na webovém prohlížeči Google Earth, který umožňuje pohlízet na zemi jako ze satelitu. V Google Earth jsem vytvořil nový projekt a importoval jsem data z KML a vizualizoval jsem poskytnutá data letů, viz. obr. 3.9 a 3.10. Vizualizace letu také umožňuje změnu barvy dle aktuální výšky.



Obr. 3.9: Vizualizace změřených dat pomocí Google Earth



Obr. 3.10: Vizualizace změřených dat pomocí aplikace Google Earth

Zhodnocení a závěr

Cílem této práce bylo vyrobit měřicí zařízení, který zachytí reálný let padákového kluzáku a analýza a vizualizace změřených dat.

V rešeršní části je popsána kinematika a dynamika padákového kluzáku. Jsou uvedeny druhy sil působící na padák včetně vzniku přímého a kluzového letu. V další části je popsáno ovládání padákového kluzáku.

Praktická část bakalářské práce je zaměřena na konstrukci měřicího zařízení včetně návrhu hardwaru a softwaru. Hlavními požadavky bylo vytvořit přenosné a robustní zařízení, které bude napájeno z baterie. Počátečním cílem byl výběr vhodných senzorů, které zachytí let padákového kluzáku. Navrhl jsem schéma včetně konstrukce desky plošných spojů. Jako zdroj byla použita 9V baterie a pomocí stabilizátoru AMS1117 bylo sníženo napětí na 5 V. Jako senzory pro změření letu byly vybrány moduly MPU-9250 a BME-280. Tyto moduly obsahují gyroskop, akcelometr, magnetometr, barometr.

Poslední část se zabývá analýzou a vizualizací dat. Nejdříve je určena orientace a citlivost os modulu MPU-9250. Zpracování dat bylo provedeno v programu MATLAB.

Do data odevzdání bakalářské práce mi bohužel nebyla poskytnuta data z reálného letu padákového kluzáku. Nebyla možnost analyzovat a vizualizovat data z letu, ale provedl jsem jednoduchá měření pohybu zařízení, na jejichž základě lze předpokládat, že navržené měřicí zařízení je funkční a vhodné pro monitorování letu padákového kluzáku.

Možnosti zlepšení do budoucna vidím ve formě rychlejšího mikroprocesoru než 16 MHz, dále existuje možnost lepší optimalizace softwaru. Lze vybrat kvalitnější senzory, které budou mít větší citlivost a orientaci, a rovněž vyšší přesnost. Jinou variantou je zmenšení desky bez implementace modulů a návrh jedné desky s integrovanými obvody a včetně součástek, které byly přímo na modulech. V případě zmenšení desky plošných spojů by bylo možné zmenšit celého měřicího zařízení.



Obr. 3.11: Výslední měřicí zařízení

Literatura

- [1] YOTOV, Nikolay a Nikolay TSAROV. Aerodynamics Theory for Beginners Paragliding Pilots. SkyNomad [online]. 2013 [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <http://skynomad.com/articles/beginners-aerodynamics.html>
- [2] El Speedo flying community [online]. [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/paraglidingskola/aerodynamika/aerodynamicke-sily>
- [3] PS-MPU-9250A-01 Datasheet [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf>
- [4] BST-BME280-DS002-15 Datasheet [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1132060/BOSCH/BME280.html>
- [5] Aduino Nano [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://docs.arduino.cc/hardware/nano>
- [6] AMS 1117 Datasheet [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://pdf.direnc.net/upload/ams1117-datasheet.pdf>
- [7] How do paraglider controls work? [online]. Aviation, 2018, 14.1.2018 [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://aviation.stackexchange.com/questions/47514/how-do-paraglider-controls-work>
- [8] ItNetwork.cz: Učíme národ IT [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.itnetwork.cz/hardware-pc/arduino/mpu6050-akcelerometr-a-gyroskop-pro-arduino>
- [9] Maker [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://makersportal.com/blog/2019/11/11/raspberry-pi-python-accelerometer-gyroscope-magnetometer>
- [10] El Speedo. Výuka k testům test [online]. El Speedo s.r.o., © 2017 [cit. 23.5.2022]. Dostupné z: <https://elspeedo.cz/prakticke-rady/>
- [11] ŠULC, Dalibor, 2011. Návrh Softwarového modulu trenažeru přistání na padákovém kluzáku. Brno. Diplomová práce. [online] Vedoucí práce: Ing. Jiří Krejsa, Ph.D. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. [cit. 23.5.2022]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/15476/final-thesis.pdf?sequence=8&isAllowed=y>

- [12] Flybubble. Flight Skills [online]. Flybubble Paragliding, © [cit. 23.5.2022].
Dostupné z: <https://flybubble.com/blog/flightskills>

Seznam obrázků

Obr. 1.1: Rozložení sil v aerodynamice [2]	- 2 -
Obr. 1.2: Proudění vzduchu kolem těles [1]	- 3 -
Obr. 1.3: Zákon o zachování energie pro proudění [2]	- 4 -
Obr. 1.4: Transformace pohybu dolů na boční sílu R_y [1]	- 5 -
Obr. 1.5: Vytvoření dopředné síly a pohybu z počátečního pohybu dolů [1]	- 6 -
Obr. 1.6: Vznik klouzavého letu [1]	- 7 -
Obr. 1.7: různé letové režimy s různými úhly náběhu [1]	- 8 -
Obr. 2.1: Modul MPU-9250 [9]	- 9 -
Obr. 2.2: Blokové schéma MPU-9250 [3]	- 11 -
Obr. 2.3: BME-280 [3]	- 12 -
Obr. 2.4: Arduino Nano [5]	- 13 -
Obr. 2.5: Blokové schéma Ams1117 [6]	- 14 -
Obr. 2.6: Schéma pro měření veličin letu	- 15 -
Obr. 2.7: Navržená DPS	- 16 -
Obr. 2.8: Osazená DPS	- 17 -
Obr. 2.9: Navrhnutá spodní část krabičky v Tinkercadu	- 18 -
Obr. 2.10: Navrhnutá Horní část krabičky v Tinkercadu	- 18 -
Obr. 2.11: Instalace knihoven v Arduino IDE	- 19 -
Obr. 3.1: Orientace os citlivosti a polarity rotace pro akcelerometr a gyroskop [3]	- 21 -
Obr. 3.2: Orientace os citlivosti pro magnetometr [3]	- 21 -
Obr. 3.3: Orientace citlivosti os pro akcelometr a gyroskop v měřicím zařízení	- 22 -
Obr. 3.4: Nahrání textového dokumentu souboru do programu MATLAB	- 23 -
Obr. 3.5: Vizualizace změřených dat bočního otočení měřicího zařízení o 360 stupňů	- 24 -
Obr. 3.6: Vizualizace změřených dat otočení vpřed otočení měřicího zařízení o 360 stupňů	- 25 -
Obr. 3.7: Vizualizace změřených dat cesta do druhého patra s měřicím zařízením	- 26 -
Obr. 3.8: Vizualizace změřených dat barometru cesty do druhého patra s měřicím zařízením	- 27 -
Obr. 3.9: Vizualizace změřených dat pomocí Google Earth	- 28 -
Obr. 3.10: Vizualizace změřených dat pomocí aplikace Google Earth	- 29 -
Obr. 3.11: Výslední měřicí zařízení	- 31 -

Přílohy

Příloha A – Software pro měřící zařízení

```
#include <FaBo9Axis_MPU9250.h>
#include <Adafruit_BMP280.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#define BMP280_ADRESA (0x76)
#define MPU9250_ADRESA (0x84)
FaBo9Axis MPU_9axis;
int const pinCS = 4;
int const pinSS = 10;
File myFile;
float ax, ay, az;
float gx, gy, gz;
float mx, my, mz;
float temp;
Adafruit_BMP280 bme;

void setup()
{
  pinMode(pinSS, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  Serial.println(F("BMP280 test"));

  if (!bme.begin())
  {
    Serial.println("BME280 error!");
    while (1);
  }
  Serial.println("configured.");

  if (MPU_9axis.begin())
  {
    Serial.println("configured");
  }
  else
  {
    Serial.println("MPU9250 error");
    while (1);
  }

  if (!SD.begin(pinCS))
  {
    Serial.println("SD Card error");
    while (1);
  }
  Serial.println("configured")
  myFile = SD.open("Data.txt", FILE_WRITE);
}
}
```

```
void loop()
{
  if (myFile)
  {

    myFile.print(bme.readTemperature());
    myFile.print(" ");
    myFile.print(" ");
    myFile.print(bme.readAltitude(1033));
    myFile.print(" ");
    MPU_9axis.readAccelXYZ(&ax, &ay, &az);
    MPU_9axis.readGyroXYZ(&gx, &gy, &gz);
    MPU_9axis.readMagnetXYZ(&mx, &my, &mz);
    myFile.print(ax);
    myFile.print(" ");
    myFile.print(ay);
    myFile.print(" ");
    myFile.print(az);
    myFile.print(" ");
    myFile.print(gx);
    myFile.print(" ");
    myFile.print(gy);
    myFile.print(" ");
    myFile.print(gz);
    myFile.print(" ");
    myFile.print(mx);
    myFile.print(" ");
    myFile.print(my);
    myFile.print(" "); +
    myFile.print(mz);
    myFile.print(" ");
    myFile.println();
    myFile.close();
    myFile = SD.open("Data.txt", FILE_WRITE);
  }
}
```

Příloha B – DPS – vrstva BOT

