



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

**URČOVÁNÍ LETOVÉ VÝŠKY DRONU POMOCÍ
RŮZNÝCH SENZORŮ**

FLIGHT ELEVATION ESTIMATION OF A DRON USING VARIOUS SENSORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTIN GÁBRLE

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Prof. Ing., Dipl.-Ing. MARTIN DRAHANSKÝ, Ph.D.

BRNO 2018

Vysoké učení technické v Brně - Fakulta informačních technologií

Ústav inteligentních systémů

Akademický rok 2017/2018

Zadání bakalářské práce

Řešitel: **Gábrle Martin**

Obor: Informační technologie

Téma: **Určování letové výšky dronu pomocí různých senzorů**
Flight Elevation Estimation of a Dron Using Various Sensors

Kategorie: Umělá inteligence

Pokyny:

1. Prostudujte literaturu týkající se způsobů určování letové výšky objektu (dronu).
2. Navrhněte a implementujte metodu pro měření výšky objektu s využitím různých senzorů - zejména se zaměřte na barometrický výškoměr.
3. Návrh z předchozího bodu prakticky realizujte a implementujte vhodný algoritmus pro automatické vyhodnocení.
4. Proveďte experimenty a zhodnoťte dosažené výsledky.

Literatura:

- Tang W., Howell G., Tsai Y.H. *Barometric Altimeter Short-term Accuracy Analysis*. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, s. 24-26, 2006, ISSN 0885-8985.
- Patent "Device and Method for Calibrating and Improving the Accuracy of Barometric Altimeters with GPS-derived Altitudes" - US 6522298 B1.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování bakalářské práce naleznete na adrese <http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Technická zpráva bakalářské práce musí obsahovat formulaci cíle, charakteristiku současného stavu, teoretická a odborná východiska řešených problémů a specifikaci etap (20 až 30% celkového rozsahu technické zprávy).

Student odevzdá v jednom výtisku technickou zprávu a v elektronické podobě zdrojový text technické zprávy, úplnou programovou dokumentaci a zdrojové texty programů. Informace v elektronické podobě budou uloženy na standardním nepřepisovatelném paměťovém médiu (CD-R, DVD-R, apod.), které bude vloženo do písemné zprávy tak, aby nemohlo dojít k jeho ztrátě při běžné manipulaci.

Vedoucí: **Drahanský Martin, prof. Ing., Dipl.-Ing., Ph.D., UITS FIT VUT**

Datum zadání: 1. listopadu 2017

Datum odevzdání: 16. května 2018

L.S.
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta informačních technologií
Ústav inteligentních systémů
612 66 Brno, Božetechova 2

doc. Dr. Ing. Petr Hanáček
vedoucí ústavu

Abstrakt

Práce řeší problematiku měření aktuální výšky dronu s co největší přesností za účelem udržení dronu v určité výšce po delší dobu letu. K ní jsou využity 2 barometry, přičemž jeden se bude nacházet na dronu a druhý bude na zemi udávat nulovou hladinu nadmořské výšky.

Abstract

The paper deals with the aim of measuring the actual height of drone with as much accuracy as possible to maintain the drone at a certain height for longer flight time. It uses 2 barometers, one on the drone and the other on the ground to indicate the zero altitude.

Klíčová slova

dron, barometr, senzor, tlak vzduchu, teplota vzduchu, mikrokontrolér, výškoměř, kvadrokoptéra

Keywords

drone, barometer, sensor, air pressure, air temperature, microcontroller, altimeter, quadcopter

Citace

GÁBRLE, Martin. *Určování letové výšky dronu pomocí různých senzorů*. Brno, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Prof. Ing., Dipl.-Ing. Martin Drahan-ský, Ph.D.

Určování letové výšky dronu pomocí různých senzorů

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Prof. Ing, Dipl.-Ing. Martina Dražanského, Ph.D. Další informace mi poskytli Ing. Tomáš Goldmann a Ing. Václav Šimek. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....
Martin Gábrle
11. května 2018

Poděkování

Při této příležitosti bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Prof. Ing, Dipl.-Ing. Martinu Dražanskému, Ph.D. za dohlížení, odborné konzultace a vedení mé práce, Ing. Tomáši Goldmannovi za poskytnutí potřebného zařízení, Ing. Václavu Šimkovi za praktické rady při návrhu plošného spoje a jeho výroby, Ing. Jirímu Vinterovi za poskytnutí pracovních prostor a potřebných materiálů. A poděkování také patří mé rodině za podporu během studia.

Obsah

1	Úvod	6
2	Výškoměr	7
2.1	Barometr	7
2.2	Laserový výškoměr	8
2.3	Radarový výškoměr	8
2.4	GPS výškoměr	9
2.5	Alternativní metoda pro měření výšky	10
3	Zvolené řešení	12
3.1	Použité barometry	12
3.1.1	BMP085	12
3.1.2	BMP180	14
3.2	Komunikace přes I^2C	17
3.2.1	Zařízení na sběrnici	18
3.2.2	Komunikace na sběrnici	18
3.2.3	Rozpoznání zařízení	19
3.3	Výpočet výšky z teploty a tlaku vzduchu	19
3.3.1	Atmosférický tlak	19
3.3.2	Babinetova formule	21
4	Návrh a implementace	22
4.1	Přepínače	22
4.1.1	Multiplexor	22
4.1.2	CMOS 4066	24
4.2	Přenos dat	25
4.2.1	Stíněná kroucená dvojlinka	25
4.2.2	Elektromagnetická indukce	26
4.3	NUCLEO-F446RE	27
4.4	Zapojení	28
4.4.1	NUCLEO-F446RE	28
4.4.2	Schéma zapojení	28
4.5	Popis programu	32
4.5.1	Inicializace	32
4.5.2	Nastavení dat	32
4.5.3	Testování korekce dat	33
4.5.4	Ovládání výšky	33

4.5.5	Ovládací signály	34
4.5.6	Výpočet aktuální výšky	36
5	Testování	38
5.1	Teplota a tlak vzduchu	38
5.1.1	První měření	38
5.1.2	Druhé měření	39
5.1.3	Třetí měření	39
5.1.4	Čtvrté měření	40
5.2	Vzorkovací frekvence	40
5.3	Měření výšky	41
5.3.1	Měření do 3 metrů	41
5.3.2	Měření do 5 metrů	42
5.3.3	Měření do 8 metrů	43
5.4	Shrnutí	43
6	Závěr	44
	Literatura	46
A	Obrázky	48
B	Obsah příloženého paměťového média/	64

Seznam obrázků

2.1	Letecký barometrický výškoměr. [15]	7
2.2	Zjednodušená ukázka laserového výškoměru. [13]	8
2.3	Zjednodušená ukázka radarového výškoměru. [4]	9
2.4	Zjednodušená ukázka GPS výškoměru. [9]	10
3.1	Technické parametry čipu. [5]	13
3.2	Konfigurace jednotlivých pinů na čipu. [5]	13
3.3	Hodnoty registru určující adresu I^2C . [5]	14
3.4	Technické parametry čipu. [6]	15
3.5	Konfigurace jednotlivých pinů na modulu. [6]	16
3.6	Linearita barometrické tlaku na výšku. [6]	16
3.7	Hodnoty registru určující adresu I^2C . [6]	17
3.8	Zjednodušené znázornění I^2C komunikace mezi Master a Slave. [20]	17
3.9	Zapojení zařízení na sběrnici. [20]	18
3.10	Signály SDA a SCL při komunikaci na I^2C . [20]	18
3.11	Přenášení dat na I^2C . [20]	19
3.12	Adresování slave. [20]	19
3.13	Zobrazení hustoty vzduchu vzhledem k výšce. [23]	20
3.14	Zobrazení vztahu tlaku vzduchu k narůstající výšce. [23]	20
4.1	Zjednodušené zobrazení multiplexoru. [17]	23
4.2	Vnitřní zapojení multiplexoru. [17]	23
4.3	CMOS pinout. [21]	24
4.4	CMOS schématické zapojení. [21]	24
4.5	Kroucená dvojlinka.	25
4.6	Schéma zapojení desky na zemi.	29
4.7	schéma plošného spoje pro desku na zemi.	30
4.8	Schéma zapojení desky ve vzduchu.	31
4.9	schéma plošného spoje pro desku ve vzduchu.	31
4.10	Znázornění rozdělení požadované výšky na sektory.	34
5.1	Porovnání získaných hodnot pro teplotu a tlak vzduchu.	38
5.2	Porovnání získaných hodnot pro teplotu a tlak vzduchu.	39
5.3	Porovnání získaných hodnot pro teplotu a tlak vzduchu.	40
5.4	Porovnání získaných hodnot pro teplotu a tlak vzduchu.	40
5.5	Fotka osciloskopu ukazující frekvenci mikrokontroléru.	41
5.6	Porovnání získaných výšek z měření pro 3 metrový rozdíl.	42
5.7	Porovnání získaných výšek z měření pro 5 metrový rozdíl.	42

5.8	Porovnání získaných výšek z měření pro 8 metrový rozdíl.	43
A.1	NUCLEO Arduino pinout [18]	49
A.2	NUCLEO pinout [18]	50
A.3	celkové zobrazení pinout NUCLEO446RE [18].	51
A.4	Výsledný graf prvního měření teploty vzduchu.	51
A.5	Výsledný graf druhého měření teploty vzduchu.	52
A.6	Výsledný graf třetího měření teploty vzduchu.	52
A.7	Výsledný graf čtvrtého měření teploty vzduchu.	52
A.8	Výsledný graf prvního měření tlaku vzduchu.	53
A.9	Výsledný graf druhého měření tlaku vzduchu.	53
A.10	Výsledný graf třetího měření tlaku vzduchu.	53
A.11	Výsledný graf čtvrtého měření tlaku vzduchu.	54
A.12	Výsledný graf prvního měření tlaku vzduchu a tří metrové výšky s historií uloženou v bufferu.	54
A.13	Výsledný graf prvního měření tlaku vzduchu a tří metrové výšky s nekonečnou historií.	55
A.14	Výsledný graf druhého měření tlaku vzduchu a tří metrové výšky s historií uloženou v bufferu.	55
A.15	Výsledný graf druhého měření tlaku vzduchu a tří metrové výšky s nekonečnou historií.	56
A.16	Výsledný graf třetího měření tlaku vzduchu a tří metrové výšky s historií uloženou v bufferu.	56
A.17	Výsledný graf třetího měření tlaku vzduchu a tří metrové výšky s nekonečnou historií.	57
A.18	Výsledný graf prvního měření tlaku vzduchu a pěti metrové výšky s historií uloženou v bufferu.	57
A.19	Výsledný graf prvního měření tlaku vzduchu a pěti metrové výšky s nekonečnou historií.	58
A.20	Výsledný graf druhého měření tlaku vzduchu a pěti metrové výšky s historií uloženou v bufferu.	58
A.21	Výsledný graf druhého měření tlaku vzduchu a pěti metrové výšky s nekonečnou historií.	59
A.22	Výsledný graf třetího měření tlaku vzduchu a pěti metrové výšky s historií uloženou v bufferu.	59
A.23	Výsledný graf třetího měření tlaku vzduchu a pěti metrové výšky s nekonečnou historií.	60
A.24	Výsledný graf prvního měření tlaku vzduchu a osmi metrové výšky s historií uloženou v bufferu.	60
A.25	Výsledný graf prvního měření tlaku vzduchu a osmi metrové výšky s nekonečnou historií.	61
A.26	Výsledný graf druhého měření tlaku vzduchu a osmi metrové výšky s historií uloženou v bufferu.	61
A.27	Výsledný graf druhého měření tlaku vzduchu a osmi metrové výšky s nekonečnou historií.	62
A.28	Výsledný graf třetího měření tlaku vzduchu a osmi metrové výšky s historií uloženou v bufferu.	62

A.29 Výsledný graf třetího měření tlaku vzduchu a osmi metrové výšky s nekonečnou historií.	63
---	----

Kapitola 1

Úvod

V poslední době se pro člověka stává čím dál tím důležitějším a běžnějším určovat pokud možno co nejpřesněji výšku nějakého objektu. Ať už se jedná o velká dopravní nebo vojenská letadla, malá motorová nebo bezmotorová letadla, parašutisty a nebo jen určení nadmořské výšky terénu. V dnešní době jsou ale největším rozmachem technologie dálově řízených bezpilotních letounů neboli dronů. Jedná se většinou o malé letající objekty, a proto je zapotřebí, aby byly co nejpřesnější při co nejmenší velikosti a váze celého měřicího zařízení.

Výškoměr je jedním z nejpodstatnějším a nepostradatelným přístrojem v letectví pro navigaci letu. Proto je důležité, aby fungovaly co nejspolehlivěji a nejrychleji ve všech možných situacích, které mohou nastat. Chyba v měření by totiž mohla způsobit havárii objektu. To by v lepším případě mohlo mít za následek "pouze" škody na majetku, v horším případě by u velkých dopravních letadel mohlo dojít k vysokému počtu ztrát na lidských životech. Pokud tyto senzory pracují ve všech podmínkách spolehlivě, piloti poté mohou, společně i s dalšími podpůrnými zařízeními, bezpečně přistát i za špatné viditelnosti.

V letectví se využívá hlavně aktivních výškoměrů. Ty fungují na principu vyslání světelného nebo zvukového signálu směrem k zemi, kde následně zjišťuje, za jakou dobu se signál vrátí odrazem zpět ke zdroji signálu. Na základě této hodnoty a známé rychlosti signálu vypočítá, v jaké výšce se letadlo nachází. Tyto senzory se ale využívají pouze jako doplňkový přístroj pro barometrické výškoměry z toho důvodu, že při letu nízko nad zemí jsou mnohem efektivnější.

Tato práce byla vypracována za účelem vytvoření systému, který bude indikovat výšku dronu a následně automaticky seřídí aktuální výšku s požadovanou výškou dronu od země. Systém je určen pro speciální dron, na kterém bude zavěšený kabel poskytující dronu napájení pro umožnění delšího setrvání ve vzduchu. Proto byl vyvinut tento systém, který zajistí dronu automatické hlídání výšky bez jakéhokoliv zásahu.

Dokument se zabývá různými dalšími senzory pro měření výšky, jejími výhodami, nevýhodami a následně rozhodnutí a vybrání nejvhodnějšího senzoru, který bude nejefektivněji a nejlevněji řešit danou problematiku. Následně v dalších kapitolách je popsáno, jak daná varianta bude implementována, způsob získání a zpracování dat, použitý hardware a algoritmus pro získání aktuální výšky na základě získaných dat ze senzorů.

Kapitola 2

Výškoměr

Výškoměr je druh senzoru, který na základě nějaké metody a výpočtů změří vzdálenost měřeného objektu od povrchu země. Existuje několik druhů výškoměrů, kde každý využívá pro změření jinou metodu. Pro měření výšky se dá využít několik různých typů senzorů, a proto je zapotřebí vybrat takový, který bude pro řešení problematiky nejefektivnější.

2.1 Barometr

Tento typ výškoměru se používá hlavně v letectví anebo horolezectví. Jedná se o typ, který pro zjištění výšky využívá tlak vzduchu. Jejich nevýhoda je právě již zmíněný tlak vzduchu, který není stabilní a během dne se může měnit. Z toho vyplývá, že pro stejnou výšku lze naměřit několik různých hodnot tlaku vzduchu. Proto se barometrický výškoměr musí pokaždé před použitím zkalibrovat, aby ukazoval správné hodnoty. Jak ale už bylo zmíněno, během dne se atmosférický tlak vlivem počasí může mírně změnit, čímž poté vznikají nepřesnosti v měření. Sensor nikdy neukazuje aktuální výšku měřeného objektu nad zemí, ale ukazuje pouze výšku vztaženou k určitému referenčnímu bodu např. hladina moře. Pro určení vzdálenosti objektu od země se v letectví využívají spíše rádiové výškoměry. [15]



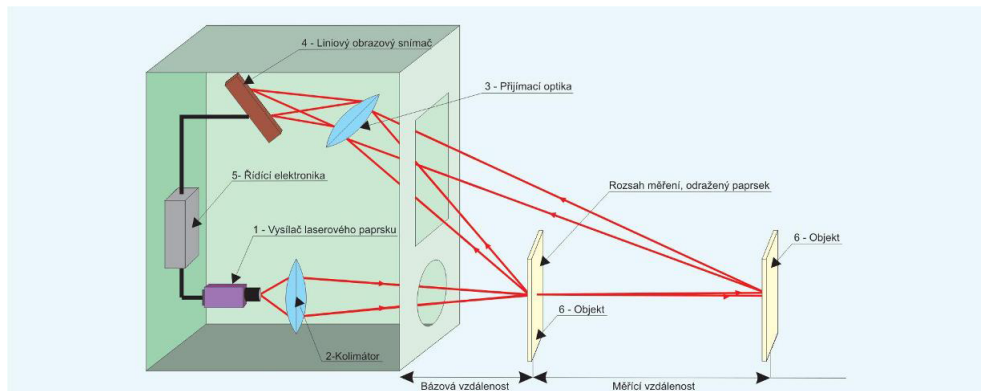
Obrázek 2.1: Letecký barometrický výškoměr. [15]

2.2 Laserový výškoměr

Tento typ výškoměru se používá v letectví pro měření při nízkých výškách, hlavně při přistávání nebo vzletu letadla. Jedná se o aktivní výškoměr, který vysílá vlastní signál a svou výšku poté vypočítává z doby, která je potřebná k odrazu a návratu tohoto signálu. Sensor využívá technologie neviditelného a bezpečného infračerveného laserového signálu, který v určitých intervalech vysílá směrem k zemi. Jakmile dosáhne povrchu, dojde k jeho odrazení, kde jeho část se vrátí zpět k výškoměru, je senzorem zaznamenána a jsou poté zastaveny hodiny, které byly spuštěny po vypuštění signálu. Vzhledem k tomu, že rychlost světla je známa, pomocí časovače zjistí, jakou dobu trvalo paprsku, než se dostal k zemi a zpět k senzoru. [13] Funkce pro výpočet výšky, která je dána vzorcem (2.1) poté vypočítáme tak, že zjištěný čas t vynásobíme známou hodnotou rychlosti světla v , čímž zjistíme vzdálenost, kterou paprsek urazil. Pro zjištění výšky s musíme tuto hodnotu ještě podělit dvěma z toho důvodu, že paprsek cestoval směrem od měřeného objektu k zemi a zase zpět. [13]

$$s = \frac{v \cdot t}{2} \quad (2.1)$$

Nevýhodou tohoto výškoměru je jeho vysoká citlivost na nerovnosti terénu. V této situaci vzniká problém při náhlých změnách ve výšce terénu, které mohou být způsobeny například budovami, stromy nebo i vysokou trávou. To má za následek velké kolísání aktuálně naměřené výšky od povrchu země.



Obrázek 2.2: Zjednodušená ukázka laserového výškoměru. [13]

2.3 Radarový výškoměr

Tato technologie se často používá v armádě a v letectví, kde se využívá pro detekci různých letadel, lodí nebo vozidel v určité oblasti.

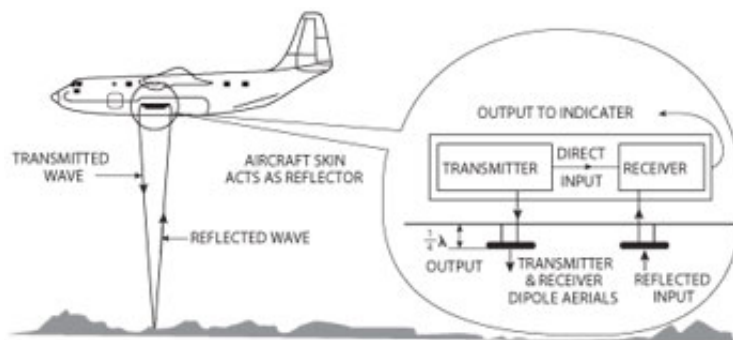
Senzor využívá velice podobnou technologii jako laserový výškoměr s tím rozdílem, že signál nevysílá infračervené světlo, ale elektromagnetické vlny o určité frekvenci. Tento výškoměr se opět skládá z vysílače a přijímače, kde vysílač vysílá elektromagnetické vlny směrem k zemi a přijímač přijímá signály elektromagnetických vln o určité

frekvenci, které se odrazily od nějakého objektu nebo země. Na základě spojitosti signálu rozlišujeme 2 různé typy radarových senzorů.

- **CW radar** - Jedná se o radar, který vysílá signál s konstantní energií a lze je použít obvykle jen na krátké vzdálenosti. U tohoto typu radaru jsou zapotřebí dvě oddělené antény. [1]
- **Pulzní radar** - Tento typ radaru vysílá signál a poté se přepne do režimu snímání a čeká, až zachytí odpovídající odražený signál. Zde radaru postačuje pouze jedna anténa pro vysílání a příjem signálu a využívá se pro větší vzdálenosti. [1]

Výška se pak počítá obdobně jako u laserových výškoměrů z rychlosti elektromagnetického signálu a doby, za jakou se daný signál vrátí zpět. U CW radarů ale nastává problém v tom, že daný signál musí být rozšířen o časovou značku, aby se dalo poznat, který přijmutý signál patří k určitému odeslanému signálu.

Nevýhodou tohoto senzoru je, že reaguje na stromy, popřípadě okolní budovy a mohlo by to mít za následek kolísání aktuální výšky dronu vůči zemi. Největší nevýhodou ale je, že tento typ senzoru je efektivní pouze pro malé vzdálenosti, a proto je pro zadanou problematiku nepraktický.



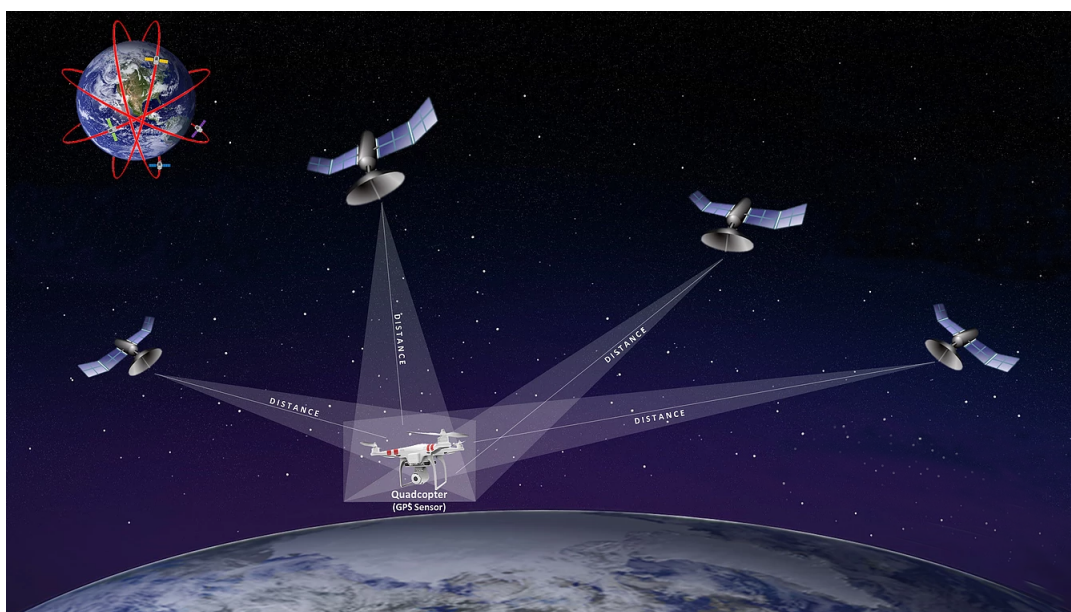
Obrázek 2.3: Zjednodušená ukázka radarového výškoměru. [4]

2.4 GPS výškoměr

Tento typ technologie se používá hlavně v turistice, kde ji lidé využívají pomocí mobilních telefonů nebo jiných zařízení pro měření GPS výšky a polohy. GPS neboli Global Positioning System je systém, který za pomoci družic umístěných na orbitě zjistí polohu, kde se dané zařízení nachází.

GPS přijímač potřebuje pro určení polohy ve dvou rovinách, tedy osy x a y , dobrý signál nejméně ze tří satelitů. Nicméně, pokud chceme zjistit polohu v třech rovinách, tedy osy x , y a z , potřebujeme dobrý signál nejméně ze čtyř satelitů (2.4). To je problematika, která letadla ve vyšších výškách nemusí příliš trápit, protože ve vzduchu je velmi nepravděpodobné, že by zde něco stínilo signál. Pokud se ale v tomto případě jedná o dron, který se může zrovna nacházet v nižších výškách v nějakém údolí, signál může být stíněný terénem a GPS nemusí získat data z potřebného počtu satelitů a stává se tím tato technologie nepřesnou a nepoužitelnou. [14]

Vypočítání výšky měřeného objektu funguje tak, že na každém satelitu se nacházejí atomové hodiny a vysílá svou aktuální polohu na zem. Než se tento vyslaný signál dostane až na zem, uplyne zhruba 70 milisekund. GPS zařízení přijímá signál z každé družice a následně potom pomocí trigonometrických výpočtů dle rozdílu doby přenosu od jednotlivých družic vypočítá aktuální polohu. Každé zařízení, které využívá GPS, má údaje o zemi uložené v paměti, kde z těchto údajů se poté zjistí skutečná poloha a výška zařízení. Bohužel ale v tomto modelu jsou části země rozděleny na elipsoidy, které jsou velice dobré pro průměrné zobrazení mořské hladiny. Nicméně ale bylo zjištěno, že v daném znázornění existují chyby v rozmezí -100 až +70 metrů nad mořem vzhledem k tomu, na jakém místě planety se zařízení zrovna nachází. [14]



Obrázek 2.4: Zjednodušená ukázka GPS výškoměru. [9]

2.5 Alternativní metoda pro měření výšky

V řešení této problematiky by se dalo i využít dalšího senzoru, který by měřil délku odmotaného kabelu. Protože na dronu bude zavěšený kabel sloužící hlavně pro napájení dronu, aktuální výška dronu by se dala zjistit tak, že daná výška by byla rovna délce odmotaného kabelu.

Tento způsob měření výšky by za jistých okolností byl velice přesný, protože jsme schopni pomocí různých metod s velkou přesností zjistit délku odmotaného kabelu. Přičemž tato velikost by byla rovna aktuální výšce dronu. Ovšem toto by platilo jen za určitých podmínek.

Jednou z nich by bylo, že dron by se musel nacházet naprosto přesně nad zařízením, které by odmotávalo a měřilo kabel. Pokud by se dron nacházel jen s menší odchylkou na jiném místě než odvíjející zařízení, aktuální výška dronu by už neodpovídala délce odvinutého kabelu. Poté by se pro zjištění aktuální výšky dronu musela použít Pythagorova věta, aby se z odvinutého kabelu dala vypočítat aktuální výška

Tato metoda ale je nepoužitelná z toho důvodu, že pro určení polohy obou zařízení by šlo pouze přes GPS systém. Ten může mít velké chyby v měření, a proto nejsme schopni zajistit, aby se obě zařízení nacházela v jedné přímce, která by byla kolmá vůči zemi, anebo zjistit přesnou vzdálenost vůči zemi mezi odvíjejícím zařízením a dronem.

Další z podmínek pro použití této metody je, že dron by musel po celou dobu držet kabel napnutý a nesměl by být prověšený. To je problematika, která je náročnější na řešení se stoupající výškou, a tudíž i velikostí odvinutého kabelu. Při středních výškách by se musel kabel napnout silou, kterou už je nemožné dronem vykonat.

Kapitola 3

Zvolené řešení

Pro řešení dané problematiky byl zvolen barometrický výškoměr. Jak již bylo zmíněno výše, barometrický senzor měří tlak vzduchu, pomocí kterého zjistí výšku objektu. Toto zařízení bylo zvoleno protože má nevýhodu, která se dá jednoduchým způsobem vyřešit a díky tomu by měl mít i dostačující přesnost měření.

Barometry jsou nevýhodné v tom, že před každým použitím se musí zkalibrovat a nastavit spodní hladina, od které bude měřit aktuální výšku. Další problém nastává v tom, že tlak vzduchu se vlivem počasí a času může různě měnit a může nastat, že pro stejnou výšku mohou odpovídat různé hodnoty. Proto by se při každé změně tlaku měl senzor znovu zkalibrovat.

Pro jejich odstranění bylo zvolené takové řešení, kde se použijí 2 senzory barometrů, přičemž se jeden bude nacházet na dronu a druhý bude na zemi u odvíjejícího zařízení a bude určovat spodní hladinu pro měření aktuální výšky. Tyto senzory budou mezi sebou komunikovat, čímž se zajistí zkalibrování a aktuálnost tlaku pro spodní hladinu a díky tomu si bude moci dron držet stabilní výšku i po delší dobu letu.

Pro testování a realizaci projektu byly zvoleny 2 různé typy barometrů. Prvním zvoleným barometrem je BPM180 a druhým je BMP085.

3.1 Použité barometry

3.1.1 BMP085

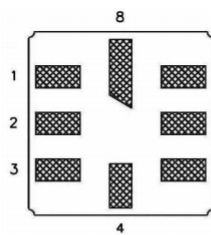
Jedná se o barometr nové generace vysoce přesných digitálních tlakových senzorů pro spotřebitelské aplikace, který je založen na piezoresistivní technologii pro EMC robustnost, vysokou přesnost, linearitu a dlouhodobou stabilitu. Jeho velice nízké napětí a nízkonapěťová elektornika je optimalizována pro použití v mobilních telefonech, PDAs, GPS zařízeních a jiná venkovní vybavení. Proto také při rychlé konverzi modul nabízí vynikající výkon. [5]

Senzor umožňuje měření tlaku v rozsahu od 300 hPa až po 1 100 hPa a měření teploty od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tento tlak odpovídá zhruba výšce od -500 metrů pod mořskou hladinou až do $9\ 000$ metrů nad mořem. Pro napájení je potřeba přivést na čip napětí mezi $1,8\text{ V}$ až po $3,6\text{ V}$, při kterém je schopen korektně pracovat při spotřebě $5\ \mu\text{A}$ na vzorek za sekundu ve standartním módu (3.1). Tento rozsah měřeného tlaku vzduchu je více než dostačující pro řešení dané problematiky. [5]

Parameter	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Units
Operating temperature	T_A	operational	-40		+85	°C
		full accuracy	0		+65	
Supply voltage	V_{DD}	ripple max. 50mVpp	1.8	2.5	3.6	V
	V_{DDIO}		1.62	2.5	3.6	V
Supply current @ 1 sample / sec. 25°C	I_{DDLOW}	ultra low power mode		3		µA
	I_{DDSTD}	standard mode		5		µA
	I_{DDHR}	high resolution mode		7		µA
	I_{DDUHR}	ultra high res. mode		12		µA
Peak current	I_{peak}	during conversion		650	1000	µA
Standby current	I_{DDSBM}	at 25°C		0.1		µA
Serial data clock	f_{SCL}				3.4	MHz
Conversion time temperature	t_{C_temp}	standard mode		3	4.5	ms
	$t_{C_p_low}$	ultra low power mode		3	4.5	ms
	$t_{C_p_std}$	standard mode		5	7.5	ms
	$t_{C_p_hr}$	high resolution mode		9	13.5	ms
Conversion time pressure	$t_{C_p_uhr}$	ultra high res. mode		17	25.5	ms
	Absolute accuracy pressure $V_{DD} = 3.3V$	700 ... 1100 hPa 0 ... +65 °C	-2.5	±1.0	+2.5	hPa
		300 ... 700 hPa 0 ... +65 °C	-3.0	±1.0	+3.0	hPa
		300 ... 1100 hPa -20 ... 0 °C	-4.0	±1.5	+4.0	hPa
Resolution of output data	pressure			0.01		hPa
	temperature			0.1		°C
Relative accuracy pressure $V_{DD} = 3.3V$	700 ... 1100 hPa @ 25 °C			±0.2		hPa
	0 ... 65 °C @ p const.			±0.5		hPa
Noise in pressure		see table on page 10				
Absolute accuracy temperature $V_{DD} = 3.3V$	@ 25 °C		-1.5	±0.5	+1.5	°C
	0 ... +65 °C		-2.0	±1.0	+2.0	°C

Obrázek 3.1: Technické parametry čipu. [5]

Ke komunikaci s vnějším prostředím senzor používá I^2C rozhraní. Jak je znázorněno na obrázku 3.2, zapojíme piny 3 a 4 na VDD, přivedeme na ně tedy napájení 3,3 V. Pin 1 bude uzeměn a proto je připojíme na GND. Pin 2, 5 a 8 v našem případě nebudeme potřebovat a mohou zůstat nezapojeny, nebo je lze připojit na GND. Pin 7, neboli SDA, slouží k získávání informací ze senzoru, připojíme ho tedy na pin, který bude programem specifikovaný na získávání dat z I^2C rozhraní. Pin 6, neboli SCL, slouží pro získávání řídicího signálu, určuje nám hodiny, podle kterých se řídí tok dat přes sběrnici. Zapojíme ho tedy na pin, který bude programem specifikovaný pro generování hodinového signálu pro I^2C rozhraní. [5]



Pin No.	Name	Function	Type
1	GND	Ground	Power
2	EOC	End of conversion	Digital output
3	V_{DDA}	Power supply	Power
4	V_{DDIO}	Digital power supply	Power
5	NC	no internal connection	-
6	SCL	I^2C serial bus clock input	Digital input
7	SDA	I^2C serial bus data	Digital bi-directional
8	XCLR	master clear (low active) input	Digital input

Obrázek 3.2: Konfigurace jednotlivých pinů na čipu. [5]

I^2C rozhraní

I^2C rozhraní je použito pro komunikaci mezi mikrokontrolérem a senzorem. Používá se zejména pro řízení senzoru, čtení kalibračních dat z E^2PROM a čtení naměřených dat z A/D převodníku po dokončení měření. Pro komunikaci slouží 2 piny SDA a SCL, kde SDA slouží pro posílání dat a SCL slouží pro řízení komunikace.

Modul má také pin master clear (XCLR), který je aktivní při zapojení logické 0. Ten slouží k resetování senzoru, tedy při aktivaci se nainicializují všechny vnitřní registry a počítadla. Zařízení se také automaticky resetuje po přivedení napájení. Proto pin XCLR může zůstat nezapojen.

U I^2C rozhraní může být jedno zařízení typu master, který ovládá veškerou komunikaci na sběrnici a až 127 zařízení typu slave, s kterými master komunikuje přes sběrnici. Zařízení připojené na sběrnici se mezi sebou rozlišují pomocí adresy. Jak je vidět na obrázku 3.3, modul má pouze *LSB* rozlišující, zda se bude jednat o zápis do registru (*LSB* nastaveno v logické 0.) nebo o čtení z registru (*LSB* nastaveno v logické 1.). Pokud tedy master chce komunikovat s tímto modulem, nejdříve pošle na sběrnici adresu a poté odpovídající data. V tomto případě, pokud bude master zapisovat do modulu na I^2C sběrnici, odešle odpovídající adresu 0xEE a poté odešle data. Pokud bude chtít číst z modulu, odešle na I^2C sběrnici odpovídající adresu 0xEF a poté přečte data z registrů daného modulu. [5]

A7	A6	A5	A4	A3	A2	A1	W/R
1	1	1	0	1	1	1	0/1

Obrázek 3.3: Hodnoty registru určující adresu I^2C . [5]

3.1.2 BMP180

Barometr je nástupcem staršího modulu BMP085. Jedná se o novou generaci přesných digitálních senzorů. Tyto jsou schopny měřit teplotu a tlak vzduchu pro spotřební aplikace. Elektronika BMP180 umožňuje na jeho čip přivést nízké napětí, díky tomu je optimalizována pro různé použití v mobilních telefonech, PDAček, GPS navigacích a různých venkovních zařízeních. Tento čip se chlubí hlavně rychlým převáděcím časem a vynikajícím výkonem. Se senzorem je možné komunikovat přes rozhraní I^2C , které umožňuje snadnou integraci systému s mikrokontrolérem. [6]

BMP180 čip je založen na piersoresistivní technologii pro EMC robustnost, vysokou přesnost, linearitu (znázorněno na obrázku 3.6) a dlouhodobou stabilitu.

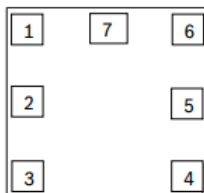
Parameter	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Units
Operating temperature	T _A	operational	-40		+85	°C
		full accuracy	0		+65	
Supply voltage	V _{DD}	ripple max. 50mVpp	1.8	2.5	3.6	V
	V _{DDIO}		1.62	2.5	3.6	V
Supply current @ 1 sample / sec. 25°C	I _{DDLOW}	ultra low power mode		3		µA
	I _{DDSTD}	standard mode		5		µA
	I _{DDHR}	high resolution mode		7		µA
	I _{DDUHR}	Ultra high res. mode		12		µA
	I _{DDAR}	Advanced res. mode		32		µA
Peak current	I _{peak}	during conversion		650	1000	µA
Standby current	I _{DDSBM}	@ 25°C		0.1		µA
Relative accuracy pressure V _{DD} = 3.3V		950 ... 1050 hPa @ 25 °C		±0.12		hPa
				±1.0		m
		700 ... 900hPa 25 ... 40 °C		±0.12		hPa
				±1.0		m
Absolute accuracy pressure V _{DD} = 3.3V		300 ... 1100 hPa 0 ... +65 °C	-4.0	-1.0*	+2.0	hPa
		300 ... 1100 hPa -20 ... 0 °C	-6.0	-1.0*	+4.5	hPa
Resolution of output data		pressure		0.01		hPa
		temperature		0.1		°C
Noise in pressure		see table on page 12-13				
Absolute accuracy temperature V _{DD} = 3.3V		@ 25 °C	-1.5	±0.5	+1.5	°C
		0 ... +65 °C	-2.0	±1.0	+2.0	°C
Conversion time	t _{c_p_low}	ultra low power mode		3	4.5	ms
pressure	t _{c_p_std}	standard mode		5	7.5	ms
	t _{c_p_hr}	high resolution mode		9	13.5	ms
	t _{c_p_luhr}	ultra high res. mode		17	25.5	ms
	t _{c_p_ar}	Advanced res. mode		51	76.5	ms
Conversion time temperature	t _{c_temp}	standard mode		3	4.5	ms
Serial data clock	f _{SCL}				3.4	MHz
Solder drifts		Minimum solder height 50µm	-0.5		+2	hPa
Long term stability**		12 months		±1.0		hPa

Obrázek 3.4: Technické parametry čipu. [6]

Modul umožňuje měření tlaku v rozsahu od 300 hPa až po 1 100 hPa a měření teploty od -40 °C až do +85 °C. Tento tlak odpovídá zhruba výšce od -500 metrů pod mořskou hladinou až do 9 000 metrů. Pro napájení je potřeba přivést na čip napětí mezi 1,8 V až po 3,6 V, při kterém je schopen korektně pracovat při spotřebě 5 µA na vzorek za sekundu 3.1.

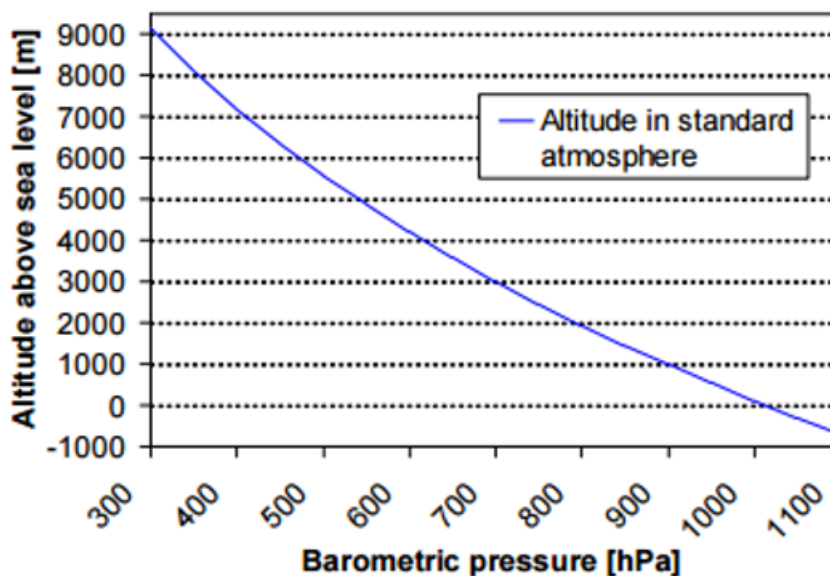
Ke komunikaci s vnějším prostředím používá I²C rozhraní. Jak je znázorněno na obrázku 3.5, zapojíme piny 2 a 3 na VDD, přivedeme na ně tedy napájení 3,3 V. Pin 7 bude uzeměn, a proto je připojíme na GND. Pin 1 a 4 v našem případě nebudeme potřebovat, mohou zůstat nezapojeny a nebo je lze připojit na GND. Pin

6, neboli SDA, slouží k získávání informací ze senzoru, připojíme ho tedy na pin, který bude programem specifikovaný na získávání dat z I^2C rozhraní. Pin 5, neboli SCL, slouží pro získávání řídicího signálu, určuje nám hodiny, podle kterých se řídí tok dat přes sběrnici. Zapojíme ho tedy na pin, který bude programem specifikovaný pro generování hodinového signálu pro I^2C rozhraní. [5]



in No	Name	Function
1	CSB*	Chip select
2	VDD	Power supply
3	VDDIO	Digital power supply
4	SDO*	SPI output
5	SCL	I2C serial bus clock input
6	SDA	I2C serial bus data (or SPI input)
7	GND	Ground

Obrázek 3.5: Konfigurace jednotlivých pinů na modulu. [6]



Obrázek 3.6: Linearita barometrické tlaku na výšku. [6]

I^2C rozhraní

I^2C rozhraní je použito pro komunikaci mezi mikrokontrolérem a senzorem. Používá se zejména pro řízení senzoru, čtení kalibračních dat z E^2PROM a čtení naměřených dat z A/D převodníku po dokončení měření. Pro komunikaci slouží 2 piny SDA a SCL, kde SDA slouží pro posílání dat a SCL pro řízení komunikace.

Modul má také pin master clear (XCLR), který je aktivní při zapojení logické 0. Tento pin slouží k resetování senzoru, tedy při aktivaci se nainicializují všechny vnitřní registry a počítačla. Zařízení se také automaticky resetuje po přivedení napájení. Proto pin XCLR může zůstat nezapojen.

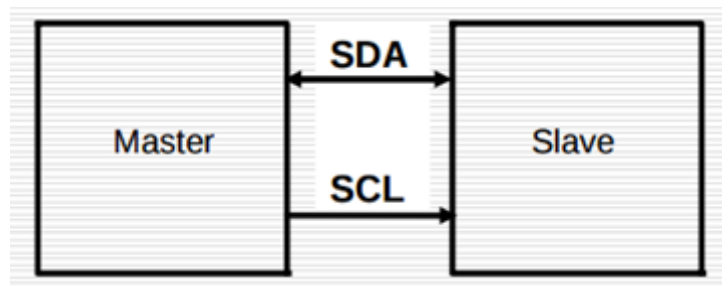
U I^2C rozhraní může být jedno zařízení typu master, který ovládá veškerou komunikaci na sběrnici a až 127 zařízení typu slave. Zařízení připojené na sběrnici se mezi sebou rozlišují pomocí adresy. Jak je vidět na obrázku 3.7, modul má pouze LSB rozlišující, zda se bude jednat o zápis do registru (LSB nastaveno v logické 0.) nebo o čtení z registru (LSB nastaveno v logické 1.). Pokud tedy master chce komunikovat s tímto modulem, nejdříve se na sběrnici pošle adresa a poté odpovídající data. V tomto, případě pokud bude master zapisovat do modulu, na I^2C sběrnici, odešle odpovídající adresu 0xEE a poté odešle data. Pokud bude chtít číst z modulu na I^2C sběrnici, odešle odpovídající adresu 0xEF a poté přečte data z registrů daného modulu. [6]

A7	A6	A5	A4	A3	A2	A1	W/R
1	1	1	0	1	1	1	0/1

Obrázek 3.7: Hodnoty registru určující adresu I^2C . [6]

3.2 Komunikace přes I^2C

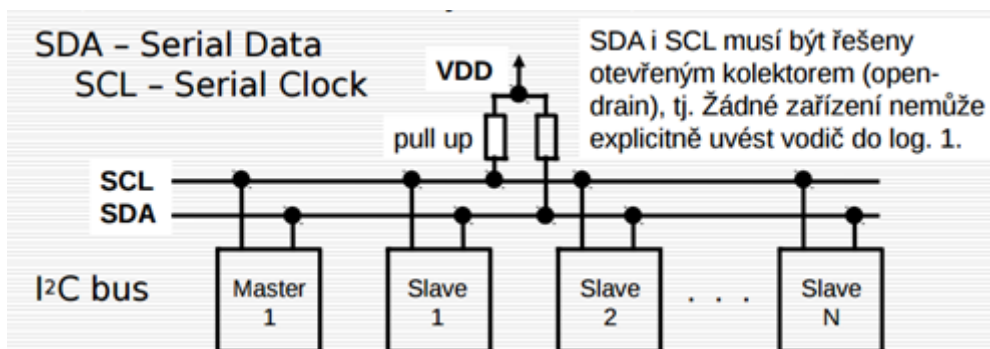
I^2C je synchronní sériové rozhraní apelující na svou jednoduchost a levnou implementaci. Jedná se o protokol typu Master-Slave (3.8), který komunikuje způsobem half-duplex. Tedy v jednu dobu se informace posílají buď od Mastera k Slave zařízení nebo obráceně. Nikdy se informace neposílají oběma směry ve stejnou časovou jednotku.



Obrázek 3.8: Zjednodušené znázornění I^2C komunikace mezi Master a Slave. [20]

3.2.1 Zařízení na sběrnici

Na jedné sběrnici může být vždy maximálně jedno zařízení Master a N-násobek zařízení typu Slave (3.9), kde N je maximálně 127 zařízení slave. Tato maximální hodnota je dána formátem adresy. Rozhraní se sestává z jednoho datového vodiče a jednoho vodiče pro přenášení synchronizačního signálu. Master má za úkol řídit komunikaci na sběrnici, vybírat zařízení typu Slave, s kterým bude komunikovat a generovat hodinový signál. Slave je neustále připojen ke sběrnici a čeká, až ho Master pomocí jeho adresy zavolá, poté určité Slave zařízení začíná komunikovat s Masterem.

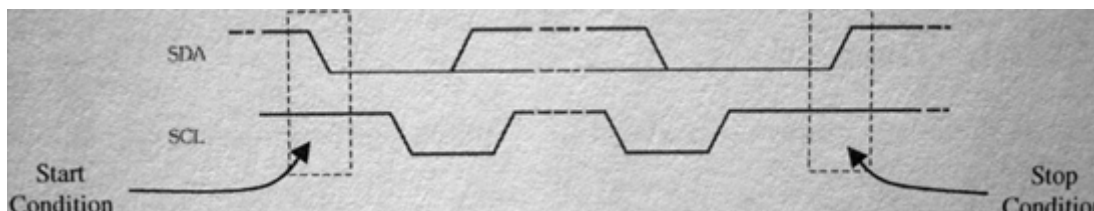


Obrázek 3.9: Zapojení zařízení na sběrnici. [20]

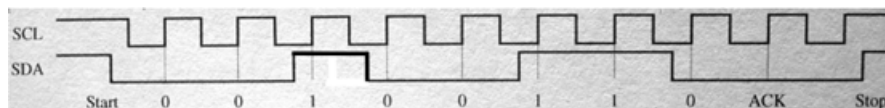
3.2.2 Komunikace na sběrnici

Pokud neprobíhá komunikace, master ani slave nijak neovlivňuje vodiče a pull-up zařízení zajistí na SDA i SCL stav v logické 1. (3.9)(3.10). Komunikaci zahajuje vždy master s tím, že překlopí SDA z logické 1 do logické 0 při nastaveném SCL v logické 1. Přitom hrana této změny stavu signalizuje zahájení komunikace. Po jejím zahájení se data začnou vzorkovat výhradně při náběžné hraně SCL, tedy při přechodu z logické 0 do logické 1. Změna hodnoty na SDA se tedy provádí vždy při SCL nastaveném v logické 0. Ukončení komunikace je signalizováno hranou z logické 0 do logické 1 na SDA při nastaveném SCL v logické 1 (3.11).

Vzhledem k tomu, že se jedná o sériovou komunikaci, data jsou přenášena po jednotlivých bitech, standardně 1 byte v bitovém rámci. Jak již bylo zmíněno, datový rámec se poté skládá ze startovací hrany, datového bloku, který obsahuje 8 bitů, potvrzovacího bitu, díky kterému lze signalizovat, že data, která byla ze strany slave odeslána, jsou validní a ukončující hrany.



Obrázek 3.10: Signály SDA a SCL při komunikaci na I²C. [20]



Obrázek 3.11: Přenášení dat na I^2C . [20]

3.2.3 Rozpoznání zařízení

Pro jednoznačné identifikování slave zařízení pro bezproblémovou komunikaci na I^2C sběrnici jsou zavedeny unikátní adresy modulů. Tyto adresy jsou zapotřebí k tomu, aby při komunikaci se zařízením typu slave by se dalo rozpoznat, s kterým konkrétním zařízením chceme komunikovat. Při zahájení komunikace se proto nejdříve odešle 8bitů v prvním rámci, které jsou interpretovány jako adresa (3.12). Z nich je prvních 7 bitů použito na identifikaci zařízení, z čehož vyplývá, že lze připojit na sběrnici maximálně 127 zařízení typu slave, 8. bit je použit pro nastavení read/write. Pokud je nastaven v logické 1 je signalizováno čtení, tudíž nastane přenos dat ze slave do master. Při nastavení logické 0 je signalizován zápis, čímž nastává přenos dat z master do slave.

	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	
START	A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0	R/W	ACK
	Slave address (7 bits)							0-write 1-read	0-ACK 1-NACK

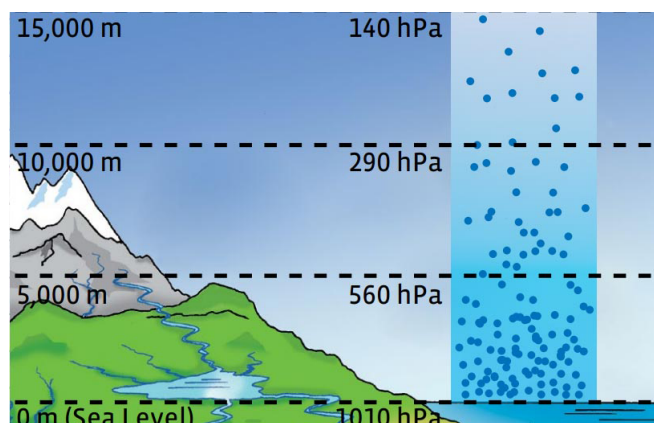
Obrázek 3.12: Adresování slave. [20]

3.3 Výpočet výšky z teploty a tlaku vzduchu

3.3.1 Atmosférický tlak

Atmosférický tlak je síla, která působí na jednotkovou plochu. Jedná se o vzduch obklopující planetu Zemi a má svoji hmotnost. Ta odpovídá přibližně 5,157 tisícům tun. To je zhruba 1,29 kg na 1 m^3 . Taková velká hmotnost působí svou silou kolmo na planetu Zemi, čímž způsobí, že na zemi vytváří určitý tlak. Ten je označován jako atmosférický tlak a vzniká tíhou svíslého sloupce vzduchu od zemského povrchu nebo hladiny moře kolmo vzhůru skrz celou atmosféru. [3]

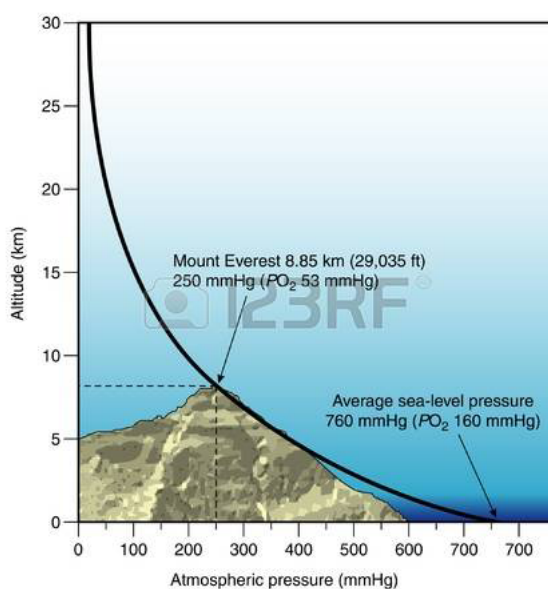
Při měření atmosférického tlaku musíme počítat i s ostatními přírodními jevy, které přímo ovlivňují velikost atmosférického tlaku. Mezi tyto vlivy patří třeba teplota vzduchu, obsah vodní páry v atmosféře, nadmořská výška a zeměpisná šířka. Jako normální atmosférický tlak je stanovena hodnota, která odpovídá redukovanému tlaku na hladinu moře, tedy zhruba 1 013,25 hPa. [3]



Obrázek 3.13: Zobrazení hustoty vzduchu vzhledem k výšce. [23]

Atmosféra nemá po celém svislém sloupci stejnou hustotu vzduchu. Pokud touto atmosférou stoupáme, sloupec vzduchu se postupně zmenšuje, čímž dochází i ke klesání tlaku (3.13). Udává se, že do vzdálenosti asi 30 kilometrů od povrchu země je soustředěno asi 99% hmotnosti atmosféry. V těchto výškách se průměrný tlak pohybuje kolem 10 až 14hPa. Do 50 kilometrů nad zemí od povrchu je soustředěno asi 99,92% hmotnosti atmosféry. Při výšce nad 80 kilometrů je už asi pouhá 1 deseti tisícina hmotnosti atmosféry. Pokud se dostaneme až na hranici atmosféry, stává se z ovzduší pomalu vakuum a můžeme naměřit hodnotu tlaku blížíící se k nule, jak je vidět na obrázku 3.14. Proto, kdybychom atmosféru považovali za homogenní, její výška by sahala pouze do 7 991 metrů nad mořskou hladinou. [3]

Pokud ale budeme počítat s malými rozdíly výšek, můžeme ji považovat za homogenní. Všeobecně se uvádí, že tlak ve výšce 5500 kilometrů nad mořskou hladinou klesne zhruba na polovinu. [22]



Obrázek 3.14: Zobrazení vztahu tlaku vzduchu k narůstající výšce. [23]

Jak již bylo zmíněno výše, tlak se během dne různě mění vlivem dalších přírodních jevů. Jedním z nich je třeba teplota. Teplejší vzduch se snaží dostat do vyšších vrstev, čímž umožní studenějšímu vzduchu zaujmout jeho místo a dostat se tak do nižších vrstev. Zede se může opět zahřívat a celý proces se bude opakovat. Důležitý je proto i sluneční svit, který ohřívá zemský povrch a to poté odevzdává teplo vzduchu, který je v nižších vrstvách. Vyšší tepelnou kapacitu než zemský povrch má voda. Proto v nocích nastává to, že na podzim značně převládají větry z moře na pevninu. Na jaře je to zase naopak a převládá spíše vítr z pevniny do moře. Přestože vzduch má stejný objemu tlaku, má při různých teplotách odlišnou hustotu. Z toho plyne, že má i rozdílný objem. Proto tlak vzduchu je závislý i na teplotách vzduchu. Protože v teplém vzduchu tlak s rostoucí výškou klesá vždy o něco pomaleji než ve studeném vzduchu. Pro výpočet výšky se poté používá Babinetova formule 3.1, která obsahuje všechny tyto důležité jevy.

3.3.2 Babinetova formule

Jedná se o vzorec pro výpočet výšky z rozdílu tlaku, který odvodil z barometrické formule francouzský fyzik J. Babinet (3.1). Přesnost vzorce je nepřímo úměrná vzdálenosti uvažovaných hladin. Z těchto důvodů lze tento vzorec uspokojivě použít pouze za těch předpokladů, že zadané rozdíly obou hladin nepřekročí 1 000 metrů. Tato funkce je dána výrazem 3.1.

$$z = 16000 * \left(1 + \frac{t}{273}\right) \left(\frac{p_1 - p_2}{p_1 + p_2}\right) \quad (3.1)$$

Kde t je průměrná teplota mezi dolní a horní hladinou měřeného tlaku naměřených ve stupních Celsia. Dále p_1 značí hodnotu tlaku v hektopascalech naměřenou na dolní hladině a p_2 je hodnota tlaku v hektopascalech naměřená na horní hladině. Z toho pak vypočítáme rozdíl výšek v metrech, kterou ve vzorci reprezentuje značení z . Jmenovatel zlomku je odvozen od absolutní nuly. Tedy teplota nemůže být nižší, než je teplota ve vesmíru, která odpovídá -273 °C. Vzorek nám určuje, že vertikální barický stupeň se zvětšuje o 0,37%, zvýší-li se teplota o jeden stupeň. [3]

Kapitola 4

Návrh a implementace

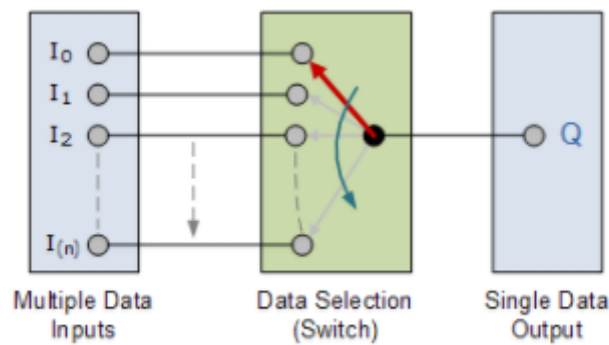
Pro realizaci byl zvolen mikrokontrolér NUCLEO-F446RE a 2 různé typy barometrů, BMP085 a BMP180, které byly osazeny na 2 desky. Mezi nimi se na základě rozdílu naměřených hodnot vypočítá výška. Pro lepší přesnost byly použity oba barometry současně a výsledná hodnota tlaku a teploty se získá z průměrných hodnot každé desky. Pro získání dat z barometrů použijeme I^2C rozhraní, na které lze připojit až 127 zařízení s různými adresami, jak je zmíněno výše. Zde ale nastává problém v tom, že oba senzory mají stejnou adresu a to jak pro zápis (0xEE), tak i pro čtení (0xEF), jak lze vidět na obrázku 3.3 a 3.7. Pokud tedy chceme mít všechny barometry připojené na jedné I^2C sběrnici, musíme je nějak rozlišit.

4.1 Přepínače

Je elektronická součástka, která se chová stejně jako 2 spínače se společným výstupem. Účelem přepínače je, že přepne jeden vybraný vstup ze dvou nebo více vstupů na jeden společný výstup. Existuje několik různých druhů jak analogových tak digitálních přepínačů, kde každý z nich má své určité vlastnosti.

4.1.1 Multiplexor

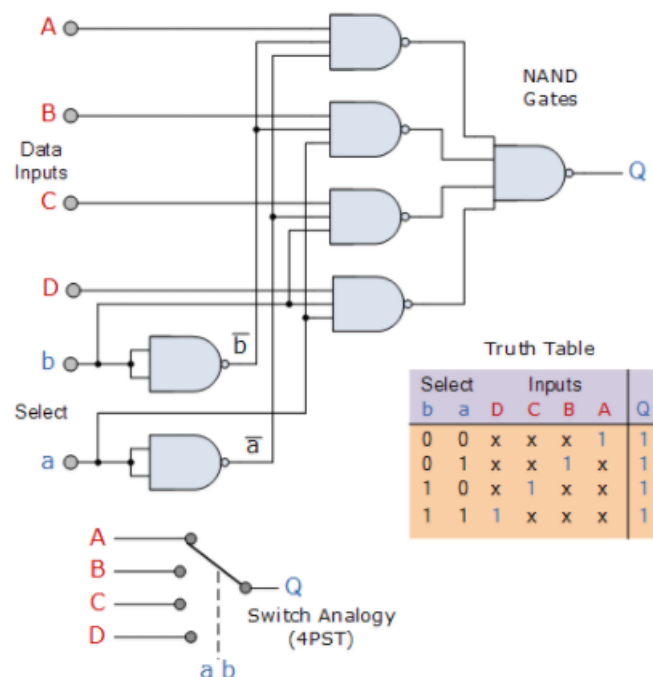
Multiplexor je kombinační logický obvod, který slouží k tomu, aby přepínal vstupy na jeden výstup (4.1). Multiplexory se skládají z klopných obvodů AND a OR, pomocí kterých dokáže jednosměrně vybrat jeden z mnoha datových vstupů a přeměřovat ho na jeden společný výstup (4.2). Každý multiplexor může mít maximálně 2^n datových vstupů, kde n je počet adresovacích vstupů. Jejich pomocí se vybere vždy jeden, který se přenesení na výstup. [17]



Obrázek 4.1: Zjednodušené zobrazení multiplexoru. [17]

Jak je vidět v pravdivostní tabulce na obrázku 4.2, každý vstup má přesně stanovenou adresu. Pokud nějaký vstup není zavolán svou adresou, je ignorován a nemůže žádným způsobem ovlivnit výstup multiplexoru.

Používá se hlavně pro převod paralelních dat na sériová data, nebo pro vybrání určitého vstupu. Jedna jeho velká nevýhoda je, že přes multiplexor složený z klopných obvodů projde pouze jednosměrná komunikace. Pokud bych chtěl tedy z jednoho vstupu přepínat na více vstupů je zapotřebí použít demultiplexor, který pracuje na stejném principu. Pokud ale chceme přepínat mezi více vstupy a mít obousměrnou komunikaci musíme zvolit CMOS technologii, která toto umožňuje.

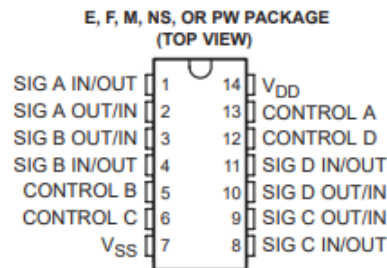


Obrázek 4.2: Vnitřní zapojení multiplexoru. [17]

4.1.2 CMOS 4066

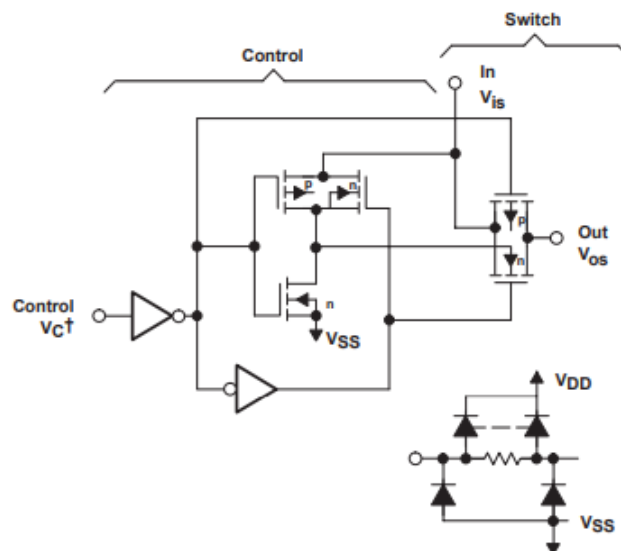
Jedná se o čtyřbodový spínač, který se skládá z CMOS tranzistorů. Je určený pro obousměrný přenos nebo multiplexování analogových a nebo digitálních signálů.

Skládá se ze čtyř dvoustranných přepínačů, z nichž každý má své nezávislé ovládací prvky. Jak je vidět na obrázku 4.4, p a n zařízení v daném přepínači jsou ovládány současně nebo vypnuty řídicím signálem.



Obrázek 4.3: CMOS pinout. [21]

Jak je na obrázku znázorněno, jamka n-kanálového zařízení na každém přepínači je vázána na vstup, pokud je spínač sepnutý nebo na zem, pokud je spínač vypnutý. Spínač zapneme nebo vypneme přivedením logické 1 nebo 0 na vstup kontrolního pinu. Tato konfigurace eliminuje změnu prahového napětí spínacího tranzistoru se vstupním signálem a tím udržuje nízkou úroveň odporu při pilném provozním signálu. [21]



Obrázek 4.4: CMOS schématické zapojení. [21]

Každý modul 74HC4066N obsahuje 4 dvoustranné přepínače (4.3), kde každý z nich má svůj ovládací vstup. Pokud na ovládací vstup přivedu logickou 1, přepínač se otevře a projde přes něj obousměrná komunikace. Pokud na určitý kontrolní pin přepínače přivedeme buď logickou 1/0 a poté necháme pin nezapojen (tzv. ve

vzduchu), přivedenou hodnotu si uchová až do té doby, dokud nebude odpojené napájení modulu a nebo na kontrolní vstup přivedena jiná logická hodnota. Na rozdíl od multiplexoru, který na základě adresového vstupu mohl vybrat jenom 1 vstup, tento modul umožňuje mít všechny přepínače aktivní najednou a tudíž mohou být vybrány všechny vstupy. V tomto případě ale je potřeba zajistit, aby byl aktivní pouze jeden přepínač. Jinak by mohlo dojít ke kolizi adres mezi barometry a došlo by k nekonzistenci získaných dat.

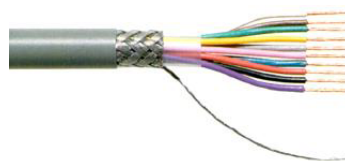
Pro řešení této problematiky byly použity 2 logické obvody 74HC4066, kde obě desky byly modulem osazeny pro rozdělení barometrů BMP085 a BMP180. Pro rozdělení mezi deskami byly použity 2 různé kanály I^2C rozhraní, které lze použít z mikrokontroléru NUCLEO-F446RE. Díky přepínači z CMOS tranzistorů, které umožňují obousměrnou komunikaci, lze rozdělit datovou komunikaci I^2C sběrnice (SDA) a tím rozlišit zařízení se stejnou adresou. Řízení datové komunikace I^2C sběrnice (SCL) se rozdělovat nemusí, protože při rozdělené SDA komunikaci dané zařízení neobdrží svou adresu. Z toho důvodu se zařízení chová jako by nebylo adresováno a následující komunikaci na sběrnici ignoruje.

4.2 Přenos dat

Pro získání dat z barometrů na desce, která bude připevněna na dronu, byl pro testovací účel zvolen 10 metrový stíněný kabel složený ze 3 kroucených dvojlinek, dohromady tedy šesti kabelů. Pro získání dat z barometrů na desce, která se bude nacházet na zemi a určovat spodní hladinu, bude připojena konektorem přímo k mikrokontroléru. Kabel mezi deskami poté může být nahrazen třeba ethernetem, přes který se budou posílat všechny řídicí informace a data z nebo do dronu.

4.2.1 Stíněná kroucená dvojlinka

Jedná se o kabel složený ze dvou vodičů, které jsou vzájemně po své délce pravidelným způsobem zakrouceny do sebe a tvoří pár. Tyto páry jsou v zásadě rovnocenné, a patří mezi tak zvané symetrické vedení. Signál přenášený po kroucené dvojlince, je vyjádřen rozdílem potenciálů obou vodičů. Takovýto kabel se chová v daném prostředí jako cívka a může se na něm indukovat elektromagnetické napětí. [19]



Obrázek 4.5: Kroucená dvojlinka.

Tyto páry jsou vytvořeny, aby co nejvíce zmenšily efekt vnějších vlivů, které na kroucenou dvojlinku mohou působit. Pokud by nějaké vnější elektromagnetické pole působilo na kabel, pak se chová obdobně jako cívka a naindukuje se na ní napětí. Pokud se tomu ale stane u kroucené dvojlinky, na oba páry se naindukují přibližně stejně velké elektrické proudy a vzájemně se poté mohou vyrušit pomocí rozdílu potenciálu obou vodičů. Toto vyrušení vnějších vlivů ale není dokonalé, proto se ještě

přidává vnější stínění. Kabley se obalí ještě vodivým materiálem, který nepřenáší žádná data, ale slouží pro lepší odstínění datových vodičů od vnějšího okolí. [19]

Pro odstranění elektromagnetické indukce vzniklé z vnějšího okolí je zapotřebí na jedné straně stínění připojit na zem, aby se veškeré vnější vlivy uzemnily a nezhodnotily tak posílaná data.

4.2.2 Elektromagnetická indukce

Elektromagnetická indukce je jev, ke kterému dochází v nestálem, měnícím se magnetickém poli. Toto pole vytváří v cívce naindukované elektrické pole, které charakterizuje indukované elektromagnetické napětí. Elektromagnetické pole může způsobit hned několik věcí. Jako například vodič, který se nepohybuje, ale mění se v něm proud, který jím prochází, pohybující se vodič s konstantním nebo proměnným proudem a nebo pohybující se permanentní magnet nebo elektromagnet.

Pro popsání elektromagnetické indukce je nutná fyzikální veličina, které se říká magnetický indukční tok (ϕ). Ten se vypočítá podle vzorce 4.1. Veličina vychází z indukčních čar. Pokud rovinu S umístíme do nějakého homogenního magnetického pole s magnetickou indukcí B , pak magnetický indukční tok je určen vzorcem 4.1. [11]

$$\phi = B * S * \cos \alpha \quad (4.1)$$

úhel α svírá vektor magnetické indukce s normálovým vektorem plochy S . V případě, že indukční čáry jsou s plochou rovnoběžné, pak je indukční tok nulový, jak lze dopočítat ze vzorce 4.2. [11]

$$\alpha = \frac{\pi}{2} rad \quad (4.2)$$

Pro děje v nestacionárním magnetickém poli jsou charakteristické změny indukčního toku. Ty mohou být způsobeny změnou B (změna velikosti proudu vodiče nebo změnou polohy vodiče či magnetu), S nebo α (rotace cívky nebo magnetu). Kvantitativně se uvažuje se změnou indukčního toku ΔF za čas Δt

Velikost indukovaného napětí určuje Faradayův zákon elektromagnetické indukce: Změní-li se magnetický indukční tok uzavřeným vodičem za dobu Δt o ΔF , indukuje se ve vodiči elektromotorické napětí, jehož střední hodnota se dopočítá podle vzorce 4.3. [11]

$$U_i = \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \quad (4.3)$$

4.3 NUCLEO-F446RE

Deska díky své cenové dostupnosti poskytuje uživatelům flexibilní způsob jak si mohou vyzkoušet své nápady a vytvořit jejich prototypy. Řada mikrokontrolérů STM32 poskytuje množství různých kombinací výkonu, spotřeby energie a funkcí. Obsahuje také Arduino konektivitu, pomocí které lze snadno rozšířit funkčnost platformy STM32 s širokým výběrem specializovaných štítů. [18]

Čip STM32F446 při 180MHz poskytuje výkon 225DMIPS/608, který se provádí z paměti typu FLASH s nulovými čekajícími stavy díky akceleratoru ART.

Poskytuje:

- dvě vyhrazené audio PLL
- SPDIF vstupy
- tři poloviční duplexy I^2S
- dvě sériová audio rozhraní (SAI) podporující plný duplex I^2S
- režim multiplexu časobého dělení (TDM)
- poskytuje až 20 komunikačních rozhraní
 - čtyři USART běžící až do 11,25 Mbit/s
 - čtyři SPI běžící až 45 Mbit/s
 - tři I^2C s novým volitelným digitálním filtrem
 - Dva CAN
 - SDIO
 - HDMI
 - CEC
 - rozhraní fotoaparátu
- dva 12-bit DACs
- tři 12-bit ADCs dosahující 2.4 MSPS nebo 7.2 v překládaném režimu
- až 17 časovačů, 16 a 32 bitů běžících až do 180 MHz
- jednoduché rozšíření paměti použitím 90MHz paměťového řadiče s 32-bitovým paralelním rozhraním
- podpora paměti FLASH,SRAM,PSRAM,NOR,NAND,SDRAM

Jak lze vidět na obrázku [A.2](#) a [A.1](#), mikrokontrolér má možnost použít až 3 kanály I^2C , pomocí kterých můžeme rozdělit barometry se stejnou adresou. Nicméně ale deska poskytuje pouze 3 kanály a my potřebujeme rozlišit 4 barometry. Proto tedy použijeme pouze 2 kanály na rozlišení komunikace mezi deskou, která bude na zemi a deskou nacházející se na dronu. Tímto řešením se ulehčí o CMOS klopný obvod, kterým by se musela rozlišit komunikace mezi zemí a dronem.

4.4 Zapojení

4.4.1 NUCLEO-F446RE

Pro komunikaci s barometry byly vybrány dva I^2C kanály ze tří a to kanál 1 a 2, konkrétně I2C1_SDA na pinu PB_7, I2C2_SDA na PB_3, I2C1_SCL na PB_8 a I2C2_SCL na PB_10. Jeden kanál bude sloužit pro komunikaci s deskou na zemi a druhý kanál bude sloužit pro komunikaci s deskou ve vzduchu.

Dále bude potřeba využít uzemnění a napájení z desky na 3,3 V pro napájení CMOS 4066 a barometrů. Pro ovládání přepínačů na 74HC4066 jsou zapotřebí 2 piny. Pro tento účel byly zvoleny 2 piny PC_9 a PC_8, které byly nastaveny na desce jako binární výstup. Těmi se bude vybírat, zda se pošle adresa barometru BMP180 nebo BMP085 a následně se s ním zahájí komunikace.

Ještě je potřeba vybrat nějaké piny, kterými se bude signalizovat dronu, zda má udržovat výšku, stoupat nebo klesat. Pro tyto účely by nám bohatě stačily pouze 2 piny. Pomocí jejich kombinací bychom byli schopni určit 4 stavy, na základě kterých by se dron rozhodoval, jak se má chovat. Nicméně ale dron může korigovat svůj výkon rotorů, čímž může měnit rychlost stoupání. Pokud bychom dronu signalizovali pouze to, že má letět naplno nahoru nebo dolů, nebyli bychom potom schopni efektivně udržovat výšku v případech, kdyby byla potřeba jen drobná korekce ve výkonu. Hlavní problém by byl také v tom, že bychom nebyli schopni nijak signalizovat, kdyby došlo k chybě ve čtení dat nebo k jinému neočekávanému stavu, po kterém by se dron mohl začít chovat nepředvídatelně a mohlo by dojít k jeho zřícení. Z tohoto důvodu jsem okolí hladiny, kolem které se má dron udržovat, rozdělil do 9 sektorů a byly přidány ještě 2 signalizace pro chyby programu a měření.

Pro signalizování výšky dronu bylo zvoleno 5 pinů PB_0, PC_0, PC_1, PC_2 a PC_3, které byly nastaveny jako binární výstup. Jejich účelem je signalizovat dronu, zda má stoupat, klesat nebo jestli došlo k chybě ve zpracování dat.

Mikrokontrolér připojíme pomocí micro-USB kabelu k počítači, notebooku nebo jinému zařízení, přes které budeme moci daný mikrokontrolér napájet a přes nějaký program, který bude odchyťávat a posílat data na sériovou linku, ho budeme moci ovládat.

4.4.2 Schéma zapojení

Pozemní deska

Jak je vidět na obrázku 4.6, pro komunikaci s NUCLEO-F446RE slouží konektor SV1, kde piny 1-5 slouží pro ovládání výšky dronu. Tyto piny jsou propojeny s diodami, které budou vizuálně zobrazovat ovládací signály. Také jsou přímo propojeny s konektorem SV3. Pin 6 a 7 na konektoru SV1 slouží pro I^2C komunikaci na kanálu 1. Pin 8 a 9 slouží pro ovládání přepínačů na 74HC4066N, které rozdělují barometry na I^2C sběrnici. Pin 10 slouží pro přivedení napájení na desku a pin 11 pro uzemnění. Dále pin 12 a 13 slouží pro I^2C komunikaci na kanálu 2.

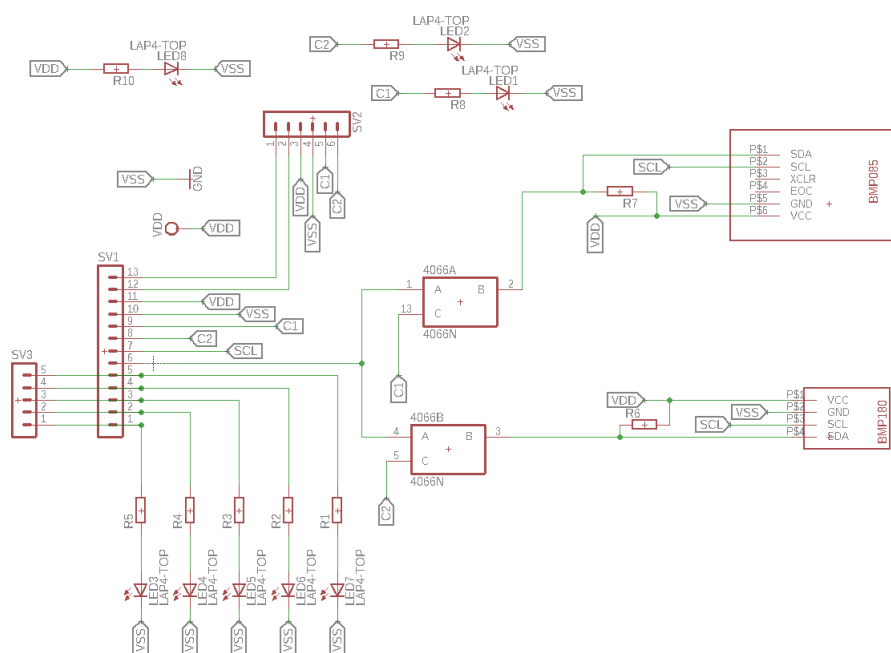
Modul 4066A a 4066B jsou znázorněny 2 přepínače kanálu *A* a *B* na modulu 74HC4066, kde na vstup *A* je přivedena společná SDA komunikace a jeho výstup *B* je přiveden k příslušnému barometru. Tyto přepínače jsou otevírány a zavírány přivedením příslušných ovládacích signálů na vstup *C*.

Deska je osazena barometry BMP180 a BMP085, ke kterým jsou přivedeny příslušné signály z konektoru SV1 a modulu 74HC4066. U obou barometrů je kvůli zajištění spolehlivější komunikace připojen na SDA vstup PULL-UP rezistor o velikosti 2K2 Ω

Konektor SV2 slouží jako výstup, ke kterému se připojí kabel propojující druhou desku. Přes konektor SV2 bude probíhat veškerá komunikace a ovládání druhé desky.

Konektor SV3 slouží jako výstup pro ovládací signály, které slouží pro ustálení stanovené výšky dronu se skutečnou výškou.

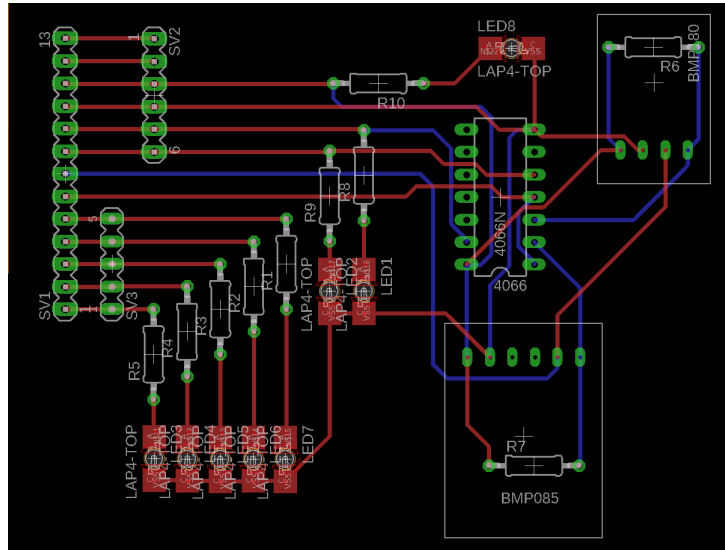
Deska je dále osazena kontrolními diodami, které signalizují správnou funkčnost a zapojení napájení desky a ovládacích signálů pro modul 74HC4066.



Obrázek 4.6: Schéma zapojení desky na zemi.

- plošný spoj

Na základě schématu zapojení pozemní desky bylo v EAGLu vytvořeno schéma, podle kterého se vyrobil plošný spoj. Po jeho výrobě byl plošný spoj osazen odpovídajícími součástkami (4.7).



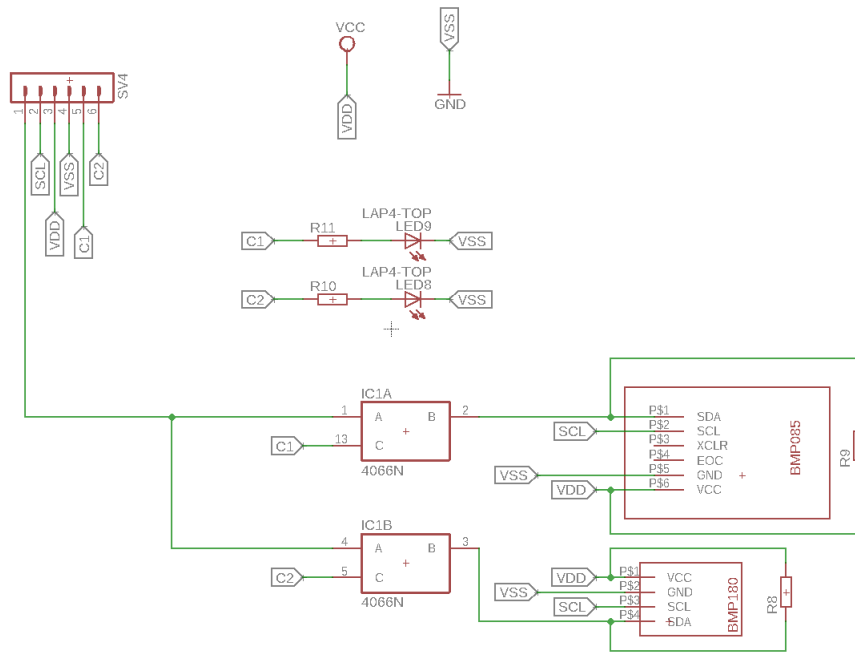
Obrázek 4.7: schéma plošného spoje pro desku na zemi.

Propojení pinů SV1 (4.6) s mikrokontrolérem STM32F446: (A.3)

- pin 1 => PB_0
- pin 2 => PC_1
- pin 3 => PC_0
- pin 4 => PC_3
- pin 5 => PB_2
- pin 6 => PB_7
- pin 7 => PB_8
- pin 8 => PC_8
- pin 9 => PC_9
- pin 10 => GND
- pin 11 => +3V3
- pin 12 => PB_10
- pin 13 => PB_3

deska připojená na dronu

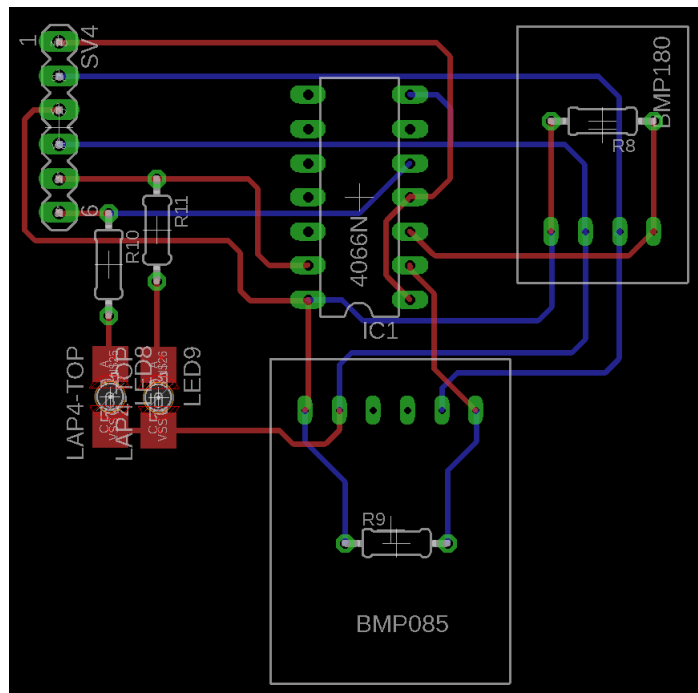
Jak je vidět na obrázku 4.8, je schéma zapojení velice podobné jako je zapojení pro pozemní desku (4.6). Pouze neobsahuje diody pro signalizaci ovládacích signálů a konektory SV1, 2 a 3. Obsahuje jen konektor SV4, který se shodně propojí kabelem s SV2 na pozemní desce 4.6.



Obrázek 4.8: Schéma zapojení desky ve vzduchu.

- plošný spoj

Na základě schématu zapojení desky ve vzduchu bylo v EAGLu vytvořeno schéma, podle kterého se vyrobil plošný spoj. Po jeho výrobě byl plošný spoj osazen odpovídajícími součástkami (4.9).



Obrázek 4.9: schéma plošného spoje pro desku ve vzduchu.

4.5 Popis programu

Jako vývojové prostředí pro NUCLEO-F446RE byl použit online mbed compiler. Poskytuje lehký on-line kompilátor C / C++ IDE, který je překonfigurovaný tak, aby umožnil rychlé psaní programů, překládání a stahování je pro běh na mikrokontroléru. Díky tomuto řešení nemusíme nic stahovat ani instalovat. Vzhledem k tomu, že se jedná o webovou aplikaci, lze se k ní přihlásit odkudkoliv a pokračovat i z jiných míst. Z toho důvodu také lze pracovat na jakémkoliv operačním systému. Po napsání programu stačí dát compilovat a aplikace nám po správném překladu stáhne přeložený program, který se jednoduše přes USB nahraje do mikrokontroléru.

Pro komunikaci s barometry byly použity knihovny pro barometrický tlakový senzor BMP085 a BMP180, které obsahují funkce pro inicializaci barometrů a získávání dat ze senzoru pomocí I^2C sběrnice.

4.5.1 Inicializace

Po zapojení mikrokontroléru se program dostane nejdříve do stavu inicializace. V něm dojde k detekci a inicializaci barometrů a přepínačů. Tento stav mikrokontrolér signalizuje tak, že na sériovou linku pošle string "*INITIALIZATION*", postupně rozsvítí kontrolní ledku pro ovládání výšky dronu od nejnižší po nejvyšší a poté rozsvítí všechny najednou.

V tomto stavu se otestuje, zda byly barometry správně nainicializovány a vracejí korektní data. Pokud se načtou špatná data, mikrokontrolér zhasne všechny diody a dojde k resetování mikrokontroléru a opětovné inicializaci.

4.5.2 Nastavení dat

Dalším stavem po inicializaci je prvotní nastavení dat. Protože z každého barometru můžeme získat trochu rozdílná data, po správném nastavení HW v tomto stavu program provede 10 vzorků, které si uloží do paměti. Tento stav je mikrokontrolérem signalizován posláním stringu "*SET VALUES*" na sériovou linku, rozsvícením všech ovládacích diod a střídavým blikáním ovládacích diod přepínačů.

Uložená data se na desce zprůměrují a získají se hodnoty pro tlak a teplotu na každé desce zvlášť. Tyto hodnoty se poté mezi sebou odečtou a vydělí dvěma. Tím dosáhneme hodnoty, která nám bude sloužit pro nastavení korekce mezi deskami a dosáhneme vyrovnáním nulové hladiny. Hodnota pro korekci tlaku a teploty vduchu zůstává až do resetování nebo opětovném připojení mikrokontroléru konstantní.

Z tohoto důvodu musí být, po zapojení nebo resetování mikrokontroléru, desky vedle sebe. Protože se mezi nimi nastaví korekce a bude se pak z této pozice výška brát jako zem, tedy 0 metrů nad zemí. Pokud vše proběhne v pořádku, mikrokontrolér pošle na sériovou linku string "*READY*", zhasne všechny ovládací signály výšky a zapíná je na základě rozdílu požadované a aktuální výšky. Zároveň přejde do dalšího stavu, ve kterém se provádí hlavní část programu, která v nekonečné smyčce provádí získávání, kontrolování a vyhodnocování dat.

4.5.3 Testování korekce dat

Každý vzorek se testuje, zda se ze senzorů vrátily korektní hodnoty. Pokud se načtou špatná data při inicializaci, mikrokontrolér zhasne všechny diody a dojde k resetování mikrokontroléru a opětovné inicializaci. Pokud se ale už nacházíme v hlavní části programu, nelze mikrokontrolér resetovat. V tomto stavu se už předpokládá, že dron je ve vzduchu a kdyby se resetoval mikrokontrolér, došlo by k celému procesu inicializace včetně korekce výšky. To by způsobilo posun nulové hladiny dronu, který by poté mohl brát například 10 metrů nad zemí jako zem, tedy 0 metrů na zemí. Proto pokud dojde k chybě dat v tomto stavu, program vstoupí do tzv. `ErrorHandlerFunction` (4.5.3).

princip testování

Pokud se program nachází ve stavu inicializace, otestuje se, zda-li jsou barometry správně inicializovány. To zjistíme tak, že vrátí buď defaultní hodnoty registrů pro teplotu vzduchu, které jsou u barometrů BMP180 rovné 0 °C a u barometrů BMP085 je rovna 12.8 °C nebo vrátí vysoce rozdílné teploty vzduchu od normálu. Proto kontrolují, zda se nachází ve zvoleném intervalu $-40\text{ °C} - +50\text{ °C}$. Dále testují, zda rozdíl tlaku vzduchu mezi barometry na určité desce nepřesáhne hodnotu 2 hPa. Pokud hodnoty nesplňují nějakou z podmínek, funkce zajistí resetování mikrokontroléru, kterým zajistí opětovnou inicializaci a zotavení se z chyby měření.

Testování hodnot v hlavním stavu programu probíhá trochu jinak než ve stavu inicializace. Vzhledem k tomu, že si mikrokontrolér uchovává historii naměřených hodnot, lze tedy porovnávat právě naměřené hodnoty s předchozím vzorkem. Zkontroluje se, zda rozdíly naměřených teplot vzduchu nepřesahuje $\pm 3\text{ °C}$ a rozdíly naměřených tlaků vzduchu nepřesahují $\pm 2\text{ hPa}$. Právě díky uchované historii nám pro detekci chyby stačí pouze tyto kontroly. Pokud nějaká naměřená hodnota nesplňuje danou podmínku, nastaví se flag pro signalizaci chyby čtení dat a následně vstoupí do tzv. `ErrorHandlerFunction` (4.5.3).

`ErrorHandlerFunction`

Jedná se o funkci, která má na starosti zotavení programu při načtení špatných dat z barometrů.

Funkce má počítadlo, kterým si zjišťuje, kolikrát za sebou byla získána špatná data. Kvůli rychlosti zotavení programu funkce nejdříve zkusí, zda se jednalo jen o drobnou závadu při čtení dat. Proto nejdříve získá další data z barometrů a otestuje, zda se jedná už o korektní data. Pokud ano, vynuluje se počítadlo, funkce se ukončí a pokračuje se dále v programu. V případě získaných špatných dat, se proces opakuje maximálně dvakrát. Jestli ani potom nedostane správná data, funkce znovu nainicializuje barometry a nastaví počáteční data, ale proměnné pro korekci výšky nechá v původní hodnotě, aby nedošlo k posunutí nulové hladiny.

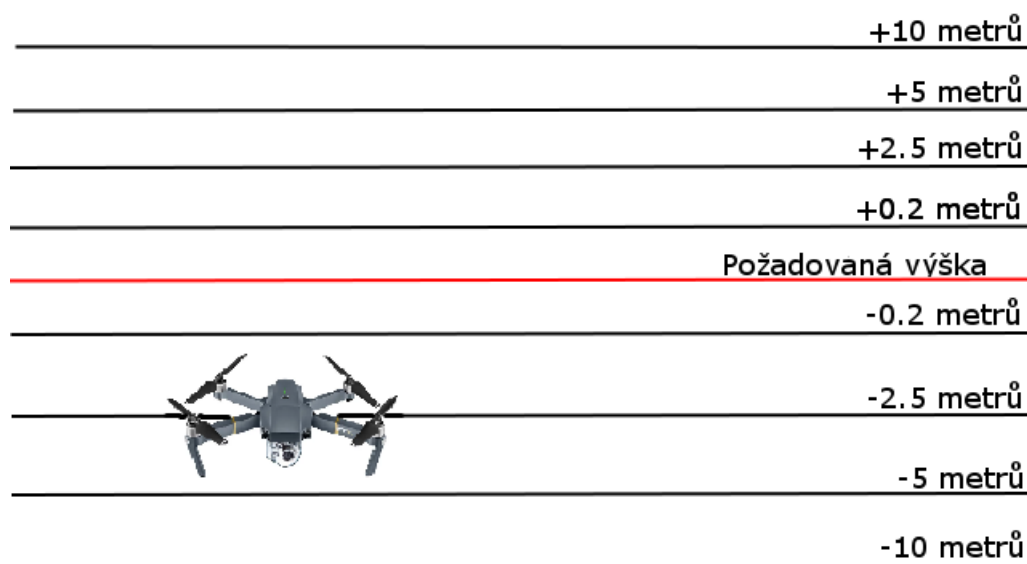
4.5.4 Ovládání výšky

Na sériovou linku lze poslat jakýkoliv string. To nám slouží pro nastavení požadované výšky, které chceme aby dron dosáhl. Po zadání znaku dojde k přerušení, které nám zkontroluje, zda znak na vstupu je číslo. Pokud ano, hodnotu uloží do bufferu a

pokračuje dál v programu. Když znak není číslo a není to ani hodnota "\x0D" (hodnota klávesy enter) , znak na vstupu se ignoruje a pokračuje dále v programu. Pokud ale dojde k přečtení "\x0D" (hodnota klávesy enter), v přerušení se vytáhne hodnota uložená v bufferu, uloží jí do proměnné určující požadovanou výšku a vynuluje buffer. Program poté porovnává požadovanou výšku s aktuální a na základě toho nastavuje výstup pro ovládání dronu, zda má stoupat, držet výšku a nebo klesat.

4.5.5 Ovládací signály

Jak již bylo zmíněno výše, okolí požadované výšky bylo rozděleno do 9 sektorů. Ty jsou rozděleny imaginárními hranicemi, které jsou nastavené ± 10 metrů, ± 5 metrů, ± 2.5 metrů a ± 0.2 metrů od požadované výšky (4.10). Podle rozdílu aktuální výšky dronu a požadované výšky je určeno, do jakého sektoru daný dron spadá a podle toho se nastaví výstup, aby se co nejvíce přiblížil nulovému rozdílu jak je vidět na 4.5.5. Dále obsahuje ještě 2 stavy, kterými lze signalizovat chybu čtení dat nebo nekorektní data.



Obrázek 4.10: Znázornění rozdělení požadované výšky na sektory.

Rozdělení vzdušné plochy na sektory a kontrolní signály (4.10)

Předpokládejme, že máme 5 pinů, kterými lze signalizovat stav měření dronu, Ty si od nejmenšího pojmenujeme control_1 - control_5. a podle daných sektorů je budeme nastavovat do logické 1 nebo 0 a tím signalizovat aktuální výšku vůči požadované výšce a určovat výkon rotorů.

- **Sektor1** ($+\infty$ až +10 metrů)
 - control_1 => 1
 - control_2 => 0

- control_3 => 0
- control_4 => 0
- control_5 => 0

- **Sektor2** (+10 metrů až +5 metrů)

- control_1 => 1
- control_2 => 1
- control_3 => 0
- control_4 => 0
- control_5 => 0

- **Sektor3** (+5 metrů až +2.5 metrů)

- control_1 => 0
- control_2 => 1
- control_3 => 0
- control_4 => 0
- control_5 => 0

- **Sektor4** (+2.5 metrů až +0.2 metrů)

- control_1 => 0
- control_2 => 1
- control_3 => 1
- control_4 => 0
- control_5 => 0

- **Sektor5** (+0.2 metrů až -0.2 metrů)

- control_1 => 0
- control_2 => 0
- control_3 => 1
- control_4 => 0
- control_5 => 0

- **Sektor6** (-0.2 metrů až -2.5 metrů)

- control_1 => 0
- control_2 => 0
- control_3 => 1
- control_4 => 1
- control_5 => 0

- **Sektor7** (-2.5 metrů až -5 metrů)

- control_1 => 0
- control_2 => 0
- control_3 => 0
- control_4 => 1
- control_5 => 0

- **Sektor8** (-5 metrů až -10 metrů)

- control_1 => 0
- control_2 => 0
- control_3 => 0
- control_4 => 1
- control_5 => 1

- **Sektor9** (-10 metrů až $-\infty$)

- control_1 => 0
- control_2 => 0
- control_3 => 0
- control_4 => 0
- control_5 => 1

- **Errorový nebo výjmečný stav**

- control_1 => 1
- control_2 => 1
- control_3 => 1
- control_4 => 1
- control_5 => 1

- **Stav nekorektních dat**

- control_1 => 0
- control_2 => 0
- control_3 => 0
- control_4 => 0
- control_5 => 0

4.5.6 Výpočet aktuální výšky

Z důvodu porovnání a zjištění lepšího způsobu měření výšky byly zvoleny 2 typy výpočtu výšky z naměřených dat. Oba způsoby berou naměřené hodnoty a vytváří si historii naměřených dat, s kterou pak dále pracují. Jeden způsob postupně shiftuje naměřené hodnoty do bufferu s kterým potom počítá a druhý způsob si vytváří nekonečnou historii, s kterou pracuje.

- **Výpočet s historií uloženou v bufferu**

Pro kvalitní měření je potřeba zvolit takovou velikost bufferu, aby výpočet zvládal dostatečně rychle konvergovat ke skutečné výšce a aby byl výpočet co nejvíce stabilní při udržování výšky. V mém případě jsem zvolil buffer o velikosti deseti prvků.

Tento způsob si postupně ukládá naměřené hodnoty z barometrů do pole. Tím se pak postupně prochází a sečtou se všechny naměřené hodnoty tlaku a teploty vzduchu pro každou desku a z jejich součtu se udělá průměrná hodnota. Ta se pak dosadí do vzorce 3.1, kde t bude průměrná hodnota teplot mezi deskami, p_1 je vypočítaná průměrná hodnota tlaku vzduchu z pozemní desky a p_2 je vypočítaná průměrná hodnota tlaku vzduchu z desky ve vzduchu. Po dosazení hodnot lze dopočítat z rozdílu tlaku a teploty vzduchu aktuální výšku z . Získaná výška z je výškový rozdíl mezi deskami, která v tomto případě odpovídá výšce dronu.

- **Výpočet s nekonečnou historií**

Tato metoda nepoužívá žádný buffer pro ukládání naměřených hodnot, ale jenom proměnné, do kterých se ukládají zprůměrované hodnoty, jak je vidět ve vzorci 4.4.

$$promenna = \frac{stara_hodnota + (konstanta * nova_hodnota)}{2} \quad (4.4)$$

K původní hodnotě dané proměnné pro teplotu nebo tlak vzduchu, je přičtena nová naměřená hodnota, která se ještě vynásobí konstantou. Jejich součet se poté zprůměruje tím, že se vydělí dvěma. Konstanta je desetinné číslo, které procentuálně určuje, o kolik % nová hodnota ovlivní starou hodnotu. V mém případě byla velikost konstanty zvolena 50%. Tímto je zajištěna lepší stabilita vypočítané výšky z naměřených hodnot. Vzhledem k tomu, že neustále průměrujeme starou hodnotu s novou, vytváří se tím nekonečná historie naměřených hodnot, která je započítána do konečného výsledku.

Naměřené hodnoty se dosadí do vzorce 3.1 pro vypočítání výšky, kde do proměnné t se dosadí průměrná hodnota naměřených teplot mezi deskami, p_1 bude obsahovat průměrné hodnoty tlaku vzduchu z barometrů jedné desky a p_2 zase z druhé desky. Po dosazení vypočítáme aktuální výšku z , která je výškový rozdíl mezi deskami. Pokud je za začátku zařízení správně kalibrováno, tato výška je pak odpovídající výška dronu.

V tomto případě, s takto nastavenou velikostí bufferu a velikostí konstanty, metoda s nekonečnou historií konverguje ke skutečné výšce nepatrně rychleji než metoda s historií uloženou v bufferu. Ta má zase o něco lepší stabilitu než metoda s nekonečnou historií. Nicméně ale tyto vlastnosti závisí hlavně na velikosti bufferu a konstanty, a proto jejich vlastnosti mohou být jiné pro různé hodnoty, kde rychlost konvergence hlavně záleží nejen na určené velikosti bufferu a konstanty, ale také na vzorkovací frekvenci mikrokontroléru, která nám udává, kolik vzorků za 1 vteřinu je schopný mikrokontrolér změřit.

Kapitola 5

Testování

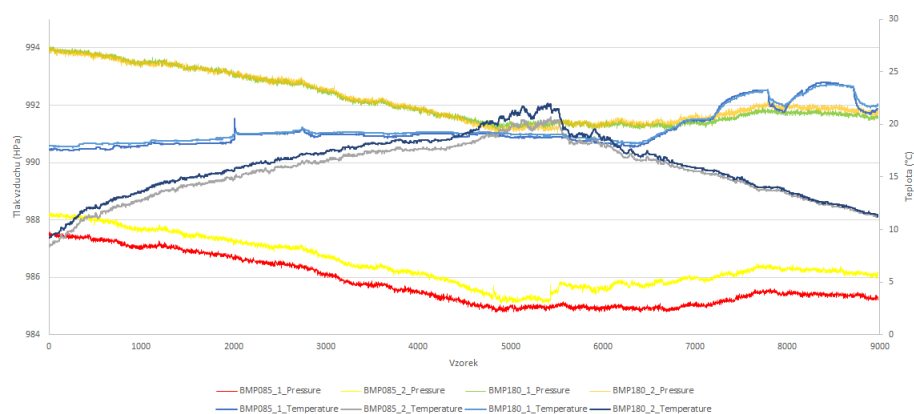
5.1 Teplota a tlak vzduchu

Jak již bylo zmíněno výše, tlak a teplota vzduchu je proměnlivá veličina a během dne se může chovat nepředvídatelně. Pro ověření této teorie byla provedena měření na dvou různých místech. Prvním místem, kde probíhalo měření, byla Dobruška nacházející se ve Východních Čechách s přibližnou nadmořskou výškou 290 metrů nad mořem. Druhým bylo Brno, vyskytující se na Jižní Moravě s průměrnou nadmořskou výškou 230 metrů nad mořem.

Z grafů je patrné, že hodnoty naměřené na určitých deskách nejsou úplně shodné, nicméně ale oba barometry reagují stejně na změnu tlaku a teploty vzduchu. Proto pro vypočítání výšky nejdříve získaná data mezi sebou zprůměrujeme, abychom získali přesnější výsledek.

5.1.1 První měření

První pokus byl proveden v Dobrušce. Za zataženého počasí bylo provedeno 10 hodinové měření, při kterém se snímala teplota a tlak vzduchu o vzorkovací frekvenci 0.25 Hz. Pro toto měření byla vzorkovací frekvence úmyslně zmenšena z důvodu redukce získaných dat pro vytvoření grafu. Pro porovnání byla jedna deska umístěna uvnitř bytu, a druhá deska byla umístěna ve venkovním prostředí. Na obrázku A.4 a A.8 lze vidět graficky znázorněná data, která byla získána z barometrů během měření. Barometry s indexem 1 jsou barometry, které byly umístěny v uzavřeném prostoru a s indexem 2 byly umístěny venku.

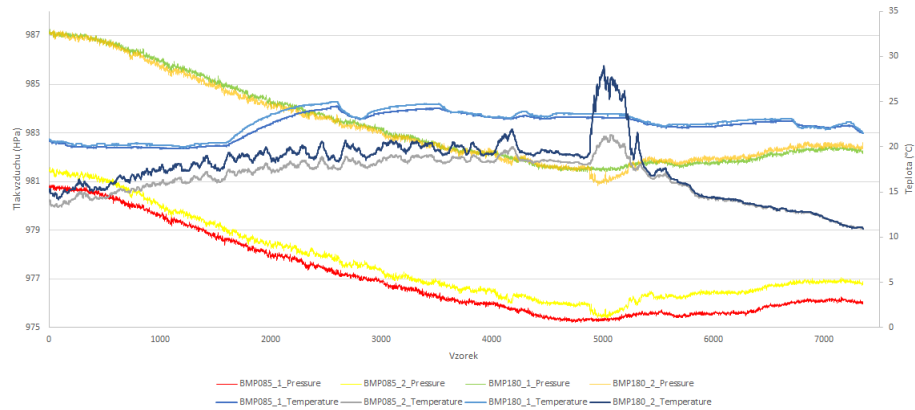


Obrázek 5.1: Porovnání získaných hodnot pro teplotu a tlak vzduchu.

Jak lze vidět na grafu 5.1, různě měnící se teplota vzduchu mezi vnitřním a vnějším prostředím nemá velké dopady na změnu tlaku vzduchu. Sice zde má rozdílnou hodnotu, ale jejich změny jsou v obou prostředích přibližně shodné.

5.1.2 Druhé měření

Druhé měření bylo provedeno za identických podmínek jako první. V tomto případě probíhalo jen 8 a půl hodiny za bezvětrného polojasného dne. Na grafu A.9 a A.5 lze vidět oproti prvnímu pokusu, že při měření ze stejného místa můžeme získat odlišné hodnoty.

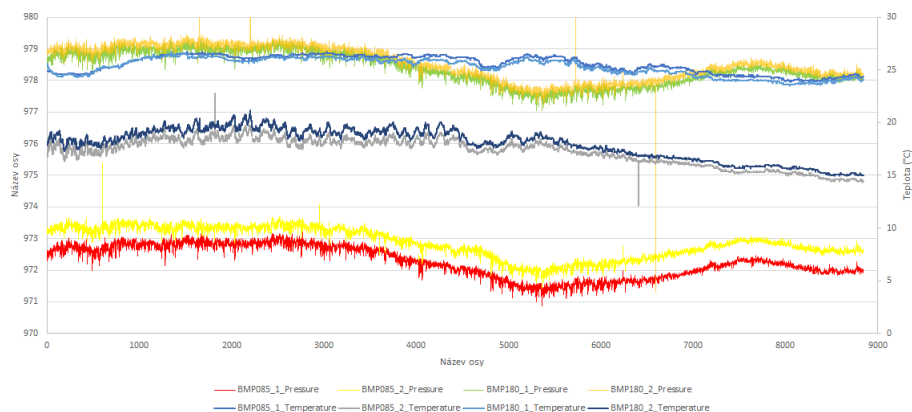


Obrázek 5.2: Porovnání získaných hodnot pro teplotu a tlak vzduchu.

Z grafu 5.2 lze vidět, kdy na barometry svítlo slunce a došlo k jejich ohřátí. Lze vidět že drobné změny v teplotě nemají velký vliv na změnu tlaku vzduchu. V případě ale velkého ohřátí čipu, jak je vidět kolem vzorku 5000, může dojít i k poměrně výrazné změně naměřeného tlaku vzduchu. Pokud by tedy nastalo, že by jedna deska byla osvětlená slunečním svitem a druhá by byla ve stínu, mohlo by dojít k nekorektnímu vypočítání výšky. Z tohoto důvodu bude dobré osadit desky do pouzdra, které zajistí dobré proudění vzduchu a uchová oba barometry ve stínu pro vytvoření identických podmínek.

5.1.3 Třetí měření

Třetí měření se tentokrát odehrávalo v Brně, kde se měřilo 10 hodin o vzorkovací frekvenci 0.25 Hz za polojasného větrného počasí. Ke konci tohoto měření kolem vzorku 7000 začalo i pršet, což se poté na grafu projevilo snížením teploty a zvýšením tlaku vzduchu. Jako při předchozích měření jedna deska byla osazena uvnitř bytu, a druhá byla posazena ve venkovním prostředí.

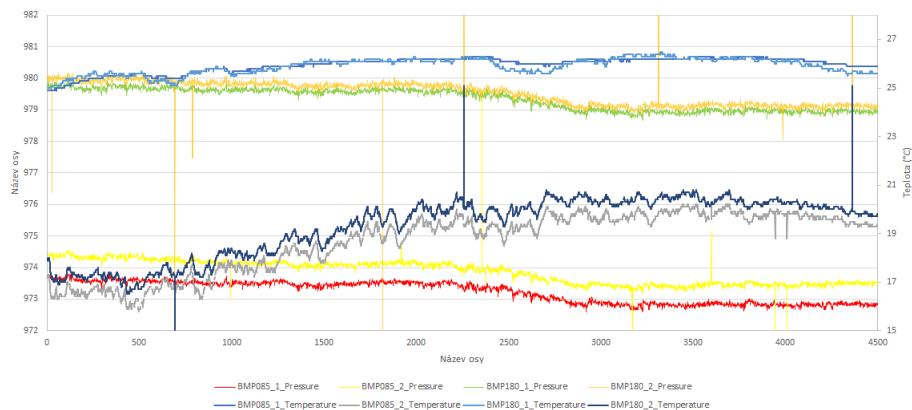


Obrázek 5.3: Porovnání získaných hodnot pro teplotu a tlak vzduchu.

Získaná data z tohoto měření lze vidět na grafu A.10 a A.6. Zde byl vytvořen nový konektor pro připojení mezi deskou a mikrokontrolérem, který nebyl dokonale připojen s deskou. To mělo za důsledek, že při čtení občas získal nekorektní data ze senzorů, které na grafu způsobily neočekávané výkyvy od předchozí hodnoty. Ty jsou ale dále programem ošetřeny a na výpočet výšky nemají žádný vliv.

5.1.4 Čtvrté měření

Stejně jako u druhého měření byly při čtvrtém pokusu vytvořeny identické podmínky třetího měření. Tento pokus probíhal za polojasného bezvětrného počasí po dobu 5 hodin. Během měření nedošlo k nějaké výrazné změně v počasí jak lze vidět i z naměřených dat A.11 a A.7. Proto vytvořený graf ze získaných hodnot je poměrně stálý po celou dobu měření a jediné co na něm lze vidět, jsou prudké výkyvy v datech, které byly způsobeny špatným přečtením hodnot z barometrů. Tato data jsou ale při výpočtu ignorována a nezpůsobí ve výpočtu výšky žádnou škodu.



Obrázek 5.4: Porovnání získaných hodnot pro teplotu a tlak vzduchu.

5.2 Vzorkovací frekvence

Pro změření vzorkovací frekvence byl využit osciloskop připojený na pin signalizující konec výpočtu. Tím bylo zjištěno, jak rychle je mikrokontrolér schopen získat data z barometrů a vypočítat z nich aktuální výšku. Vzorkovací frekvence poté udává v Hertzech počet výpočtů za jednu sekundu.



Obrázek 5.5: Fotka osciloskopu ukazující frekvenci mikrokontroléru.

Jak lze vidět na obrázku 5.5, mikrokontrolér je schopen bez výpisu na sériovou linku vypočítat výsledek s frekvencí 5.413 Hz . To znamená, že mikrokontrolér je schopen zjistit aktuální výšku dronu každou 0.185 sekundy.

5.3 Měření výšky

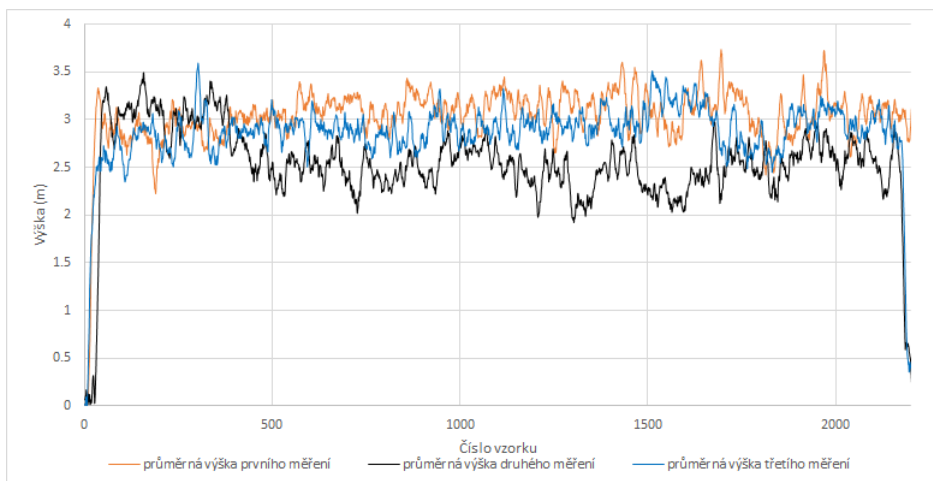
Barometry jsou velice citlivé na sluneční svit, pokud se jeden z nich náhle objeví na slunci a druhý byl ve stínu, mikrokontrolér náhle vrátil rozdíl výšky až o 10 metrů. Z toho důvodu musely být oba barometry zastíněny pro vytvoření identických podmínek.

Pro výpočet výšky byly použity 2 různé výpočty. Jeden s historií uloženou v bufferu, který je v grafu znázorněn pod indexem 1 a druhý výpočet s nekonečnou historií je v grafu znázorněn hodnotami pod indexem 2 (A.12, A.13, A.14, A.15, A.16, A.17, A.18, A.19, A.20, A.21, A.22, A.23, A.24, A.25, A.26, A.27, A.28, A.29). Z grafu lze vyčíst, že metoda pro výpočet výšky s nekonečnou historií dokáže trochu rychleji konvergovat ke skutečné výšce než metoda s historií uloženou v bufferu. Tento rozdíl je ale velice nepatrný. Naopak ale metoda s historií v bufferu má mnohem hladší průběh měření výšky a nedochází mezi vzorky k tak prudkým změnám naměřené výšky. Dále lze z grafů zjistit, že přesnost měření výšky z barometrů je zhruba ± 0.5 metrů.

5.3.1 Měření do 3 metrů

Byla provedena celkem 3 měření, kde z okna byla deska spuštěna dolů o 3 metry. Tato výška byla pro porovnání změřena pomocí metrického pásma. Po spuštění o danou výšku deska zůstala na zavěšeném lanu po dobu 15 minut, během kterých probíhalo měření.

Z naměřených dat byly vytvořeny grafy pro výpočet s historií uloženou v bufferu A.12, A.13 a A.16, pro výpočet s nekonečnou historií A.13, A.15 a A.17.



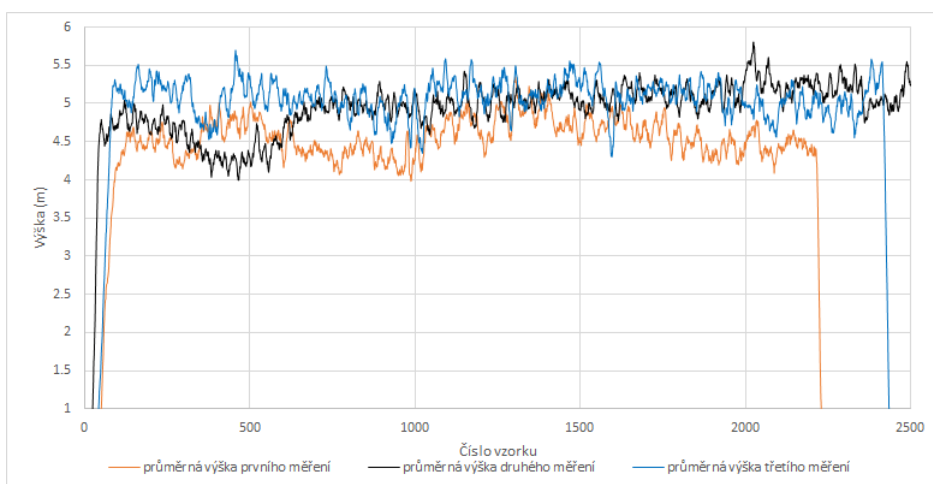
Obrázek 5.6: Porovnání získaných výšek z měření pro 3 metrový rozdíl.

Z grafu 5.6 lze vidět, že druhé měření bylo přibližně o půl metru nepřesné. Odchylka vznikla z důvodu špatné počáteční inicializace, kterou lze vidět na začátku grafu kolem vzorku 0, kde je vidět velký skok od nulové hladiny. Další hlavní příčinou pro vznik nepřesnosti v měření je nevytvoření identických podmínek pro obě desky. Jedna se nacházela ve venkovním prostředí a druhá byla umístěná uvnitř.

5.3.2 Měření do 5 metrů

Tato měření byla vytvořena za identických podmínek jako předchozí měření. Tentokrát byla deska spuštěna o 5 metrů níže než druhá deska. Tato vzdálenost byla opět ověřena metrickým pásmem a po intervalech 15 minut byla provedena 3 měření. Při každém dalším pokusu se deska vytáhla zpět na stejnou výšku jako druhá deska a resetoval se mikrokontrolér pro nové inicializování a nastavení nulové hladiny.

Z naměřených dat byly vytvořeny grafy pro výpočet s historií uloženou v bufferu A.18,A.19 a A.22 ,pro výpočet s nekonečnou historií A.19,A.21 a A.23.

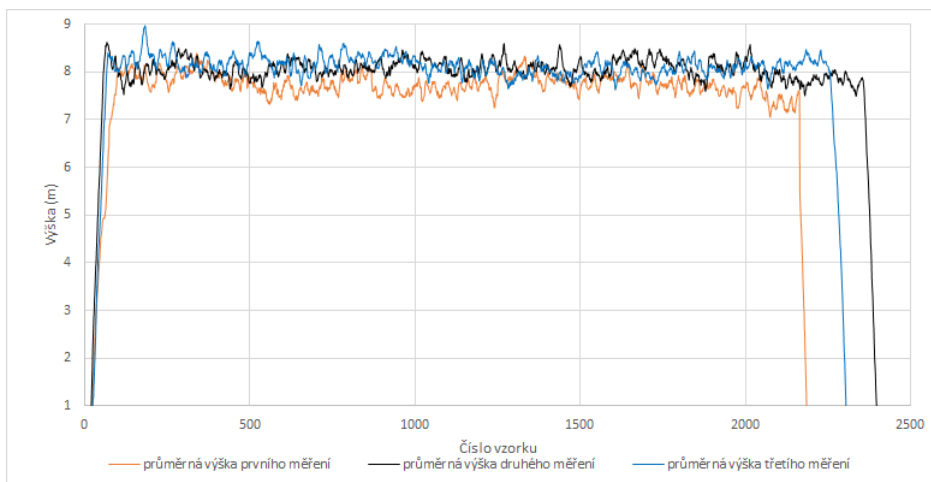


Obrázek 5.7: Porovnání získaných výšek z měření pro 5 metrový rozdíl.

5.3.3 Měření do 8 metrů

Oproti předchozím pokusům byl tento proveden ve venkovním prostředí na balkóně paneláku, ze kterého byla deska spuštěna o 8 metrů níže než druhá deska. Tato vzdálenost byla opět ověřena metrickým pásmem. Po spuštění byla deska zavěšená na lanu po dobu 15 minut a byly provedeny 3 pokusy za identických podmínek.

Z naměřených dat byly vytvořeny grafy pro výpočet s historií uloženou v bufferu [A.24,A.25](#) a [A.28](#) ,pro výpočet s nekonečnou historií [A.25,A.27](#) a [A.29](#).



Obrázek 5.8: Porovnání získaných výšek z měření pro 8 metrový rozdíl.

Na rozdíl od předchozích měření, byly pro tento pokus zajištěné identické podmínky pro obě desky. Díky tomu lze vidět na grafu 5.8 stabilnější průběh měření, kde naměřená výška se pohybuje s menšími skoky od skutečné výšky, než předchozí měření.

5.4 Shrnutí

Z měření jsme zjistili, že výpočet výšky pomocí Babinetovy formule (3.1) nezávisí jenom na tlaku, ale i na teplotě vzduchu. Pokud se obě desky nenacházely ve stejném prostředí, docházelo pak k větší nestabilitě vypočítané výšky od výšky skutečné.

V případě že se jedna deska nacházela ve stínu a druhá byla vystavena slunečnímu svitu, došlo k ohřátí senzorů jedné desky a byl způsoben nárůst naměřených hodnot teploty a pokles hodnot tlaku vzduchu. To mělo za důsledek velký skok ve vypočítané výšce až o ± 10 metrů od skutečné výšky.

Pro vytvoření identických podmínek je nutné zajistit, aby obě desky byly ve stejném prostředí, barometrické senzory musejí být zastíněny a zároveň nesmějí být utěsněny pro zajištění dostatečného proudění okolního ovzduší.

Pokud byly zajištěné identické podmínky pro obě desky, došlo k správné inicializaci barometrů a k přesnému seřízení nulových hladin obou desek, můžeme poté říci, že měření výšky pomocí výpočtu z teploty a tlaku vzduchu bylo úspěšné s přesností ± 0.5 metrů.

Kapitola 6

Závěr

Cílem této práce bylo seznámení se s aktuálně nejpoužívanějšími senzory pro měření výšky. Ze všech veřejně dostupných publikací byly shrnuty nejdůležitější informace, které vedly k pochopení funkčnosti jednotlivých senzorů a jejich principy měření výšky. U každého druhu senzoru se bral ohled hlavně na výhody a nevýhody systému, které vyplývaly zejména z principu měření.

Hlavním bodem práce bylo vytvořit návrh a jeho realizaci. Na základě získaných informací o jednotlivých senzorech bylo zvolené takové řešení, které nejvýhodněji a nejpřesněji dokázalo vyřešit zadanou problematiku týkající se měření a udržení výšky dronu, na kterém bude zavěšen datový a napájecí kabel.

Pro měření výšky bylo zvoleno řešení, s použitím 2 barometrů, mezi kterými se bude určovat výška na základě rozdílu naměřeného tlaku vzduchu. Z toho důvodu se jeden barometr upevní na dron a druhý se bude nacházet na zemi, kde bude určovat nulovou hladinu. Pro porovnání byly využity 2 různé barometry, a to barometry BMP180 a BMP085.

Během realizace byly pro přesnější měření použity oba barometry a výsledné hodnoty se braly z jejich průměrů. Bylo nutné se vypořádat s několika problémy. První byl, že pro komunikaci mezi deskami byl použit 10 metrový kabel kroucené stíněné dvojlinky. V tomto případě se nám z toho stala anténa, která naindukovala veškeré vnější rušení a znehodnotila veškerá posílaná data. Pro vyřešení stačilo připojit stínění kabelu na zem a rušení bylo odvedeno od datových kabelů. Největším problémem byla komunikace s barometry přes I^2C sběrnici, kde všechny barometry měly identickou adresu a na dané sběrnici je nešlo od sebe rozlišit. Pro rozlišení bylo použito 2 kanálů I^2C sběrnice a CMOS přepínačů. Kvůli připojení CMOS přepínačů vznikl další problém, kde signál, který přes něj byl poslán, byl oslaben a zařízení měla problém rozeznat, zda se jedná o logickou 1 nebo o logickou 0. To mělo za důsledek znehodnocení dat a barometry poté vracely náhodná data. Proto musely být tyto signály zpětně posíleny. To se vyřešilo připojením PULL-UP rezistoru k SDA pinu u barometrů.

Dalším cílem bylo vytvořit program, který měl na starosti veškerou komunikaci s barometry, řízení přepínačů a výpočet aktuální výšky. Při získání dat program musel nejdříve zjistit zda se jedná o korektní data. Na základě toho daná data buď zahodí a nebo je použije pro výpočet aktuální výšky. Dále se musí vypořádat s chybovými stavy, které musí co nejefektivněji a nejrychleji vyřešit, aby nedošlo k zřícení dronu.

Tato práce byla pro mě přínosem z hlediska získání informací o výškových senzorech a dronech. O drony se hodně zajímám z toho důvodu, že dle mého názoru se jedná o technologii budoucnosti s širokou škálou možností od filmářských prací až po lékařskou službu, kde by drony mohly poskytovat rychlou asistenci lidem v nouzi. Jedinou jejich velkou nevýhodou je výdrž baterie. Po jejím vyřešení, podle mého názoru, se budou drony používat skoro v každém průmyslu. Další důvod mého zájmu je takový, že bych si chtěl sestavit vlastní dron s kamerou, který by mě následoval a poslouchal mé příkazy na dálku. Z toho i vyplývá, že jako budoucí práci bych chtěl vytvořit systém, který by na základě nějakého principu měření zaručil, aby dron letěl v určité poloze za mnou, následoval mě a udržoval pozici kamery tak, abych byl v záběru.

Během řešení této práce jsem se naučil pracovat s mikrokontrolérem NUCLEO-F446RE, a využívat funkčnosti I^2C komunikace. Zde bych chtěl ještě o něco lépe vytvořit konektor pro připojení

mezi mikrokontrolérem a deskou a zapájet kabely pro komunikaci mezi deskami, aby nedocházelo k tak časté ztrátě dat vlivem jejich pohybu. Nicméně na základě provedeného měření a testování modulů barometrů a systému, mohu říci, že v určité toleranci byl cíl práce splněn.

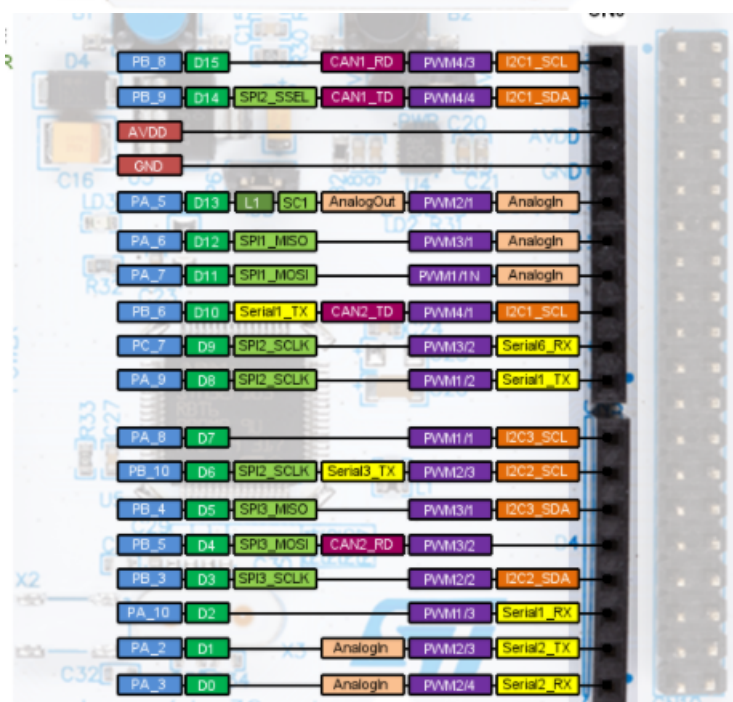
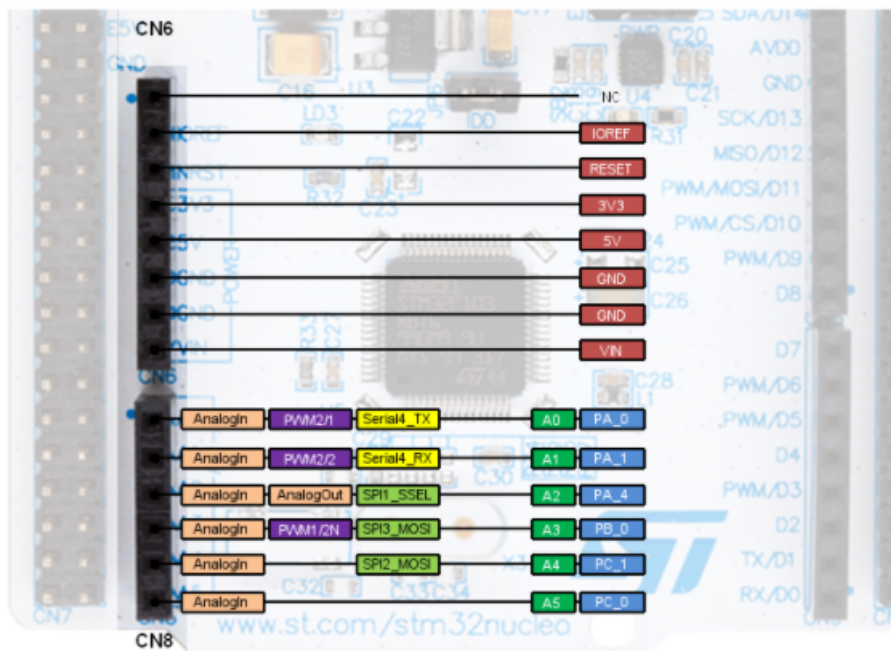
Literatura

- [1] ABSOLON, M.: *Radarový výškoměr pro ultralehký letoun*. Diplomová práce, Brno FIT VUT v Brně, 2015.
- [2] Allain, R.: HOW DO DRONES FLY? PHYSICS, OF COURSE! *Wired*, 2017.
URL <https://www.wired.com/2017/05/the-physics-of-drones/>
- [3] Atmosférický tlak. [online], 2009, FYZMATIK.
URL <http://fyzmatik.pise.cz/903-atmosfericky-tlak.html>
- [4] Barrett, D.: Next Generation Radar Altimeter Testing. *Microwave Journal*, 2013.
- [5] BOSCH: *BMP085 Digital pressure sensor*. 2009, data Sheet.
- [6] BOSCH: *BMP180 Digital pressure sensor*. 2012, data Sheet.
- [7] Corrigan, F.: How Do Drones Work And What Is Drone Technology. *DroneZon*, 2018.
URL <https://www.dronezon.com/learn-about-drones-quadcopters/what-is-drone-technology-or-how-does-drone-technology-work/>
- [8] Edmund Keith Stone, M. K.: Introducing an Approach for Extracting Temperature from Aircraft GNSS and Pressure Altitude Reports in ADS-B Messages. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, ročník 32, č. 4, 2015.
- [9] GPS for Drone and Quadcopter. [online], quad for fun.
URL <http://quadsforfun.wixsite.com/quadsforfun/gps-global-positioning-system>
- [10] Jakub Karas, T. T.: *Drony*. Brno: Computer Press, 2016, ISBN 978-80-251-4680-4.
- [11] Jandora, R.: ELEKTROMAGNETICKÁ INDUKCE, eLEKTROMAGNETICKÁ INDUKCE.
- [12] Jieru Zhao, D. H. Z. P., Yang Li: *Design on altitude control system of quad rotor based on laser radar*. IEEE, 2016, ISBN 978-1-5090-1087-5.
- [13] Kachtík, L.: L. Laserový metr. [online], Naposledy navštíveno 15. 3. 2017.
URL http://lasery.wz.cz/laserove_zamerovani_a_mereni_vzdalenosti.html
- [14] Lauer mann, M.: GPS A BAROMETRICKÁ VÝŠKA. [online], Naposledy navštíveno 17. 3. 2017.
URL http://www.pg-leonardo.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=300:gps-a-barometricka-vyka-konena-odpov&catid=59:jak-se-co-dla&Itemid=55
- [15] Lichtenberg: P. BAROMETRICKÉ VÝŠKOMĚRY. [Online; navštíveno 17.3.2017].
URL http://lichtco.cz/side_vysk.htm
- [16] Marris, E.: Drones in science: Fly, and bring me data. *nature International weekly journal of science*, 2013, doi:10.1038/498156a.
URL <https://www.nature.com/news/drones-in-science-fly-and-bring-me-data-1.13161>
- [17] [online], *electronicsTutorials*.
URL https://www.electronics-tutorials.ws/combo/combo_2.html

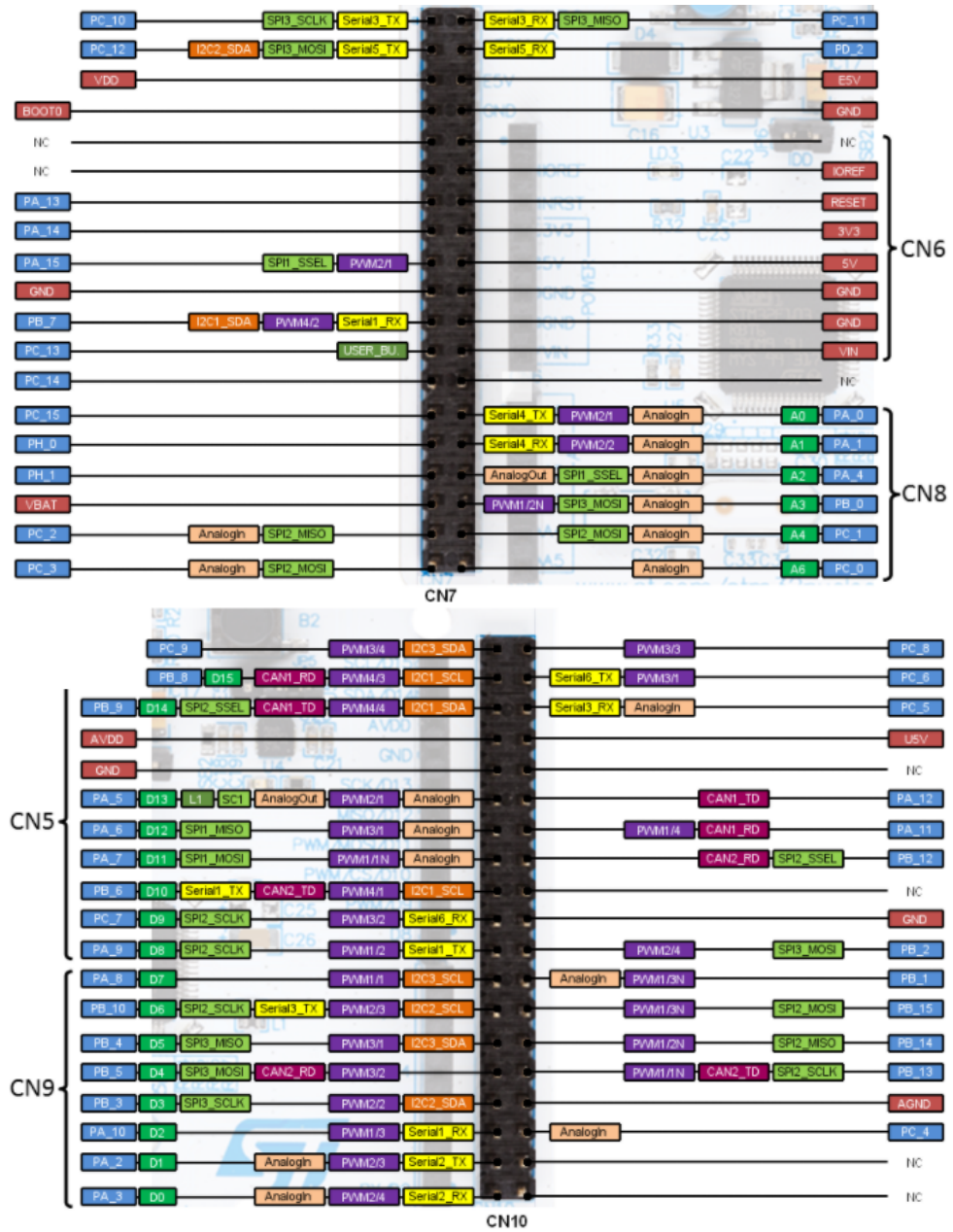
- [18] NUCLEO-F446RE. [online], aRMMBED.
URL <https://os.mbed.com/platforms/ST-Nucleo-F446RE/>
- [19] Peterka, J.: [online], archiv článků a přednášek Jiřího Peterky.
URL <http://www.earchiv.cz/a96/a644k150.php3>
- [20] Růžička, R.: Synchronní sériová rozhraní: SPI, I2C, 10 2016, studijní opora, Faculty of Information Technology, Brno University of Technology.
- [21] Texas instruments: CMOS Quad bilateral switch. 2003, data Sheet.
- [22] ZÁVISLOST TLAKU VZDUCHU NA VÝŠCE A TEPLOTĚ. [online], frigomont a.s..
Komplexní dodávky technologických celků.
URL <http://www.frigomont.cz/zavislost-tlaku-vzduchu-na-vysce-a-teplote>
- [23] tlak vzduchu. [online], 2014, mladý-vedec.eu.
URL
<https://www.mladý-vedec.eu/navod-klima-a-pocasi-demo/493-tlak-vzduchu-demo>
- [24] Turgeon, A.: altimeter. National Geographic Society, 2014.
URL <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/altimeter/>
- [25] Turgeon, A.: barometer. National Geographic Society, 2014.
URL <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/barometer/>
- [26] Vadim Zaliva, F. F.: Barometric and GPS altitude sensor fusion. IEEE, 2014, ISBN 978-1-4799-2893-4.

Příloha A

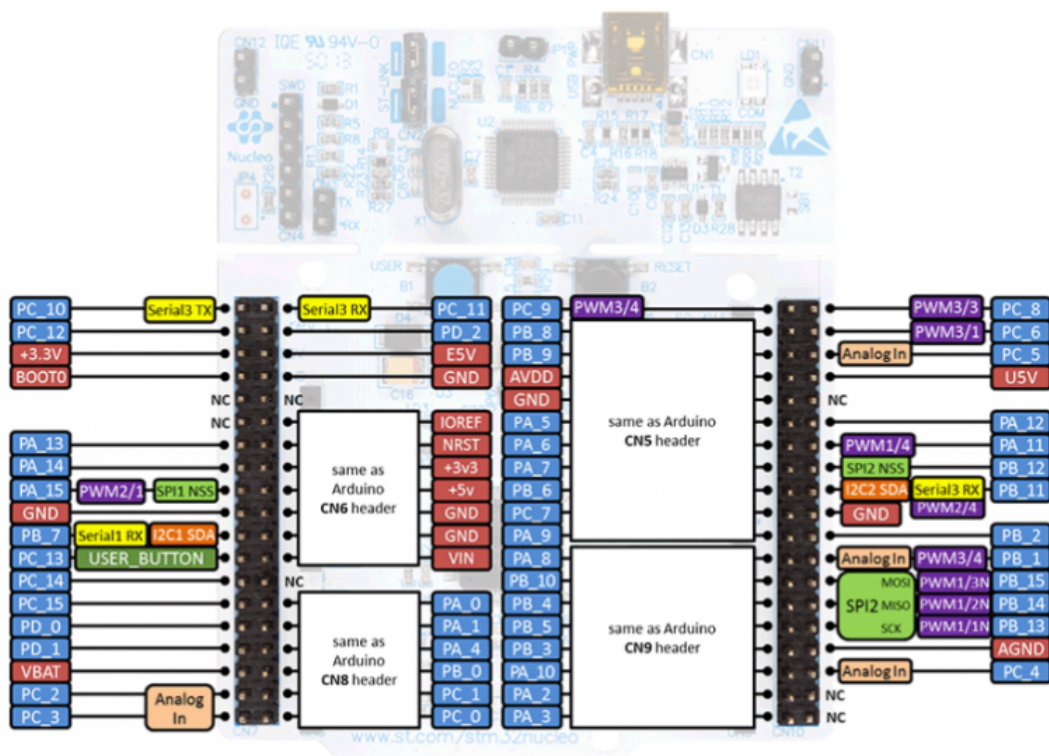
Obrázky



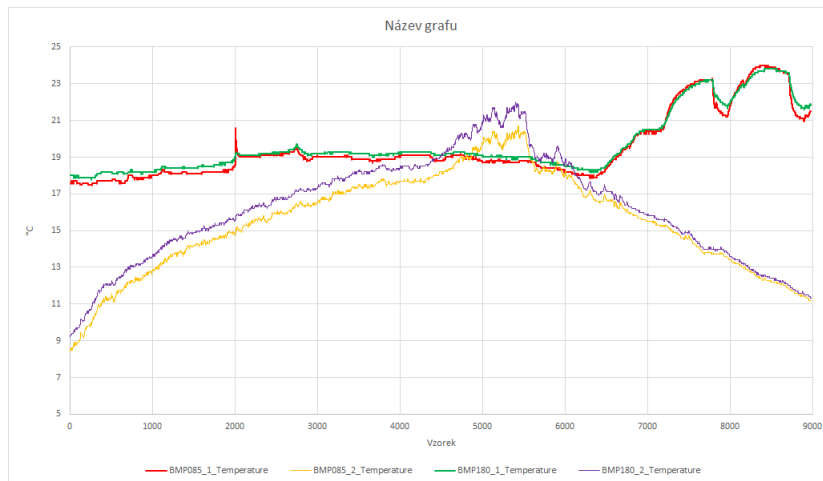
Obrázek A.1: NUCLEO Arduino pinout [18] .



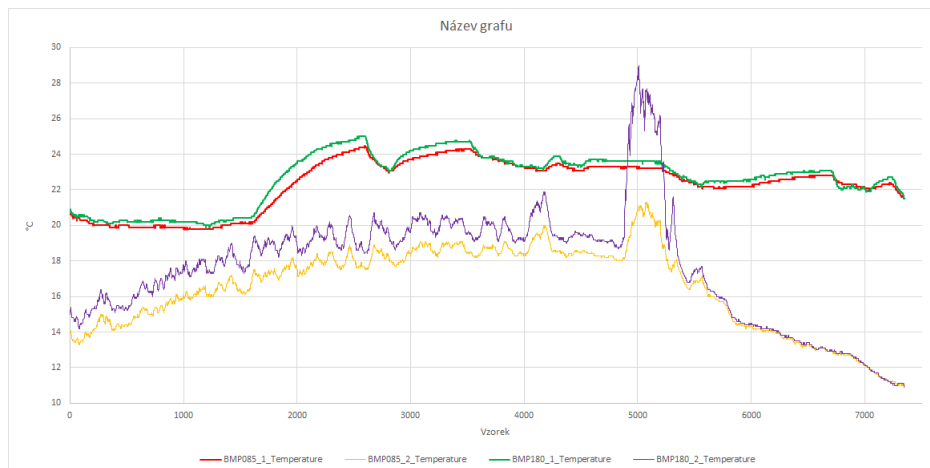
Obrázek A.2: NUCLEO pinout [18].



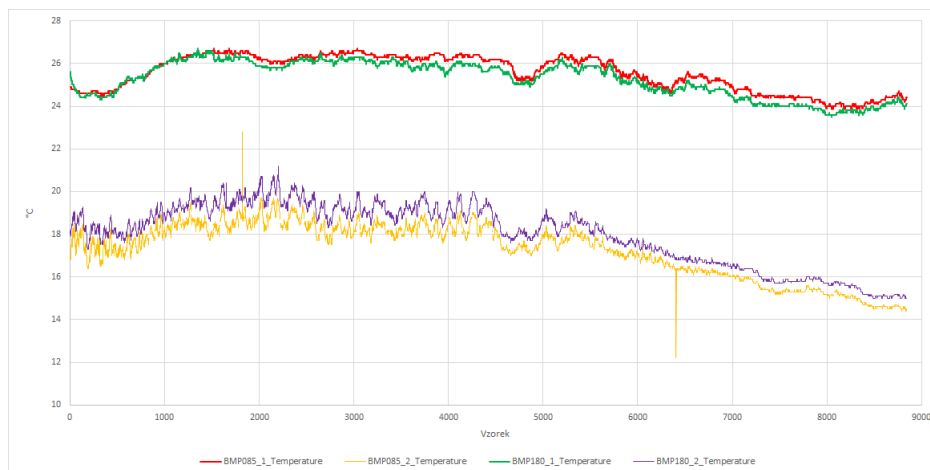
Obrázek A.3: celkové zobrazení pinout NUCLEO446RE [18].



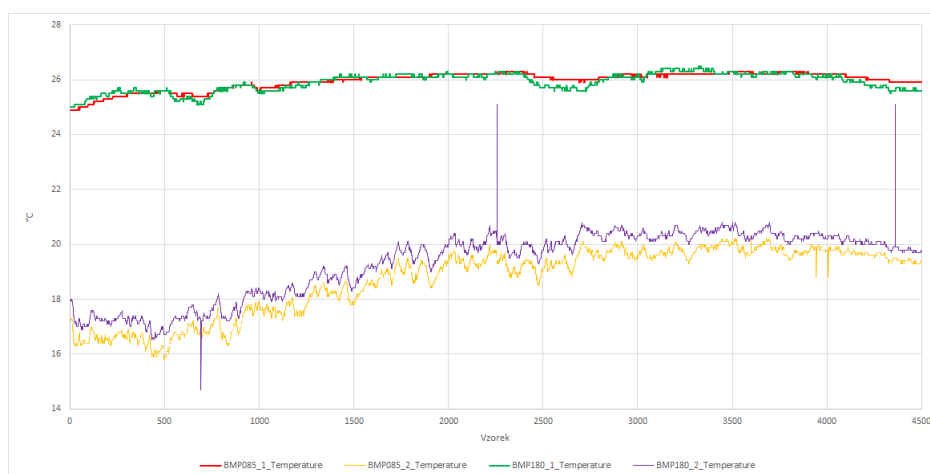
Obrázek A.4: Výsledný graf prvního měření teploty vzduchu.



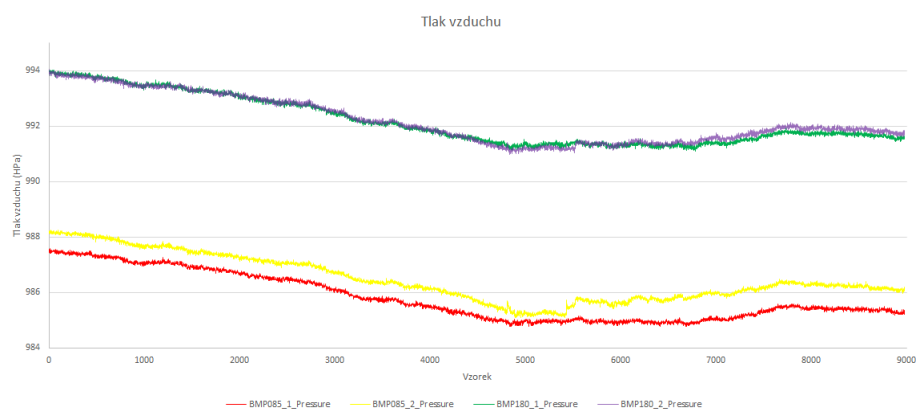
Obrázek A.5: Výsledný graf druhého měření teploty vzduchu.



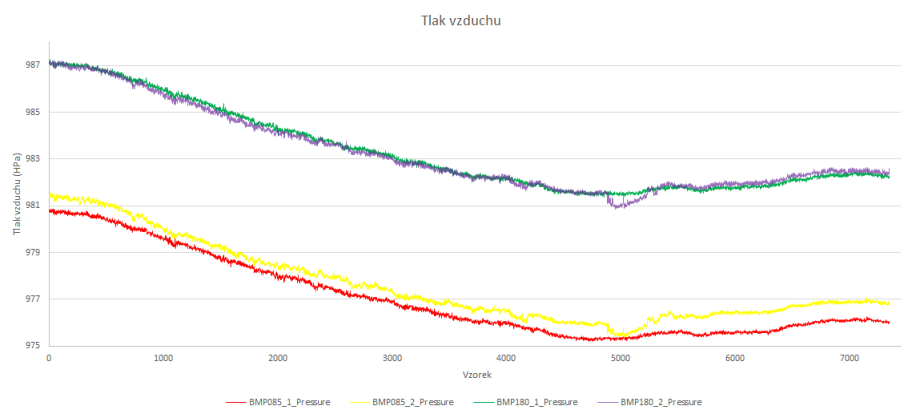
Obrázek A.6: Výsledný graf třetího měření teploty vzduchu.



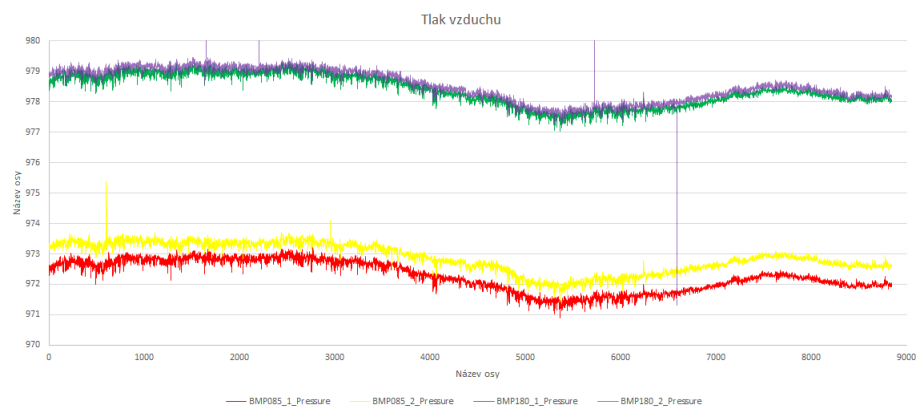
Obrázek A.7: Výsledný graf čtvrtého měření teploty vzduchu.



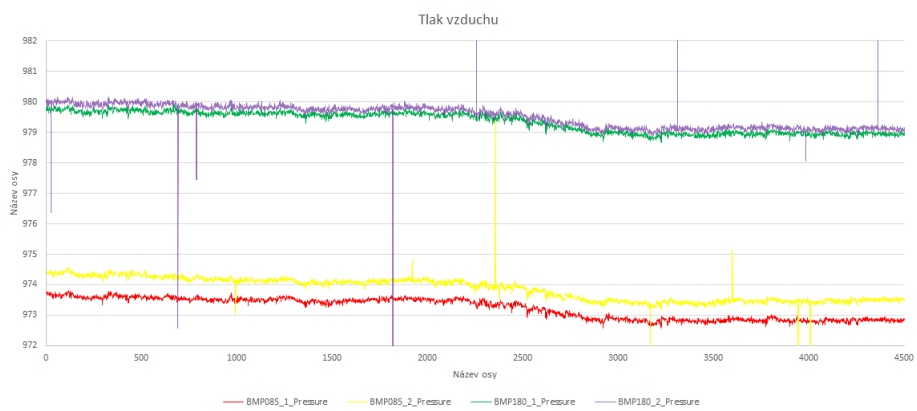
Obrázek A.8: Výsledný graf prvního měření tlaku vzduchu.



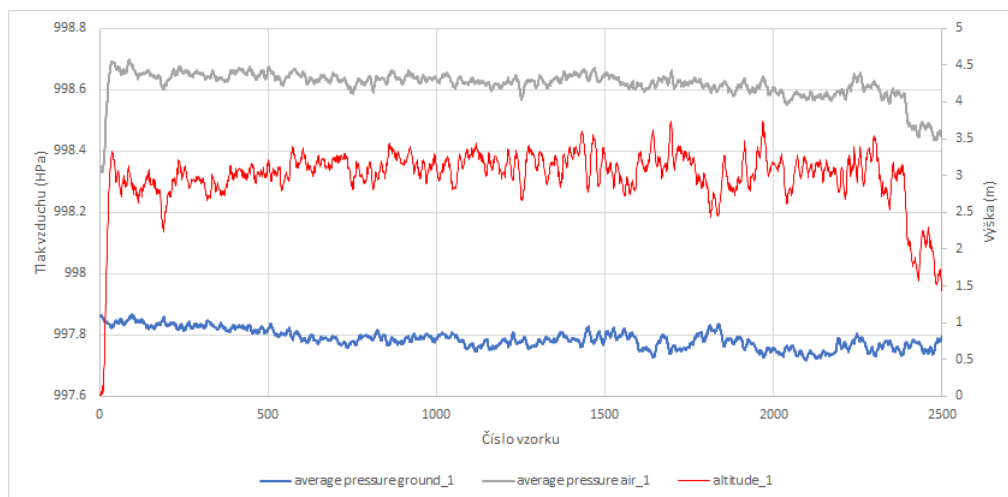
Obrázek A.9: Výsledný graf druhého měření tlaku vzduchu.



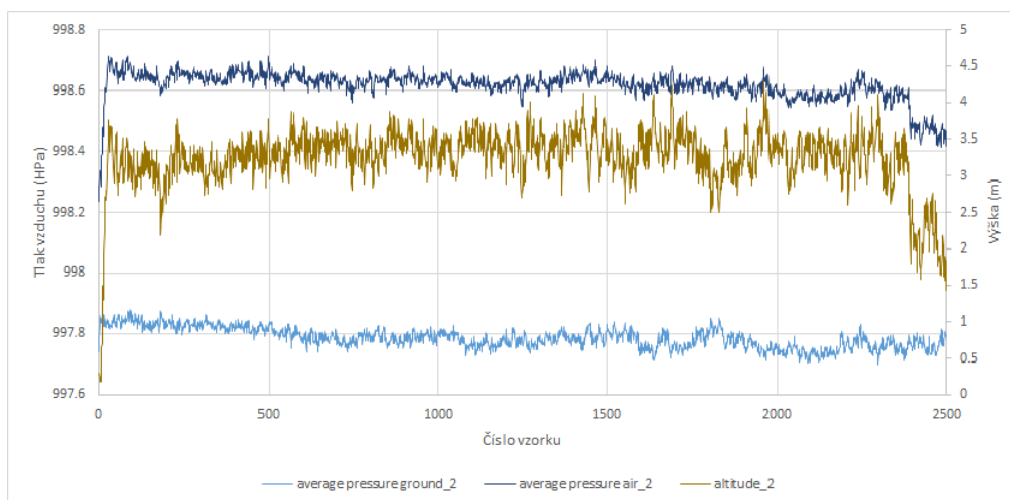
Obrázek A.10: Výsledný graf třetího měření tlaku vzduchu.



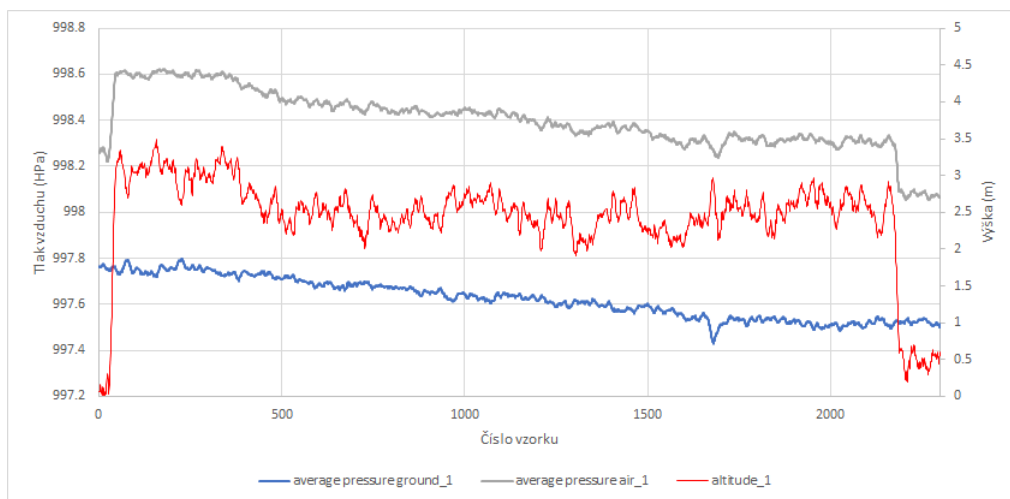
Obrázek A.11: Výsledný graf čtvrtého měření tlaku vzduchu.



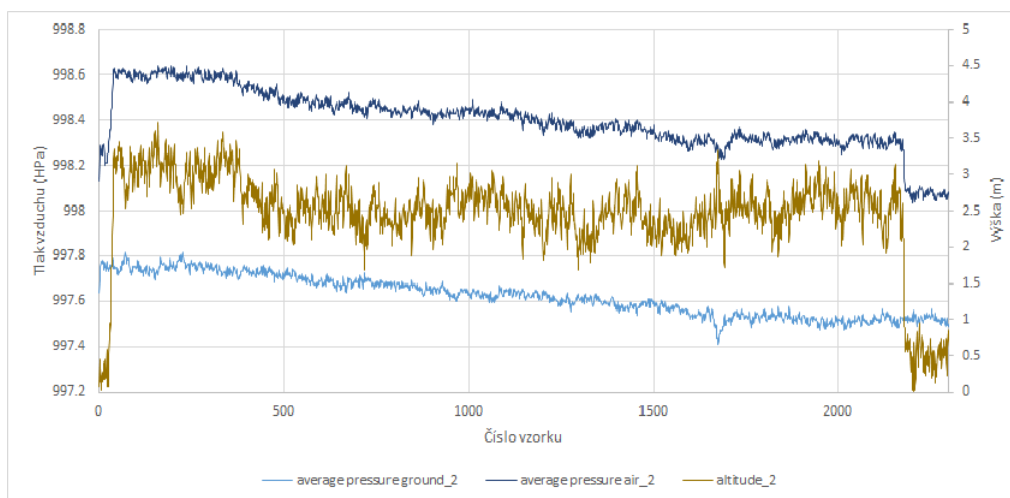
Obrázek A.12: Výsledný graf prvního měření tlaku vzduchu a tří metrové výšky s historií uloženou v bufferu.



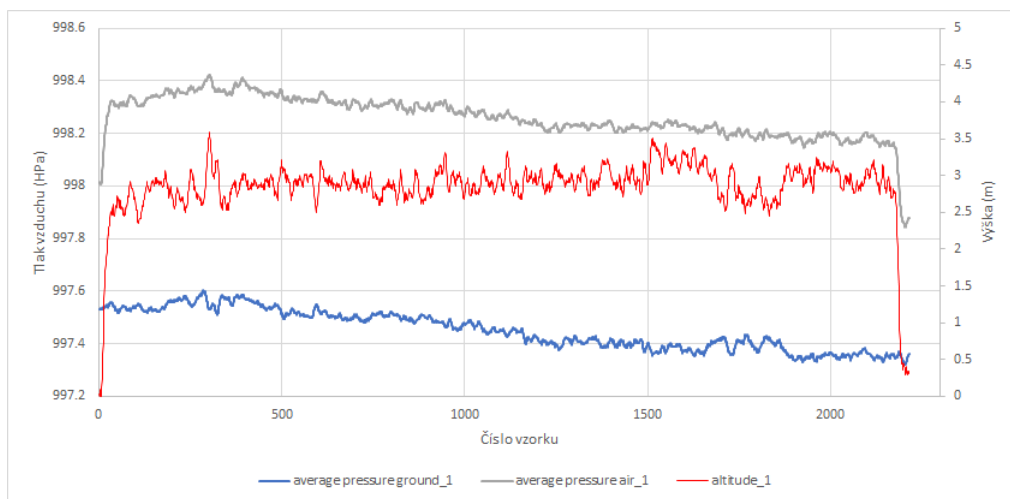
Obrázek A.13: Výsledný graf prvního měření tlaku vzduchu a tří metrové výšky s nekonečnou historií.



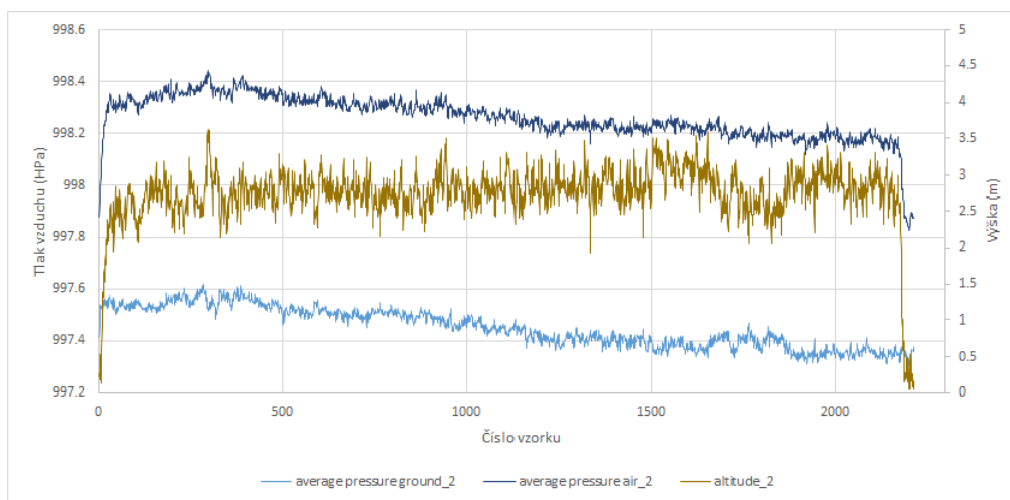
Obrázek A.14: Výsledný graf druhého měření tlaku vzduchu a tří metrové výšky s historií uloženou v bufferu.



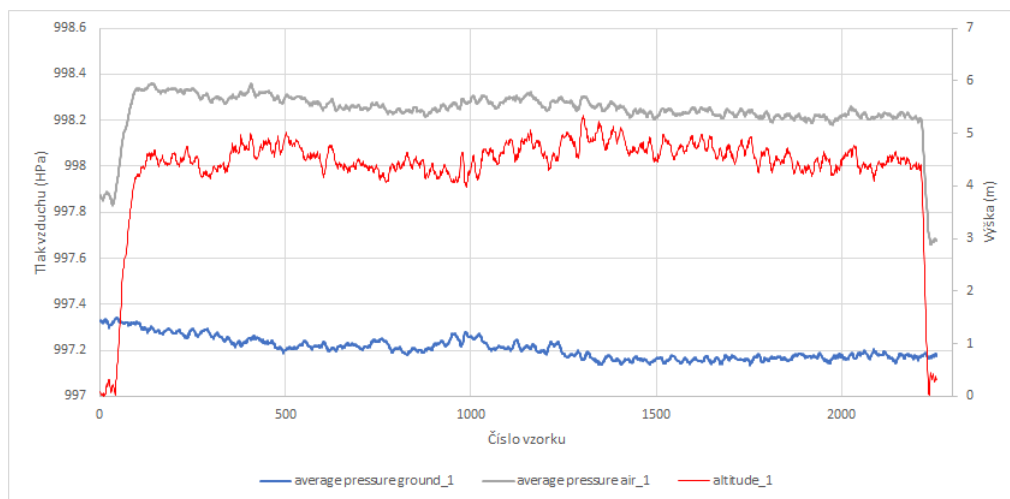
Obrázek A.15: Výsledný graf druhého měření tlaku vzduchu a tří metrové výšky s nekonečnou historií.



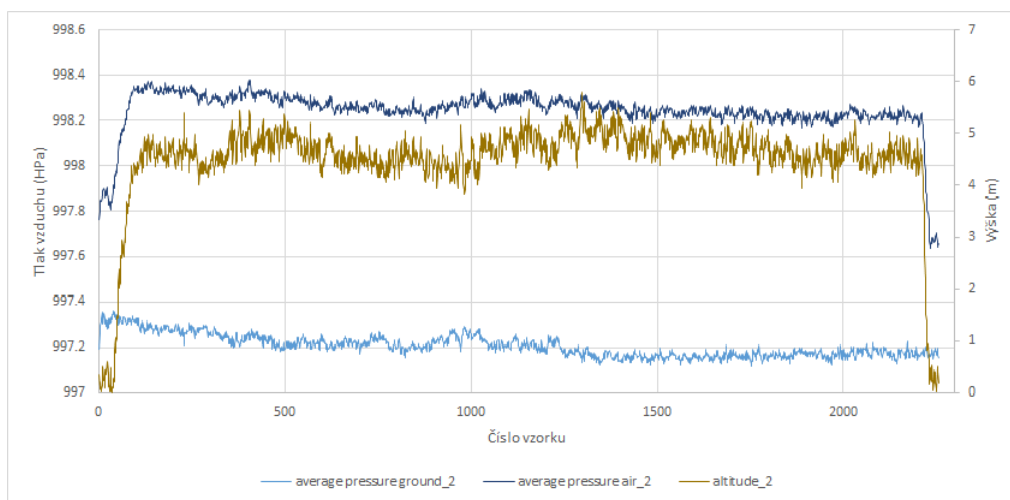
Obrázek A.16: Výsledný graf třetího měření tlaku vzduchu a tří metrové výšky s historií uloženou v bufferu.



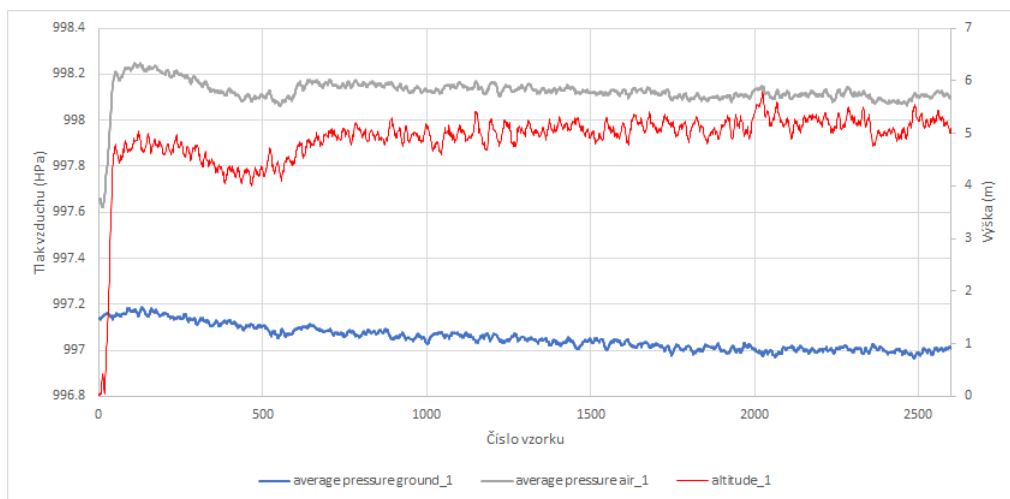
Obrázek A.17: Výsledný graf třetího měření tlaku vzduchu a tří metrové výšky s nekonečnou historií.



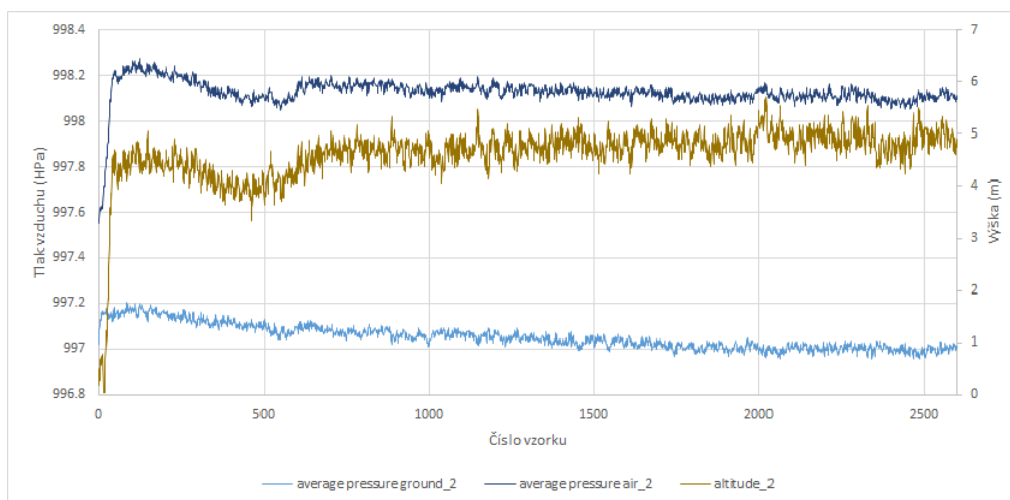
Obrázek A.18: Výsledný graf prvního měření tlaku vzduchu a pěti metrové výšky s historií uloženou v bufferu.



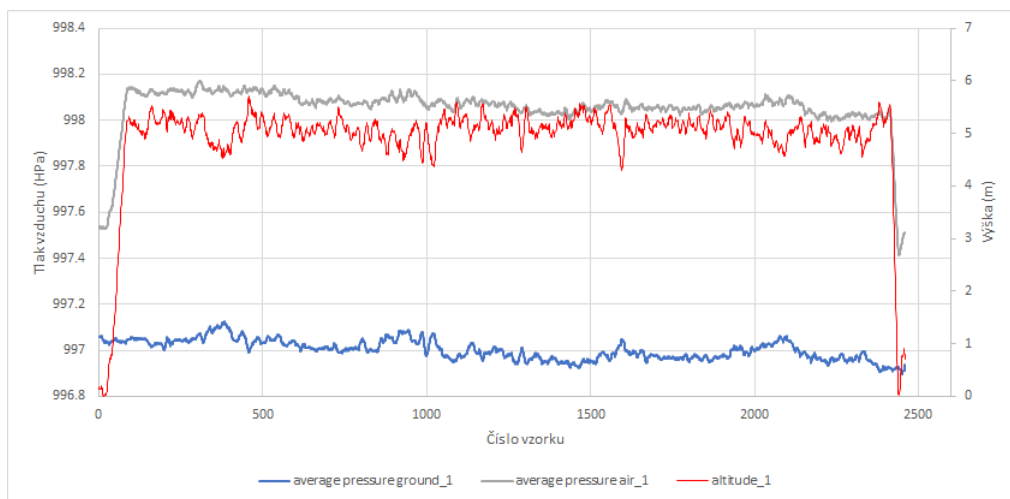
Obrázek A.19: Výsledný graf prvního měření tlaku vzduchu a pěti metrové výšky s nekonečnou historií.



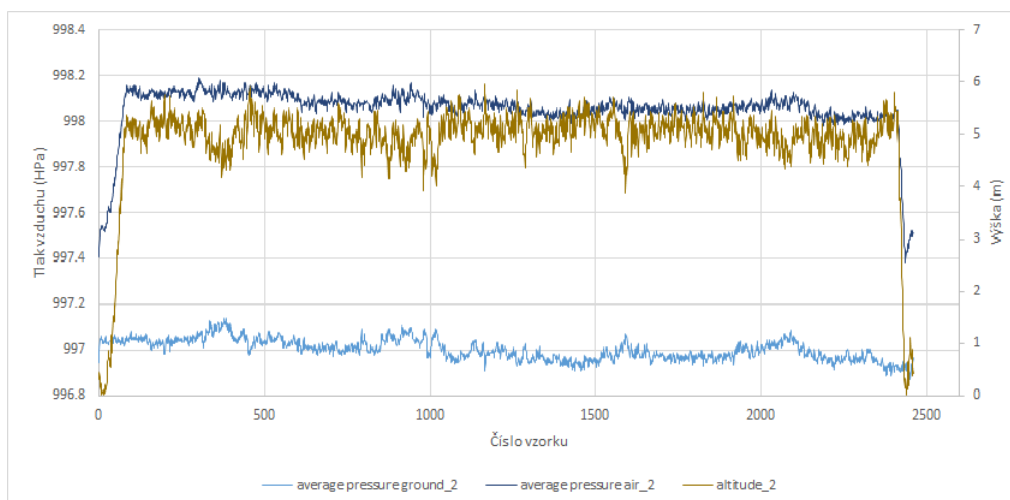
Obrázek A.20: Výsledný graf druhého měření tlaku vzduchu a pěti metrové výšky s historií uloženou v bufferu.



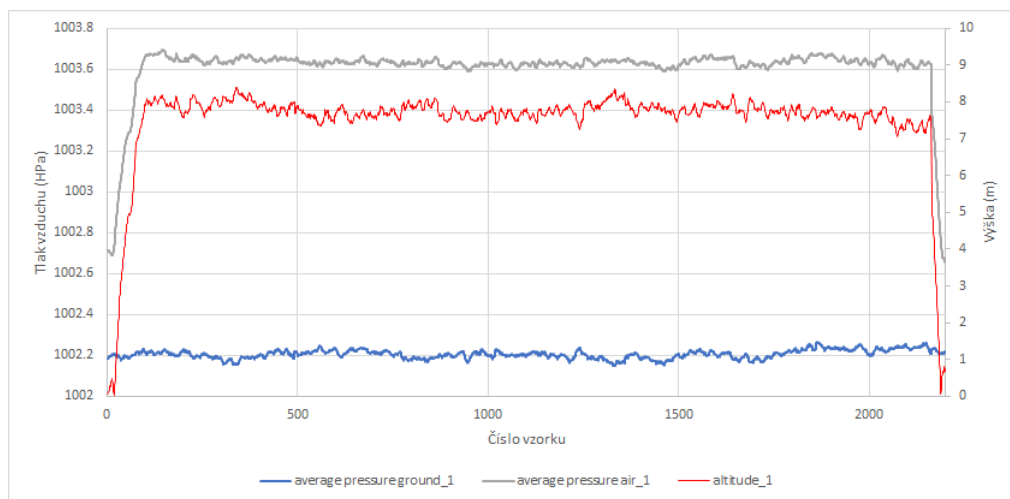
Obrázek A.21: Výsledný graf druhého měření tlaku vzduchu a pěti metrové výšky s nekonečnou historií.



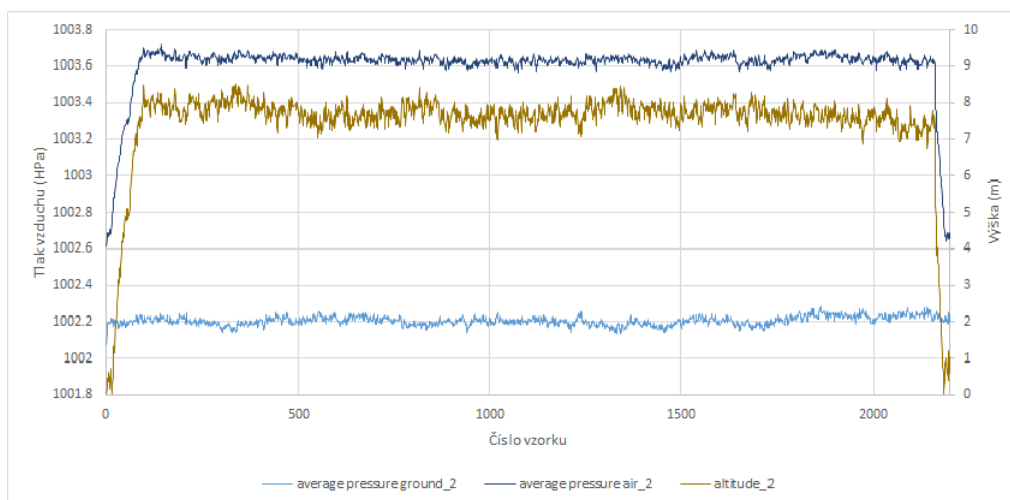
Obrázek A.22: Výsledný graf třetího měření tlaku vzduchu a pěti metrové výšky s historií uloženou v bufferu.



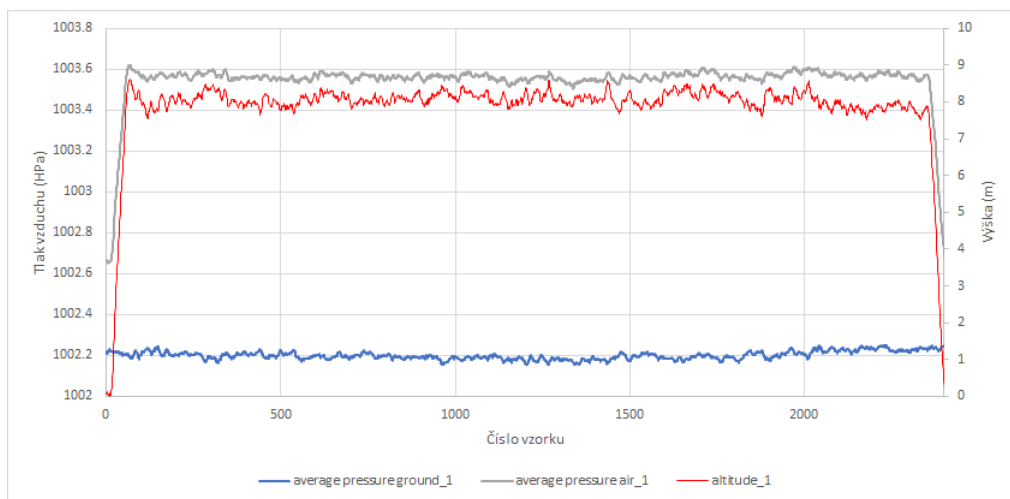
Obrázek A.23: Výsledný graf třetího měření tlaku vzduchu a pěti metrové výšky s nekonečnou historií.



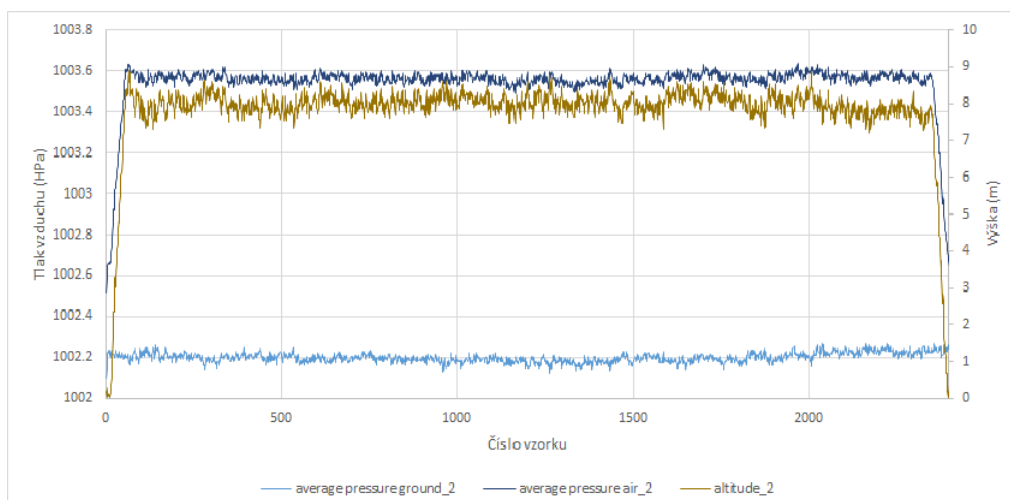
Obrázek A.24: Výsledný graf prvního měření tlaku vzduchu a osmi metrové výšky s historií uloženou v bufferu.



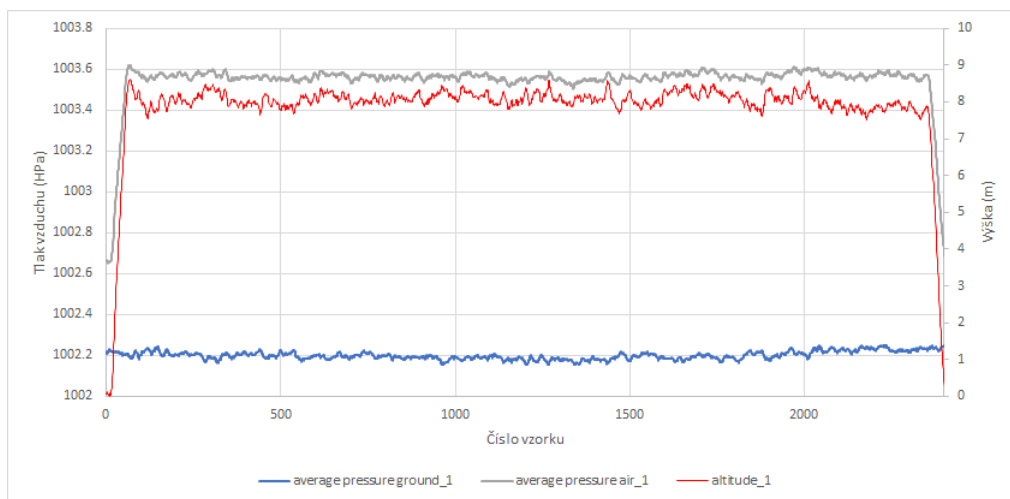
Obrázek A.25: Výsledný graf prvního měření tlaku vzduchu a osmi metrové výšky s nekonečnou historií.



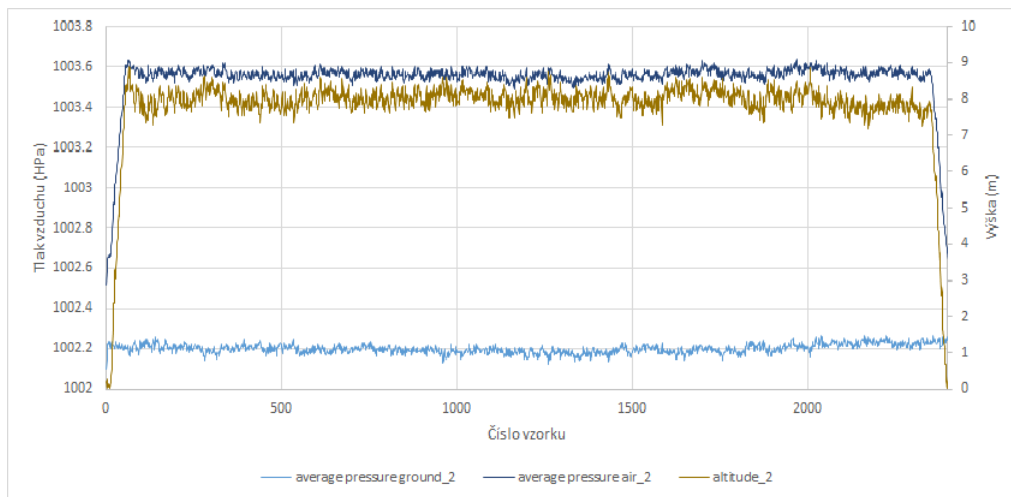
Obrázek A.26: Výsledný graf druhého měření tlaku vzduchu a osmi metrové výšky s historií uloženou v bufferu.



Obrázek A.27: Výsledný graf druhého měření tlaku vzduchu a osmi metrové výšky s nekonečnou historií.



Obrázek A.28: Výsledný graf třetího měření tlaku vzduchu a osmi metrové výšky s historií uloženou v bufferu.



Obrázek A.29: Výsledný graf třetího měření tlaku vzduchu a osmi metrové výšky s nekonečnou historií.

Příloha B

Obsah přiloženého paměťového média/

- **data\bin/** - Adresář obsahující přeložený program pro mikrokontrolér NUCLEO-F446RE
- **data\src/** - Adresář obsahující zdrojové kódy aplikace
- **data\vystup/** - Adresář obsahující data s hodnotami získané z výstupu programu během měření
- **data\scheme/** - Adresář obsahující schéma zapojení a plošného spoje pro obě desky
- **dokumentace/** - Adresář obsahující text bakalářské práce
- **dokumentace_src/** - Adresář obsahující zdrojové soubory k písemné zprávě
- **README.txt** - text obsahující návod pro spuštění, obsah paměťového média a nastavení programu.