

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Přírodovědecká fakulta



**Multikoptéra s využitím platformy Arduino
Nano s komunikačním protokolem ZigBee**

Bakalářská práce

Autor: Matěj Poláček

Vedoucí práce: PhDr. Milan Novák, Ph.D.

České Budějovice 2015

Bibliografické údaje

Poláček M., 2015: Multikoptéra s využitím platformy Arduino Nano s komunikačním protokolem ZigBee. [Multicopter using platform Arduino Nano with communication protocol ZigBee. Bc.. Thesis, in Czech.] – 60 p. , Faculty of Science, The University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá realizací multirotorového zařízení založeného na technologii Arduino Nano s komunikačním protokolem ZigBee a naprogramováním ovládacího softwaru. Multirotorové zařízení musí být schopno vzlétnout a vznášet se ve stabilizované pozici. Dále musí být ovladatelné prostřednictvím pozemní řídicí stanice, se kterou komunikuje za pomoci komunikačního protokolu ZigBee.

Annotation

The bachelor thesis deals with a construction of multirotor device based on the technology Arduino Nano with communication protocol ZigBee and programming of the control software. Multirotor device must be able to takeoff and hover in stabilized position. Multirotor device must be also controlled by the ground control station with which it communicates through communication protocol ZigBee.

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne Podpis autora

Obsah

Úvod.....	2
Cíle práce a metodika.....	3
1 Kinetický popis UAV	4
2 Obecné schéma.....	7
2.1 Rám a vrtule.....	8
2.2 Řídicí subsystém	12
2.3 Senzorický subsystém.....	16
2.4 Komunikační subsystém	19
2.5 Akční členy	21
2.6 Zdroj elektrické energie	23
2.7 Pozemní řídicí stanice	24
3 Praktická část	25
3.1 Výběr hardwaru multikoptéry.....	25
3.2 Realizace	33
3.3 Programové vybavení	38
3.4 Stabilizace.....	43
3.5 Nastavení konstant PID regulátoru	47
3.6 Testování.....	49
4 Závěr	52
5 Seznam použité literatury.....	54
6 Seznam obrázků a tabulek.....	58
7 Přílohy.....	60

Úvod

Multikoptéry spadají do skupiny bezpilotních letadel (UAV - z anglického Unmanned Aerial Vehicle). Multikoptéry v těchto dnech zažívají rychlý rozvoj a zastávají pozici významného pomocníka jak v běžném, tak profesním životě. Rozsáhlé využití najdou např. ve vojenských operacích, při sledování objektů nebo ve filmovém průmyslu. Pokud je na konstrukci robota nainstalována kamera (FPV), dostává se nám do rukou velmi mocná „zbraň.“ Zařízení mohou být uplatněna k monitorování určitého prostoru, které je lidem špatně přístupné, neboť je možné díky malým rozměrům a šikovnosti multikoptér pořizovat fotografie a videozáznam z ptáčích perspektiv.

Tato bakalářská práce se zabývá konstrukcí multirotorového zařízení využívající technologii Arduino a komunikační protokol ZigBee. Konkrétně se jedná o realizaci čtyřvrtulové verze - kvadrokoptéry.

Cíle práce a metodika

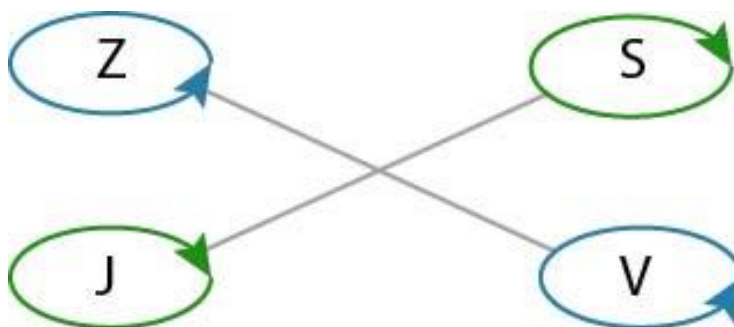
Hlavním cílem práce je realizace kvadrokoptéry a naprogramování ovládacího softwaru pro pozemní řídicí stanici (PC). Stroj bude letuschopný a udrží se ve stabilní poloze bez použití pozičního systému GPS. Tím bude stroj schopen stabilního letu uvnitř budov. Roli řídicí jednotky převezme platforma Arduino Nano. Vzájemnou komunikaci multikoptéry a pozemní řídicí stanice zprostředkuje komunikační protokol ZigBee, který je definován standardem IEEE 802.15.4. Pozemní řídicí stanici bude představovat komunikační modul podporující standard IEEE 802.15.4, připojený k PC s naprogramovaným ovládacím softwarem. Zkonstruovaná multikoptéra bude určena především k létání uvnitř budov, takže stabilizace musí být provedena jinak, než běžně pomocí globálního polohovacího systému.

K dosažení těchto cílů bude v teoretické části nutné analyzovat různá řešení multirotorových zařízení a na jejím základě vytvořit obecnou konstrukci. Analýza bude zaměřena především na multikoptéry využívající technologii Arduino. Ke zkonstruování multikoptéry na platformě Arduino musí být systém rozdělen na jednotlivé subsystemy. Výsledkem zkoumání bude shrnutí poznatků, které multikoptéry zahrnují. Z těchto poznatků bude vycházet praktická část práce.

Praktická část bude zaměřena na stavbu multikoptéry, realizaci řídicí jednotky, naprogramování ovládacího a řídicího softwaru a stabilizaci. Na základě analýzy dílčích subsystemů v teoretické části bude vytvořen seznam komponent, které budou použity na stavbu zařízení. Deskripce jednotlivých komponent vysvětlí jejich technické parametry a využití.

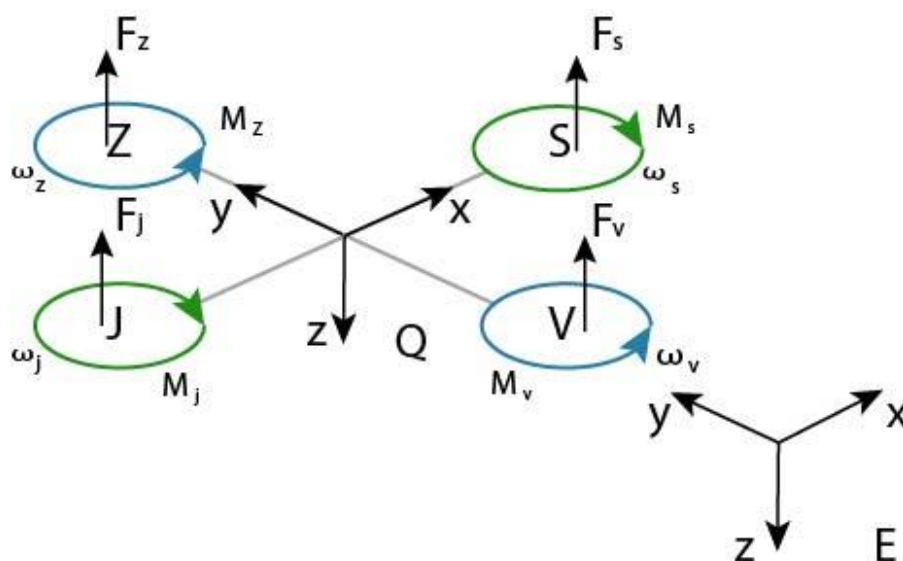
1 Kinetický popis UAV

Základní myšlenka letu multirotorových zařízení je založena na překonání váhy a vnějších sil působících na stroj pomocí motorů s vrtulemi. Vrtule generují tahovou sílu a způsobí kolmé stoupání. Každý motor s vrtulí produkuje vedle tahové síly směrem vzhůru i reakční moment, který je vyvolán okolo osy otáčení motoru. Tento moment musí být vyrušen, jinak by letoun samovolně rotoval okolo svislé osy. Motory musí být rozděleny na pravotočivé a levotočivé. [1] Dvojice protilehlých motorů se otáčí ve stejném směru a motory sousední ve směru opačném.



Obrázek 1.1 Směry otáčení vrtulí

Na obrázku (Obrázek 1.2 Fyzikální model) je znázorněn a popsán fyzikální model kvadrokoptéry. Jsou zde dva souřadné systémy E a Q . Souřadný systém $E = \{x, y, z\}$ je spojen se Zemí a souřadný systém $Q = \{x, y, z\}$, náleží centrálnímu bodu konstrukce kvadrokoptéry. Čtyři stejné motory (*sever, jih, východ, západ*), které jsou umístěny na konci ramen, způsobují tah $F = \{F_s, F_j, F_v, F_z\}$. Jednotlivé vrtule na motorech rotují úhlovou rychlostí $\omega = \{\omega_s, \omega_j, \omega_v, \omega_z\}$, a otáčením způsobují reakční moment $M = \{M_s, M_j, M_v, M_z\}$, ve směru otáčení. Aby byl zajištěn v celém souřadném systému Q celkový nulový reakční moment, je směr otáčení dvou protilehlých rotorů vždy opačný a tím se momenty vyruší. [1] [2]



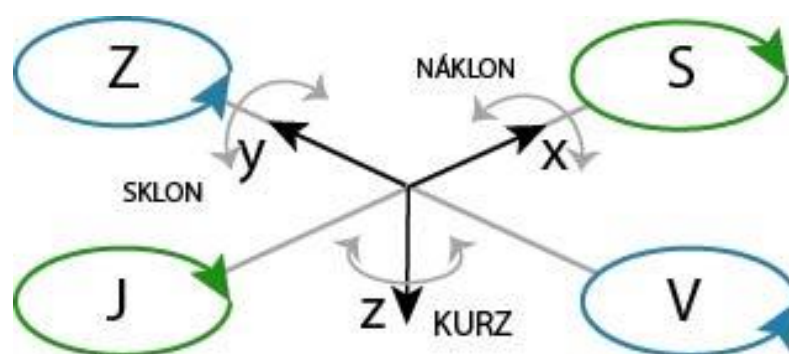
Obrázek 1.2 Fyzikální model

Pohyb multikoptéry

Posuvný pohyb je základní pohyb stroje. Jedná se o let vpřed/vzad po ose x , do stran vpravo/vlevo po ose y a nahoru a dolů po ose z . Pohyb do stran je mnohem jednodušší než v případě vrtulníků. Náklon vrtulníku je způsoben změnou úhlu náběhu rotorových listů během jejich otáčky, čímž se mění tah vytvářený v různých směrech od osy rotoru. V případě kvadroptéry je princip o mnoho jednodušší. Změna polohy závisí pouze na změně rychlosti otáček jednotlivých motorů. Listy multirotorových zařízení mají fixně daný úhel náběhu. [2] K popisu orientace v prostoru se obecně v letectví používá soubor tří Eulerových úhlů.

Eulerovy úhly

Rotaci tělesa v prostoru lze vyjádřit rotací kolem osy procházející bodem, který je součástí tělesa a po dobu rotace je nehybný. Dále vyplývá, že orientaci tělesa v prostoru lze popsat pomocí tří parametrů. Tuto myšlenku představil již v pol. 18. století Leonard Euler. Soubor těchto tří parametrů jsou Eulerovými úhly, které se ve spojení s multikoptéry nazývají kurz, sklon a náklon (yaw, pitch, roll). U multikoptér toho lze využít při stabilizaci a zjištění polohy v prostoru. [3]



Obrázek 1.3 Eulerovy úhly

Kvaternion

Kvaternion lze využít při výpočtu pozice v prostoru. Pod tímto pojmem je v matematice označováno nekomutativní rozšíření oboru komplexních čísel. Jako první je popsal William Rowan Hamilton v roce 1843. Rozdíl mezi čtyřrozměrným vektorem a kvaternionem je ten, že mezi kvaterniony je možné provádět dělení. Kvaternion můžeme obecně zapsat jako uspořádanou čtveřici.

$$(s, (x, y, z)) \quad 1.1$$

Nebo také zkráceně

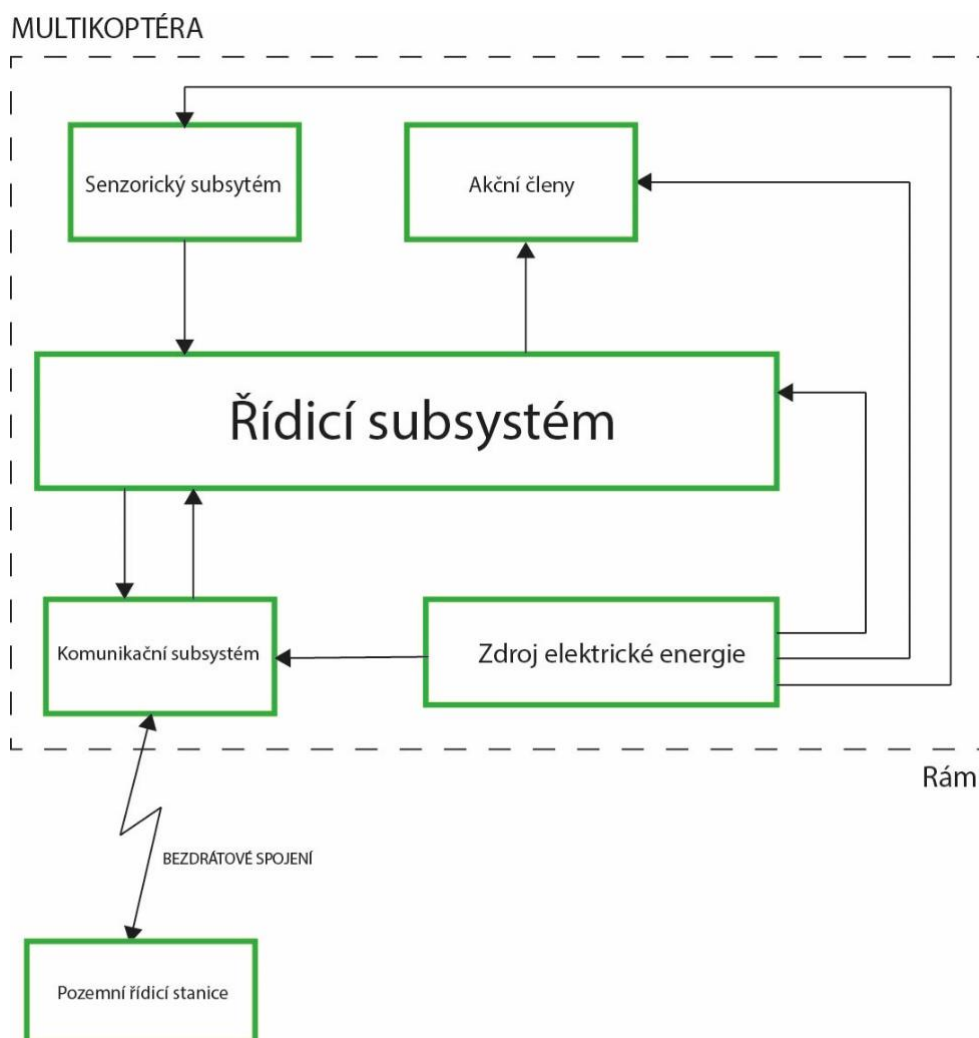
$$(s, v) \quad 1.2$$

kde s je skalár zastupující úhel rotace kolem třírozměrného vektoru v . [4]

2 Obecné schéma

Před zahájením realizace multirotorového zařízení je důležité provést analýzu obecného systému multikoptéry a zjistit, jak je celý systém provázán. Výchozí požadavky na multikoptéru jsou takové, že zařízení se po vzletu udrží ve stabilní poloze v prostoru bez využití globálního polohovacího systému, setrvá v jedné pozici a uživatel mu bude moci bezdrátově posílat základní povely.

Na základě analýzy konstrukcí UAV, lze sestavit blokové schéma, které ukazuje, jaké komponenty jsou důležité nebo nepostradatelné pro úspěšnou realizaci. [5]



Obrázek 2.1 Obecné blokové schéma multikoptéry

Celý systém multirotorového zařízení je možné rozdělit na:

- Rám a vrtule
- Řídicí subsystém
- Senzorický subsystém
- Komunikační subsystém
- Akční členy
- Zdroj elektrické energie
- Pozemní řídicí stanici

2.1 Rám a vrtule

2.1.1 Rám

Rám je hlavním nosníkem celého systému multirotorového zařízení. Podle typu rámu se odvíjí počet vrtulí, podle kterého se multikoptéry dělí do několika skupin. Základní dělení je na trikoptéry (3 vrtule), kvadrokoptéry (4 vrtule), hexakoptéry (6 vrtulí), octokoptéry (8 vrtulí). Další méně obvyklou skupinou jsou multikoptéry označené „coaxial“. U všech skupin je rozlišován dopředný let jedním ramenem nebo dvěma rameny. [6]

Kvalitní rám a vrtule jsou klíčovým předpokladem k stabilizaci multikoptéry. Nejběžnější materiály použité k výrobě těchto komponent jsou např. plast, uhlíková nebo skelná vlákna. U rámu je důležitým parametrem váha, neboť je žádoucí, aby výsledná hmotnost celé multikoptéry byla co nejnižší.

Trikoptéra

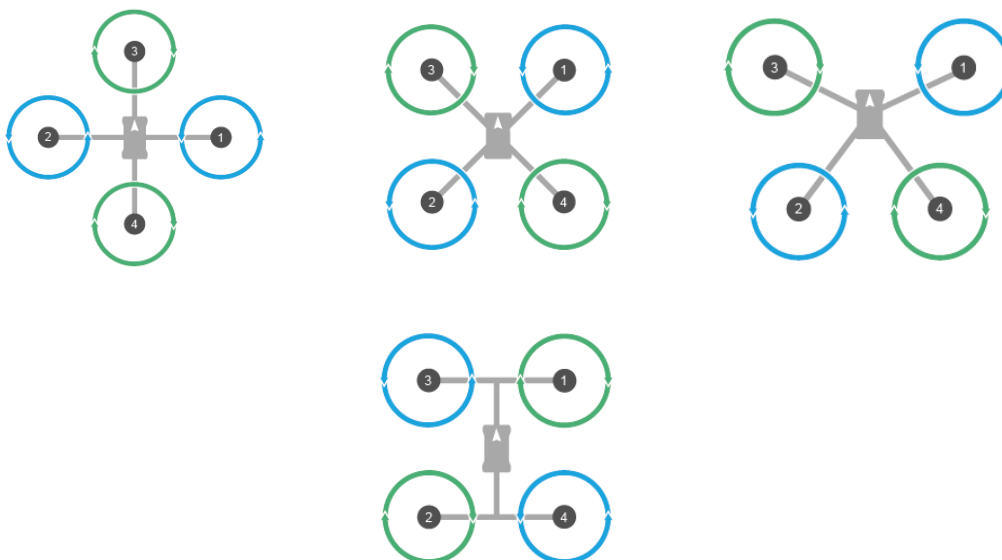
Rám těchto multikoptér se skládá ze tří ramen uspořádaných do písmene „Y“ nebo „T“. Druhá varianta je vhodná na pořizování FPV videa kvůli možnosti širokému záběru videokamery. Na konci každého ramene je jeden motor. Přední dva jsou pevně spojeny s rámem, kdežto zadní motor je pohyblivý do stran a umožňuje, aby se stroj otáčel kolem svislé osy a tím měnil kurz. O pohyb zadního motoru se stará mechanismus se servomotorem. [6]



Obrázek 2.2 Schéma trikoptéra

Kvadrokoptéra

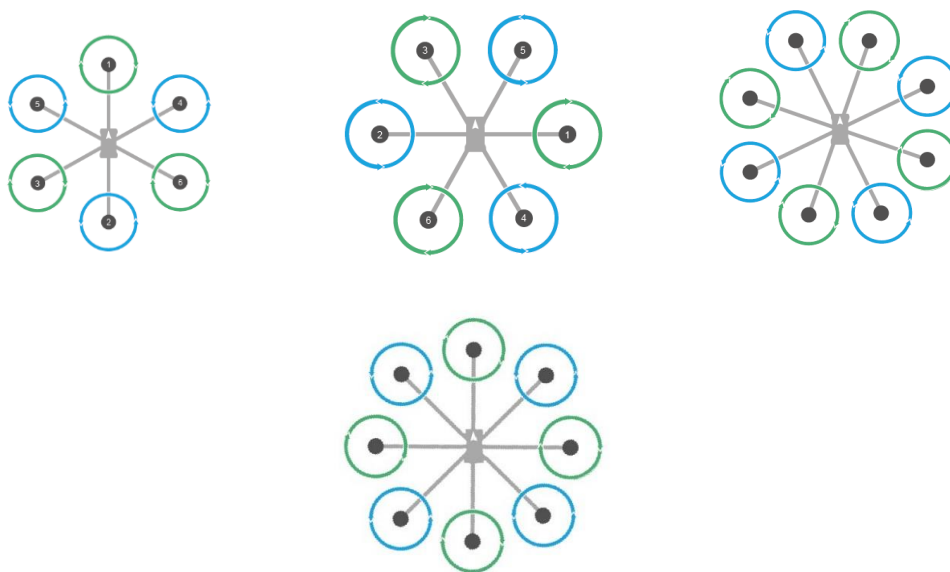
Tato konfigurace se stala nejvíce populárním a nejrozšířenějším typem multirotorového zařízení. K letu využívá čtveřici motorů. Každý z motorů je pevně spojen s ramenem rámu. Oproti trikoptéře je stabilizace jednodušší. Ramena jsou uspořádána buď do „X“ nebo do „H“. [6]



Obrázek 2.3 Schéma kvadrokoptéra

Hexakoptéra a octokoptéra

Tyto druhy konstrukce nejsou tak rozšířené, ale těší se velké oblibě hlavně u filmařů a profesionálních fotografů. Tato zařízení disponují velkou stabilitou a bezpečností díky většímu počtu motorů. V případě, že jeden z motorů má poruchu, stroj může stále bezpečně přistát a nedojde k žádným velkým škodám. Vše se promítá ve vysoké pořizovací ceně, velikosti, hmotnosti stroje a výdrži baterie. [6]



Obrázek 2.4 Schéma hexakoptéra, octokoptéra

Coaxial

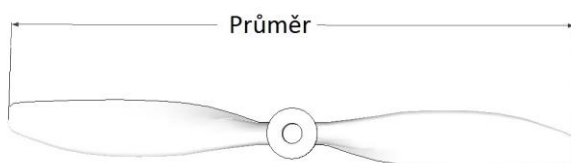
Jedná se o speciální skupinu multikoptér. Tato zařízení mají na každém rameni dvě protilehlé vrtule. Například „Coaxial X8“ představuje multikoptéru s 8 vrtulemi a rám ve tvaru písmene „X“. [6]



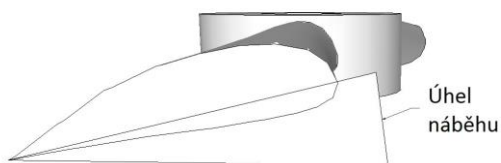
Obrázek 2.5 Schéma coaxial

2.1.2 Vrtule

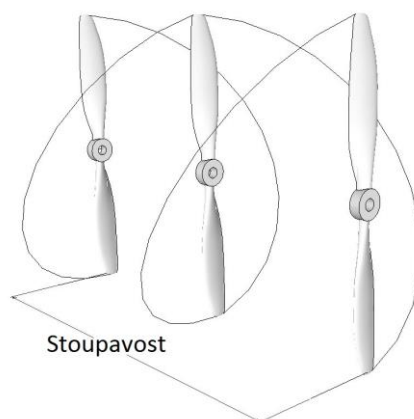
Vrtule se dělí na levotočivé (CCW) a pravotočivé (CW). Nejběžněji použité materiály při výrobě jsou plast, dřevo nebo uhlíková vlákna. Vrtule charakterizuje průměr a stoupavost, kde obě hodnoty jsou uváděny v palcích. Stoupavost, je možné vysvětlit jako délku, o kterou se vrtule posune v daném směru během jedné otočky, a je závislá na úhlu náběhu listu. Tah produkovaný vrtulí závisí na hustotě vzduchu, počtu otáček za minutu, průměru, tvaru, ploše a úhlu náběhu listu vrtule. [7]



Obrázek 2.6 Průměr vrtule



Obrázek 2.7 Úhel náběhu vrtule [7]



Obrázek 2.8 Stoupavost vrtule [7]

2.2 Řídicí subsystém

Předpokladem pro funkční multikoptéru je implementace řídicího subsystému. Řídicí jednotka společně s programovým vybavením tvoří „mozek“ celé multikoptéry. Hardware řídicí jednotky musí mít dostatečný výpočetní výkon, aby byl schopen kvalitativně i kvantitativně zpracovávat informace od senzorického subsystému, zvládnout výpočet regulace otáček a komunikaci s pozemní řídicí stanicí. Důležitou schopností je výpočet akční veličiny v reálném čase. Další parametry při výběru řídicí jednotky mohou být rozměry, spotřeba, velikost napájecího napětí a cena. [5]

Běžně prodávané řídicí jednotky v sobě mohou mít již implementovanou inerciální měřicí jednotku nebo jiné subsystémy. Toto řešení, může mít své výhody v tom, že řídicí systém obsahuje méně fyzických propojení pomocí vodičů (méně šumu, poruch), avšak pokud jsou jednotlivé komponenty separovány od řídicí jednotky a mají integrován vlastní procesor, mohou určitou část svého procesu provádět bez potřeby výpočetního výkonu řídicí jednotky, čímž může být řídicí jednotce značně odlehčeno.

Na trhu jsou dostupné různé komerční řídicí systémy využívající otevřený/uzavřený software. Řídicí software zajišťuje interakce mezi uživatelem a hardwarem multikoptéry, který v závislosti na zvolené platformě, řídí všechny subsystémy a celou konstrukci multikoptéry. U uzavřeného řídicího softwaru není zveřejněn zdrojový kód a není tedy možné ho nijak dále rozšiřovat či upravovat podle potřeb uživatele. V případě, že chce uživatel zavést novou funkci, kterou řídicí systém nepodporuje, je nucen pořídit jinou řídicí jednotku.

Kladnou stránkou uzavřených systémů multikoptér je např. technická podpora, široký výběr rozšiřujících kompatibilních komponent, spolehlivost či menší pracnost při implementaci nové komponenty.

Open-source zástupci řídicích softwarů jsou v zásadě dva. MultiWii a AeroQuad. Tyto systémy jsou si v celku podobné s tím rozdílem, že systém MultiWii je více optimalizován na přesně určený hardware. [8] [9]

MultiWii

MultiWii je univerzální open-source software pro ovládání RC modelů s řídicí jednotkou založenou na desce Arduino. Zdrojový kód je optimalizován na vybrané komponenty. Podle dostupné dokumentace a různých uživatelských tutoriálů, je nutné software doladit na zařízení, na které je implementován. [8]

AeroQuad

AeroQuad je open-source hardware a software založený na vývojových deskách Arduino. Jedná se o kvalitní a spolehlivý řídicí systém, jehož zakladatelem je Ted Taranchen. Nejnovější verze softwaru je kompatibilní s různými druhy gyroskopů, akcelerometrů a typů rámu. Podporuje monitorování stavu baterie a FPV video. AeroQuad poskytuje možnost volného výběru komponent. [9]

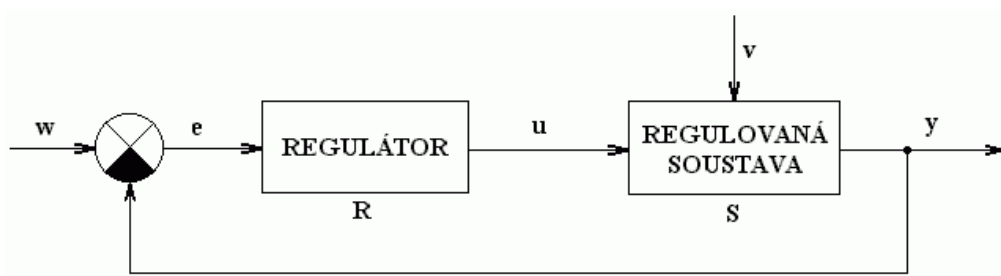
Tato práce se zabývá konstrukcí multikoptéry, řídicího systému založeného na platformě Arduino NANO a naprogramováním vlastního ovládacího softwaru. Díky svým vlastnostem se technologie Arduino stává vhodným kandidátem. Jedná se o efektivní a levné řešení s dostatečným výpočetním výkonem.

2.2.1 Arduino Nano

Arduino Nano je součástí rodiny technologie Arduino, která je založena na 16 MHz mikrokontroléru ATmega328 od firmy Atmel. Architektura mikrokontroléru je AVR, což je 8bitový procesor typu RISC s harvardskou architekturou. Disponuje USB Mini-B rozhraním, 14 digitálními a 8 analogových I/O piny a pamětí 32 kB. Vývojová deska se dá jednoduše připojit k počítači a naprogramovat pomocí vývojového prostředí Arduino IDE. Programovací jazyk určený pro Arduino se nazývá Wiring a vychází z jazyka C++. Program Arduina obsahuje dvě základní metody: Setup(), která se spouští jednou, a Loop(), která je volaná v cyklu [10] [11]

2.2.2 PID regulátor

Aby mohlo být multirotorové zařízení stabilizováno v prostoru, je nutné použít softwarový regulační obvod. Bez regulace by zařízení nebylo možné stabilizovat. Akční veličina je vypočtena na základě informací ze sensorického subsystému. Podle vypočtených akční veličin se odvíjí otáčky motorů, čímž se mění jejich tah a stabilizuje se poloha. Systém regulačního obvodu se skládá ze dvou částí. Jedná se o regulovanou soustavu S a regulátor R . [12] [13]



w - žádaná veličina; e - regulační odchylka; y - regulovaná veličina; v - poruchová veličina; u - akční veličina; R - regulátor; S - regulovaná soustava

Obrázek 2.9 Blokové schéma regulátoru [13]

Regulátor zajišťuje, aby na jeho výstupu byly takové změny akční veličiny, díky nimž se odstraní regulační odchylka e , kde

$$e = w - y \quad 2.1 [13]$$

Cílem regulátoru je, aby v každém časovém okamžiku byla hodnota regulované veličiny stejná jako hodnota žádané (řídící) veličiny w a byla odstraněna regulační odchylka e [13]

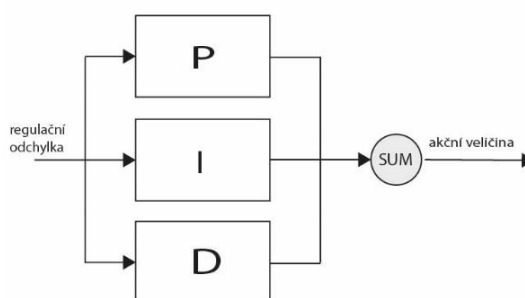
$$y \rightarrow w \Leftrightarrow e \rightarrow 0 \quad 2.2 [13]$$

V praxi hojně používaný je zpětnovazební PID regulátor. PID regulátor se skládá z proporcionální, integrační a derivační složky. Jsou to tři způsoby na odstranění

regulační odchylky. Správný výstup z regulátoru je závislý na optimálním poměru těchto tří složek, které se nastavují pomocí konstant. Výslednou akční veličinu získáme sumací jednotlivých částí. [13]

Konstanty se označují:

- Zesílení K_P , které řídí proporcionální složku P.
- Integrační časová konstanta K_I , která řídí integrační složku I.
- Derivační konstanta K_D , která řídí derivační složku D.



Obrázek 2.10 PID regulátor [13]

Akční veličinu $u(t)$ vypočteme vzorcem:

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{d}{dt} e(t) \quad 2.3 [13]$$

Kde:

K_P : proporcionální konstanta

K_I : integrační konstanta

K_D : derivační konstanta

e : regulační odchylka = žádaný stav – současný stav výstupu

t : aktuální čas

τ : proměnná integrační složky, nabývá hodnot z t_0 do t

2.3 Senzorický subsystém

Aby multikoptéru bylo možné plynule stabilizovat, je důležité získávat aktuální informace o poloze stroje v prostoru. Při návrhu senzorického subsystému je důležité zohlednit vícero faktorů, jako je pracovní prostředí, vzájemné interakce senzorů nebo výpočetní nároky na řídicí subsystém.

2.3.1 Inerciální měřicí jednotka

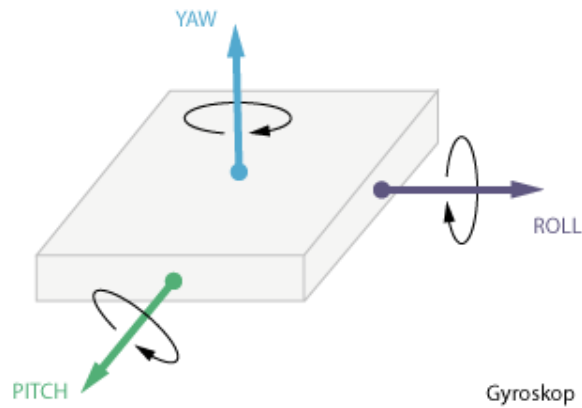
Inerciální měřicí jednotka neboli IMU, získává informace o rychlosti, aktuálním náklonu, sklonu nebo kurzu multikoptéry. Díky těmto informacím je možné stroj stabilizovat. IMU se obecně skládá z akcelerometru v kombinaci s gyroskopem (6 stupňů volnosti) nebo i magnetometrem (9 stupňů volnosti).

Gyroskop

Gyroskop je využíván k měření a určení změny polohy nebo natočení jakéhokoliv tělesa, ke kterému je gyroskop připevněn. V dnešní době jsou integrované gyroskopy vyráběny jako integrované MEMS¹ obvody. Obsahují mimo samotný snímač i vyhodnocovací obvod a logiky. Výstup gyroskopu může být jak analogový, tak digitální. [14]

Obecně je gyroskop určen k měření úhlové rychlosti. Tento údaj popisuje, jak se měřené těleso rychle otáčí v jednotkách stupňů/sekundu ($^{\circ}/s$). Rotaci je možné měřit vzhledem k jedné ze tří os x, y, z, známé jako pitch, roll, yaw. K zpřesnění výsledků je ideální gyroskop použit v kombinaci s akcelerometrem. [14]

¹ Zkratka MEMS je označení pro Mikro-Elektrické-Mechanické-Systémy. Jedná se o vzájemné spojení integrovaných obvodů a mechanických mikro součástek. [16]

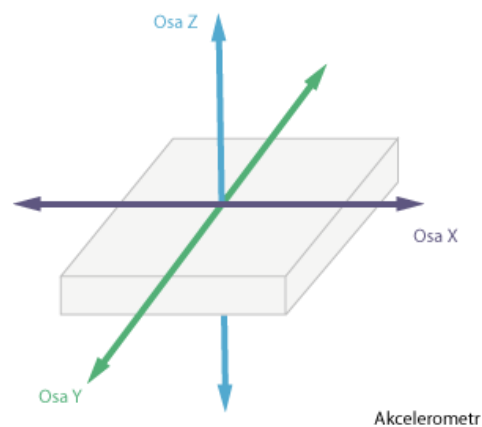


Obrázek 2.11 Osy gyroskopu

Akcelerometr

Akcelerometr je zařízení schopné změřit zrychlení v jednotlivých osách, které je způsobené změnou pohybu. Akcelerometry přeměňují zrychlení na měřitelný elektrický signál.

V praxi se nejčastěji používají piezoelektrické, piezorezistivní a akcelerometry s proměnou kapacitou. Akcelerometr se používá např. k měření náklonu, otřesů, vibrací a setrvačných sil. Akcelerometry je možné vyrobit technologií MEMS. [15] [14]



Obrázek 2.12 Osy akcelerometru

2.3.2 Senzory na určení výšky

K určení vzdálenosti a výšky může být použit např. princip sonaru, metoda dálkového měření vzdálenosti pomocí laseru, zvané LIDAR, nebo barometrické měření.

Sonar

Sonar je senzor k měření vzdálenosti. Měření je založeno na principu měření doby mezi vysláním akustického signálu a přijetím odraženého signálu. U ultrazvukových sonarů je frekvence signálu nad 40 kHz. Kvůli vysokému tlumení ultrazvukového signálu je možné tento senzor použít na detekci překážek do 10 metrů. [5]

LIDAR

LIDAR je akronymem z anglických slov „Light Detection And Ranging“. Tímto pojmem je označené zařízení nebo technologie určené k přesné detekci objektů a měření vzdáleností pomocí laserového paprsku. Měření vzdálenosti je založené na výpočtu doby šíření pulsu laserového paprsku odraženého od snímaného objektu. Využití je možné k spolehlivé navigaci multikoptéry v prostoru. Z důvodu sofistikované elektroniky je pořizovací cena zařízení vyšší. [16]

Barometr

Barometr je senzor pro výpočet atmosférického tlaku pomocí barometrického měření. Barometrické měření okolního atmosférického tlaku je poněkud méně přesný způsob měření výšky stroje a je tedy možné ho použít pouze k orientačnímu měření. Důvodem jsou neustálé změny atmosférického tlaku. Je využit předpoklad, že atmosférický tlak se mění v závislosti s výškou. Čím výš od zemského povrchu probíhá měření, tím nižší je okolní atmosférický tlak. [17]

2.4 Komunikační subsystém

V případě multirotorových zařízení je velmi důležité, aby zařízení bylo osvobozeno od přívodních kabelů a ovládání bylo prováděno bezdrátově. Komunikace je nejčastěji realizována rádiovým spojením např. pomocí Wi-Fi, Bluetooth nebo ZigBee.

Důležité parametry, podle kterých se zvolí potřebná technologie, jsou například nároky na hardware, dosah signálu, spolehlivost a rychlost přenosu dat.

K zprostředkování komunikace plyne z cílů práce použití komunikačního protokolu ZigBee. Použití této technologie bylo z důvodu snížení celkové energetické náročnosti komunikačního subsystému a možnosti ovládání přes PC.

2.4.1 ZigBee

Od prosince roku 2004 se portfolio bezdrátových komunikačních standardů rozšířilo o další prvek s názvem ZigBee, též označován jako IEEE 802.15.4. Jedná se o mezinárodní bezdrátový komunikační standard, který je určen hlavně pro průmyslovou automatizaci, automatizaci budov a spotřební elektroniku. Na vývoji se podílí více jak sto padesát světově významných elektrotechnických firem a tyto firmy společně tvoří organizaci ZigBee Alliance. Jedním z hlavních požadavků těchto firem bylo, aby se standart stal globálně akceptovatelnou technologií. V roce 2015 byla schválena nejnovější verze 3.0. [18] [19]

Největšími výhodami tohoto standardu jsou minimální nároky na hardware a zdroj energie. Díky jednoduchosti je zpracovatelný i 8bitovým kontrolérem. Díky této technologii může vzniknout nízkonákladové, spolehlivé a nízkopříkonové bezdrátové propojení různých inteligentních snímačů, čidel či monitorovacích zařízení s kontrolní stanicí. Vzájemná komunikace je umožněna na vzdálenost několika stovek metrů. Protokol je navržen tak, aby veškerá zařízení mohla být snadno uspána a v případě potřeby, zase rychle probuzena. Signál se šíří v nelicencovaných pásmech 868 MHz, 915 MHz a 2,4 GHz. V České republice jsou povoleny pouze 868 MHz a 2,4 GHz. [18] [19]

Pásmo	Rychlost
868 MHz	40 kB/s
915 MHz	20 kB/s
2,4 GHz	250 kB/s

Tabulka 1 Přehled přenosových rychlostí ZigBee [19]

Standart ZigBee definuje dva typy zařízení a to plně funkční zařízení (FFD) a zařízení se sníženou funkčností (RFD). Plně funkční zařízení obsahuje kompletní protokolový rámec, komunikuje s každým zařízením a zprostředkovává veškeré služby standardu ZigBee. Na druhou stranu zařízení se sníženou funkčností slouží pouze jako koncová zařízení.

Plně funkční zařízení může mít jednu ze tří rolí. Roli koordinátora, směrovače nebo koncového zařízení. Každá síť musí mít koordinátora, který síť spravuje a přiděluje jí PAN ID. Směrovač přeposílá data koncovým zařízením a tím rozšiřuje dosah koordinátora. Koncové zařízení pouze získávají informace například z čidel a přeposílají je koordinátorovi nebo směrovači.

K adresování v síti jsou používány binární kódy s délkou 64 nebo zkráceně 16bitů. U 16bitové verze je tedy možné připojit až 65 535 zařízení v síti. Každou síť je možné identifikovat pomocí 16bitového identifikátoru PAN ID. [19]

2.5 Akční členy

Nezbytnou součástí každé multikoptéry jsou akční členy, díky kterým je stroj schopný pohybu. Akční členy převádí informační část procesu na technickou a realizují tím pohyb v prostoru. V oblasti airborn robotů se namísto akčních členů používají elektromotory s vrtulemi. Elektromotor je elektrický stroj, který mění elektrickou energii na mechanickou práci. Z důvodu efektivnosti jsou používány 3 fázové střídavé asynchronní elektromotory. [20]

2.5.1 Elektromotor

Většina elektromotorů pracuje na elektromagnetickém principu. Jedná se o stroj, který mění elektrickou energii na mechanickou práci. Elektromotor se skládá ze dvou hlavních částí statoru a rotoru. Stator je nepohyblivá a rotor pohyblivá část. [21]

Střídavé elektromotory

U multikoptér se nejčastěji setkáme s bezkartáčovými třífázovými fázovými asynchronními střídavými elektromotory (brushless motor), které mají tři pevná budící vinutí, napájená napětím/proudem, ta jsou vzájemně posunutá o 120° , čímž je vytvořeno točivé magnetické pole. Konstrukčně je můžeme dělit na outrunner a inrunner. Inrunner elektromotory mají cívky s vinutím na vnějším plášti a otáčí se vnitřní rotor s permanentním magnetem. V případě outrunner motorů je vinutí na statoru a otáčí se vnější plášť tvořený permanentními magnety. Rychlost otáčení je úměrná frekvenci budícího napětí, které provádí střídavý frekvenční měnič (ESC) založený na pulzně-šířkové modulaci (PWM). [21] [20]

Střídavý frekvenční měnič

Střídavý frekvenční měnič (ESC) je elektrický obvod starající se elektronické řízení rychlosti střídavého třífázového elektromotoru. Vstupem střídavého frekvenčního měniče je stejnosměrné napětí z akumulátoru a výstupem jsou tři fáze střídavého napětí, kde je výstupní frekvence řízena šířkou PWM pulzu, který generuje řídicí jednotka multikoptéry. [21]

Výstupem regulátoru jsou tři vodiče, které jsou připojeny na 3 fáze střídavého elektromotoru. Smysl otáčení elektromotoru je možné změnit prohozením dvou fází.

Důležitým parametrem u regulátorů je maximální proudová zatížitelnost. Určuje velikost maximálního proudu, který je schopný dodávat bez poškození. Regulátor musí být schopen pokrýt proudové požadavky elektromotoru. V lepším případě by regulátor měl mít mírnou rezervu.

Regulátory mohou být vybaveny takzvaným obvodem BEC. Jedná se o jednoduchý stabilizátor napětí. Další funkcionalitou může být možnost nahrání nového firmwaru či přeprogramování pomocí programovací karty. [21]

2.6 Zdroj elektrické energie

Celý systém musí být připojen ke zdroji energie, aby mohla být palubní elektronika „oživena“. V této práci je výhodné, aby multikoptéra byla nezávislá na externím zdroji napětí. Možností je použít dobíjecí akumulátor připevněný k rámu kvadrokoptéry. Nejvyšší nárok na odběr elektrické energie má zpravidla akční subsystém. Důležitými parametry každého akumulátoru jsou maximální proudová zatížitelnost, velikost vnitřního odporu, rychlost samovybitení, životnost, kapacita, počet nabíjecích cyklů, existence či neexistence paměťového efektu a hlavně fyzická velikost a hmotnost. Na trhu je na výběr z širokého množství různých typů akumulátorů. Nejběžnější akumulátory jsou založeny na chemické reakci s niklem nebo lithiem, a to NiCd, NiMh, Li-Po a Li-Ion. [5] [22] [23]

NiCd

Tyto akumulátory využívají chemické reakce niklu s kadmíem, avšak tento druh už je poměrně zastaralý. Disponují nižším vnitřním odporem, takže dovolují vysoké proudové zatížení. Mohou být nabíjeny velkým proudem, čímž se sníží nabíjecí čas. Životnost baterie je okolo 1500 nabíjecích cyklů.

Nevýhodou je v celku nízká kapacita v porovnání s hmotností. Dále se projevuje vysoký samovolný vybíjecí efekt a velmi vysoká zátěž na životní prostředí z důvodu toxického kadmia. [23] [24]

NiMh

Pokud srovnáme předchozí typ baterie, mohou mít nikel-metal-hydridové baterie až dvakrát vyšší kapacitu při stejné hmotnosti a velikosti.

Na rozdíl od NiCd mají vyšší vnitřní odpor a nižší životnost. Jsou schopny vydržet okolo 500 nabíjecích cyklů. [23] [24]

Li-Ion

Tyto baterie mají téměř nulový samovolný vybíjecí efekt, disponují vysokou kapacitou ve spojení s vysokým jmenovitým napětím. Nevýhodou je pomalé nabíjení v důsledku vysokého vnitřního odporu. [23] [24]

Li-Pol

Jedná se o jeden z nejmodernějších druhů zdroje elektrické energie, jejichž tuhý elektrolyt je tvořený vrstvou polymeru. Tento fakt umožňuje vyrábět baterie různého tvaru. V podstatě se jedná o novější typ Li-Ion baterii. Výhoda je vysoká kapacita, velmi nízká hmotnost a vysoká životnost. Svými vlastnosti jsou ideální pro RC modely. [23] [24]

Jmenovité napětí jednoho článku akumulátoru je 3,7 V a při plném nabití je maximální napětí 4,2 V. Při nabíjení akumulátoru nesmí být tato maximální hodnota napětí překročena, jinak by mohlo dojít k nevratnému poškození. K tomuto účelu jsou určeny speciální nabíječky s ochranným systémem. [22]

Články akumulátorů je možné spojovat do takzvaných „packů“. Akumulátor 3S je tvořen 3 články zapojenými do série. Výsledné napětí se počítá vynásobením počtu článků akumulátoru s napětím jednoho článku ($3 \times 3,7 \text{ V} = 11,1 \text{ V}$).

Při nabíjení těchto akumulátorů je použita nabíjecí charakteristika UI. Nejdříve nabíjíme akumulátor konstantním proudem a zvyšuje se napětí baterie až na maximální hodnotu (4,2 V na článek), poté nabíjecí proud začne klesat a zůstává konstantní napětí baterie. Maximální nabíjecí a vybíjecí proud je závislý na typu baterie a je udán výrobcem [22]

2.7 Pozemní řídicí stanice

K ovládání multikoptéry uživatelem je potřebný ovladač. Tuto roli může obstarat RC souprava nebo modul k PC s naprogramovaným ovládacím softwarem.

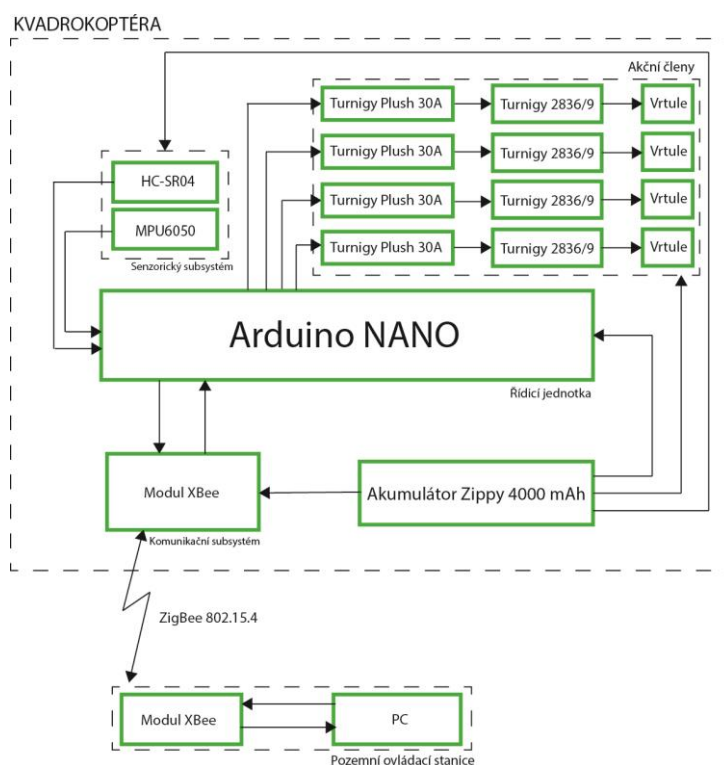
3 Praktická část

Praktická část práce je zaměřena na realizaci multikoptéry. Konkrétně se jedná o čtyřvrtulovou verzi – kvadrokoptéra. V následujících kapitolách je deskripce vybraných komponent, realizace kvadrokoptéry, software, nastavení konstant PID regulátoru a testování kvadrokoptéry. Při analýze a výběru vhodných komponent byly použity webové kalkulatory „XcopterCalc a „Static Thrust Calculator“.

3.1 Výběr hardwaru multikoptéry

Před výběrem jednotlivých komponent byl stanoven hlavní účel a funkcionality kvadrokoptéry. Kritéria vycházela především z cílů práce.

- Roli řídicí jednotky převezme vývojová deska Arduino Nano.
- Komunikaci mezi kvadrokoptérou a řídicí stanicí zprostředkuje komunikační protokol ZigBee.
- Kvadrokoptéra bude stabilizovaná pomocí IMU.
- Schopnost setrvat v jedné stabilní poloze a výšce.
- Celková hmotnost okolo 1kg.
- Úsporné finanční řešení.



Obrázek 3.1 Blokové schéma s konkrétními komponentami

Rám

Základní konstrukci tvoří rám typu kvadrokoptéra v konfiguraci dvou ramen vpřed při dopředném letu. Důvodem zvolení kvadrokoptéry je jednodušší mechanická konstrukce a následná snazší stabilizace. Řešení počítá i s nižší finanční náročností. S vyšším počtem motorů logicky stoupá i cena celého zařízení.

Jako optimální řešení je vybrán rám DJI FlameWheel F330. Jedná se o nejmenší verzi rámu z rodiny FlameWheel. Průměr ramen je 33 cm a váží 160g.



Obrázek 3.2 DJI WheelFlame F330 [25]

Elektromotory

Výběr elektromotoru je nutno podřídít požadavkům na systém. Po analyzování různých sestav multikoptér vyšlo najevo, že motory s nižším počtem otáček, které jsou osazeny velkými vrtulemi, mají větší efektivitu a multikoptéra má větší stabilitu. Na druhou stranu multikoptéra s menšími vrtulemi a větším počtem otáček motorů, dokáže rychleji reagovat. Elektromotory s počtem otáček menším jak 1000 KV^2 jsou určeny spíše pro multikoptéry zaměřené na fotografování a pořizování videa. Tyto multikoptéry disponují velmi dobrou stabilitou a přiměřenou rychlostí reakce. Elektromotory s vyšším KV jsou spíše pro akrobatický a sportovní let.

Při výběru střídavého elektromotoru musela být známa přibližná celková hmotnost kvadroptéry, aby mohl být odvozen potřebný tah jednoho elektromotoru s osazenou vrtulí. Aby se kvadroptéra vznesla a byla snadno ovladatelná, měly by elektromotory se správně zvolenou vrtulí zajistit dvakrát větší tahovou sílu, než je celková hmotnost kvadroptéry. Výrobce ve většině případech udává přibližný tah korespondujícím s typem vrtule.

$$\text{tahová síla na motor} = (\text{hmotnost} \times 2) / 4 \quad 3.1$$

Po vyhodnocení všech faktů byla zvolena čtveřice střídavých bezkartáčových outrunner elektromotorů Turnigy D2836/9 950 KV. [26]

² Hodnota KV představuje teoretický počet ot/min na 1V bez zátěže elektromotoru.

Počet otáček na volt	950 KV
Hmotnost	70 g
Maximální proud	23 A
Maximální napětí	15 V
Výkon	243 W
Maximální tah (vrtule 9×6)	850 g

Tabulka 2 Parametry Turnigy D2836/9 [26]



Obrázek 3.3 Turnigy D2836/9 [26]

Frekvenční měniče

Správně zvolené frekvenční měniče jsou základem řízení otáček střídavých elektromotorů. V případě Turnigy D2836/9, je dle specifikace výrobce maximální proud motorem 23 A. Regulátor musí být schopen tento proud elektromotoru dodat a v lepším případě mít i určitou rezervu. Byly vybrány čtyři frekvenční měniče Turnigy Plush 30A. Tento frekvenční měnič je možné konfigurovat programovací kartou a jeho originální firmware je navrhnout právě pro multikoptéry. Je schopen pracovat s PWM signálem o frekvenci až 490 Hz. Měnič je vybaven BEC obvodem, který dodává stálé napětí 5 V. [27]



Obrázek 3.4 Frekvenční měnič Turnigy Plush 30A

Vrtule

Selekce vrtulí je zaměřena na vrtule vyrobené z uhlíkových vláken. Uhlíková vlákna má oproti plastu mnoho výhod. Tyto vrtule jsou lehčí, produkují méně vibrací z důvodu větší tuhosti a multikoptéra získá celkově lepší letové vlastnosti. Jejich lepší vlastnosti jsou vykoupeny podstatně vyšší pořizovací cenou.

Při výběru průměru a úhlu stoupavosti vrtulí jsou použity webové kalkulatory „XCopterCalc“ a „Static Thrust Calculator“. Na základě těchto kalkulatorů je možné simulovat předběžný výsledný model kvadrokoptéry a porovnat charakteristiky vrtulí v závislosti na elektromotoru Turnigy D2836/9.

Porovnány jsou vrtule 8×3.7, 8×4.5, 9×3.8 a 9×4.5, které jsou na trhu běžně dostupné. Následující tabulka přináší souhrn výsledků. Sloupec „throttle“ značí potřebný procentuální výkon motorů na vznesení stroje. K ideálnímu řízení je vhodná hodnota okolo 50 %. Ostatní sloupce určují dobu letu v minutách na jeden plně nabitý akumulátor Zippy Compact 4000mAh 3S, který bude dále popsán.

	Throttle	Min. doba letu	Kombin. doba letu	Doba letu ve visu
8037	60 %	7.5 min	11.7 min	14.8 min
8045	55 %	6.6 min	11.5 min	14.9 min
9038	44 %	5.3 min	11.8 min	16.8 min
9045	40 %	4.7 min	11.5 min	16.9 min

Tabulka 3 Výsledky XcopterCalc

Z toho porovnání plyne, že lepším řešením je vrtule 8×4.5. Maximální tah elektromotoru Turnigy D2836/9 s touto vrtulí je přibližně 0.56 kg.



Obrázek 3.5 CW a CCW vrtule 8045 z uhlíkových vláken

3D akcelerometr a 3D gyroskop MPU-6050

K inerciální navigaci kvadrokoptéry v prostoru je vybrána inerciální měřící jednotka MPU-6050. Senzor MPU6050 je osazen na modulu GY-521. Uvnitř tohoto senzoru nalezneme zapouzdřený tříosý MEMS gyroskop s tříosým MEMS akcelerometrem. Citlivost měření je u obou senzorů možné nastavit podle potřeb. Citlivost akcelerometru na ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g až ± 16 g. U gyroskopu ± 250 , ± 500 , ± 1000 , ± 2000 °/s. Modul GY-521 podporuje komunikaci po I²C sběrnici, která obsahuje dva komunikační vodiče SDA a SCL. GY-521 pracuje v režimu slave a napájecí napětí je 3,3 V – 5 V. Výhodou je zabudovaný procesor DMP, který zajišťuje přímé zpracování dat ze senzorů. Základní jednotkou pro výpočet pozice je kvaternion. V DMP je implementován komplementární filtr MotionFusion na redukci nežádoucích krátkodobých odchylek a šumu. Výsledný úhel náklonu je možné již použít k výpočtu akčních zásahů.

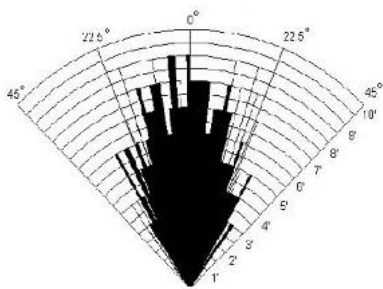
Senzor je vždy nutné před použitím kalibrovat a nastavit offsety. Pro práci s modulem jsou již připravené knihovny v jazyce C++, které velmi usnadňují implementaci. [28]



Obrázek 3.6 Senzor GY-521 [28]

Ultrazvukový modul HC-SR04

Ultrazvukový sonar HC-SR04 je použit v senzorickém subsystému k měření výšky letu kvadrokoptéry. Rozsah měření je účinný v rozsahu 2 cm až 2 m. Měření je využito ke stabilizaci a setrvání stroje v jedné stálé výšce. Napájecí napětí senzoru je 5 V. [5]



Obrázek 3.7 Vyzářovací diagram sonaru (rozměr ve stopách) [5]



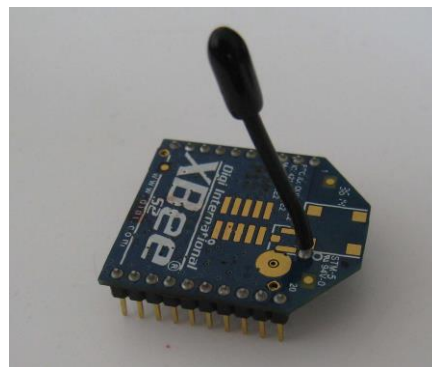
Obrázek 3.8 Sonar HC-SR04 [5]

Modul Xbee

Jednou z předních vlastností kvadrokoptéry je dálková bezdrátová ovladatelnost. K zprostředkování bezdrátové komunikace mezi kvadrokoptérou a pozemní řídicí stanicí, jak cílů práce plyne, je využit protokol ZigBee. Je několik výrobců, kteří se specializují na výrobu modulů podporující standart 802.14.5. Mezi přední výrobce patří například společnost Digi International nebo Texas Instruments. Na základě vlastností jsou vybrány dva moduly XBee 2 mW Wire Antenna Series 2 od společnosti Digi International. Jeden modul je použit v komunikačním subsystému kvadrokoptéry a druhý u řídicí stanice.

Modul XBee 2 mW Wire Antenna Series 2 má v obvodu integrovaný vysílač a přijímač standardu ZigBee, A/D převodníky, osm I/O konfigurovatelných portů a komunikační linku UART. [29]

Dosah uvnitř budov	40 m
Dosah venku (přímá viditelnost)	120 m
Vysílací výkon	2mW (3 dBm)
Citlivost přijímače	-96 dBm



Tabulka 4 Parametry modul XBee [29]

Akumulátor

Zdrojem elektrické energie je zvolen Li-Pol akumulátor Zippy Compact 4000 mAh 3S 25 C. Akumulátor tvoří jeden „pack“ skládající se ze tří článků zapojených do série. Celkové jmenovité napětí je 11.1 V, tedy 3,7 V na článek. Velikost maximálního proudu akumulátoru, určuje parametr xC , kde číslo x určuje násobek základní kapacity C akumulátoru. Použitý akumulátor má parametr 25 C, tzn., že je schopen dodávat $25 \times 4000 \text{ mA}$ tj. 100 A.

3.2 Realizace

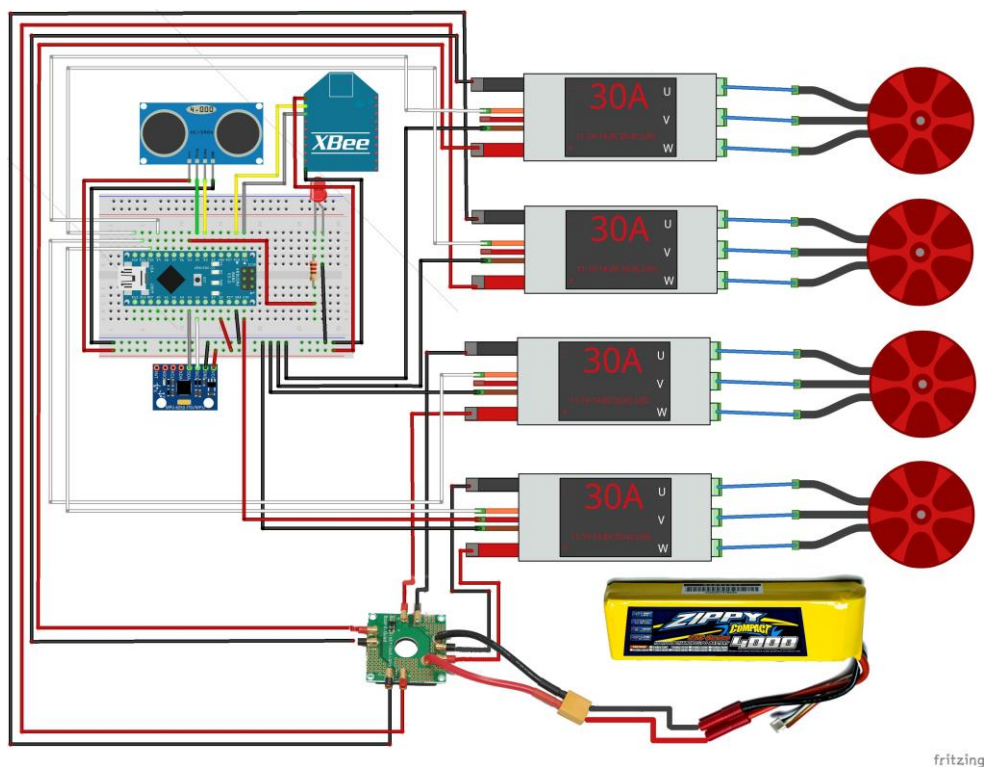
Základní konstrukci kvadrokoptéry tvoří rám DJI WheelFlame F330 se čtyřmi rameny. K tomuto rámu jsou připevněny zbylé komponenty. Na konce ramen jsou imbusovými šrouby připevněny střídavé elektromotory Turnigy D2836/9, na kterých jsou kleštinovými unašeči uchyceny vrtule. K elektromotorům jsou připojeny střídavé frekvenční měniče Turnigy Plush 30A, regulující proud tekoucí do elektromotoru.

Z frekvenčního vodiče vede celkem osm vodičů. Na jedné straně jsou dva tlusté (červený, černý) a tři tenké vodiče (červený, černý, bílý). Tlusté vodiče slouží k napájení a jsou připojeny konektory k desce distribuující elektrickou energii. Tenké vodiče jsou součástí konektoru připojeného k řídicí jednotce, z nichž bílý je signálový vodič, černý je uzemnění a červený je napájecí vodič z obvodu BEC.

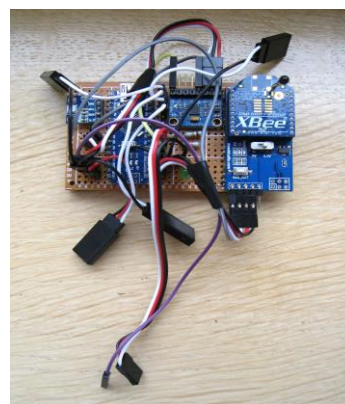
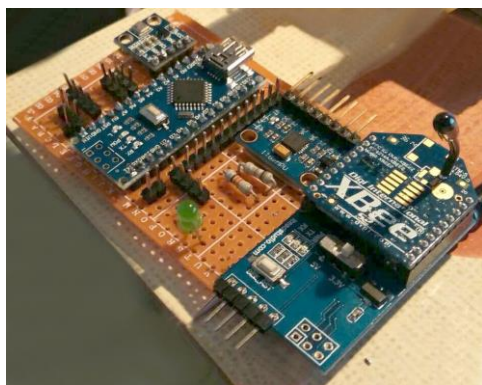
Z druhé strany frekvenčního měniče jsou tři tlusté výstupní vodiče (tři fáze). Tyto vodiče jsou připojeny pozlacenými 3,5mm konektory k střídavým elektromotorům. Podle zapojení fází je možné změnit smysl otáčení elektromotorů. Aby nedošlo ke zkratu a následnému poškození elektroniky včetně akumulátoru, jsou konektory chráněny teplem smršťovací bužírkou.

Všechny regulátory musí být stejně nakonfigurovány. V případě Turnigy Plush 30A se konfiguruje typ akumulátoru, ochrana a reakce na nízké napětí akumulátoru nebo šířka pulzů PWM. PWM pulzy jsou posílány signálovým vodičem z řídicí jednotky. Frekvenční měniče byly nastaveny na šířku pulzu 1 až 2 milisekundy, kde PWM pulz o šířce 1 milisekunda představuje 0 % výkonu a 2 milisekundy 100 % výkonu elektromotoru.

Propojením řídicí jednotky, IMU a komunikačního modulu XBee za pomoci pájivého kontaktního pole a vodičů, vznikl jednotný řídicí systém kvadrokoptéry. Při propojování komponent byla použita technika pájení mikropájkou. Do řídicího systému je instalována LED dioda, která rozsvícením signalizuje připojení řídicí stanice ke kvadrokoptéře. Řídicí systém je napájen z BEC obvodu jednoho z frekvenčních měničů. Signálové vodiče frekvenčních měničů jsou připojeny k řídicí jednotce na piny 9-12 a všechny jsou uzemněny připojením k řídicí jednotce na pin GND, viz Obrázek 3.10 Schéma zapojení .



Obrázek 3.10 Schéma zapojení systému



Obrázek 3.11 Řídicí systém kvadrokoptéry

Na ploše ve středu rámu je šrouby připevněna antivibrační deska, na níž je řídicí systém. Antivibrační deska je zde z důvodu eliminace vibrací, které vnikají při rotaci elektromotorů s vrtulemi. Tyto vibrace by mohly negativně ovlivňovat IMU.

Akumulátor Zippy Compact 4000mAh 3S se nachází v podvěsu kvadrokoptéry a napájí veškerou elektroniku. Je připojen dvěma vodiči (červený, černý) k desce distribuující elektrickou energii.



Obrázek 3.12 Finální podoba kvadroptéry

Druhou částí práce je pozemní ovládací stanice. Skládá se z modulu XBee, PC a ovládacího softwaru. Modul XBee je připojen k PC a vysílá data k druhému modulu umístěném na kvadroptéře.

3.2.1 Implementace modulu XBee

PC a modul XBee

Moduly XBee jsou vybaveny komunikačním protokolem UART. Aby mohl být připojen modul XBee přes USB port k PC, musí být zařazen převodník mezi USB a UART. K tomuto účelu je použit převodník SparkFun XBee Explorer USB s FT232RL čipem.

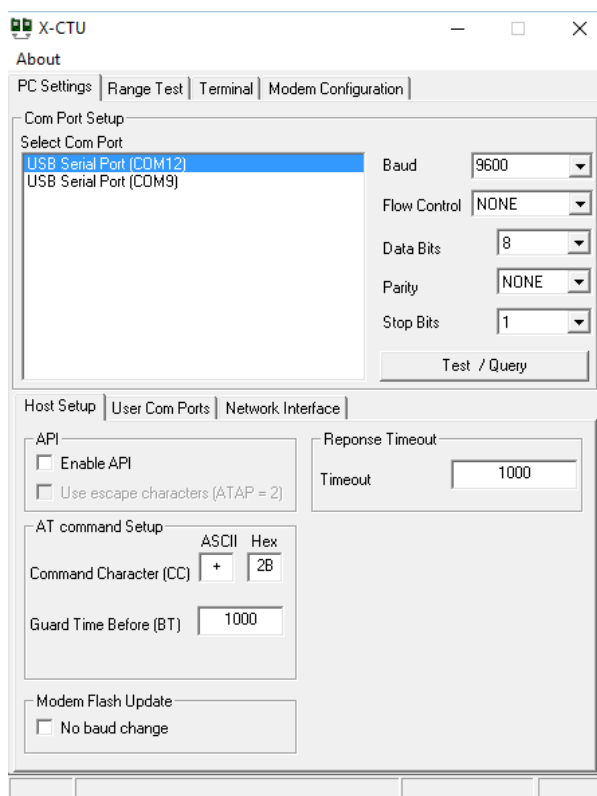
Po připojení převodníku s modulem XBee k USB portu PC se vytvoří virtuální COM port, který je možné využívat jako fyzický sériový port. K správné komunikaci musí být nainstalované ovladače FTDI.

Konfigurace XBee modulů

Moduly musí být správně nakonfigurovány, aby mezi sebou mohly komunikovat. Konfigurace je provedena programem X-CTU od firmy Digi International. Program poskytuje jednoduchou cestu k interakci XBee modulů uživatelem, testování komunikace a aktualizování firmwaru. Program je možné stáhnout ze stránek výrobce.

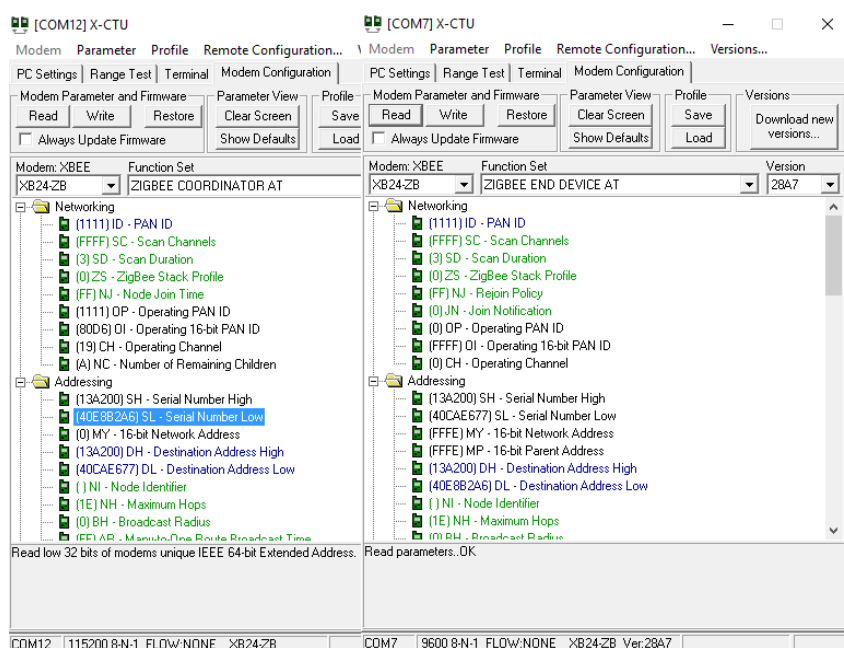
Ke komunikaci mezi kvadrokoptérou a řídicí stanicí je vytvořena bezdrátová síť topologie peer-to-peer. Jde o nejjednodušší typ sítě, která vyžaduje pouze dvě zařízení, koordinátora a koncové zařízení.

Po spuštění programu X-CTU jsou v okně „*Select Com Port*“ zobrazeny všechny dostupné COM porty s XBee moduly. Ve výchozím nastavení každého modulu je rychlost 9600 baud/s, počet data bitů 8, počet stop bitů 1 a žádná parita. Pro případný test COM portu je možné použít tlačítko „*Test / Query*“.



Obrázek 3.13 Program X-CTU

V záložce „*Modem Configuration*“ probíhá konfigurace modulu. Nejprve musí být modulu přiřazena funkce v síti. Jeden modul je nastaven jako „ZigBee Coordinator AT“ druhý „ZigBee End Device AT“. Aby moduly byly ve stejné síti, je jim přiřazen stejný PAN ID (1111), dále je zvýšena komunikační rychlost „Baud rate“ na 115200 baud/s a nastavena vzájemná cílová adresa. Každý modul má svoji jedinečnou adresu již od výrobce, která je uvedena na štítku XBee modulu.



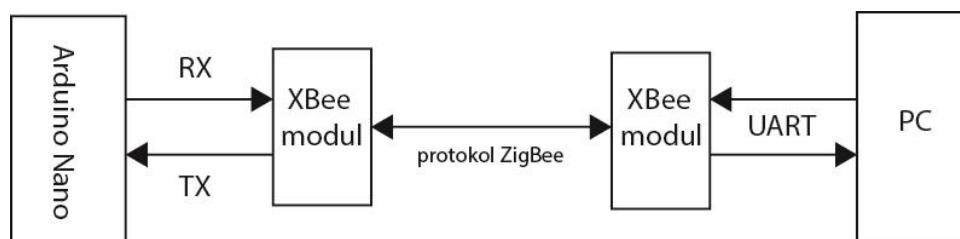
Obrázek 3.14 X-CTU konfigurace XBee modulů

Komunikace XBee modulů

XBee modul může být připojen k jakémukoliv zařízení, které podporuje asynchronní sériovou komunikaci UART. V této práci je toho využito jak u řídicího systému kvadrokoptéry (Arduino Nano komunikuje s XBee modulem), tak u pozemní řídicí stanice (PC komunikuje s XBee modulem).

Arduino Nano poskytuje UART rozhraní na pinech 0 (RX) a 1 (TX). Do modulu XBee data vstupují přes pin DI (Data In) a vystupují přes pin DO (Data Out). Komunikace probíhá pomocí asynchronního sériového signálu. Obě rozhraní,

jak Arduino Nano, tak modul XBee, musí pracovat na stejné přenosové rychlosti. V tomto případě 115200 baud/s. V případě řídicí stanice je to obdobné.



Obrázek 3.15 Schéma komunikace mezi moduly

Datový bezdrátový přenos probíhá v transparentním módu. Modul data přenáší ve stejném tvaru a formě, v jakém je přijme. Tento mód je na výpočetní nárok a složitost řídicího programu tím nejjednodušším řešením.

3.3 Programové vybavení

3.3.1 Software k ovládání kvadroptéry

Ovládání kvadroptéry je realizováno aplikací ve Windows. Ovládací aplikace je napsána v programovacím jazyku Java a k vytvoření grafického uživatelského rozhraní je využito grafické knihovny Java Swing. Ovládání kvadroptéry ovládacím softwarem probíhá na základě textových řetězců. Tyto textové řetězce jsou generovány z povelů, které zadává uživatel v grafickém rozhraní.

Po spuštění aplikace se zobrazí uživatelské prostředí. V první řadě je nutné se připojit na virtuální sériový port, ke kterému je připojen USB – UART převodník s modulem XBee. Po úspěšném připojení je možné zadávat sadu instrukcí tvořících textový řetězec. Jsou to instrukce:

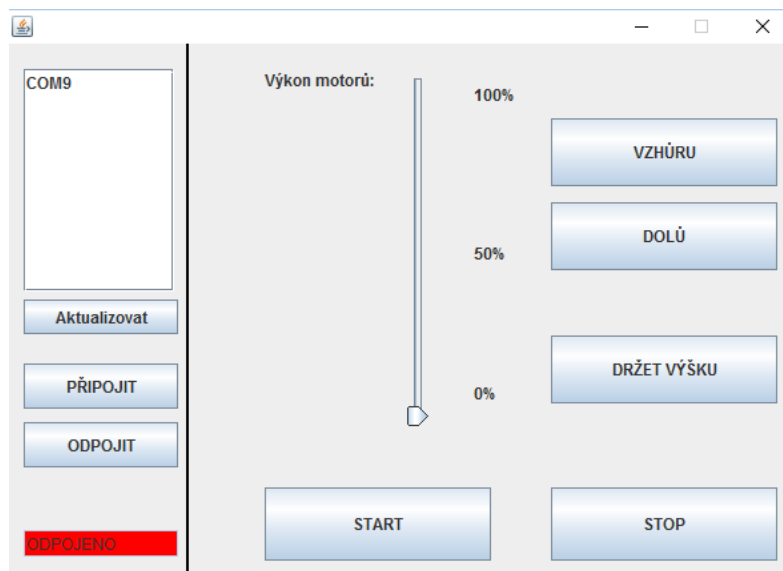
- Připojit/ odpojit.
- Start/ stop.
- Přidávání/ ubírání výkonu motorů.
- Držet výšku.

Textový řetězec je rozdělen na čtyři oddíly, kde každý oddíl reprezentuje jednu instrukci určenou číselným údajem.

- Připojit/ odpojit – pokud je aplikace připojena 1, pokud odpojena 0.
- Start/ stop – roztočení vrtulí 1, zastavení 0.
- Přidávání/ ubírání výkonu motorů – hodnota od 1000 – 2000, značí základní výkon všech motorů (PWM signál 1-2 ms).
- Držet aktuální výšku – v případě zapnutí 1, jinak 0 (aktuální výšku od povrchu měří sonar).

Výsledná podoba textového řetězce může být např. 1115001, kde první dvě jedničky značí připojení aplikace k řídicí jednotce a roztočení vrtulí. Číslo 1500 reprezentuje nastavení výkonu motorů na 50 % (PWM signál 1,5 ms). Poslední jednička značí zapnutí letového režimu, kdy kvadrokoptéra drží aktuální výšku.

Výsledný řetězec je dále distribuován modulem XBee řídicí jednotce Arduino NANO, která na určené povely reaguje.



Obrázek 3.16 Ovládací aplikace

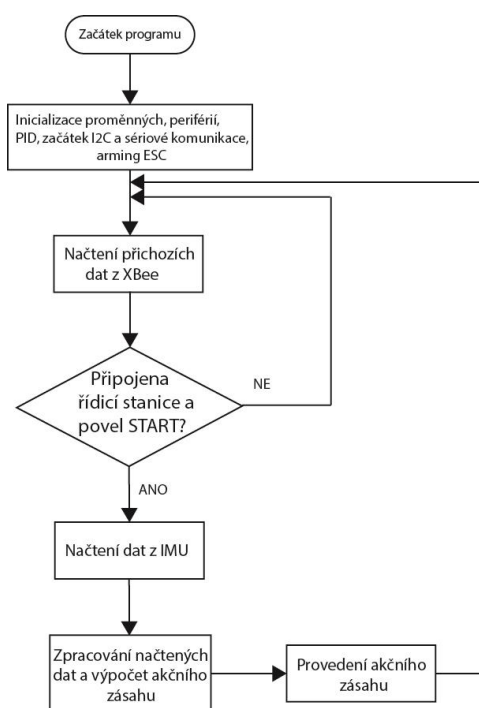
3.3.2 Software pro Arduino

Program pro řídicí jednotku je napsán v prostředí Arduino IDE v programovacím jazyku C++.

Největším omezením, se kterým se řídicí jednotka Arduino NANO potýká, je poměrně malý paměťový prostor určený pro program. V průběhu vývoje kvadrokoptéry a postupného rozšiřování funkcionality kódu se ukázalo, že 32 kB programové paměti je poměrně málo. Jsou zavedena určitá úsporná řešení, aby velikost paměťového prostoru pro program byla dostačující.

K řídicí jednotce jsou připojeny různé periferie. Sensory k určení polohy stroje v prostoru, modul XBee ke komunikaci s řídicí stanicí a frekvenční měniče. Při programování řídicí jednotky byly využity knihovny Arduino, díky kterým je práce s těmito periferiemi podstatně ulehčena.

Na obrázku Obrázek 3.17 Vývojový diagram řídicího algoritmu je zobrazen řídicí algoritmus. Hlavním úkolem řídicího algoritmu je načítání příchozího textového řetězce, načítání a zpracování dat z inerciální měřicí jednotky, výpočet akční veličiny pomocí softwarového PID regulátoru a provedení akčního zásahu.



Obrázek 3.17 Vývojový diagram řídicího algoritmu

Příchozí řetězec je zpracován pomocí knihovny Serial. Aby řetězec mohl být vůbec přijat, je důležité zahájit UART komunikaci. To je provedeno pomocí příkazu *Serial.begin(115200)*, kde 115200 baud/s určuje rychlost komunikace UART. K informaci, že v příchozím bufferu jsou nějaká data, slouží příkaz *Serial.available()*, který vrací *true* nebo *false*.

Příchozí řetězec je uložen do proměnné datového typu String příkazem *Serial.readString()*. Rozdělením textového řetězce na jednotlivé povely je dosaženo příkazem *prichoziRetezec.substring(od, do)*.

```
void xbeeCteni() {
    if (Serial.available()) {
        Serial.setTimeout(4);
        prichoziRetezec = Serial.readString();
        pripojeno = prichoziRetezec.substring(0, 1);
        start = prichoziRetezec.substring(1, 2);
        zakladniRychlost = prichoziRetezec.substring(2, 6).toInt();
    }
}
```

Práce s akcelerometrem a gyroskopem na čipu MPU-6050 je velmi zjednodušená knihovnou I2CLib od Jeffa Rowberga. Na stránkách autora je k dispozici několik příkladů použití. [30]

K regulování otáček elektromotorů ke stabilizaci kvadrokoptéry a držení aktuální výšky je implementován softwarový PID regulátor. Realizaci tohoto regulátoru usnadnila knihovna PID_v1.h. [31]

Princip inicializace PID regulátoru je založen na vytvoření instance objektu PID konstruktorem *PID (double* Input, double* Output, double* Setpoint, double Kp, double Ki, double Kd, int ControllerDirection)*. Proměnná *Input* je regulovaná veličina, *Output* je akční veličina a *Setpoint* hodnota, kterou má regulovaná soustava dosáhnout. Dále se zadávají konstanty jednotlivých složek PID regulátoru. Výpočet akční veličiny je proveden příkazem *Compute()*.

Další užitečné funkce jsou *SetTunning(double Kp, double Ki, double Kd)*, na změnu PID konstant v průběhu programu, a *SetOutputLimits(double min, double max)*, k nastavení mezních hodnot výstupu regulátoru.

PID regulátor je implementován na všechny tři osy (pitch, roll, yaw). Na základě akční veličiny jsou regulovány otáčky jednotlivých elektromotorů, čímž je dosaženo stabilního stavu kvadrokoptéry. Dále je PID regulátor použit k ustálení kvadrokoptéry v aktuální výšce. Ladění konstant PID regulátoru je popsáno v kapitole „Nastavení konstant PID regulátoru“.

Akční veličiny provádí akční zásahy prostřednictvím akčních členů. K řízení střídavého elektromotoru a frekvenčního měniče je importovaná knihovna *Servo.h*. Inicializace frekvenčních měničů je pomocí instancí *motorSever*, *motorJih*, *motorVychod*, *motorZapad* objektu *Servo*. Jednotlivé instance frekvenčních měničů jsou pomocí příkazu *attach (číslo pinu)* připojeny na definované piny.

```
Servo motorSever, motorJih, motorVychod, motorZapad;
```

```
#define escMotorJih 9
#define escMotorSever 10
#define escMotorZapad 11
#define escMotorVychod 12

void inicializaceESC() {
    motorSever.attach(escMotorSever);
    motorJih.attach(escMotorJih);
    motorVychod.attach(escMotorVychod);
    motorZapad.attach(escMotorZapad);
}
```

Funkce `writeMicroseconds()` nastaví na výstupní pin šířku pulzu, který určuje rychlost otáčení střídavého elektromotoru.

```
void aktualizaceMotory() {  
    {  
        motorSever.writeMicroseconds(motorSeverRychlost);  
        motorJih.writeMicroseconds(motorJihRychlost);  
        motorVychod.writeMicroseconds(motorVychodRychlost);  
        motorZapad.writeMicroseconds(motorZapadRychlost);  
    }  
}
```

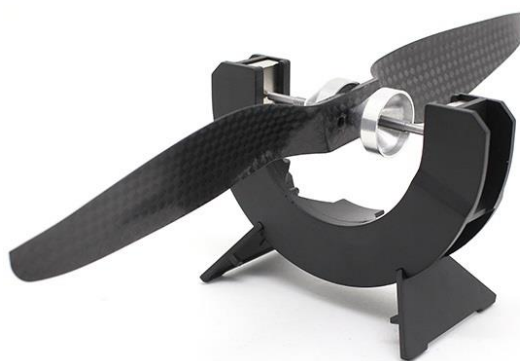
3.4 Stabilizace

3.4.1 Vyvážení elektromotorů a vrtulí

Základním krokem k úspěšné stabilizaci kvadrokoptéry je vyvážení elektromotorů a vrtulí. Nesprávně vyvážené elektromotory nebo vrtule při rotaci způsobují nepříjemné vibrace v celé konstrukci a negativně ovlivňují letové vlastnosti a IMU kvadrokoptéry.

Vyvážení vrtulí

K vyvážení vrtulí byla použita magnetická vyvažovačka vrtulí. Součástí vyvažovačky je osička, která se umístí do otvoru ve středu vrtule a vystředí vystřed'ovacími kuželi. Osička s vrtulí se horizontálně umístí do konstrukce s neodymovými magnety, kde drží díky magnetické síle. Správně vyvážená vrtule by při uvedení do horizontální pozice neměla změnit svoji polohu. Toho však nebylo dosaženo ani u jedné zakoupené vrtule. Důvodem je vyšší hmotnost jednoho ze dvou listů. Na lehčí stranu vrtulí byl nalepen tenký pruh lepicí pásky, aby se hmotnost obou listů vyrovnala.



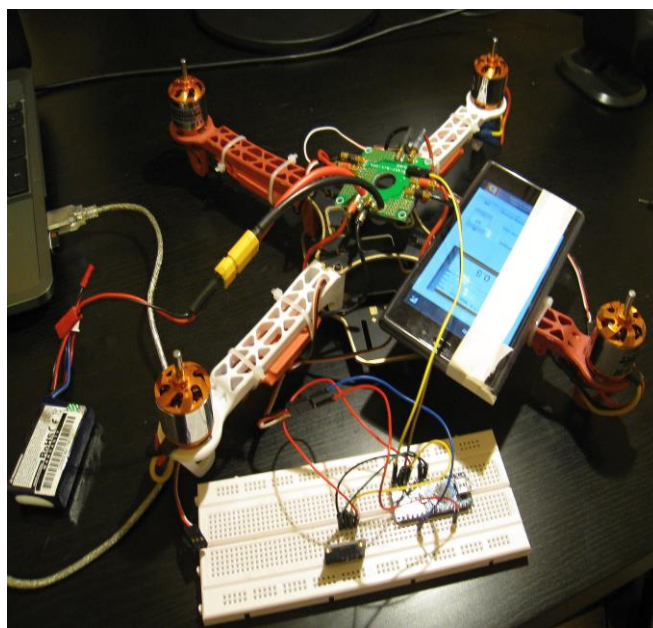
Obrázek 3.18 Vyvažovačka vrtulí

Vyvážení motorů

Dalším původcem vibrací jsou nevyvážené střídavé elektromotory. K vyvážení motorů byla použita jednoduchá metoda měření vibrací vibrometrem. Na místo vibrometru byl použit mobilní telefon s bezplatnou aplikací „Vibrometr“.

Na konstrukci kvadrokoptéry byl pomocí lepicí pásky připevněn mobilní telefon se spuštěnou aplikací. Elektromotor bez vrtule byl zapnut přibližně na polovinu maximálních otáček. Pomocí grafu v mobilní aplikaci byla vidět síla vibrací. V případě, že bylo množství vibrací neúnosné, musel být motor vyvážen. K vyvážení byl použit, stejně jako v případě vrtulí, malý pruh lepicí pásky.

Nebylo možné se u všech motorů zbavit veškerých vibrací, ale výsledek byl v porovnání s předchozím stavem znatelně lepší.



Obrázek 3.19 Průběh vyvažování motorů

3.4.2 Stabilizace polohy v prostoru

Stabilizace kvadrokoptéry byla řešena na základě dat z modulu MPU-6050 a sonaru HC-SR04, který byl použit místo globálního navigačního systému. Tato data byla následně použita PID regulátorem k výpočtu akčních veličin, kterými byly regulovány otáčky elektromotorů. V programu řídicí jednotky byly aplikovány softwarové PID regulátory, zvláště na data z modulu MPU-6050 a zvláště na data ze sonaru HC-SR04.

Na každou osu kvadrokoptéry x , y , z , viz Kinetický popis UAV, byl aplikován jeden PID regulátor, kde data získaná z MPU-6050 (úhly náklonu, sklonu a kurzu), byla použita jako regulační veličiny. Z rozdílu žádané a regulační veličiny vzniká regulační odchylka, na kterou reaguje regulátor výpočtem akční veličiny tak, aby byla odstraněna. V dané soustavě je žádaná veličina rovna nule. Konstanty PID regulátoru pro osy x a y byly nastaveny na stejné hodnoty, protože jsou osy navzájem nezávislé a regulace otáček motorů probíhá stejným způsobem.

Aby kvadrokoptéra byla schopna držet ve visu se stálou letovou výškou, byl aplikován další PID regulátor. Při zapnutí letového módu „Drž výšku“ prostřednictvím ovládací aplikace je tomuto PID regulátoru nastavena jako požadovaný

stav soustavy aktuální letová výška. Následně PID regulátor počítá akční veličinu na základě dat aktuální letové výšky, o které dostává informace ze sonaru HC-SR04.

Logika regulace otáček motorů na základě všech akčních veličin vypadá následovně:

```
if (modDrzVysku)
{
    motorJih = zakladniRychlost + vystupPitchPID - vystupRollPID
    - vystupYawPID + vystupSonarPID;
    MotorZapad = zakladniRychlost + vystupPitchPID + vystupRollPID
    + vystupYawPID + vystupSonarPID;
    motorSever = zakladniRychlost - vystupPitchPID + vystupRollPID
    - vystupYawPID + vystupSonarPID;
    motorVychod = zakladniRychlost - vystupPitchPID
    - vystupRollPID + vystupYawPID + vystupSonarPID;
}
else
{
    motorJih = zakladniRychlost + vystupPitchPID - vystupRollPID
    - vystupYawPID;
    motorZapad = zakladniRychlost + vystupPitchPID + vystupRollPID
    + vystupYawPID;
    motorSever = zakladniRychlost - vystupPitchPID + vystupRollPID
    - vystupYawPID;
    motorVychod = zakladniRychlost - vystupPitchPID
    - vystupRollPID + vystupYawPID;
}
```

3.5 Nastavení konstant PID regulátoru

Nastavování proporcionální, integrační a derivační konstanty probíhalo při stabilizaci výšky a vodorovné polohy kvadrokoptéry stejným způsobem. Inspirace k této kapitole a postupu nastavování konstant PID regulátoru je z [32].

Proporcionální složka

Při zvyšování proporcionální konstanty K_P se zvětšuje rozdíl mezi požadovaným náklonem a aktuální hodnotou náklonu, tzv. chybný signál. Dochází tím k čím dál většímu srovnávání kvadrokoptéry do horizontální polohy. Na určité hodnotě začne kvadrokoptéra lehce oscilovat. Při tomto stavu se kvadrokoptéra jednou překlápí na jednu stranu a po chvíli na stranu druhou. Při dalším zvyšování konstanty K_P nabere oscilace rostoucí charakter. Oscilace se budou samovolně zvětšovat. Použitím pouze proporcionální složky není možné kvadrokoptéru účinně stabilizovat.

Integrační složka

Integrační složka působí na kvadrokoptéru až postupem času. Integrace je sumací všech chybových signálů. Pokud je při výchozím stavu nastavena integrační konstanta K_I na určitou hodnotu a kvadrokoptéra je vychýlena z vodorovné pozice, nejprve se neděje nic a až postupem času se postupně začnou zvyšovat otáčky elektromotoru na té straně, na kterou je kvadrokoptéra vychýlena do doby, než se srovná do polohy oscilací okolo požadovaného bodu. V případě, že je hodnota konstanty K_I příliš vysoká, dostanou oscilace zvyšující charakter, jako v případě proporcionální složky.

Derivační složka

Derivační složka představuje rozdíl aktuálního chybového signálu a předchozího chybového signálu. Tato složka působí proti jakékoliv změně polohy zařízení.

3.5.1 Proces určení konstant PID

Je několik různých metod, které vedou k získání jednotlivých konstant PID regulátoru. Nejpoužívanějším typem je Ziegler-Nicholsova metoda, která je jednoduchá, avšak velmi účinná. Bohužel aplikování této metody nevedlo k uspokojivým výsledkům, a tak bylo použito manuální nastavování na základě vizuálního vjemu.

Při procesu nastavování konstant PID regulátoru byla kvadrokoptéra umístěna do testovacího stojanu a zajištěna, aby v případě špatně nastavených konstant nemohla napáchat hmotné škody. Ve výchozím stavu byly všechny konstanty PID regulátoru nastaveny na 0, čímž byly vyřazeny jednotlivé složky.

1. Postupně byla zvyšována proporcionální konstanta K_p do doby, než kvadrokoptéra začla lehce oscilovat. V tomto bodě byla proporcionální konstanta snížena na předchozí hodnotu, kdy byla kvadrokoptéra bez viditelných oscilací. Tato hodnota byla zvolena jako proporcionální konstanta K_p .
2. Postupně byla zvyšována derivační konstanta K_D , do doby než se projeví oscilace. Následně byla hodnota derivační konstanty ubrána o 10 % a tato hodnota byla zvolena jako derivační konstanta K_D . Poté byl opakován krok 1. a krok 2.
3. Jako poslední, byla postupně přidávána po malých hodnotách integrační konstanta K_I do doby, než byly viditelné oscilace. Následně byla hodnota integrační konstanty ubrána o 10 % a nastavena jako integrační konstanta K_I .

Tímto popsaným postupem bylo dosaženo v průběhu několika testů k uspokojivé stabilitě kvadrokoptéry. K regulaci kvadrokoptéry ve visu byl použit stejným postup k nalezení konstant PID regulátoru.

3.6 Testování

Průběžné testování probíhalo souběžně s konstrukcí kvadrokoptéry. Pokaždé, když byla implementována nová část hardwaru či naprogramovaná nová funkcionality, bylo nezbytné otestovat správnost řešení. Bez správné funkčnosti by nebylo možné na systém navázat a dále ho rozšiřovat.

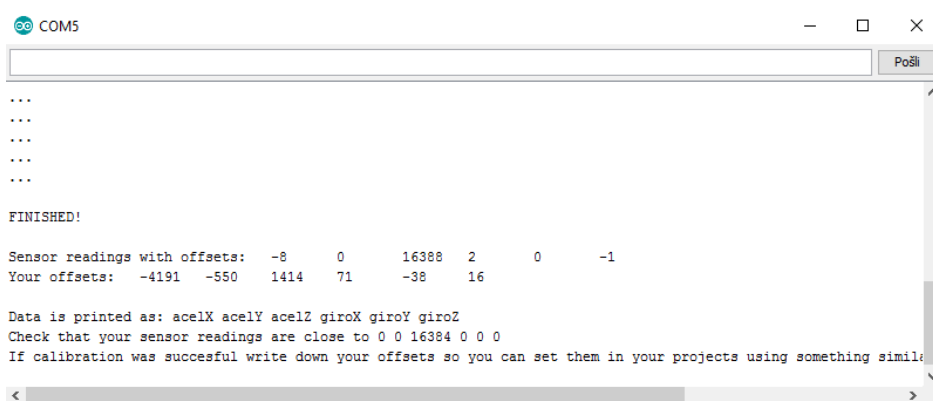
Během konstrukce kvadrokoptéry muselo být provedeno několik různých testů. Jednalo se o testování:

- modulů
- komunikace
- řídicího systému
- stability

3.6.1 Testování modulů

MPU-6050

Testováním měla být zjištěna správnost měření a výpočtu polohy v prostoru. Modul MPU-6050 byl připojen k Arduino Nano, ve kterém byl nahrán program, který po sériové lince vypisoval do konzole hodnoty úhlů pitch, roll a yaw. Na základě analýzy změn polohy senzoru a výpisu v konzoli PC bylo zjištěno, že senzor není správně zkalibrován. Kalibrace byla provedena pomocí knihovny I2Clib [30], která umožňuje výpočet offsetů akcelerometru a gyroskopu, které byly následně použity ke kalibraci.



```
COM5
...
...
...
...
...
FINISHED!

Sensor readings with offsets:  -8      0      16388  2      0      -1
Your offsets:  -4191  -550   1414   71     -38    16

Data is printed as: accelX accelY accelZ giroX giroY giroZ
Check that your sensor readings are close to 0 0 16384 0 0 0
If calibration was successful write down your offsets so you can set them in your projects using something similar
```

Obrázek 3.20 Výpočet offsetů

Sonar HC-SR04

Test sonaru HC-SR04 probíhal podobně jako u předchozího modulu. Sonar byl připojen k Arduino Nano, které do konzole PC vypisovalo vzdálenost mezi sonarem a překážkou, která byla před sonar umístěna. Nejprve byla tato vzdálenost změřena pomocí stahovacího metru a následně porovnána s výpisem. Na základě testu bylo zjištěno, že použitý sonar je přesný bez větších odchylek přibližně do vzdálenosti 1,2m.

Moduly XBee

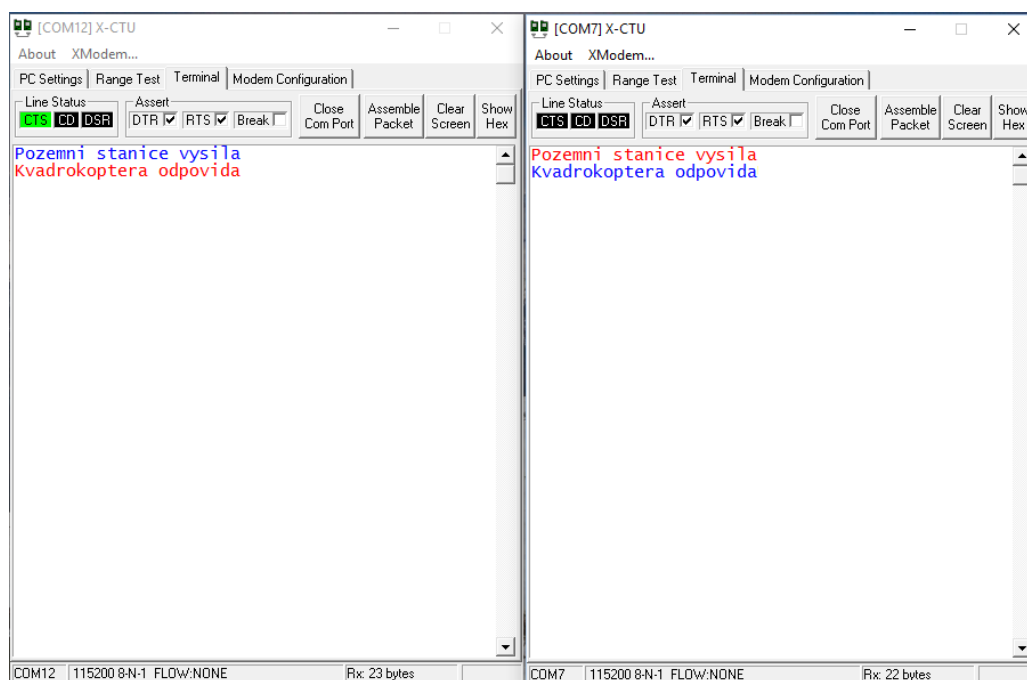
Ověření funkčnosti obou modulů XBee bylo uskutečněno pomocí programu X-CTU. Spočívalo pouze v připojení jednotlivých modulů XBee přes UART – USB převodník k PC a kontroly možného připojení. V programu X-CTU je v záložce „PC settings“ implementována funkce „Test/Query“, která po správném nastavení parametrů připojení vypíše informace o připojeném modulu.

Frekvenčních měniče a střídavé elektromotory

Po seřízení všech frekvenčních měničů pomocí programovací karty a nastavení šířky přijímaných PWM pulzů na 1-2 ms, byl proveden test s připojenými elektromotory. Test byl založen na posílání stejného PWM signálu jednotlivým frekvenčním měničům, které na jeho základě měnily rychlost otáček střídavých elektromotorů. Byla sledována změna otáček elektromotorů, která v případě správné konfigurace měničů musela být u všech čtyř motorů stejná.

3.6.2 Test komunikace

Po parametrizování obou modulů XBee bylo možné mezi nimi odzkoušet komunikaci. K tomuto kroku byl opět použit program X-CTU. V záložce „Terminal“ je umožněno posílat a přijímat data mezi moduly. V tomto kroku byla odladěna i ovládací aplikace pro pozemní stanici. Bylo kontrolováno správné zasílání textových řetězců.



Obrázek 3.21 Navázání komunikace

3.6.3 Test řídicího systému

V první řadě bylo zkoumáno správné připojení pozemní řídicí stanice ke kvadroptéře. K jednoduchému ověření připojení slouží zelená LED dioda, která je součástí realizovaného řídicího systému. Dioda svým rozsvícením signalizuje, že řídicí systém přijal data od pozemní ovládací stanice a je připraven přijímat další povely. Tento krok proběhl hned na první pokus v pořádku.

Dalším předmětem zkoumání byla správnost přijímaného textového řetězce a reakcí řídicího systému na jednotlivé povely, které byly posílány. Protože byly všechny prvky

řídícího systému samostatně odladěny již v předchozím dění, nebylo nijak složité a časově náročné implementovat jednotný řídicí systém.

3.6.4 Test stability

Při testu stability byla kvadrokoptéra umístěna do testovací konstrukce a důkladně připevněna. Po vzletu byla sledována celková stabilita zařízení. Na základě sledování byly doladěny konstanty PID regulátorů, aby bylo dosaženo lepších výsledků a stabilizování kvadrokoptéry.

4 Závěr

Cílem této práce byla kompletní realizace stabilizované a letuschopné multikoptéry založené na platformě Arduino Nano komunikující protokolem ZigBee a naprogramování ovládacího softwaru pro pozemní řídicí stanici. K dosažení těchto cílů musel být proveden celkový rozbor multirotorových zařízení a na jejím základě sepsán teoretický základ, ze kterého bylo čerpáno v průběhu realizace multikoptéry v praktické části práce.

Výsledkem praktické části práce je zrealizovaná multikoptéra typu kvadrokoptéra, jejíž přední vlastností je možnost použití v uzavřených objektech, neboť není závislá na žádném globálním polohovacím systému.

Aby kvadrokoptéra byla letuschopná, stabilizovaná a ovladatelná, byl navrhnut a sestaven řídicí systém, který se skládá z řídicí jednotky, IMU a komunikačního subsystému. K realizaci řídicího systému byly použity samostatné komponenty, které bylo nutné provázat a vytvořit z nich jednotný systém. V komunikačním subsystému byl použit komunikační modul XBee podporující protokol ZigBee. V roli řídicí jednotky je Arduino Nano, které se stará o zpracování dat z IMU (3D akcelerometr a 3D gyroskop MPU-6050 a sonar HC-SR04), obsluhuje komunikační subsystém a ovládá akční členy. Pro řídicí jednotku byl naprogramován řídicí program v jazyku C++.

Kvadrokoptéra je ovladatelná prostřednictvím ovládací pozemní stanice, představující PC a druhý modul XBee. Pro ovládací stanici byla naprogramovaná ovládací aplikace v jazyku Java.

V průběhu návrhu a realizace kvadrokoptéry se vyskytlo několik zásadních problémů. Největší problém se vyskytl u řídicí jednotky, neboť byl nedostačující paměťový prostor pro řídicí program, a tak musel být navrhnout kompletně znovu s jistými úpravami. Dalším problémem byl vznik šumu a nežádoucích odchylek ve výsledcích měření senzorů, které negativně ovlivňují výsledky a znesnadňují dokonalou stabilizaci kvadrokoptéry v prostoru. Tento problém by mohl být vyřešen použitím sofistikovanějších senzorů v IMU, např. náhrada sonaru za LIDAR pro přesnější určení výšky stroje, tato optimalizace systému by přinesla další finanční nároky na projekt.

Všechny cíle práce, které byly na počátku stanoveny, se povedlo uspokojivě splnit. Při navázání na práci je možné kvadrokoptéru rozšířit o další funkcionality, zlepšit letové vlastnosti, či rozšířit možnosti ovládací aplikace.

5 Seznam použité literatury

- [1] Flight Physics. In: *Qdrone Project Website* [online]. 2012 [cit. 2016-03-19]. Dostupné z: <http://qdrone.jimdo.com/project/flight-physics/>
- [2] Quadcopter Dynamics, Simulation, and Control.pdf. In: *ResearchGate* [online]. b.r. [cit. 2016-03-19]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html>
- [3] Encyklopedie fyziky: Eulerovy úhly. *Encyklopedie fyziky* [online]. b.r. [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/108-eulerovy-uhly>
- [4] VÝRUT, Radek. *Kvaternion*. [přednáška]. Plzeň: ZCU, 1. dubna 2009
- [5] NOVÁK, Petr. *Mobilní roboty: pohony, senzory, řízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 8073001411.
- [6] Multirotor frame configurations. In: *Coptercraft* [online]. Coptercraft Ltd, 2015 [cit. 2016-03-24]. Dostupné z: <http://www.coptercraft.com/multirotor-frame-configurations/>
- [7] How to Make a Drone / UAV – Lesson 3: Propulsion. *RobotShop* [online]. RobotShop Inc, 2016 [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://www.robotshop.com/blog/en/make-uav-lesson-3-propulsion-14785>
- [8] *MultiWii* [online]. MultiWii, b.r. [cit. 2016-03-19]. Dostupné z: <http://www.mutiwii.com>
- [9] *AeroQuad* [online]. vBulletin Solutions, 2016 [cit. 2016-03-19]. Dostupné z: <http://aeroquad.com/content.php>

- [10] VODA, Zbyšek. *Průvodce světem Arduina*. Vydání první. Bučovice: Martin Stříž, 2015. ISBN 9788087106907.
- [11] MALÝ, Martin. Arduino: jak pro něj začít programovat. *Root.cz* [online]. 2010, , 1 [cit. 2016-03-02]. ISSN 1212-8309. Dostupné z: <http://www.root.cz/clanky/arduino-jak-pro-nej-zacit-programovat/>
- [12] GÁBLÍK, Petr. *Quadcopter - stabilizace a regulace*. Brno: VUT 2010. Bakalářská práce. VUT, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky
- [13] Regulační obvody. *Katedra automatizační techniky a řízení: Fakulta strojní* [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2012 [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: http://www.352.vsb.cz/uc_texty/synteza/text02.htm
- [14] Integrované MEMS GYROSKOPY. In: *Automatizace.HW.cz* [online]. HW server s.r.o, 1997 [cit. 2016-03-12]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/integrované-mems-gyroskopy>
- [15] HUSÁK, Miroslav. *Akcelerometry* [přednáška]. Praha: CVUT, b.r. [cit. 2016-03-12].
- [16] DOLANSKÝ, Tomáš. *Lidary a letecké laserové skenování*. Vyd. 1. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2004. Acta Universitatis Purkynianae. ISBN 8070445750.
- [17] BEDNÁŘ, Jan. *Meteorologie: [úvod do studia dějů v zemské atmosféře]*. Vyd. 1. Praha: Portál, 2003. ISBN 80-717-8653-5.
- [18] *The ZigBee Alliance* [online]. The ZigBee Alliance, 2016 [cit. 2016-02-27]. Dostupné z: <http://www.zigbee.org/zigbeealliance/>

- [19] KOTON, J., P. ČÍKA a V. KŘIVÁNEK Standard nízkorychlostní bezdrátové komunikace ZigBee. In: *Access server* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006 [cit. 2016-02-27]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2006032001>
- [20] El. motory a jejich řízení - základní přehled - 1.díl. *Automatizace.HW.cz* [online]. HW server s.r.o, 1997 [cit. 2016-03-16]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/el-pohony-mereni-a-regulace/el-motory-a-jejich-řízení-zakladni-prehled.html>
- [21] ZDAŘIL, Tomáš. *Regulátor otáček pro střídavé motory*. [online] Brno: VUT 2012, Diplomová práce, VUT, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky.
- [22] SODOMKA, Tomáš. *Mobilní nabíječ Li-pol baterií s funkcí BMS pro studentský experimentální elektromobil* [online]. Pardubice , 2010, Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Ing. Ondřej Černý, Ph.D.
- [23] Vlastnosti a údržba akumulátorů. *Nářadí Slavkov s.r.o.* [online]. b.r. [cit. 2016-03-16]. Dostupné z: <http://www.azvercajk.cz/11064-repase-akumulatoru/>
- [24] Akumulátory. *Monako* [online]. 2004 [cit. 2016-03-16]. Dostupné z: http://www.mo-na-ko.net/ruzne_acupack.htm
- [25] *DJI* [online]. Šen-čen, Čínská lidová republika, 2006 [cit. 2016-03-31]. Dostupné z: <http://www.dji.com/>
- [26] D2836/9 Out Runner Brushless Motor Instruction. *HobbyKing* [online]. 2016 [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uploads/1013956805X669553X18.pdf>

- [27] TURNIGY Plush 30amp Speed Controller w/BEC. *Hobbyking.com* [online]. b.r. [cit. 2016-03-16]. Dostupné z: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__2164__TURNIGY_Plush_30amp_Speed_Controller_w_BEC.html
- [28] MPU-6050 Six-Axis (Gyro + Accelerometer) MEMS MotionTracking™ Devices. *InvenSense* [online]. 2016 [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: <http://www.invensense.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/>
- [29] XBee 2mW Wire Antenna - Series 2. *Sparkfun* [online]. 2016 [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/10414>
- [30] *I2Cdevlib* [online]. Jeff Rowberg, b.r. [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: <http://www.i2cdevlib.com/>
- [31] What Is PID?. In: *Arduino* [online]. b.r. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://playground.arduino.cc/Code/PIDLibrary>
- [32] Stavíme kvadroptéru: PID regulátor. In: *Root.cz* [online]. Root.cz, b.r. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://www.root.cz/clanky/stavime-kvadropteru-pid-regulator/#ic=serial-box&icc=text-title>

6 Seznam obrázků a tabulek

Obrázky

Obrázek 1.1 Směry otáčení vrtulí.....	4
Obrázek 1.2 Fyzikální model	5
Obrázek 1.3 Eulerovy úhly.....	6
Obrázek 2.1 Obecné blokové schéma multikoptéry.....	7
Obrázek 2.2 Schéma trikoptéra	9
Obrázek 2.3 Schéma kvadrokoptéra.....	9
Obrázek 2.4 Schéma hexakoptéra, octokoptéra	10
Obrázek 2.5 Schéma coaxial	10
Obrázek 2.6 Průměr vrtule	11
Obrázek 2.7 Úhel náběhu vrtule [7].....	11
Obrázek 2.8 Stoupavost vrtule [7].....	11
Obrázek 2.9 Blokové schéma regulátoru [13].....	14
Obrázek 2.10 PID regulátor [13].....	15
Obrázek 2.11 Osy gyroskopu	17
Obrázek 2.12 Osy akcelerometru	17
Obrázek 3.1 Blokové schéma s konkrétními komponentami.....	26
Obrázek 3.2 DJI WheelFlame F330 [25]	26
Obrázek 3.3 Turnigy D2836/9 [26].....	28
Obrázek 3.4 Frekvenční měnič Turnigy Plush 30A	28
Obrázek 3.5 CW a CCW vrtule 8045 z uhlíkových vláken	29
Obrázek 3.6 Senzor GY-521 [28].....	30
Obrázek 3.7 Vyzařovací diagram sonaru (rozměr ve stopách) [5].....	31
Obrázek 3.8 Sonar HC-SR04 [5].....	31
Obrázek 3.9 Modul XBee.....	32
Obrázek 3.10 Schéma zapojení systému	34
Obrázek 3.11 Řídicí systém kvadrokoptéry	34
Obrázek 3.12 Finální podoba kvadrokoptéry	35

Obrázek 3.13 Program X-CTU	36
Obrázek 3.14 X-CTU konfigurace XBee modulů.....	37
Obrázek 3.15 Schéma komunikace mezi moduly	38
Obrázek 3.16 Ovládací aplikace.....	39
Obrázek 3.17 Vývojový diagram řídicího algoritmu	40
Obrázek 3.18 Vyvažovačka vrtulí	44
Obrázek 3.19 Průběh vyvažování motorů	45
Obrázek 3.20 Výpočet offsetů.....	50
Obrázek 3.21 Navázání komunikace.....	51

Tabulky

Tabulka 1 Přehled přenosových rychlostí ZigBee [19].....	20
Tabulka 2 Parametry Turnigy D2836/9 [26]	28
Tabulka 3 Výsledky XcopterCalc.....	29
Tabulka 4 Parametry modul XBee [29].....	31

7 Přílohy

Příložené CD obsahuje elektronickou verzi práce ve formátu PDF a zdrojový kód řídicího systému kvadrokoptéry a ovládací aplikace. Software řídicího systému je ve formě projektu ve vývojovém prostředí Arduino IDE. Software ovládací aplikace je přiložen jako projekt vývojového prostředí NetBeans IDE 8.0.2.