

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Dron
Bc. Jan Košťál

Diplomová práce
2015

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Košťál**
Osobní číslo: **I13378**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a řídicí technologie**
Název tématu: **Dron**
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem diplomové práce je návrh a řešení létajícího dronu s vertikálním startem. Řešení diplomové práce bude sestávat z výběru konstrukce létajícího dronu (koaxiální vrtulník, klasický vrtulník, multikoptéry), motorizaci, senzORIZACI a základní řízení.

Teoretická část práce bude obsahovat rozbor problematiky létajících dronů, možnosti jejich pohonů, způsobů jejich řízení, snímání polohy a okolí, orientace, přenosů dat. Dále bude práce obsahovat přehled existujících řešení s důrazem na otevřené, případně komunitně podporované s dostatečnou dokumentací. Práce bude obsahovat přehledy a vlastnosti komponent alespoň v rozsahu nutném pro zdůvodnění volby jednotlivých komponent, nebo částečných řešení.

Praktická část bude obsahovat výběr vhodné konstrukce a výběr jejího pohonu. K pohonu bude proveden návrh řízení motoru s možností alespoň částečné diagnostiky, pokud nalezne student dostatečně kvalitní dokumentované řešení, může jej použít. Dron bude obsahovat senzORIKU nutnou k jeho orientaci v prostoru, detekci, případně měření vzdálenosti překážek a konečně řídicí desku schopnou vyčítat data ze senzorů, provádět základní regulační smyčky pro stabilní let, vstupy pro připojení modelářských přijímačů, rozhraní pro připojení vyššího řídicího celku, umožňujícího vyčtení dat ze senzorů, stavových veličin a přenos řídicích povelů. Dron bude doveden do stavu základního oživení všech periférií, schopen přímo řízeného letu, pokusně bude naprogramován automatický manévr pro stabilní vzlet dronu do cca 1 metru, který bývá jedním z nejkritičtějších momentů pilotovaného letu.

Rozsah grafických prací: 20 listů
Rozsah pracovní zprávy: 90 - 100 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

RIPKA, P.; TIPEK, A. Master Book of Sensors. Praha: BEN, 2003. ISBN 0-12-752184-4 Kalman filter [online] Dostupný z WWW: http://en.wikipedia.org/wiki/Kalman_filter BALÁTĚ J.; Automatické řízení, BEN, ISBN 978-80-7300-148-3 ŠULC B.; VÍTEČKOVÁ M.; Teorie a praxe návrhů regulačních obvodů, ČVUT, ISBN 80-01-03007-5

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Rozsival
Katedra elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: 31. října 2014
Termín odevzdání diplomové práce: 15. května 2015

prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan



L.S.

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. listopadu 2014

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 27. 5. 2016

Jan Košťál

Poděkování

Tímto chci poděkovat mému vedoucímu práce panu Ing. Pavlovi Rozsivalovi, který mě vedl touto prací.

Anotace

Práce je zaměřená na seznámení s druhy multikoptér, jejich principu řízení a popis zhotovených řešení pro stavbu dronu. V praktické části je navrhnout a vyroben regulační obvod pro řízení dronu obsahující mikroprocesor s programem, který provede automatický vzlet. Pro stabilizaci jsou použity dva důležité senzory. Prvním je gyroskop pro stabilizaci horizontální a vertikální osy, druhým je IR čidlo pro měření výšky.

Klíčová slova

Dron, BLDC, gyroskop, hexakoptéra, řízení multikoptér, PID, SPI, MPU6000, mikroprocesor, IR čidlo

Title

Dron

Annotation

The work is aimed at multi-propeller drones and their control principles. Practical part contains design and manufacturing process of the control circuit with microprocessor programmed with stabilization loop using gyro sensor for axial stability and automatic takeoff maneuver using IR sensor for altitude measurement.

Keywords

BLDC, gyroscope, hexacopter, driving multicopter, PID, SPI, MPU6000, microprocesor, IR sensor

Obsah

Seznam zkratk	8
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	10
Úvod	11
1 Rozdělení dronů s vertikálním vzletem	12
1.1 Koaxiální vrtulník.....	12
1.2 Klasický vrtulník	12
1.3 Multikoptéry	13
1.3.1 Kvadroptéry	13
1.3.2 Hexakoptéry.....	14
1.3.3 Oktokoptéry	15
1.3.4 Právní omezení pro létání	16
2 Princip letu hexakoptéry	17
2.1 Definice souřadnicového systému	17
2.2 Princip letu hexakoptéry	18
2.3 Pohony pro drony	22
2.3.1 Elektromotory	22
2.3.2 Spalovací motory	23
2.4 Způsob řízení motorů	23
2.5 Přenos dat	24
2.5.1 Komerční drony	24
2.5.2 Vojenské drony.....	24
2.6 Orientace v prostoru	25
2.6.1 Měření výšky nad terénem	25
2.6.2 Gyroskop	25
2.6.3 Akcelerometr	27
2.6.4 GPS.....	28
2.6.5 Digitální kompas	28
2.7 Stabilizace.....	31

2.8	PID.....	32
2.8.1	P – proporcionální regulátor.....	32
2.8.2	I – integrační regulátor.....	32
2.8.3	D – derivační regulátor.....	33
2.8.4	PID ve spojení s dronem.....	33
2.9	Zhotovené řešení dronů a jejich kompatibilita s open source.....	34
2.9.1	AR.Drone.....	34
2.9.2	Mikro Kopter.....	36
2.9.3	Paparazzi UAV.....	37
2.9.4	DJI Matrice 100.....	38
2.9.5	OpenPilot.....	39
2.9.6	APM-ArduCopter.....	40
2.9.7	DRONECODE.....	41
3	Praktická část.....	42
3.1	Pohon dronu.....	42
3.1.1	Testovací modul bezkartáčových motorů.....	42
3.1.2	Testovací modul kartáčových motorů.....	43
3.1.3	Závěr z měření motorů.....	44
3.2	Výběr mikroprocesoru.....	45
3.3	Senzory.....	46
3.3.1	Gyroskop MPU-6000.....	46
3.3.2	Tranzistory poloviční h-můstek.....	46
3.3.3	IR měření výšky.....	47
3.4	SPI komunikace mikroprocesor-MPU-6000.....	48
3.5	Bezdrátová komunikace ZigBee pomocí XBEE.....	49
3.6	Celkové zapojení.....	50
3.7	Návrh fyzické podoby dronu.....	51
3.8	Inicializace registrů gyroskopu MPU6000.....	52
3.9	Program.....	54
3.10	PSoC creator 3.3.....	55
	Závěr.....	58

Literatura	60
Příloha A.....	62
Příloha B.....	63
Příloha CD:	65

Seznam zkratk

UAV	Unmanned Aerial Vehicle
SUAAVE	Sensing Unmanned Autonomous Aerial VEHicles
BLDC	Bezkartáčový motor
DPS	Deska plošných spojů
DRON	Robotické zařízení
PWM	Pulsní šířková modulace
AMR	Anisotropická magnetická resistance
RC	Rádiové řízení
SPI	Sériové periferní řízení
AD	Analogově digitální převodník
GPS	Družicový navigační systém
M	Moment síly [Nm]
CW	Ve směru hodinových ručiček
CCW	Proti směru hodinových ručiček
ARM	Označení architektury procesoru-Advanced RISC Machine
Li-pol	Lithium polymerová baterie
PID	Regulátor-proporcionální, integrační a derivační složka
LQR	Kvadratický regulátor
GPIO	General-purpose input/output (všestranně použitelný vstup/výstup)
PSoC	Programmable System on Chip
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
V_x	Rychlost v ose x [m/s]
V_y	Rychlost v ose y [m/s]
V_z	Rychlost v ose z [m/s]
θ	úhel théta, náklon osy x [rad]
ϕ	úhel fi, náklon osy y [rad]
ψ	úhel psí, náklon osy z [rad]
F_c	Coriolisova síla
m	Hmotnost

Seznam obrázků

Obrázek 1 Model koaxiálního vrtulníku.....	12
Obrázek 2 Klasický vrtulník Honey Bee CP2	12
Obrázek 3 De Bothezat kvadrokoptéra z roku 1921 [2].....	13
Obrázek 4 Kvadrokoptéra řazení motorů (+), řazení motorů (X) a řazení motorů (H) [4].	14
Obrázek 5 Hexakoptéra řazení motorů (+) a řazení motorů (X) [4].....	15
Obrázek 6 Oktokoptéra řazení motorů (+) a řazení motorů (X) [4].....	16
Obrázek 7 Souřadnicové systémy [5].....	17
Obrázek 8 Princip otáčení motorů – všechny síly v rovnováze	19
Obrázek 9 Princip otáčení motorů – otáčení po směru hodinových ručiček.....	20
Obrázek 10 Princip otáčení motorů – otáčení proti směru hodinových ručiček	20
Obrázek 11 Přímý let.....	21
Obrázek 12 Zpětný let	22
Obrázek 13 řízení vojenských dronů[9]	25
Obrázek 14 Rotační gyroskop [10].....	26
Obrázek 15 Vektor Coriolisovy síly.....	26
Obrázek 16 Pohyblivé desky kondenzátoru	27
Obrázek 17 Teplotní akcelerometr [13].....	28
Obrázek 18 Ukázka principiálního rozdílu mezi Hallovou sondou a AMR senzorem [14]	29
Obrázek 19 3D magnetometr Zapojení v integrovaném můstku [14].....	30
Obrázek 20 Stavový model [15].....	31
Obrázek 21 Uzavřený regulační obvod	32
Obrázek 22 Školní kvadrokoptéra od firmy Parrot	34
Obrázek 23 Popis chování dronu.....	35
Obrázek 24 Regulační smyčka AR.Drone.....	36
Obrázek 25 Schéma zapojení všech periférií u Paparazzi [18]	38
Obrázek 26 DJI Matrice 100 [20].....	39
Obrázek 27 OpenPilot CC3D deska [21]	40
Obrázek 28 ArduCopter V2.5 - deska bez senzorů [22].....	41
Obrázek 29 Testovací modul BLDC motoru.....	43
Obrázek 30 Schéma zapojení řízení kartáčového motoru	44
Obrázek 31 CY8C588LTI	45
Obrázek 32 H-můstek.....	47
Obrázek 33 Závislost výstupního napětí na vzdálenosti	48
Obrázek 34 Zapojení sériové linky SPI.....	49
Obrázek 35 Celkové zapojení.....	51
Obrázek 36 Tvar dronu vlevo první, vpravo druhý	51
Obrázek 37 Vývojový diagram	54
Obrázek 38 PSoC creator 3.3	56
Obrázek 39 Nastavení pinů na mikprocesoru.....	56
Obrázek 40 Blokové zapojení výstupů.....	57

Obrázek 41 Hotový prototyp dronu.....	62
Obrázek 42 Osazovací list	62

Seznam tabulek

Tabulka 1 Rozdíl kartáčového a bezkartáčového motoru	23
Tabulka 2 Nastavení parametrů PID	33
Tabulka 3 Vlastnosti ArduCopterV2.....	40
Tabulka 4 Parametry XBee	50
Tabulka 6 Nastavení registru 27.....	52
Tabulka 7 Nastavení citlivosti gyroskopu	52
Tabulka 8 Nastavení registru 107	53
Tabulka 9 Nastavení registru 108.....	53
Tabulka 10 Vychítání registrů 67-72.....	54
Tabulka 11 Piny CY8C588LTI	63

Úvod

Bezpilotní dron (dále jen dron) představuje multirotorové zařízení schopné letu za pomoci operátora, který jej bezdrátově ovládá. Operátorem dronu může být civilní osoba nebo vojenský příslušník. Drony jsou označovány zkratkou UAV (z angl. Unmanned Aerial Vehicle), což v překladu znamená bezpilotní letoun. Tato zkratka je běžně používána ve vojenském i komerčním odvětví. Jsou využívány při záchranných misích, vojenských útocích či monitorování nedostupných oblastí (radioaktivita, znečištěné ovzduší, apod.). Drony byly rovněž součástí mnoha projektů, konkrétně lze zmínit například projekt SUAAVE odstartovaný v roce 2008 [1] (snímací bezpilotní autonomní vzdušné dopravní prostředky, z angl. Sensing Unmanned Autonomous Aerial VEHicles), jehož cílem bylo vytvořit a řídit skupiny dronů při pátracích akcích po ztracených nebo zraněných osobách.

V porovnání s pilotovaným zařízením jsou drony upřednostňovány zejména z hlediska jejich levnější výroby, snadnější realizace konstrukce, menších rozměrů a také nižší hmotnosti. Nejjednodušším multirotorovým zařízením je kvadrokoptéra, její konstrukce zahrnuje čtyři vrtule v jedné rovině a ve dvou na sebe kolmých osách. V laboratorních podmínkách (bez vlivů větrných proudů a vírů) je let klasického vrtulníku mnohem složitější, protože směr letu se určuje pomocí změny úhlu náběhu hlavního rotoru. V porovnání s kvadrokoptérou, u které stačí změnit výkon jednoho rotoru, což vede ke změně pohybu. Ve skutečnosti je řízení dronů mnohem složitější, protože uvést dron (bez automatické stabilizace) do klidu v prostoru, kde není bezvětrí je téměř nereálné. Z tohoto důvodu se stále vyvíjí regulační řídicí systémy, které pomohou zjednodušit řízení takového sofistikovaného zařízení za různých podmínek.

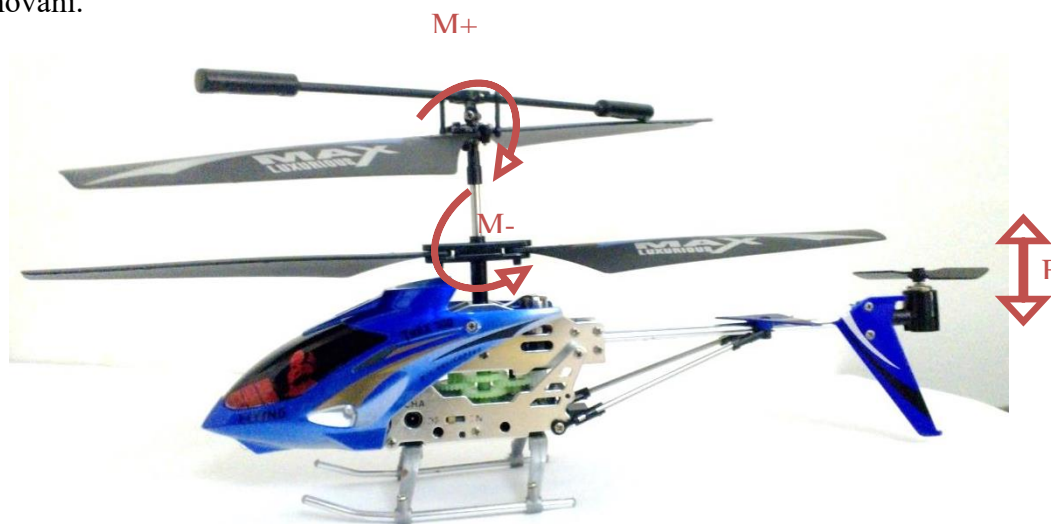
Mezi lidmi jsou bezpilotní drony stále oblíbenější a rozšířenější. Nasvědčuje tomu první mistrovství nazvané World Drone Prix uskutečněné v březnu 2016 v Dubai, které vyhrál teprve patnáctiletý chlapec.

Toto téma diplomové práce jsem si vybral z toho důvodu, že drony nabývají stále více na popularitě a rád bych se stal součástí tohoto odvětví. Využívám svůj komerční dron k osobním účelům, jako je natáčení různých událostí a toto zařízení mě velmi fascinuje.

1 Rozdělení dronů s vertikálním vzletem

1.1 Koaxiální vrtulník

Pro koaxiální vrtulník jsou typické dvě vrtule hlavního rotoru, které se otáčejí opačným směrem. Hlavní výhodou těchto vrtulníků je vysoký tah rotoru a nulový točivý moment. Nevýhoda je ve složité konstrukci **takovéhoto** uložení rotorů a jejich vzájemném ovlivňování.



Obrázek 1 Model koaxiálního vrtulníku

1.2 Klasický vrtulník

Konstrukce klasického vrtulníku je typický jeden rotor s jednou vrtulí včetně ocasní stabilizační vrtule, která vyrovnává točivý moment vycházející od hlavního rotoru. Pro uvedení vrtulníku do pohybu, je nutné změnit náklon náběžné hrany vrtulí hlavního rotoru. Jedná se o jeden z nejrozšířenějších typů vrtulníků využívaný k letu s posádkou, který je poměrně spolehlivý.

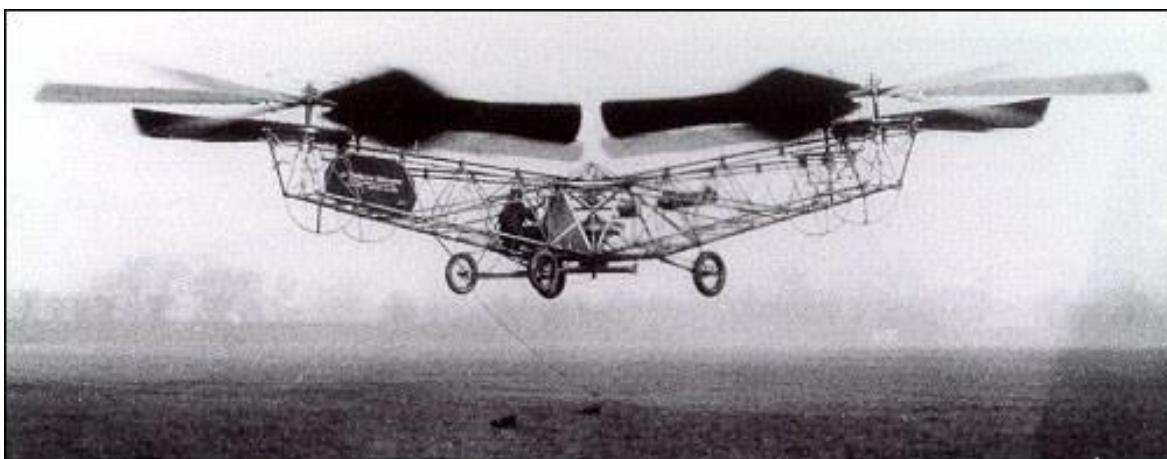


Obrázek 2 Klasický vrtulník Honey Bee CP2

1.3 Multikoptéry

V současnosti existuje přes tisíc typů dronů, které mají dvě a více vrtulí tvořících potřebný vztlak pro let. První doložená konstrukce dronu v podobě kvadrokoptéry pochází z roku 1921. V té době byl ovšem problém s řízením a stabilizací takto složitého stroje, proto k největšímu pokroku v rozvoji kvadrokoptér došlo až při vzniku mikroprocesorů. První pokus o rádiem řízený model se datuje k roku 1990 v Japonsku viz Obrázek 3. Tento model kvadrokoptéry ovšem nebyl natolik zajímavý pro širokou veřejnost, zejména z důvodu krátkého letu, který byl realizován pouze po dobu 3 minut.

V současnosti se multikoptéry nejčastěji uplatňují zejména v monitorování prostředí a následném získání fotografií či kamerových záznamů. Na základě uvedeného použití je žádoucí, aby byly schopné unést zařízení o hmotnosti jednotek kilogramů.



Obrázek 3 De Bothezat kvadrokoptéra z roku 1921 [2]

1.3.1 Kvadrokoptéry

Název je odvozený od použití čtyř vrtulí, které bývají usazeny v obdélníkovém nebo čtvercovém rámu. Jedná se o nejpoblárnější drony na trhu, protože jejich výroba je rychlá a cenově dostupnější než v předchozích letech. Čtyři hnané vrtule mají dost síly, aby unesly vlastní konstrukci s přídatnou zátěží.

Řazení motorů z hlediska letu může být konfigurace do (+), (X) nebo (H). Používají se všechny typy, avšak každá je výhodnější k různým účelům.

- Konfigurace (+) je jednou z prvních, protože na řízení je jedna z nejjednodušších jak pro pilota, tak pro stabilizátory. V tomto sestavení mohou být použity dva výkonnější motory pro vzlet, které jsou proti sobě a dva slabší stabilizační.
- Konfigurace (X) je jednou z nejvyužívanějších. Zde musí být obsaženy čtyři stejné motory a jejich řízení se provádí stejně jako u (+) konfigurace, ovšem po dvojicích. Využívají se především pro sportovní létání s kamerou FPV (vidění v první osobě, z angl. first-person view).

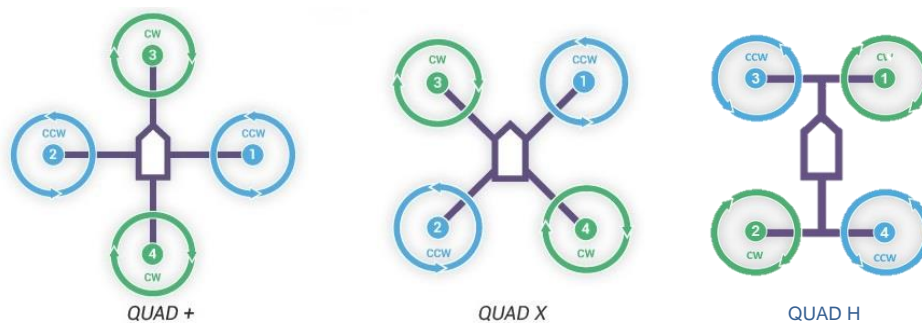
- Konfigurace (H) je principiálně podobná s (X). Výhoda proti konfiguraci (X) nastane při použití kamery, kdy se vrtule nepletou před objektivem.[3]

Výhody:

- Levné na výrobu a opravu
- Mají výkon pro menší příslušenství

Nevýhody:

- Nedosahují takových vzletových výšek jako hexakoptéry a oktokopty
- Neunesou velké doplňkové příslušenství



Obrázek 4 Kvadrokoptyera řazení motorů (+), řazení motorů (X) a řazení motorů (H) [4]

1.3.2 Hexakoptéry

Obsahují šest vrtulí, díky nimž dokáží unést větší předměty než kvadrokoptyery při stejných rozměrech a vykazují tudíž lepší poměr cena/výkon. Sestavit funkční hexakoptéru je cílem této diplomové práce.

Výhody:

- Lepší ovladatelnost ve srovnání s kvadrokoptyerami
- Dosáhnutí větších rychlostí a výkonu při letu oproti kvadrokoptyerám
- Vyšší bezpečnost než u kvadrokoptyer, protože je možnost přistání s jedním nebo dvěma poškozenými motory
- Dosáhnutí vyšších vzletových výšek

Nevýhody:

- Vyšší pořizovací a servisní cena
- Potřeba většího prostoru pro let



Obrázek 5 Hexakoptéra řazení motorů (+) a řazení motorů (X) [4]

1.3.3 Oktokoptéry

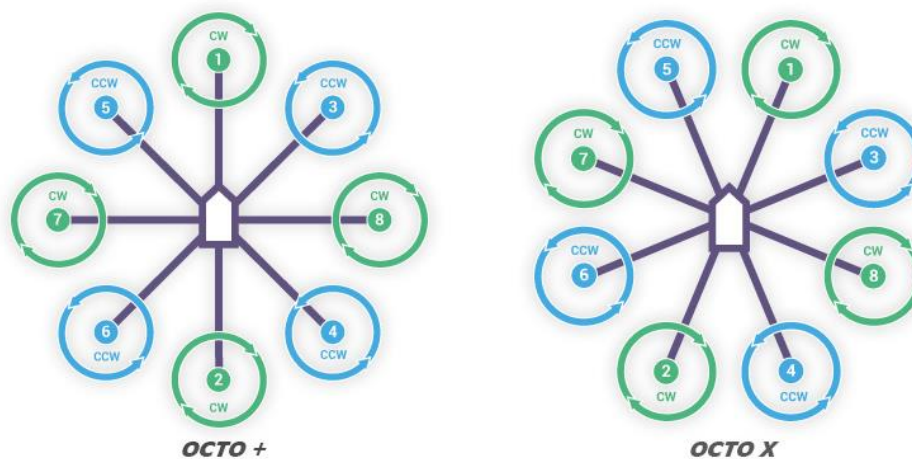
Oktokoptéry jsou osmi vrtulové létající drony, které se svým vysokým počtem vrtulí dokáží unést největší zátěž ve srovnání s předchozími uváděnými typy dronů. Používají se pro profesionální pořizování záběrů, např. při kontrole rozvodu elektrické energie v nedostupných oblastech, kde se ušetří peníze za vzlet velkého pilotovného vrtulníku. [3]

Výhody:

- Dosahují velké rychlosti a hbitých manévřů při zachování stability
- Dosahují vysokých vzletových výšek
- Vysoký výkon pro příslušenství
- Bezpečné, dokáží nouzově přistát se pouze se 4 funkčními motory

Nevýhody:

- Jsou veliké a pro let je potřeba rozlehlý prostor
- Vysoká pořizovací cena
- Nízká výdrž baterie



Obrázek 6 Oktokoptéra řazení motorů (+) a řazení motorů (X) [4]

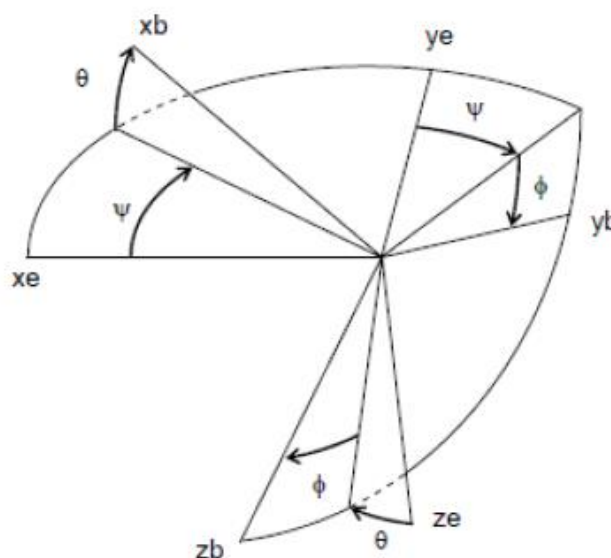
1.3.4 Právní omezení pro létání

V posledních letech se rozšiřují drony s vertikálním vzletem i do privátního sektoru z důvodu snížení prodejní ceny a zvýšení poptávky po bezpilotních modelech. Nejčastější využití je při natáčení sportovních aktivit a při monitorování terénu. Pokud chce člověk podnikat v oblasti pilotování dronů za účelem zisku, je potřeba mít platnou licenci z letecké školy na řízení bezpilotních letadel. Omezení pro soukromé létání bez licence s drony do 20kg je povoleno do vzdálenosti přímé viditelnosti pilotovaného dronu s maximální výškou 300 metrů nad zemí. Létání je zakázáno nad třetími osobami a jejich majetkem bez jejich souhlasu.

2 Princip letu hexakoptéry

2.1 Definice souřadnicového systému

Pro stabilizaci létajících dronů se využívají akcelerometry nebo gyroskopy, proto je potřeba definovat o jaký souřadnicový systém se jedná, jelikož existují dvě možnosti. První z nich je dán vůči Zemi, tento je pro představu a integraci do zařízení nejjednodušší. Druhý je dán konstrukcí dronu, proto není přesně definována jeho podoba. Na Obrázku 7 je znázorněn souřadnicový systém daný Zemí odpovídající symbolům x_e , y_e a z_e . Ukázka souřadnicového systému, který odpovídá jiné konstrukci dronu je také znázorněna ve stejném obrázku odpovídající symbolů x_b , y_b a z_b . Jedná se o létající objekt, který svým natočením vůči jakékoliv ose markantně zasáhne do stability letu, protože přímého pohybu se dosáhne nakloněním dronu vůči ose x_e nebo y_e . Musí být definovány i úhly natočení.



Obrázek 7 Souřadnicové systémy [5]

V leteckém odvětví se používají odborné termíny při pohybu okolo jednotlivých os:

Rotační pohyb okolo osy y_e - odpovídá náklonu letadla ve směru jeho pohybu, který u vícevrtulových dronů způsobí let směrem vpřed nebo zpět a u letadel vzestup nebo klesání, nazývá se PITCH.

$$PITCH(\theta) = \frac{180}{\pi} * atan\left(\frac{\Delta y_e}{\Delta z_e}\right) [^\circ] \quad (1)$$

Rotační pohyb okolo osy x_e . odpovídá náklonu letadla kolmo ke směru jeho pohybu, který u více vrtulových dronů způsobí pohyb doleva nebo pohyb doprava. U letadel se tohoto manévru využívá při zatáčení, nazývá se ROLL.

$$ROLL(\phi) = \frac{180}{\pi} * atan\left(\frac{\Delta x_e}{\Delta z_e}\right) [^\circ] \quad (2)$$

Rotační pohyb okolo osy z_e - je kolmý k oběma osám x_b a y_b , u více vrtulových dronů způsobí rotační pohyb, který se využívá k zatažení při letu směrem vpřed a nazývá se YAW.

$$YAW(\psi) = \frac{180}{\pi} * atan\left(\frac{\Delta x_e}{\Delta y_e}\right) \text{ [}^\circ\text{]} \quad (3)$$

Při konkrétním použití vycházejících dat z gyroskopu, lze určit jednotlivé úhly náklonu od nulové hodnoty. Data vycházející z gyroskopu udávají úhlovou rychlost.

$$\phi = \phi + dataX * \Delta t \text{ [}^\circ\text{]} \quad (4)$$

$$\theta = \theta + dataY * \Delta t \text{ [}^\circ\text{]} \quad (5)$$

$$\psi = \psi + dataZ * \Delta t \text{ [}^\circ\text{]} \quad (6)$$

$$sx = vx * t \text{ [m]} \quad (7)$$

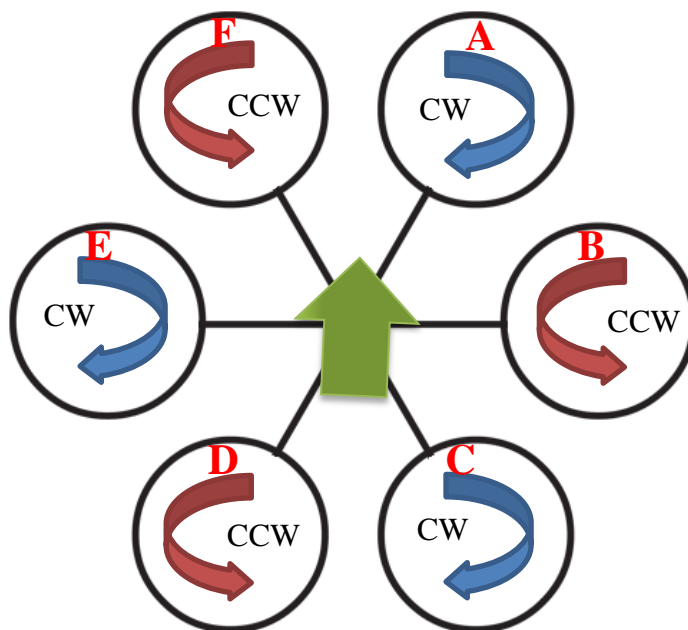
$$sx = vx * t \text{ [m]} \quad (8)$$

$$sx = vx * t \text{ [m]} \quad (9)$$

Zde jsou vypočteny úhlové dráhy pro všechny tři osy. Zpětným dosazením do rovnic (4 - 9) lze vypočíst úhly odklonu od původních hodnot a tím dojde k akčnímu zásahu a stabilizaci dronu. Protože vyčtené hodnoty z gyroskopu jsou najednou za všechny osy, tak hodnota t je pro všechny stejná.

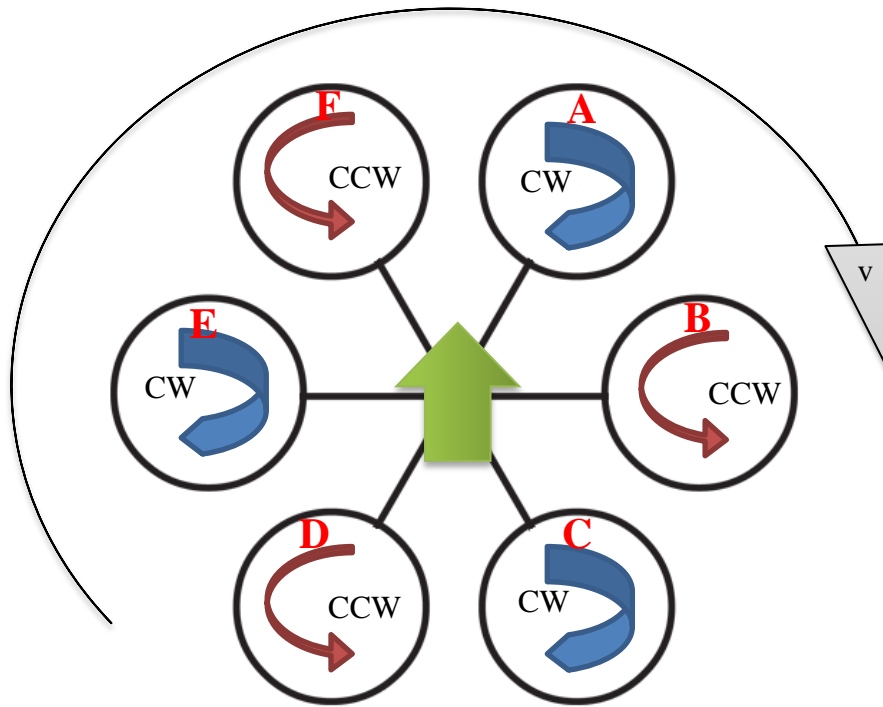
2.2 Princip letu hexakoptéry

Hexakoptéry mají tři vrtule otáčející se po směru hodinových ručiček (CW) a tři otáčející se proti směru hodinových ručiček (CCW). Při pohledu shora je osazení CW a CCW střídavé. Tím se vyruší momenty rotace, aby zde nedocházelo k samostatnému otáčení dronu podle svíslé osy. Na Obrázku 8 jsou všechny otáčivé síly vyrovnané a výkony jednotlivých motorů jsou stejné. Hexakoptéra setrvává v klidu, stoupá nebo klesá.

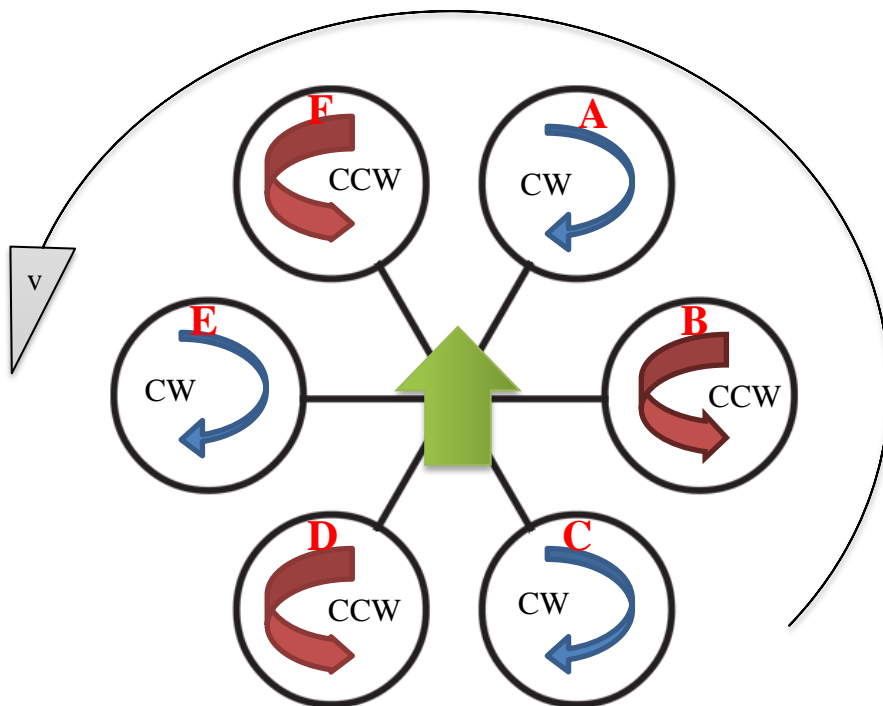


Obrázek 8 Princip otáčení motorů – všechny síly v rovnováze

Otáčivého pohybu po směru hodinových ručiček dosáhneme tak, že na třech vrtulích CW zvýšíme rychlost otáčení, viz Obrázek 9. Aby nedocházelo ke zvyšování výšky a rotaci dronu, musí dojít ke snížení rychlosti otáčení všech vrtulí otáčejících se ve směru CCW. Zde již nedochází k vyrušení momentů rotace a dron se začne otáčet v požadovaném směru. Rychlost otáčení závisí na rozdílech rychlostí otáčení vrtulí CW a CCW, tudíž na výsledném momentu otáčení. Na Obrázku 10 je graficky znázorněno požadované otočení ve směru CCW se zvýšením rychlosti otáčení CCW a se snížením rychlosti otáčení CW. Principiálně je to přesný opak otáčení ve směru hodinových ručiček.



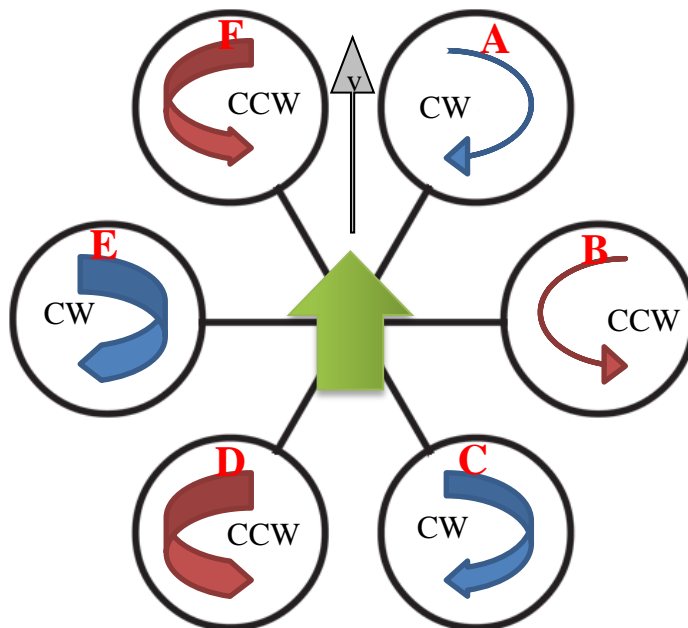
Obrázek 9 Princip otáčení motorů – otáčení po směru hodinových ručiček



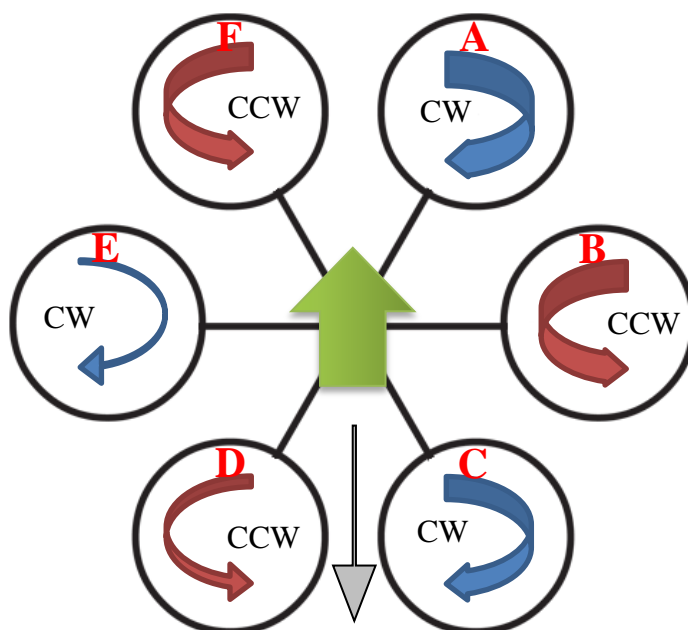
Obrázek 10 Princip otáčení motorů – otáčení proti směru hodinových ručiček

Let směrem vpřed je znázorněn na Obrázku 11, kde přední vrtule A a F sníží svůj výkon a ve stejný okamžik zadní vrtule C (CW) a D (CCW) zvýší svůj výkon, tím dojde k naklonění dronu, který se dá do pohybu směrem dopředu. Vrtule C a D také zvýší svůj výkon a tím dojde ke zvýšení rychlosti letu vpřed. Pohyb vzad je zrcadlovým otočením výkonů ve srovnání s pohybem vpřed, znázorněno na Obrázku 12. Nyní zadní vrtule C a D sníží svůj výkon a přední vrtule A a F naopak zvýší svůj výkon. Ovšem rychlost otáčení motorů na ramenech B a E zůstane nezměněná.

K pohybu do stran dochází principiálně stejně jako k pohybu vpřed a vzad, avšak jednotlivé výkony vrtulí jsou posunuty o 90°. Výhodnější pro let dronů je natočit celý drak okolo své osy a letět vřed, protože v závěsu bývá přidělena kamera pro natáčení a tím se řízení dronu operátorem stává intuitivnějším.



Obrázek 11 Přímý let



Obrázek 12 Zpětný let

Popis všech těchto úkonů je pouze teoretický a v ideálních podmínkách. Slouží pouze pro představu nastavování výkonů na jednotlivých vrtulích při vykonávání zadaných úkonů. Ve skutečnosti je to velice složitá záležitost, protože v každém okamžiku dochází ke stabilizaci dronu a výkon na vrtulích je nastavován podle požadavku stabilizačních senzorů jako je gyroskop, magnetometr, akcelerometr a v poslední době i GPS.

2.3 Pohony pro drony

Pro let a dobré řízení se využívají elektromotory, které jsou nejlepší pro toto použití, protože mají rychlou odezvu na požadovanou změnu rychlosti otáčení. V USA jsou první experimenty se spojením spalovacího motoru jako generátoru elektrické energie s bateriemi a elektromotorem. Jako další zdroj energie a pohonu je testován vodík, který ukázal, že limitovanost elektrické baterie může být nahrazena vodíkovým článkem. V laboratorních podmínkách se podařilo přestavět dron DJI matrice 100 na vodíkový pohon, který prodloužil let z 28min na 120min. Problémem s rozšířením takového pohonu je jeho vysoká cena. [6,7]

2.3.1 Elektromotory

Při konstrukci dronů se uplatňují elektromotory kartáčové a bezkartáčové-BLDC (Tab. 1).

Tabulka 1 Rozdíl kartáčového a bezkartáčového motoru

	BLDC motor	Kartáčový DC motor
Komutace	Nutnost elektronické komutace	Kluzný kontakt
Údržba	Minimální	Výměna kluzných kontaktů
Využitelný rozsah otáček	V celém rozsahu otáček	Ve vyšších rychlostech kluzný kontakt zvyšuje své tření
Setrvačnost rotoru	V rotoru pouze permanentní magnety	Cívky s větší hmotností s větší setrvačností
Elektrické rušení okolí	Téměř žádné	Na kluzných kontaktech dochází k jiskření a ke vzniku rušení
Regulace	Složitá, zapotřebí mikroprocesor	Jednoduchá
Efektivita	Přibližně 90%	Přibližně 50%
Hlučnost	Nižší	Vyšší
Pořizovací cena	Vyšší	Nižší
Dron	Větší rozměry Bez převodu	Malé rozměry Většinou s převodem

2.3.2 Spalovací motory

Spalovací motory se u čtyř a více vrtulových dronů využívají výjimečně a většinou pouze jako zdroj elektrické energie, která uvádí v pohyb elektrické motory. Největší problém u spalovacích motorů je jejich pomalá reakce na změnu požadovaných otáček. V privátním sektoru se používají výhradně elektromotory ve spojení s bateriemi.

2.4 Způsob řízení motorů

Kartáčové motory – Řízení těchto motorů je jednodušší - změnu rychlosti otáčení můžeme docílit dvěma způsoby:

- Analogově - změna amplitudy vstupního lineárního signálu
- Digitálně - změnou střídy u PWM signálu, který je poměrně jednoduché vygenerovat z mikroprocesoru

BLDC motory – k řízení těchto motorů je zapotřebí připojení tří statorových vodičů, které se musí spouštět dle předem daného schématu. V základním zapojení je možné pro silovou část použít šest Darlingtonových tranzistorů, tj. 3x plný H-můstek.

Kartáčové DC motory – pro řízení těchto motorů stačí použít přímo jeden vývod z mikroprocesoru s použitím zesilování signálu a to nejjednodušší člen - Darlingtonovo zapojení tranzistoru.

2.5 Přenos dat

Jedním z nejdůležitějších schopností je bezpečný přenos letových požadavků a informací z dronu během letu, aniž by byly negativně ovlivněny okolím. Existuje několik způsobů jak přenášet požadavky do dronu bezdrátově, omezení jsou hlavně legislativní. Pro běžného uživatele jsou dostupné dva druhy kontrolérů, a to rádiový nebo optický, které jsou široce rozšířeny a jednoduše dostupné. Pro vojenské účely, jsou pro řízení využívána data přenášena pomocí satelitů, které umožní operátorovi řídit dron přes celou zeměkouli.

2.5.1 Komerční drony

Analogové vysílačky pracující na stejných frekvencích musí být odlišené kanálem, aby nedocházelo ke vzájemnému rušení. Proto uživatelé mění ve vysílačích i přijímačích tzv. krystaly odstupňovány po 455 KHz modulovány amplitudovou nebo frekvenční modulací. Zde se povely přenáší na frekvencích:

- Pásmo 27 MHz používají hračky, řízení ponorek a staré rádiové soupravy, protože jsou rušeny občanskými radiostanicemi (CB) pracujícím na stejném kmitočtu
- Pásmo 35 MHz používáno pouze pro letecké modely (ze zákona)
- Pásmo 40 MHz pro všechny modely aut, lodí a létajících zařízení

Modulace může být analogová či frekvenční.

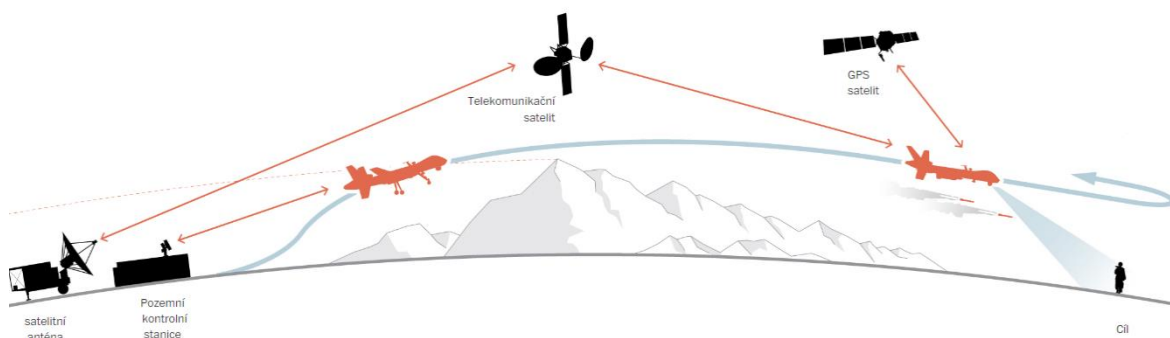
Analogové soupravy jsou vytlačovány a nahrazovány digitálními pracujícími na kmitočtu 2,4 GHz stejně jako wifi. Zde se využívá širokopásmového přenosu dat pomocí techniky DSSS (direct sequence spread spectrum) - kde systémy přímé sekvence rozprostřou do 22 MHz širokého pásma za použití matematického kódování kam se vejdou tři nezávislé kanály (2412 MHz, 2437 MHz, 2462 MHz). U moderních rádiových kontrolérů při párování vysílače s přijímačem dojde k oskenování spektra a nalezení volného kanálu. Poté dojde k automatickému spárování a uzamknutí tohoto volného kanálu. [8]

Optické řízení obsahují hlavně dětské modely, které je možno řídit za pomoci infračerveného vysílače, má dosah 5 metrů a může být zrušen dálkovým ovládním od televize. Dnešní doba mobilních telefonů dohnala výrobce příslušenství k vytvoření zařízení ovládaných na dálku za pomoci bluetooth. Nejedná se o řízení velkých aut, lodí ani letadel, protože dosah cca. 20 metrů je nedostatečný. Jedná se proto o malé automobily či malé vrtulové drony s vertikálním startem.

2.5.2 Vojenské drony

Komunikace za pomoci satelitů je navržena tak, aby mohla probíhat na velké vzdálenosti s minimální náchylností na rušení a odposlech. Od startu až do opuštění přímé viditelnosti je dron řízen přímou vazbou z pozemní řídicí stanice. Po opuštění této oblasti převezme kontrolu satelit a pomocné autonomní řízení pomocí GPS satelitu. Nebezpečí výpadku signálu mezi dronem a komunikačním satelitem nastává při rychlé změně směru, kdy se směrová anténa nestihne natočit za satelitem. Zde je takovýto problém opatřen

bezpečnostním naprogramováním, kdy dron začne kroužit v předem definovaném kruhu, vrátí se na základnu nebo samostatně letí na zadanou pozici.



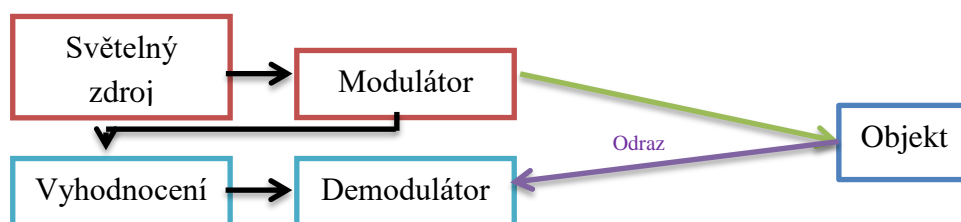
Obrázek 13 řízení vojenských dronů[9]

2.6 Orientace v prostoru

2.6.1 Měření výšky nad terénem

Optický senzor

Pro měření výšky se používají ultrazvukové senzory, optosenzory infračervené nebo laserové, kamery a GPS lokátory. Toto je možné pouze v prostorech, kde jsme schopni přijmout a zpracovat tento signál.



Ultrazvukový senzor

Opakovaně vysílá vysokofrekvenční impuls, který se do okolí šíří rychlostí zvuku. Po nárazu do překážky se od ní odrazí a vrací se zpět k vysílači jako ozvěna. Za pomoci korelační funkce jsme schopni zjistit, o jakou vzdálenost se jedná. Výhodou těchto čidel je, že dokáží změřit vzdálenost téměř u všech materiálů bez rozdílů barvy, dokonce i pokud jsou průhledné, např. fólie. Vzdálenost měření je v rozmezí od 3cm až do 40m. Využívají se s analogovým nebo digitálním výstupem. Ultrazvukové senzory se používají u malých dronů nebo jako pomocné měření při automatickém přistání dronů.

2.6.2 Gyroskop

Jedná se o zařízení známé již od roku 1852, které pomohlo pochopit rotaci země okolo své osy. Jedná se o mechanické zařízení, které má těžký setrvačnick uzavřený v kleci, ve které rotuje okolo své osy a protože má moment hybnosti, zůstane ve stejné poloze i bez vnějších sil. Jde o důmyslný systém uchycení v ložiscích s minimálním třením, který má 3 stupně volnosti. Při roztočení kola do vysokých otáček, zůstane jeho osa ve stálém stavu, i když dojde k jakémukoliv pohybu s klecí. Rozdíl úhlů mezi osou kola a klecí lze

vyhodnotit jako naklonění celé sledované soustavy. Pro určení změny polohy nepotřebuje vnější signál, proto jeho použití se zapojením s GPS a akcelerometrem tvoří univerzální nástroj ke stabilizaci jakéhokoliv zařízení, které je umístěno v budově i mimo ni. Podle způsobu určování stabilní polohy rozdělujeme gyroskopy na rotační, vibrační a optické.

Rotační gyroskopy

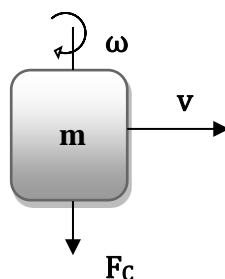


Obrázek 14 Rotační gyroskop [10]

Vibrační gyroskop - vlivem otáčení dochází k využití Coriolisovy síly, kterou lze popsat jako součin hmotnosti m s vektorovým součinem úhlové rychlosti ω a rychlosti objektu v daném směru v (rovnice 10). Příklad Coriolisovy síly je vodní vír při vypouštění umyvadla nebo vany, záleží na dobrém tvaru a sklonu dna a odpadního potrubí, ze kterého pozorovaná voda vytéká. Tento příklad platí pouze v laboratorních podmínkách. [11]

$$F_C = 2m\vec{\omega} \times \vec{v} \quad (10)$$

Tento výraz Coriolisovy síly je popsán:



Obrázek 15 Vektor Coriolisovy síly

Optický vláknový gyroskop – pro zjištění úhlové rychlosti a směru rotace se využívá vlastností optického záření. Optická dráha je tvořena navinutým optickým vláknem do tvaru cívky. Pokud dojde k otáčení určitou rychlostí, je díky skládání rychlostí různá rychlost šíření svazku ve směru a proti směru otáčení.

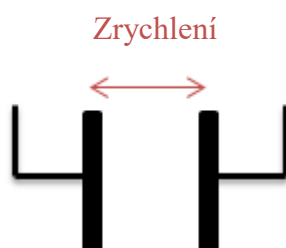
2.6.3 Akcelerometr

Akcelerometry jsou elektromechanické senzory, které měří dynamické zrychlení (síla vzniklá změnou rychlosti pohybujícího se tělesa) a statické zrychlení (způsobené gravitační silou Země). Zrychlení integrované přes čas t je rovno vzdálenosti. Na základě této skutečnosti se uplatňují k měření rychlosti, vzdálenosti nebo síly. Této vlastnosti se dále využívá například v automobilových airbazích, navigačních a stabilizačních systémech. Akcelerometry mohou být využity pro měření vibrací strojů, ale i zemského povrchu.

Jedním z mnoha druhů jsou akcelerometry využívající piezoelektrický jev, které jsou složeny z mikroskopické krystalické stavby a ta při mechanickém namáhání (při zrychlení), generuje napětí. Po změření napětí je možno určit velikost nárůstu zrychlení.

Dalším druhem jsou kapacitní akcelerometry, které fungují na principu změny kapacity při zrychlení mezi dvěma mikroskopickými krystalickými deskami, protože se mění vzdálenost d při zrychlování. Pro takovýto případ platí základní rovnice (11), ve které figuruje závislost kapacity C na ploše desek S , jejich vzdálenosti od sebe d a permeabilitě ϵ :

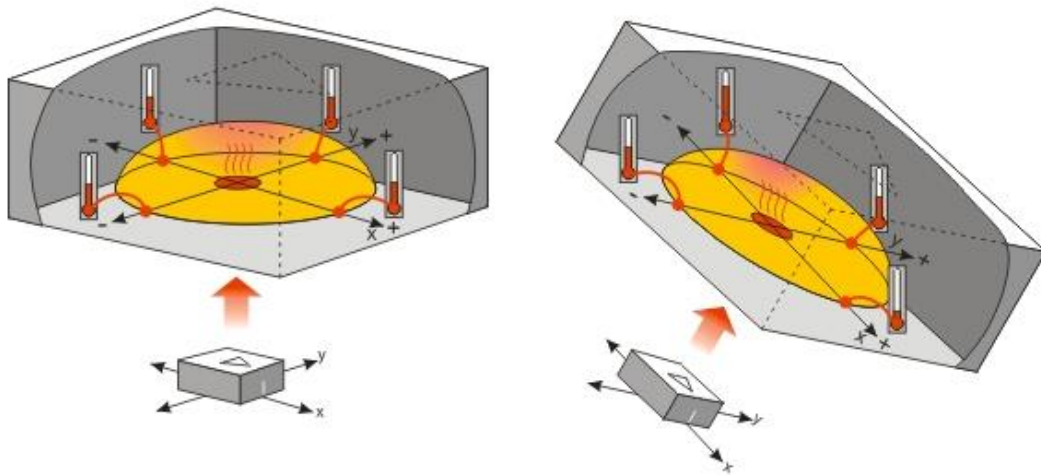
$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d} \quad (11)$$



Obrázek 16 Pohyblivé desky kondenzátoru

Pokud takovýto akcelerometr vsadíme do zařízení, bylo by možné měřit zrychlení v jednom směru, proto pro 3D akcelerometry jsou takovéto mikroskopické kondenzátory v jednom pouzdru, které se realizují pomocí MEMS technologie.[12]

Pro zajímavost bych chtěl zmínit akcelerometr využívající tepelný článek pro zjištění zrychlení Obrázek 17. Jedná se o dutinu vyplněnou plynem, ve které je uprostřed topný článek, a okolo jsou rozmístěny velice přesné snímače teploty. Akcelerometr bez jakéhokoliv pohybu vyhodnocuje pouze gravitační sílu. Při naklonění dojde k zahřátí plynu, a protože teplý plyn je lehčí než studený, začne stoupat a studený naopak klesat. V závislosti na změně teploty změní své hodnoty i snímače teploty.



Obrázek 17 Teplotní akcelerometr [13]

2.6.4 GPS

Jedná se o navigační systém, který 24 hodin denně poskytuje uživatelům na celém světě data, pomocí kterých lze určit přesnou pozici v reálném čase. Je pod kontrolou vojenského letectva Spojených států amerických a řízený je na pokyn Ministerstva národní obrany. I přesto, že je celosvětově mnoho komerčních i soukromých uživatelů, kontrola stále spadá pod vojenské operace.

Systém pro plnou funkčnost obsahuje 24 geostacionárních družic, které vysílají v pásmu 1GHz až 2GHz, modulované známým pseudonáhodným kódem. Přijímač přijímá tento signál a vyhodnocuje rozdíl příchodu času od jednotlivých družic. Pro určení polohy je nutné přijímat signál nejméně od 4 družic. Čím více signálů přijímač zachytí, tím se zvýší přesnost určení polohy. Problém nastává v budovách a na místech bez pokrytí signálem, kde je takovéto vyhodnocení polohy téměř nepoužitelné.

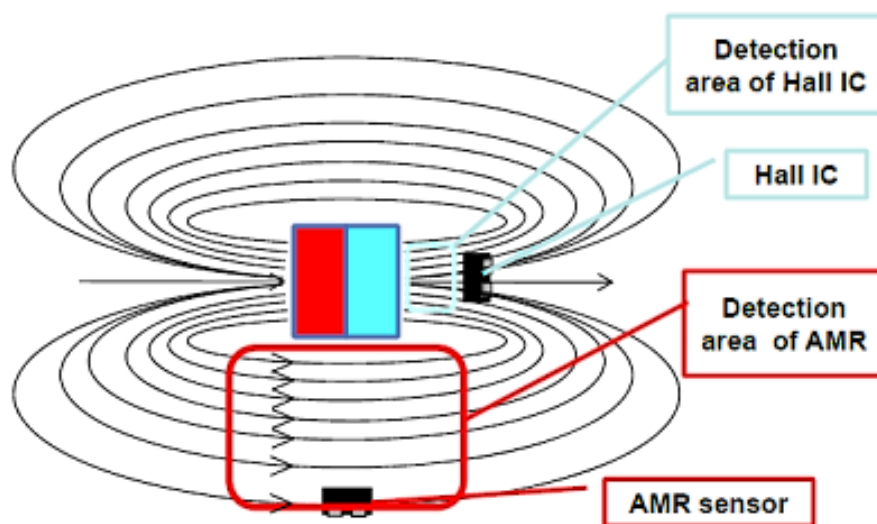
Přesná geolokace dronu umožní stabilizaci na místě nebo automatický let po požadované trase. Moderní GPS moduly pro drony jsou schopné vést a udržet dron na požadované trase nebo místě, ale také zaznamenávat data letu a případně je přenášet uživateli pomocí wifi.

2.6.5 Digitální kompas

Kompas je zařízení pro určení světových stran za pomoci magnetického pole Země. Klasický kompas obsahuje magnetickou střílku, která se natočí jednou stranou na sever a druhou na jih a uživatel si ostatní světové strany určí sám. Neznámější senzory, které jsou schopny měřit intenzitu magnetického pole, využívají tzv. Hallův jev. Velikost a polarita výstupního napětí senzoru je závislá na kolmém magnetickém poli. Další senzory, které měří sílu magnetického pole, pracují na základě tzv. AMR jevu. Digitální kompas pracující na tomto principu zahrnuje polovodičové feromagnetorezistory, u kterých dochází ke změnám elektrického odporu závislého na intenzitě magnetického pole.

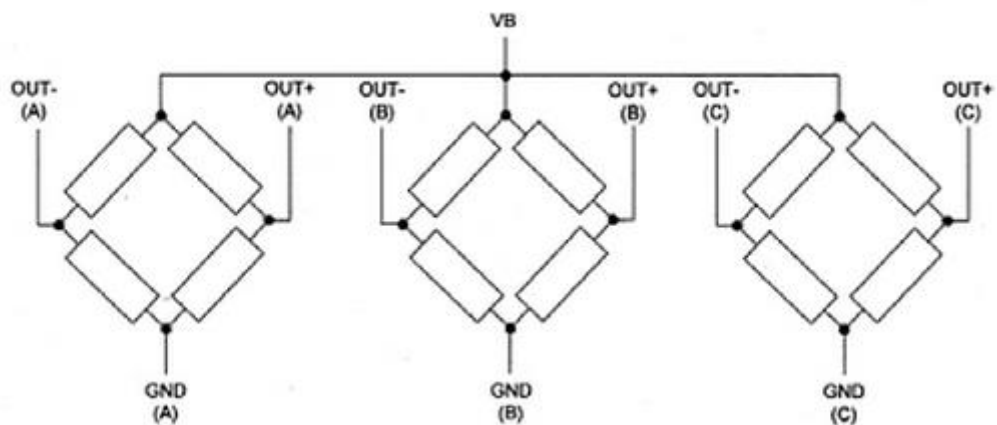
AMR senzory pro měření magnetického pole Země, jsou velice citlivé a dokáží určit hodnoty v řádu jednotek mikroT až miliT. Výhodou je, že s rostoucí hodnotou pole odpor rychle a skoro lineárně klesá, bohužel do prahové hodnoty, kde se již odpor se změnou pole nemění. Jejich složení je z velmi tenké vrstvy slitiny železa a niklu (permalloy) kde dochází ke změně elektrického odporu při vložení do podélného magnetického pole Země. Pro aplikaci těchto senzorů, je nutné zvolit odpovídající typ, protože pro měření různých velikostí intenzity magnetického pole, musí být vybrán konkrétní senzor, lišící se rozměry, tvarem a složením určeným pro různé použití.

Rozdíl mezi Hallovým jevem a AMR je v jejich citlivosti a místě použití, protože ARM efekt reaguje na podélné siločáry magnetického pole a Hallův jev je využíván kolmo na siločáry. AMR senzor není náhradou za Hallovy senzory, protože jeho reakce na magnetické pole je odlišná. AMR senzory se používají pro měření magnetického pole Země z různých detektorů a vyhledávačů aktivních vodičů.



Obrázek 18 Ukázka principiálního rozdílu mezi Hallovou sondou a AMR senzorem [14]

I přesto že AMR senzor může být v miniaturním pouzdře, není jeho vnitřní zapojení pouze z magneticky citlivých materiálů permalloyů, ale zapojením do Wheatsonova můstku čtyř snímacích odporových elementů. Na Obrázku 19 je zobrazené vnitřní zapojení 3D magnetometru pro měření magnetického pole Země, kde jsou můstky vůči sobě natočeny o 90°.



Obrázek 19 3D magnetometr Zapojení v integrovaném můstku [14]

Pro orientaci v prostoru magnetického pole Země je zapotřebí, aby magnetometr byl při každé aplikaci zkalibrován.

2.7 Stabilizace

Stabilizovaný dron je takový, který setrvává v jakékoliv výšce nad zemí, za pomoci správné stabilizace řídicího systému akčními zásahy do výkonu jednotlivých motorů. Pokud regulátor funguje správně, tak při změně vnějších podmínek, dojde k vychýlení z rovnovážného stavu a regulátor se jej bude snažit vrátet do původní stabilizační polohy. V ideálním případě stačí minimalizovat zrychlení ve všech osách.

V úvodu je popsáno, jakým způsobem jsou nastaveny výkony motorů, aby setrval v dané poloze nebo vykonal požadovaný manévr. Pro stabilizaci letu reálného dronu je zapotřebí kvalitní regulátor. Na výběr jsou stavové regulátory, PID regulátory, LQR regulátory a další.

System pro regulaci dronu se nazývá regulační soustava, která je regulovaná regulátorem. Stavový model v maticovém zápisu pro spojitý bez šumu, který se sestaví podle Obrázku 20.

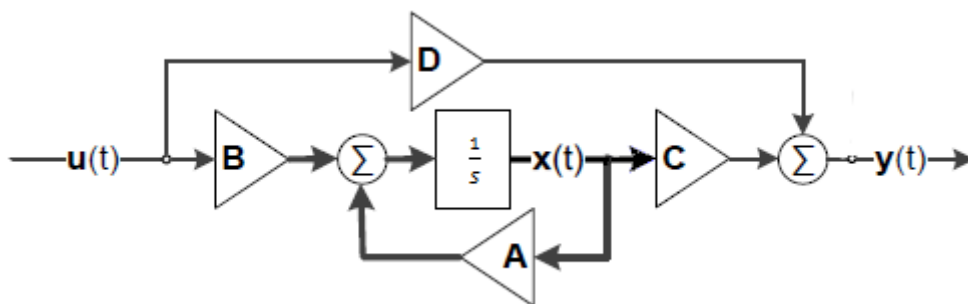
$$\frac{dx(t)}{dt} = A \cdot x + B \cdot u \quad (12)$$

$$y = C \cdot x + D \cdot u \quad (13)$$

Pro diskretní model:

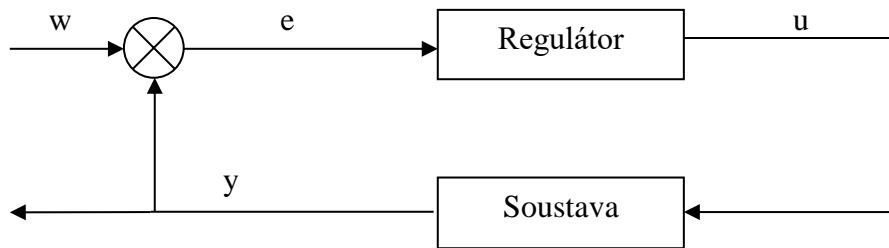
$$x(k + 1) = A \cdot x(k) + b \cdot u(k) \quad (14)$$

$$y(k) = c \cdot x(k) + d \cdot u(k) \quad (15)$$



Obrázek 20 Stavový model [15]

Regulačního obvodu dosáhneme spojením regulátoru a regulované soustavy. Charakteristická u základního zapojení je zpětná vazba jdoucí z výstupu soustavy na vstup regulátoru.



Obrázek 21 Uzavřený regulační obvod

Cílem regulátoru je nastavení požadované hodnoty na výstupu soustavy (y). Je snahou docílit nulového rozdílu mezi výstupem soustavy (y) a žádanou (řídící) veličinou (w). Tento rozdíl hodnot se nazývá regulační odchylka (e), kterou se snaží regulátor snížit jeho akčními zásahy (u), a tím ji stabilizovat.

2.8 PID

V praxi se nejčastěji používá PID regulátor, který vyhodnocuje regulační odchylku $e=w-y$ a její integrál, tím dochází k akčním zásahům. Jedná se poměrně o jednoduchý regulátor s velkým spektrem univerzálnosti a jednoduchou realizovatelností elektronickými obvody.

Obecný tvar PID regulátoru:

$$u(t) = r_0 e(t) + r_1 \int_0^t e(t) dt + r_2 e'(t) \quad (16)$$

r_1 a r_2 jsou parametry regulátoru a obsahuje tři složky:

P – proporcionální regulátor

I – integrační regulátor

D – derivační regulátor

2.8.1 P – proporcionální regulátor

$r_1 = r_2 = 0$ takže pro přenosovou funkci platí: $R(s) = r_0$

Je zde pouze zesílená záporná zpětná vazba. Platí, že čím je zesílení větší, tím je regulace rychlejší, ale pro příliš vysoké hodnoty zesílení je kmitavý a může se stát nestabilním. Výstupní hodnota se rozkmitá a začne růst až do nekonečna. Problém je, že regulační odchylka nebude nikdy úplně odstraněna, protože pro nenulovou hodnotu výstupní veličiny je zapotřebí nenulový výstup z regulátoru a tím nenulová regulační odchylka, a ta je tím menší, čím je větší zesílení r_0 .

2.8.2 I – integrační regulátor

$r_0 = r_2 = 0$ zde je přenosová funkce $R(s) = 1/r_1 \cdot s$

Umožňuje úplné odstranění regulační odchylky (e). Bohužel zvyšuje řád a prodlužuje děj regulace.

2.8.3 D – derivační regulátor

$r_0 = r_1 = 0$ v praxi se nevyužívá (nerealizuje zpětnou vazbu) Přenosová funkce: $R(s) = r_2 \cdot d$

Jedná se o rychlost, jakou se vrátí do své původní polohy, obzvláště u soustav s vyššími řády. Umožní zpětné vazbě reagovat s určitým zpožděním a v ustáleném stavu je nulová. Bohužel nejde přímo prakticky realizovat, protože není možno derivovat Diracův impuls.

2.8.4 PID ve spojení s dronem

PID regulátor patří k jedněm z nejspolehlivějších regulátorů, které jsou složeny z proporcionálních, integračních a derivačních regulátorů a jejich kombinací. Nastavení jednotlivých parametrů je velice důležité, protože při špatném určení hodnot nemusí dojít k žádané stabilitě, a to by mohlo mít fatální následky.

Jednou z nejpoužívanějších metod pro určení parametrů je metoda Ziegler-Nichols, u které stačí zjistit kritické zesílení r_{ok} a kritickou periodu T_k . Pro zjištění kritických hodnot se používá zapojení s relátkem ve zpětné vazbě, které kmitá a vypočítá se podle vztahu 17. Hodnota e je polovina maximální hodnoty na výstupu při kmitání relé a R je amplituda relé. Někdy bývá problém začlenit takovéto relé do regulačního obvodu. Pro určité systémy může být nestabilní.

$$r_{ok} = \frac{r \cdot R}{\pi \cdot e} \quad (17)$$

Tabulka 2 Nastavení parametrů PID

Typ regulátoru	r_0	r_1	r_2
P	$0,5 \cdot r_{ok}$	-	-
PI	$0,45 \cdot r_{ok}$	$0,85 \cdot T_k$	-
PID	$0,6 \cdot r_{ok}$	$0,5 \cdot T_k$	$0,125 \cdot T_k$

Zvýšení hodnoty P: Dron se stane stabilnějším do doby, než P nabyde takové hodnoty, že začne regulátor oscilovat a ztratí kontrolu. Je odolný vůči vnějším vlivům

Snížení hodnoty P: Pokud klesne na úměrnou mez, tak dron se stane velice nestabilním.

Zvýšení hodnoty I: Zvýší se schopnost držet požadovanou polohu, ale také se zvýší zpoždění při návratu do původní polohy při silných vnějšších vlivech.

Snížení hodnoty I: Zrychlí se reakce na vnější vlivy, tím se sníží schopnost udržení požadované pozice

Zvýšení hodnoty D: Zlepší se rychlost, při které je odchylka od požadované hodnoty nulová, ale při vysoké hodnotě může dojít ke kmitům

Snížení hodnoty D: Obnova do původní polohy se zpomalí. Sníží se oscilace při návratu do původní polohy dronu

2.9 Zhotovené řešení dronů a jejich kompatibilita s open source

2.9.1 AR.Drone



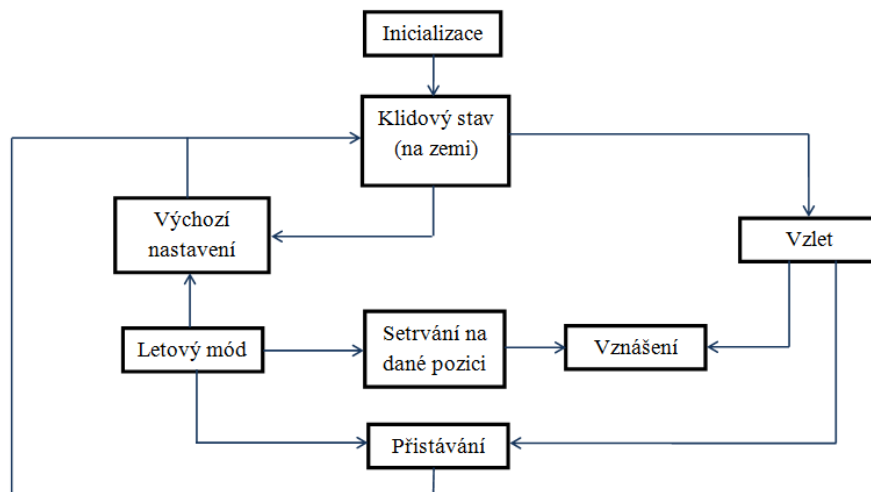
Obrázek 22 Školní kvadroptéra od firmy Parrot

Jedná se o jeden z nejznámějších komerčně využívaných dronů od firmy Parrot, která tímto quadrokopterem odstartovala poptávku po dronech. Představen veřejnosti byl v roce 2010 a od té doby má Parrot na svém kontě třetí verzi tohoto úspěšného dronu. První modely bylo možno ovládat pomocí iPhone od Apple, avšak nyní je možné tyto drony řídit pomocí jakéhokoliv zařízení přes wifi. Jejich hlavní předností je dostupnost pro veřejnost a příznivá cena. O veškerou avioniku se stará mikroprocesor ARM9 32-bitu Parrot P6 taktovaný na 468MHz, který obsahuje operační systém Linux pro výpočty v reálném čase. Tento dron je osazen dvěma kamerami, které zde nejsou pouze za účelem pořizování fotografií, ale také z důvodu výpočtu vlastní rychlosti. Přední horizontální kamera má rozlišení 640x480 pixelů se zorným polem 93° s rychlostí 15 snímků za sekundu a využívá se pro pořizování fotografií. Druhá vertikální kamera se nachází naspodu dronu a je využívána pro výpočet rychlosti letu. Její rozlišení je 176x144 pixelů při vzorkovací frekvenci 60 snímků za sekundu. Další nedílnou součástí jsou potřebné snímače, pro bezpečnou stabilizaci a robustní řízení je použitý tříosý akcelerometr s 10bitovým A/D převodníkem, dvouosý gyroskop s 12bitovým A/D převodníkem s automatickým nulováním pro minimalizaci driftu, jednoosý vertikální gyroskop pro zvýšení přesnosti. Pro odhad a stabilizaci výšky obsahuje ultrazvukový snímač s použitím do maximální výšky 6 metrů. Nejedná se o profesionální sestavu senzorů, protože jejich celková cena nepřesáhne deset dolarů.

Výpočet rychlosti dronu pomocí vertikální kamery obsahuje dva navzájem se doplňující algoritmy. Prvním algoritmem pro zpracování obrazu je nazván multi-resolution scheme, který pracuje na principu Lucas-Kanade, jenž byl představený v roce 1981. Pro výpočet použije okolí výrazných bodů. Tímto principem lze vypočítat malou změnu optického toku a to za předpokladu konstantního jasu, kdy zpracováváné snímky mají stejný jas. Rychlost pohybu nemůže být velká, protože snímky musí obsahovat důležité body, které v malé

výšce a velké rychlosti, není možné zachytit. Dalším důležitým upozorněním je prostorová koherence, kdy okolní pixely leží na stejné rovině vykonávající stejný pohyb. Tato metoda je méně robustní, protože je velice závislá na změně jasu a velikosti pohybujícího se obrazu, avšak umožňuje odhad v malé i velké rychlosti s konstantní výpočetní náročností. Tento algoritmus, je zde použit jako výchozí a k přepnutí na druhý dojde pro zvýšení přesnosti. K vrácení na původní algoritmus dojde, pokud výpočet rychlosti je nepřesný z důvodu nízkého počtu zjištěných rohových bodů.

Druhým je corner tracking pracující na základě autokorelační metody, kdy jsou detekovány rohové body s přesně definovaným počtem. Algoritmus Trajkovic a Hedley [1998] aplikuje rohový operátor na vstupní obraz, kde vznikne mapa rohovitosti o velikosti původního obrázku, kde každý pixel zastupuje váhu jednotlivých pixelů. Následně se odstraní body s prahovou váhou rohovitosti, která pomůže k oddělení méně důležitých bodů nebo falešných bodů. Poslední úkon spočívá v nalezení konkrétních rohových bodů, které potlačí nemaximální hodnoty a tím dojde k vystoupení maximálních hodnot, které představují hodnoty rohové. [16]

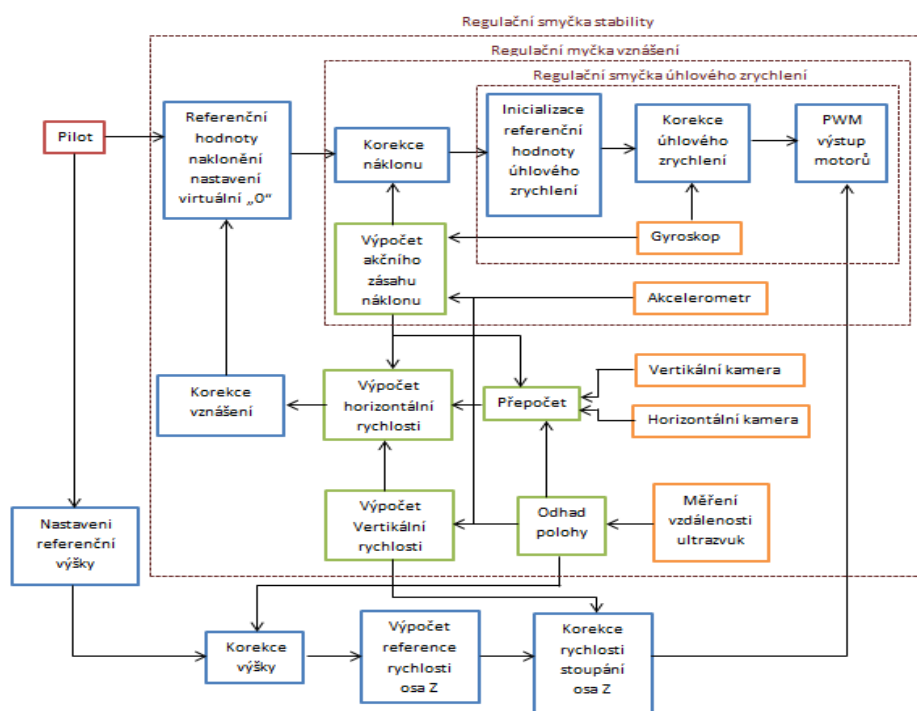


Obrázek 23 Popis chování dronu

Řízení dronu:

Pro bezpečný let AR.drone je potřeba znát přesný odhad rychlosti, který není. Je to proto, že přenos letových požadavků od pilota je pomocí wifi, které nebývá moc spolehlivé. Při výpadku spojení nebo nezadávání požadavků nesmí dojít k pádu, proto se kombinují algoritmy využívající vertikální kameru ve spojení se senzory, které zamezí samovolný pád. Jedná se o zpětnovazební regulátor s více zpětnovazebními smyčkami. Proporcionálně integrační regulátor je obsažen ve smyčce, která udržuje pozici v závislosti na skutečné a požadované pozici. Regulace úhlové rychlosti je provedena za pomoci proporcionálního regulátoru. Originální program je navržen tak, že vnitřní stavový automat rozhoduje, který stav se navolí na základě kolizního stavu (vybitá baterie, zaseknutí motoru, výpadek spojení) nebo požadavku pilota: [16]

1. Vzlétnutí - take off
2. Vznášení – hovering flight
3. Let – forward flight
4. Přistání – landing
5. Udržení polohy – go to fix



Obrázek 24 Regulační smyčka AR.Drone

2.9.2 Mikro Kopter

Německý výrobce komponent pro sestavení dronů. Oproti AR.Drone vsadil na individuální požadavky zákazníků, proto je při objednávání možnost sestavení dronu z volitelných

periférií. Jejich vývoj se zabývá všemi náležitostmi pro konstrukci a samotný let dronu. Nabízí mnoho rozšiřujících funkcí k dronu. Protože je celý systém veden k modulovému řazení jednotlivých periférií nad středovou konzolí, záleží na volbě uživatele, jak moc svůj dron rozšíří. Základními bloky jsou FlightCtrl, BL-Ctrl a potřebné napájení. Mikro Kopter je vyvíjen s veškerým přístupem do zdrojových kódů. [17]

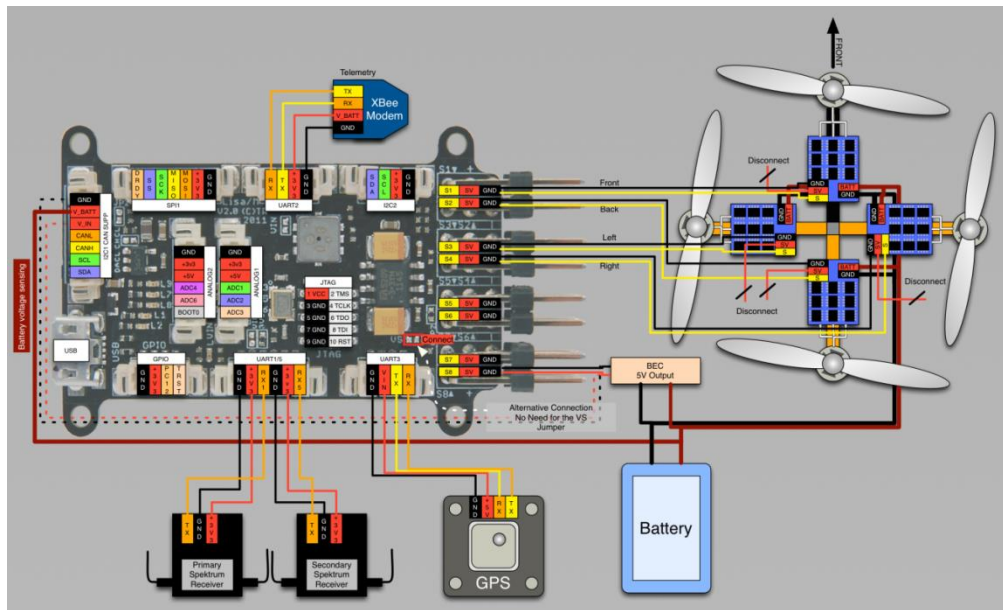
FlightCtrl - základní řídicí deska, která obsahuje mikroprocesor a potřebné senzory pro let. K této desce se připojují ostatní komponenty.

BL-Ctrl - deska pro řízení BLDC, která s FlightCtrl komunikuje přes sériovou sběrnici I2C. Nabízené verze jsou dvě - samotná deska pro řízení 4 motorů nebo menší deska, která je schopna řídit pouze 1 BLDC motor.

Napájení je realizováno za pomoci Li-Pol tří článkové až šesti článkové baterie. Kapacita baterie je podle potřeb uživatele. Nabízená telemetrie baterie je pouze do velikosti čtyř článků.

2.9.3 Paparazzi UAV

K jeho založení došlo v roce 2003. Jedná se o celosvětový projekt, ve kterém na vývoji pracují nejen jednotlivci, ale také univerzity. Při vzniku se pracovalo na vývoji desek, které obsahovaly jako výpočtový procesor ATmega, ale během vývoje došlo k přechodu na dva hlavní STM32 a LPC2148. Nyní jsou k dispozici více než dvě desítky základních desek osazených těmito mikroprocesory, které mají různé periferie. Všechny desky jsou dostatečně popsány a zveřejněny na internetových stránkách výrobce. Po zakoupení jakékoliv desky, která obsahuje základní letový a stabilizační program, má uživatel možnost si jej kdykoliv upravit dle svých představ a schopností. Veškerý firmware na bázi Linuxu je dostupný volně ke stažení a obsahuje okomentovaný kód pro jednoduchou stabilizaci. Pro začátečníky nabízí simulaci letu na konzoli, ve které se zkouší letové dovednosti a úpravy programů. Při koupi upozorňují, že distribuce je bez jakýchkoli záruk.[18]



Obrázek 25 Schéma zapojení všech periférií u Paparazzi [18]

K velkému skoku došlo díky spolupráci Parrotu a Paparazzi při vývoji Bebop 2, kdy došlo ke zveřejnění výborného dronu s open source. Takže uživatel při koupi dostane dron, který jde jednoduše řídit pomocí aplikace běžící na androidu nebo iOS. Jednoduchým nastavením lze spustit Paparazzi na Bebop a získat plnou podporu pro autonomní let.

2.9.4 DJI Matrice 100

Je to jedna z nejrozšířenějších značek dronů, běžně prodávaných v ČR a přichází s absolutní novinkou, která byla navržena přímo pro vývojáře, kteří se zabývají kvadrokoptéry. Sama o sobě je Matrice 100 letu schopná i bez jakéhokoliv zásahu, ovšem obsahuje komponenty pro připojení dalších procesorů, senzorů a dalšího vybavení do hmotnosti 1Kg. Firma DJI je na práci jednotlivých vývojářů zvědavá, jakou se vydají cestou a jaké schopnosti předají dronu. Cena základního balení, které obsahuje draka, řídicí jednotku, GPS, akumulátor a vysílač je 99 990 Kč, což si myslím, že je pro individuální vývojářské pokusy drahé.[19,20]



Obrázek 26 DJI Matrice 100 [20]

2.9.5 OpenPilot

Jedná se o open source zaměřený na komunitu preferující nízké náklady, vysokou stabilizaci a podporu. Vývoj je směřován nejen pro veřejné použití, ale také pro pátrání a záchranu osob, snímkování a univerzitní výzkumy. OpenPilot platforma je flexibilní a může být použita jak v leteckém, námořním, tak i pozemním odvětví. Veškerý hardware i kód je šířen pod licencí Creative Commons BY-NC-SA V3. Znamená to tedy, že dokumentace je plně veřejná, ale komerční výroba jakýchkoli odvozených verzí je zakázána. Pro individuální vývoj jsou připraveny následující komponenty: [21]

OpenPilot Revolution – Jedná se o vyšší verzi základní desky, která nepotřebuje další rozšiřující komponenty pro autonomní let. Obsahuje 32 bitový procesor STM32F taktovaný na 168MHz s 1MB flash pamětí a 192kB RAM. Tři sériové porty pro připojení různých RF přijímačů s podporou přenosu řízení, telemetrie a konfiguraci dronu. Rozšíření dvěma digitálními a dvěma analogovými porty.

OpenPilot CC3D board – Jedná se o předchůdce OpenPilot Revolution, který je jednodušší o řídicí desku, postrádající možnost autonomního letu a UHF modem.

OpenPilot GPS V9 – Rozšiřující deska je osazena 32 bitovým ARM procesorem pro bezproblémovou komunikaci mezi touto a Revolution deskou, velice přesným GPS přijímačem, sportovním magnetometrem a energeticky nezávislou 32MB flash pamětí pro záznam letových údajů.



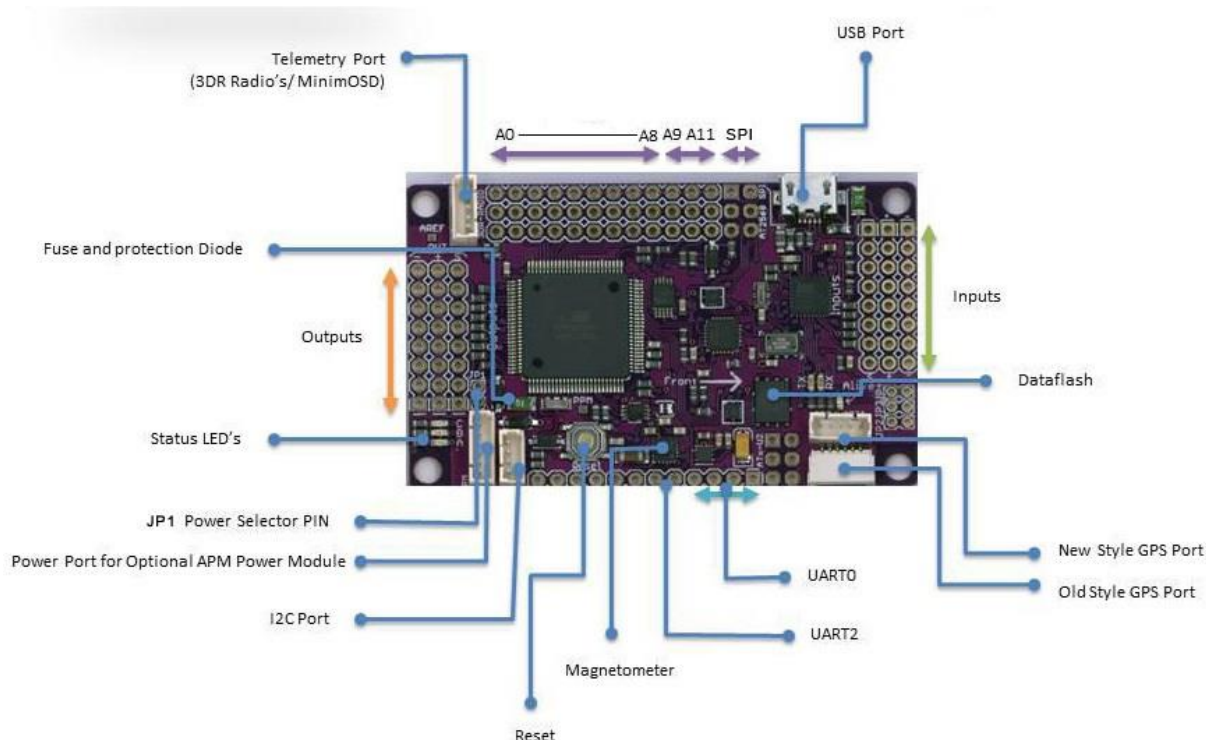
Obrázek 27 OpenPilot CC3D deska [21]

2.9.6 APM-ArduCopter

První vývoj začal v roce 2007, ovšem první verze ArduCopter spatřila světlo světa až v roce 2009. Další z řady multikopter s největší podporou open source je ArduCopter Mega, nyní verze 3.1. Jedná se o nastavbu Arduina, která obsahuje dva mikroprocesory. Prvním je ATmega 2560 běžící na taktu 16 MHz, která se stará o veškerá data ze senzorů, kterými jsou gyroskop MPU-6000, magnetometr, GPS, akcelerometr Invensense 6 DoF a měření statického tlaku vzduchu MS5611-01BA03. Druhý procesor ATmega32u2 se stará o komunikaci s přijímačem dat od uživatele a komunikuje servomotory. Pro připojení periférií používá 11 vstupně/výstupních portů, 8 vstupních a 8 výstupních portů. Tato řídicí deska dokáže plnohodnotný autonomní let dronu a to již od samostatného startu, průletu navolenou trasou až po přistání. Na oficiálních stránkách výrobce, lze vyzkoušet různé software pro drony, které obsahují další pokročilé funkce, kterými mohou konkurovat drahým vyspělým dronům.

Tabulka 3 Vlastnosti ArduCopterV2

μ-procesor	ATmega 2560	ATmega 32u2
f	16 MHz	16 MHz
Flash	256 KB	32 KB
RAM	8 KB	-
Rozhraní	USART, SPI	USART, SPI, USB



Obrázek 28 ArduCopter V2.5 - deska bez senzorů [22]

2.9.7 DRONECODE

Jedná se o kolaborativní projekt, který spolupracuje se stávající tvůrčí skupinou open source projektů v rámci neziskové struktury, kterou řídí Linux Foundation. Jedná se o open source platformu pro UAV, které mohou být rychle, jednoduše a levně rozšířeny, podobně jako android pro mobilní zařízení. Platforma využívá jako základ ArduPilot, který je pokročilým autopilotem pro drony. Prioritou pro rok 2016 je modularizace dronových technologií, které najdou jednotnost instalačních souborů s jednoduchou obsluhou.[23]

Rozdělení na 3 základní skupiny:

- Řešení UAV kamer
- Vývoj hardwarového a softwarového rozhraní
- Řízení managementu projetu dronecode

3 Praktická část

3.1 Pohon dronu

Pro pohon dronu jsem vybíral mezi bezkartáčovým motorem, který je účinnější než kartáčový motor, ale je složitější na řízení jeho otáček. Rozběh bezkartáčového motoru je jedna z nejsložitějších věcí v celém řízení, protože je zapotřebí znát v jaké poloze se motor nachází a budit příslušné vinutí. Pro vyzkoušení rozdílu tahu těchto dvou motorů byl sestaven testovací modul pro bezkartáčové a rovněž pro kartáčové motory. Jednotlivé motory osazené vrtulí po přilepení k váze ukázaly, jaký mají reálný tah.

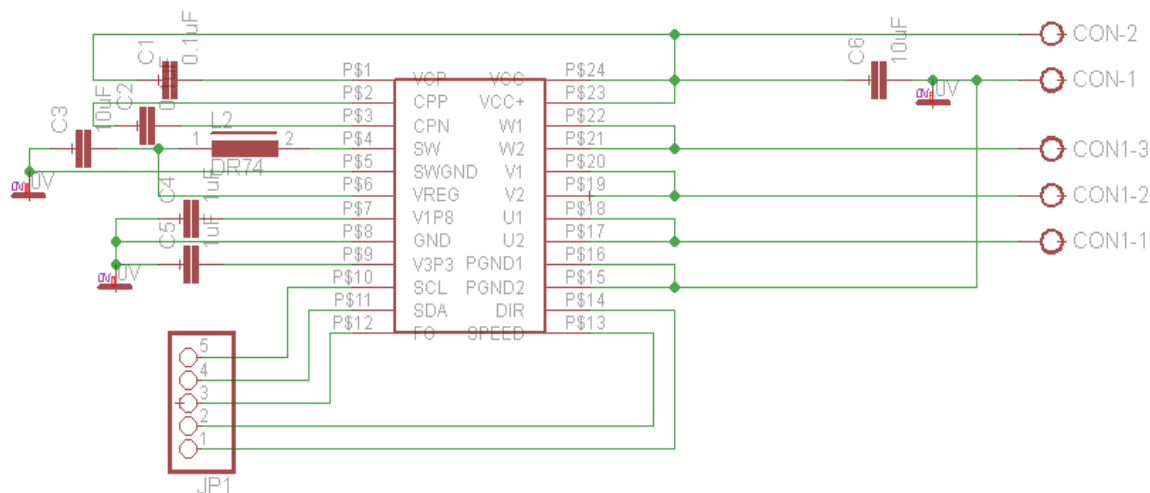
3.1.1 Testovací modul bezkartáčových motorů

Bezkartáčové motory neobsahují fyzickou část nazývanou komutátor, avšak řízení motorů je prováděno elektronicky. Proto je pro řízení použit komerčně dostupný prvek, který je ideální pro řízení BLDC motorů a pro tento pokus se silou vztlaku. Jmenuje se DRV10983 a jejím výrobcem je TexasInstruments. Jedná se o součástku, která budí třífázové stejnosměrné motory pomocí PWM na základě hodnoty stejnosměrného napětí na vstupu do velikosti 4 voltů nebo na základě vstupní PWM. Sám pak generuje PWM, odpovídající požadovaným otáčkám na základě velikosti přivedeného napětí na vstupu. Zvládne regulovat jeden motor s proudem do 2 A. [24]

Parametry DRV10983:

- Rozsah napětí PWM signálu při 50KHz je 8 V až 28 V
- Proud pro řízení motorů 2 A (krátkodobě až 3 A)
- Po roztočení motoru řízení pomocí BEMF-napětí indukované na zpětnovazebním vinutí, generované budícím proudem cívek
- Generování sinusového průběhu komutačního napětí
- Nastavení požadovaných otáček pomocí PWM, analogového napětí nebo pomocí I2C
- Odběr v klidovém stavu 3 mA
- Možnost použití elektronické brzdy
- Individuální možnosti nastavení parametrů podle zvoleného motoru

Schéma zapojení obsahuje potřebné součástky na chod regulátoru a jeho nastavení parametrů pomocí sériové linky I2C. Použité konektory jsou zde pro připojení napájení z baterie o minimálním napětí 8 V, další pro vyvedení přívodních kabelů na třífázový stejnosměrný motor a pro sériovou linku I2C. Kondenzátory jsou velikosti 10 μF a 0,1 μF s jednou cívkou o velikosti 47 μH na doporučení výrobce.



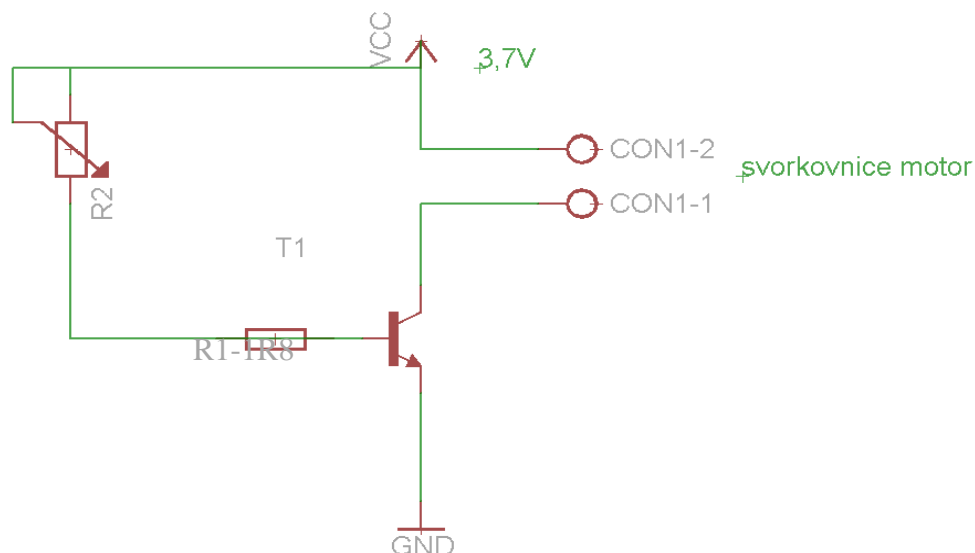
Obrázek 29 Testovací modul BLDC motoru

Při ožívování tohoto obvodu došlo k problému s přenastavením regulátoru, protože originální nastavení bylo na malý motor. Regulátor bylo nutné přizpůsobit motoru, který má vinutí natočené vůči sobě o 120° a navýšení rozběhového proudu z 0,2 A na 1,6 A. Výhodou tohoto regulátoru je, že při rozběhu nepotřebuje znát natočení motoru, protože při rozběhu začne generovat signál, který pomalu roztáčí motor až na požadovanou hodnotu. Vztlak motoru s použitím 5,4 cm dlouhé vrtule je 18 g

3.1.2 Testovací modul kartáčových motorů

Pro otestování síly stejnosměrného motoru, jsem použil principiálně stejnou metodu jako u předchozích BLDC motorů, ovšem zde je roztočení takového motoru mnohem jednodušší. V první řadě jsem již měl fyzicky motor, na kterém je maximální proud do zkratu, který se objeví při podržení rotoru v zapnutém stavu. Toto měření trvalo dvě sekundy, aby nedošlo k poškození motoru. Zkratový proud byl 2 A při vstupním napětí 3,7 V.

Pro otestování síly motoru a reakci na změnu otáček je použit bipolární tranzistor v zapojení do polovičního H-můstku. Poloviční je proto, že na dronu stačí pouze jeden směr otáčení motoru s volitelnou rychlostí otáčení. K možnosti použití jsou i poloviční H-můstky v jednom pouzdře pro řízení až sedmi motorů avšak v přípustné velikosti od 500 mA, což je čtvrtinová hodnota oproti mezní hodnotě motorů.



Obrázek 30 Schéma zapojení řízení kartáčového motoru

Jako zdroj napájecího napětí je použita jedno článková baterie Li-Pol s napětím 3,7 V. Na výstupní svorkovnici je připojen motor, která vede na kolektor NPN tranzistoru typ 2SRT1215. Při oživení tohoto analogového obvodu se postupovalo tak, že se postupně mění hodnota potenciometru z maxima až po nulu. Při této změně docházelo k rychlým změnám otáček motoru a k velké vztlakové síle vrtule. Nehrozilo spálení tranzistoru, protože zde byl i odpor R1 pro omezení proudu.

Tento testovací modul je postaven pro jeden kartáčový motor a dron jich potřebuje šest (tři pravotočivé a tři levotočivé). Výhodou těchto motorů, je jednoduchost reverz smyslu otáčení a to jednoduchým otočením polarity napájení. Ve finálním zapojení bude tranzistor, který je zde ve smyslu spínače, otevírán pomocí PWM výstupem z mikroprocesoru. Vztlak motoru s použitím 5,4 cm dlouhé vrtule je 14 g. Aby se při měření odečetla chyba hmotnosti, která vzniká tlakem vrtule. Byla držena milimetr nad váhou a tento tlak byl 4 g.

3.1.3 Závěr z měření motorů

Pro další realizaci dronu jsou zvoleny stejnosměrné kartáčové motory, protože jejich výkon při napětí 3,7 V je dostatečný. Nevýhoda BLDC motoru je v jejich složitějším řízení a v požadovaném minimálním napětí budiče DRV10983 a to 8 V. Pro dosažení takového napětí je zapotřebí tříčlánková baterie Li-Pol běžně užívaná k modelářským účelům. Pro bezkartáčové stejnosměrné motory stačí takováto baterie jednočlánková s napětím 3,7 V. Porovnání hmotnosti baterií (dvoučlánková baterie jen pro představu):

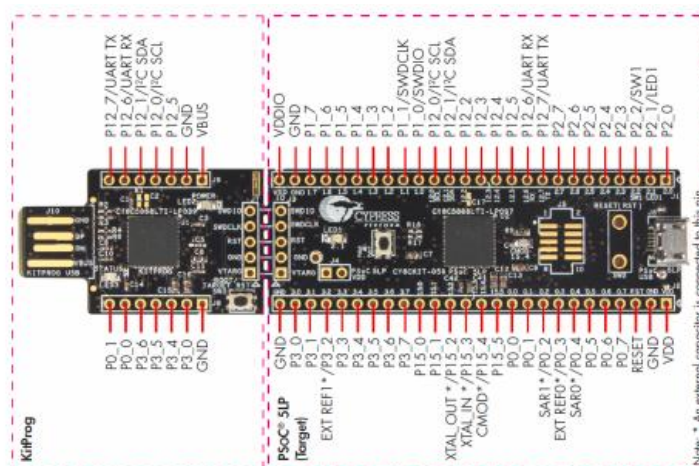
- 1článek 3,7 V 300 mAh - 8 g
- 1článek 3,7 V 700 mAh - 19 g
- 2 články 7,4 V 300 mAh – 17 g
- 3 články 11,1 V 450 mAh – 50 g

V porovnání jsou zahrnuty baterie se stejnou kapacitou, avšak 3-článek není s takovou nízkou kapacitou komerčně dostupný, proto byla zvolila co možná nejbližší. Další možností by bylo sestavit vlastní 3-článek, který by zůstal osazen originálními konektory pro dobíjení, ovšem tuto strategii jsem zavrhl z důvodu celkové hmotnosti.

3.2 Výběr mikroprocesoru

Pro tuto práci byl použit vývojový programovatelný kit od Cypress pParform s označením CY8C588LTI obsahující 32-bitový mikroprocesor ARM Cortex-M3 se 69 piny a programovací USB desku. Jeho použití bylo zvoleno na základě jeho uživatelské podpory od výrobce, který poskytuje PSoC creator s ukázkou práce s kitem. Předností toho programátoru je velký počet programovatelných vstupů/výstupů, které mohou být změněny úpravou ve vizuálním programování. Volitelné napájení v rozsahu 3,3 V až 5,5 V je ideální při použití jedno článkové baterie 3,7 V. Při jednodušších aplikacích může být napájeno z USB, ovšem při našem použití se 6 ti motory je nemožné, neboť výstupní proud z PC je 1 A. Naprogramování je možné pomocí portu USB, I2C, SPI, UART a LIN. Programovací paměť je typu flash a má velikost 256 KB. Napájení signalizuje oranžová dioda, zelená stav a modrá je volitelně programovatelná. Dle potřeby může být část s USB vstup oddělena a využívána pouze pro programování. Použití výstupů je v tabulce 10 v příloze C.

Hlavní využití bylo při odladování tvaru nosného rámu a programu. Ve finální verzi je navrhnutá samostatná deska ve tvaru hexakoptéry, která obsahuje podobný mikroprocesor jako v kitu CY8C588LTI. Konkrétně se jedná o PIC cy8c4245pvi-482, který má menší avšak dostačující počet vstupů/výstupů, zvolený v pouzdře SSOP28, které jde jednoduše připájet.



Obrázek 31 CY8C588LTI

3.3 Senzory

3.3.1 Gyroskop MPU-6000

Jedná se o světové první integrovaný 6-ti osý sledovač pohybu, kde jsou kombinovány 3 osy gyroskopu a 3 osy akcelerometru. Ovšem rozdíl v pouzdrech je takový, že oba senzory jsou v jednom pouzdře nebo mohou být použity individuálně. Dalším rozšířením může být připojení externího 3 osého kompasu, snímače tlaku, výšky a dalších senzorů, pomocí sériové linky I2C. Tento gyroskop obsahuje tři 16-ti bitové analogově digitální převodníky pro jednodušší zpracování dat v mikroprocesoru. Další výhodou je nastavení přesnosti pro sledování pomalých či rychlých pohybů a to od ± 250 °/s až po 2000 °/s. Podle typu lze použít komunikaci se všemi registry tohoto zařízení buď pomocí I2C na 400 kHz nebo pomocí SPI na 1 MHz. Pokud by bylo zapotřebí rychlejší komunikace mezi mikroprocesorem a gyroskopem je možno přerušit všechny ostatní registry a číst data pomocí SPI na 20 MHz. Na tomto čipu se ukrývá teplotní čidlo, které pracuje s přesností $\pm 1\%$ v celém rozsahu teplot. Tento gyroskop je k dostání ve dvou druzích, první je již zmíněné MPU-6000, které podporuje rozhraní I2C a SPI. Druhým je MPU-6050, který obsahuje navíc samostatný napěťový referenční pin VLOGIC. [26]

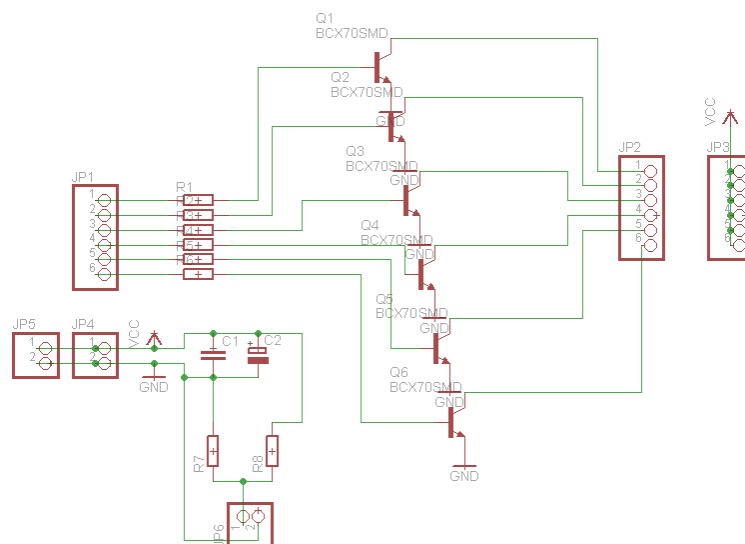
Tento gyroskop je zvolen, protože patří mezi skupinu využívající své vlastnosti v komerčně dostupných přístrojích, jakými jsou např. videa stabilizace, bezpečnostní čidla, hrací konzole, mobilní zařízení, sportovní a zdravotní senzory a hračky.

Popis funkcí:

- 3-osý gyroskop, vyrobený MEMS technologií s velikostí pouzdra 4x4x0,9mm
- Digitální výstup X, Y a Z v ose snímače s uživatelsky programovatelným rozsahem
- Připojení externího synchronizačního signálu k podpoře videa a GPS synchronizace
- Integrovaný 16-ti bitový ADC se vzorkovaným výstupem gyroskopu
- Vysoká stabilita v celém teplotním pásmu -40 °C až 85 °C bez potřeby uživatelské kalibrace
- Programovatelný dolnofrekvenční filtr pro vyhlazení výstupních hodnot
- Pracovní napětí 2,375 V-3,46 V s odebíraným proudem 3,6 mA
- Senzor se dodává kalibrovaný z výroby

3.3.2 Tranzistory poloviční h-můstek

Jedná se o bipolární NPN tranzistory s označením FM6T17 v smd pouzdře SOT23. Maximální hodnoty napětí $U_{CE}=15$ V a proud tekoucí do kolektoru 3 A je dostatečný. Pro řízení motorů, byly zvoleny tyto tranzistory pro jejich nízkou hmotnost a vysoký výkon v zapojení do polovičního H-můstku, jelikož směr rotace je požadován jedním směrem, který je dán tvarem vrtulí.



Obrázek 32 H-můstek

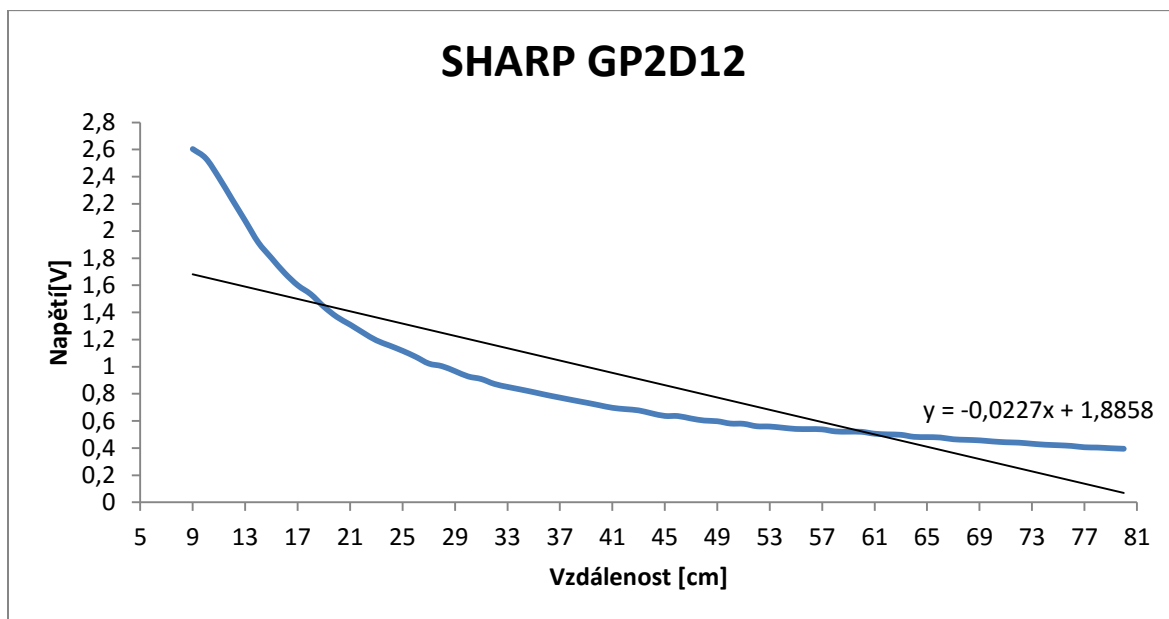
3.3.3 IR měření výšky

Protože se jedná o autonomní létající dron, je zapotřebí aby znal svoji výšku nad povrchem. K volbě přichází v úvahu dva druhy senzorů a to ultrazvukové nebo infračervené. Zvolil jsem měření vzdálenosti pomocí infračerveného senzoru.

Požadavky na senzor jsou: napájecí napětí do 3,7 V, měření vzdálenosti od 10cm do 1m, vysoká obnovovací frekvence minimálně 50x za sekundu tj. 20 mS, protože rychlost stoupání bývá maximálně 5m/s, tak aby byl dron schopen s dostatečnou rychlostí kontrolovat výšku. Výstup ze snímače digitální nebo analogový výstup, malá hmotnost.

Jako ideální se jeví senzor měření vzdálenosti od výrobce Sharp s názvem GP2D12. Jeho vlastnosti splňují požadavky při návrhu a některé i dalece přesahují. Jedná se o snímač vzdálenosti od objektu. Jeho napájení je možno od 2,7 V po 3,6 v, ale po spojení dvou pinů dojde možnosti navýšení napájecího napětí do 5,5 V, což naprosto vyhovuje napájecímu napětí 3,7 V z modelářské Li-pol baterie. Obnovovací frekvence je $16,5 \pm 4$ ms, v průměru to je 60,6 Hz (48,8 Hz-80 Hz), zase je zde dostatečná hodnota.

Hlavní nevýhodou toho čidla je nelinearita měření. Na obrázku je vidět, jak od vzdálenosti 8 cm do 80cm dojde k velkému nelineárnímu poklesu napětí na výstupu odpovídajícímu vzdálenosti. Vyhodnocení je 8mi bitové, tudíž vzdálenost, která odpovídá hodnotě výstupního napětí je převedena AD převodníkem na 256 hodnot. Proto je nejlepší regulovat výšku, která je v největším poklesu napětí a to od 10cm do 60cm. Pro jednodušší vyhodnocení, je zapotřebí vypočítat lineární regresi a zjednodušit si cestu při vyhodnocení výšky. Naměřená data odpovídají při měření vzdálenosti bílého papíru, předpokládá se, že při ztmavení dojde ke snížení měření maximální vzdálenosti.

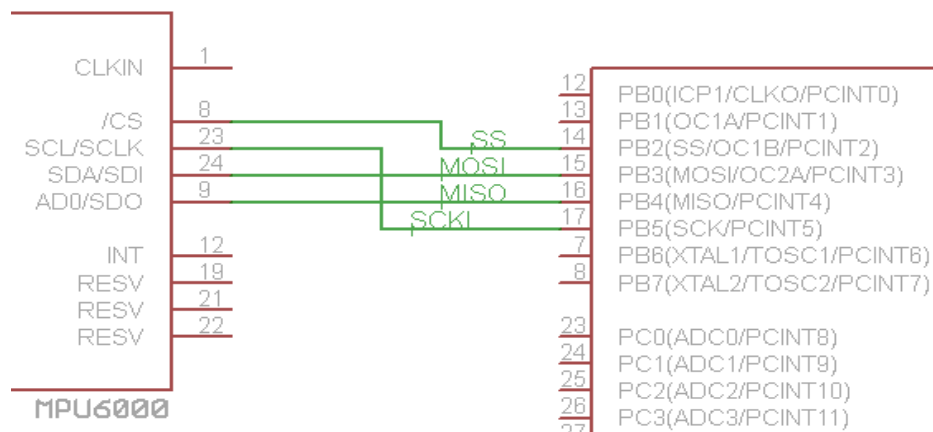


Obrázek 33 Závislost výstupního napětí na vzdálenosti

3.4 SPI komunikace mikroprocesor-MPU-6000

Jedná se o sériovou komunikaci mezi více zařízeními, přičemž jedno je master, se kterým komunikují ostatní, v našem případě se jedná o komunikaci mezi mikroprocesorem, který je zde jako master a gyroskopem MPU-6000, který je zde jako slave.

Aby gyroskop začal fungovat, je zapotřebí nastavit na CS logickou 0 pomocí mikroprocesoru a po dobu komunikace tuto hodnotu držet až do ukončení. Následně začne mikroprocesor generovat hodinový signál, aby byl přenos dat synchronizován. Po zasynchronizování dojde k vyslání dat z mikroprocesoru do gyroskopu přes vodič MOSI (master out, slave in) a opačným směrem po vodiči MISO (master in, slave out). V prvním okamžiku dojde k inicializaci gyroskopu a poté případně vysílá procesor požadavek na odeslání hodnoty z gyroskopu, kde následně gyroskop odpoví hodnotami odpovídající jeho úrovni naklonění ve 3 osách. Výhodou SPI sběrnice je obousměrný přenos dat takřka bez jakéhokoliv omezení při frekvenci 1 MHz.



Obrázek 34 Zapojení sériové linky SPI

Použité piny v zapojení:

VDD – Napájení 2,375 V – 3,46 V. Externí stabilizátor udržuje napájecí napětí 3,3 V

GND – Zem. Záporná polarita baterie

SDA - Připojeno na výstup mikroprocesoru (MOSI SPI)

INT – Datové přerušení - např. pokud jsou nová data v paměti přepsána a připravena k vyčtení (paměť je typu FIFO (first in, first out) – nepřipojeno

AUX_DA – Připojení dalšího senzoru (magnetometru) data pomocí I2C. Nevyužito

AUX_CL – Připojení dalšího senzoru (magnetometru) clock pro I2C. Nevyužito

SCLK - Připojeno na výstupní hodinový signál procesoru

CS - Chip select, logická „0“ = SPI mód

SDO - Výstupní data v SPI režimu

REGOUT – Připojen kondenzátor, který funguje jako filtr při regulaci.

FSYNC – Použití pro externí digitální synchronizaci např. s kamerou. Nevyužito, proto připojeno na GND

CPOUT – Připojený kondenzátor vůči zemi jako filtr šumů v napájení.

CLKIN - připojení externích hodin. Nevyužit, proto připojen na GND

3.5 Bezdrátová komunikace ZigBee pomocí XBEE

Jedná se o bezdrátovou komunikační technologii stavěnou podle standardu IEEE 802.15.4 standardizovanou v roce 2004. Zaměřená především na průmyslové aplikace, ve kterých je zapotřebí malých nebo velkých rozlehlých sítí s nízkou spotřebou energie do rychlosti přenosu dat 20 kbit/s až 250 kbit/s. Dosah až 1000 metrů avšak reálně stovky metrů

v závislosti na provozních podmínkách. Využívá bezlicenčních pásem 868 MHz (1 kanál, 20 kbit/s), 902–928 MHz (USA, 10 kanálů, 40 kbit/s na kanál) a 2,4 GHz (EU, 16 kanálů, 250 kbit/s na kanál). [8]

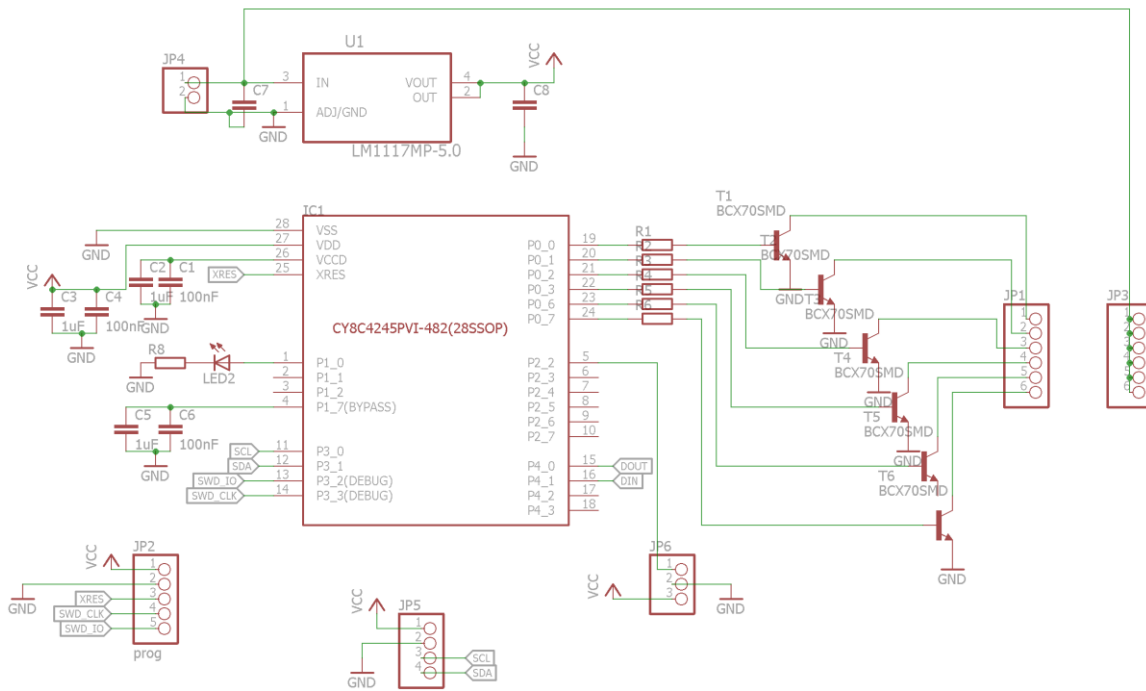
Příprava pro diagnostiku dronu byl zvolen modul XBee první série od firmy MaxStream. Tyto moduly se vyznačují malými rozměry, vysokým dosahem a nízkou cenou. Důležité parametry jsou popsány v tabulce 4. Pro komunikaci s periférií využívá sériový port UART.

Tabulka 4 Parametry XBee

Dosah - přímá viditelnost	100m
Dosah - zastavěné prostranství	30m
Vysílací výkon	1 mW
Rychlost přenosu dat RF	250 kbit/s
Sériová linka přenos dat	1200 b/s – 230400 b/s
Citlivost přijímače	-92 dBm
Napájení	2.8 V – 3.4 V
Odběr proudu při vysílání (VCC= 3,3 V)	45 mA
Odběr proudu při přijímání (VCC= 3,3 V)	50 mA
Odběr proudu při vypnutý stavu	méně než 10 μ A
Vysílací frekvence	ISM 2.4 GHz
Rozměry	2,438 cm x 2,761cm
Provozní teplota	-40 °C – 85 °C
Integrovaná anténa	zisk 1,5 dBi
Externí anténa	zisk 2,1 dBi
Topologie sítě	Point to point, Point to multipoint, Peer to peer, Mesh
Počet kanálů	16

3.6 Celkové zapojení

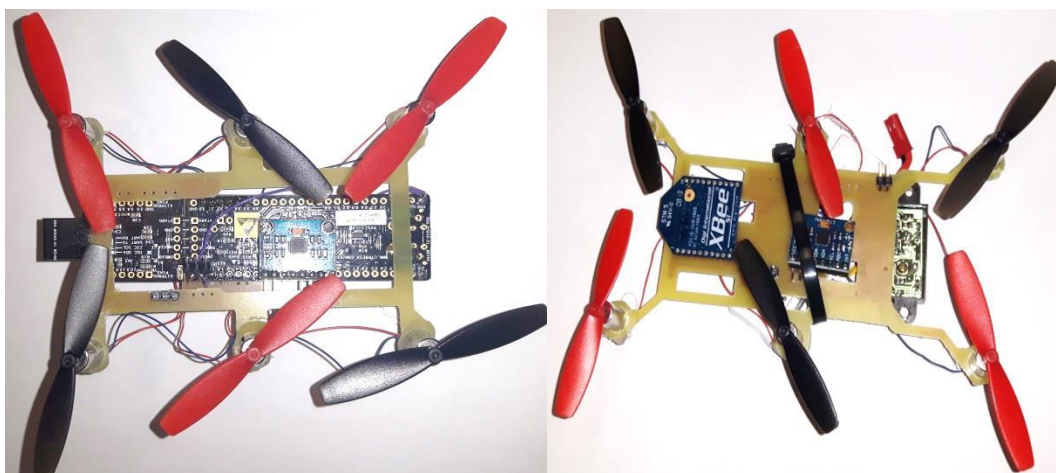
Zde je vidět jak vypadá potřebné zapojení. Stabilizátor 3,3 V je pouze pro napájení gyroskopu. Přivedené napájení z baterie je na pinech COM1 a COM2. Konektor JP2 pro připojení programování procesoru. Napájení jednotlivých motorů je zobrazeno konektory JP1 a JP3, avšak při použití BLDC motorů s regulátorem by bylo lepší použít kabelové vývody z desky, pro přizpůsobení většímu průtoku proudů. JP1 je připraven pouze pro propojení jeho dvou pinů při programování procesoru, aby nedošlo k samovolnému odesílání dat přes sériovou linku a tím k porušení programovacích dat.



Obrázek 35 Celkové zapojení

3.7 Návrh fyzické podoby dronu

Požadavky na dron jsou takové, aby byl co nejlehčí. Proto je nosný rám vyroben z kuprextitu s DPS. První verze na obrázku 36 (vlevo) je vidět první verze s testovacím kitem CY8C588LTI, který byl připevněn k rámu. Takovéto sestavení měli vrtule velice blízko u sebe a většina proudu vzduchu od vrtule narážel do DPS, proto i se svojí nízkou hmotností 51 g nedokázal vzlétnout. Prostřední motorky jsou posazeny o 5 mm níže než krajní, proto nedochází k fyzickému kontaktu vrtulí, ale při regulaci otáček se motory ovlivňují. Druhá vylepšená verze obrázek 36 (vpravo), je o 4 cm delší což dopomohlo omezení vzájemné ovlivňování vrtulí proudícího vzduchu. Odstraněním testovacího kitu došlo ke snížení váhy o 6 g.



Obrázek 36 Tvar dronu vlevo první, vpravo druhý

3.8 Inicializace registrů gyroskopu MPU6000

Registr 27:

Použití tohoto registru je k otestování mechanických a elektrických částí gyroskopu vykonanou pro každou osu nezávisle na sobě zvlášť nebo všechny současně. Je-li tento test povolen, bude na výstupu generován signál z tohoto autotestu, který odpovídá velikosti Coriolisovy síly podle definované rovnice. Výstupní hodnoty musí splňovat požadavky na minimální a maximální velikosti.

Tabulka 5 Nastavení registru 27

bit	Zkratka	Funkce	Nastavení
7	XG_ST	Zapnutí testování osy X	0
6	YG_ST	Zapnutí testování osy Y	0
5	ZG_ST	Zapnutí testování osy Z	0
4	FS_SEL [1:0]	Nastavení citlivosti rozsahu gyroskopu	0
3			0
2	-		0
1	-		0
0	-		0

Tabulka 6 Nastavení citlivosti gyroskopu

FS_SEL	Citlivost plného rozsahu
0	± 250 °/s
1	± 500 °/s
2	± 1000 °/s
3	± 2000 °/s

Registr 107:

Zde se nastavuje režim napájení, protože gyroskop může přejít do úsporného režimu SLEEP, ve kterém odebírá 3 μ A. Tento režim se při inicializaci musí zakázat, protože je požadováno, aby plnil funkci v zapnutém stavu. Dalšími bity se nastavuje, zda je použit externí nebo interní oscilátor, popř. na jaké frekvenci.

Tabulka 7 Nastavení registru 107

bit	Zkratka	Funkce	Nastavení
7	DEVICE_RESET	Reset	0
6	SLEEP	Režim spánku	0
5	CYCLE	Zapnutí cyklu vypisování	1
4	-	-	0
3	TEMP_DIS	Vypisování teploty	1
2	CLKSEL[2:0]	Nastavení vnitřního oscilátoru	0
1			0
0			0

Registr 108:

Tento registr se používá pro převedení gyroskopu z a do režimu spánku, kde odebírá 3 μ A. Zprvu je zapotřebí nastavit, aby se nedostal do režimu spánku. Další nastavení se zde provádí pro režim cyklu, aby odpovídal na dotazy. Dalším nastavením lze zapnout či vypnout vypisování teploty. V tomto případě je to zbytečné, ale pro drony dosahující vyšších nadmořských výšek to může být pro operátora zajímavý doplněk. Dalším nastavením se provede požadavek na spuštění vnitřního oscilátoru.

Tabulka 8 Nastavení registru 108

bit	Zkratka	Funkce	Nastavení
7	DEVICE_RESET	Reset	0
6	SLEEP	Režim spánku	0
5	CYCLE	Zapnutí cyklu vypisování	1
4	-	-	0
3	TEMP_DIS	Vypisování teploty	1
2	CLKSEL[2:0]	Nastavení vnitřního oscilátoru	0
1			0
0			0

Vyčítání registrů:

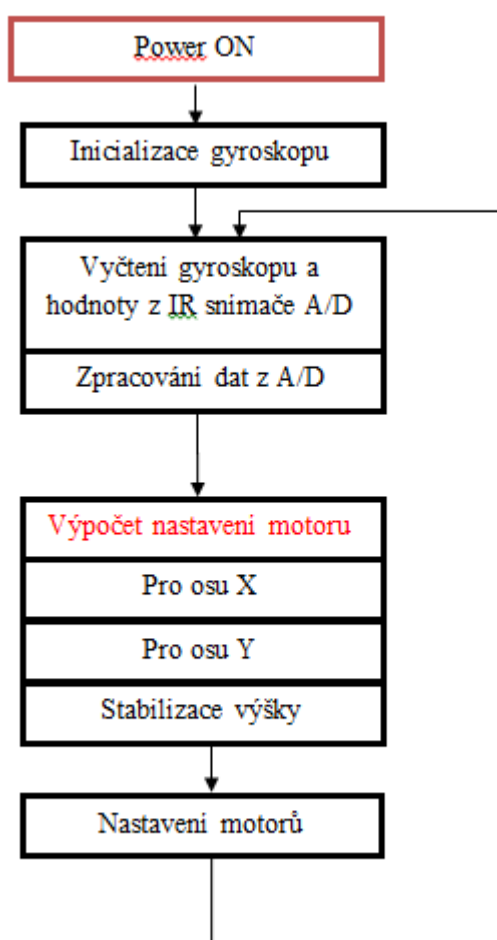
Registr 67-72: Tyto registry v sobě uchovávají hodnoty z měření gyroskopu. Jedná se o 16bitové zakódování informace o změně hodnoty v dané ose podle nastavení rozsahu dle registru 27. 16 bitové vyčítání je zde provedeno tak, že gyroskop odešle 8 horních bitů a poté 8 spodních bitů. Zapotřebí je vyčítat pouze data z gyroskopu. Pro rozšíření je možno vyčítat i data z interního akcelerometru, popř. měření teploty.

Tabulka 9 Vyčítání registrů 67-72

Číslo registru	Zkratka	Funkce
67	GYRO_XOUT[15:8]	8 horních bitů osa X
68	GYRO_XOUT[7:0]	8 spodních bitů osa X
69	GYRO_YOUT[15:8]	8 horních bitů osa Y
70	GYRO_YOUT[7:0]	8 spodních bitů osa y
71	GYRO_ZOUT[15:8]	8 horních bitů osa Z
72	GYRO_ZOUT[7:0]	8 spodních bitů osa z

3.9 Program

Vývojový diagram posloupnosti funkčních bloků ukazuje jaká je programová smyčka.



Obrázek 37 Vývojový diagram

Vyčítání dat je ukázáno v následující ukázce programu. Dochází k postupnému vyčítání hodnot z gyroskopu osa X, osa Y, a osa Z. Výstupní data jsou o velikosti 16 bitů, což je pro nás zbytečně jemný rozsah, proto dojde k odstranění dolních 8 bitů. Při takovém to oříznutí dochází k odstranění většiny šumů, které by jinak vyžadovaly použití patričního filtru.

```
vx=Vyci(69)/256; //vycteni gyra a odstraneni dolnich osmi bitu
vy=Vyci(67)/256; //vycteni gyra a odstraneni dolnich osmi bitu
vz=Vyci(68)/256; //vycteni gyra a odstraneni dolnich osmi bitu
```

Nastavení regulátoru pro regulaci výšky je tvořeno přebuzeným P regulátorem, který zaručí razantní start. Překmit je limitován výkonem a setrvačností motorů. S přebuzeným regulátorem dochází k neustálému zakmitávání, které je slyšet pouze akusticky, na pohybu dronu je neznatelné.

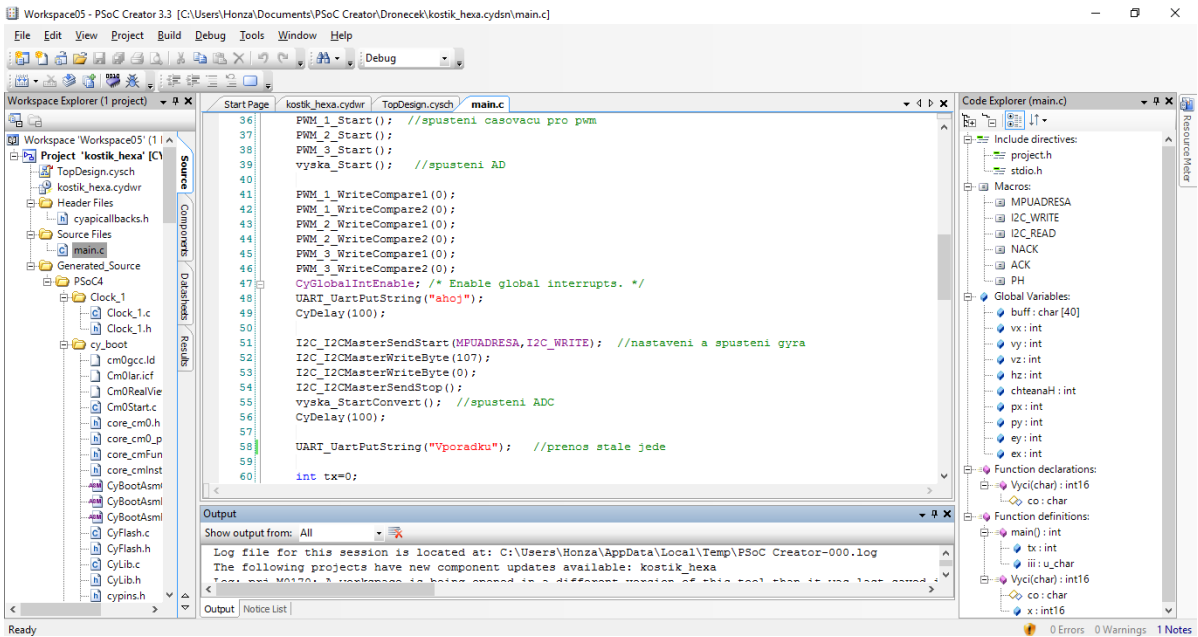
```
hz=vyska_GetResult16(0); //zmereni vysky
iii=(chteanaH-hz)*PH; //regulacni odchylka * zesileni PH
```

Výpočet je regulační odchylka krát zesílení a od toho odečtená data z gyroskopu, tato hodnota se porovnává a pokud nedosáhne do 255, tak se použije právě ta spočítaná hodnota. Pokud hodnotu 255 přeteče, použije se už jen maximální hodnota to 255 pro všechny větší hodnoty. Podle obrázku 8 jsou společně regulovány vrtule F a A pro naklání vpřed. Naklání vzad je prováděno vrtulemi C a D. Boční náklon regulují motory B a E.

```
PWM_1_WriteCompare1((iii-vy/py)>255?255:(iii-vy/py)); //nastaveni motoruA
PWM_1_WriteCompare2((iii+vx/px)>255?255:(iii+vx/px)); //nastaveni motoruB
PWM_2_WriteCompare1((iii+vy/py)>255?255:(iii+vy/py)); //nastaveni m3otorC
PWM_2_WriteCompare2((iii-vy/py)>255?255:(iii-vy/py)); //nastaveni motoruF
PWM_3_WriteCompare1((iii-vx/px)>255?255:(iii-vx/px)); //nastaveni motoruE
PWM_3_WriteCompare2((iii+vy/py)>255?255:(iii+vy/py)); //nastaveni motoruD
```

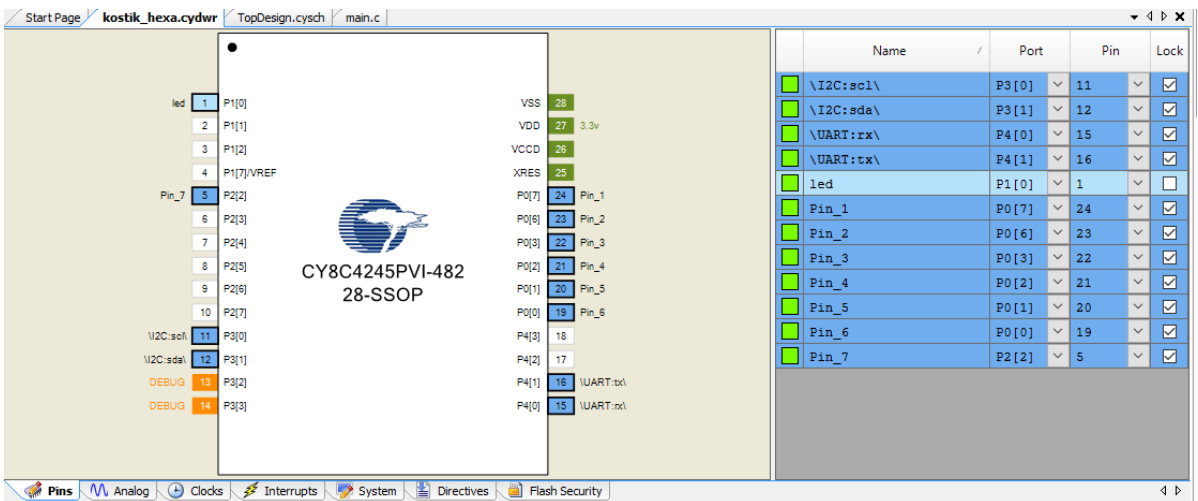
3.10 PSoC creator 3.3

Jedná se o univerzální programovací nástroj, vytvořený zejména pro procesory řady PSoC 3 a PSoC 5. Pro zjednodušení obsahuje grafické prostředí pro vkládání jednotlivých analogových i digitálních bloků, které se „přetáhnout“ z palety nabídek do pracovního okna. Každý blok jde samostatně konfigurovat a při textovém programování v jazyce C se používají jejich vstupy, výstupy i jejich parametry. Na obrázku 38 je ukázka blokového zapojení 6 výstupů generovaných PWM na základě vstupní frekvence. Použitý AD převodník pro připojení analogového čidla na měření výšky. Po „rozkliknutí“ tohoto bloku je nastaven převod na 12 bitů. I2C komunikace je důležitá pro vyčítání dat z gyroskopu. Na obrázku 36 je ukázka otevřeného programu PSoC creator 3.3 při tvorbě regulačního programu do dronu.

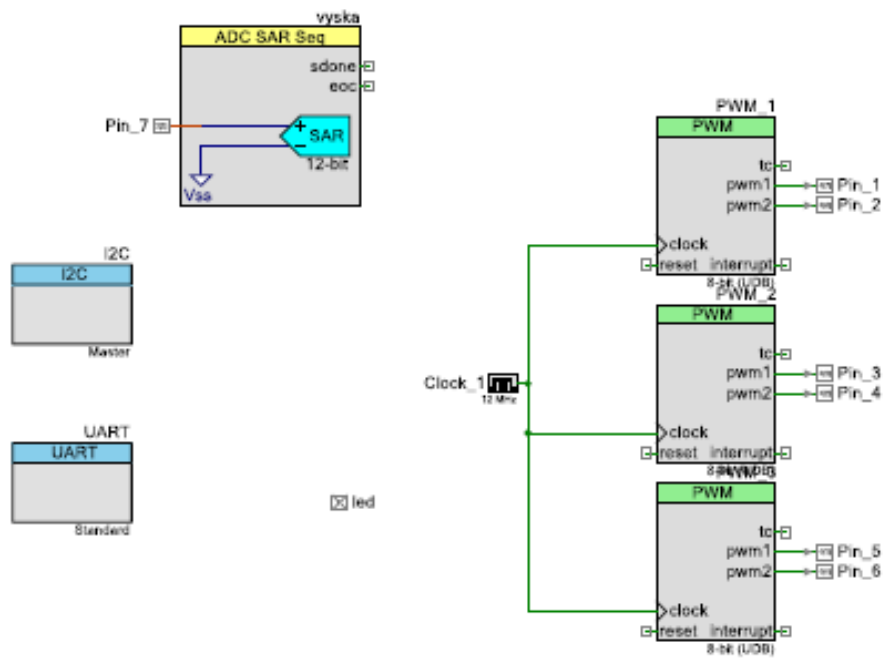


Obrázek 38 PSoC creator 3.3

Pro zjednodušení práce obsahuje programátor graficky zobrazený mikroprocesor, u kterého se použití pinů nastavuje přetažením myši.



Obrázek 39 Nastavení pinů na mikroprocesoru



Obrázek 40 Blokové zapojení výstupů

Závěr

První část práce se zabývá seznámením s druhy létajících dronů, které jsou využívány pro letecké aplikace. V dnešní době se člověk může setkat s mnoha druhy vícevrtulových zařízení, proto jsou vybrány a následně popsány základní verze. U všech dronů musí být vyrovnán moment otáčivosti od vrtulí, aby byla zachována stabilita dronu. Počet vrtulí pravotočivých a levotočivých bývá zpravidla vyrovnán, aby došlo k eliminaci tohoto otáčivého momentu. Počet motorů, velikost a tvar ramen je zpravidla dán na co je dron určený, protože profesionální kamerové zařízení nemá zanedbatelnou hmotnost, proto takovéto drony bývají rozměrné, výkonné a velice drahé.

Osobní zkušenost mám s konfigurací (X) a (+). Při letu s kamerou se mi více osvědčila konfigurace (X), jelikož objektiv zabírá obraz mezi podvozkem dronu. Let v takovémto sestavení je pocitově klidnější, avšak odezva na změnu směru letu je nepatrně menší než u (+). Z vlastní zkušenosti mohu osobně se lépe lítá s konfigurací (X) respektive s (H).

Před 5-ti lety, nebylo možno sehnat dobrý dron s opensource, protože na trhu jich bylo velice málo, ale rychlý vývoj elektronické stability vícevrtulových dronů a pokles ceny těchto zařízení, dopomohl k extrémnímu nárůstu nabídky i poptávky. Proto je vybráno jen pár projektů s open source, které se objevují na trhu, i když jich je mnohem více. V porovnání těchto vybraných je DJ matrice 100 nejmladší z této řady a skrývá v sobě největší potenciál v proražení na trh. Jedná se o ukázkou kvality a preciznosti již zavedené firmy, která je předním dodavatelem malých dronů pro pořizování záběrů z výšek. Jedná se o produkt, který má podporu ze strany dodavatele, jehož výhodou je také spolupráce s vývojáři z celého světa na tvorbě nových aplikací, zejména pro stabilizaci a orientaci v prostoru.

Stejně jako u elektro-automobilů, u kterých závisí rádius působnosti hlavně na kapacitě baterií, tak i u dronů je výdrž ve vzduchu závislá na kapacitě baterie. Pokud dojde v pokroku ve vývoji výkonných a lehkých baterií, dojde ke zvýšení průměrné doby letu. Je možné, že veškerá energie nebude uložena pouze v bateriích, ale vývoj bude směřovat k hybridním zdrojům. Další možností je rychlé bezdrátové dobíjení baterií, které by neomezilo funkci při vykonávání daného úkolu.

Praktická část začíná porovnáním dvou možných akčních členů u dronu a to kartáčových nebo moderních bezkartáčových motorů. Kde je vidět jasná výhoda výkonu BLDC motorů, avšak jejich nutnost složitějšího řízení a hmotnost hrají v jejich neprospěch v této práci. Jsou zde popsány jednotlivé části, ze kterých se dron skládá s detailním popisem DPS. Program je vyvinut právě pro takovýto dron.

Při ožívování dronu byl proveden vývoj dvou desek DPS které se postupně vyvíjely a zlepšovaly. Prvním problémem byl tvar použitého rámu, který rapidně omezoval dobré proudění vzduchu a dron i přes svoji váhu 50 g nebyl schopen vzlétnout. Druhým propracovanějším řešením bylo oddálení motorů od DPS, která brání v průchodu vzduchu

a snížení celkové hmotnosti na 45 g. Při prvotních vzletech docházelo k mnoha pádům, avšak bez jediného poničení jakékoliv části na dronu. Přenos dat mezi XBee byl bezproblémový do zapnutí motorů, které drasticky zaruší veškerou komunikaci. Původní návrh počítal s jednočládkovou baterií s 300 mAh, avšak její výstupní proud byl velice malý, který uvedl v provoz pouze jeden motor. Nahrazen byl baterií o kapacitě 700 mAh, která s přehledem dodá požadovaný proud pro 6 motorů 12 A. Ve výsledné verzi je dron schopný samostatného vzletu do výšky 70 cm s následným přistáním.

Dalším rozšířením tohoto projektu je možnost měření magnetického pole a tím zajištění stability ve větrném prostředí. Dále je možné tento dron rozšířit také o GPS modul, který by zvýšil potenciál, protože dron by byl schopen intuitivního pohybu v prostředí, záznamu dat z trasy letu nebo bezpečnostního vrácení na vzletové místo. Aby mohla být tato rozšíření uskutečněna, muselo by dojít ke zvětšení celého dronu, které by nejspíše vedlo k použití moderních BLDC motorů.

Literatura

[1] **Sensing, Unmanned, Autonomous Aerial Vehicles** [online]. University of Oxford, 2008 [cit. 2015-01-17]. Dostupné z: <https://www.cs.ox.ac.uk/projects/SUAAVE/>. Vedoucí práce Professor Niki Trigoni.

[2] **ALL THE WORLDS ROTORCRAFT** [online]. 2007 [cit. 2015-08-02]. Dostupné z: http://www.aviastar.org/helicopters_eng/us.html

[3] **Minařík P.**, Kvadroptéry vs. hexakoptéry vs. oktokopty: Pro a proti. *Droncentrum* [online]., 2016 [cit. 2016-02-17]. Dostupné z: <http://www.droncentrum.cz/kvadroptery-vs-hexakoptery-vs-oktokoptery-pro-a-proti/>

[4] **Motor order diagrams** [online]. ardupilot.org, 2013 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: <http://ardupilot.org/copter/docs/connect-escs-and-motors.html#>

[5] **Ing. ŠOLC, CSc., F. a Ing. ŽALUD PH.D, L.** Robotika. *Robotika*. 2002, (1). Dostupné také z: <http://media1.wgz.cz/files/media1:5100dca52f8f1.pdf.upl/Robotika.pdf>

[6] **MINAŘÍK, Petr.** *Droncentrum* [online]. 2015 [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://www.droncentrum.cz/hybridni-pohon-pro-drony/>

[7] **BRISTEAU.** Hydrogen fuel cells may turn corner in commercial drone use. *Intelligent Energy* [online]. [cit. 5.1.2016]. 2015. Dostupné z: <http://www.intelligent-energy.com/news-and-events/company-news/2015/12/15/intelligent-energy-hydrogen-fuel-cells-significantly-extend-drone-flight-time>

[8] **Ing. Zdeněk Němec, PhD.,** 2015 Mobilní komunikační kanály – Přednášky 2015 P6

[9] **CUADRA, Alberto a Craig WHITLOCK.** How drones are controlled. *The Washington Post* [online]. 2014 [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://www.washingtonpost.com/wp-srv/special/national/drone-crashes/how-drones-work/>

[10] **GYROSCOPES** [online]. weseeastthroughaglassdarkly.wordpress.com, 2015 [cit. 2016-04-08]. Dostupné z: <https://weseeastthroughaglassdarkly.wordpress.com/2015/10/12>

[11] **REICHL; VŠETIČKA.** Coriolisova síla [online]. [cit. 5.1.2015]. Dostupný na WWW: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/43-coriolisova-sila>

[12] **Návrh MEMS navigačních senzorů** [online]. 2013, 43 s. [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/prezentace_08_1312_1.pdf

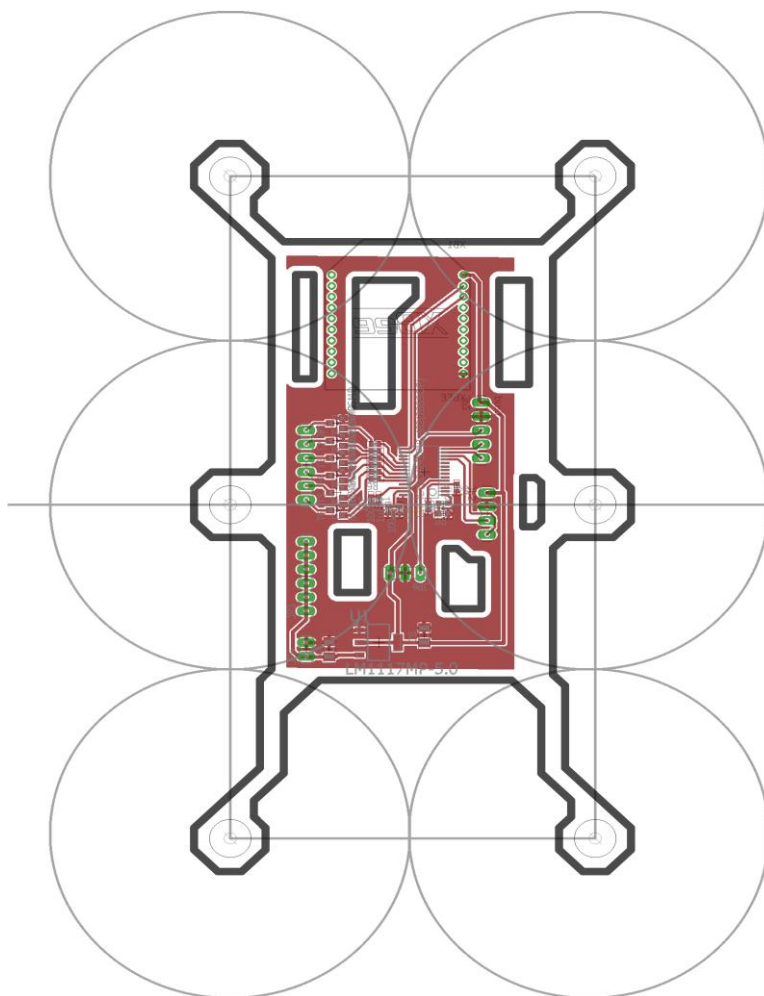
[13] **Průvodce akcelerometry pro začátečníky.** *Průvodce akcelerometry pro začátečníky* [online]. 2007 [cit. 2015-09-03]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~jur286/prostredky_aut_rizeni/preklad.htm

[14] **VOJÁČEK, A.** Integrované AMR senzory magnetického pole. *Automatizace* [online]. 2011 [cit. 2015-09-03]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/integrované-amr-senzory-magnetickeho-pole>

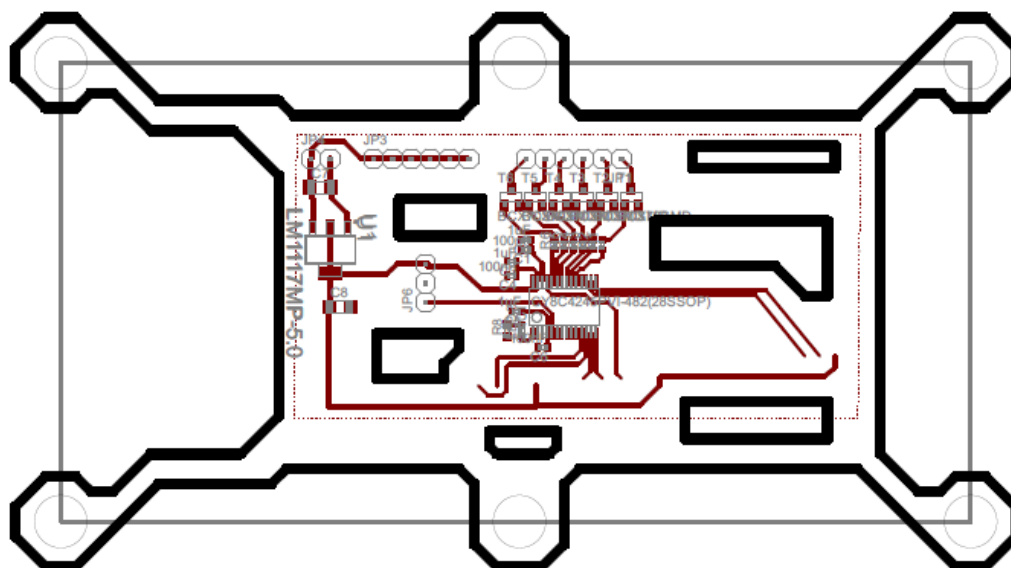
[15] **Doc. Ing. Dušek, František CSc. 2012.** *Teorie řídicích systémů - přednášky*. 2015

- [16] **BRISTEAU, Pierre-Jean, a kol.** The navigation and control technology inside the ar. drone micro uav. In: 18th IFAC world congress. 2011, 1477-1484
- [17] **Mikrokopter:** quadromotor Mikrokopter [online] 2010 [cit. 2015-06-23]. Dostupný z www.mikrokopter.de
- [18] **PAPARAZZI** *The Free Autopilot* [online]. 2014 [cit. 2015-04-23]. Dostupné z: http://wiki.paparazziuav.org/wiki/Main_Page
- [19] **MINAŘÍK, Petr.** *Droncentrum* [online]. 2015 [cit. 2015-06-15]. Dostupné z: <http://www.droncentrum.cz/novinky-dji-matrice-100-a-guidance/>
- [20] **Drona.cz** [online]. 2015 [cit. 2015-08-01]. Dostupné z: <http://www.drona.cz/presentation/matrice100/specifikace><https://www.openpilot.org/products/coptercontrol/>
- [21] **OpenPilot.** *OpenPilot* [online]. 2014 [cit. 2015-09-03]. Dostupné z: <https://www.openpilot.org/>
- [22] **Ardudrone** http://dev.ardupilot.com/wiki/supported-autopilot-controller-boards/#erle-brain_autopilot
- [23] **Dronecode** [online]. 2016 [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: <https://www.dronecode.org/>
- [24] **ATMEL CORPORATION.** *ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P* [online]. 2014 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: www.atmel.com
- [25] **CY8CKIT-059.** *Cypress Perform* [online]. 2015, , 42 [cit. 2016-01-31]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1945839.pdf>
- [26] **INVENSENSE INC.** *MPU-6000 and MPU-6050* [online]. 2012 [cit. 2015-03-23]. Dostupné z: <http://www.invensense.com/>
- [27] **POLOLU.** Sharp GP2Y0A60SZLF [online], 2011 [cit. 2015-03-23]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/2474/specs>
- [28] **NORRIS, Donald.** *Build your own quadcopter: power up your designs with the Parallax Elev-8.* United States: McGraw-Hill Education, 2014, xvii, 343 pages. ISBN 00-718-2228-3.

Příloha A



Obrázek 41 Hotový prototyp dronu



Obrázek 42 Osazovací list

Příloha B

Tabulka 10 Piny CY8C588LTI

Výstupní Pin	Signálový pin	Funkce		Výstupní Pin	Signálový pin	Funkce
J1_01	P2.0	GPIO		J2_01	VDD	3,3 V-5,5 V
J1_02	P2.1	GPIO/LED		J2_02	GND	GND
J1_03	P2.2	GPIO/SW		J2_03	RESET	RESET
J1_04	P2.3	GPIO		J2_04	P0.7	GPIO
J1_05	P2.4	GPIO		J2_05	P0.6	GPIO
J1_06	P2.5	GPIO		J2_06	P0.5	GPIO
J1_07	P2.6	GPIO		J2_07	P0.4	GPIO
J1_08	P2.7	GPIO		J2_08	P0.3	GPIO
J1_09	p12.7	GPIO/UART_TX		J2_09	P0.2	GPIO/UART_TX
J1_10	P12.6	GPIO/UART_RX		J2_10	P0.1	GPIO/UART_RX
J1_11	p12.5	GPIO		J2_11	P0.0	GPIO
J1_12	p12.4	GPIO		J2_12	P15.5	GPIO
J1_13	p12.3	GPIO		J2_13	P15.4	GPIO
J1_14	p12.2	GPIO		J2_14	P15.3	GPIO
J1_15	p12.1	GPIO/I2C_SDA		J2_15	P15.2	GPIO/I2C_SDA
J1_16	p12.0	GPIO/I2C_SCL		J2_16	P15.1	GPIO/I2C_SCL
J1_17	p1.0	GPIO		J2_17	P15.0	GPIO
J1_18	P1.1	GPIO		J2_18	P3.7	GPIO
J1_19	p1.2	GPIO		J2_19	P3.6	GPIO
J1_20	p1.3	GPIO		J2_20	P3.5	GPIO
J1_21	p1.4	GPIO		J2_21	P3.4	GPIO
J1_22	p1.5	GPIO		J2_22	P3.3	GPIO
J1_23	p1.6	GPIO		J2_23	P3.2	GPIO
J1_24	p1.7	GPIO		J2_24	P3.1	GPIO
J1_25	GND	GND		J2_25	P3.0	GND
J1_26	VDDIO	3,3 V-5,5 V		J2_26	GND	GND
Výstupní Pin	Signálový pin	Funkce		Výstupní Pin	Signálový pin	Funkce
J3_01	VTARG	3,3 V-5,5 V		J7_01	VTARG	3,3 V-5, 5V
J3_02	GND	GND		J7_02	GND	GND
J3_03	XRES	XRES		J7_03	P12.4	XRES
J3_04	P1.1	SWDCLK		J7_04	P12.3	SWDCLK
J3_05	P1.0	SWDIO		J7_05	P12.2	SWDIO
Výstupní Pin	Signálový pin	Funkce		Výstupní Pin	Signálový pin	Funkce
J8_01	GND	GND		J9_01	VDD	3,3 V-5,5 V
J8_02	P3.0	GND		J9_02	GND	GND
J8_03	P3.4	RESET		J9_03	P12.5	GPIO

J8_04	P3.5	GPIO		J9_04	P12.0	GPIO/I2C_SCL
J8_05	P3.6	GPIO		J9_05	P12.1	GPIO/I2C_SDA
J8_06	P0.0	GPIO		J9_06	P12.6	GPIO/UART_RX
J8_07	P0.1	GPIO		J9_07	P12.7	GPIO/UART_TX

Příloha CD:

KostalJ_Dron_2016.pdf

Návrh_desky

Program

Video_letu