

Vícerotorový vrtulník s mikropočítačovou řídicí jednotkou

Multi rotor helicopter with microcontroller control unit

Bc. Ladislav Jeníček



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ladislav JENÍČEK**
Osobní číslo: **A10321**
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Počítačové a komunikační systémy**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vícerotorový vrtulník s mikropočítačovou řídicí jednotkou**

Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte existující řešení vícerotorových modelů vrtulníků a zpracujte literární rešerši na dané téma.
2. Navrhněte a vytvořte model vrtulníku.
3. Navrhněte a realizujte řídicí jednotku modelu.
4. Vytvořte software pro řídicí jednotku.
5. Ověřte funkčnost vytvořeného modelu a zhodnoťte výsledky.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. MANN, Burkhard. C pro mikrokontroléry: ANSI-C, kompilátory C, spojovací programy – linkery, práce s ATMEL AVR a MSC-51, příklady programování v jazyce C, nástroje pro programování, tipy a triky. Praha: BEN, 2003, 279 s. ISBN 80-730-0077-6.
2. PINKER, Jiří. Mikroprocesory a mikropočítače. Praha: BEN – technická literatura, 2004, 159 s. ISBN 80-730-0110-1.
3. CATSOULIS, John. Designing embedded hardware. Sebastopol: O'Reilly, 2005, 377 s. ISBN 05-960-0755-8.
4. PLÍVA, Zdeněk. EAGLE prakticky: řešení problémů při běžné práci. Praha: BEN – technická literatura, 2010, 184 s. ISBN 978-807-3002-527.
5. ARDUINO. Arduino Home Page [online]. 2013 [cit. 2013-01-29]. Dostupné z: <http://www.arduino.cc>

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jan Dolinay, Ph.D.

Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání diplomové práce:

26. února 2013

Termín odevzdání diplomové práce:

31. května 2013

Ve Zlíně dne 26. února 2013

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan



prof. Ing. Karel Vlček, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Cílem práce je sestrojít a naprogramovat vícerotorovou helikoptéru. Teoretická část se zabývá především existujícími řešeními kvadrokoptér a použitých senzorů. V praktické části je popsána konstrukce vytvořené kvadrokoptéry a použité komponenty. Celý model je řízen vývojovým kitem Arduino Due, který získává data ze senzorů a realizuje PID regulátor zajišťující stabilní let kvadrokoptéry. Pro tělo kvadrokoptéry jsou použity dřevěné překližky a hliníkové profily ve tvaru U, na které jsou připevněny motory. Na střední části je upevněn vývojový kit se senzory.

Klíčová slova: vícerotorová helikoptéra, akcelerometr, gyroskop, PID regulace.

ABSTRACT

The aim was to design and programme multirotor helicopter. The theoretical part deals mainly with existing quadcopter solutions and sensors used. Experimental part describes the design of the built quadcopter as well as used components. Whole model is controlled via Arduino Due Starter kit, which collects data from sensors and realizes PID regulator securing a stable flight of the quadcopter. The body of a quadcopter is made of plywood and aluminium U profiles, onto which engines are mounted. The starter kit with sensors has been attached to the middle part.

Keywords: multirotor helicopter, accelerometer, gyroscope, PID regulation.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Janu Dolinayovi, Ph.D. za vedení v průběhu práce, cenné rady pro tvorbu, vylepšení a za všechny starosti spojené s řádným odevzdáním této práce.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST.....	10
1 PŘEHLED EXISTUJÍCÍCH ŘEŠENÍ KVADROKOPTÉR	11
1.1 AEROQUAD	11
1.2 HOBBYKING KK2.0 MULTI-ROTOR	13
1.3 MULTIWII	14
1.4 ARDUOPTER.....	16
1.5 MEGAPIRATE	20
2 SNÍMAČE VYUŽÍVANÉ U KVADROKOPTÉR	21
2.1 AKCELEROMETR.....	21
2.1.1 Princip	22
2.1.2 Elektronická struktura	24
2.2 GYROSKOP	26
2.2.1 Princip	27
3 REGULACE	29
4 ARDUINO	31
II PRAKTICKÁ ČÁST	32
5 KONSTRUKCE.....	33
5.1 MOTORY, VRTULE	34
5.2 REGULÁTOR	35
5.3 VYSÍLAČ, PŘIJÍMAČ	36
5.4 DESKY TIŠTĚNÝCH SPOJŮ	37
5.5 NAPÁJENÍ SOUSTAVY	39
6 MMA7260QT - AKCELEROMETR.....	40
7 ITG-3200 - GYROSKOP	41
8 MPU-9150 - AKCELEROMETR, GYROSKOP, MAGNOMETR.....	42
9 ZÍSKÁVÁNÍ DAT	43
9.1 PŘEVOD ZÍSKANÝCH DAT NA STUPNĚ	43
9.1.1 Akcelerometr.....	43
9.1.2 Gyroskop.....	43
9.2 PRŮMĚR	43
9.3 KLOUZAVÝ PRŮMĚR - JEDNODUCHÝ	44
10 MIKROKONTROLÉR - ARDUINO DUE.....	48
11 PROGRAM.....	50
12 SHRUTÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ	53
ZÁVĚR	55
ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....	56
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	57
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	59
SEZNAM OBRÁZKŮ	60

SEZNAM TABULEK.....	62
---------------------	----

ÚVOD

Závěrečná diplomová práce se zabývá výrobou a ovládáním kvadrokoptéry. Tato zařízení se začínají využívat v různých oblastech běžného života. Ve spojení se záznamovou technikou usnadňují práci v oborech výškových konstrukcí, mapování krajiny, záznamu pohybu zvířete nebo kontroly objektů. Pro udržení letových vlastností je nutno zajistit stabilizaci polohy a letu kvadrokoptéry, omezit vibrace, které působí na použité elektronické součástky, synchronizovat otáčky motorů a ovládat jejich výkon.

V teoretické části se seznámíme s jednotlivými typy elektronických desek používaných pro ovládání různých typů modelů, jejich parametry a použitím. Na tuto kapitolu navazuje seznámení s podpůrnými prvky jako akcelerometr a gyroskop. Bude vysvětlen jejich účel, objasněna funkce a budou popsány jejich parametry. Samostatnou kapitolou je PID regulace, jež je pro let nejdůležitější. Udržení stability a klidného letu závisí na přesnosti dodávaných dat a jejich vhodném zpracování.

Praktická část práce popisuje použitou konstrukci kvadrokoptéry, její součástky, stavební materiál a ovládací vysílač. V poslední kapitole jsou shrnuty dosažené výsledky mé práce.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PŘEHLED EXISTUJÍCÍCH ŘEŠENÍ KVADROKOPTÉR

Projekty zaměřené na konstrukci kvadrokoptér se začaly více rozšiřovat od roku 2009. V přehledu se práce zaměřuje na projekty, které jsou volně k dostání (open-source). Hlavními zájmovými body úvodní kapitoly jsou jednotlivá řešení, cenové relace, použité senzory a mikropočítačové řídicí jednotky.

1.1 AeroQuad

AeroQuad je volně dostupný hardwarový a softwarový projekt, který je zaměřený na ovládání více rotorových vrtulníků.

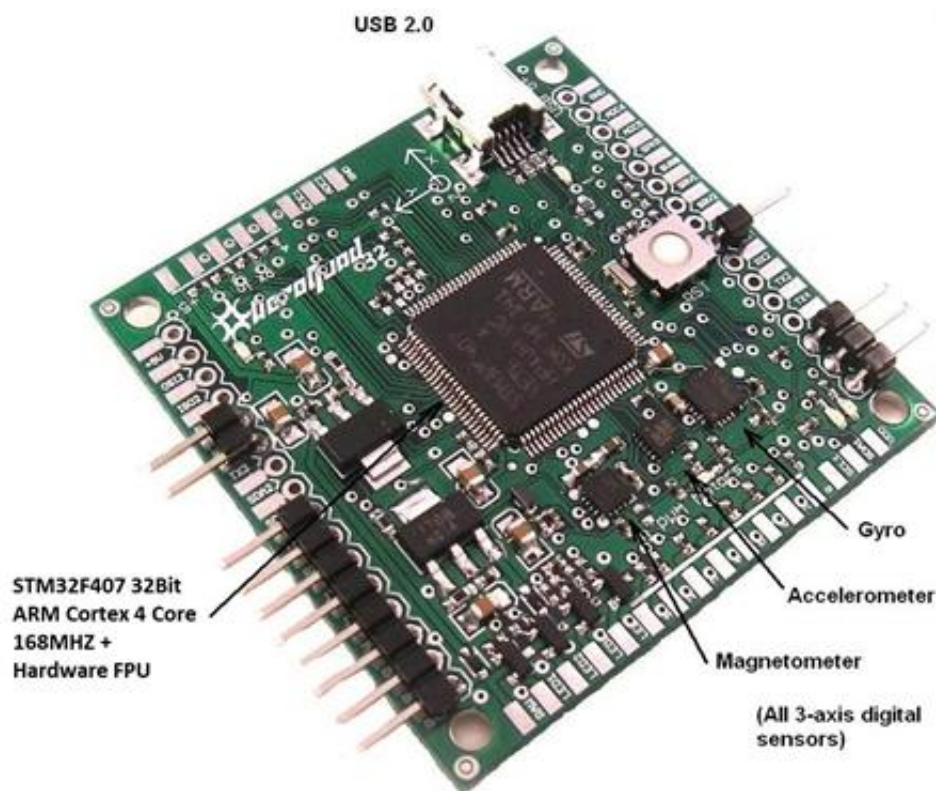
Základem vícerotorového vrtulníku je vývojový kit Arduino (typ Mega-2560 nebo Uno), který obsahuje hlavní řídicí jednotky. K tomuto kitu je připojena podpůrná deska, která na sobě obsahuje senzory (akcelerometr, gyroskop, barometr a magnetometr), jejichž data zajišťují bezpečný let. Celý program je psaný v jazyku C, který je potom nahráván pomocí Arduino IDE do mikrokontroléru. Vývojáři po určité době přešli v rámci technického vylepšení na novou řídicí jednotku AeroQuad 32 Flight Control Board. Ta umožnila rozšířit stávající letové schopnosti kvadrokoptéry. Nová základní deska již používá jiný software pro programování.

Kvadrokoptěře umožňuje akrobatický režim nebo stabilní let nad krajinou. Lze připojit i další volitelné senzory, které rozšíří možnosti jejího použití. [1][2]

Parametry hlavního ovládacího zařízení:

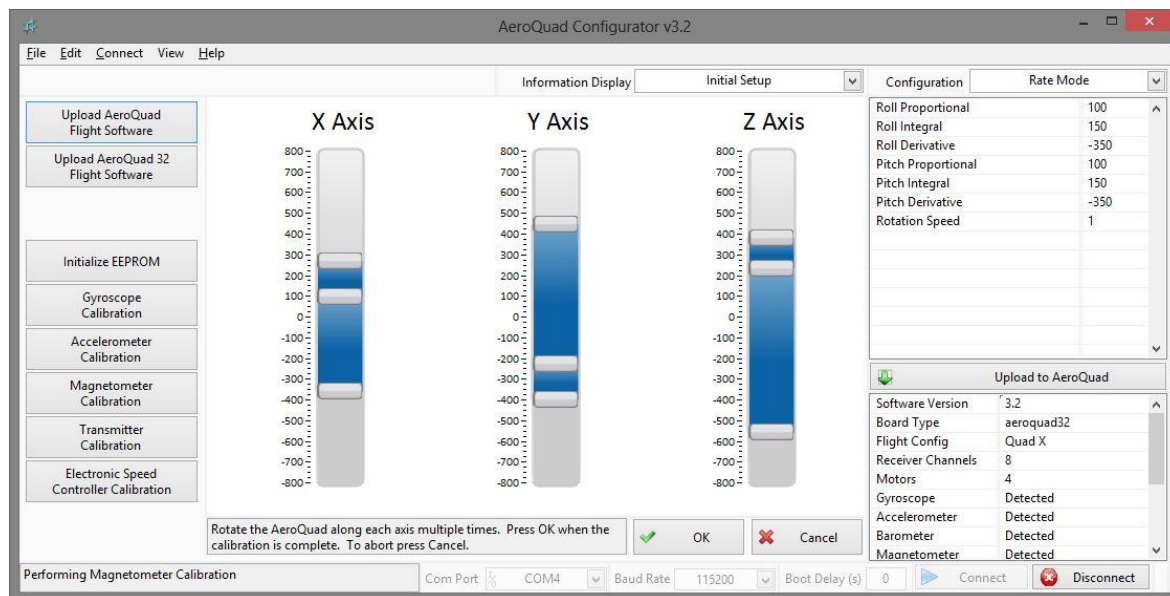
- ❖ Mikroprocesor: STM32F407-32 Bit - frekvence 168 MHz
- ❖ Až 8 vstupů s přijímače
- ❖ Zapojení až 8 motorů (ESC)
- ❖ Možnost zapojit 4 serva (např. pro kameru)
- ❖ Komunikace přes USART, SPI, I²C
- ❖ 1 konektor mini USB pro připojení k PC
- ❖ 1 slot na mikroSD kartu
- ❖ Možnost připojení led diod pro orientaci směru letu
- ❖ 2x 5V výstup na desce
- ❖ 2 výstupy z 3.3V
- ❖ 6x ADC (12bit)
- ❖ 1x DAC (12bit)

- ❖ SWD port pro ladění
- ❖ všechny PWM výstupy jsou řízeny hardwarový čítačem



Obrázek 1 – AeroQuad 32 Flight Control Board [1]

Pro ovládání řídicího mikrokontroléru byl vyvinut program pro konfiguraci zařízení a usnadnění programování. Program může být propojen s kvadrokoptérou pomocí bezdrátové komunikace XBee nebo pomocí Bluetooth. Samozřejmostí je programování přes rozhraní USB 2.0. Mezi hlavní funkce programu patří kalibrace senzorů, aktuální natočení vrtulníku, 3D pohled, nastavení motorů a jejich výkon, nastavování samostatného letu po zvolené trajektorii, chování senzorů a stav baterie. Program také umožňuje nahrání nového kódu do zařízení. Zkušenější uživatelé mohou použít přímo program Arduino. [1]
[2]



Obrázek 2 – Ukázka kalibrace magnetometru [1]

Cena hlavního ovládacího prvku: \$149.

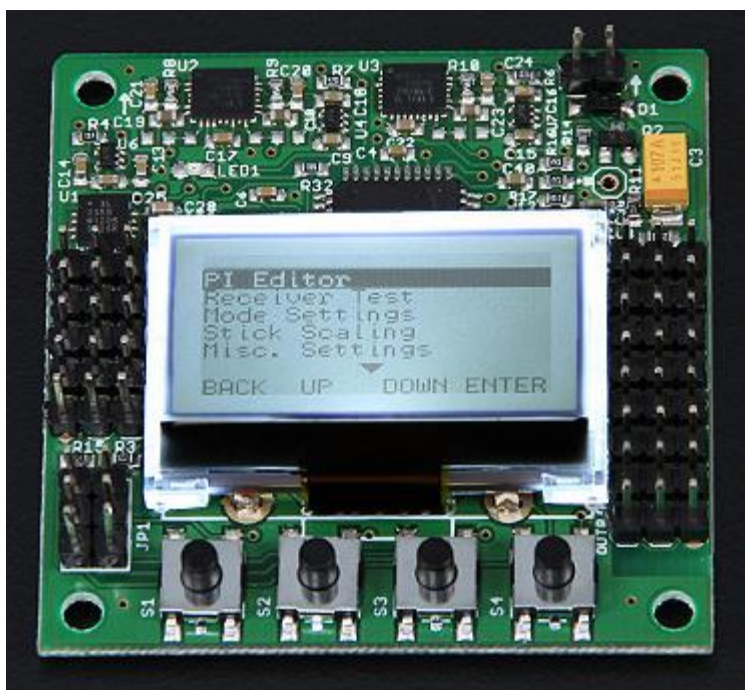
1.2 HobbyKing KK2.0 Multi-Rotor

Skupina uživatelů na fóru RCGroups.com se pustila do projektu vícerotorového vrtulníku, a navrhla první verzi základní desky KK-Multirotor, která umožnila nastavovat hodnoty PID regulátoru manuálně. U nového typu KK2.0-Multirotor byla přidána LCD obrazovka, díky které je instalace a nastavení mnohem jednodušší. Má předinstalované nastavení pro typové rozložení motorů. Vše se dá nastavit při prvním startu, kdy se zvolí rozložení motorů, možnosti módu létání a směr vrtulí. Zařízení se zkalibruje a je vše připraveno k letu. Samozřejmě můžou nastat problémy s kmitáním například u typu „quadcopter“. To vše lze přenastavit pomocí LCD displeje a tlačítek umístěných pod ním, které slouží k ovládání pohybu na displeji, ke změně přednastavených hodnot a umožňují jejich ukládání. Od svého staršího předchůdce se liší v osazení gyroskopů. Zde již byly použity dvoučipové 3-osé gyroskopy a jednočipový 3-osý akcelerometr.

K nahrávání nového firmwaru do zařízení je potřeba dokoupit adaptér, ke kterému se připojí flashovací konektory s USB. Program pro nahrání nové verze firmwaru se jmenuje kkMulticopter FlashTool. Slouží pouze pro nahrání novějšího firmwaru. Celý program kvadrokoptéry je napsaný v jazyce assembler. [4]

Parametry hlavního ovládacího zařízení:

- ❖ Mikroprocesor: Atmega324 PA
- ❖ Gyro: od firmy InvenSense Inc.
- ❖ Akcelerometr: od firmy Analog Devices Inc.
- ❖ Automatická stabilizace
- ❖ Vstupní napětí: 4.8 ~ 6.0V
- ❖ 5x vstupů signálu z přijímače (1520us)
- ❖ Až 8 výstupů pro ovládání motorů (ESC)
- ❖ Velikost: 50.5mm x 50.5mm x 12mm
- ❖ Hmotnost: 21 gramů (včetně Piezo bzučáku)



Obrázek 3 – Řídící deska KK2.0 Multi-Rotor [4]

Cena hlavního ovládacího prvku:\$33

1.3 MultiWii

MultiWii je univerzální software pro ovládání více rotorových vrtulníků.

Projekt je založen na platformě Arduino a je psán v jazyku C. Létařící model dosahuje dobré stability pro použití FPV kamery a zároveň je schopen zvládnout složitější akrobacii.

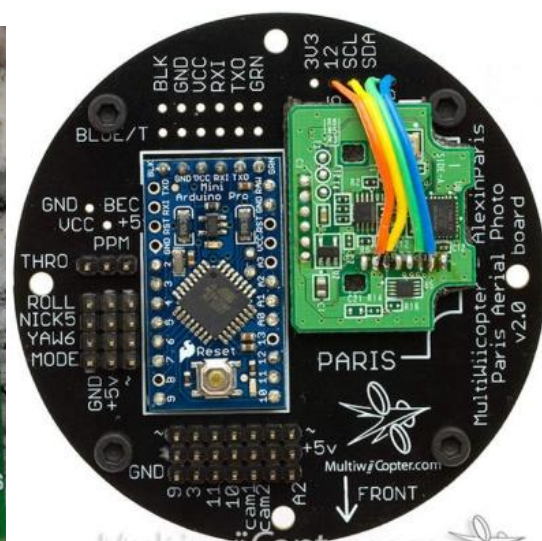
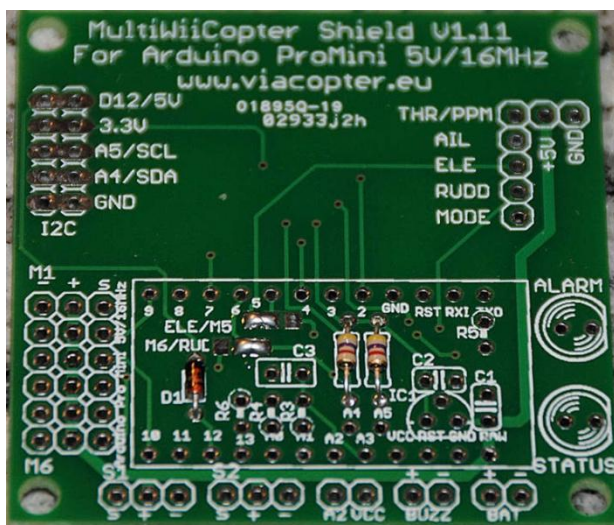
Při skládání kvadrokoptéry se dají použít různé předpřipravené tištěné desky, kam se připojuje vývojový kit Arduino. U starších desek na pozici senzorů je použit modul z

ovladače ke konzoli Nintendo Wii, který má v sobě obsažen gyroskop a akcelerometr. Novější modely mohou využít připojení externích senzorů, protože prodej staršího typu ovládacího prvku se senzory je těžko k dostání. [3]

Parametry hlavního ovládacího zařízení:

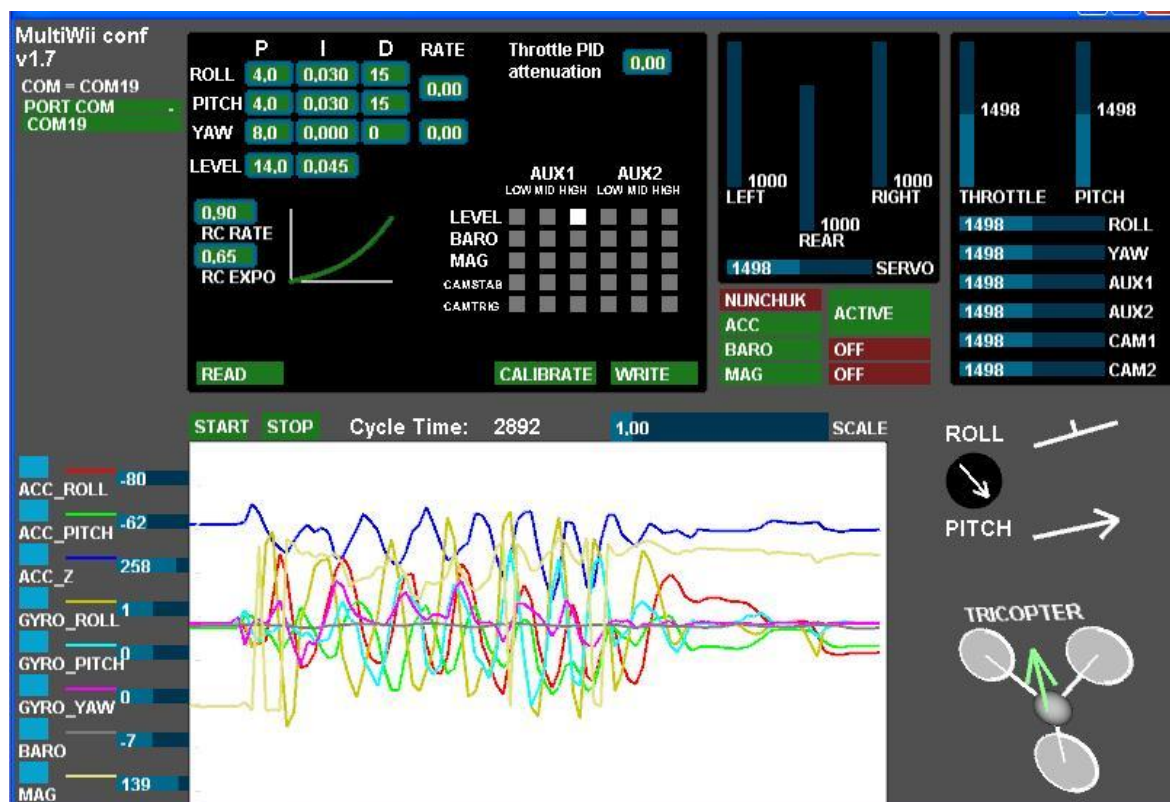
Arduino Pro Mini:

- ❖ Mikroprocesor: ATmega168
- ❖ Provozní napětí 3.3V nebo 5V (v závislosti na modelu)
- ❖ Vstupní napětí 3,35 -12 V (3,3V model) nebo 5-12 V (5V model)
- ❖ Digitální I/O pinů: 14 (z toho 6 poskytuje PWM výstup)
- ❖ 6x Analogových vstupů
- ❖ Maximální proud z digitálních pinů: 40 mA
- ❖ Flash paměť 16 KB (z toho 2 KB používá zavaděč)
- ❖ SRAM 1 KB, EEPROM 512 bajtů
- ❖ Frekvence procesoru: 16 MHz (5V model)



Obrázek 4 – Ukázka použitých desek v projektu MultiWii [3]

Pro správné fungování více rotorového vrtulníku je potřeba správně nastavit koeficienty pro PID regulátor. Vše je možné nastavovat velmi jednoduše, protože k tomuto účelu byl vytvořen speciální software. Pomocí něj lze kalibrovat hodnoty PID regulátoru a sledovat chování senzorů. K propojení s počítačem je potřeba dokoupit programovací USB modul, který se propojí s Arduinem Pro Mini.



Obrázek 5 – Ukázka programu na nastavování vícerotorového vrtulníku [3]

Cena hlavního ovládacího prvku: \$18 (Arduino Pro Mini).

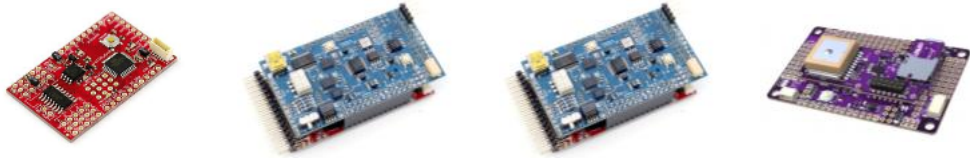
1.4 ArduCopter

ArduCopter je softwarový projekt, který vytvořila skupina DIY Drones. Ta se zaměřovala převážně na letadla. Tímto projektem se dostala mezi vícerotorové vrtulníky.

Skupina začala na projektu pracovat v roce 2010. Snaha vytvořit co nejlepší projekt spojila více vývojářských týmů (AeroQuad, RCGroups). Výhodou spolupráce vývojářských týmů bylo, že všichni pracovali s platformou Arduino. Na konci roku pak vznikla první beta verze, která byla odvozena z dřívějšího projektu na ovládání letadel. Na začátku roku 2011 se začalo pracovat na složitějších řešeních, jako byl bezpilotní let. Koncem roku 2011 byla vydána oficiální verze ArduCopter 2.0.

Hlavní řídicí jednotkou je deska ArduPilotMega. Velkou výhodou je, že je možné ji využít k různým účelům. Podporuje řízení letadel, vícerotorových vrtulníků o různém rozložení vrtulí, tradičních vrtulníků i pozemních vozidel. Pokud uživatel chce toto zařízení používat k ovládání helikoptéry, má možnost přehrávat samotný kód pomocí vývojového prostředí Arduino nebo přímo programem, který je možné stáhnout z oficiálních stránek projektu ArduCopter. [5]

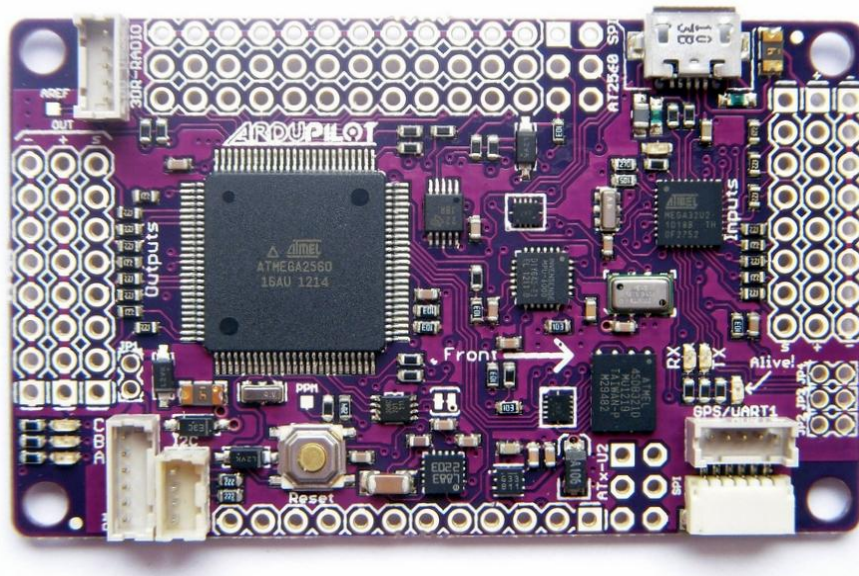
Tabulka 1 – Postupný vývoj řídicí desky ArduPilotMega [6]

				
Autopilot	ArduPilot	ArduPilotMega APM 1 - 1280	ArduPilotMega APM 1 - 2560	ArduPilotMega APM 2
Datum zavedení	1/4 2009	1/4 2010	1/4 2011	4/4 2011
Status projektu	Uzavřen	Uzavřen	Probíhá	Probíhá
Procesor	Atmega 328	Atmega 1280, Atmega 328	Atmega 2560, Atmega 328	Atmega 2560, Atmega 32u2, MPU-6000 DMP
Použité senzory na řídicí desce	Pouze externí	3-osý gyroskop, 3-osý akcelerometr, barometr, magnetometr	3-osý gyroskop, 3-osý akcelerometr, barometr, magnetometr	6-osý MPU- 6000 (gyroskop a akcelerometr), barometr, magnetometr, GPS
Ukládací paměť	Žádná	2 MB	2 MB	4 MB
Rozměry	30x50x30mm	40x72x20mm	40x72x20mm	40x65x10mm
Montáž vyžaduje	Hodně pájení	Méně pájení	Méně pájení	Žádné pájení

Parametry hlavního ovládacího zařízení:ArduPilotMega APM 2.5:

- ❖ Je kompatibilní s Arduino produkty.
- ❖ 8x výstupů na motory (ESC)
- ❖ 8x vstupů pro signál s vysílače
- ❖ 2x servo výstupy pro připojení například FPV kamery
- ❖ Obsahuje 3-osý gyroskop, 3-osý akcelerometr a 3-osý magnetometr, spolu s vysoce výkonným barometrem
- ❖ Palubním 4 MB čipem DataFlash pro automatické zapisování letu.
- ❖ Digitální kompas HMC5883L-TR, který je zahrnut na základní desce.
- ❖ Mikroprocesory: Atmel ATmega2560 a ATMEGA32U-2

- ❖ Výstupy pro GPS modul, programovací port USB
- ❖ Možnost připojit externí senzory přes komunikační rozhraní I²C a konektor pro připojení bezdrátového zařízení pro přenos dat.



Obrázek 6 – Řídící deska APM 2.5 [5]

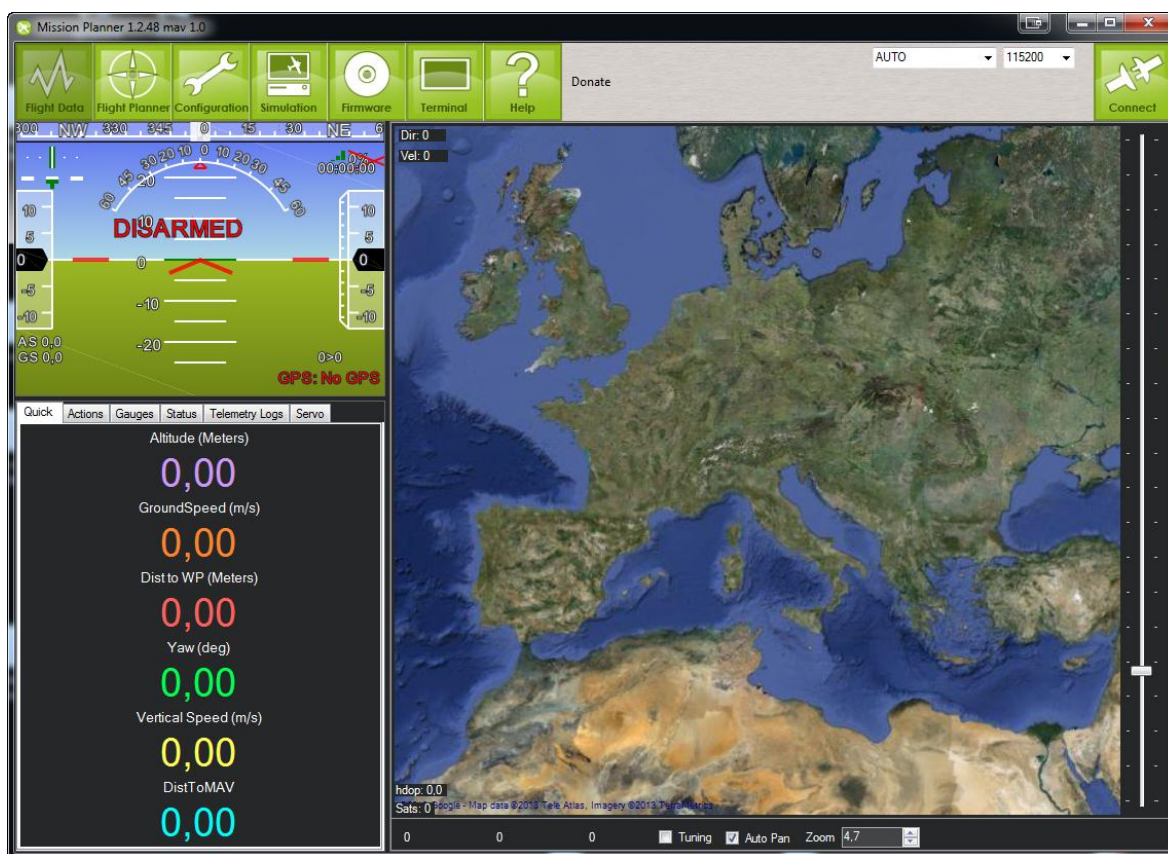
Na sestavené zařízení se můžeme podívat na následujícím obrázku 7.



Obrázek 7 – Sestavené zařízení APM 2.5 určené k prodeji [5]

Program Mission Planner na následujícím obrázku 8 slouží pro nastavení zařízení, kontrolu sensorových dat a hlavně plánování misí pro bezpilotní létání (UAV). V následující části je popis základních funkcí programu:

- Flight Planner - plánování letových tras.
- Flight Data - zobrazení informací o senzorech, stavu natočení vrtulníku, nastavení motorů.
- Configuration - slouží k přizpůsobení PID a dalších důležitých nastavení, včetně zapnutí a vypnutí hardwaru.
- Simulation - používá se pro simulace, kdy můžeme propojit desku s počítačem
- Firmware - slouží pro nejnovější aktualizaci firmwaru pro APM desku
- Terminal - pomáhá ručně nastavit vlastnosti APM, možnost spuštění testů - jestli senzory fungují správně.



Obrázek 8 – Program Mission Planner pro ovládání a nastavování kvadrokoptéry [5]

Cena hlavního ovládacího prvku: \$180.

2 SNÍMAČE VYUŽÍVANÉ U KVADROKOPTÉR

2.1 Akcelerometr

Akcelerometr je senzor pro měření statického a dynamického zrychlení. Statické zrychlení je působící síla zemské gravitace (gravitační zrychlení země). U dynamického zrychlení se měří síla, která vzniká změnou rychlosti pohybujícího se předmětu.

V dnešní době dochází k neustálému vývoji a vylepšování senzorů. V diplomové práci byl použit akcelerometr od firmy Freescale s označením MMA7260QT. Tento akcelerometr patří do skupiny 3D MEMS akcelerometrů. Tato skupina senzorů má velmi dobré dynamické vlastnosti a současně velmi malé rozměry. [12]

Možnosti použití 3D MEMS akcelerometrů:

- Měření sklonu či náklonu ploch a předmětů
- Monitorování pohybu předmětů při přepravě
- Zabezpečovací zařízení
- Detekce a monitorování nárazů a vibrací
- Měření zrychlení - akcelerace
- Detekce a měření pádů
- Měření otřesů
- Měření a předpovídání seismické aktivity



Obrázek 10 – Možnosti použití akcelerometrů dle snímacího rozsahu [12]

Typy akcelerometrů:

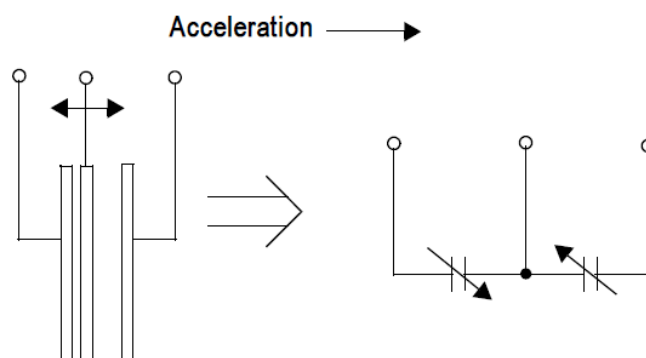
1. Tenzometrické akcelerometry
2. Piezoelektrické akcelerometry
3. Kapacitní akcelerometry
4. Tepelné akcelerometry

2.1.1 Princip**Mechanická struktura:**

Základem struktury a funkce MEMS akcelerometru je proměnná kapacita tříelektrodového vzduchového kondenzátoru. Zařízení využívá nelineární závislosti kapacity C na vzdálenosti elektrod kondenzátoru d dle vztahu (2.0):

$$C = \varepsilon \cdot \frac{S}{d} [F] \quad (2.0)$$

(ε – permitivita, S – plocha elektrod). Při použití jedné pohyblivé elektrody, jejíž pohyb je závislý na působícím zrychlení, vznikne kapacitní akcelerometr. Pomocí MEMS technologie je snadno realizovatelná struktura pohyblivých elektrod, čímž vzniká MEMS akcelerometr.

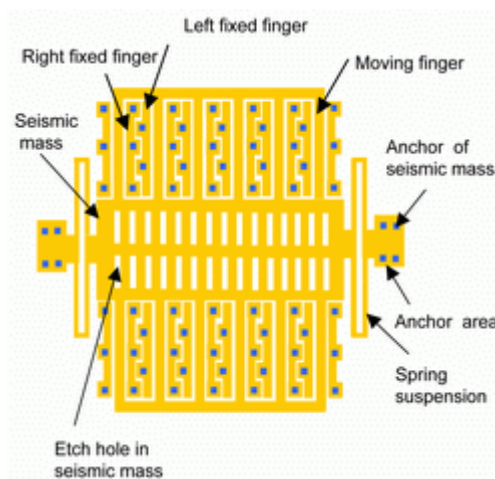


Obrázek 11 – Základní princip MEMS akcelerometru [12]

Hlavním cílem výsledné funkční struktury je zajistit lineární a dostatečně citlivý převod zrychlení na mechanický posuvný pohyb. Tento pak určuje maximální a minimální měřitelné zrychlení, tzn. měřící rozsah senzoru. Rozsah je odvozen ze vztahu pro působení síly při zrychlení. (2.1): [12]

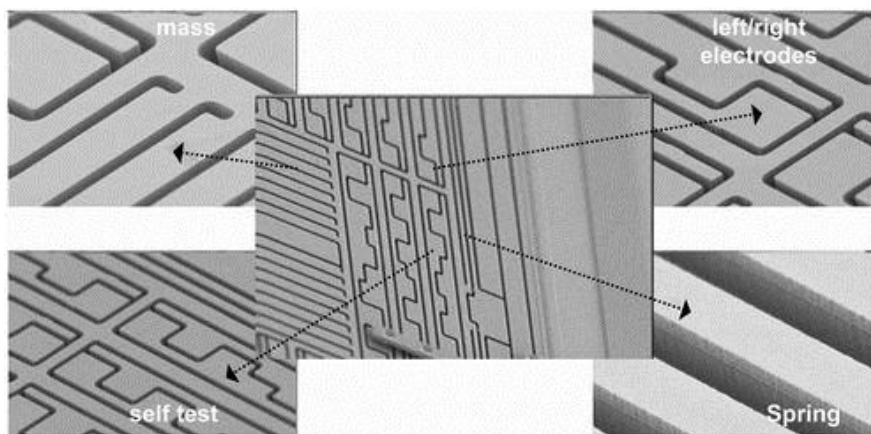
$$F = m \cdot a \quad (2.1)$$

Kde síla F vzniká působením zrychlení a na těleso o hmotnosti m . Síla se převádí přes pružiny na posuv nosníku. Některé části tohoto nosníku tvoří pohyblivé elektrody vzduchového kondenzátoru. Elektronicky měřenou hodnotu kapacity takto vzniklého kondenzátoru pak určuje pozice pohyblivých elektrod nosníků vůči levým a pravým pevným elektrodám.



Obrázek 12 – Schematicky znázorněná mechanická MEMS struktura akcelerometru [12]

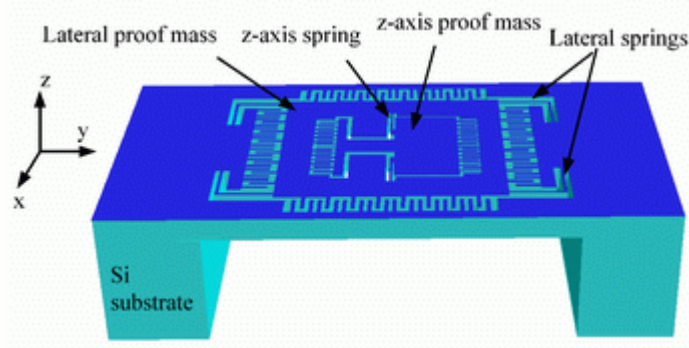
Nosníková struktura a pružiny se vyrábí leptáním polykrystalického křemíku. Lepšího odstupu signál/šum, menší křížové citlivosti a odezvy na změnu velikosti zrychlení je možné dosáhnout díky několikanásobnému protažení délky elektrod. Toho je docíleno stálým vývojem, který vede k postupnému protahování pohyblivých elektrod ve směru kolmém na měřenou osu. [12]



Obrázek 13– Detailní záběry na reálné provedení jednotlivých částí struktury - pevných a pohyblivých elektrod (electrodes), detekční hmoty (mass), pružiny (spring) a samo testovací strukturu (self test) [12]

Popsaná struktura umožňuje měřit zrychlení jen ve směru kolmém na pohyblivé elektrody. Takové akcelerometry nesou označení 1D.

U 3D akcelerometrů se pohybují všechny tři osy X, Y a Z.

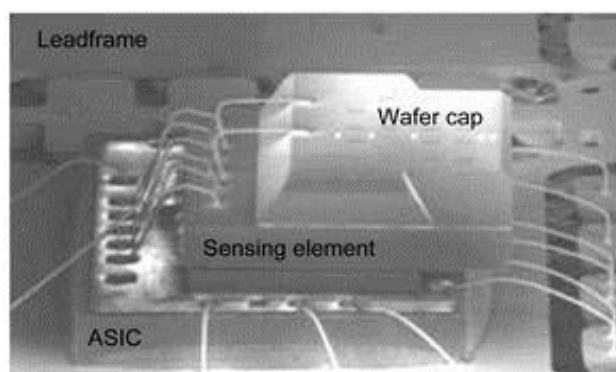


Obrázek 14 – 3D struktura akcelerometru (měření zrychlení v osách X, Y, Z) [12]

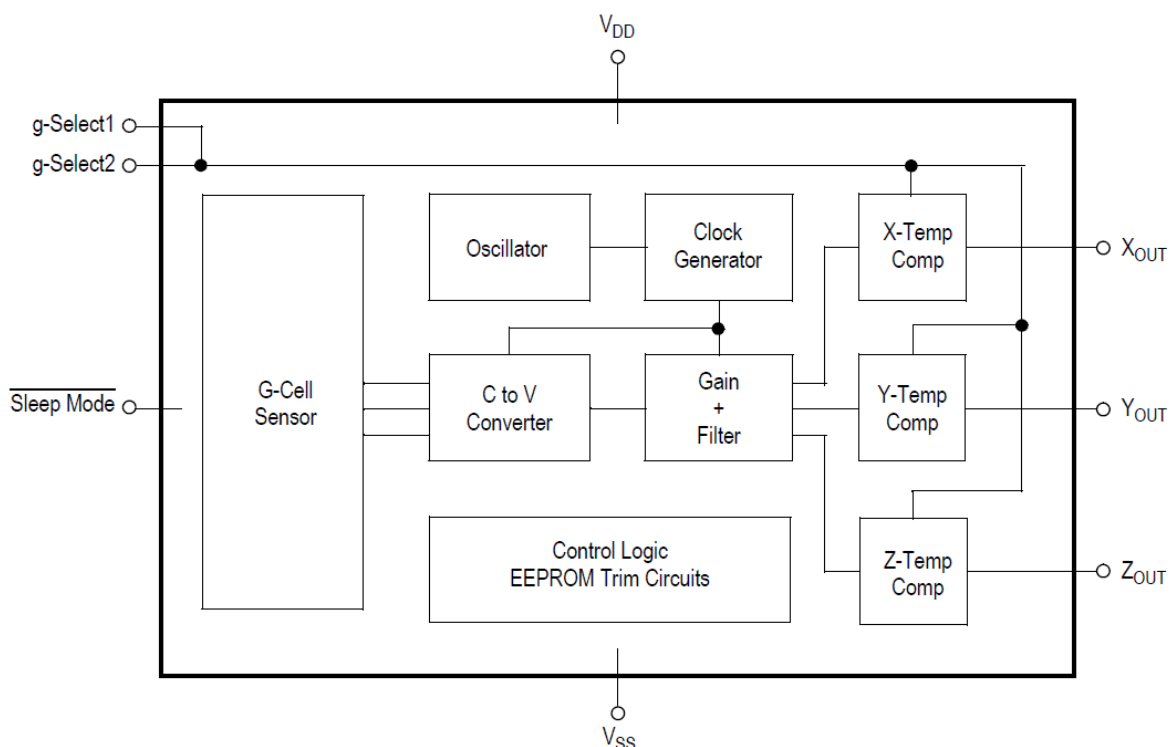
2.1.2 Elektronická struktura

ASIC elektronika měří změnu kapacit a převádí ji na změnu napětí. Získaný signál je pak transformován na standardní lineární napěťový výstup. ASIC vrstva je umístěna pod snímacím elementem (Sensing element), který je chráněn krycí "kopulí" (Wafer cap). Kapacita je měřena pomocí metody spínaných kondenzátorů řízené číslicovou logikou a generátorem spínacího hodinového signálu, tím dochází k převodu změny kapacity na změnu napětí. Následně je napětí linearizováno a opět filtrováno obvody se spínanými

kondenzátory. V konečné fázi dochází ke kompenzaci vlivu teploty. Výstupem pak je lineární, kompenzovaný a zesílený napěťový signál s definovanou převodní konstantou (citlivostí) informující o tom, o kolik je nutné změnit hodnotu měřeného zrychlení, aby se změnilo výstupní napětí o 1 V (hodnota g/V). Vše je nutné provést zvlášť pro každou osu snímání (kanál). [12]



Obrázek 15 – Struktura spojení snímače a ASIC elektroniky[12]



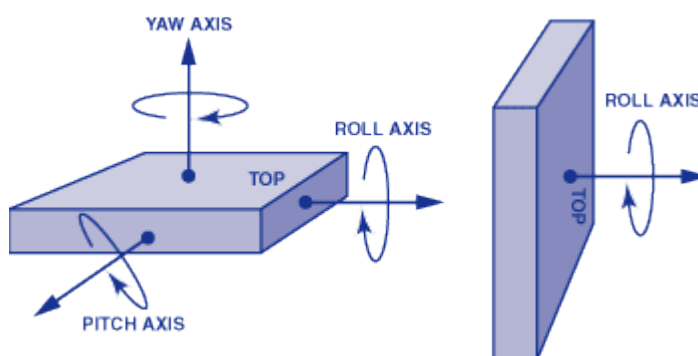
Obrázek 16 – Blokové schéma elektrické struktury 3D akcelerometru [12]

Praktickým řešením s tímto typem akcelerometru se zabývá kapitola 9.

2.2 Gyroskop

Použití gyroskopů je vedle akcelerometrů další možností, jak měřit pohyb, změnu polohy, natočení a otáčení. Novější gyroskopy jsou díky technologii MEMS integrovány spolu s logikou na jednom čipu.

Gyroskopy jsou již dlouhou dobu známy a využívány pro měření a určování změny polohy nebo natočení libovolného předmětu, ke kterému jsou připevněny. Dříve však bylo možné použít pouze jejich mechanické provedení, případně verzi optickou s využitím světlovodných vláken. Dnes je lze najít v integrované podobě klasických součástek, obsahujících mimo samotný snímač i množství vyhodnocovacích obvodů a logiky. Výstup je pak analogový, digitální nebo obojí. Díky tomu lze gyroskopy použít i v běžných aplikacích, nejen ve vědě a výzkumu. Na funkci gyroskopických zařízení je závislá například technologie přesného určování polohy GPS. [9]



Obrázek 17 – Možnost měření natočení a rotace [9]

Možnosti použití 3D MEMS gyroskopů:

- Detekce a měření rotačního pohybu
- Stabilizační jízdní systémy automobilů
- Zpřesňování pozice systémů GPS
- Stabilizace obrazu předmětů
- Zjišťování změny polohy, detekce pohybu
- Měření setrvačnosti
- Měření náklonu
- Detekce převrácení, např. automobilu

2.2.1 Princip

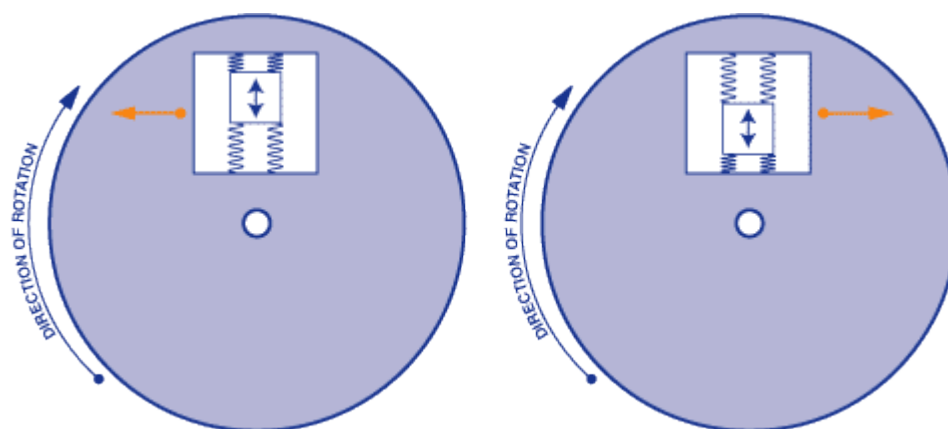
Gyroskopy jsou užívány k měření úhlové rychlosti, což je údaj o tom, jak rychle se objekt otáčí ve stupních za sekundu [°/s]. Rotaci je možné změřit pouze v jednom směru jedné osy (x, y, z). Je-li nutné měřit více os, musí být každá měřena individuálně. Kolmá osa se nazývá *YAW*, příčná osa *PITCH* a podélná osa se nazývá *ROLL*. Jak je patrné z obrazové přílohy č. 17 bude se v této práci operovat zejména s gyroskopy vyrobenými technologií MEMS, které fungují na principu Coriolisovy síly.

Coriolisova síla je tzv. virtuální síla, působící na libovolný hmotný objekt, jenž se pohybuje rychlostí v v soustavě rotující kolem osy rotace úhlovou rychlostí. [9]

$$F_c = 2 \cdot m \cdot v \times \omega$$

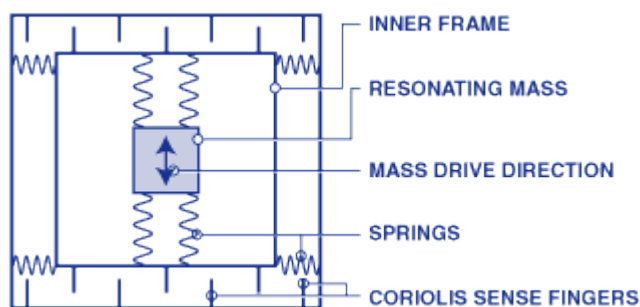
kde x je vektorový součin.

U mechanických gyroskopů se při pohybu objektu využívá pružin upevněných uvnitř rámu. Směrem ven k okraji působí na kotouč Coriolisova síla (Obr. 18). Velikost a směr této síly jsou úměrné úhlové rychlosti. Tento systém lze využít k měření rychlosti. [9]



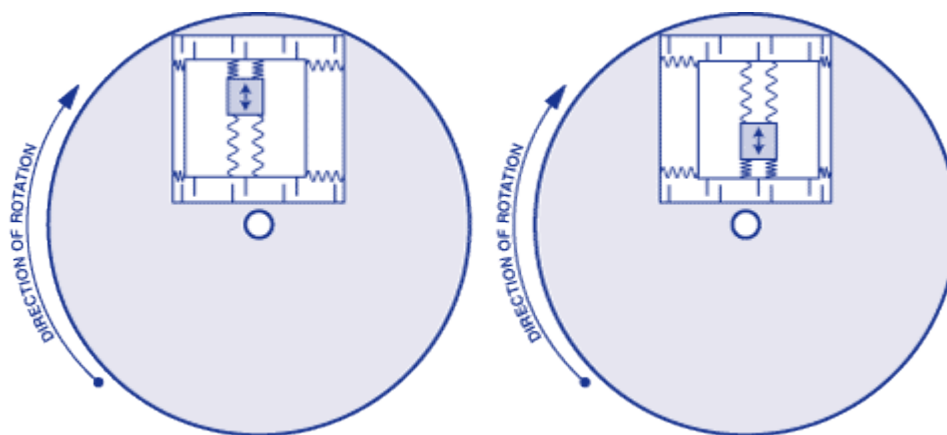
Obrázek 18 – Působení Coriolisovy síly na mechanický gyroskop pohybující se k okraji kruhu (vlevo) a ke středu (vpravo) [9]

V integrovaných gyroskopech se při praktickém použití Coriolisovy síly využívá technologie MEMS. Spolu s elektrickými obvody se na čipu vytváří i mechanické mikrosoučásti, které tvoří samotný snímač. Základní princip je znázorněn na obrázku 19. [9]



Obrázek 19 – Zjednodušená struktura snímače MEMS gyroskopu [9]

Základ tvoří rezonující struktura (Resonating mass) upevněná v rámu (Inner frame), která se vlivem vlastní mechanické rezonance, zde reprezentované pružinami (Springs), pohybuje v uvedeném směru (Mass drive direction), který je kolmý na směr otáčení (Obr. 19). Při otáčení vzniká Coriolisova síla úměrná úhlové rychlosti otáčení. Ta stlačí vnější pružiny rámu, čímž způsobí vzájemný posuv měřících ploch (Coriolis sense fingers), které fungují jako elektrody vzduchových kondenzátorů. Výstupem je tedy změna kapacity úměrná úhlové rychlosti otáčení [$^{\circ}/s$]. [9]

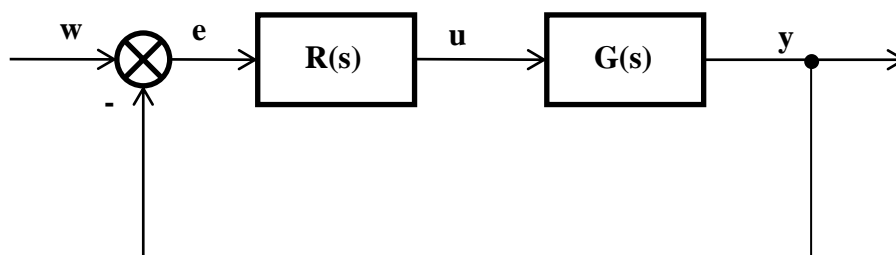


Obrázek 20 – Příklad funkce struktury snímače gyroskopu při rotaci [9]

3 REGULACE

Regulace je pro nás velmi důležitá, protože kvadrokoptéra se chová nestabilně. K vyřešení tohoto problému nám pomůže regulátor. V regulátoru probíhá proces regulace, který nám zajistí ustálení hodnot na požadované hodnotě, která se od systému očekává.

Celý proces probíhá ve smyčce, kde bere v úvahu i předchozí naměřené hodnoty. Takový systém nazýváme regulační obvod. Jeho obecné schéma je vidět na obrázku 21.



Obrázek 21 – Základní zpětnovazební zapojení

Do regulačního obvodu je přivedena vstupní hodnota $w(t)$, která je naší žádanou hodnotou. Vstoupí do slučovacího členu (komparátoru), kde se porovnává regulovaná veličina s požadovanou veličinou. Výstupem s komparátoru je regulační odchylka $e(t) = w(t) - y(t)$. Ta vstupuje do regulátoru, kde je upravena na akční zásah $u(t)$. Ten působí na regulovanou soustavu, kde výstupem je regulovaná veličina $y(t)$. Tento cyklus se opakuje, dokud regulovaná veličina se nerovná požadované veličině a tak nemusí probíhat žádný akční zásah na regulovanou soustavu. Pro správné fungování celého systému je důležité správně nastavit regulátor.

Pro náš problém byly zvoleny 3 typy regulátorů (P, I, D) a jejich možné kombinace. V praxi se využívají kombinace regulátorů PD, PI, PID. V našem případě jsme použili PID regulátor.

PID v řídicí technice znamená proporcionální, integrační a derivační členy, které určují chování regulátoru. Tyto regulátory se většinou nepoužívají samostatně a jejich kombinací PD, PI, PID jsou v automatizačním průmyslu používány nejčastěji. [13] [14] [15]

Typy regulátorů:

- a) Proporcionální (P)
- b) Integrační (I)
- c) Derivační (D)

a) Proporcionální chování regulátoru je akční zásah regulátoru úměrný regulační odchylce podle následujícího vztahu (4.1)

$$R_P(s) = r_o \quad (4.1)$$

Vstupní veličina se změní na výstupu o 100%. Dochází k zesílení. Proporcionální člen se nedá použít samostatně, protože zanechává trvalou regulační odchylku.

b) Integrační chování je akční zásah úměrný době, po kterou existuje regulační odchylka – vztah (4.2).

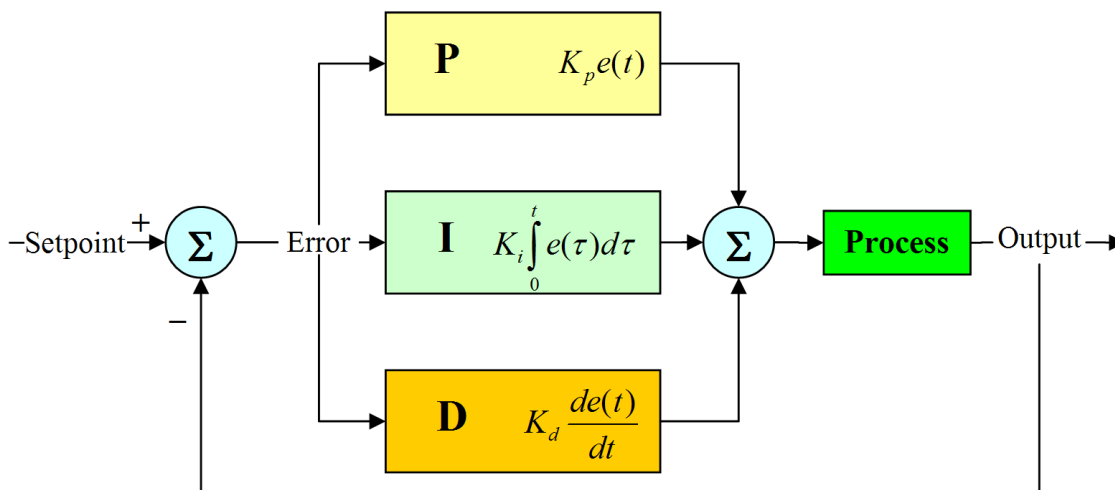
$$R_i(s) = \frac{1}{T_I \cdot s} \quad (4.2)$$

T_I se nazývá integrační časová konstanta.

c) Derivační chování se definuje jako výstup z regulátoru úměrný rychlosti změny regulační odchylky – vztah (4.3).

$$R_i(s) = T_D \cdot s \quad (4.3)$$

T_D se nazývá derivační časová konstanta. Derivační člen zesiluje šумы, proto ho nelze používat samostatně.



Obrázek 22 – Ukázka PID regulátoru

4 ARDUINO

Projekt Arduino vznikl v roce 2005 v Itálii ve městě Ivrea. Jeho zakladatelé byli Massimo Banzi a David Cuartielles. Projekt byl pojmenován po významné historické osobnosti tohoto města -Arduinovi Ivrejském.

Platforma Arduino je schopna vytvářet složité projekty pomocí jednoduchého vývojového kitu a mikrokontroléru. Může být použita k vytváření interaktivních objektů. Vstupy z různých spínačů nebo senzorů mohou být používány k ovládání světel, motorů a různých zařízení. Arduino projekty mohou fungovat samostatně nebo mohou spolupracovat s programem v počítači, například pomocí sériového rozhraní. Desky se dají ručně kompletovat dle požadavků nebo se nakupují již sestavené výrobcem. Pro programování mikrokontroléru bylo vyvinuto snadné programovací prostředí, které se neustále vyvíjí. Celý program lze zdarma stáhnout na internetových stránkách Arduina.

V současné době existuje velké množství dalších mikrokontrolérů s různými mikroprocesory. Všechna tato zařízení mají své specifické programovací příkazy, které jsou častokrát zbytečně složité, na rozdíl od Arduina, které má poměrně jednoduché programování.

Software k programování zařízení Arduino spolupracuje s operačními systémy Windows, Macintosh OS a Linux.

Jednoduché a přehledné programovací prostředí Arduina umožňuje začátečníkům jeho snadné použití a pokročilým uživatelům dává dostatek flexibility pro náročnější využití jeho schopností.

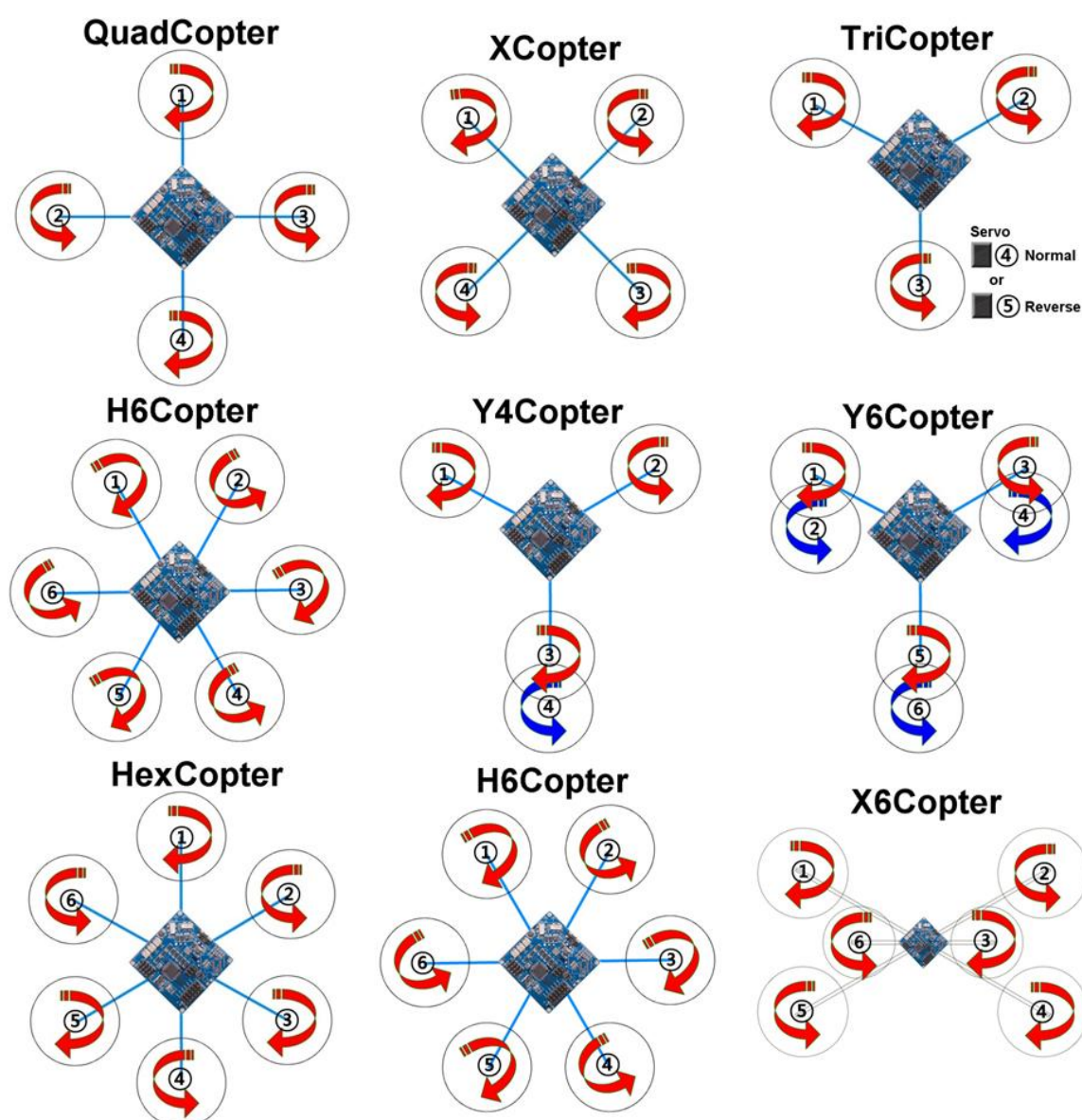
Vlastnosti Arduina- Software Arduino je využíván jako volně šiřitelná platforma zkušenými programátory. Jazyk může být rozšířen pomocí C++ knihoven. Uživatelé, kteří zvládnou technické problémy, mohou udělat další krok z Arduina k programování v jazyce C, na němž je Arduino založeno.

Rozšiřitelné hardwarové prvky - Arduino je založeno na mikrokontroléru ATmega8 a ATmega168 od firmy Atmel. Plány pro moduly jsou publikovány pod licencí Creative Commons, takže zkušení návrháři obvodů jsou schopni vytvořit svou vlastní verzi modulu, jeho prodloužení a zlepšení. [8]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 KONSTRUKCE

Existuje množství řešení, jimiž je možné přistupovat k problému konstrukce. V případě této práce bylo zvoleno řešení se čtyřmi motory tvořící konstrukci "kříž". Tato konstrukce je na následujícím obrázku 23 označena pod názvem „QuadCopter“. Řešení bylo zvoleno z důvodu snadnějšího ovládání kvadrokoptéry. Při pohybu dopředu nebo dozadu není u dvou motorů nutné měnit otáčky.



Obrázek 23 – Možnosti rozložení motorů pro vícerotorové vrtulníky

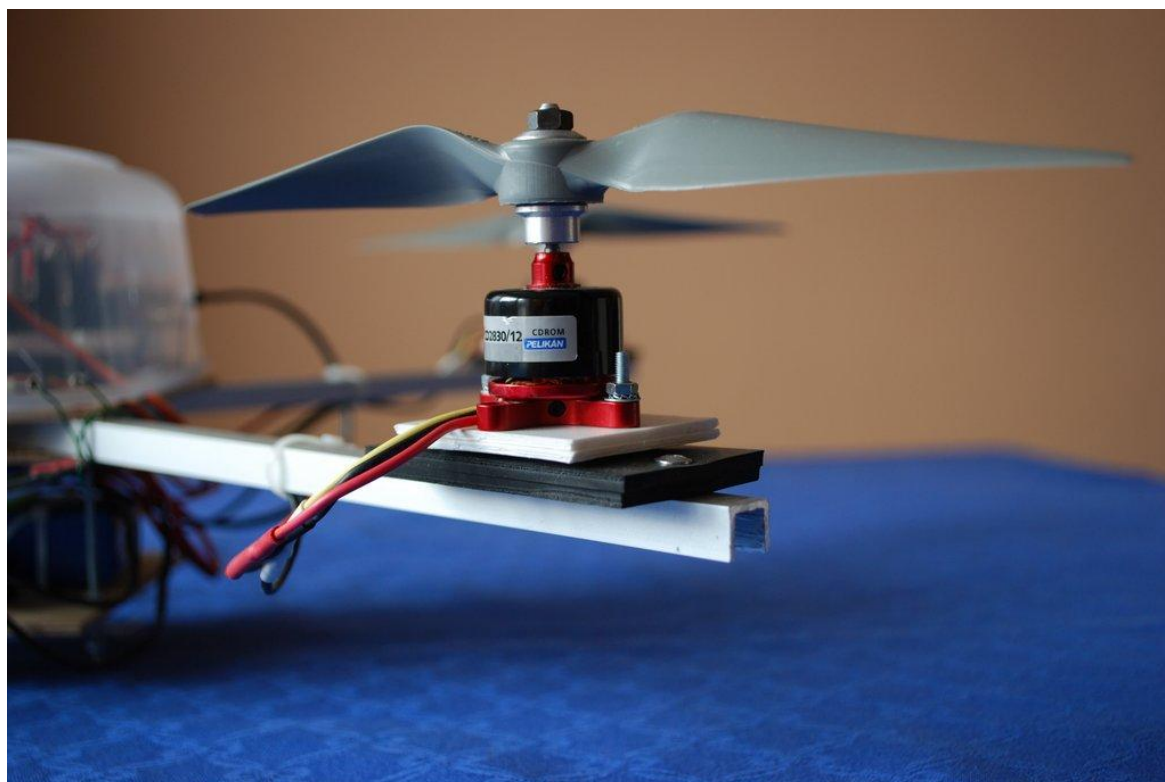
Základem konstrukce kvadrokoptéry jsou hliníkové profily ve tvaru U. Střed je vyroben z modelářské 5mm silné překližky zajišťující dostatečnou pevnost střední části. Na ni je namontován mikrokontrolér s pomocným tištěným spojem. Přímě na vývojovém kitu jsou upevněny senzory, které jsou umístěny na středu kvadrokoptéry. Důvodem tohoto umístění je získání co nejpřesnějších dat. Velkým problémem kvadrokoptér jsou vibrace, které byly částečně eliminovány pomocí silenbloků, které jsou umístěny pod každým motorem a vývojovým kitem. Došlo k jejich výraznému omezení, nicméně úplného odstranění nebylo dosaženo.



Obrázek 24 –Finální podoba kvadrokoptéry

5.1 Motory, vrtule

Pro model o váze cca 1250g se zvolily odpovídající střídavé motory. Každý z těchto motorů dokáže unést až 500g pro 3D akrobacii. Motory jsou od českého výrobce PELIKÁN DANIEL. Při prvních pokusech se model začal zvedat při 65% výkonu.



Obrázek 25 – Motor RAY CD2830/12 na silenbloku

K motoru jsou pořízeny vrtule typu 9x6 pravotočivé a levotočivé. V tomto případě byla zvolena konstrukce se čtyřmi vrtulemi. Vrtule stejného typu jsou umístěny proti sobě. Toto rozložení eliminuje otáčení kvadrokoptéry. Jak je patrné z obrázku 23 pod názvem "QuadCopter".

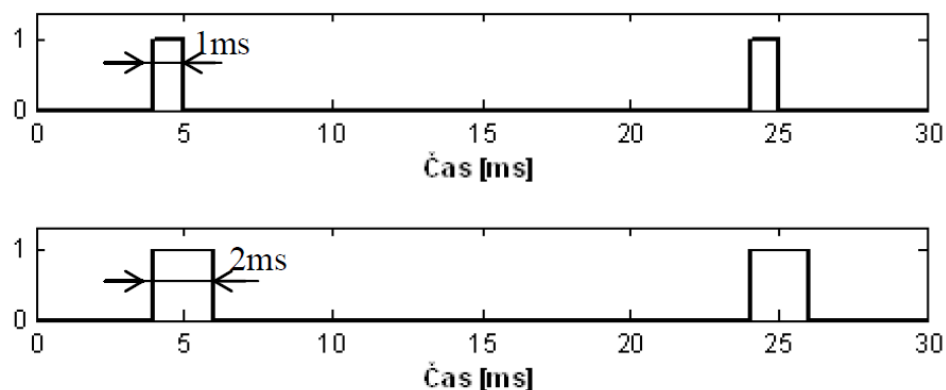
5.2 Regulátory

Pro motory byl vybrán regulátor o proudovém výkonu 25A od výrobce FOXY.



Obrázek 26 – Regulátor otáček FOXYR-25B [21]

Způsob ovládání střídavých motorů vychází z principu servomotorů. Generované signály PWM pro motory jsou vyvedeny z výstupu Arduina na jednotlivé regulátory. Generovaný signál má velikost logické jedničky po dobu 1 až 2ms a periodou 20ms.



Obrázek 27 – Signál řízení PWM

5.3 Vysílač, přijímač

Pro řízení kvadrokoptéry byla zvolena vysílací soustava DX6i od výrobce Spektrum. Ta disponuje šesti kanály, kde čtyři kanály jsou obsazeny (THRO, RUDD, AILE, ELEV) a další dva kanály jsou volné. Zařízení pracuje s technologií DSM2 na frekvenci 2,4 GHz. Díky technologii DMS2 je zajištěno, že zařízení není rušeno vysílačem jiného modeláře.

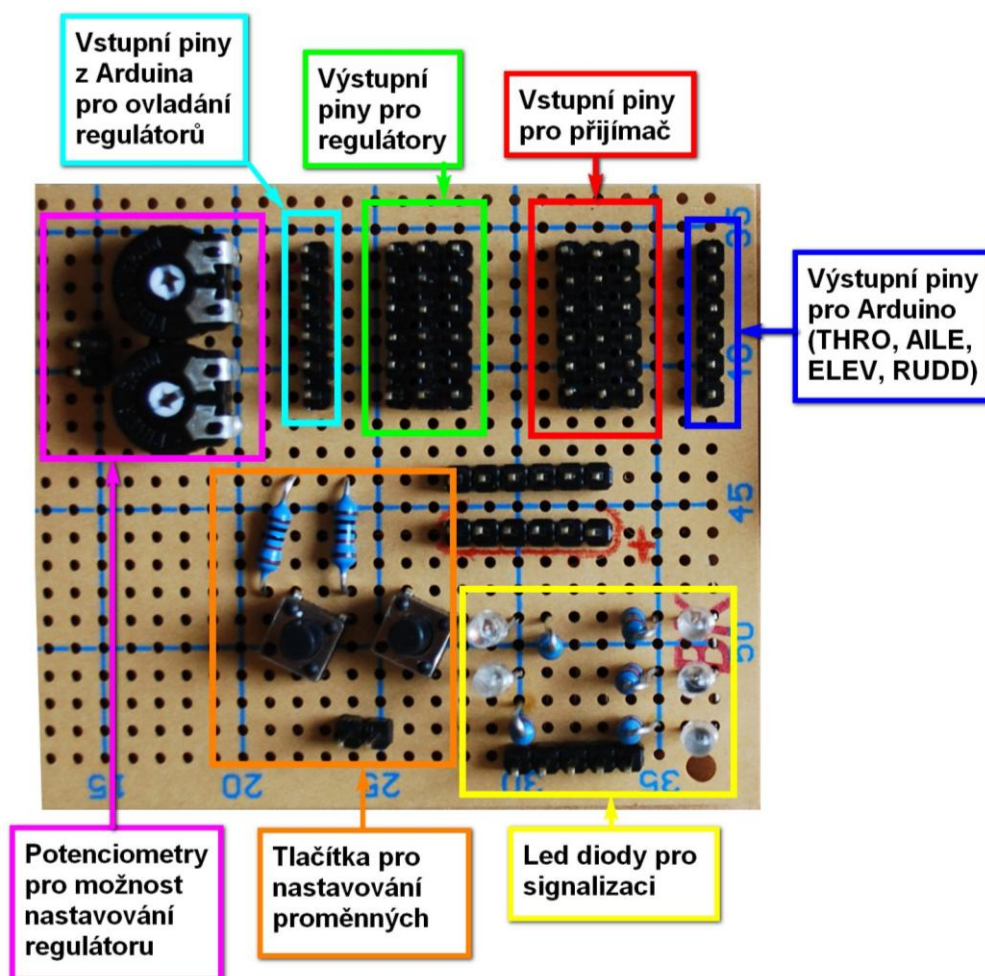
Součástí DX6i je 6-ti kanálový přijímač AR6200. Jedná se o kombinaci interního a externího přijímače. Vysílač DX6i současně vysílá na dvou kmitočtech, vytváří dvojí RF cesty. Díky zdvojenému datovému přenosu si přijímač sám vybere silnější signál. Přijatá data se vyhodnotí a použijí k ovládání. Tento způsob zajišťuje spolehlivé RF spojení za všech podmínek.



Obrázek 28 – Vysílací soustava DX6i s přijímačem AR6200

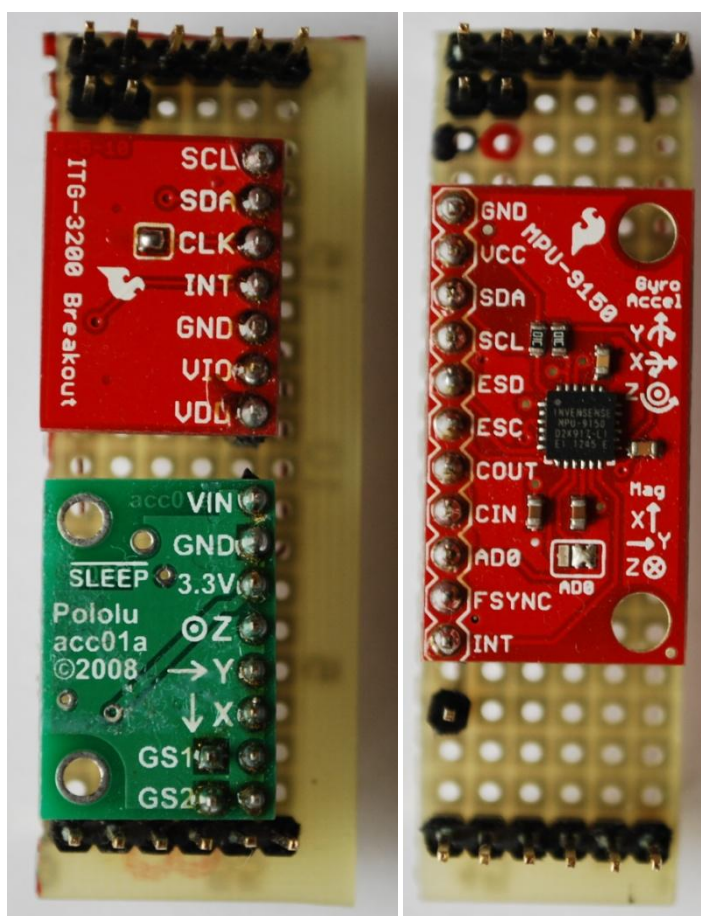
5.4 Desky tištěných spojů

U normálních leteckých modelů jsou motory zapojeny přes regulátor přímo do přijímače. U existujících řešení jsou umístěny mikrokontroléry, senzory a výstupní konektory na jedné desce. V našem případě se zvolilo jiného postupu. Byl vytvořen obvod, který propojuje přijímač AR6200 s piny Arduina a výstupy pro motory jsou řešeny podobně. Jak je zřejmé z následujícího obrázku 29. Přijímač AR6200 a ovládání motorů je zapojeno do jednoho obvodu. Z obvodu jsou pak vyvedeny samotné vodiče, které se propojí s Arduinem pro zajištění správné komunikace. Toto řešení není ideální, ale díky neustálému vývoji a užití různých typů senzorů nebylo možno vytvořit nadstavbovou desku, která by zahrnovala kompletní řešení. Pro signalizaci stavu zařízení byly přidány led diody, které upozorňují na chybové stavy. Dále byla přidána tlačítka, která mohou být použita pro nastavování kvadrokoptéry. K tlačítkům byly přidány i potenciometry. Potenciometry mohou sloužit k jemné regulaci složek PID regulátoru. Celý obvod byl pájen drátkovací technikou, která pro tento účel byla dostačující.



Obrázek 29 – Pomocný tištěný spoj pro propojení se zařízením Arduino

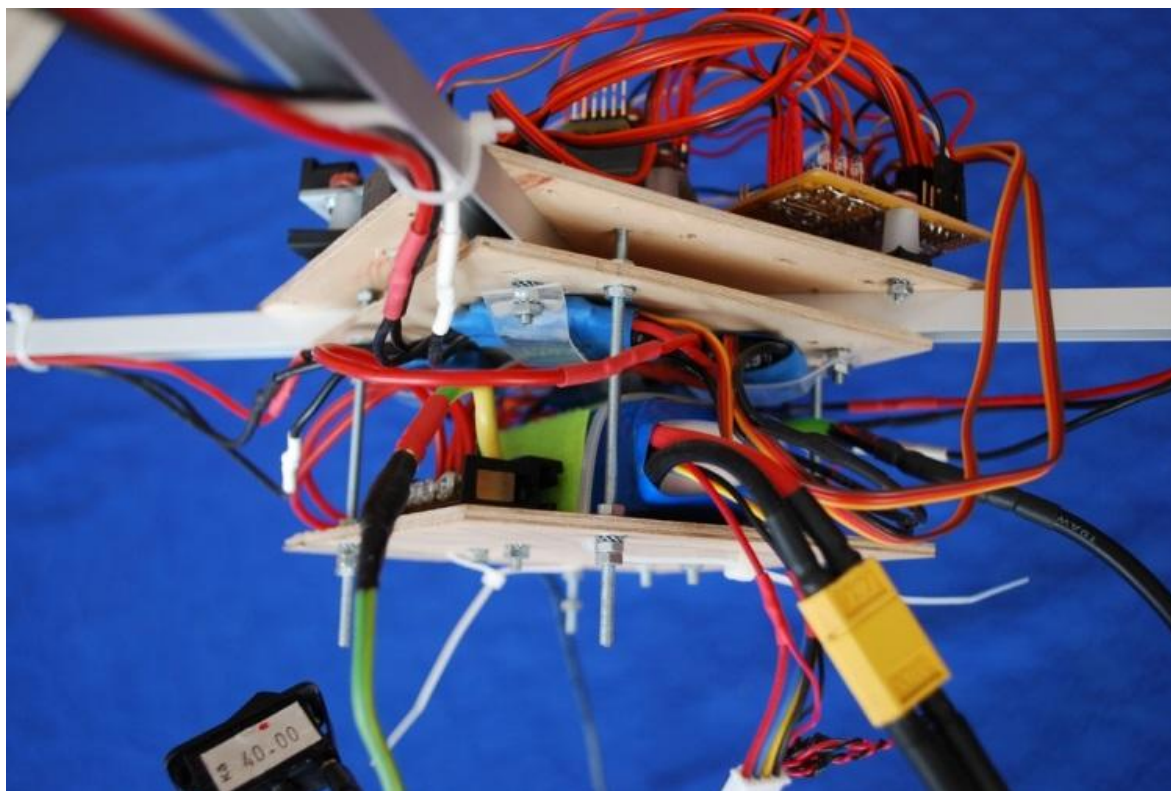
Dříve byly akcelerometr a gyroskop umístěny samostatně a připojeny k Arduino pomocí vodičů. Kvůli eliminování vnějších vlivů (vibrace, studené spoje, rozpojený vodič) byly senzory umístěny na nastavbovou desku. Ta umožnila pevně připevnit senzory na vývojový kit Arduino. V případě problémů se senzory dají vyjmout. Nastavbová deska je udělána tak, aby se daly ostatní piny Arduino plně využít a nesnižovaly tak možnosti využití.



Obrázek 30 – V levé části je akcelerometr MMA7600QT a gyroskop ITG-3200, v pravé části je nový senzor MPU-9150

5.5 Napájení soustavy

Celkovou soustavu napájí 3 článková Li-pol baterie o kapacitě 2200 mAh. Její výstupní napětí je 12.6V, které se dá použít pro napájení vývojového kitu Arduina. Při zapnutí baterie se aktivují regulátory, které mají servokonektor připojený do pomocného tištěného obvodu. Ten má výstupní napětí 5V a proudový výkon až 3A. Tímto napětím napájíme přijímací soustavu. Mohlo být použito výstupní napájení Arduina, ale jeho 5V výstup nebyl použit, aby nezatěžoval proudovým odběrem.



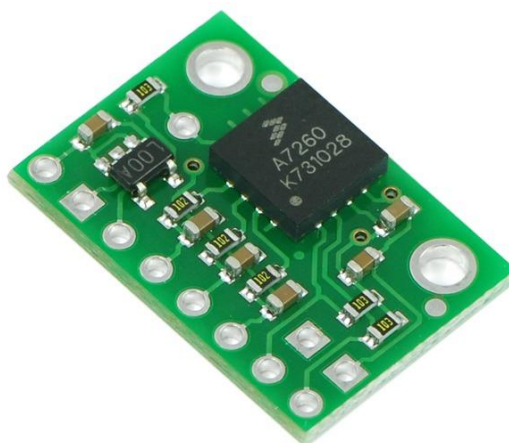
Obrázek 31 – Napájecí soustava kvadrokoptéry

6 MMA7260QT - AKCELEROMETR

Senzor MMA7260QT je levný kapacitní 3D MEMS akcelerometr s integrovaným zpracováním signálů, jednopólovým filtrem typu dolní propust, teplotní kompenzací a externí volbou měřicího rozsahu a citlivosti. Každý senzor má již z výroby nastavenou nulovou hladinu a zlomový kmitočet filtru a tedy nejsou zde vyžadovány žádné externí součástky. Nízkou spotřebu v běžném provozu podtrhuje nepatrná spotřeba v režimu spánku. Akcelerometr je tedy vhodný i pro bateriově napájená zařízení. Citlivost zařízení lze nastavovat pomocí propojení pinů na zařízení. [10]

Základní vlastnosti senzoru MMA 7260QT:

- ❖ Měřicí rozsah: 1.5 g / 2 g / 4 g / 6 g volitelné 2 vstupy g-Select
- ❖ Maximální citlivost: 800 mV/g v rozsahu 1.5g
- ❖ Nelinearita: +/- 1 % z rozsahu
- ❖ Křížová citlivost: 5 %
- ❖ Spotřeba: 500 μ A, v režimu spánku jen 3 μ A
- ❖ Napájecí napětí: 2.2 V až 3.6 V
- ❖ Pracovní teplota: -40 až 105 °C
- ❖ Pouzdro: QFN 6 x 6 x 1.45 mm



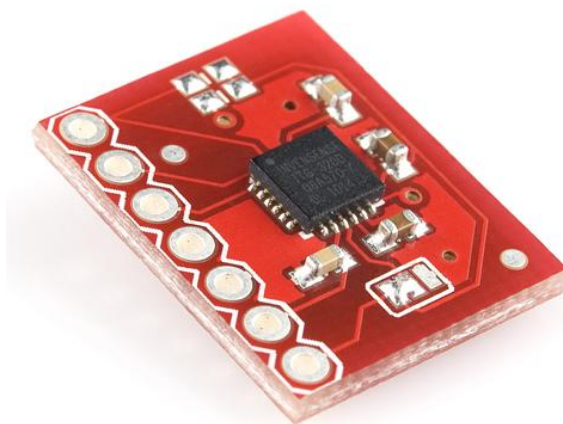
Obrázek 32 – Integrovaný obvod s akcelerometrem MMA 7260QT [10]

7 ITG-3200 - GYROSKOP

Gyroskop stejně jako akcelerometr patří do skupiny MEMS senzorů. Oproti akcelerometru se liší tím, že využívá přenos informací přes rozhraní I²C, přes které lze dostat potřebná data. Gyroskop převádí analogové informace na digitální 16 bitová data. V zařízení je uživatelsky volený nízko-pásmový filtr. I²C přenos lze nastavit až na 400 kHz. Mezi výhody zařízení patří vestavěný teplotní senzor a přesný interní oscilátor. Díky nízké spotřebě se zařízení může napájet i z baterie.

Základní vlastnosti senzoru ITG-3200:

- ❖ Digitální výstupy X, Y a Z osy jsou integrovány na jednom integrovaném obvodu
- ❖ Programovatelný nízko-pásmový filtr
- ❖ Nízký provozní proud 6,5 mA
- ❖ Široký rozsah napájecího napětí VDD na 2.1V na 3.6V
- ❖ Pohotovostní proud: 5μA
- ❖ Digitální teplotní čidlo
- ❖ Rychlý režim I²C (400kHz)
- ❖ Volitelné externí hodiny 32,768 kHz nebo 19.2MHz pro synchronizaci se systémovým časem
- ❖ Rozměry: 17,78 x 13,97 mm



Obrázek 33 – Integrovaný obvod s gyroskopem ITG-3200 [19]

8 MPU-9150 - AKCELEROMETR, GYROSKOP, MAGNOMETR

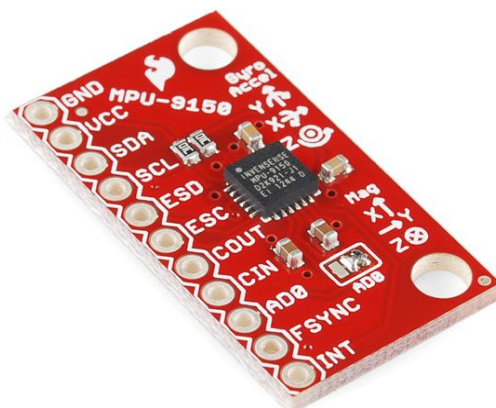
MPU-9150 je 9-osé zařízení, které kombinuje dva čipy - MPU-6050, který obsahuje 3-osý gyroskop, 3-osý akcelerometr a AK8975 - 3-osý digitální kompas. Dále obsahuje digitální procesor Motion (DMP) schopný zpracovat komplexní 9-osé MotionFusion algoritmy.

Zařízení obsahuje samokalibrační firmware, který usnadňuje práci a odebírání starostí uživateli. Celé zařízení je energeticky velmi šetrné. Při maximální zátěži zařízení odebírání 4,25 mA, proto může být napájeno i z baterie.

Hlavní výhodou zařízení je, že obsahuje vlastní procesor na zpracování vstupních dat ze senzorů (DMP). Uživatel si pak tato data může nechat poslat přes rychlé rozhraní I²C.

Základní vlastnosti senzoru MPU-9150:

- ❖ 3-osý gyroskop s citlivostí až 131 LSB / DPS a volitelným měřicím rozsahem ± 250 , ± 500 , ± 1000 a ± 2000 DPS
- ❖ 3-osý akcelerometr s rozsahem $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ a $\pm 16g$
- ❖ 3-osý kompas s rozsahem $\pm 1200\mu T$
- ❖ Digitální výstup 9-osého MotionFusion (DMP) – údaje jsou ve výstupu matice rotace, vypočítaného úhlu anebo upravených dat kompasu
- ❖ Rozsah napájecího napětí 2.4V-3.46V, VLOGIC z $1,8 \pm 5\%$ od VDD
- ❖ Gyroskop - provozní proud: 3,6 mA (plný rozsah gyroskopu na všech osách)
- ❖ Gyroskop + akcelerometr - provozní proud: 3,8 mA (plný rozsah u gyroskopu a akcelerometru při vzorkovací frekvenci 1kHz)
- ❖ Gyroskop + akcelerometr + kompas + DMP - provozní proud: 4,25 mA (plný rozsah u gyroskopu a akcelerometru při vzorkovací frekvenci 1kHz a kompas na frekvenci 8Hz)
- ❖ Rychlé sériové rozhraní I²C až 400kHz



Obrázek 34 – MPU-9150 Akcelerometr, gyroskop a magnetometr [19]

9 ZÍSKÁVÁNÍ DAT

Sběr dat nám zajišťují 3 senzory (akcelerometr MMA7620QT, gyroskop ITG-3200, a MPU -9150). U prvního akcelerometru je převáděn analogový signál na digitální, u dalších dvou senzorů jsou data posílána přes I²C komunikační rozhraní již v digitální formě. Výsledná data ze senzorů jsou pak zpracována v mikrokontroléru. Získaná data obsahují šum, který je způsoben při převodu z analogové formy na digitální.

Pro správnou hodnotu dat je potřeba použít filtraci. Při zvolení správného filtrování můžou být data použita k řízení systému. V této kapitole bude popsáno několik způsobů filtrace dat, od jednodušších průměrů až po složitější Smoothingův a Komplementární filtr. Pro výsledné grafy byly použity nasbírané data z osy Y (akcelerometr a kombinace akcelerometru a gyroskopu).

9.1 Převod získaných dat na stupně

9.1.1 Akcelerometr

Pro vypočítání úhlu na ose X platí vztah (9.1.1)

$$x_{acr} = \left(\operatorname{atan} \left(\frac{a_x}{a_z} \right) * \pi \right) * 57.29577 \quad (9.1.1)$$

Kde a_x je hodnota zrychlení v ose počítaného úhlu X a a_z je hodnota zrychlení v ose Z. Výsledný úhel x_{acr} je vypočítaný ve stupních.

9.1.2 Gyroskop

Pro vypočítání úhlu pomocí gyroskopu v ose X je použit vztah (9.1.2)

$$x_{gyro} = \Phi * t \quad (9.1.2)$$

Kde $\Phi(PITCH)$ je hodnota zrychlení a t je hodnota udávající čas, za který se gyroskop nakloní. Výsledný úhel x_{gyro} je vypočítaný ve stupních.

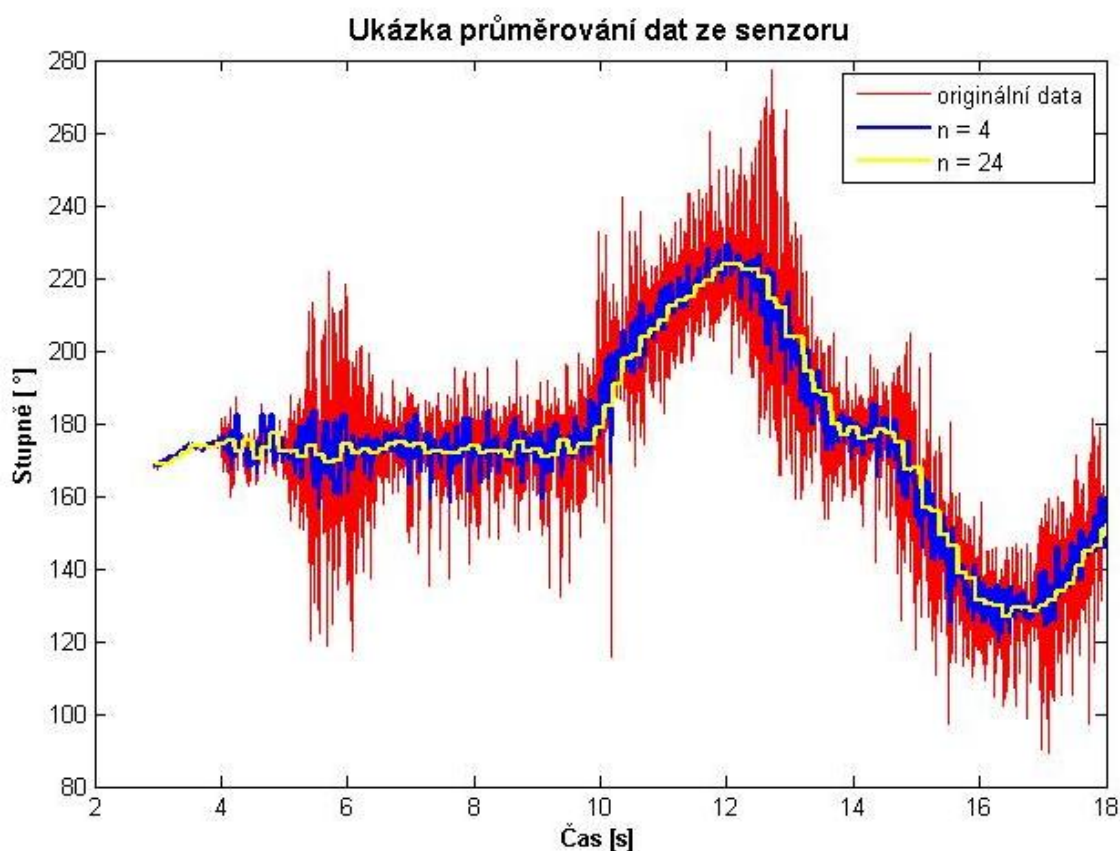
9.2 Průměr

Pro první metodu pro úpravu dat bylo zvoleno aritmetické průměrování -vztah (10.1)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (10.1)$$

Počet prvků ve vzorci nám představuje hodnota n , ze kterých je tvořen průměr. x_i je prvek souboru naměřených dat.

U tohoto typu průměrování je problém se zpožděním výpočtu aktuálního naklonění, protože se musí čekat, dokud se data ze senzoru nenasbírají. Tento typ průměrování není pro náš problém vhodný, protože zkresluje výsledná data. Nedokáže rychle reagovat na změnu náklonu. V následujícím grafu můžeme vidět upravování získaných dat ze senzorů. [20]



Obrázek 35 – Aplikování průměru na data z akcelerometru pro osu Y při zapnutých motorech na 30% výkonu.

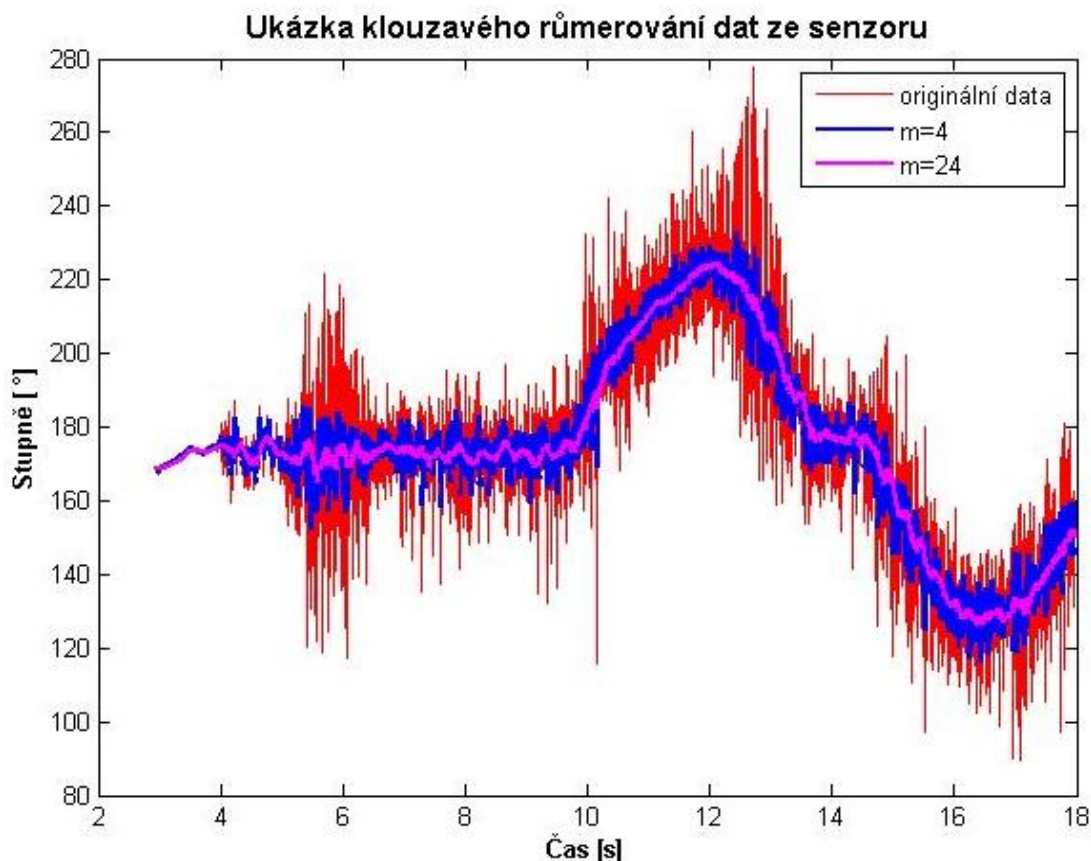
Průměrování o velikosti 4 nedokázalo upravit data tak, aby byla použitelná. U průměrování o velikosti 24 se data hodně opoždějí za skutečnou hodnotou.

9.3 Klouzavý průměr - jednoduchý

U normálního průměrování se pracovalo s celým souborem dat, u klouzavého průměru se oblast získávaných dat posunuje „klouže“. Klouzavý průměr je definován vztahem (10.2).

$$\bar{x}[n] = \frac{1}{k} \sum_{i=n-k}^{n-1} x_i \quad (10.2)$$

Prvek n definuje aktuální pozici prvku, který je počítán. Hodnota k je velikost průměru a x_i je soubor prvků dat v průměru.[20]

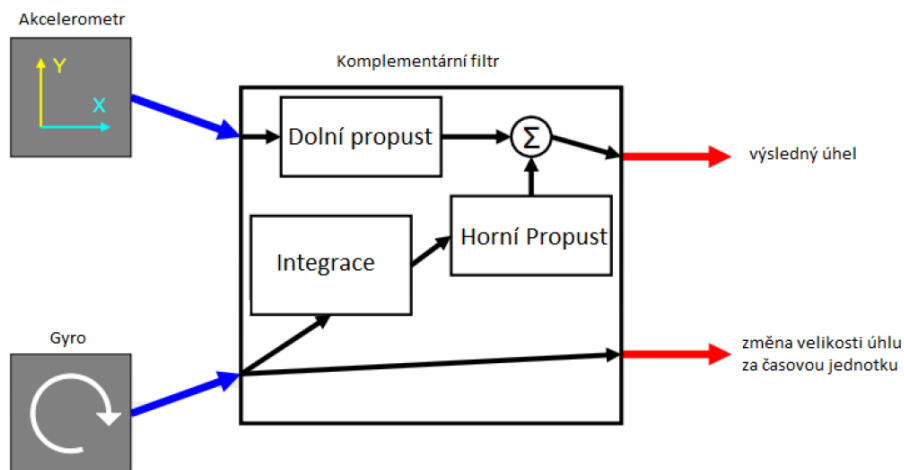


Obrázek 36 – Aplikování klouzavého průměru na data z akcelerometru pro osu Y při zapnutých motorech na 30% výkonu.

Výsledkem jsou přepočítaná data, které jsou lépe upraveny. Jak lze vidět, tak data při malém klouzavém průměru o velikosti 4 jsou velmi znehodnocena. Oproti spočítanému průměru o velikosti 24 se data zdají být dobře upravena. Při velkém množství průměrovaných hodnot výsledek "klouže" za skutečnou naměřenou hodnotou a tak se data nedají korektně použít.

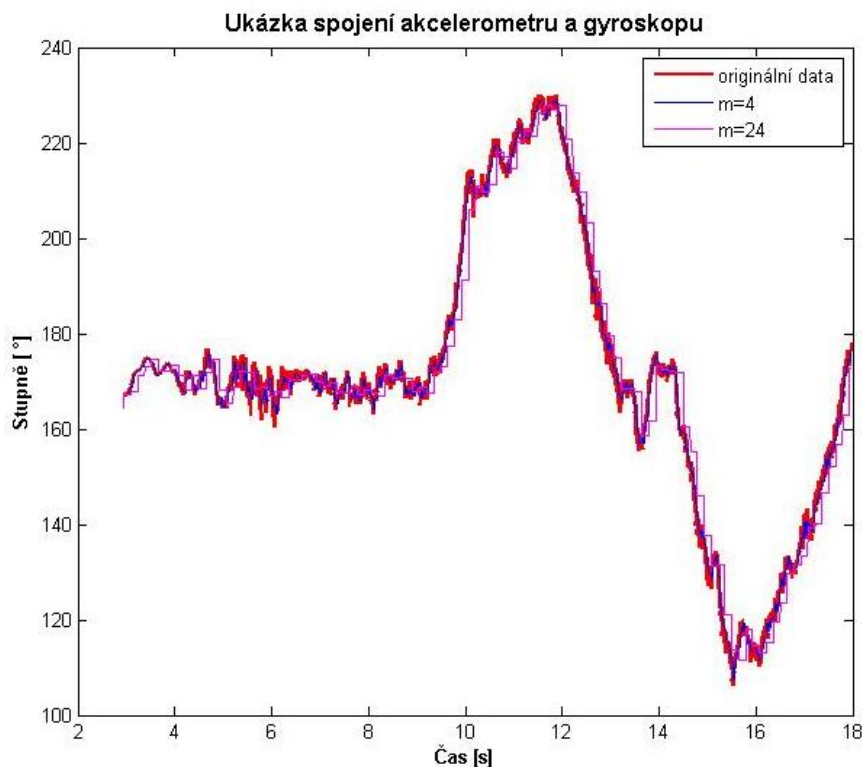
Z akcelerometru nebylo možno upravit data do takové míry, aby se dala použít pro vzniklý problém. Proto byl zakoupen nový senzor MPU-9150, který je na tyto problémy lépe vybaven. Obsahuje vlastní výpočetní jednotku, která zpracovává data a upravuje je do podoby použitelné pro řízení kvadrokoptéry. MPU-9150 může kombinovat data z akcelerometru, gyroskopu a magnetometru.

Pro problém se využily i jiné metody filtrování. Komplementární filtr, který používá dva senzory akcelerometr a gyroskop. Kombinací těchto senzorů bylo docíleno dobrých výsledků. Princip filtru je zobrazen na obrázku 37.



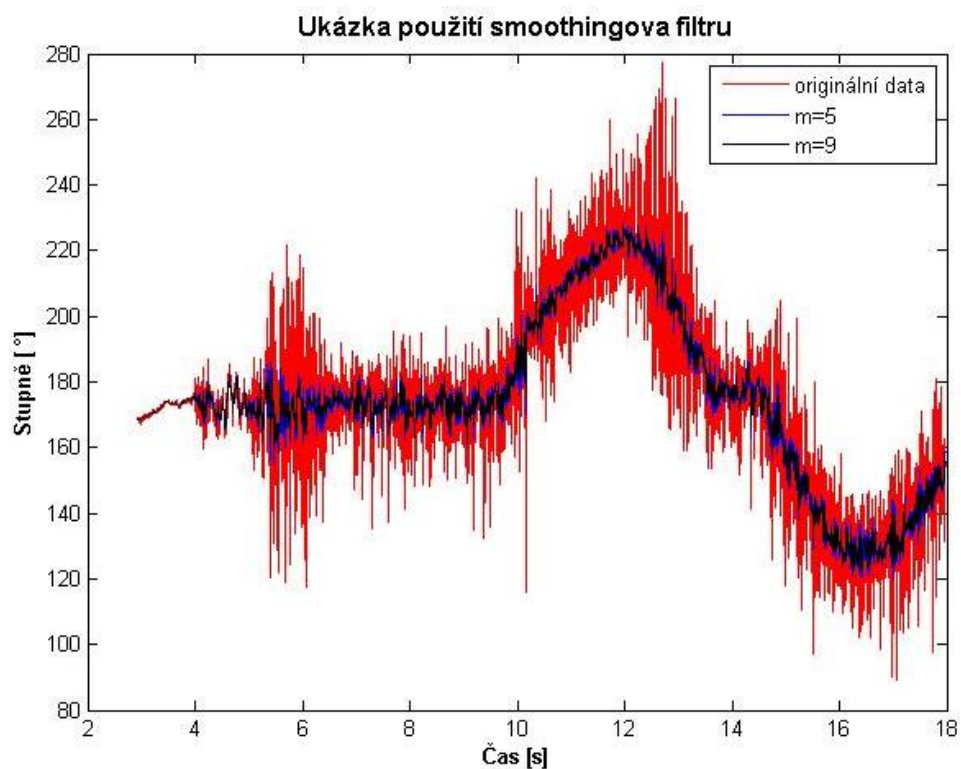
Obrázek 37 – Princip komplementárního filtru

Výsledek filtrace je na obrázku 38.

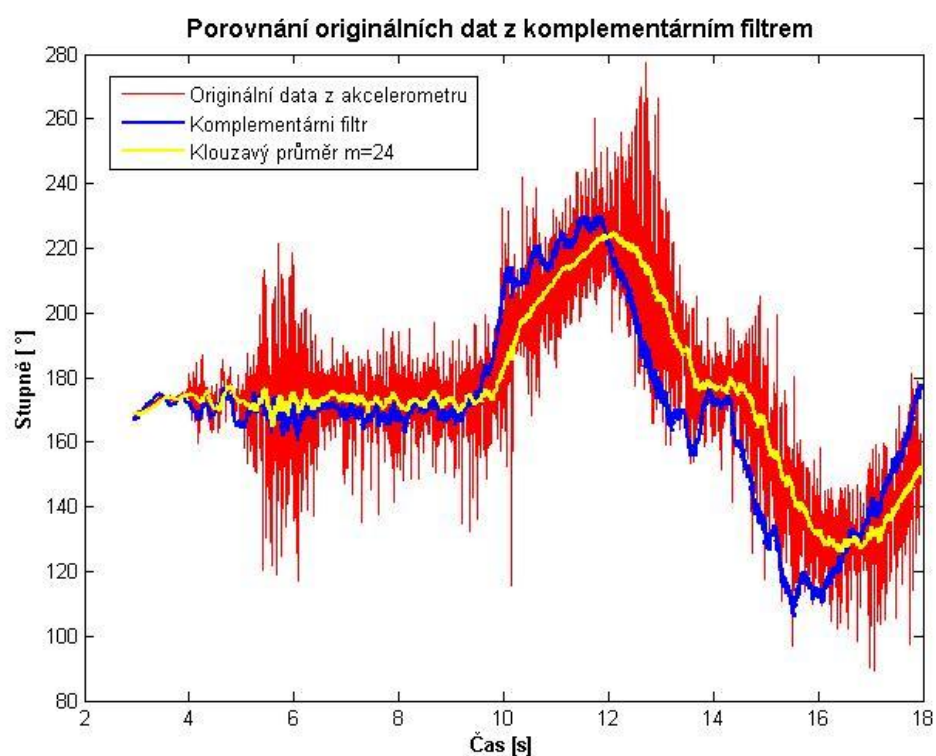


Obrázek 38 – Použití komplementárního filtru, originální data s úpravou dat pomocí průměrování pro 4 a 24 hodnot

Posledním zkoušeným filtrem byl Smoothingův filtr.



Obrázek 39 – Použití Smoothingova filtrování na data z akcelerometru



Obrázek 40- Porovnání komplementárního filtru s originálními daty z akcelerometru

10 MIKROKONTROLÉR - ARDUINO DUE

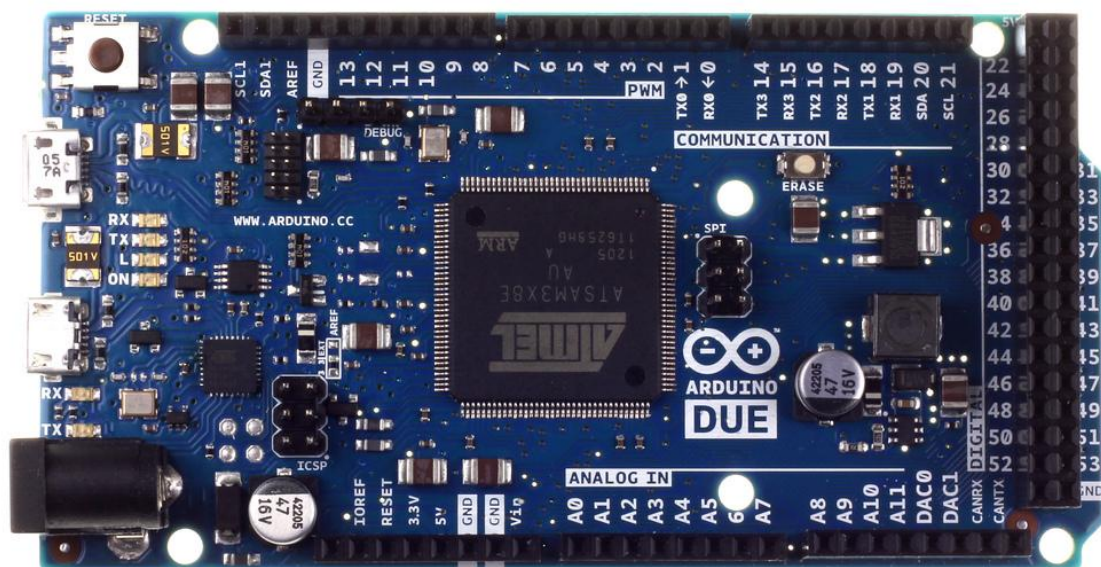
Získaná data je třeba velmi rychle zpracovávat. Proto byl vybrán vývojový kit Arduino Due, který obsahuje 32-bitový mikropočítač. Při diplomové práci byly vyzkoušeny i jiné zařízení od firmy Arduino (Arduino MEGA 2560), ale pro naše použití byly méně spolehlivé. Podstatné chyby vznikaly při příjmu signálu z vysílače a jeho následným vyhodnocováním šířky impulzu. Díky novému kitu se vyhodnocování impulzu velmi zpřesnilo. Zařízení zpracovává i velké množství dat, které je potřeba vyhodnotit velmi rychle, aby se stačily provést adekvátní zásahy na výkony jednotlivých motorů. Celou soustavu pohání 32-bitový mikroprocesor SAM3X8E ARM Cortex-M3 od firmy Atmel, který má operační napětí 3,3V, což bylo dobré pro komunikační rozhraní I²C a použité senzory. Jiné modely Arduina, které se zakoupily, měly operační napětí 5V. Tento problém sice vyřešil konvertor logických úrovní, který převáděl 5V na 3,3V a naopak. Při přenosu dat vznikaly problémy, které zapříčinily nesprávnou funkci zařízení.

Vlastnosti vývojového kitu:

- ❖ Napájení z externího zdroje: (doporučeno 7-12V) nebo z USB
- ❖ Napájení externích obvodů: 3,3V nebo 5V
- ❖ Uživatelská LED dioda (zelená) + 4x informační o přenosu UART
- ❖ Až 54 digitálních I/O pinů pro připojení periférií
- ❖ 2x I²C, 1x SPI, 1xCAN
- ❖ Maximální výstupní proud na pinu 3,3V: 800mA
- ❖ Maximální výstupní proud na pinu 5V: 800mA
- ❖ Maximální výstupní proud na výstupních digitálních pinech: 130mA

Vlastnosti mikrokontroléru:

- ❖ Operační napětí: 3.3V
- ❖ Typové označení: AT91SAM3X8E
- ❖ Frekvence procesoru: 84 MHz
- ❖ 12x PWM výstupů
- ❖ 12x analogových vstupů
- ❖ 2x analogové výstupy (DAC)
- ❖ Flash paměť 512 KB - k dispozici pro uživatelské aplikace
- ❖ SRAM 96 KB (dvě banky: 64KB a 32 KB)

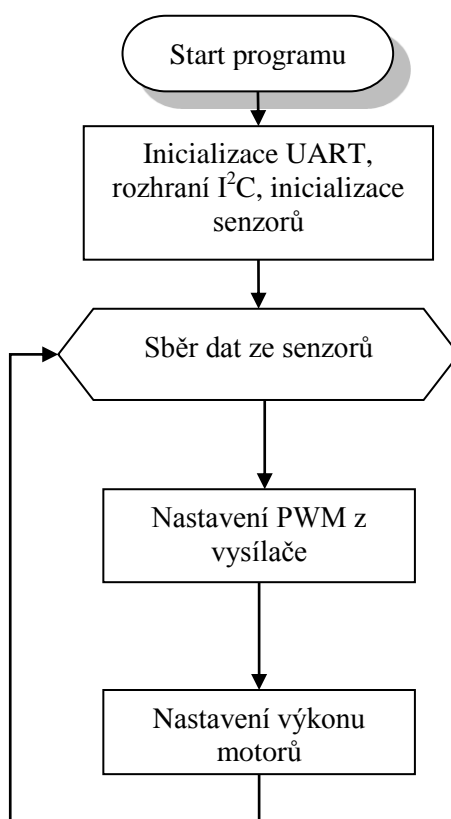


Obrázek 41 – Vývojový kit Arduino Due [8]

Programování probíhalo v programu Arduino s kódovým označením 1.5.1 ve verzi 2. Celý program je v postupném vývoji a důležité knihovny se musely dodatečně nahrávat. Chyběly knihovny, které byly pro kompilaci důležité. Celé vývojové prostředí Arduina je velmi jednoduché, a tak splňuje veškeré požadavky pro bezproblémové programování.

11 PROGRAM

Program byl navržen k udržování létajícího objektu ve stabilní poloze. K tomu slouží PID regulátor, který generuje data každých 20ms. Data ze senzorů se vyhodnocují každých 5ms, aby regulátor dostával aktuální data. Pokud se zjistí odchylka, tak se regulátor snaží objekt vyrovnat do stabilní polohy tím, že změní výkon jednotlivých motorů. Zvolení správných koeficientů regulátoru je klíčovým řešením pro stabilní let. Musíme brát v úvahu i to, že data ze senzorů musí být korektní, aby nedocházelo k chybným zásahům regulátoru, což by vedlo k rozkmitání kvadrokoptéry.



Obrázek 42 – Vývojový diagram

Celý program je psaný v programovacím prostředí Arduino. Jeho soubory mají koncovku *.ino*. Při kompilaci programu jsou automaticky vloženy vnitřní knihovny Arduina. V hlavním souboru *quadcopter.ino* se provádí všechny operace k ovládání kvadrokoptéry. Vnitřní struktura souboru *.ino* je zjednodušena na smyčku *setup(){}* , která se provádí jen jednou a slouží například k inicializaci sériového rozhraní. Druhá část je *loop(){}* . Ta nahrazuje nepřetržitou smyčku, ve které se operace vykonávají pořád dokola.

Pro Arduino byly napsány knihovny, které rozdělují jednotlivé celky do samostatných souborů. Soubory jsou psané v jazyku C++. Patří mezi ně motor, radio, pid, controlSignal, i2cdev a podpůrné knihovny pro zařízení MPU-9150.

Quadcopter.ino

Na začátku programu byly definovány všechny potřebné knihovny a lokální proměnné a byly provedeny inicializace tříd.

V `setup()` je možné provést inicializaci komunikace po rozhraní I²C, zprovoznit senzor MPU-9150 a inicializovat sériovou komunikaci UART. Dále je možné přidat externí přerušení `attachInterrupt(radio.THRO_pin, radio_thro, CHANGE)` na vstupní piny Arduina, které komunikují s vysílačem. Při jakékoliv změně se vyvolá přerušení a spustí se funkce `radio_thro`, ve které se zjišťuje délka PWM impulsu z vysílače. Dále je možné připojit piny s led diodami, které signalizují různé stavy programu. V poslední části `setup` jsou připojeny výstupní piny na generování PWM signálu pro regulátory.

V `loop()` je na začátku umístěno ovládání z počítače, kterým je možno vypnout nebo zapnout motory a kalibrovat senzor MPU-9150. Poté lze číst data ze senzorů, které jsou ukládány do připravených knihoven. V další části jsou zpracovány PWM impulzy, kde jsou na základě velikosti impulsů nastaveny výkony motorů. Ty se následně generují z Arduina na regulátory. První se provádí inicializace motorů (regulátorů), kdy se na výstup posílá 0 v našem případě to odpovídá šířce generovaného signálu o velikosti 1ms. Tím jsou motory uvedeny do aktivního stavu.

Motor

Třída motor prezentuje ovládání motorů. Jsou zde nastavovány jednotlivé výkony motorů a možnost omezit celkový výkon kvadrokoptéry.

PID

V této knihovně se nastavuje PID regulátor, každá složka regulátoru lze nastavit samostatně při inicializaci.

Radio

Tato třída slouží k zapisování délky PWM impulsu. Uvnitř třídy lze nastavit piny Arduina, které se mají používat pro příjem PWM signálu z vysílače. Tento signál je vyhodnocen v metodě `set_impuls()`, která rozhodne, zda signál je v rozmezí přípustných hodnot a zapíše

ho do odpovídajícího pole (THRO, AILE, ELEV, RUDD). V této třídě je použita knihovna `controlSignal`, která slouží pouze k zapisování délky impulzů.

I2CDev

Tato knihovna slouží ke komunikaci se zařízeními, které komunikují přes I²C rozhraní. Pomocí ní lze číst data ze zařízení a zapisovat do zařízení nové nastavení.

MPU9150Lib

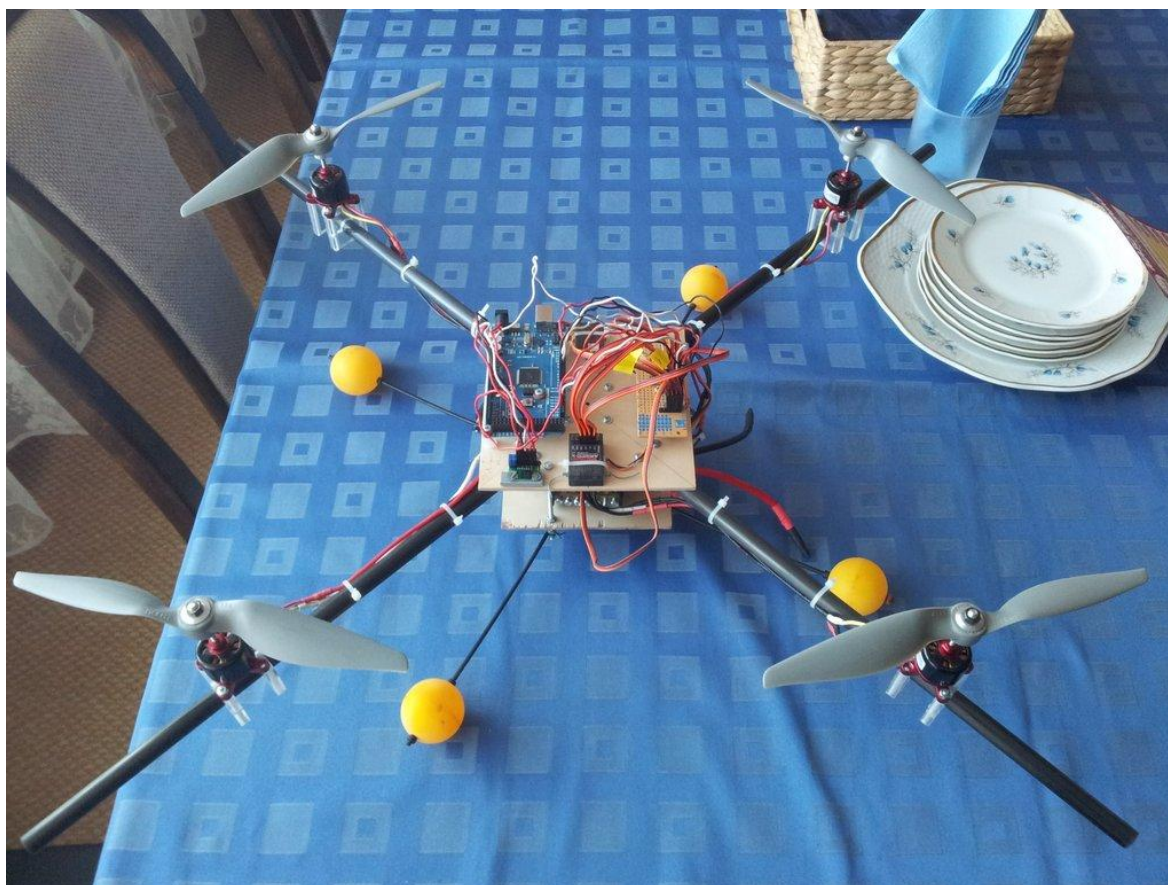
Třída slouží k nastavování senzoru MPU-9150. Na začátku je možné nechat tento senzor zkalibrovat. V našem případě akcelerometr a magnetometr. Slouží k tomu dvě funkce `useAccelCal()` a `useMagCal()`. Tyto dvě funkce lze spustit přes sériové rozhraní, a to v případě odeslání odpovídajícího znaku ("s ", "S" nebo "a", "A").

12 SHRUTÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Celkem byly postaveny 2 různé konstrukce kvadrokoptér. První konstrukce měla pro uchycení motorů karbonové trubičky o průměru 10 mm, které byly připevněny ve středové části. Motory byly uchyceny na průhledné plexisklo o rozměrech 40 x 40 x 10 mm. Plexi se provrtalo vrtákem o průměru 10 mm a rozřízlo se na půlku. Tím vznikla úchytky na motor. Regulátory byly připevněny při okraji středové části. První vývojový kit Arduino Mega 2560 byl upevněn na modelářské překližce.

U tohoto typu Arduina musel být použit pro komunikaci přes I²C rozhraní konvertor logických úrovní, který převádí napětíovou úroveň logické jedničky z 5V na 3,3V. Tato úprava musela být použita pro gyroskop, který komunikuje přes toto rozhraní.

Na zbytku volného místa byl připevněn senzor akcelerometr MMA7620QT a později byl přikoupen gyroskop ITG-3200. Jak lze vidět na obrázku 43. S tímto modelem byly provedeny i letové zkoušky. Nestabilita výsledků dala podnět k přepracování konstrukce kvadrokoptéry.



Obrázek 43 – První konstrukce kvadrokoptéry

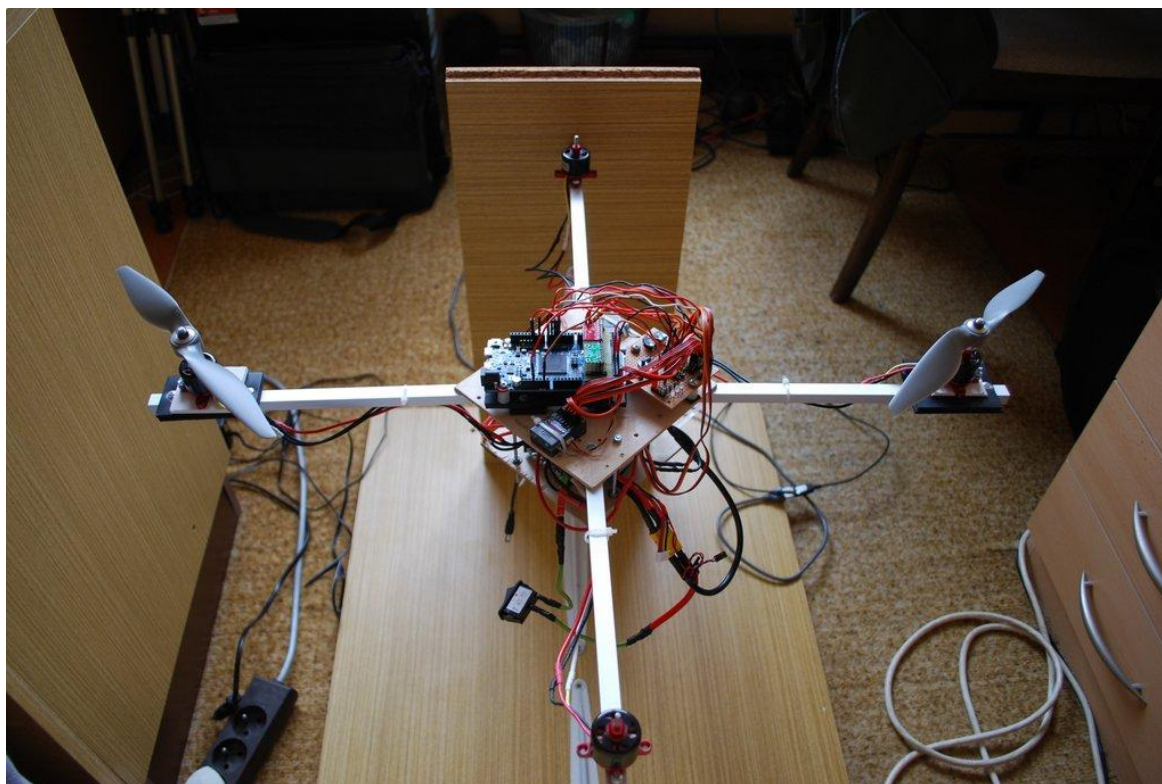
Přistoupilo se k přestavbě kvadrokoptéry, kde byly nahrazeny tenké karbonové trubičky hliníkovým profilem ve tvaru U (Obr. 24). Na něj jsou upevněny motory. Pro testování senzorů byla vyrobena kolíbka, na kterou se kvadrokoptéra přichytila (Obr. 44).

Během přenosu dat u staršího typu Arduina docházelo k výpadkům přenosu dat.

Při čtení dat ze senzorů se hodně projevily vibrace.

První krok pro zlepšení tohoto problému byl, že se nastavila menší citlivost na senzorech. Tato změna zmenšila rozlišovací schopnost senzorů. V druhém kroku se prováděla filtrace. Postupovalo se od nejjednodušších metod až ke složitějším. I přes použité filtry se nedosáhlo uspokojivých výsledků v odfiltrování vibrací. Proto byly motory opatřeny silenbloky, které měly omezit vibrace. Nové řešení bylo úspěšné a vibrace se snížily.

Všechna data byla měřena na testovací kolíbce, kde získaná data ze senzorů se nedala upravit do takové míry, aby se mohla použít k návrhu regulátoru. Kolíbka totiž přenášela vibrace, které ovlivňovaly měření.



Obrázek 44 – Testovací kolíbka pro kvadrokoptéru

Tento zásadní problém byl odhalen až ve chvíli, kdy byly spuštěny všechny čtyři motory najednou. Bohužel tento problém byl zjištěn těsně před odevzdáním diplomové práce. Výsledná data byla zaznamenávána při držení kvadrokoptéry v rukou. Tyto výsledky jsou prezentovány v kapitole 9.

ZÁVĚR

Hlavním cílem diplomové práce bylo sestavit model vícerotorového vrtulníku. Celý projekt je založen na vývojovém kitu Arduino, který v této diplomové práci vykonává zásadní funkci.

V teoretické části byly popsány existující projekty, které se zabývají vícerotorovými vrtulníky. Dále byly vysvětleny základní principy použitých senzorů (akcelerometr, gyroskop).

Praktická část je zaměřena na konstrukci kvadrokoptéry. Jsou v ní popsány použité komponenty, jako jsou vysílač, přijímač, materiály pro sestavení kvadrokoptéry. Byly vytvořeny dva modely. Vývojový kit Arduina byl doplněn nadstavbovou deskou plošného spoje, která obsahuje používané senzory. Propojení jednotlivých součástek bylo provedeno drátkovou metodou. Pro ovládání motorů jsou použity regulátory, které zpracovávají PWM signál z Arduina. Podle šířky PWM signálu vysílaného z Arduina, který je v rozmezí 1 až 2ms, jsou ovládány otáčky motorů.

Z připojených senzorů byla získávána data, která byla upravována různými filtry. Základní průměrování neposkytlo dostatečně upravená data, která by zajišťovala přesné informace o naklonění kvadrokoptéry. Proto byly použity složitější druhy průměrování a komparativního filtrování.

V závěru mé práce se mi podařilo upravit data do takové podoby, ze které by šel navrhnout PID regulátor, ovšem pro nedostatek času nebyla již regulace realizována. Věřím, že v budoucnu budu schopen navrhnout takový PID regulátor, který celou kvadrokoptéru bude správně řídit a bude schopná letu.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

The main aim of the diploma thesis was to design the model of a multirotor helicopter. Whole project is based on the Arduino starter kit, which plays the key role in the work.

In the theoretical part existing projects dealing with multirotor helicopters were described. Apart from that basic principles of used sensors (accelerometer, gyroscope) were explained.

Experimental part is focused on the design of a quadrocopter. Used components such as transmitter, receiver and parts required for building quadrocopter are described therein. Two models were designed. Arduina starter kit was upgraded with printed circuit board, which contains used sensors. Connection of individual parts was done using wire method. For engine control regulators, which process PWM signal from Arduina, are used. On the basis of PWM signal bandwidth, which varies from 1 to 2ms, engine rotations are controlled.

Data collected from connected sensors was modified using various filters. Basic averaging did not provide sufficiently modified data, which would secure accurate information on quadrocopter pitch/roll. Therefore more complex averaging methods and comparative filtering was employed.

In the end of my work I managed to filter the data so that it would be possible to design PID controller, however due to lack of time it has not been implemented. However, due to lack of time, the controller was not implemented. I strongly believe that in future I would be able to design PID regulator capable of correct control of the flyable quadrocopter.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] AEROQUAD. *Homepage AeroQuad*. [online]. ©2013 [cit. 2013-02-15]. Dostupný z WWW: <<http://aeroquad.com/content.php>>.
- [2] AEROQUAD. *Arduino based four rotor R/C helikoptér or quadrocopter* [online]. ©2013 [cit. 2013-02-12]. Dostupný z WWW: <<https://code.google.com/p/aeroquad/>>.
- [3] MULTIWII. *Homepage MultiWii* [online]. ©2013 [cit. 2013-03-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.multiwii.com/>>.
- [4] HOBBYKING KK2.0 MULTI-ROTOR. *Homepage MultiWii* [online]. ©2013 [cit. 2013-03-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?t=1651010>>.
- [5] ARDUCOPTER, *Homepage ArduCopter* [online]. ©2013 [cit. 2013-03-16]. Dostupný z WWW: <<https://d/code.google.com/p/arducopter/wiki/ArduCopter>>.
- [6] DIY DRONES, *Homepage ArduCopter* [online]. ©2013 [cit. 2013-03-17]. Dostupný z WWW: <<http://diydrones.com/>>.
- [7] MEGAPIRATE. *Project homepage MegaPirate* [online]. ©2013 [cit. 2013-02-24]. Dostupný z WWW: <<https://code.google.com/p/megapirateng/>>.
- [8] ARDUINO. *Arduino homepage* [online]. ©2013 [cit. 2013-01-29]. Dostupný z WWW: <<http://www.arduino.cc>>.
- [9] VOJÁČEK, Antonín. *Gyroskopy v integrovaném provedení MEMS*. [online]. ©2011 [cit. 2011-01-10]. Dostupný z WWW: <<http://jonatan.spse.pilsedu.cz/~mazanec/gyroskopy.htm>>.
- [10] GABRLÍK, Petr. *Test akcelerometru Freescale MMA7260QT*. [online]. ©2009 [cit. 2009-05-13]. Dostupný z WWW: <http://pandatron.cz/?776&test_akcelerometru_freescale_mma7260qt>.
- [11] VOJÁČEK, Antonín. *Test - 3D akcelerometr MMA7260*. [online]. ©2007 [cit. 2007-05-14]. Dostupný z WWW: <<http://automatizace.hw.cz/clanek/2007051401>>.
- [12] VOJÁČEK, Antonín. *Jak pracují nové 3D MEMS akcelerometry Freescale*. [online]. ©2007 [cit. 2013-01-30]. Dostupný z WWW: <<http://www.hw.cz/soucastky/jak-pracuji-nove-3d-mems-akcelerometry-freescale.html>>.

- [13] AUTOMA. *Časopis pro automatizační techniku - Co znamená PID*. [online]. ©2003 [cit. 2003-03-01]. Dostupný z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=28768>.
- [14] HEJHÁLEK, Jiří. *Proporcionální, PI a PID regulátory ve výstavbě a jejich fungování*. [online]. ©2008 [cit. 2008-11-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/proporcionalni-pi-a-pid-regulatory-ve-vystavbe-a-j/>>.
- [15] PROKOP, Roman, MATUŠŮ, Radek, PROKOPOVÁ, Zdenka. *Teorie automatického řízení - lineární spojité dynamické systémy*. Pracovní verze ©2005 [cit. 2013-02-18].
- [16] MANN, Burkhard. C pro mikrokontroléry: ANSI-C, kompilátory C, spojovací programy - linkery, práce s ATMEL AVR a MSC-51, příklady programování v jazyce C, nástroje pro programování, tipy a triky. Praha: BEN, 2003, 279 s. ISBN 80-730-0077-6.
- [17] PINKER, Jiří. *Mikroprocesory a mikropočítače*. Praha: BEN - technická literatura, 2004, 159 s. ISBN 80-7300-110-1.
- [18] PLÍVA, Zdeněk. *EAGLE prakticky: řešení problémů při běžné práci*. Praha: BEN - technická literatura, 2010, 184 s. ISBN 978-807-3002-527.
- [19] SPARKFUN ELECTRONICS. *Internetový obchod s elektronikou* [online]. ©2013 [cit. 2013-01-20]. Dostupný z WWW: <<https://www.sparkfun.com/>>.
- [20] AVERAGING FILTER. *Simple averaging and Moving Average Filter* [online]. ©2009 [cit. 2013-01-15]. Dostupný z WWW: <<http://lorien.ncl.ac.uk/ming/filter/filmav.htm>>.
- [21] PELIKAN DANIEL. *Internetový obchod s modelářskou technikou* [online]. ©2011 [cit. 2013-04-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.pelikandaniel.com/>>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

obr.	Obrázek
tj.	To je
tzv.	Takzvaný
akcelerometr	Je to přístroj měřící vibrace nebo zrychlení pohybu zařízení
UAV	Unmanned aerial vehicle
PID regulátor	Proporcionálně integračně derivační regulátor
DMS	Digitální spektrální modulace
DMP	Digital Motion Processor
ESC	Electronic Speed Control
assembler	Jazyk symbolických adres
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
GPS	Global Position System
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
AVR	označení pro rodinu 8bitových a některých 32bitových mikročipů typu RISC s harvardskou architekturou od firmy Atmel
SWD	Seriál wire debug
PWM	Pulse width modulation
FPV	First personal view
ASIC	Aplication specific integrated circuit
mAh	Miliampérhodina

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – AeroQuad 32 Flight Control Board [1]	12
Obrázek 2 – Ukázka kalibrace magnetometru [1]	13
Obrázek 3 – Řídící deska KK2.0 Multi-Rotor [4]	14
Obrázek 4 – Ukázka použitých desek v projektu MultiWii [3]	15
Obrázek 5 – Ukázka programu na nastavování vícerotorového vrtulníku [3]	16
Obrázek 6 – Řídící deska APM 2.5 [5]	18
Obrázek 7 – Sestavené zařízení APM 2.5 určené k prodeji [5]	18
Obrázek 8 – Program Mission Planner pro ovládání a nastavování kvadrokoptéry [5]	19
Obrázek 9 – Řídící deska MultiWiiMega verze 2.2 [7]	20
Obrázek 10 – Možnosti použití akcelerometrů dle snímacího rozsahu [12]	21
Obrázek 11 – Základní princip MEMS akcelerometru [12]	22
Obrázek 12 – Schematicky znázorněná mechanická MEMS struktura akcelerometru [12]	23
Obrázek 13– Detailní záběry na reálné provedení jednotlivých částí struktury - pevných a pohyblivých elektrod (electrodes), detekční hmoty (mass), pružiny (spring) a samo testovací strukturu (self test) [12]	24
Obrázek 14 – 3D struktura akcelerometru (měření zrychlení v osách X, Y, Z) [12]	24
Obrázek 15 – Struktura spojení snímače a ASIC elektroniky [12]	25
Obrázek 16 – Blokové schéma elektrické struktury 3D akcelerometru [12]	25
Obrázek 17 – Možnost měření natočení a rotace [9]	26
Obrázek 18 – Působení Coriolisovy síly na mechanický gyroskop pohybující se k okraji kruhu (vlevo) a ke středu (vpravo) [9]	27
Obrázek 19 – Zjednodušená struktura snímače MEMS gyroskopu [9]	28
Obrázek 20 – Příklad funkce struktury snímače gyroskopu při rotaci [9]	28
Obrázek 21 – Základní zpětnovazební zapojení	29
Obrázek 22 – Ukázka PID regulátoru	30
Obrázek 23 – Možnosti rozložení motorů pro vícerotorové vrtulníky	33
Obrázek 24 – Finální podoba kvadrokoptéry	34
Obrázek 25 – Motor RAY CD2830/12 na silenbloku	35
Obrázek 26 – Regulátor otáček FOXYR-25B [21]	35
Obrázek 27 – Signál řízení PWM	36
Obrázek 28 – Vysílací soustava DX6i s přijímačem AR6200	36

Obrázek 29 – Pomocný tištěný spoj pro propojení se zařízením Arduino	37
Obrázek 30 – V levé části je akcelerometr MMA7600QT a gyroskop ITG-3200, v pravé části je nový senzor MPU-9150	38
Obrázek 31 – Napájecí soustava kvadrokoptéry	39
Obrázek 32 – Integrovaný obvod s akcelerometrem MMA 7260QT [10]	40
Obrázek 33 – Integrovaný obvod s gyroskopem ITG-3200 [19].....	41
Obrázek 34 – MPU-9150 Akcelerometr, gyroskop a magnetometr [19]	42
Obrázek 35 – Aplikování průměru na data z akcelerometru pro osu Y při zapnutých motorech na 30% výkonu.	44
Obrázek 36 – Aplikování klouzavého průměru na data z akcelerometru pro osu Y při zapnutých motorech na 30% výkonu.	45
Obrázek 37 – Princip komplementárního filtru	46
Obrázek 38 – Použití komplementárního filtru, originální data s úpravou dat pomocí průměrování pro 4 a 24 hodnot	46
Obrázek 39 – Použití Smoothingova filtrování na data z akcelerometru	47
Obrázek 40- Porovnání komplementárního filtru s originálními daty z akcelerometru	47
Obrázek 41 – Vývojový kit Arduino Due [8]	49
Obrázek 42 – Vývojový diagram.....	50
Obrázek 43 – První konstrukce kvadrokoptéry	53
Obrázek 44 – Testovací kolíbka pro kvadrokoptéru.....	54

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Postupný vývoj řídicí desky ArduPilotMega [6]	17
---	----