



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra mikroelektroniky

Řídicí systém pro trikoptéru

Control System for Tricopter

Diplomová práce

Bc. Petr Jeník

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Studijní obor: Elektronika

Vedoucí práce: Ing. Lubor Jirásek, CSc.

2014

Praha

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra mikroelektroniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. J E N Í K Petr**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Elektronika

Název tématu: **Řidicí systém pro trikoptéru**

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte dostupnou literaturu týkající se problematiky řízení modelů letadel s kolmým startem. Zaměřte se speciálně na řešení řídicího a sensorového systému a řešení napájecí soustavy.
2. Na základu 1) navrhnete a realizujete řídicí a sensorový systém pro trikoptéru a napájecí systém letadla s rotující nosnou plochou.
3. Navrhnete postup vhodný pro ověření funkce přístroje.
4. Provedte ověřovací měření na zařízení.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky.
6. Publikování výsledků dosažených v této práci je možné pouze se svolením zadavatele.

Seznam odborné literatury:

- [1] Husák, M.: Mikrosenzory a mikroaktuátory. Academia, Praha 2008.
[2] Krejčířík, A.: Napájecí zdroje I.-III. Ben, Praha 1996 a pozdější vydání.
[3] Katalogové listy součástek a aplikační poznámky výrobců.

Vedoucí: **Ing. Lubor Jirásek, CSc.**

Platnost zadání: 31. 8. 2015

L.S.

Prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 29. 1. 2014

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Řídicí systém pro trikoptéru“ jsem vypracoval samostatně a všechny podklady, ze kterých jsem čerpal, jsem uvedl v seznamu použité literatury.

V Praze dne

.....
podpis

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu své práce Ing. Luboru Jiráskovi, CSc. za cenné rady a odborné vedení při tvorbě práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za trpělivost a podporu v době mého studia a při psaní diplomové práce.

Abstrakt:

Tato diplomová práce se zabývá teoretickým rozborem a praktickou stavbou řídicího systému pro trikoptéru. V teoretické části je vysvětlena funkce použitých senzorů. Dále jsou zde vysvětleny základní teoretické principy vyhodnocení dat ze senzorů a princip regulace náklonu. V další části je popis použitého a vytvořeného hardwaru. Poslední část je věnována funkci vytvořeného softwaru a způsobu vzdáleného ovládní zařízení.

Klíčová slova: trikoptéra, gyroskop, akcelerometr, regulace, Raspberry Pi

Abstract:

The objective of this diploma thesis is to develop a control system for tricopter. The theoretical part contains an explanation of basic principles of evaluation data from sensors and basic principles of tilt regulation. In next chapter is hardware description. Last chapter contains description of software.

Key words: tricopter, gyroscope, accelerometer, regulation, Raspberry Pi

Obsah

1 Úvod.....	1
2 Podobné projekty.....	3
3 Popis trikoptyry.....	4
3.1 Fyzikální popis.....	4
3.1.1 Rozložení sil.....	4
3.1.2 Rozdělení výkonu mezi jednotlivé motory.....	6
3.2 Blokové schéma zařízení.....	7
4 Součásti modelu.....	8
4.1 Motor.....	8
4.2 Vrtule.....	8
4.3 ESC - frekvenční měnič.....	9
4.3.1 Možnosti ESC.....	10
4.3.2 Firmware ESC.....	10
4.4 Servomotor	11
4.5 Akumulátor.....	12
5 Senzorový systém.....	13
5.1 Akcelerometr.....	13
5.2 Gyroskop.....	15
5.3 Ultrazvukový senzor vzdálenosti.....	17
6 Hardware.....	18
6.1 Raspberry Pi.....	18
6.1.1 Wi-Fi.....	19
6.1.2 Kamera.....	19
6.2 PWM generátor.....	19
6.3 Řídicí deska ultrazvukových modulů.....	20
6.3.1 Převodník USB-UART.....	21
6.4 Napájecí modul.....	22
6.5 LED osvětlení.....	22
7 Vyhodnocení dat ze senzorů.....	23

7.1	Převod měřených dat na fyzikální veličiny	23
7.2	Korekce chyb senzorů.....	24
7.2.1	Gyroskop.....	24
7.2.2	Akcelerometr.....	24
7.3	Měření náklonu.....	25
7.3.1	Filtrace signálu filtrem typu dolní propust.....	26
7.3.2	Komplementární filtr.....	28
7.4	Naměřené hodnoty.....	30
8	Regulace.....	33
8.1	PID regulace.....	33
8.1.1	Terminologie PID.....	34
8.1.2	P složka regulátoru.....	36
8.1.3	I složka regulátoru.....	36
8.1.4	D složka regulátoru.....	37
8.2	PD regulátor.....	37
8.3	PI regulátor.....	37
8.4	PID regulátor.....	38
8.5	Ladění regulátoru.....	38
8.6	Uspořádání regulátorů.....	39
9	Software.....	41
9.1	Přenos telemetrie do PC.....	41
9.2	Ovládání z PC.....	41
9.2.1	Hlavní obslužný program.....	42
9.2.2	Fotoaparát.....	43
9.2.3	Monitorování ultrazvukových senzorů.....	44
9.2.4	Joystick.....	44
9.3	Software v zařízení.....	45
9.4	Software pro PWM generátor.....	45
9.5	Software pro řídicí desku ultrazvukových modulů.....	46
10	Zhodnocení výsledků a případná budoucí vylepšení.....	48

11 Závěr.....	51
12 Zdroje.....	52
13 Seznam ilustrací.....	54
14 Seznam tabulek.....	55
15 Seznam použitých zkratk a symbolů.....	56
16 Přílohy.....	57
16.1 Motivy desek plošných spojů	57
16.2 Ekonomické zhodnocení.....	58
16.3 Obsah příloženého CD.....	59

1 Úvod

Zadání této práce je navrhnout a zkonstruovat řídicí systém pro trikoptéru. Trikoptéra je jeden z mnoha typů vícerotorových vrtulníků. Její princip bude popsán v následujících kapitolách.

V současnosti je na vzestupu obliba vícerotorových modelů, především kvadrokoptér. Výhoda těchto modelů je především jejich mechanická jednoduchost, stabilní let, možnost vznášet se na místě a schopnost startu z velmi malé plochy. Jejich použití se z vojenského sektoru dostává postupně i do amatérské či komerční sféry. Používají se převážně v kombinaci s dálkovým přenosem videa, například pro vzdálenou kontrolu stavebních konstrukcí, anténních vysílačů, budov a jiných těžce přístupných míst v případě, že je vizuální kontrola dostačující. Další příkladem využití může být policejní sledování jednotlivců nebo celého davu, natáčení filmových scén ze vzduchu, vysílání krátkých přímých přenosů atd. Použití je mnoho a každým dnem se objevují další.

Na rozdíl od modelů letadel jsou vícerotorové modely velmi nestabilní. Jejich ovládání je bez podpory stabilizačního systému nemožné. Vyžadovaná rychlost a přesnost regulačních zásahů je daleko za možnostmi lidského pilota, a proto je nutné v těchto modelech používat stabilizačních zařízení. Od pilota jsou přenášeny pouze údaje o požadovaném směru a rychlosti letu. Úkolem této práce je takový stabilizační systém navrhnout a zrealizovat, a to včetně nutných podpůrných systémů, jako je napájecí systém, sensorový systém, komunikační rozhraní atd.

Pro ovládání je použito běžné PC, interakce s pilotem probíhá pomocí klávesnice a pákového ovladače. Pro komunikaci je použita WiFi síť. Tím je značně omezen dosah zařízení na přibližně 50 m – 100 m, ale velmi se zjednoduší obousměrný přenos dat mezi PC a zařízením. Pokud bude výsledek práce uspokojivý, lze bez problémů nahradit WiFi za jiný komunikační hardware, který nebude mít taková omezení. Zařízení je doplněno o signalizační LED, osvětlení pro lepší viditelnost za letu, ultrazvukové senzory vzdálenosti a několik dalších senzorů.

Pro měření náklonu, směru a rychlosti pohybu je použit MEMS (Mikro Elektro Mechanický Systém) gyroskop a akcelerometr. Stabilizace je zajištěna pomocí PID regulátorů. Frekvence regulačních zásahů by neměla být menší než 100 Hz. Ideální by byla spojitá regulace, avšak té se můžeme v digitálních systémech pouze přiblížit.

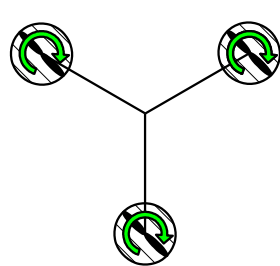
Velký důraz je kladen na filtraci měřených signálů. Bez spolehlivého měření náklonu a rychlosti rotace zařízení není možné trikoptéru uvést do provozu. Do signálu z akcelerometru se dostává veliké množství rušení a zrychlení způsobené vibracemi může být srovnatelné s gravitačním zrychlením. Proto je potřeba použít další způsob měření náklonů, a to pomocí integrace úhlové rychlosti, kterou měří gyroskop. Ten je velmi odolný vůči vibracím, ale drift jeho offsetu společně s chybou numerické integrace znemožňují jeho samostatné použití.

Vytvořený hardware, senzorový systém, stabilizační systém a vyvinutý software budou detailněji popsány v následujících kapitolách.

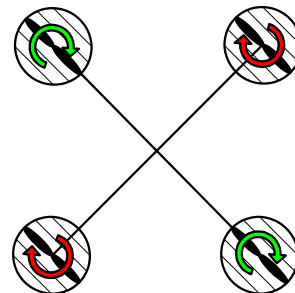
2 Podobné projekty

Mezi základní typy multirotorových zařízení patří všem dobře známá helikoptéra, dále trikoptéra, kvadrokoptéra, hexakoptéra, oktokoptéra a další modely s rozdílným počtem a rozložením vrtulí. Nejčastější rozložení vrtulí a směr jejich otáčení jsou uvedeny na obr. 1 .

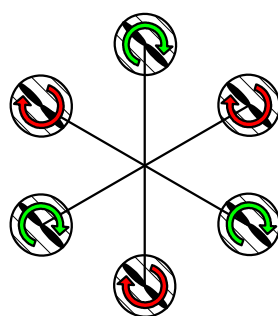
Na trhu je dostupných mnoho kompletních leteckých modelů, ale prakticky žádný výrobce neposkytuje teoretické informace o způsobu řízení a stabilizaci. Je možné zakoupit samotný řídicí systém. K dostání je mnoho univerzálních řídicích systémů, které lze podle potřeby nastavit pro stabilizaci různých typů modelů. Většina těchto systémů má stejné základní rysy. Jsou postaveny na osmibitových mikroprocesorech a pro měření náklonu využívají elektronický gyroskop v kombinaci s akcelerometrem. Některé systémy využívají senzor atmosferického tlaku pro stabilizaci výšky letu. K pokročilejším lze připojit GPS modul. Ten umožňuje v případě ztráty signálu automatický návrat zařízení na startovní pozici. Některé tyto prvky jsou použity i v této práci, například použití stejného typu senzorů.



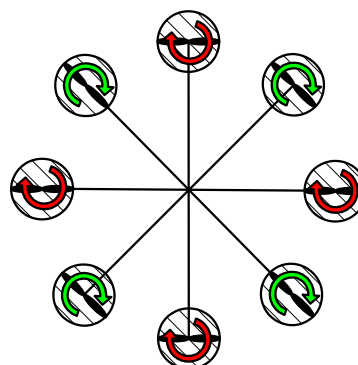
a) Trikoptéra



b) Kvadrokoptéra



c) Hexakoptéra



d) Oktokoptéra

obr. 1: Typy multirotorových systémů

3 Popis trikoptyéry

Trikoptyéra je třírotorový letoun s kolmým startem. Skládá se ze tří ramen, která vůči sobě svírají úhel 120° . Na konci ramen jsou umístěny motory. Všechna ramena jsou stejně dlouhá. U každého motoru je umístěn výkonový frekvenční měnič pro řízení otáček motoru. Ve středu zařízení je umístěna řídicí deska společně se senzory. Konstrukce musí být dobře vyvážená, těžiště by mělo pokud možno ležet v geometrickém středu zařízení.

Kromě nejnütnějších senzorů, jako je akcelerometr a gyroskop, jsem se rozhodl vybavit zařízení dalšími senzory a signalizací. Mezi ně patří ultrazvukové senzory vzdálenosti, elektronický kompas, barometr pro měření atmosferického tlaku, teploměr, hodiny reálného času, kamera a LED osvětlení.

Konstrukcí se trikoptyéra velmi podobá kvadrokoptyře. Liší se pouze počtem vrtulí a způsobem, kterým je kompenzován rotační moment vzniklý otáčením vrtulí.

3.1 Fyzikální popis

V porovnání s modelem vrtulníku či letadla je konstrukce trikoptyéry mechanicky jednodušší. U letadla je směr pohybu ovládán mechanicky pomocí vztlakových klapek a směrového kormidla. U helikoptyéry je směr pohybu ovládán pomocí změny náklonu listů hlavního rotoru a změnou otáček zadního rotoru. U trikoptyéry se rotace kolem osy Z ovládá náklonem zadního motoru. Všechny ostatní pohyby jsou řízeny elektronicky změnou otáček příslušných motorů.

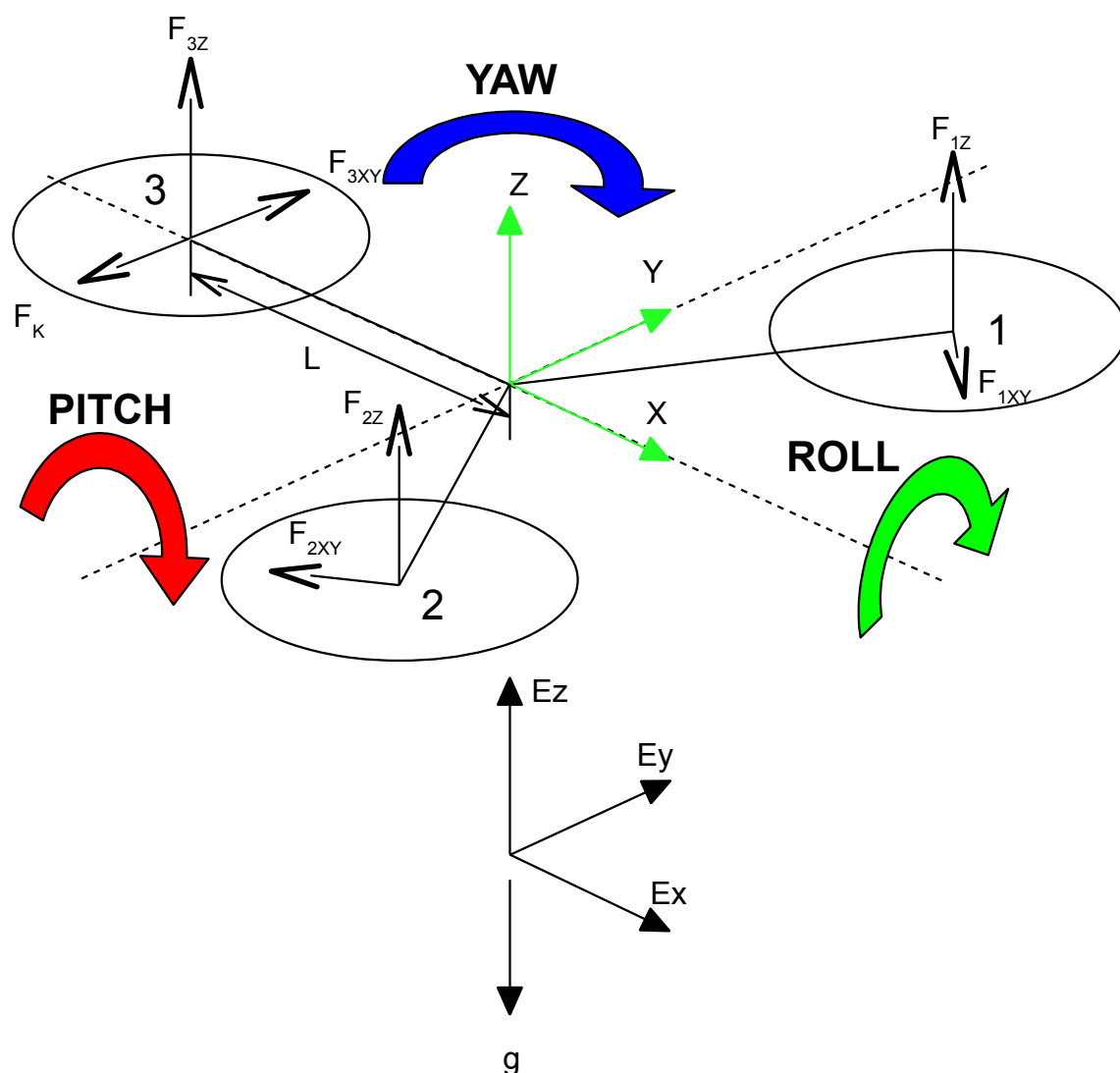
Například pokud má model letět směrem vpřed, řídicí elektronika jej musí stabilizovat pod malým kladným nenulovým úhlem vůči zemi. Tím jsou motory číslo 1 a číslo 2 níže než těžiště, motor číslo 3 je nad těžištěm a celý model se začne pohybovat směrem vpřed.

3.1.1 Rozložení sil

Na obr. 2 je znázorněno rozložení základních sil, které působí na konstrukci. Motor číslo 1 vyvolává tah, který způsobí sílu F_1 . Tato síla má složky F_{1Z} , která působí ve směru osy Z , a složku F_{1XY} . Tato složka je způsobena rotací vrtule a působí v rovině vytyčené osami X a Y kolmo k ramenu, na kterém je přidělán motor. Stejně síly působí

u obou ostatních motorů. Všechny tři síly působící v ose XY se sečtou a způsobí rotaci modelu kolem osy Z. Řízeným nakloněním zadního motoru dojde ke změně směru působení síly F_3 . F_K je kompenzační síla, která vznikne tímto nakloněním. Její směr a velikost je funkce úhlu naklonění zadního motoru. Motor musí být nakloněn pod takovým úhlem, aby platilo, že $F_{1XY} + F_{2XY} + F_{3XY} = F_K$. Tím jsou nežádoucí síly kompenzovány a model přestane rotovat. Tento mechanismus je detailněji popsán v kapitole 4.4 Servomotor .

Náklon zařízení se udává v úhlech zvaných Yaw, Roll a Pitch. Jejich význam je vyznačený na obr. 2. Jedná se o úhly, o které je pootočená vztažná soustava s počátkem ve středu modelu vůči vztažné soustavě na zemském povrchu.



obr. 2: Rozložení hlavních sil působících na konstrukci

3.1.2 Rozdělení výkonu mezi jednotlivé motory

Z obr. 2 je patrné, že na změnu úhlu Roll nemá motor č. 3 žádný vliv. Zvýšení tohoto úhlu je zajištěno snížením výkonu prvního motoru a zvýšením výkonu druhého motoru. A naopak. Úhel Pitch je regulován zvýšením výkonu motoru č. 3 a snížením výkonu obou předních motorů.

Pro jednotlivé tahy motorů tedy platí následující vztahy:

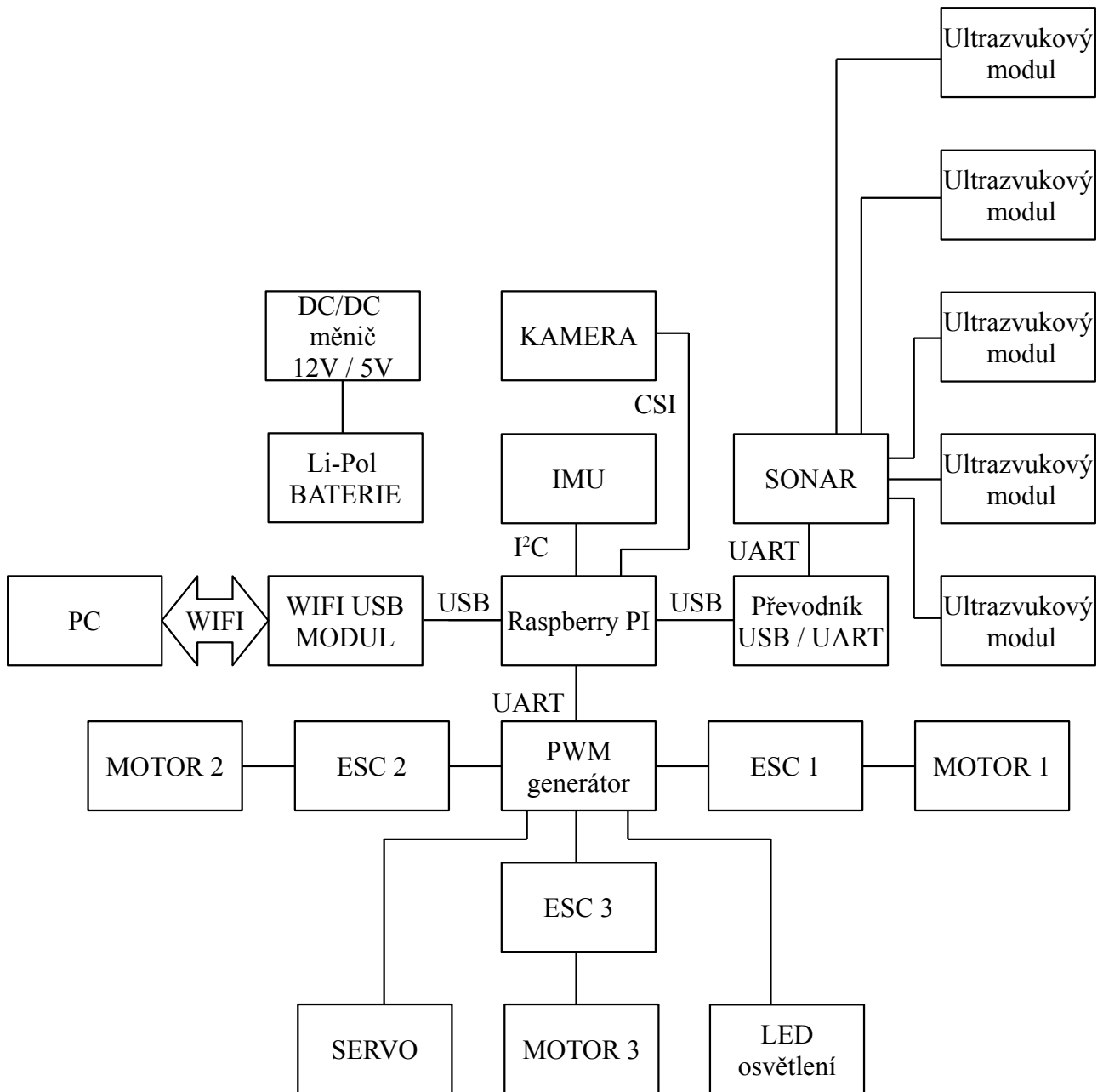
$$Tah_1 = Tah + Roll_R + Pitch_R \quad (\%) \quad (1)$$

$$Tah_2 = Tah - Roll_R + Pitch_R \quad (\%) \quad (2)$$

$$Tah_3 = Tah - Pitch_R \quad (\%) \quad (3)$$

kde Tah_1 , Tah_2 a Tah_3 jsou signály řídicí výkon příslušných motorů. $Roll_R$ a $Pitch_R$ jsou signály výstupující z příslušných regulátorů a Tah je signál vyjadřující celkový požadovaný tah zařízení.

3.2 Blokové schéma zařízení



obr. 3: Blokové schéma zařízení

4 Součásti modelu

4.1 Motor

Modelářské letecké motory lze dělit podle několika kritérií. Základní dělení těchto elektrických motorů je na motory stejnosměrné a střídavé. Stejnosměrné motory se vyznačují výrazně jednodušším řízením. Jejich rychlost otáčení a točivý moment jsou řízeny pomocí změny velikosti napájecího napětí. Regulace napájecího napětí může být spojitá nebo diskretní. Mezi diskretní způsoby regulace patří například PWM (Pulzně šířková modulace). Změny smyslu otáčení motoru lze docílit změnou polaritu napájecího napětí. K tomu se využívá zapojení v tzv. H-můstku.

Proti tomu regulace otáček u střídavých třífázových motorů se provádí pomocí změny frekvence napájecího napětí. Tento způsob regulace je výrazně složitější, než u stejnosměrných motorů. Změny smyslu otáčení motoru lze dosáhnout záměnou dvou libovolných fází. Výhodou střídavého motoru je vyšší moment při nízkých otáčkách než u motoru stejnosměrného.

V dnešní době převažuje použití motorů střídavých. Jejich konstrukce je značně jednodušší, neobsahují složitý komutátor, a jsou tedy lehčí než motory stejnosměrné. Motory použité v této práci jsou CF2822 od výrobce EMAX. Jedná se o bezkomutátorové střídavé motory s rotačním pláštěm. Maximální statický tah jednoho motoru při správně zvolené velikosti vrtule je 0,740 kg.

Jeden z výrobcem udávaných parametrů motoru je RPM (Revolutions Per Minute). Tato hodnota udává počet otáček nezátíženého motoru bez vrtule za 1 minutu. Vypočítá se podle vztahu (4), kde K_v je konstanta motoru udávaná výrobcem, která udává počet otáček motoru za minutu v závislosti na velikosti napájecího napětí. U_{BAT} je napětí akumulátoru.

$$RPM = K_v \cdot U_{BAT} \quad (4)$$

K_v použitého motoru je 1534 RPM/V. Účinnost motoru je podle výrobce 82 %. Maximální proudový odběr motoru je 16 A po dobu maximálně 60 sekund.

4.2 Vrtule

Vrtule je zařízení sloužící ke změně rotačního pohybu na tah a naopak. Dále se budu zabývat pouze pevnými vrtulemi bez možnosti regulování náklonu listů.

Základní dělení jednoduchých leteckých vrtulí je podle směru otáčení. Dělí se na vrtule pravotočivé a levotočivé. Pravotočivé vrtule se při pohledu proti směru působení tažné síly otáčí ve směru chodu hodinových ručiček. V zahraniční literatuře jsou označovány jako CW (Clockwise). Levotočivé vrtule mají listy sklopené přesně naopak. K vyvolání tahu o stejném směru jako pravotočivé se musí otáčet proti směru chodu hodinových ručiček. Bývají označovány jako CCW (Counterclockwise).

Dále se dělí použití vrtulí podle směru vyvolaného tahu vůči poloze motoru. První typ použití je vrtule tažná, kdy je vrtule umístěna před motorem ve směru letu a celé zařízení za sebou táhne. Naopak tlačná vrtule je umístěna za motorem a tlačí model před sebou. Modelářské vrtule se značí kombinací písmen a čísel. První číslo udává průměr vrtule v palcích. Druhé udává velikost stoupání vrtule. Velikost stoupání si lze představit jako délku závitu, který má stejný sklon jako listy vrtule a je vytvořen jednou otáčkou vrtule kolem své osy.

Existují vrtule s různým počtem listů. Běžné se používají vrtule od jednolistých až po vrtule s osmi listy. Pro svoji práci jsem zvolil pravotočivé dvoulisté vrtule s označením 10x3,8.

4.3 ESC - frekvenční měnič

ESC (Electronic speed control) je obvod pro řízení otáček elektrických motorů. Existují varianty pro stejnosměrné a střídavé motory. Pro stejnosměrné motory (brushed – motory s komutátorem) se jedná o jednoduché obvody s H-můstkem s PWM buzením pro řízení směru a rychlosti otáčení motoru. Pro střídavé motory (brushless – bez komutátoru) je zapojení složitější. Kontrolér postupně budí všechny 3 fáze motoru. Otáčky jsou řízeny pomocí změny frekvence buzení jednotlivých fází. Fáze je nutné budit přesně v závislosti na aktuálních otáčkách motoru. Otáčky lze detekovat opticky, magneticky (Hallowou sondou) nebo pomocí detekce změn napětí generovaného točícím se motorem. Tato metoda se nazývá „back EMF detection“, více o této metodě viz [1]. Tato metoda je i přes zvýšení složitosti řízené elektroniky velice často používána, protože umožňuje použití konstrukčně jednodušších motorů, které nemusí obsahovat senzory otáček.

ESC je řízeno standardním servo signálem. Řídicím signálem je obdélníkový pulz s šířkou 1 ms – 2 ms s periodou 50 Hz. Šířka 1 ms odpovídá nulovému výkonu, 2 ms znamenají plný výkon motorů.

4.3.1 Možnosti ESC

ESC je vybaven řadou dalších funkcí, které lze vypnout/zapnout podle potřeby.

- Brzda – V případě snížení výkonu motor nedobíhá plynule, ale je automaticky zastaven.
- Typ baterie – volba typu baterie
- Li-Po Cells – počet článků baterie
- Ochrana nízkého napětí - Z udaného typu akumulátoru a počtu článků se vypočítá nejnižší přípustná hodnota napětí baterie. V případě poklesu pod tuto hodnotu se spustí akustická signalizace.
- Startovací mód – Udává rychlost rozběhu motoru z vypnutého stavu na maximální otáčky.

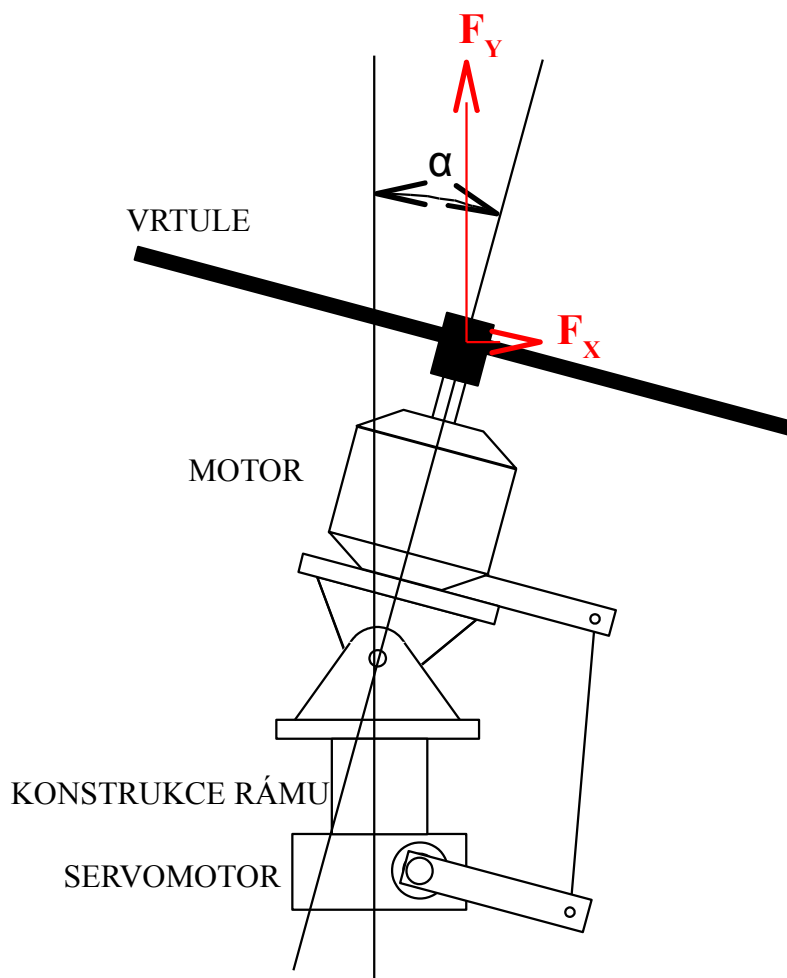
Po zapnutí ESC akusticky signalizuje úspěšnou inicializaci a případné chyby pomocí příslušné tónové sekvence. Vysvětlení jednotlivých sekvencí viz [2]. Zařízení není vybaveno žádným elektroakustickým měničem. Audio signál je vytvářen vysokofrekvenčním buzením cívky motoru a jejím následným chvěním.

4.3.2 Firmware ESC

Frekvenční měniče s originálním firmwarem jsou schopné přijímat řídicí pulzy pouze s frekvencí 50 Hz. Navíc provádí plovoucí průměr přes posledních 8 přijatých vzorků. To vnáší do systému příliš velké časové zpoždění. Tyto měniče jsou určeny pro použití v modelech letadel, kde tato funkce slouží ke zvýšení plynulosti letu. Ovšem pro použití v multirotorových systémech je tato funkce nežádoucí. Bylo proto nutné v každém ESC přeprogramovat řídicí mikroprocesor. Jako řídicí mikroprocesor zde byl použit SIL F334 od výrobce Silicon Labs. Jako nový firmware byl zvolen firmware BLHeli, který umožňuje použít obnovovací frekvenci pro přenos dat 100 Hz a nepoužívá průměrování přijatých dat. Více viz [12]. Pro naprogramování bylo nutné vytvořit USB programátor pro mikroprocesory Silicon Labs podle [13]. Pro programátor byl použit mikrokontrolér od společnosti ATMEL s firmwarem „owSilProg“. Po připojení k PC přes USB lze v ESC nastavit rychlost rozběhu, frekvenci buzení motoru, frekvenci vstupních dat, směr otáčení a další nestandardní funkce.

4.4 Servomotor

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, rotující vrtule vytváří kroučící moment, který působí v opačném směru rotace vrtule na upevnění motoru, a tím na celou strukturu. Momenty všech vrtulí se sčítají. Bez náležité kompenzace by se trikoptéra ve vzduchu stále otáčela. U klasické helikoptéry je tento nežádoucí kroučící moment kompenzován pomocí sekundárního rotoru umístěného vertikálně na ocase. U konstrukce kvadrokoptéry, hexakoptyry a dalších více-rotorových systémů se sudým počtem vrtulí má polovina vrtulí opačný smysl otáčení, čímž je kroučící moment kompenzován.



obr. 4: Princip ovládní rotace

U trikoptyry k této kompenzaci slouží servo, pomocí kterého se naklání zadní vrtule. Protože kroučící moment není konstantní, ale je funkcí otáček vrtule, je nutno dynamicky kompenzovat výsledný kroučící moment. Náklonem zadního rotoru lze tento kroučící moment měnit i do záporných hodnot, a tím lze plynule měnit rotaci kolem osy Z.

$F_x * r = M$	bez rotace
$F_x * r > M$	rotace vlevo
$F_x * r < M$	rotace vpravo

Tabulka 1: Ovládání rotace

r – vzdálenost nakloněného motoru od těžiště zařízení

M – kroutící moment od všech vrtulí

Požadovaný tah ve vertikálním směru je nutno v závislosti na náklonu motoru vydělit hodnotou $\cos(\alpha)$. Tím je zaručeno, že i po natočení motoru o úhel α bude motor působit stále stejnou silou F_y .

4.5 Akumulátor

Celé zařízení je napájené z akumulátoru. Na akumulátor jsou kladeny poměrně vysoké nároky, především na jeho nízkou hmotnost, vysokou kapacitu a schopnost dodávat do zátěže vysoké proudy. Po zvážení těchto požadavků bylo jedinou dostupnou možností použití Lithium-polymerového (Li-Pol) akumulátoru. Pro tento typ akumulátoru jsou navrženy motory i proudové regulátory. Konkrétně byl použit akumulátor značky ZIPPY FLIGHTMAX typ 3000mAh 3S1P 40C LI-POL.

Napětí naprázdno na 3 článkovém plně nabitém akumulátoru je 12,6 V, na vybitém akumulátoru je napětí naprázdno 11,1 V. Zvolený akumulátor má kapacitu 3000 mAh. Je schopný do zátěže dodávat až 120 A bez poškození akumulátoru, nebo až 150 A po dobu maximálně 15 sekund. Jako maximální nabíjecí proud výrobce udává 15 A. Přesto jsem jako maximální nabíjecí proud zvolil 2 A. Při přesáhnutí maximálního dovoleného nabíjecího proudu dojde k zahřátí akumulátoru, které může vyústit v explozi všech článků. Hmotnost akumulátoru je 270 g.

5 Senzorový systém

Senzorový systém slouží k měření okolních veličin působících na zařízení. V zapojení je použita měřicí deska GY-80, která obsahuje následující senzory:

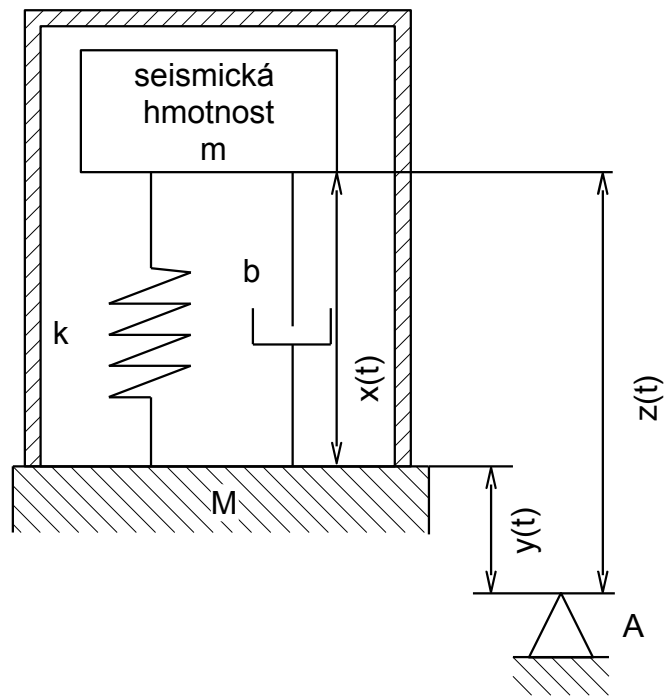
- tříosý gyroskop L3G4200D od společnosti ST Microelectronics,
- tříosý akcelerometr ADXL345 od společnosti Analog Devices,
- tříosý magnetometr MC5883L od společnosti Honeywell,
- barometr BMP085 od společnosti Bosch.

Všechny senzory komunikují přes sběrnici I²C. Pro samotné měření je použit pouze akcelerometr a gyroskop.

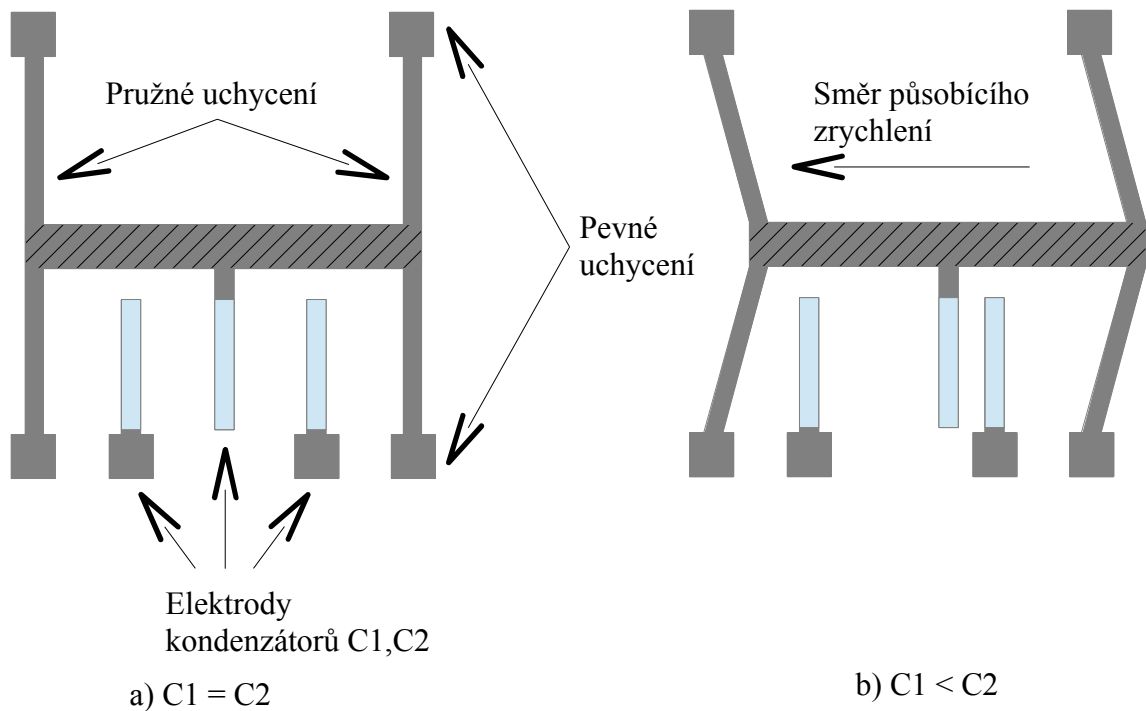
5.1 Akcelerometr

Akcelerometr je senzor, který slouží k měření velikosti a směru působícího zrychlení. Akcelerometry lze dělit podle typu měřeného zrychlení. Některé typy akcelerometrů dokáží měřit pouze dynamické zrychlení, ostatní měří dynamické i statické zrychlení. Statické zrychlení je vyvolané gravitačním polem Země a působí směrem do středu Země. To umožňuje akcelerometru měřit náklon vůči zemi. Dynamické zrychlení je způsobené změnou rychlosti pohybu v čase.

Základem senzoru je mechanická kmitavá soustava tvořená pružinou o tuhosti k , hmotností m a tlumením, o němž lze předpokládat, že je úměrné rychlosti pohybu s konstantou úměrnosti b (viskózní tlumení). Více viz [15]. Soustava je znázorněna na obr. 5. Změnu vzdálenosti $x(t)$, která je u akcelerometru přímo úměrná zrychlení, lze jednoduše převést na změnu kapacity deskového kondenzátoru. Nejjednodušší případ je jednoosý akcelerometr složený ze tří elektrod deskového kondenzátoru. Dvě elektrody jsou pevné, přidělané k podkladu M . Třetí elektroda je pohyblivá, pevně spojená se seismickou hmotou o hmotnosti m . Seismická hmota je pružně přichycena k okolí. Pokud dojde k jejímu vychýlení z rovnovážné polohy v důsledku zrychlení, změní se kapacity C_1 a C_2 . C_1 a C_2 jsou kapacity pevných desek vůči desce pohyblivé. Tato zjednodušená struktura je zobrazena na obr. 6 .



obr. 5: Model akcelerometru



obr. 6: Zjednodušená struktura kapacitního akcelerometru

a) bez působícího zrychlení

b) se zrychlením ve směru osy seismické hmoty

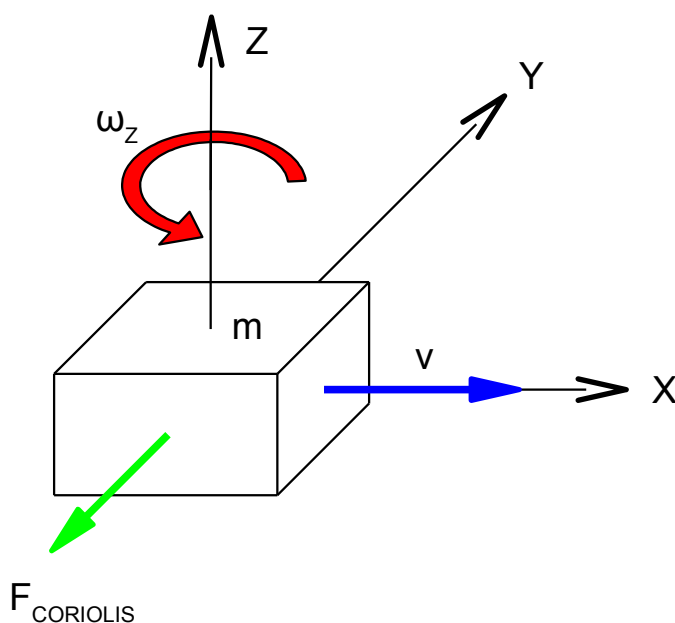
5.2 Gyroskop

Elektronický gyroskop je senzor, který je schopen měřit rychlost rotace. Se skutečným mechanickým gyroskopem nemá prakticky nic společného. V této části práce se pokusím objasnit princip vibračního elektronického gyroskopu.

Na obr. 7 je zobrazen princip gyroskopu. V mikrostruktuře gyroskopu je seismická hmotnost m , která se pohybuje ve směru osy X rychlostí v . Pokud se senzor otáčí kolem osy Z nenulovou úhlovou rychlostí ω_z , působí na seismickou hmotu díky Coriolisově efektu síla F_{CORIOLIS} . Tato síla se vypočte podle vztahu (5).

$$F_{\text{CORIOLIS}} = -2 \cdot m \cdot \omega \times v \quad (5)$$

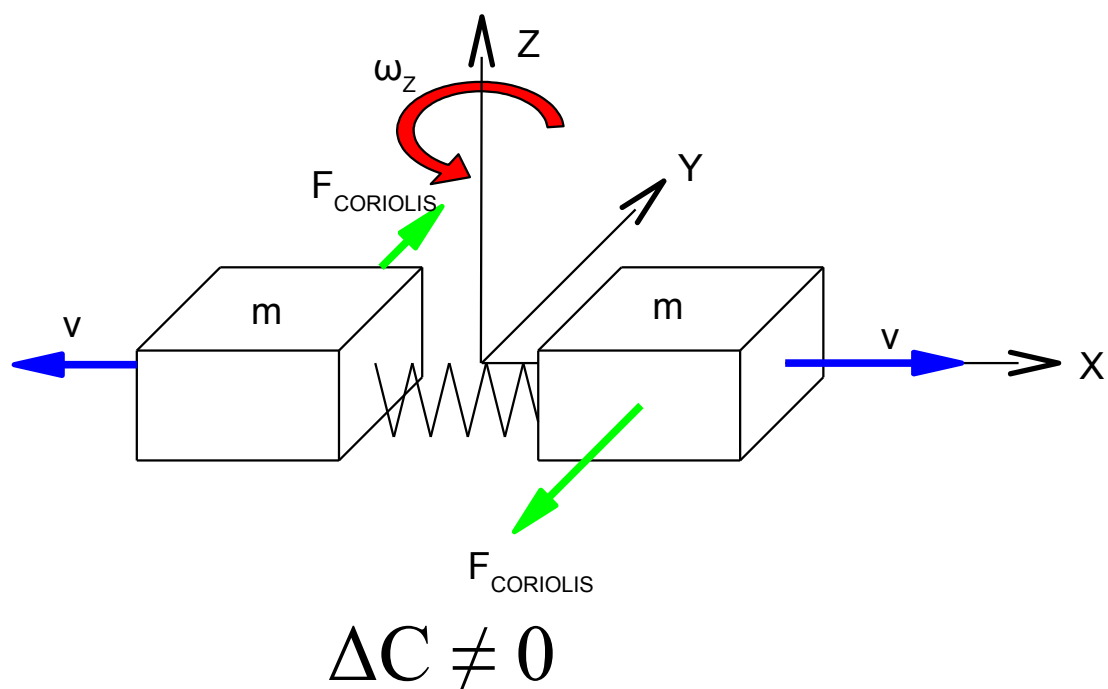
Velikost výchylky hmoty ve směru osy Y je přímo úměrná velikosti této síly, a tím i přímo úměrná velikosti a směru rotační rychlosti. Velikost výchylky je měřena vnitřní elektronikou senzoru jako změna kapacity. Seismická hmota se pohybuje tam a zpět, proto se tento princip nazývá vibrační. Tato struktura je ovšem citlivá i na zrychlení. Během působení zrychlení ve směru osy Y také dojde k vychýlení hmotnosti m z klidové polohy. Proto je nutné použít tyto struktury dvě a změnu kapacity měřit diferenciálně. Toto zapojení je znázorněné na obrázku obr. 8 a obr. 9.



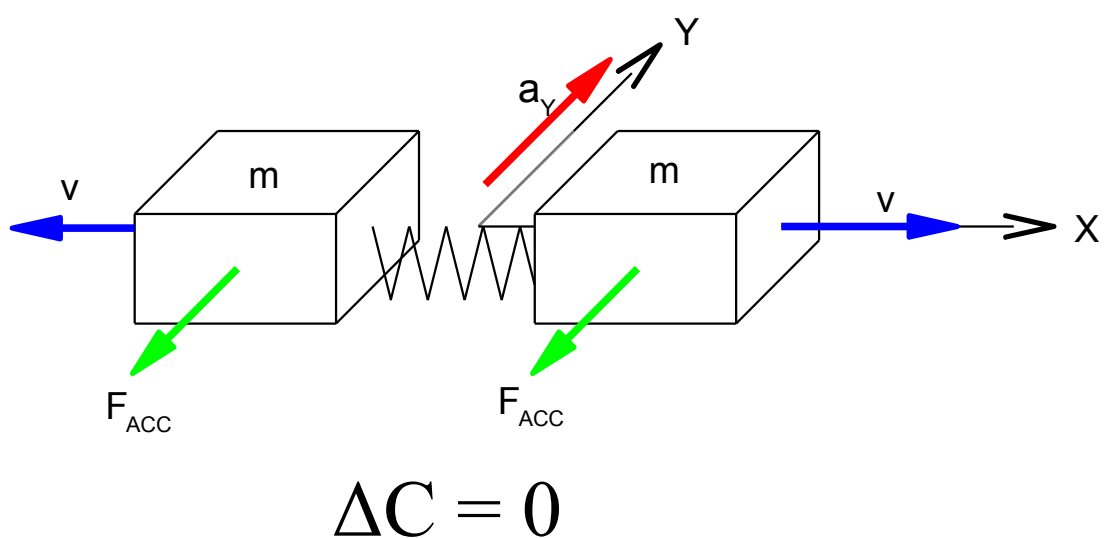
obr. 7: Princip činnosti MEMS gyroskopu

Pokud na tuto zdvojenou strukturu působí zrychlení, dojde k vychýlení obou hmotností ve stejném směru a změna diferenciální kapacity je nulová. Tímto je

eliminován vliv zrychlení na výstup gyroskopu. Více o principu funkce MEMS gyroskopu viz [14].



obr. 8: Diferenciální měření změny kapacity



obr. 9: Potlačení vlivu zrychlení

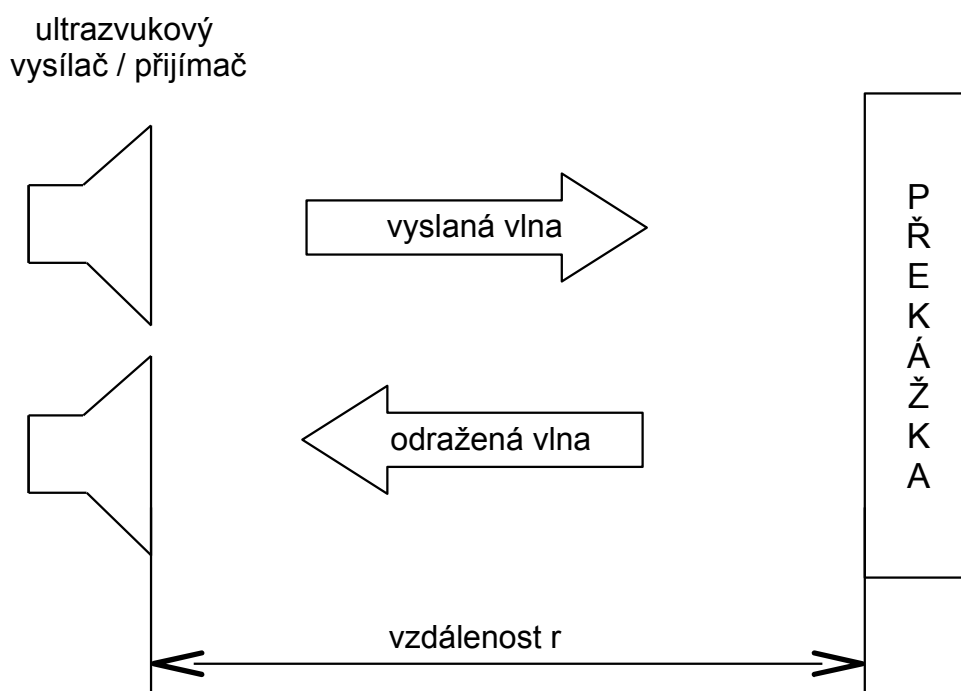
5.3 Ultrazvukový senzor vzdálenosti

Ultrazvuk je stejně jako zvuk akustické vlnění. Na rozdíl od zvuku leží frekvence ultrazvuku nad hranicí slyšitelnosti lidského ucha, ta je přibližně 20 kHz.

Princip měření vzdálenosti pomocí ultrazvuku spočívá ve vyslání ultrazvukového signálu směrem k překážce. Na překážce dojde k odrazu části signálu, která cestuje zpět ke zdroji signálu. Je měřena doba mezi vysláním pulzu a detekcí odraženého signálu. Ze známé rychlosti šíření zvuku je možné dopočítat vzdálenost mezi senzorem a detekovanou překážkou. Jako rychlost šíření ultrazvuku lze považovat rychlost šíření zvuku. Rychlost šíření zvuku ve vzduchu je závislá především na teplotě, vlhkosti a složení vzduchu. Pro výpočet rychlosti zvuku v suchém vzduchu lze použít zjednodušený vztah (6). Vzdálenost překážky od senzoru se vypočte podle vztahu (7). Jako ultrazvukový vysílač a přijímač jsou použity piezoakustické měniče.

$$c = (331,57 + 0,607 \cdot \theta) \quad (m \cdot s^{-1}; ms^{-1}, ^\circ C) \quad (6)$$

$$r = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (m; ms^{-1}, s) \quad (7)$$



obr. 10: Princip funkce ultrazvukového senzoru vzdálenosti

6 Hardware

6.1 Raspberry Pi

Raspberry Pi je miniaturní počítač velikosti kreditní karty. Je založený na SoC BCM2835 od společnosti Broadcom. Obsahuje ARMv6 procesor ARM1176JZFS s taktovacím kmitočtem 700 MHz, 256 MB RAM, GPU VideoCore IV.

Počítač vyniká především svojí nízkou cenou, která umožňuje jeho snadné použití v embedded systémech. Cena je 35 USD. Spotřeba při běhu je maximálně 2,5W. Mezi jeho hlavní přednosti patří velké množství komunikačních portů. Konkrétně se jedná o:

- digitální video výstup HDMI
- kompozitní video výstup
- audio stereo výstup
- LAN
- 2x USB 2.0 port
- SPI
- UART
- I²C
- 8x GPIO

Operační systém je nahrán na SD kartě. V této práci jsem jako operační systém použil Raspbian OS, modifikaci distribuce Debian optimalizovanou pro hardware Raspberry Pi. Systém je volně dostupný pod licencí GNU GPL včetně zdrojových kódů. Používá jádro Linux, konkrétně verzi 3.1.9.

Výhody použití takto složitěho řídicího systému před použitím běžně dostupných mikrokontrolérů jsou:

- možnost připojení různých periférií přes USB rozhraní (kamera, GPS, WIFI, atd.)
- vysoký výpočetní výkon
- možnost použít vysokoúrovňový programovací jazyk
- multitasking

Nevýhody jsou:

- systém nepracuje v reálném čase, není zajištěna přesná časová odezva. Proto není možné použít tento systém pro generování PWM signálů, či jiných signálů vyžadujících přesné časování.
- vyšší cena
- delší doba bootování, systém je připraven k činnosti cca do 1 minuty po zapnutí napájení

Zařízení vyžaduje napájecí napětí 5 V, které je přiváděno pomocí micro-USB konektoru. Jednotlivé vstupy a výstupy ale využívají 3,3 V logiku a nejsou kompatibilní s 5 V logikou. Proto je nutné mezi Raspberry Pi a ostatní hardware zařadit převodníky napěťových úrovní.

6.1.1 Wi-Fi

Pro zajištění komunikace s PC byl použit WiFi USB adaptér TL-WN722N od společnosti TP-LINK. Tento modul splňuje standardy IEEE 802.11b/g/n. Komunikace probíhá na frekvenci 2,4 GHz. Maximální teoretická rychlost přenosu je až 150 Mbit/s.

6.1.2 Kamera

Kamerový modul se k Raspberry Pi připojuje pomocí vysokorychlostního CSI (Camera Serial Interface) rozhraní, takže kamera nezabírá volný USB port. Kamera obsahuje CMOS snímač Omnivision 5647 s rozlišením 5MPiX. Jednotlivé snímky jsou pořizovány v rozlišení 2592x1944 pixelů. Video je snímáno v rozlišení 1080p při 30fps, 720p při 60fps a 640x480 při 60fps. Kamera váží pouze 3g.

6.2 PWM generátor

Vysoký výpočetní výkon zařízení zajišťuje Raspberry Pi. Jak již bylo zmíněno výše, nelze jej ale použít pro operace, které vyžadují přesné časování. Proto je doplněno o mikroprocesor, který zajišťuje generování PWM pulzů pro moduly elektronického řízení motorů a pro servomotor. K Raspberry Pi je připojen pomocí UART rozhraní. Byl použit mikroprocesor ATMEL ATmega168 s taktovacím kmitočtem 12 MHz. Procesor používá napájecí napětí 5 V. Raspberry Pi používá 3,3 V logiku. Proto bylo nutné komunikaci oddělit pomocí oddělovacích členů. Jako oddělovací členy byly použity

optočleny s fototranzistory. Tyto optočleny se při testování zařízení ukázaly jako příliš pomalé. Proto je maximální rychlost komunikace mezi mikroprocesorem a řídicí jednotkou omezena na 9600 Baud/s. Tato rychlost je ale dostačující.

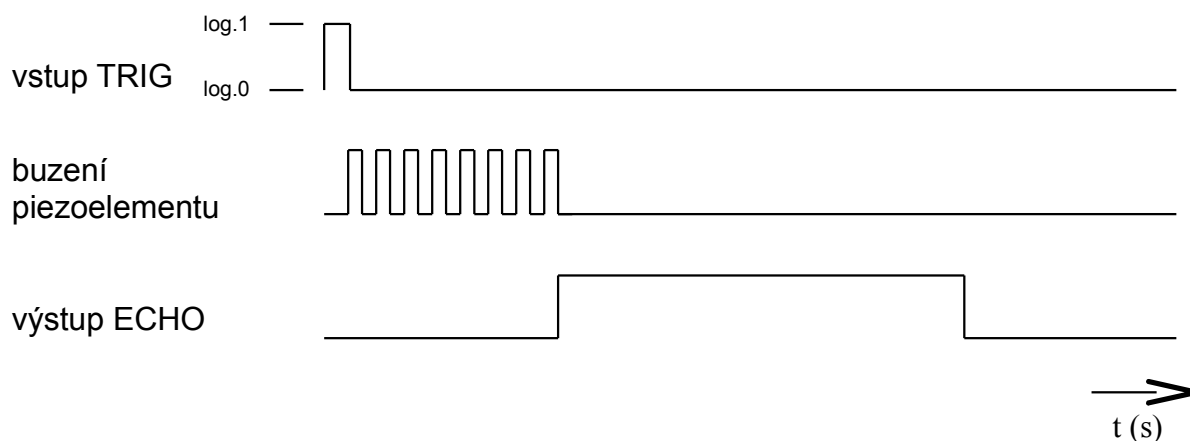
Zařízení dále obsahuje hodiny reálného času, připojené pomocí I²C sběrnice. Na tuto sběrnici je připojena i senzorová deska GY-80, která je na tomto zařízení také umístěna. Plošný spoj je navržen jako přídatný modul pro Raspberry Pi a připojuje se přímo na něj. Pro návrh plošného spoje byl použit program Eagle 6.2.0.

6.3 Řídicí deska ultrazvukových modulů

Ultrazvukové senzory jsou ovládány pomocí mikroprocesoru ATmega168. V tomto zapojení pracuje s externím krystalem, který slouží jako zdroj přesného kmitočtu 20 MHz. Zapojení je možné ovládat přes rozhraní I²C nebo UART. V režimu I²C se zařízení chová jako I²C Slave. Bohužel během odpojení napájecího napětí od procesoru se komunikační piny SDA a SCL uzemní, čímž dojde k zablokování celé I²C sběrnice. Tím je znemožněna jakákoli další komunikace mezi řídicí deskou a senzory, které na této sběrnici komunikují. V případě selhání tohoto měřicího modulu by došlo k selhání celého zařízení. Proto jsem zvolil připojení této měřicí desky přes rozhraní UART.

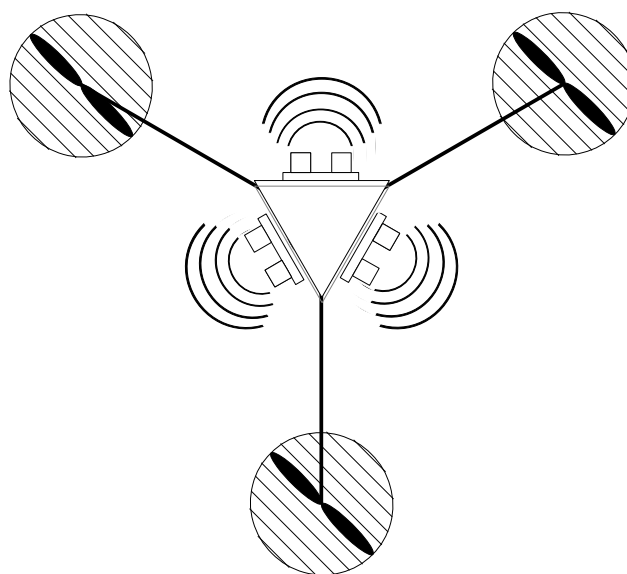
Zařízení je vybaveno pěti ultrazvukovými senzory pro měření vzdálenosti. Tyto senzory jsou rozmístěny tak, aby byla řídicí jednotka schopna změřit vzdálenost od nejbližších překážek. Jako senzory jsou použity moduly HC-SR04.

Měření vzdálenosti je spuštěno přivedením 10 μ s trvajícího pulzu na vstup TRIG senzoru. Odpovědí senzoru je pulz na výstupu ECHO. Šířka výstupního pulzu je přímo úměrná vzdálenosti nejbližší překážky.



obr. 11: Časový diagram ovládní HC-SR04

Jedná se o aktivní detektory, které do okolí vyzařují energii, a proto se mohou vzájemně ovlivňovat během měření. Kvůli zamezení chyb vzniklých touto interferencí jsou senzory ovládány postupně. Mezi jednotlivými měřeními je ponechána časová rezerva, která odpovídá přibližně času, za který by ultrazvuková vlna urazila maximální vzdálenost, kterou je senzor schopen detekovat. Tím je zajištěno, že se senzory navzájem neovlivňují. Senzory vysílají ultrazvukové vlny přímo před sebe se šířkou svazku 15° . Točící se vrtule způsobuje rušení i mimo slyšitelné spektrum, proto musí být senzory nasměrovány přesně mezi vrtule. Jinak by mohlo docházet k interferenci s rušením vzniklým rotací vrtulí.



obr. 12: Poloha ultrazvukových senzorů

Správná činnost zařízení je signalizována pomocí LED, která svítí, když je vysílán ultrazvukový signál. Jako odpověď na přijetí určité sekvence bytů zařízení zahájí měření. Po dokončení měření se odesílají zpět do řídicí jednotky 16-ti bitová naměřená data ze všech pěti senzorů. Společně s těmito daty jsou přenášeny byty pro detekci začátku přenosu a 3 paritní byty pro ověření správnosti přenosu. Jeden cyklus měření trvá přibližně 35 ms.

6.3.1 Převodník USB-UART

Raspberry Pi obsahuje pouze jedno UART rozhraní. Toto rozhraní již bylo použito ke komunikaci s jiným zařízením. Proto jsem se rozhodl použít převodník

USB - UART. Převodník pracuje s 3,3 V signály a není kompatibilní s 5 V logikou. Proto bylo nutné mezi převodník a měřicí desku zapojit převodník napěťových úrovní. Rychlost komunikace mezi Raspberry Pi a řídicí deskou ultrazvukových modulů je 9600 Baud/s.

6.4 Napájecí modul

Pro napájení elektroniky je požadováno napětí 5 V a proudový odběr až 1 A. Kvůli nezanedbatelným požadavkům na proudový odběr nelze přímo použít integrovaný stabilizátor typu LM7805. Úbytek napětí na něm by byl při plném napětí akumulátoru až 7,6 V. Při maximálním odebíraném proudu by byla výkonová ztráta 7,6 W. Pro bateriově napájené zařízení je toto zbytečně velký vyzářený výkon. Pro vyzáření takového výkonu by byl potřeba masivní chladič, který by znatelně zvýšil hmotnost celého zařízení. Teoretická účinnost takového zapojení by byla cca 40 %.

Pro zvýšení účinnosti napájecího zdroje byl použit integrovaný obvod LM2596 od Texas Instruments. Jedná se o jednoduchý step-down měnič s teoretickou účinností (podle [13]) cca 80 % . Výstupní napětí je nastaveno na 6 V. Na výstup je připojen nízkoubytkový lineární stabilizátor L4940V5 od STMicroelectronics. Při vstupním napětí 6 V, výstupním napětím 5 V a proudu 1 A je teoretická účinnost 83 %. Sériové zapojení těchto obvodů má teoreticky účinnost skoro 67 %. Na prvním obvodu dojde ke ztrátě cca 1,5 W a na druhém 1 W. Lineární stabilizátor je použit pro jeho ochranné výstupní prvky, jako je vnitřní nadproudová ochrana, pevné výstupní napětí a tepelná ochrana.

6.5 LED osvětlení

Pro možnosti signalizace, případně osvětlení za letu, bylo přidáno několik LED pásů. LED pásy jsou spínány výkonovým MOS tranzistorem. Intenzitu osvětlení lze ovládat programově pomocí PWM. Proud do osvětlení je přibližně 250 mA.

7 Vyhodnocení dat ze senzorů

Ze senzorů přijímáme surová data v digitální podobě. Ta je nutno dále převést na fyzikální veličiny. Poté musíme odstranit chyby, které jsou typické pro jednotlivé typy senzorů. Z takto upravených dat již můžeme dopočítat hodnoty náklonu zařízení, případně další měřené veličiny, jako je například atmosferický tlak a teplota okolního prostředí.

7.1 Převod měřených dat na fyzikální veličiny

Údaje z akcelerometru jsou přijímány v 16-bitové podobě. Informaci o zrychlení nese pouze spodních 10 bitů. Hodnoty jsou uloženy ve formátu dvojkového doplňku. Data převedeme do celočíselného formátu a dále tuto hodnotu vynásobíme citlivostí senzoru. Tím získáme údaj o zrychlení v určité ose v základních fyzikálních jednotkách.

$$a_X = D_{AX} * S_{AX} \quad (8)$$

$$a_X - \text{zrychlení ve směru osy } X \quad (ms^{-2})$$

$$S_{AX} - \text{citlivost akcelerometru v ose } X \quad (ms^{-2}/digit)$$

$$D_{AX} - \text{data z akcelerometru} \quad (-)$$

Stejně jsou převedena data i v ostatních dvou osách měření.

Data z gyroskopu jsou přijímána v 16-bitové podobě. Výpočet probíhá obdobně jako u akcelerometru.

$$\omega = D_G * S_G \quad (9)$$

$$\omega - \text{úhlová rychlost gyroskopu} \quad (^\circ/s)$$

$$S_G - \text{citlivost gyroskopu při požadovaném rozsahu} \quad (^\circ/s/digit)$$

$$D_G - \text{data z gyroskopu} \quad (-)$$

7.2 Korekce chyb senzorů

7.2.1 Gyroskop

Data z gyroskopu obsahují tzv. offset gyroskopu. To znamená, že i pokud je senzor v klidu, není výstupní rychlost rotace nulová. Tento offset je teplotně závislý. Tuto závislost lze aproximovat polynomem prvního stupně.

$$\text{offset}(T) = K_1 + K_2 * T \quad (^\circ/s; ^\circ/s, ^\circ/s/^\circ C) \quad (10)$$

$$T - \text{teplota gyroskopu} \quad (^\circ C)$$

$$K_1 = 0.15$$

$$K_2 = 0.035$$

Hodnoty koeficientů K_1 a K_2 byly určeny z měření závislosti tohoto offsetu na teplotě. Pro jednotlivé výstupy se hodnoty koeficientů K_1 a K_2 liší. Výše uvedené hodnoty platí pro úhlovou rychlost ω_z . Hodnota offsetu vypočítaná pomocí předchozího vztahu je následně od změřených dat odečítána. I přes teplotní kompenzaci není offset nulový. Integrací úhlové rychlosti se chyba způsobená offsetem s časem zvyšuje a již během několika minut naprosto znehodnotí výsledky měření. Teplotní kompenzací jsme alespoň rychlost nárůstu této chyby značně zpomalili.

7.2.2 Akcelerometr

Data z akcelerometru také obsahují chybu offsetu. Byl změřen offset akcelerometru, který se projevil nejvíce v údajích o zrychlení v ose Z. Během měření se ukázalo, že závislost offsetu na teplotě není u akcelerometru tak výrazná jako u gyroskopu. Po odečtení změřeného offsetu od dat z akcelerometru lze tuto chybu již zanedbat. Protože se data z akcelerometru neintegrují, chyba již dále nenarůstá.

Data z akcelerometru obsahují nežádoucí signál na vyšších kmitočtech. Toto rušení je způsobeno několika vlivy. Už z principu své činnosti je MEMS akcelerometr citlivý na gravitační a pohybové zrychlení. Pokud používáme akcelerometr k měření náklonu senzoru vůči zemi, je detekce pohybového zrychlení nežádoucí jev. Mezi pohybové zrychlení patří například zrychlení způsobené vibracemi senzoru. Vysokofrekvenční signál způsobený těmito vibracemi lze považovat za šum v signálu z akcelerometru. Dalším zdrojem šumu je zesilovací obvod v samotném senzoru,

například šum polovodičových přechodů, teplotní šum a jiné zdroje. Tyto zdroje produkují obvykle šum na vyšším kmitočtu, než je kmitočet užitečného signálu. Dále se do signálu během analogového zpracování může dostat spínací kmitočet digitálních prvků, který je také na vyšším kmitočtu než užitečný signál.

7.3 Měření náklonu

Pro správnou činnost zařízení je nutné s minimálním zpožděním znát náklon zařízení vůči zemskému povrchu. Konkrétně se měří úhly náklonu Roll, Pitch a rotační úhel Yaw. Význam těchto úhlů je popsán v kapitole 3.1. Pro měření náklonu lze použít akcelerometr i gyroskop. Akcelerometr měří sílu, kterou působí zrychlení na vnitřní seismickou hmotu senzoru. Použitý akcelerometr měří zrychlení statické i dynamické. Náklon senzoru lze dopočítat z údajů z akcelerometru podle následujících vztahů.

$$Roll_A = atan2(a_Y, a_Z) \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right) \quad (^\circ) \quad (11)$$

$$Pitch_A = atan2(a_X, a_Z) \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right) \quad (^\circ) \quad (12)$$

$$a_X - \text{zrychlení působící v ose } X \quad (ms^{-2})$$

$$a_Y - \text{zrychlení působící v ose } Y \quad (ms^{-2})$$

$$a_Z - \text{zrychlení působící v ose } Z \quad (ms^{-2})$$

Výše uvedené vztahy platí pouze za předpokladu, že na senzor nepůsobí jiné zrychlení než gravitační. Hodnoty vypočtené podle těchto vztahů jsou zatíženy nežádoucím rušením a nelze je samostatně použít jako vstup pro stabilizační algoritmus.

Gyroskop měří úhlovou rychlost. Integrací této úhlové rychlosti lze získat relativní náklon vůči počáteční poloze.

$$Roll_G(t) = Roll(0) + \int_0^t \omega_X(t) \cdot dt \quad (^\circ) \quad (13)$$

$$Roll(0) - \text{počáteční hodnota náklonu} \quad (^\circ)$$

$$\omega_X - \text{rychlost rotace kolem osy } X \quad (^\circ/s)$$

Obdobně se vypočítá úhel Pitch.

$$Pitch_G(t) = Pitch(0) + \int_0^t \omega_x(t) \cdot dt \quad (^\circ) \quad (14)$$

$Pitch(0)$ – počáteční hodnota náklonu $(^\circ)$

ω_x – rychlost rotace kolem osy X $(^\circ/s)$

Spojitá integrace je nahrazena numerickou integrací v diskrétním čase. Konkrétně je použita obdélníková metoda numerické integrace. Při této metodě se předpokládá, že během celé vzorkovací periody je úhlová rychlost konstantní. Tím se do měření zanáší další chyba.

$$Roll_G(t) = Roll(0) + \sum_{n=1}^N \omega_x[n] \cdot T_s \quad (^\circ) \quad (15)$$

$$Pitch_G(t) = pitch(0) + \sum_{n=1}^N \omega_y[n] \cdot T_s \quad (^\circ) \quad (16)$$

T_s – vzorkovací perioda (s)

Rotační úhel YAW je vypočítán pouze na základě dat z gyroskopu. Tento nedostatek lze vyřešit použitím elektronického kompasu.

$$YAW_G(t) = \sum_{n=1}^N \omega_z[n] \cdot T_s \quad (^\circ) \quad (17)$$

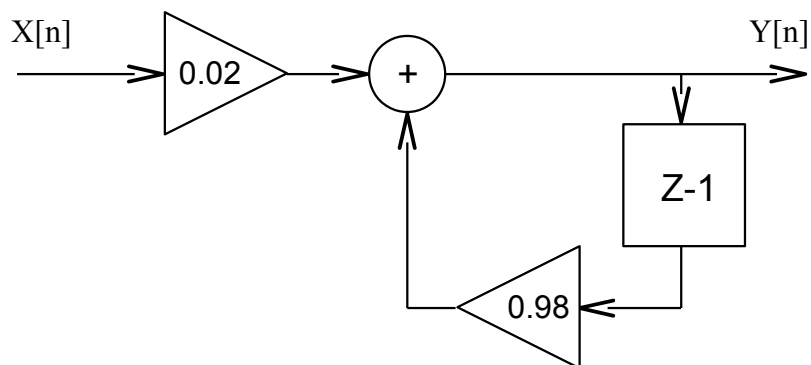
Takto vypočtené úhly obsahují narůstající stejnosměrnou složku a chybu způsobenou nepřesnou numerickou integrací. S postupem času v řádech minut tyto chyby převáží nad užitečným signálem.

Z obou senzorů lze tedy získat informaci o náklonu zařízení. Avšak oba způsoby měření obsahují chyby, kvůli kterým nelze tato data samostatně použít pro stabilizaci zařízení. Existuje mnoho metod, kterými lze tyto nedostatky eliminovat a získat lepší odhad aktuálních hodnot náklonů.

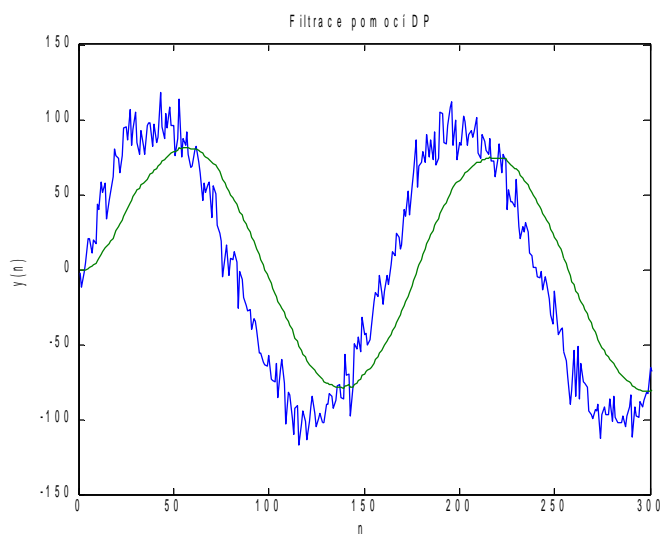
7.3.1 Filtrace signálu filtrem typu dolní propust

Jako nejjednodušší možnost filtrace naměřených dat se nabízí filtrace údajů z akcelerometru pomocí digitálního filtru typu dolní propust. Tím se odstraní rušení, které je na vyšších frekvencích než námi požadovaný signál. Jako dolní propust byl použit filtr s nekonečnou impulzní odezvou (IIR) prvního řádu. Z níže uvedeného grafu je vidět, že správně navržená dolní propust dobře filtruje rušivý signál. Nevýhoda

tohoto filtru je značné časové zpoždění mezi vstupním a výstupním signálem. Při vzorkovací frekvenci 100 Hz a zpoždění výstupního signálu za vstupním signálem o 40 vzorků je zpoždění signálu 0,4 sekundy. U systémů s rychlou časovou odezvou proto tento filtr nelze použít.



obr. 13: IIR filtr

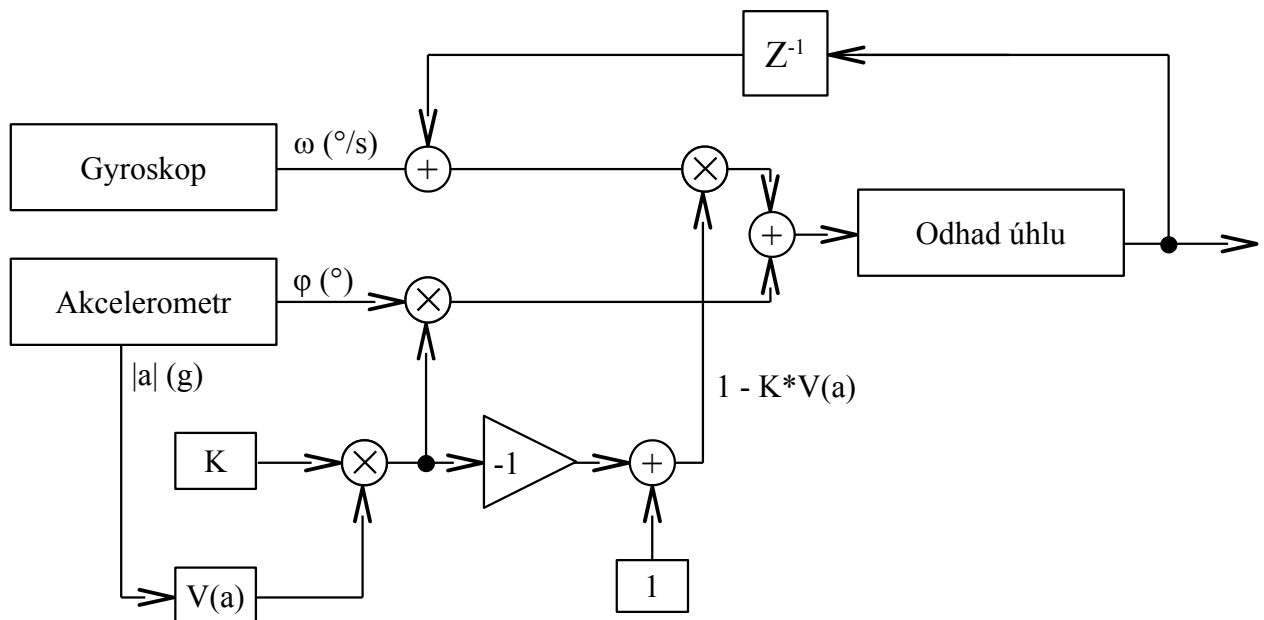


obr. 14: Filtrace filtrem typu dolní propust

7.3.2 Komplementární filtr

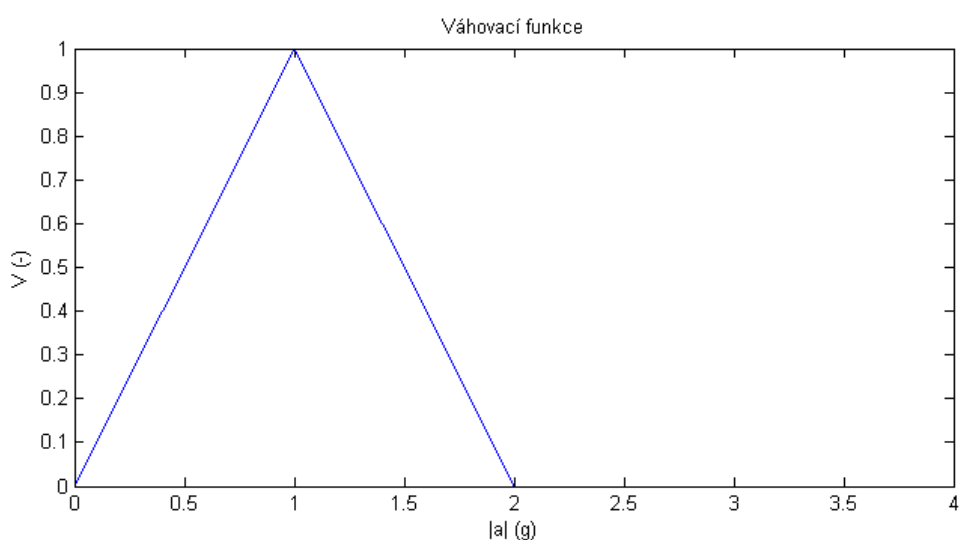
Jedna z metod zpracování dat pro přesnější určení náklonu se nazývá komplementární filtr. Tento typ filtrace umožňuje spojit signály z gyroskopu se signály z akcelerometru a vytvořit tak lepší odhad náklonu, než by bylo možné za použití jen jednoho typu senzorů. Blokové schéma je uvedeno na obrázku obr. 15.

V každém kroku je spočítána změna úhlu náklonu z dat z gyroskopu a z doby trvání jednoho cyklu výpočetního algoritmu. Tato změna je sečtena s minulou hodnotou výstupu filtru. Tím dochází k integraci dat z gyroskopu. Poté je tato hodnota vynásobena hodnotou $(1 - K * V(a))$, kde K je koeficient filtru a $V(a)$ je váhová funkce. Tato funkce bude vysvětlena později. Velikost koeficientu K udává vliv, jaký mají data z akcelerometru na výstup filtru. Pokud platí $K = 0$, je na výstupu filtru pouze hodnota integrace dat z gyroskopu. Pokud platí $K = 1$, tak je na výstupu úhel změřený pouze na základě dat z akcelerometru. Změnou hodnoty K v rozmezí $0 - 1$ lze plynule měnit váhu vstupních dat. Z měření byla určena hodnota $K = 0,015$. Tato hodnota byla zvolena jako optimální poměr mezi vlivem rušení z akcelerometru a vlivem offsetu gyroskopu. Pokud je zařízení v klidu, výstupní úhlová rychlost z gyroskopu je přibližně nulová a filtr se chová jako IIR dolní propust pro data z akcelerometru.



obr. 15: Blokové schéma komplementárního filtru

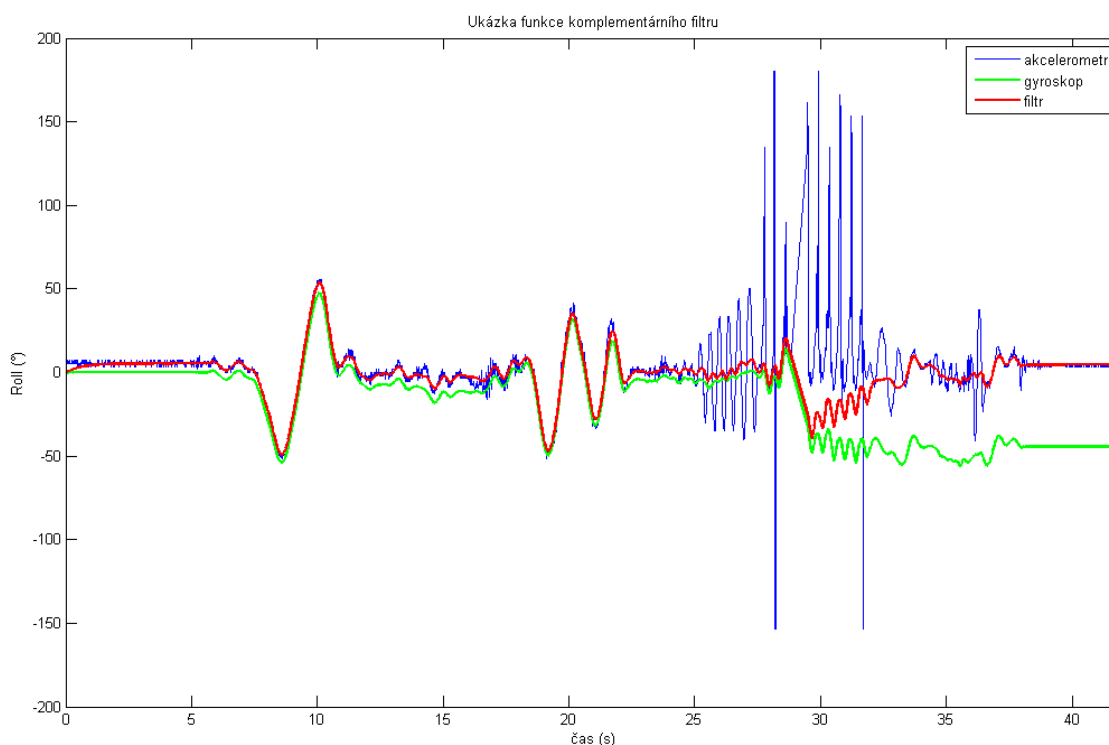
Váhovací funkce $V(a)$ vyjadřuje důvěryhodnost dat z akcelerometru. Do funkce vstupuje modul celkového měřeného přetížení. Na obr. 16 je váhovací funkce vykreslena. Pokud je absolutní hodnota měřeného zrychlení rovna $1 g_N$, znamená to, že na zařízení nepůsobí pohybové zrychlení, ale pouze gravitační zrychlení. V tomto případě lze data z akcelerometru považovat za důvěryhodné a koeficient filtru K se násobí hodnotou 1. V případě, že zrychlení je větší nebo menší než $1 g_N$, snižuje váhovací funkce jeho vliv na výstup filtru. Tím je značně potlačen vliv pohybového zrychlení na měření náklonu.



obr. 16: Váhovací funkce pro data z akcelerometru

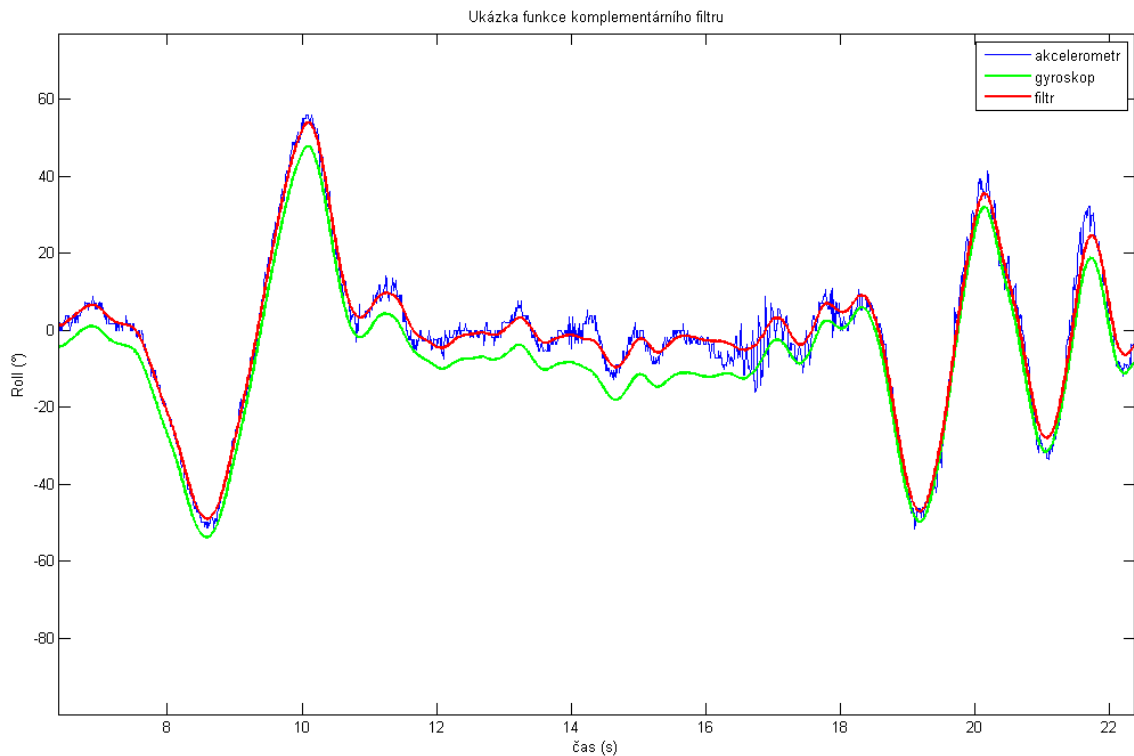
7.4 Naměřené hodnoty

Zde jsou uvedeny grafy naměřených hodnot a srovnání úhlu náklonu měřeného pomocí samotného akcelerometru, samotného gyroskopu a jejich kombinaci pomocí komplementárního filtru. Měření probíhalo postupným nakláněním zařízení ve všech osách, poté přibližně okolo 25. sekundy měření začaly na zařízení působit silné vibrace.



obr. 17: Ukázka funkce komplementárního filtru

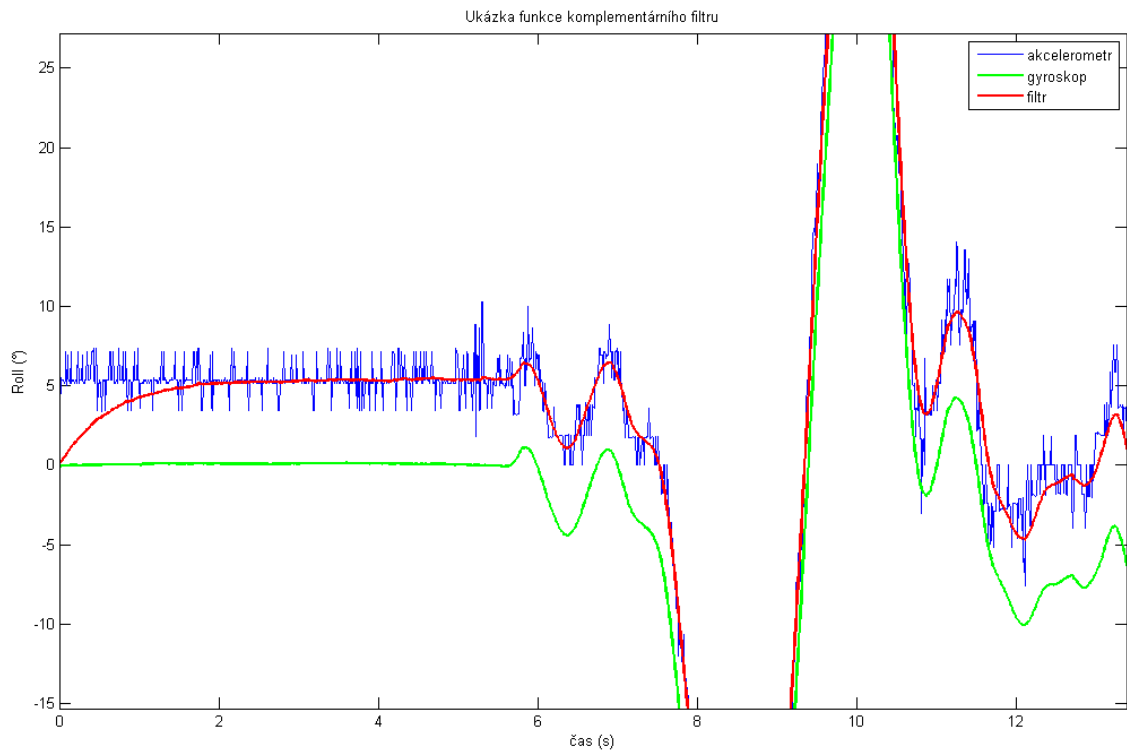
Z průběhů naměřených hodnot na obr. 17 je na první pohled vidět citlivost akcelerometru na pohybové zrychlení. Na gyroskop má toto zrychlení minimální vliv. Zvlnění dat z gyroskopu není způsobeno citlivostí na vibrace, ale nakláněním zařízení během měření. Naopak je vidět vliv chyby offsetu gyroskopu a chyba způsobená integrační obdélníkovou metodou. V čase 28,8 sekundy po začátku měření došlo k prodloužení trvání jednoho cyklu programu až na 0,7 sekundy. V tomto čase operační systém v řídicí desce pravděpodobně obsluhoval některý ze svých vnitřních procesů, a tím došlo ke snížení priority běhu ovládacího programu. Tato chyba se nevyskytuje příliš často a lze ji minimalizovat zvýšením priority běhu ovládacího programu. Na naměřených hodnotách je dále vidět, že komplementární filtr odstraní následky této chyby během 1-2 sekund.



obr. 18: Ukázka funkce komplementárního filtru

Na obr. 18 je lépe vidět funkce filtru. Úhel změřený pomocí gyroskopu je posazen na stejnosměrné složce úhlu změřeného pomocí akcelerometru. Zpoždění výstupu filtru za vstupními daty je na rozdíl od použití klasického filtru zanedbatelné.

Na obr. 19 je detailně zobrazen průběh signálů bezprostředně po začátku měření. Na datech z akcelerometru je vidět výrazné rušení. Zařízení nebylo na začátku měření umístěno zcela vodorovně, ale pod úhlem přibližně 5° . Je zde vidět náběh výstupních dat na tuto hodnotu. Rychlost tohoto náběhu lze ovlivnit změnou koeficientu K filtru. Při příliš velkém zvýšení hodnoty K se ale ve výstupních datech začne objevovat rušení z akcelerometru.



obr. 19: Ukázka funkce komplementárního filtru

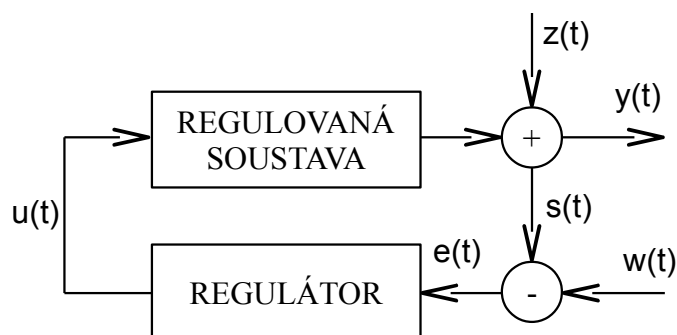
8 Regulace

Regulace slouží ke stabilizaci náklonu zařízení vůči zemi. Pro stabilizaci jsem se rozhodl použít diskrétní PID regulátory. Jejich výhodou je poměrně snadná implementace a výpočetní nenáročnost. Nevýhodou může být jejich složitější nastavení. Pro každou osu jsou použity 2 regulátory v kaskádovém zapojení.

8.1 PID regulace

Proporcionálně-Integračně-Derivační (PID) regulátor je dobře známý a hojně rozšířený způsob regulace, který se v různých obdobách používá téměř ve všech průmyslových odvětvích. Za oblibu PID regulátorů může jejich stabilita ve velké šíři pracovních podmínek regulované soustavy společně s jednoduchostí regulátoru. Tyto výhody jsou vyváženy jeho problematickým nastavením.

Základní princip PID regulátorů je přečtení údajů ze senzorů a poté výpočet požadovaného regulačního zásahu sečtením proporcionální, integrální a derivační reakce na rozdíl mezi požadovanou hodnotou a daty ze senzorů. Spojení regulátoru a regulované soustavy je znázorněno na obr. 20. Jedná se o zpětnovazební řízení.



- $e(t)$ – regulační odchylka
- $s(t)$ – data ze senzorů
- $u(t)$ – akční veličina
- $w(t)$ – požadovaná hodnota
- $y(t)$ – regulovaná veličina
- $z(t)$ – poruchová veličina

obr. 20: Blokové schéma regulační smyčky

8.1.1 Terminologie PID

Regulovaná veličina

Jak již název napovídá, jedná se o veličinu, kterou je potřeba v regulační soustavě regulovat. Může se jednat například o tlak, teplotu, průtok a v případě této práce o úhel náklonu nebo úhlovou rychlost. V této práci je značena jako $y(t)$.

Požadovaná hodnota

Jedná se o hodnotu, které chceme dosáhnout. Například v této práci to může být 0° v případě regulace náklonu. Je značena jako $w(t)$.

Akční veličina

Jedná se o výstup regulátoru, který přímo vstupuje do regulované soustavy. Může se jednat například o signál řídicí výkon motoru. Značí se $u(t)$.

Regulační odchylka

Jedná se o rozdíl mezi požadovanou hodnotou a skutečnou hodnotou (daty ze senzoru). Tato chyba slouží jako vstup regulátoru. Značí se $e(t)$.

Poruchová veličina

Tato veličina vyjadřuje vliv vnějších i vnitřních vlivů na stav soustavy. Například vliv větru na náklon zařízení. Značí se $z(t)$.

Data ze senzorů

Jak již název napovídá, jedná se o aktuální stav regulované veličiny zjištěný pomocí sensorového systému. Může se jednat například o náklon zařízení nebo úhlovou rychlost. Značí se $s(t)$.

Skoková odezva

V případě návrhu řídicího systému je nejprve důležité znát rychlost soustavy. Rychlost soustavy může být pozorována pozorováním odezvy na skokové buzení.

Náběžná doba

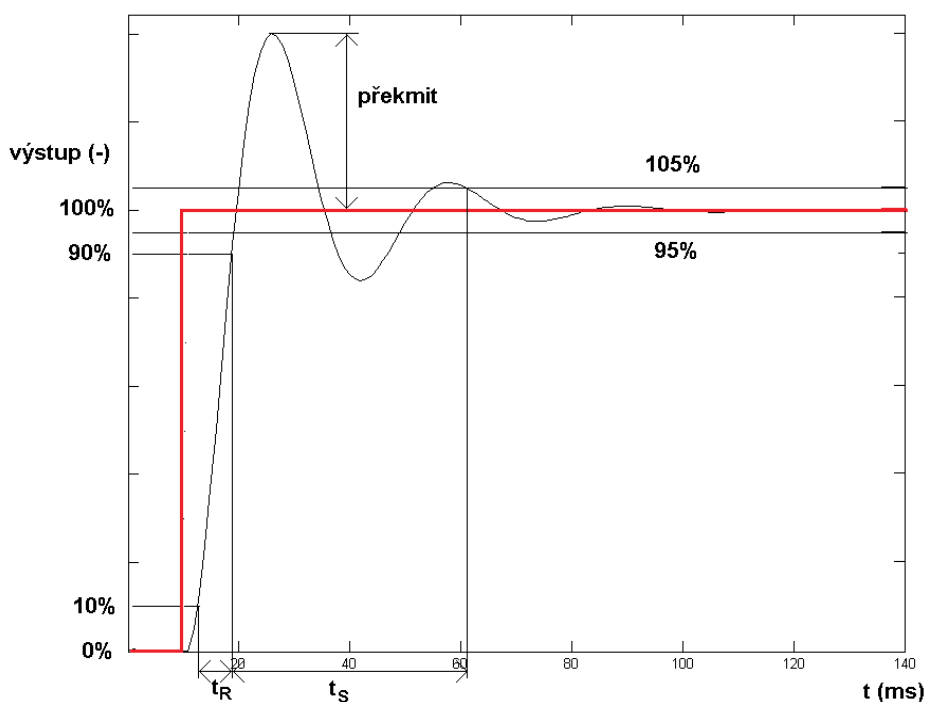
Doba, za kterou systém naběhne z 10 % do 90 % ustáleného stavu.

Velikost překmitu

Jde o procentuální velikost překmitu, o kterou je regulovaná veličina pod nebo nad ustálenou hodnotou.

Doba ustálení

Čas potřebný k ustálení systému s tolerancí $\pm 5\%$.



obr. 21: Odezva soustavy na skokové buzení

Doba trvání jedné smyčky

Jedná se o časový interval, který odděluje dvě po sobě jdoucí měření. V případě této práce je frekvence regulačních zásahů 100 Hz, takže doba trvání jedné smyčky by neměla přesáhnout 10 ms.

8.1.2 P složka regulátoru

Proporcionální složka regulátoru závisí pouze na současné hodnotě regulační odchylky a na velikosti proporcionálního zesílení K_p .

$$P_{\text{OUT}} = K_p \cdot e(t) \quad (18)$$

Čím větší je koeficient K_p , tím je reakce regulátoru rychlejší. Pokud je ale hodnota koeficientu příliš vysoká, začne regulátor kmitat. Samotný P regulátor nedokáže plně vykompenzovat regulační odchylku. Pokud P regulátor zmenší regulační odchylku, dojde ke zmenšení chyby, a tím i zmenšení vlivu P regulátoru. Tím se opět zvýší regulační odchylka. Po odeznění přechodového děje dojde k ustálení regulátoru na hodnotě menší, než je požadovaná hodnota. V případech, kdy nevádí konstantní hodnota regulační odchylky, lze P regulátor použít samostatně.

8.1.3 I složka regulátoru

Integrační složka regulátoru závisí na současné hodnotě regulační odchylky i na jejích minulých hodnotách. I složka regulátoru integruje všechny předchozí chyby.

$$I_{\text{OUT}} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (19)$$

Integrací i malé regulační odchylky dojde ke zvýšení vlivu I složky regulátoru, který způsobí eliminaci této regulační odchylky. Po dosažení nulové regulační odchylky, kdy je požadovaná a skutečná hodnota stejná, ale není integrál v integrační složce nulový. Regulace tedy pokračuje ve svém původním směru a dojde k překmitu přes požadovanou hodnotu. Tím se opět zvýší hodnota regulační odchylky, ale s opačným znaménkem. Překmit stoupá tak dlouho, dokud není integrál roven nule. Skutečná hodnota je tedy opět vychýlena vůči požadované. I složka regulátoru se opět snaží eliminovat regulační odchylku. Tento děj se tedy znovu opakuje. Znovu dojde k překmitu a soustava osciluje okolo požadované hodnoty. V závislosti na velikosti koeficientu K_i a typu regulované soustavy může dojít ke třem jevům.

1. Amplituda kmitů se postupně snižuje a dojde ke stabilizaci soustavy na požadované hodnotě.
2. Amplituda kmitů je konstantní a soustava trvale osciluje kolem požadované hodnoty. Soustava je na mezi stability.

3. Amplituda kmitů se neustále zvyšuje. Soustava je nestabilní.

Proto je nutné nastavení velikosti koeficientu K_i věnovat patřičnou pozornost. Špatně nastavená I složka regulátoru může způsobit nestabilitu regulované soustavy, v případě trikoptyry může tato chyba soustavu snadno nenávratně zničit.

8.1.4 D složka regulátoru

D složka regulátoru závisí na velikosti derivace regulační odchylky. Závisí tedy na rychlosti změny regulační odchylky.

$$D_{\text{OUT}} = K_d \frac{\partial e(t)}{\partial t} \quad (20)$$

Pokud se měřená hodnota rychle blíží nastavené hodnotě, je příspěvek od D složky regulátoru negativní a D složka zpomalí její nárůst. Toto zpomalení zmenší nebo úplně odstraní zákmit způsobený I složkou regulátoru. Pokud se regulační odchylka mění pomalu, D složka se neuplatní. D složka je velmi citlivá na rušení v měřeném signálu. Pokud je signál zarušen, nelze D složku regulátoru použít, protože mezi jednotlivými vzorky měření může velikost derivace dosáhnout obrovských hodnot. D regulátor nelze použít samostatně.

8.2 PD regulátor

Tato kombinace se příliš často nepoužívá. P složka způsobuje nežádoucí konstantní hodnotu regulační odchylky a díky D složce je regulátor citlivý na šum.

8.3 PI regulátor

Tento regulátor vznikne kombinací P a I regulátoru. Jedná se patrně o nejrozšířenější kombinaci PID regulátoru. Díky P složce je regulátor dostatečně rychlý a jeho konstantní regulační odchylka je odstraněna I složkou regulátoru.

$$PI_{\text{out}} = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (21)$$

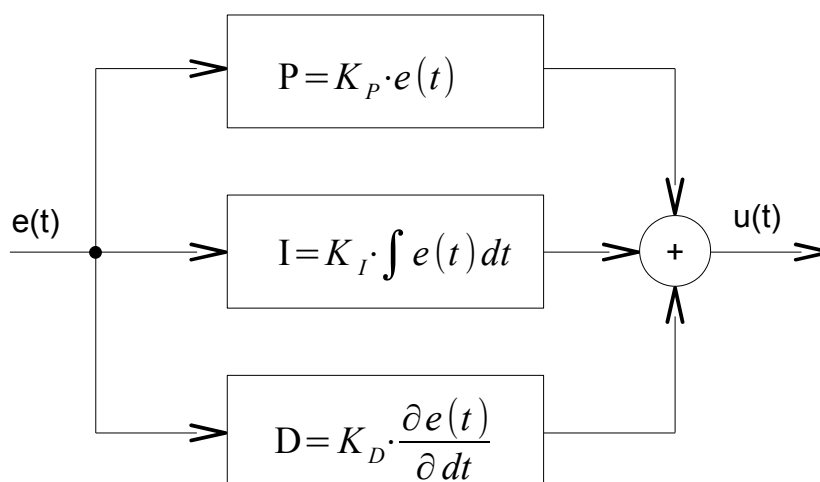
Mezi jeho výhody patří nutnost nastavit pouze 2 koeficienty. Nevýhodou je možnost vzniku oscilací při špatně nastaveném K_p a K_i .

8.4 PID regulátor

PID regulátor obsahuje všechny tři výše zmíněné složky.

$$PID_{\text{out}} = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{\partial e(t)}{\partial t} \quad (22)$$

Používá se v případech, kdy je potřeba snížit nebo odstranit oscilace přidáním D složky. Nastavení tohoto regulátoru je již značně složité.



obr. 22: Blokové schéma PID regulátoru

Tabulka 2 ukazuje vliv zvýšení jednotlivých koeficientů na chování soustavy.

Koeficient	Náběžná doba	Velikost překmitu	Doba ustálení	Offset regulační odchylky
K_p	Snížení	Zvýšení	Malá změna	Snížení
K_i	Snížení	Zvýšení	Zvýšení	Eliminace
K_d	Nepatrná změna	Snížení	Snížení	Bez efektu

Tabulka 2: Vliv zvýšení koeficientů na chování soustavy[6]

8.5 Ladění regulátoru

Ladění PID regulátoru je složité. Je nutné přesně naladit všechny koeficienty. Existuje mnoho metod ladění, od manuálního ladění experimentální metodou, přes

empirické metody až po metody založené na analýze přenosové funkce soustavy.[11]

Manuální ladění

Během manuálního ladění se nastaví všechny koeficienty na nulu. Poté se postupně zvedá proporcionální zesílení K_p až do doby, než se objeví výrazné kmity. V případě, že se jedná o PI regulátor, zmenšíme K_p , čímž snížíme amplitudu kmitů. Následně zvyšujeme derivační složku, čímž dojde ke zklidnění oscilací. Nakonec zvyšujeme integrační složku, čímž dojde k odstranění trvalé regulační odchylky. Vliv jednotlivých koeficientů na chování soustavy je v tabulce 2.

Ziegler–Nichols metoda

Jedná se o empirickou metodu založenou na pozorování a praktických zkušenostech. Byla představena v roce 1942 J.G. Zieglerem a N.B. Nicholsem. Její postup je následující. Nejprve dojde k vyřazení integrační a derivační složky regulátoru, $K_i = K_d = 0$. Poté se postupně zvedá zesílení proporcionální složky K_p . Zesílení se zvedá až do té doby, než začne soustava kmitat netlumenými kmity. Aktuální hodnota K_p je označena jako kritické zesílení K_K . Perioda kmitů je označena jako T_K . Výpočet koeficientů je uveden v tabulce 3.

Regulátor	K_p	K_i	K_d
P	$0,5 * K_K$	-	-
PI	$0,45 * K_K$	$0,54 * K_K / T_K$	-
PID	$0,6 * K_K$	$1,2 * K_K / T_K$	$0,075 * K_K * T_K$

Tabulka 3: Výpočet koeficientů regulátoru pomocí Z-N metody

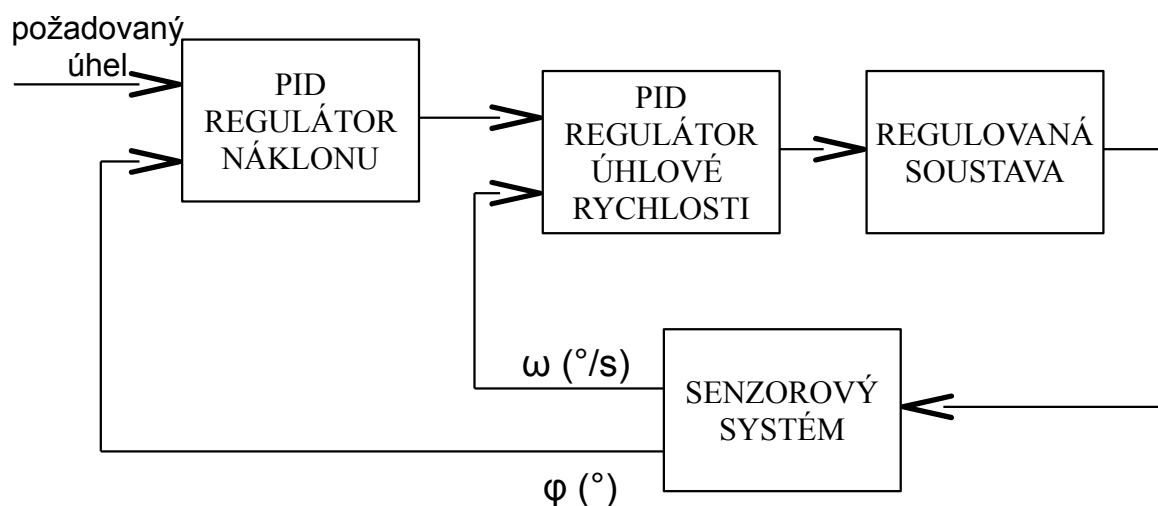
8.6 Uspořádání regulátorů

Při prvotním pohledu do principu regulátorů jsem plánoval použít jako vstupy regulátoru požadovaný a skutečný úhel a výstup použít pro změnu tahu příslušných motorů. Tento způsob se ovšem ukázal jako značně nespolehlivý. Úhel náklonu nezávisí přímo na tahu motorů, ale na integraci úhlové rychlosti. Závislost úhlové rychlosti na tahu motorů má také přibližně charakter integračního članku. Tento vztah je sice nepřesný, ale při zanedbání odporu vzduchu a dalších veličin, kvůli kterým nemůže úhlová rychlost růst nade všechny meze, lze tento vztah použít. Jeden PID stabilizátor nedokáže spolehlivě stabilizovat tyto dva kaskádově zapojené integrační články.

Po detailnějším zkoumání problematiky stabilizace trikoptéry jsem se rozhodl

použít kaskádové zapojení regulátorů. Zapojení je zobrazeno na obr. 23. Regulátory jsou zapojeny ve dvou smyčkách. Vnitřní smyčku tvoří regulátor úhlové rychlosti, regulovaná soustava a senzorový systém, přesněji řečeno gyroskop ze sensorového systému. Tato smyčka slouží ke stabilizaci úhlové rychlosti. Vnější smyčku tvoří regulátor náklonu, regulátor úhlové rychlosti, regulovaná soustava a senzorový systém.

Princip funkce je následující. Do systému vstupuje požadovaný úhel a měřený údaj o aktuálním náklonu. V prvním PID regulátoru je vypočtena požadovaná úhlová rychlost, které je potřeba dosáhnout, aby bylo dosaženo požadovaného náklonu. Tato výsledná rychlost rotace vstupuje jako požadovaná hodnota do druhého regulátoru. Do tohoto regulátoru vstupuje také rychlost rotace z gyroskopu. Výstupem z tohoto regulátoru jsou ovlivněny tahy příslušných motorů. Tím dojde ke změně rychlosti rotace.



obr. 23: Kaskádové zapojení regulátorů

Pro zajištění stability ve všech třech osách je tedy nutné zapojit a naladit 6 regulátorů. Další regulátor by byl potřeba v případě, že by byl ultrazvukový senzor vzdálenosti použit pro stabilizaci výšky letu.

9 Software

9.1 Přenos telemetrie do PC

Komunikace mezi PC a řídicí jednotkou probíhá pomocí technologie WiFi. Samotná komunikace probíhá pomocí tzv. socketů. Socket je obecný mechanismus pro síťovou komunikaci. Pro přenos řídicích příkazů je použit protokol TCP, který obsahuje mechanismus pro kontrolu správnosti přijatých dat. V případě, že přijímač detekuje chybu v přijatých datech, jsou data zahozena a přijímač zašle vysílači požadavek na opětovné zaslání dat.

Po zapnutí hlavního kontrolního programu dojde k vytvoření dvou síťových spojení. Pro příchozí spojení je otevřen neblokující socket na portu 5000, na kterém program začne detekovat přijatá data. Na portu 5001 je otevřeno odchozí spojení, pomocí kterého jsou zpět do PC odesílány naměřené údaje. Příchozí spojení je neblokující. To znamená, že program nečeká na přijetí dat a dále vykonává svoji funkci i v případě, že nejsou žádná přijatá data k dispozici. Pokud nejsou přijata žádná data, program načte z paměti výchozí datový řetězec, který považuje za přijatá data. Případně, pokud již komunikace probíhala, je za přijatá data považován poslední korektně přijatý řetězec. Po přijetí dat jsou data jednoduše kontrolována na správnost pomocí kontrolního součtu a dalších kontrolních mechanismů.

Jednou za několik cyklů běhu hlavní smyčky programu jsou pomocí odchozího spojení odesílána data ze senzorů do PC. S frekvencí cca 10 Hz jsou v kontrolním PC přijímány údaje o okolí, náklonu zařízení, rychlosti rotace, teplotě, vzdálenosti překážek a obsah některých dalších proměnných z řídicího programu.

9.2 Ovládání z PC

Obslužný software na straně uživatele se skládá z několika podprogramů.

Konkrétně to jsou:

1. Hlavní obslužný program
2. Program pro přenos obrazu
3. Vyhodnocení a zobrazení dat z ultrazvukových senzorů vzdálenosti

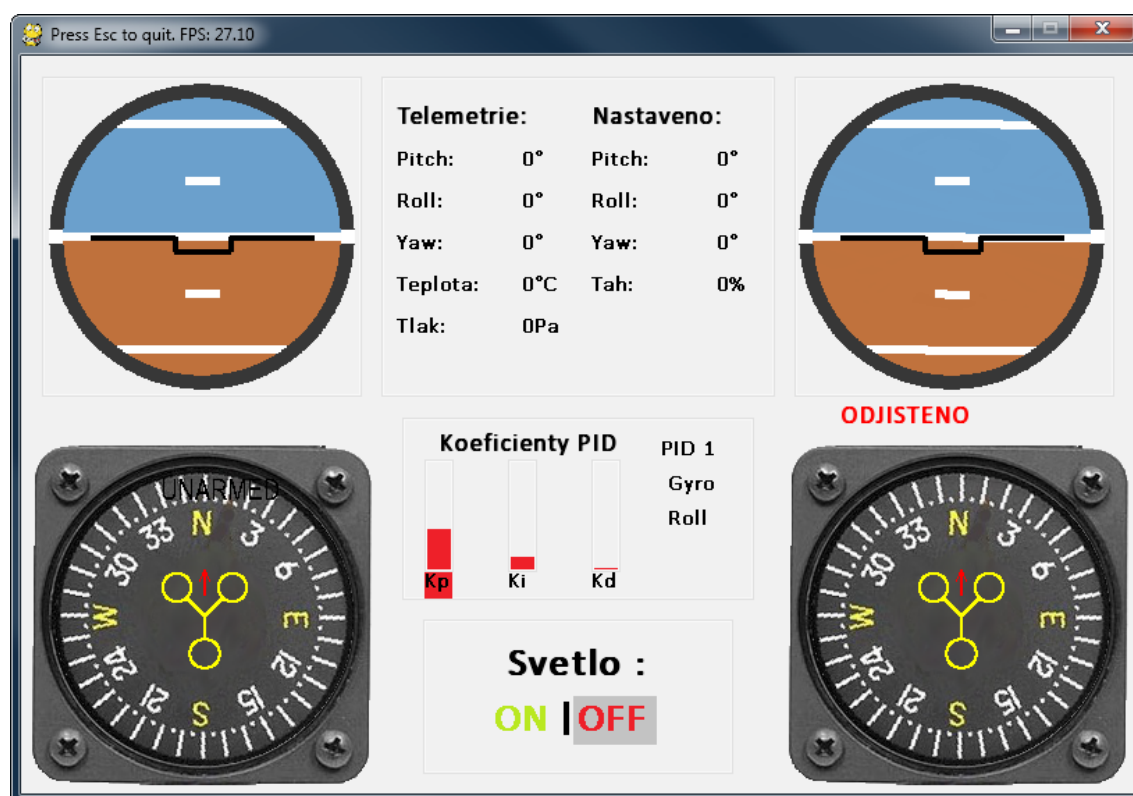
Všechny části jsou napsány v programovacím jazyce Python. Grafické uživatelské rozhraní (GUI) je vytvořeno pomocí knihovny PyGame. Všechny programy včetně GUI

jsou multiplatformní a lze je bez problému spustit na systémech Windows a Linux.

9.2.1 Hlavní obslužný program

Tento program slouží k zobrazení požadovaných a změřených hodnot náklonu, rotace, tahu, teploty a mnoha dalších měřených dat. K interakci s uživatelem slouží pákový ovladač a klávesnice.

Po startu programu dojde k inicializaci pákového ovladače. Poté je otevřeno několik síťových spojení, která slouží ke komunikaci s řídicí deskou trikoptéry a několik spojení, která slouží ke komunikaci s dalšími částmi ovládacího softwaru. Následně je spuštěno GUI. To se skládá ze dvou umělých horizontů a dvou kompasů. Jedna dvojice zobrazuje uživatelem požadované hodnoty, druhá zobrazuje aktuální stav trikoptéry. GUI je zobrazeno na obr. 24.



obr. 24: Grafické uživatelské rozhraní ovládacího programu

Tah motorů leží v rozmezí hodnot 0 % – 100 %. Tato hodnota je ovládána analogovým potenciometrem na pákovém ovladači. Aby nedošlo k nechtěnému vzletu zařízení okamžitě po startu ovládací aplikace, je nutné zařízení odjistit pomocí určité sekvence povelů. Bez odjištění není možné zařízení ovládat. Po odjištění jsou do

zařízení s frekvencí přibližně 25 Hz odesílána kontrolní data. Jedná se o konkrétní hodnoty dvou úhlů náklonu vůči zemi, rotace kolem osy Z, hodnotu tahu motorů, řídicí povely pro kamerový modul a stav osvětlení. Přímo z ovládacího programu je možné nastavovat koeficienty všech PID regulátorů. Dále jsou zde zobrazeny nastavené hodnoty náklonu a tahu, hodnoty přijaté z trikopty a stav LED osvětlení.

9.2.2 Fotoaparát

Ovládání fotoaparátu probíhá pomocí tlačítka na pákovém ovladači. Po stisku tlačítka je do zařízení odeslán povel pro pořízení aktuálního snímku pomocí kamery. Bohužel ale použitý kamerový modul potřebuje přibližně 5 sekund po zapnutí ke kalibraci barev a nastavení vyvážení intenzity osvětlení, než může začít samotné focení, případně natáčení videa. Toto zpoždění je příliš velké a pro focení jednotlivých snímků je toto ovládání prakticky nepoužitelné. Proto bylo nutné vytvořit v zařízení program, který bude schopen zachytit obraz s minimálním zpožděním. Princip programu je následující. Kamera je zapnuta ihned po startu řídicího programu v Raspberry Pi. Dojde k potřebné několikasekundové kalibraci a poté program ve smyčce čeká na řídicí signál. Jako řídicí signál je použito unixové systémové volání SIGUSR1 [7]. V případě detekce systémového volání dojde k uložení aktuálního snímku ve formátu JPEG. Aby se zamezilo předčasnému zničení SDHC paměťové karty častým zápisem dat, není snímek uložen na ní, ale do virtuálního RAM disku. Přístup do tohoto disku v operační paměti je také značně rychlejší.

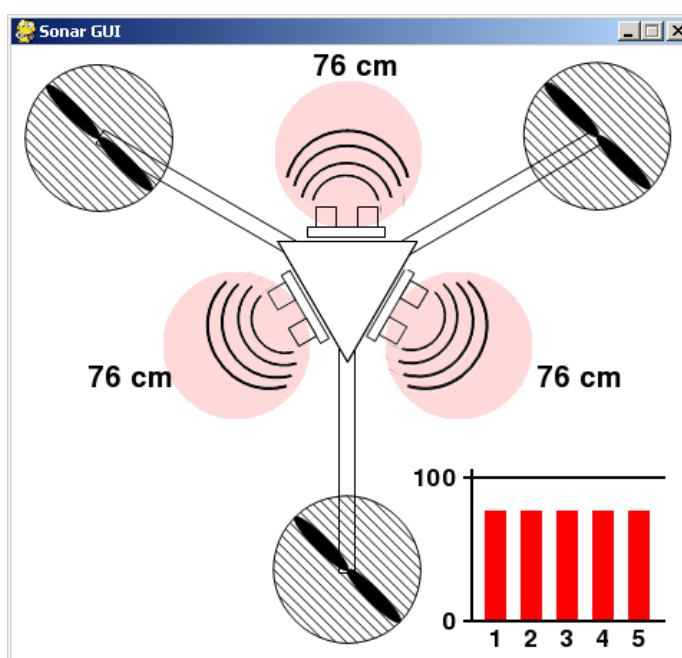
Současně s odesláním řídicího povelu do zařízení je odeslán povel pro přenos nové fotografie do PC. K přenosu je použita knihovna pro FTP připojení. Program se přihlásí ke službě FTP, která je zapnuta v Raspberry Pi. Poté stáhne soubor s fotografií a spojení se ukončí. FTP přenos byl zvolen z důvodu nízkého vytížení procesoru na straně vysílače. Byl vytvořen i vlastní program pro přenos obrazu. Na straně vysílače došlo k vyfocení snímku, jeho převodu do nekomprimovaného formátu a následnému rozdělení do 1 kilobytových bloků. K blokům byla přidána start sekvence několika bytů a kontrolní součet. Takto označená data byla poslána do PC, kde došlo k rekonstrukci a zobrazení obrazu. Tímto způsobem se povedlo přenášet obraz rychlostí až 25 snímků za sekundu. Tuto snímkovací frekvenci lze již bez problémů označit za plynulý přenos videa. Bohužel ale všechny výpočetní operace s tímto přenosem spojené zatěžovaly neúnosně procesor na straně vysílače. Takto vytížený procesor již nešlo spolehlivě využít pro jiné výpočetně náročné úkony, které jsou kritické na rychlost výpočtu. Proto

nebyl nakonec tento přenos obrazu použit.

Zpoždění mezi stiskem spouště fotoaparátu na ovladači a zobrazením fotky v rozlišení 2592x1944 bodů v PC je přibližně 4 sekundy. Snížením rozlišení fotografie lze toto zpoždění samozřejmě výrazně zmenšit.

9.2.3 Monitorování ultrazvukových senzorů

Tento program přijímá přes síťový socket údaje z pěti ultrazvukových senzorů. Přijátá data jsou zpracována a následně zobrazena. Vzdálenosti jsou zobrazeny ve formě textu i graficky. Graficky jsou zobrazena v grafu a pomocí intenzity červené barvy kolem konkrétního senzoru. GUI je zobrazeno na obr. 25.



obr. 25: Vyhodnocení dat z ultrazvukových senzorů

9.2.4 Joystick

Joystick je pákový ovladač sloužící k interakci s počítačem. Skládá se z páky kolmo umístěné do vodorovné podložky. Páku lze vychýlit v libovolném směru přibližně o 30°. Výchylka páky je převedena na spojitou informaci o průmětu vychýlení páky vůči podložce ve dvou na sebe vzájemně kolmých směrech. Tyto ovladače se většinou používají pro ovládání leteckých simulátorů, proto jsou velmi vhodné i pro ovládání leteckých modelů. Ovladač komunikuje přes rozhraní USB. Dále je vybaven

pěti tlačítky a analogovým potenciometrem.

Náklonem páky ve směru osy X (směrem od a k uživateli) je nastavována požadovaná velikost úhlu Pitch. Stejně tak při vychýlení páky v směru osy Y je nastavována velikost úhlu Roll. Úhel rotace YAW je ovládán dvojicí tlačítek. Prostřední tlačítko na ovladači slouží k ovládání kamery. Přední tlačítko slouží k ovládání osvětlení.

9.3 Software v zařízení

Jak již bylo zmíněno, v zařízení běží operační systém s jádrem Linux. V tomto systému je spuštěna řídicí aplikace, která je napsána v jazyce Python. Aplikace se stará o inicializaci celého systému. Ověřuje funkčnost všech senzorů, otevírá komunikační rozhraní, dále ovládá výkony jednotlivých motorů, náklon servomotoru a v nekonečné smyčce obsluhuje všechny regulátory. V tomto systému nelze využít časovače a přerušení, proto je nutné softwarově hlídat délku jednoho cyklu programu. Finální verze softwaru má přibližně 1300 řádků kódu. Zdrojové kódy jsou na příloženém CD.

9.4 Software pro PWM generátor

Software pro mikrokontroléry byl napsán v jazyce ANSI C ve vývojovém prostředí Atmel Studio 6.1. Zdrojové kódy pro PWM generátor i ovládání ultrazvukových senzorů jsou na příloženém CD.

Software pro PWM generátor obsahuje přes 400 řádků kódu. Mikroprocesor v tomto zapojení musí obsloužit tři ESC a jeden servomotor. Pro zvýšení spolehlivosti je každá PWM přivedena na dva výstupy procesoru současně. V případě poškození jednoho výstupu procesoru, například následkem pádu zařízení, lze jednoduše příslušné ESC nebo servomotor připojit na druhý výstup. Proto je potřeba generovat celkem 8 PWM signálů plus 2 řídicí signály pro osvětlení.

Použitý mikroprocesor ATmega168 obsahuje 1x16-bitový čítač a 2x8-bitový čítač. Pro ovládání ESC a serva pomocí standardních servo pulzů je nutné použít 16-bitový čítač. Čekání mezi jednotlivými pulzy je natolik velké, že by 8-bitový čítač přetekl. Řídicí signál má podobu pulzu o proměnné šířce 1 ms – 2 ms. Šířka toho pulzu je měněna ve 256-ti krocích. Hardware 16-bitového čítače dokáže v PWM módu generovat pouze dva PWM signály. Proto bylo nutné generovat všech 8 řídicích signálů softwarově pomocí přerušení od tohoto čítače. Frekvenci řídicích pulzů lze softwarově

volit mezi 50 Hz a 100 Hz.

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, komunikace mezi mikroprocesorem a Raspberry Pi probíhá pomocí UART rozhraní rychlostí 9600 Baud/s. Jeden výpočetní cyklus hlavního programu v Raspberry Pi trvá 10 ms, za tuto dobu je tedy do mikroprocesoru možné přenést maximálně 96 bitů. Pro přenesení 1 bytu dat je nutné odeslat 10 bitů, první a poslední bit označují začátek a konec přenosu. V jednom cyklu řídicího programu lze tedy do zařízení přenést maximálně 9 bytů dat. Do tohoto omezeného počtu bytů je tedy nutné vložit informaci o aktuálních stavech 4 PWM signálů, start byty pro detekci přenosu a kontrolní součet.

START BYTE	START BYTE	DATA 1	DATA 2	DATA 3	DATA 4	PARITNÍ BYTE
0xAA	0x55					

Tabulka 4: Struktura datové komunikace

V procesoru je vytvořen 7 bytů dlouhý posuvný registr, do kterého se postupně ukládají přijatá data. Pokud jsou přijatá data ve výše uvedeném formátu a souhlasí kontrolní součet, jsou tato data nastavena jako nové hodnoty PWM signálů. Poté dojde k vymazání celého registru. Pokud nesouhlasí kontrolní součet, jsou přijatá data považována za neplatná a jsou vymazána. Stejným způsobem je ovládán i stav LED osvětlení a změna frekvence PWM signálů.

V případě neočekávaného ukončení řídicího programu dojde k přerušení komunikace a do motorů je stále odesílán pulz, který odpovídá posledním přijatým hodnotám dat. Tato situace může nastat v případě pádu zařízení. Bylo proto nutné zajistit, aby v případě ukončení komunikace došlo k zastavení motorů. Pokud nedojde během 1 vteřiny od poslední úspěšné komunikace k přijetí nových dat, dojde automaticky k zastavení motorů až do té doby, než jsou přijata nová data.

9.5 Software pro řídicí desku ultrazvukových modulů

Software pro tento software obsahuje přibližně 600 řádků kódu. V tomto zapojení je opět použit mikroprocesor ATmega168. Pokud je přes UART rozhraní přijat startovní byte, konkrétně 0x61, začne procesor postupně obsluhovat všech pět ultrazvukových senzorů. Nejprve je přiveden na vstup TRIG prvního senzoru spouštěcí pulz o hodnotě log. 1 a délce trvání 10 μ s. Po ukončení tohoto pulzu je spuštěn

16-bitový čítač. Po ukončení spouštěcího pulzu se na výstupu ECHO senzoru objeví log. 1, která trvá až do přijetí signálu odraženého od překážky. Pro detekci sestupné hrany tohoto signálu je použito externí přerušení na příslušném vstupu, které reaguje na změnu vstupní hodnoty. V případě detekce sestupné hrany signálu ECHO se uloží aktuální hodnota čítače do příslušné proměnné v paměti. Čítač dále inkrementuje svoji hodnotu až do doby, než dojde k dosažení maximální hodnoty čítače. Maximální hodnota je zvolena jako doba, za kterou přijde signál zpět z maximální vzdálenosti, na kterou je senzor schopen detekovat překážku. Pokud není během této doby detekována sestupná hrana, je překážka příliš daleko. Poté dojde k vynulování čítače. Tento postup se opakuje postupně pro všechny ostatní senzory. Po dokončení měření jsou data odeslána společně se start byty a třemi paritními součty do Raspberry Pi. Samotné měření trvá přibližně 33 ms, odesílání dat trvá přibližně 16 ms. Vzdálenost tímto obvodem lze tedy měřit s frekvencí přibližně 20 Hz.

10 Zhodnocení výsledků a případná budoucí vylepšení

Během práce bylo nutné soustředit se na několik bodů. Prvním bodem byla samotná mechanická konstrukce trikopty a výroba nutného hardwaru. Návrh hardwaru, výroba plošných spojů a naprogramování mikrokontrolérů trvalo přibližně dva měsíce. Do této doby jsou zahrnuty i opravy po neúspěšném testování. Zhotovené zařízení váží 1,3 kg. Dokáže vyvinout maximální statický tah 2,1 kg. Na jedno nabití dokáže pracovat 10 – 12 minut v závislosti na požadovaném výkonu motorů. Všechna schémata zapojení, motivy plošných spojů a osazovací plány jsou na přiloženém CD.

Celková cena komponent potřebných pro výrobu zařízení se pohybuje okolo 9 000,- Kč. Ceny jednotlivých komponentů jsou uvedeny v přiložené tabulce.

Dalším bodem bylo vytvoření kontrolního softwaru pro zařízení, ovládacího programu pro PC a vytvoření spolehlivé formy síťové komunikace. Tato část trvala s drobnými přestávkami přibližně jeden rok. Jako největší problém se ukázala minimalizace časového zpoždění komunikace, zvýšení spolehlivosti přenosu a vytvoření různých bezpečnostních mechanismů. Těmito mechanismy se systém řídí v případě ztráty komunikace s PC, zaseknutí Linuxového systému, pádu řídicího programu a při dalších neočekávaných problémech.

Po úspěšném vyřešení výše zmíněných problémů se pozornost přesunula k dalšímu důležitému bodu práce, a to k senzorovému systému a vyhodnocení naměřených dat. Pro správnou funkci zařízení bylo kriticky nutné z dat odstranit rušení a další nežádoucí vlivy. Jako metoda filtrace byl zvolen komplementární filtr. Tento filtr způsobuje minimální časové zpoždění mezi vstupními a výstupními daty a v porovnání se složitějšími typy filtrů poskytuje téměř srovnatelné výsledky. Jeho výhodou oproti např. Kalmanově filtru je jednoduchá implementace.

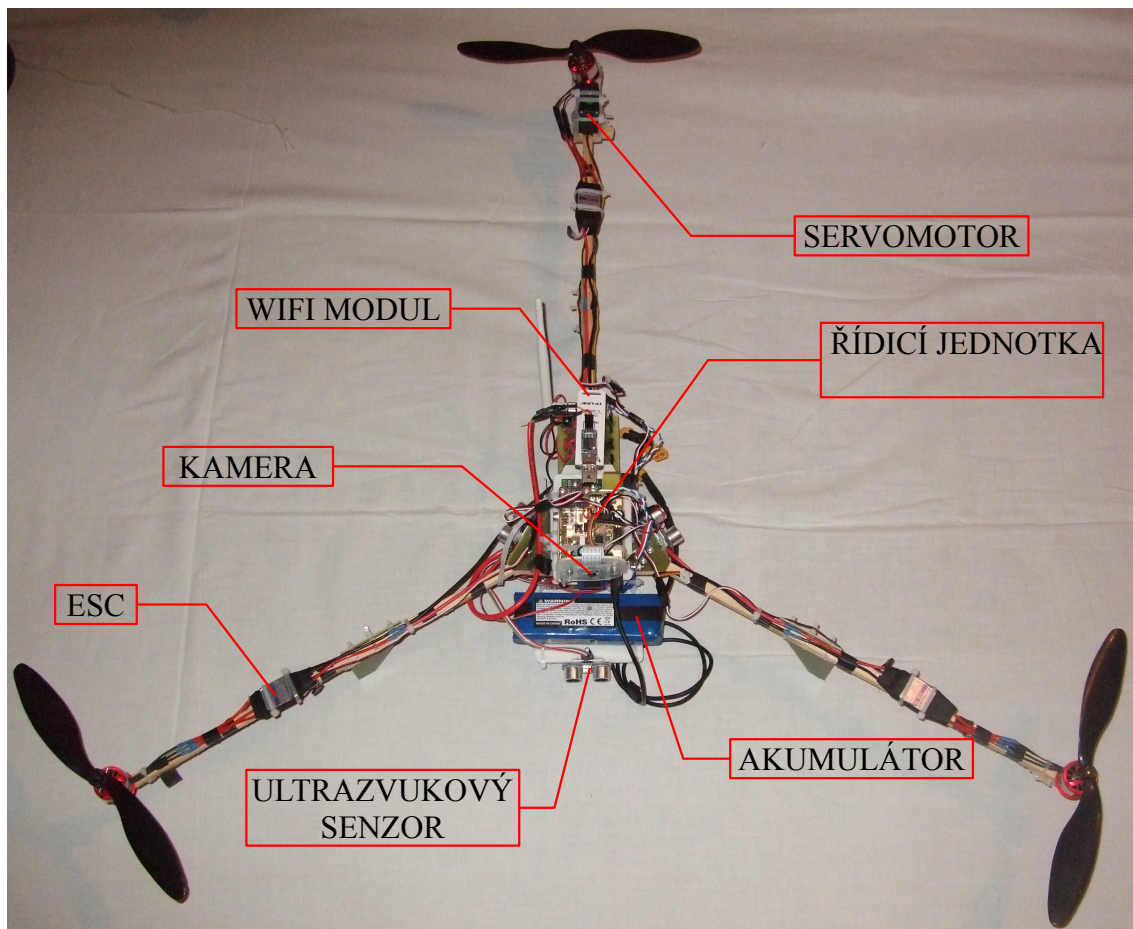
Posledním důležitým bodem byla stabilizace náklonu zařízení. Pro stabilizaci bylo použito zapojení dvou kaskádně zapojených PID regulátorů. Pro hrubé nastavení regulátorů byla použita Ziegler–Nicholsova metoda nastavování a jemnější doladění probíhalo experimentální metodou. Správné nastavení koeficientů regulátorů se ukázalo být jedním z nejtěžších úkolů v této práci. Nastavení regulátorů pomocí simulace vyžaduje detailní matematický model zařízení. Pokud tento model není k dispozici, je vyžadována technická zručnost a praxe s nastavováním regulátorů.

Zařízení bylo doplněno o ultrazvukové senzory vzdálenosti. Výrobce senzorů udává jejich maximální dosah jako 400 cm. Skutečný dosah všech použitých senzorů je však pouhých 109 cm. Tato skutečnost brání použití těchto senzorů pro automatické udržení výšky letu nad zemí. Dále byla přidána kamera s rozlišením 5Mpix pro natáčení videa a pořizování jednotlivých snímků.

Nastavení PID regulátorů a testování letuschopnosti probíhalo následovně. Konstrukce byla nejdříve pevně zafixována v ose X. Tím byl úhel Pitch pevně nastaven a mohl se měnit pouze úhel Roll. Upevnění bylo provedeno ocelovou tyčí, případně ocelovým lanem. Následovalo nastavení regulátoru úhlové rychlosti. Poté bylo zařízení schopné regulovat svoji rychlost otáčení kolem osy X. Po nastavení regulátoru náklonu bylo zařízení schopné stabilizovat svůj rotační úhel kolem osy X a svým náklonem sledovat požadavky přijaté z PC. Stejným postupem bylo provedeno nastavení regulátorů rotace kolem osy Y. Během následujícího testování se potvrdila funkčnost principu stabilizátorů a ostatních částí systému. Pro stabilnější let je potřeba lépe nastavit koeficienty jednotlivých regulátorů. Zařízení je schopné vznést se vlastní silou do vzduchu, ale má sklony oscilovat kolem rovnovážné polohy.

Hlavní budoucí cíl je přesnější nastavení koeficientů regulátorů. Poté se lze věnovat dalším cílům, jako je například výměna motorů za motory s vyšším výkonem. Současné motory jsou sice schopné vznést zařízení do vzduchu, ale při více než 60 % výkonu. To velmi omezuje možný rozsah regulačních zásahů. S výměnou motorů úzce souvisí i výměna akumulátoru za model s vyšší kapacitou. 3000 mAh akumulátor je vybit přibližně za 10 minut. Tato skutečnost velmi komplikovala testování a měření, opětovné nabití akumulátoru proudem 2 A na plnou kapacitu trvá přibližně 100 minut. Výrobce udává jako maximální nabíjecí proud akumulátoru 15 A. Takový zdroj jsem ovšem neměl k dispozici a nabíjení Li-Pol baterií takto velkým proudem se mi nezdálo bezpečné. Dalším nutným vylepšením je měření napětí na jednotlivých člancích akumulátoru. Při poklesu napětí pod minimální hodnotu dochází okamžitě k nevratné ztrátě kapacity akumulátoru.

Po vyřešení těchto hlavních problémů bude zařízení doplněno o GPS a GSM přijímač, což umožní návrat na startovní pozici v případě ztráty spojení, případně plně automatické lety.



obr. 26: Hotové zařízení

11 Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout a zkonstruovat řídicí systém, sensorový systém a napájecí soustavu pro trikoptéru. Vzhledem k tomu, že se jedná o relativně nový typ zařízení, není nabídka dostupné literatury příliš široká. Na základě získaných znalostí jsem navrhl napájecí systém, který plně pokrývá požadavky této práce. Po úspěšné konstrukci hardwaru a celého zařízení jsem se zaměřil na vývoj potřebného ovládacího softwaru. Povedlo se zprovoznit spolehlivý obousměrný datový přenos mezi zařízením a ovládacím počítačem. Zařízení je z počítače ovládáno pomocí klávesnice a pákového ovladače.

Při návrhu sensorového systému bylo potřeba zaměřit se především na odstranění nežádoucího rušení z měřených signálů. Vysoké požadavky byly kladeny na minimalizaci časového zpoždění mezi vstupním a výstupním signálem filtru, a proto jsem se rozhodl použít komplementární filtr. Tento filtr kombinuje data z akcelerometru a z gyroskopu a poskytuje tak lepší odhad úhlů náklonu, než jednotlivé senzory samostatně, navíc s minimálním zpožděním. Po vylepšení o automatické váhování vstupních dat je sensorový systém necitlivý na pohybové zrychlení a na rušení vzniklé působením vibrací na senzory. Takto navržený sensorový systém je schopen měřit náklon zařízení vůči zemi a rychlost rotace ve třech osách.

Pro stabilizaci zařízení jsou použity PID regulátory. Návrh, použití a nastavení regulátorů se ukázalo jako nejproblematičtější část celé práce. Prvním problémem bylo vybrat vhodné zapojení regulátoru. Použití jediného PID regulátoru se pro stabilizaci v jedné ose neosvědčilo. Po přechodu k použití dvou kaskádně zapojených regulátorů začala stabilizace fungovat prakticky okamžitě. Zařízení je nyní schopné letu, ale koeficienty jednotlivých regulátorů je stále nutné lépe nastavit, během letu totiž dochází k oscilacím kolem ustálené polohy.

12 Zdroje

[1] Jianwen Shao: *Direct Back EMF Detection Method for Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drives* [online]. [cit. 2014-02-09].

Dostupné z: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-09152003-171904/unrestricted/T.pdf>

[2] TURNIGY – *návod k obsluze pro regulátory střídavých motorů* [online]. [cit. 2014-02-07].

Dostupné z: http://www.bighobby.cz/fotky6348/fotov/_ps_6Regl_turnigy.PDF

[3] Jeník P.: *Senzorový systém pro monitorování bezpečného pohybu osob*,
Bakalářská práce, FEL ČVUT, 2012

[4] ElecFreaks: *Ultrasonic Ranging Module HC - SR04* [online].

[cit. 2014-03-10]. Dostupné z: <http://www.micropik.com/PDF/HCSR04.pdf>

[5] Airspace.cz: *Popis vrtulí* [online]. [cit. 2013-12-05].

Dostupné z: http://www.airspace.cz/akademie_letectvi/2012/03/co-by-se-mohlo-ale-spise-melo-vedet-o-vrtulich/

[6] Shafiq Ur Rahman,: *DESIGN OF AVIONICS AND CONTROLLERS FOR AUTONOMOUS TAKEOFF, HOVER AND LANDING OF A MINI-TANDEM HELICOPTER*, Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, 2010. [online]. [cit. 2014-01-23].

Dostupné z: http://drum.lib.umd.edu/bitstream/1903/11264/1/Rahman_umd_0117N_11839.pdf

[7] Raspberry Pi Foundation: *Popis Raspberry Pi* [online]. [cit. 2013-10-25].

Dostupné z: <http://www.raspberrypi.org/>

[8] *Popis jazyka Python* [online]. [cit. 2013-12-09]

Dostupné z: <http://www.python.org/>

- [9] STMicroelectronics: *MEMS gyroscope L3G4200D datasheet* [online]. [cit. 2013-11-15] Dostupné z: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00265057.pdf>
- [10] Analog Devices: *MEMS Digital Accelerometer datasheet ADXL345* [online]. [cit. 2013-11-15] Dostupné z: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXL345.pdf
- [11] Kupka L.: *Nastavování PID regulátorů*, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií, Technická univerzita v Liberci [online]. [cit. 2014-03-09] Dostupné z: http://www.fm.tul.cz/~libor.kupka/09_-_Nastavovani_PID.pdf
- [12] *BLHeli firmware pro ESC* [online]. [cit. 2014-02-17] Dostupné z: <https://github.com/bitdump/BLHeli>
- [13] Texas Instruments, *datasheet LM2596* [online]. [cit. 2013-10-08]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf>
- [14] STMicroelectronics, *MEMS gyroscopes* [online]. [cit. 2014-04-11]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=A03AENwOVNY>
- [15] Husák, M.: *Mikrosenzory a mikroaktuátory*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2008, 540 s. ISBN 978-80-200-1478-8.

13 Seznam ilustrací

obr. 1: Typy multirotorových systémů.....	3
obr. 2: Rozložení hlavních sil působících na konstrukci.....	5
obr. 3: Blokové schéma zařízení.....	7
obr. 4: Princip ovládání rotace.....	11
obr. 5: Model akcelerometru.....	14
obr. 6: Zjednodušená struktura kapacitního akcelerometru.....	14
obr. 7: Princip činnosti MEMS gyroskopu.....	15
obr. 8: Diferenciální měření změny kapacity.....	16
obr. 9: Potlačení vlivu zrychlení.....	16
obr. 10: Princip funkce ultrazvukového senzoru vzdálenosti.....	17
obr. 11: Časový diagram ovládání HC-SR04.....	20
obr. 12: Poloha ultrazvukových senzorů.....	21
obr. 13: IIR filtr.....	27
obr. 14: Filtrace filtrem typu dolní propust.....	27
obr. 15: Blokové schéma komplementárního filtru.....	28
obr. 16: Váhovací funkce pro data z akcelerometru.....	29
obr. 17: Ukázka funkce komplementárního filtru.....	30
obr. 18: Ukázka funkce komplementárního filtru.....	31
obr. 19: Ukázka funkce komplementárního filtru.....	32
obr. 20: Blokové schéma regulační smyčky.....	33
obr. 21: Odezva soustavy na skokové buzení.....	35
obr. 22: Blokové schéma PID regulátoru.....	38
obr. 23: Kaskádové zapojení regulátorů.....	40
obr. 24: Grafické uživatelské rozhraní ovládacího programu.....	42
obr. 25: Vyhodnocení dat z ultrazvukových senzorů.....	44
obr. 26: Hotové zařízení.....	50

14 Seznam tabulek

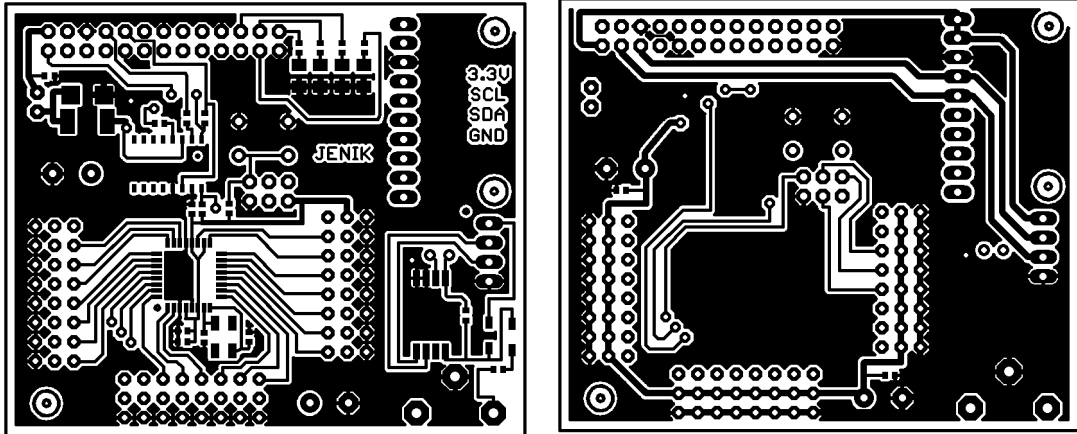
Tabulka 1: Ovládání rotace.....	12
Tabulka 2: Vliv zvýšení koeficientů na chování soustavy[6].....	38
Tabulka 3: Výpočet koeficientů regulátoru pomocí Z-N metody.....	39
Tabulka 4: Struktura datové komunikace.....	46
Tabulka 5: Ekonomické zhodnocení.....	58

15 Seznam použitých zkratk a symbolů

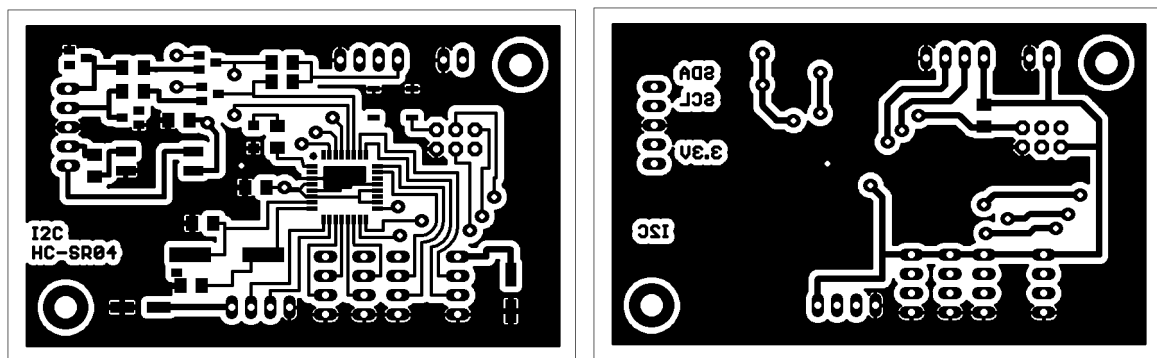
UART	-	Universal Asynchronous Receiver Transmitter, Sériová linka
I ² C	-	Inter-Integrated Circuit,
CPU	-	Central Processing Unit, Centrální výpočetní jednotka
GPU	-	Graphic Processing Unit, Grafická výpočetní jednotka
SoC	-	System on Chip
PWM	-	Pulse Width Modulation, Pulzně šířková modulace
ESC	-	Electronic speed controller, Elektronické řízení otáček motoru
Li-Pol	-	Lithium-Polymerový akumulátor
LAN	-	Local Area Network, Místní síť
GPIO	-	General-purpose input/output, Obecný vstup/výstup
USB	-	Universal Serial Bus
MEMS	-	Mikro Elektro Mechanický Systém
GUI	-	Grafické uživatelské rozhraní
$a \text{ (ms}^{-2}\text{)}$	-	Zrychlení
$g_N \text{ (ms}^{-2}\text{)}$	-	Gravitační zrychlení, $g_N = 9,823 \text{ ms}^{-2}$
IIR	-	Infinite impulse response, filtr s nekonečnou impulzní odezvou
PID	-	Proporcionálně-Integračně-Derivační regulátor

16 Přílohy

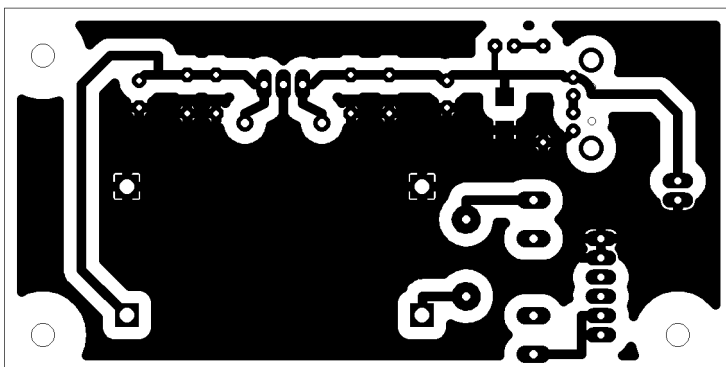
16.1 Motivы desek plošných spojů



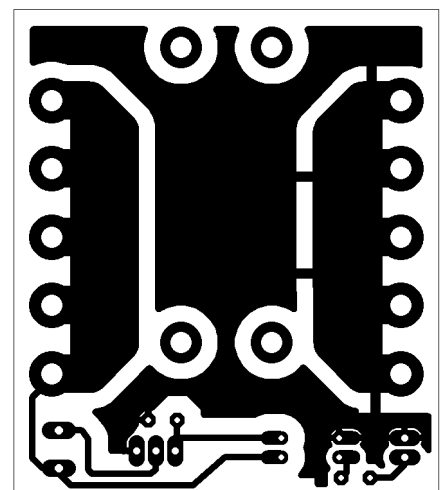
PWM generátor



Ultrazvukový systém



Napájecí deska



Rozvod napájení

16.2 Ekonomické zhodnocení

Zařízení	Název	Množství (ks)	Cena za kus (Kč)	Cena (Kč)
akumulátor	ZIPPY FLIGHTMAX 3000MAH 3S1P 40C LI-POL	1	710	710
konektor akumulátoru	konektor XT60, 1 pár	1	50	50
nabíječka akumulátoru	TURNIGY ACCUCCELL-6 50W 6A NABÍJEČ, VYBÍJEČ, BALANCER	1	995	995
nehořlavý obal pro nabíjení akumulátoru	LIPO-SAFE 25X33CM	1	155	155
řídící jednotka	Raspberry Pi rev. B	1	1259	1259
ultrazvukový senzor	HC-SR04	5	71	355
mikroprocesor	ATmega168	2	89c	178
motor	CF2822	3 (+1)	250	750
ESC	TURNIGY Plush 25 A	3	265	795
USB / UART	PL2303HX	1	68	68
spínaný zdroj		1	65	65
Senzorový systém	GY-80	1	570	570
servomotor	HITEC HS-311	1	250	250
WiFi modul	TP-LINK TL-WN722N	1	284	284
pákový ovladač	Joystick Genius F17 USB	1	203	203
paměťová karta	Verbatim SDHC,8GB,Class 10	1	179	179
vtule	APC 10x3,8 SF	3	75	225
upevnění vrtulí	unašeč vrtule	3	46	138
kamera	RPI CAMERA BOARD	1	807	807
PCB	fotocuprextit FR4	3	74	222
ostatní elektronické součástky	R,C, optočleny, konektory, atd...	-	500	500
ostatní mechanické části	rám, spojovací materiál, kabeláž	1	200	200
vyvažovač vrtule		1	40	40
Celková cena za komponenty:				8 998 Kč

Tabulka 5: Ekonomické zhodnocení

16.3 Obsah přiloženého CD

Přiložené CD obsahuje:

- tento text ve formátu PDF,
- fotky zhotoveného zařízení,
- výrobní podklady pro vytvořený hardware,
- software pro PC, Raspberry Pi a mikrokontroléry.