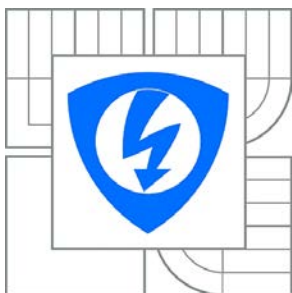




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLÓGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

REALIZACE VRTULNÍKU SE ŠTYŘMI ROTORY

QUADROCOPTER REALIZATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JÁN PEKAROVI

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. TOMÁŠ GÖTTHANS, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Ján Pekarovi

ID: 115254

Ročník: 2

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Realizace vrtulníku se čtyřmi motory

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principem čtyřmotorového vrtulníku, možnostmi realizace, potřebnými senzory, řídicími obvody a vhodnými motory. Zvažte použití mikroprocesoru s ohledem na výpočetní nároky, požadavky na řízení a potřebované senzory. Prostudujte možnosti dálkového ovládání a bateriového napájení s ohledem na hmotnost.

Realizujte základní konstrukci řízení, otestujte řízení jednotlivých motorů a dalších dílčích částí. Navrhněte algoritmy usnadňující ovládání vrtulníku (vrtulník je bez zásahu operátora schopen udržovat klidovou polohu ve vzduchu).

Zkompletujte celkové řízení, otestujte vlastnosti řízení, parametry řízení (výdrž baterie atd.) a možnosti předprogramovaných akcí (maker). Otestujte chování ve vnitřních i venkovních prostorech a zvažte použití ideálně zabráněných kolizí.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] NOVÁK, P. MOBILNÍ ROBOTY - pohony, senzory, řízení. BEN - technická literatura, Praha, 2005.

[2] MANN, B. C pro mikrokontroléry. BEN - technická literatura, Praha, 2003.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 23.5.2014

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Götthans, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Předseda oborové rady

Abstrakt

Táto diplomová práca sa zaoberá návrhom vrtuľníku so štyrmi rotormi označovaného ako quadcopter. Popisuje jeho princípy fungovania a existujúce modifikácie. Súčasťou práce je výber vhodného rámu, zostavy diaľkového ovládania, motorov a vrtulí, akumulátora, senzorov pre stabilizáciu i detekciu prekážok a vhodných mikrokontrolérov pre ich obsluhu. Práca predstavuje návrh koncepcie konkrétneho kopteru, návrh a simuláciu dosiek plošných spojov až po ich vlastnoručnú výrobu, oživenie a otestovanie. Záverečná časť diplomovej práce je obsahujúce ekonomické zhodnotenie projektu a jeho porovnanie s konkurenciou.

Kľúčové slová

Batéria, diaľkové ovládanie, elektromotor, gyroskop, mikrokontrolér, quadcopter, simulácia, vrtuľník

Abstract

This thesis deals with the design of a helicopter with four rotors known as quadcopter. It describes the principles of operation and existing modifications. Part of the work is the selection of a suitable frame, remote control set, engines and propellers, battery, sensors for stabilization and detection of obstacles and microcontroller for their operation. The paper presents the concept of the specific copter design, design and simulation of printed circuit boards to their self-production, activation and testing. The final part of the thesis includes an economic assessment of the project and its comparison with competitors.

Keywords

Battery, remote control, motor, gyroscope, microcontroller, quadcopter, simulation, helicopter

PEKAROVIČ, J. *Realizace vrtulníku se čtyřmi rotory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 74 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Götthans, Ph.D..

Prehlásenie

Prehlasujem, že svoju diplomovú prácu na tému *Realizace vrtulníku se čtyřmi rotory* som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s jej vytvorením som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení § 152 trestného zákona č. 140/1961 Sb.

V Brne dňa 23. mája 2014 podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu diplomovej práce Ing. Tomášovi Götthansovi, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej diplomovej práce.

V Brne dňa 23. mája 2014 podpis autora

Obsah

1. Úvod	11
1.1 Typy konštrukcií viacrotorových vrtulníkov	12
1.1.1 Trikopter.....	12
1.1.2 Quadkopter	12
1.1.3 Hexakopter	13
1.1.4 Oktokopter.....	14
1.2 Princíp riadeného letu kopterov	14
1.3 Návrh konkrétneho kopteru.....	15
2. Nosná konštrukcia	17
2.1 Ochranný kryt.....	17
3. Diaľkové ovládanie	19
3.1 Výber vhodnej zostavy.....	19
4. Regulátory motorov	22
4.1 Elektromotory.....	23
4.2 Mikrokontrolér a logické obvody.....	26
4.3 Mostíkové spínače.....	28
4.4 Komparátor pre časovanie komutácie	31
4.5 Rozbeh motora	36
4.6 Meranie prevádzkových podmienok	37
4.6.1 Meranie stavu akumulátora	37
4.6.2 Meranie prúdového odberu motora	38
4.6.3 Meranie teploty spínacích tranzistorov	41
4.7 Doska plošných spojov.....	43
4.8 Vrtule.....	43
4.8.1 Parametre zvolených vrtulí.....	44
4.9 Záver kapitoly 4	45
5. Obvod pre riadenie letu	46
5.1 Mikrokontrolér	47
5.1.1 Zbernica I ² C	48
5.1.2 Zbernica USART.....	49
5.2 Senzory.....	50
5.2.1 Gyroskopy	50
5.2.2 Ultrazvukové senzory.....	54
5.3 Doska plošných spojov.....	56
5.4 Záver kapitoly 5	56
6. Napájanie	58
6.1 Akumulátor.....	58
6.2 Palubný napájací zdroj 5V	59
7. Merania	61
7.1 Meranie ťahu vrtulí	61
7.2 Meranie dosahu a presnosti ultrazvukových senzorov	64
7.3 Meranie dosahu diaľkového ovládania	65

7.4 Charakteristiky napájacieho zdroja 5V	65
8. Ekonomické zhodnotenie	69
9. Záver	70
Literatúra	71
Zoznam príloh	74

Zoznam obrázkov

Obr. 1.1 Experimentálny vrtuľník Dr. de Bothezat a Ivana Jeroma [1]	11
Obr. 1.2 Trikopter [26]	12
Obr. 1.3 Quadkopter [26]	13
Obr. 1.4 Hexakopter [26]	13
Obr. 1.5 Oktokopter [26]	14
Obr. 1.6 Bloková schéma navrhovaného quadkopteru	15
Obr. 2.1 Nosná konštrukcia	18
Obr. 2.2 Ochranný kryt z polystyrénu	18
Obr. 2.3 Vyrobený ochranný kryt	18
Obr. 3.1 Zostava diaľkového ovládania [15]	19
Obr. 3.2 Pripojenie kanálov k páčkovým ovládačom vysieláča	20
Obr. 3.3 Výstup prijímača diaľkového ovládaia pre maximálnu ľavú polohu ovládača	20
Obr. 3.4 Výstup prijímača diaľkového ovládaia pre stredovú polohu ovládača	21
Obr. 3.5 Výstup prijímača diaľkového ovládaia pre maximálnu pravú polohu ovládača	21
Obr. 4.1 Bloková schéma regulátora motorov	22
Obr. 4.2 Synchronný striedavý motor [16]	22
Obr. 4.3 Princíp zapojenia synchronného striedavého motora [8]	23
Obr. 4.4 Princíp spínania fáz synchronného striedavého motora [30]	24
Obr. 4.5 Spätné elektromotorické napätie trojfázového synchronného motora [30]	25
Obr. 4.6 Jedna fáza trojfázového synchronného motora zobrazená na osciloskope	25
Obr. 4.7 Mikrokontrolér Atmega8 v puzdre TQFP32 [3]	26
Obr. 4.8 Mikrokontrolér a logické obvody pre riadenie komutácie motora	28
Obr. 4.9 Schéma zapojenia mostíkového spínača	29
Obr. 4.10 Tranzistorový mostík zakreslený v simulačnom programe LT Spice	30
Obr. 4.11 Výsledky simulácie tranzistorového mostíka	30
Obr. 4.12 Snímanie prechodu plávajúcej fázy nulou pomocou odporových deličov	32
Obr. 4.13 Snímanie prechodu plávajúcej fázy nulou pomocou komparátora	33
Obr. 4.14 Komparátor pre časovanie komutácie zakreslený v LT Spice	34
Obr. 4.15 Sínusovky predstavujúce jednotlivé fázy	34
Obr. 4.16 Spätné elektromotorické napätia a referencia vstupujúce do komparátorov	35
Obr. 4.17 Preklopenie komparátora v okamihu prechodu nulou	35
Obr. 4.18 Zmena trvania kroku a striedy riadiaceho PWM signálu pre rozbeh motora	37
Obr. 4.19 Odporový delič pre meranie stavu akumulátora	38
Obr. 4.20 Zapojenie obvodu pre meranie jednosmerného prúdu	39
Obr. 4.21 Obvod pre meranie prúdu zakreslený v simulačnom programe LT Spice	40
Obr. 4.22 Priebeh meraného prúdu a výstupu LTC6102 pre prúd 1A	40
Obr. 4.23 Priebeh meraného prúdu a výstupu LTC6102 pre prúd 20A	41
Obr. 4.24 Odporový delič s termistorom pre meranie teploty	42
Obr. 4.25 Závislosť odporu termistoru KTY81/220 na teplote [35]	42
Obr. 4.26 Umiestnenie termistoru pre meranie teploty tranzistorov na vyrobenom obvode ..	43
Obr. 4.27 Vrtule GWS	44
Obr. 4.28 Hliníkové vrtulové kužele	44
Obr. 5.1 Bloková schéma obvodu pre riadenie letu	46
Obr. 5.2 Mikrokontrolér Atmega64 v puzdre TQFP64 [2]	47
Obr. 5.3 I ² C zbernica	48
Obr. 5.4 USART sériový rámec [3]	49
Obr. 5.5 Obvod FT232RL od firmy FTDI Chip [10]	49
Obr. 5.6 Zapojenie gyroskopu MuRata ENC-03R podľa katalógového listu výrobcu [32] ..	51

Obr. 5.7	Zapojenie gyroskopu MuRata ENC-03R v kombinácii s operačným zosilňovačom	52
Obr. 5.8	Zosilňovač a filter výstupného signálu gyroskopu zakreslený v LT Spice	52
Obr. 5.9	Signály na výstupoch gyroskopu, RC filtru a operačného zosilňovača	53
Obr. 5.10	Ultrazvukový senzor vzdialenosti HC-SR04	54
Obr. 5.11	Signály ultrazvukového senzoru HC-SR04 [33]	54
Obr. 5.12	Umiestnenie ultrazvukového senzoru na ramene quadkopteru	55
Obr. 5.13	Mikrokontrolér a logické obvody pre obsluhu ultrazvukových senzorov	55
Obr. 6.2	Detail konektorov pre pripojenie akumulátora na spodnej strane robota	60
Obr. 7.1	Nákres prípravku pre meranie ťahu vrtulí	61
Obr. 7.2	Prípravok pre meranie ťahu vrtulí	62
Obr. 7.3	Závislosť ťahu vrtulí na odoberanom prúde	63
Obr. 7.4	Pomer ťahu k odoberanému prúdu v závislosti na prúde	63
Obr. 7.5	Meranie dosahu a presnosti ultrazvukových senzorov	64
Obr. 7.6	Záťažová charakteristika spínaného napájacieho zdroja 5V	66
Obr. 7.7	Účinnosť spínaného napájacieho zdroja 5V	67
Obr. 7.8	Zvlnenie výstupného napätia zdroja pri plnej záťaži	68

Zoznam tabuliek

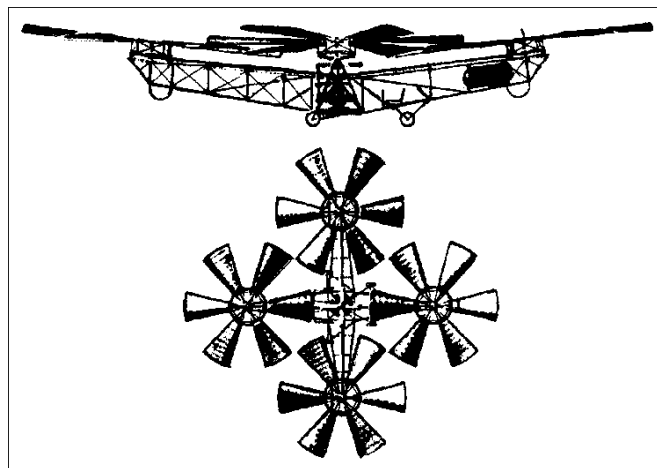
Tab. 2.1 Parametre konštrukcie [19]	17
Tab. 4.1 Parametre motora [16]	23
Tab. 4.2 Log. stavy enable výstupov mikrokontroléru pre jednotlivé kroky komutácie.....	28
Tab. 4.3 Zmena trvania kroku a striedy riadiaceho PWM signálu pre rozbeh motora.....	36
Tab. 5.1 Prehľad periférií	47
Tab. 5.2 Parametre gyroskopu MuRata ENC-03R [32]	51
Tab. 7.1 Namerané a vypočítané hodnoty ťahu vrtule GWS 10“.....	62
Tab. 7.2 Namerané a vypočítané hodnoty ťahu vrtule GWS 7“.....	62
Tab. 7.3 Meranie záťažovej charakteristiky spínaného napájacieho zdroja 5V	66
Tab. 8.1 Cenový prehľad materiálu na zostavenie quadkopteru navrhnutého v tejto práci	69

1. Úvod

Myšlienka štvorrotorového vrtuľníka je v porovnaní s vrtuľníkmi klasickej koncepcie relatívne málo známa. Je ale takmer rovnako stará. Prvé takéto zariadenie sa vznieslo už v októbri roku 1922 [1]. Stroj visel vo vzduchu po dobu jednej minúty a 42 sekúnd [1]. Dosiahol pri tom výšku 1,8 m [1]. Autormi projektu, ktorý vznikol na základe požiadaviek americkej armády, boli Dr. George de Bothezat a Ivan Jerome [1].

Išlo o stroj vážiaci 1700 kg so štvoricou ramien dlhých 9 m [1]. Na konci každého z ramien sa nachádzal rotor so šiestimi listami a priemerom 8,1 m [1]. Rotory na bočných ramenách mali premenlivé stúpanie, aby bolo možné stroj ovládať. Pôvodne bol nad motorom s výkonom 180 konských síl umiestnený ešte jeden pomocný rotor [1]. Ten bol ale uznaný za prebytočný a po niekoľkých letoch ho konštruktéri odstránili. Do konca roku 1923 bolo uskutočnených približne sto letov [1]. Konštruktéri postupne zdokonalili motor až na výkon 220 konských síl [1]. Napriek tomu sa stroj nikdy nevzniesol do výšky väčšej ako 5 m [1]. Kontrakt s americkou armádou však požadoval minimálne 100 metrovú výšku a tak bol po preinvestovaní 200 tisíc amerických dolárov vývoj štvorrotorového vrtuľníka ukončený [1].

Konštruktérom sa podarilo preukázať, že let vrtuľníka je prakticky možný, ale ich stroj bol nespoľahlivý, mal nedostatočný výkon a pilot bol tak zamestnaný stabilizáciou stroja, že už nedokázal riadiť smer letu [1]. Zariadenie dokázalo iba visieť na mieste [1]. Myšlienka vrtuľníku so štyrmi rotormi bola teda na dlhú dobu zabudnutá.



Obr. 1.1 Experimentálny vrtuľník Dr. de Bothezat a Ivana Jeroma [1]

V posledných rokoch zaznamenávajú bezpilotné lietajúce prostriedky výrazný rozmach. Či už vo vojenskej alebo civilnej sfére. Obľúbenú skupinu zariadení určených na prieskum, prenos ľahkých predmetov či na zábavu, predstavujú práve koptery.

Ide o mobilné, diaľkovo riadené airborne roboty: viacrotorové vrtuľníky vybavené stabilizačnou elektronikou. Tá riadi samostatne každý rotor, čo kopterom umožňuje mimoriadnu stabilitu a zároveň rýchlosť a obratnosť. Počet rotorov sa u jednotlivých konštrukcií líši od troch až po osem. Použitie viac ako osem rotorov by bolo už neefektívne [25]. Práve podľa počtu rotorov koptery rozdelíme.

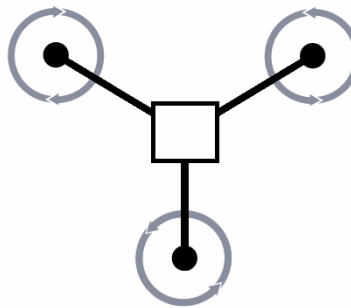
1.1 Typy konštrukcií viacrotorových vrtuľníkov

1.1.1 Trikopter

Ako z názvu vyplýva, ide o kopter poháňaný troma rotormi [26]. Tie sú rozmiestnené v tvare písmena Y [26]. Dva rotory majú zhodný smer rotácie, kým tretí rotuje opačne [26]. Práve tento nepomer smeru otáčania rotorov je hlavnou konštrukčnou nevýhodou trikopteru. Rotáciou totiž vzniká gyroskopický moment a vrtuľník sa otáča okolo zvislej osi [25]. Tomuto otáčaniu možno zabrániť natočením zadného rotoru požadovaným smerom. S rovnakým javom sa stretávame u vrtuľníkov klasickej konštrukcie – hlavný rotor vytvára gyroskopický moment, kým malý zadný rotor jeho vplyv zasa ruší, takže vrtuľník letí stabilným smerom.

Trikopter možno riadiť, rovnako ako všetky koptery, zmenou otáčok jednotlivých rotorov [26]. Oproti ostatným typom navyše aj zmenou uhlu natočenia zadného rotoru [26]. Vďaka tejto vlastnosti trikopter vyniká obratnosťou pri natočení okolo zvislej osi.

Menší počet rotorov trikopteru môže byť výhodou najmä z ekonomického hľadiska. V porovnaní s inými typmi kopterozov totiž spotrebujeme menej materiálu na konštrukciu, menší počet motorov i vrtulí.



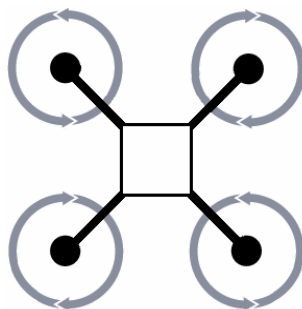
Obr. 1.2 Trikopter [26]

1.1.2 Quadkopter

Quadkopter je najrozšírenejším typom kopteru. Okrem štyroch symetricky usporiadaných rotorov nemá žiadne pohyblivé časti [26]. Všetky štyri motory i vrtule sú zhodné [26]. Z konštrukčného hľadiska je to výhoda, pretože na riadenie kopteru stačí regulovať otáčky jednotlivých rotorov. Štyri rotory zaručujú lepšiu pohyblivosť a stabilitu, než akou sa vyznačuje trikopter.

Zmysel otáčania jednotlivých rotorov je znázornený na obrázku Obr. 1.3. Je možné použiť aj rotory otáčajúce sa zhodným smerom [26]. Pri tomto konštrukčnom riešení by však bolo nutné vychýlenie jedného, či dvoch rotorov podobne, ako u trikopteru. Konštrukcia takéhoto typu quadkopteru by bola zbytočne zložitá a zároveň ťažko ovládateľná.

Spôsob letu požadovaným smerom je podrobne popísaný v nasledujúcej kapitole tejto práce.



Obr. 1.3 Quadkopter [26]

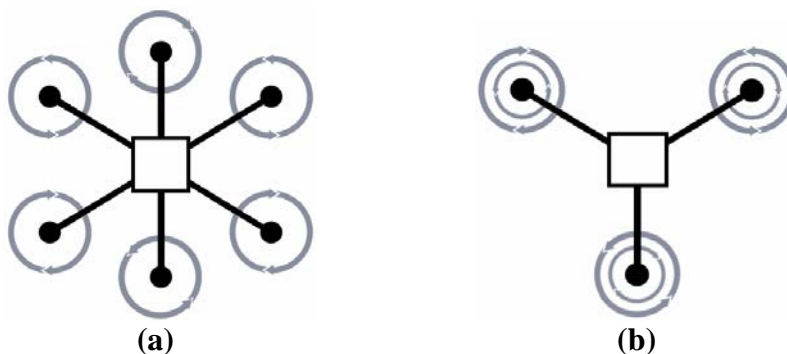
1.1.3 Hexakopter

Ide o zariadenie vybavené šiestimi rotormi [26]. Tie sú svojimi parametrami zhodné, líšia sa iba v smere otáčania vrtulí [26]. Okrem rotorov nemá hexakopter žiadne iné pohyblivé časti, jeho let je teda riadený zmenou otáčok jednotlivých rotorov [26]. Hexakopter je spoľahlivejší ako hore popísané typy kopterov, pretože šesť rotorov umožňuje let aj v prípade poruchy jedného z rotorov.

Existujú dve modifikácie hexakoptera s rôznym rozmiestnením rotorov. Prvá vychádza z quadkoptera pridaním dvoch rotorov [26]. Rotory sú usporiadané súmerne po obvode kruhu. Každá z dvojíc susediacich rotorov má opačný zmysel otáčania z dôvodu odrušenia vplyvu gyroskopického momentu od otáčajúcich sa rotorov [26]. Túto modifikáciu principiálne zobrazuje obrázok **Obr. 1.4 (a)**.

Druhá modifikácia hexakoptera je na obrázku **Obr. 1.4 (b)**. Konštrukčne vychádza z trikoptera. Jednotlivé rotory boli nahradené dvojicou rotorov s opačným smerom otáčania [26]. Motory sú umiestnené pod sebou z vrchnej aj spodnej strany ramena [26]. Tým sa podarilo odstrániť potrebu natočenia zadného rotoru, teda najväčšiu konštrukčnú nevýhodu trikoptera. Táto modifikácia hexakoptera má vo vzduchu výbornú stabilitu a už z princípu je obratnejšia ako modifikácia vychádzajúca z quadkoptera.

Stavba hexakoptera je ekonomicky náročnejšia ako u trikoptera a quadkoptera. To vyplýva z potreby väčšieho počtu motorov a vrtulí, zložitejšej riadiacej elektroniky a vyššej požadovanej kapacity akumulátorov. Zároveň spotrebujeme viac materiálu na nosnú konštrukciu. Na druhej strane tým získame robota s vyšším výkonom, lepšou obratnosťou i spoľahlivosťou.



Obr. 1.4 Hexakopter [26]

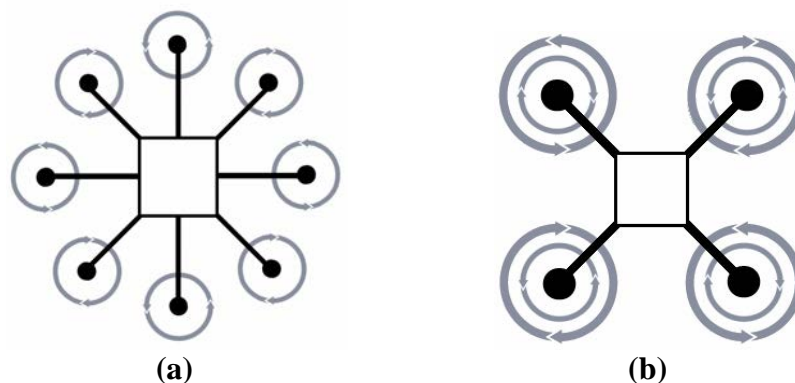
1.1.4 Oktokopter

Výkonný a mimoriadne obratný kopter. Osem rotorov zaručuje dostatočný vztlak pre let s relatívne ťažkými bremenami. Veľkú výhodu predstavuje spoľahlivosť vyplývajúca z počtu rotorov, pri poruche jedného z nich je let naďalej stabilný [26]. Platí rovnaký princíp riadenia letu, ako u ostatných kopterov. Rovnaký je i zmysel otáčania rotorov.

Rovnako ako hexakopter, aj oktokopter existuje vo dvoch modifikáciách. Prvá z nich má rotory usporiadané súmerne po obvode kruhu [26]. Rozmiestnenie rotorov a zmysel ich otáčania ilustruje obrázok **Obr. 1.5 (a)**.

Druhá modifikácia vychádza z quadkopteru pridaním štvorice rotorov zo spodnej strany jednotlivých ramien [26]. Je zobrazená na obrázku **Obr. 1.5 (b)**. Rotory sú umiestnené presne pod sebou, pričom smer otáčania jednotlivých dvojíc je opäť opačný [26].

Viac rotorov, ako u tejto konštrukcie, sa u kopterov nepoužíva. S počtom motorov a vrtulí narastá ekonomická náročnosť konštrukcie, nároky na riadiacu elektroniku aj kapacitu akumulátorov. Teoreticky by kopter s viac rotormi už nedosiahol výrazne lepšiu stabilitu a ťah možno vždy zvýšiť použitím výkonnejších motorov a väčších vrtulí.



Obr. 1.5 Oktokopter [26]

1.2 Princíp riadeného letu kopterov

Princíp letu a ovládania je u všetkých kopterov takmer rovnaký. Robot sa pohybuje v troch osiach voľnosti. Tieto osi sa štandardne označujú svojimi anglickými názvami **pitch**, **roll** a **yaw** [25]. Ich význam je nasledujúci [25]:

- roll = naklonenie (natočenie okolo pozdĺžnej osi)
- pitch = naklopenie (natočenie okolo priečnej osi)
- yaw = vybočenie (natočenie okolo zvislej osi)

U quadkopteru sa natočenie okolo jednotlivých osí, a tým aj smer letu, riadi zmenou otáčok jeho štyroch rotorov [25]. Tieto rotory sú: predný, zadný, ľavý a pravý. Keď majú rotory zhodné otáčky, vyrovnajú sa jednotlivé gyroskopické momenty a robot je vzhľadom ku zvislej osi v klude [25].

Naklopenie kopteru je možné dosiahnuť tak, že znížime otáčky predného a zároveň zvýšime otáčky zadného rotoru, alebo naopak. Tým príde k natočeniu robota okolo priečnej osi v jednom, alebo druhom smere a ten sa začne pohybovať smerom dopredu, alebo dozadu. Predpokladám, že bude potrebné regulovať otáčky oboch spomínaných rotorov a nie iba jedného, pretože tým by zároveň došlo ku zmene celkového ťahu a k nežiadúcej zmene letovej výšky. Tento predpoklad ale musím overiť na funkčnom prototypu.

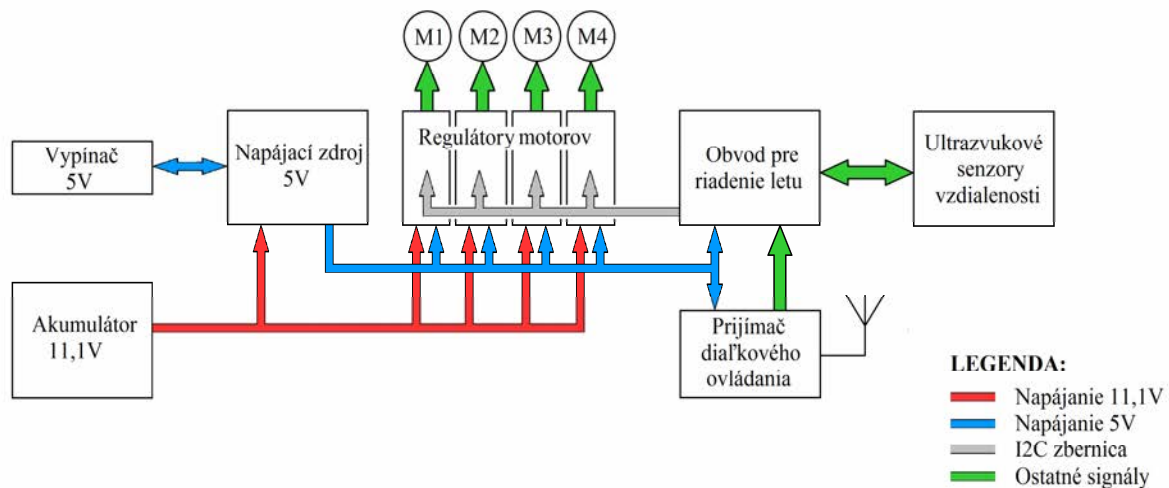
Naklonenie, teda natočenie okolo pozdĺžnej osi, prebieha rovnako. V tomto prípade znížime otáčky ľavého a zvýšime otáčky pravého rotoru, prípadne naopak. Tým dosiahneme pohyb robota doľava, alebo doprava.

Vybočenie robota, teda natočenie okolo zvislej osi, je možné dosiahnuť tak, že zvýšime otáčky ľavotočivých a znížime otáčky pravotočivých rotorov, alebo naopak. Ako bolo popísané vyššie, koptery majú rotory s opačným zmyslom otáčania, aby sa navzájom vyrušili jednotlivé gyroskopické momenty a robot visel v stabilnej polohe. V tomto prípade využívame práve tento jav a zámerné dosiahneme rozdielne gyroskopické momenty. Tak dosiahneme natočenie robota v smere zvislej osi.

V prípade, že potrebujeme s kopterom stúpať, alebo klesať, zvýšime/znížime otáčky všetkých rotorov rovnako. Jednotlivé pohyby je samozrejme možné kombinovať a dosiahnuť tak mimoriadnu stabilitu i obratnosť.

1.3 Návrh konkrétneho kopteru

Po obvodovej stránke popisuje quadkopter realizovaný v tejto práci bloková schéma uvedená nižšie.



Obr. 1.6 Bloková schéma navrhovaného quadkopteru

Celý systém je napájaný akumulátorom o menovitom napätí 11,1V. Riadiaca elektronika však potrebuje ku svojej funkcii aj prítomnosť napájacieho napätia o hodnote 5V. To zaručuje malý spínaný zdroj. Vypínač na napájacom zdroji 5V slúži k zapnutiu/vypnutiu celého robota.

Regulátory motorov sú štyri, pre každý motor jeden. Regulátory slúžia ako frekvenčné meniče k samostatnému nastaveniu otáčok každého zo štyroch použitých elektromotorov

poháňajúcich vrtule. Motory sú totiž trojfázové a ich otáčanie funguje na podobnom princípe, ako je tomu u krokových motorov. Regulátory motorov zároveň zabezpečujú kontrolu stavu akumulátora, meranie prúdu odoberaného jednotlivými motormi a meranie teploty použitých tranzistorov spínajúcich fázy motora. S obvodom pre riadenie letu komunikujú po I²C (TWI) zbernici.

Obvod pre riadenie letu je najdôležitejšou súčasťou kopteru. Pomocou gyroskopov kontroluje náklon robota vo všetkých troch osiach, spracúva signály z prijímača diaľkového ovládania a z ultrazvukových senzorov vzdialenosti pre detekovanie prípadných prekážok. Následne podľa potreby upraví hodnoty otáčok jednotlivých motorov.

2. Nosná konštrukcia

Nosná konštrukcia airborne robota by mala byť dostatočne pevná a stabilná, ale zároveň ľahká. V porovnaní s konštrukciou klasického vrtuľníka je rám quadkoptera jednoduchý bez pohyblivých častí [25]. Rám však musí byť geometricky veľmi presný, aby nedošlo ku zhoršeniu letových vlastností [25]. Preto som sa rozhodol nevyrábať rám vlastnoručne, ale siahnuť po profesionálnom výrobku. Komerčný predaj quadkopter rámov je pomerne rozšírený. Zákazník má možnosť výberu z rôznych veľkostí v širokej cenovej relácii. Finančná náročnosť rámu je závislá najmä na použítom materiále. Na výber sú rámy z plastu, preglejky, hliníku či dokonca sklenených vlákien.

Rozhodol som sa pre rám z ľahkej preglejky s podvozkom zo sklenených vlákien. Podvozok je pri pristáti mechanicky najviac namáhaná časť, preto je z odolnejšieho materiálu. Z dôvodu redukcie hmotnosti sú použité nylonové skrutky [19]. Táto konštrukcia je vhodným kompromisom medzi kvalitou a priaznivou cenou. Parametre rámu uvádza nasledujúca tabuľka.

Výška rámu (mm)	200
Šírka rámu (mm)	550
Šírka podvozku (mm)	256
Výška podvozku (mm)	115
Šírka preglejky (mm)	3
Celková hmotnosť (g)	195

Tab. 2.1 Parametre konštrukcie [19]



Obr. 2.1 Nosná konštrukcia

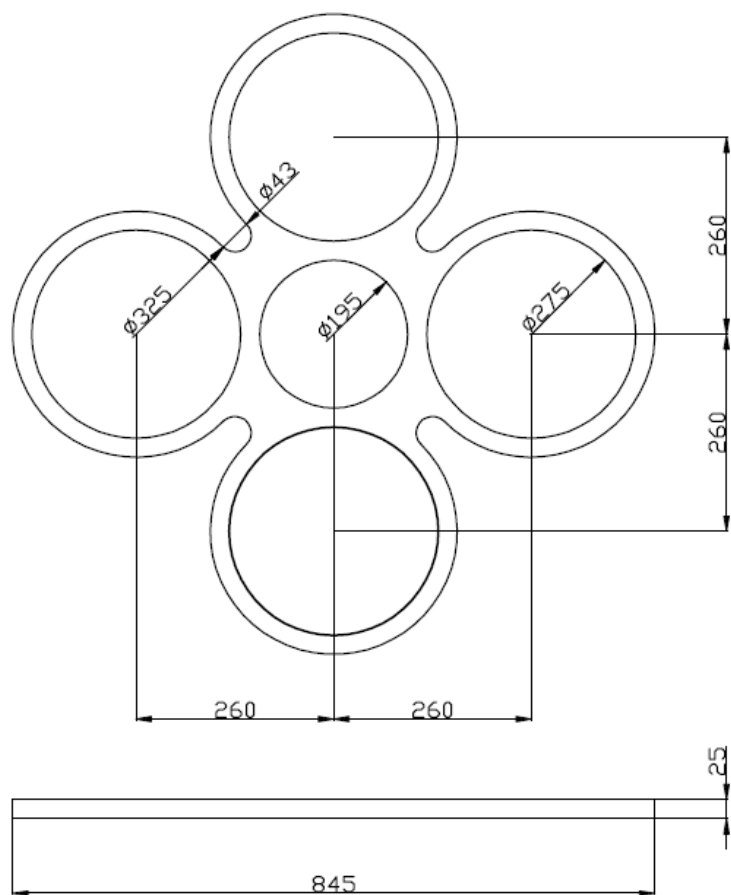
2.1 Ochranný kryt

Jedným z najdôležitejších parametrov každého elektrického zariadenia, robota nevynímajúc, je úroveň bezpečnosti. V prípade quadkoptera predstavujú najväčšie riziko štyri rotory o priemere 250 mm, ktoré podľa údajov od výrobcu motorov dosahujú šesť až sedem tisíc otáčok za minútu. Kontakt osoby s takýmto rotorom so sebou nesie vážne zdravotné riziká. Obzvlášť, ak máme v úmysle prevádzku robota aj v interiéri.

Konštrukciu som sa preto rozhodol doplniť o ochranný kryt z polystyrénu. Jeho použitie zvyšuje odolnosť robota voči nárazu či pádu. Zároveň chráni osoby voči poraneniu spôsobenému kontaktom s rotujúcou vrtuľou. Ochranný kryt je pripevnený k nosnej konštrukcii z preglejky tak, aby sa nachádzal práve v úrovni vrtulí.

Tvar ochranného krytu som vyrezal z polystyrénu o hrúbke 25 mm. K tomu som využil metódu rezania polystyrénu pomocou napnutého horúceho medeného drôtu, ktorým preteká elektrický prúd o dostatočne vysokej hodnote.

Nasledujúci obrázok zachytáva návrh tvaru a rozmerov ochranného krytu v dvoch pohľadoch: zhora a spredu. Nasleduje fotografia vyrobeného ochranného krytu. Ten je vyrobený ručne, preto nieje dokonale zhodný s návrhom. Svoju funkciu však plní uspokojivo.



Obr. 2.2 Ochranný kryt z polystyrénu



Obr. 2.3 Vyrobený ochranný kryt

3. Diaľkové ovládanie

Štvorrotorový vrtuľník popisovaný v tejto práci je diaľkovo riadený operátorom zo zeme. Je potreba riadiť výšku robota a k tomu jeho náklon v troch osiach – roll, pitch a yaw. Modul prijímača aj vysielača by mal byť dostatočne úsporný, aby bolo možné batériové napájanie. Prijímač by mal byť dostatočne malý a ľahký, aby bolo možné jeho umiestnenie na quadkopter. Vysielač by rovnako mal mať batériové napájanie a kompaktné rozmery, aby bolo možné riadiť robota z ľubovoľného miesta bez potreby prístupu k rozvodnej sieti elektrickej energie. Ďalším dôležitým parametrom je dosah vysielača.

3.1 Výber vhodnej zostavy

Možností, ako realizovať diaľkové ovládanie je niekoľko. U malých interiérových vrtuľníkov je hojne využívaná technológia IrDA. Tá je však nevhodná do exteriéru [33]. Ponúka sa aj technológia bluetooth. V tomto prípade by však bol hlavným problémom nízky dosah diaľkového ovládania [33]. Ovládanie prostredníctvom wifi som vylúčil z dôvodu náročnej realizácie aj vyššej ceny [33]. Najlepšie spĺňajú kladené požiadavky zostavy využívané v leteckom modelárstve. Veľkou výhodou je veľký výber kvalitného a spoľahlivého sortimentu v širokých cenových reláciách.

Rozhodol som sa pre zostavu vysielača HobbyKing HK-T4A V2 (Mode 1) a prijímača HobbyKing HK-TR6A, ktorá pracuje na kmitočte 2,4 GHz [15].



Obr. 3.1 Zostava diaľkového ovládania [15]

Vysielač je štvorkanálový, čo pre potreby riadenia quadkoptera plne postačuje. Tieto štyri kanály sú pripojené k pákovým ovládačom, čo umožňuje jednoduché a intuitívne ovládanie robota. Prijímač disponuje až šiestimi kanálmi, vďaka čomu poskytuje priestor pre prípadné doplnkové funkcie robota. Výstupom každého z kanálov prijímača je PWM signál, ktorý bude potrebné spracovať riadiacim obvodom quadkoptera.

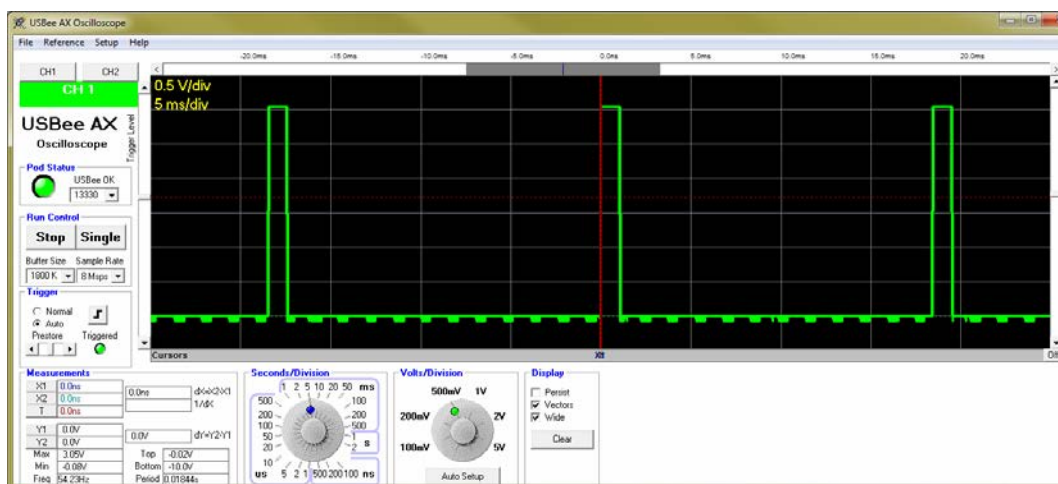
Použitie jednotlivých kanálov diaľového ovládania je nasledujúce [15]:

- Kanál 1: nastavenie rýchlosti v osi y (pitch)
- Kanál 2: nastavenie rýchlosti v osi x (roll)
- Kanál 3: nastavenie rýchlosti v osi z (stúpanie)
- Kanál 4: nastavenie rýchlosti bočenia (yaw)

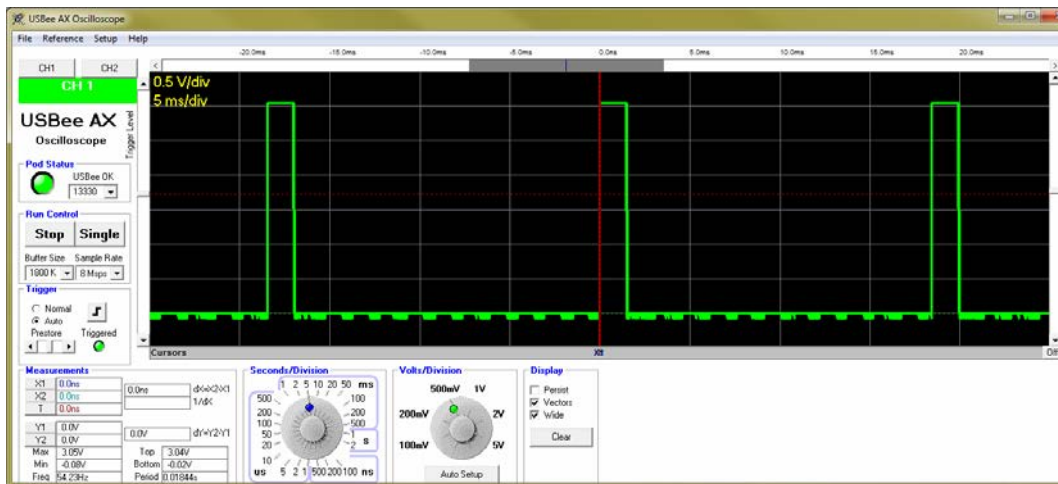


Obr. 3.2 Pripojenie kanálov k páčkovým ovládačom vysielča

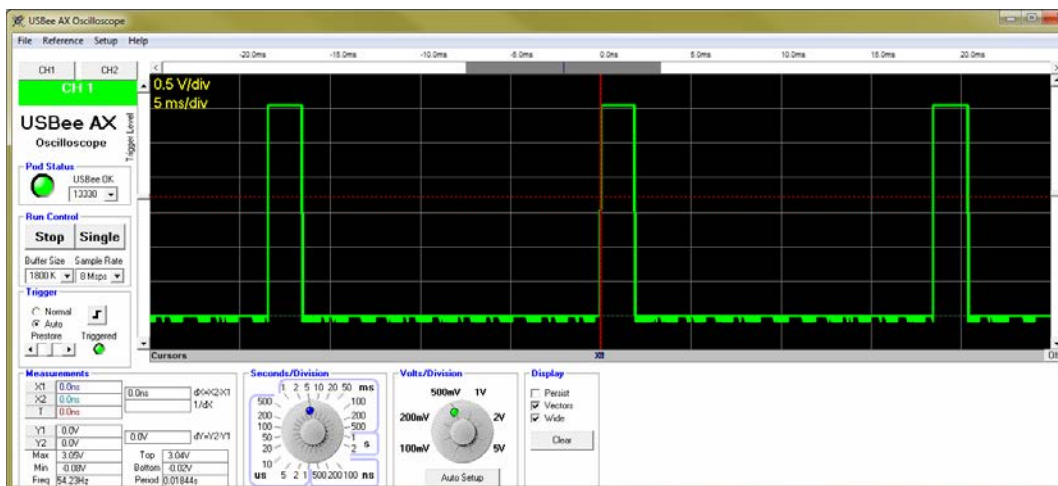
Prijímač diaľkového ovládania je napájaný z palubného napájacieho napätia 5V. Na obrázkoch **Obr. 3.3** až **Obr. 3.5** je výstup prvého kanálu prijímača zobrazený na osciloskope pre maximálnu ľavú, stredovú a maximálnu pravú výchylku páčkového ovládača. Výstup všetkých štyroch kanálov je totožný, preto som na osciloskope zachytil iba jeden z nich.



Obr. 3.3 Výstup prijímača diaľkového ovládaia pre maximálnu ľavú polohu ovládača



Obr. 3.4 Výstup prijímača diaľkového ovládaia pre stredovú polohu ovládača



Obr. 3.5 Výstup prijímača diaľkového ovládaia pre maximálnu pravú polohu ovládača

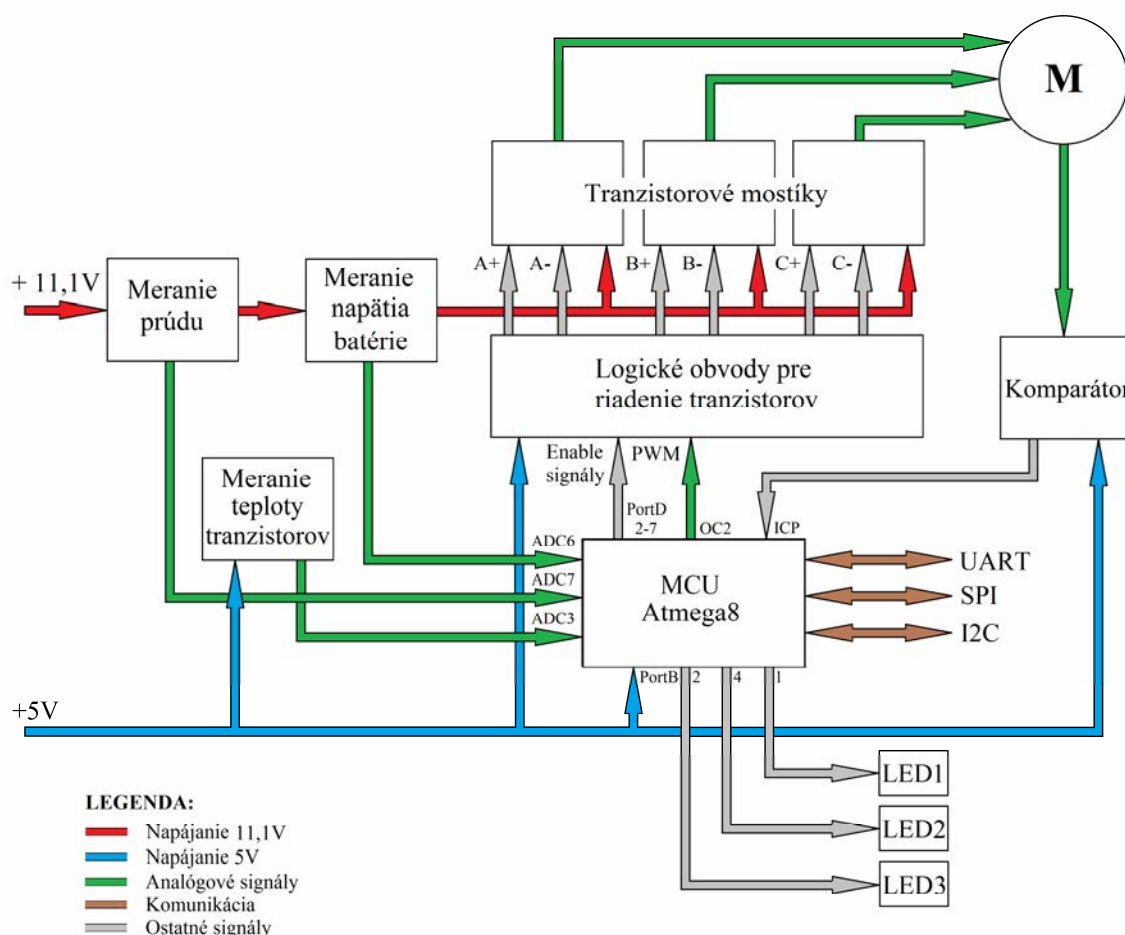
4. Regulátory motorov

Regulátory motorov predstavujú najviac prínosnú časť práce. Existuje mnoho projektov zaoberajúcich sa vývojom quadkoptera, väčšinou ale počítajú so zakúpenými modelárskymi regulátormi určenými do RC lietadiel. Táto práca však vývoj regulátora detailne popisuje.

Riadiacou elektronikou pre riadenie synchronných striedavých motorov sú frekvenčné meniče. Tie sa v modelárskej praxi nazývajú striedavé regulátory. Nahradzujú komutátor klasického trojfázového elektromotora. Najdôležitejším parametrom pri výbere správneho frekvenčného meniču je maximálna prúdová zaťažiteľnosť, hodnota napájacieho napätia a spôsob komunikácie (PWM, I²C, USART).

Rozhodol som sa pre návrh štyroch totožných regulátorov ktoré riadia každý motor quadkoptera samostatne. Rozdiel medzi jednotlivými regulátormi je iba v obslužnom SW. Každý z regulátorov má inú I²C adresu pre správnu komunikáciu s obvodom pre riadenie letu. Dvojica regulátorov otáča rotorom v smere hodinových ručičiek a dvojica naopak proti smeru hodinových ručičiek [26]. To vyplýva z konštrukcie quadkoptera a z princípu jeho ovládania.

Bloková schéma regulátora synchronného striedavého motora vyvinutého v rámci tejto práce je na nasledujúcom obrázku.



Obr. 4.1 Blokovaná schéma regulátora motorov

Jednotlivé bloky blokovej schémy sú podrobne popísané ďalej v tejto kapitole.

4.1 Elektromotory

Výber správnych motorov je u airborne robota mimoriadne dôležitý. Je nutné zohľadniť ich hmotnosť, účinnosť (resp. energetickú náročnosť), ťah a výrobcom odporúčaný priemer použitej vrtule. V tomto prípade som sa rovnako inšpiroval leteckým modelárstvom a rozhodol som sa použiť synchronné striedavé motory určené pre RC lietadlá. Motory sú trojfázové zapojené do hviezdy [8]. Výhodami týchto motorov oproti klasickým jednosmerným motorom sú menšie rozmery pri rovnakom výkone a možnosť dosiahnuť rovnakých parametrov pri otáčaní v oboch smeroch [8]. Nevýhoda spočíva v komplikovanejšej riadiacej elektronike [8].

Pre vyvíjaný quadkopter som zakúpil štyri elektromotory FC 28-22. Ide o dostatočne výkonný typ určený primárne pre využitie v RC lietadlách. Stator pozostáva až z 12 statorových cievok [16] (resp. z troch štvoríc cievok zapojených do série). Podľa údajov výrobcu by mal byť motor ideálne zaťažovaný vrtulou o priemere 9 až 10 palcov. Parametre zakúpených elektromotorov sú zhrnuté v nasledujúcej tabuľke.

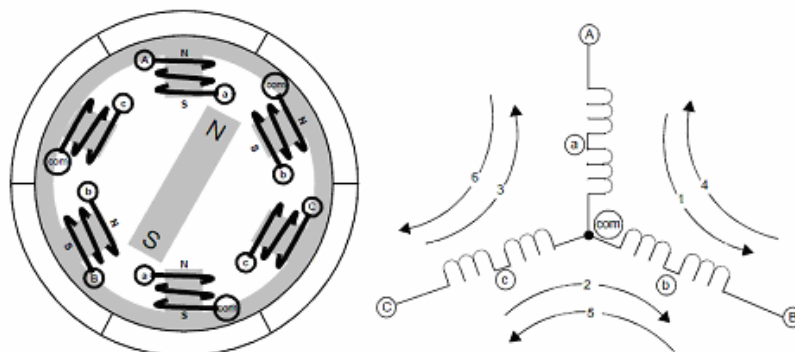
Celková hmotnosť (g)	39
Výška (mm)	46
Priemer (mm)	28
Rozmery statoru (mm)	22x10
Max. odoberaný prúd (A)	14,5
Napájacie napätie (V)	11,1
Otáčky (rpm/V)	1200

Tab. 4.1 Parametre motora [16]



Obr. 4.2 Synchronný striedavý motor [16]

Nasledujúci obrázok popisuje konštrukciu synchronného striedavého elektromotora a zapojenie jednotlivých cievok vinutia. Šípky naznačujú smer toku elektrického prúdu cievkami v jednotlivých krokoch otáčania (komutácie).

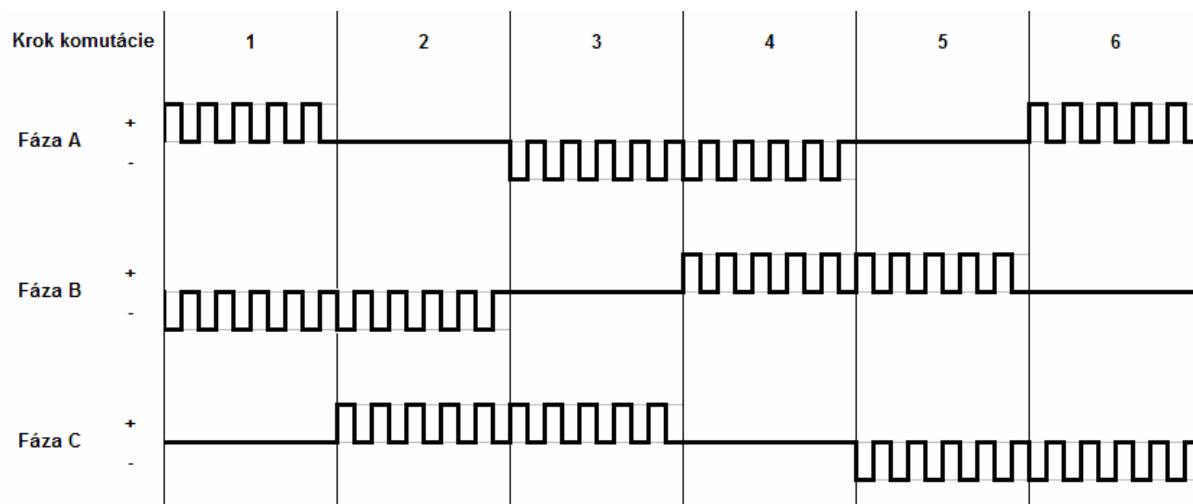


Obr. 4.3 Princíp zapojenia synchronného striedavého motora [8]

Rotor pozostáva z trvalého magnetu a stator zo statorových cievok. Na predchádzajúcom obrázku pozostáva stator zo 6 cievok, ale ich počet sa môže u jednotlivých

motorov líšiť. Existujú aj typy s vinutím zapojeným do trojuholníka. Tie sa však používajú iba výnimočne. Postupným spínaním cievok v šiestich krokoch dosiahneme otáčanie magnetického poľa statora nasledovaného rotorom. Komutácia motora pozostáva zo 6 krokov [1]. každý krok zodpovedá elektrickému uhlu 60° . Počas každého kroku je jedna fáza pripojená ku kladnému pólu napájania, druhá k zápornému a tretia fáza zostáva odpojená (plávajúca).

Postup spínania jednotlivých fáz synchronného striedavého motora popisuje nasledujúci obrázok.



Obr. 4.4 Princíp spínania fáz synchronného striedavého motora [30]

U quadkopteru je nevyhnutné, aby sa dvojica motorov točila opačným smerom tak, ako je to popisované v úvode tejto práce. To je možné dosiahnuť jednoducho tým, že jednotlivé kroky komutácie budú spínané v opačnom poradí.

Rýchlosť otáčania motora však nezávisí na rýchlosti prepínania krokov komutácie ale na striede PWM signálu privádzaného do jednotlivých cievok. Prepnutie do nasledujúceho kroku komutácie musí nastať v správnej aktuálnej polohe natočenia rotoru. K určeniu správneho okamihu komutácie synchronného striedavého elektromotora existujú dva spôsoby:

- využitie Hallových senzorov,
- snímanie spätnej elektromotorickej sily.

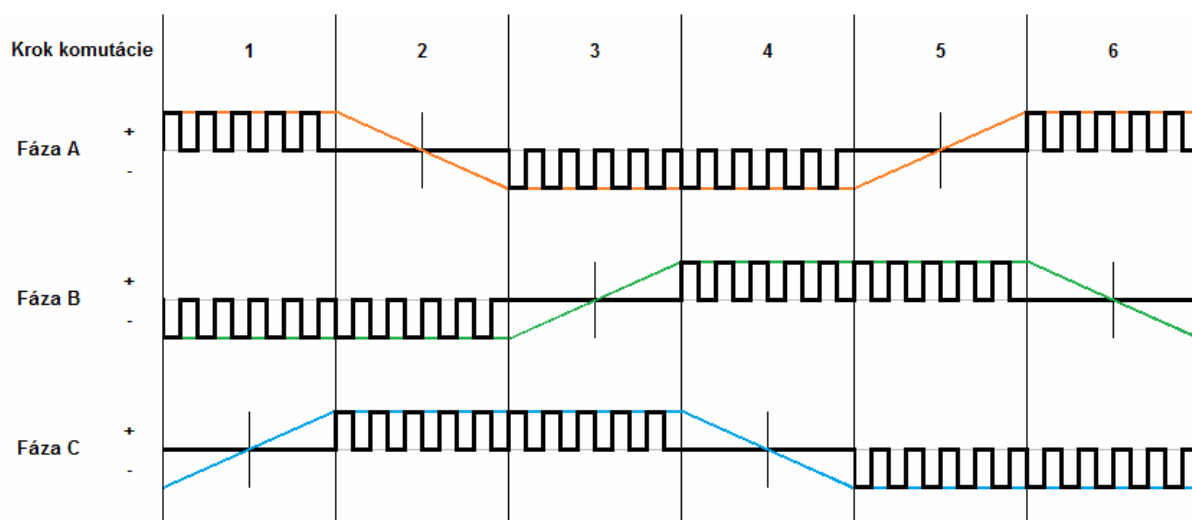
Metóda využitia Hallových senzorov je založená na trojici Hallových sond umiestnených vo vnútri motora. Takéto motory môžeme rozoznať podľa toho, že majú až šesť vodičov. Trojica vodičov slúži ako fázy pre spínanie cievok motora a trojica ako výstup Hallových senzorov. Možno tak získať trojbitový kód, ktorý je jedinečný pre každú zo šiestich kombinácií zopnutia fáz motora. To zjednodušuje časovanie komutácie motora ako po stránke obvodovej, tak aj po stránke obslužného programu. Ja som sa však rozhodol pre použitie synchronných striedavých motorov bez Hallových senzorov a to hlavne z dôvodu nižšej ceny a menších rozmerov.

Na plávajúcej fáze sa vplyvom rotácie v magnetickom poli indukuje napätie označované aj ako spätná elektromotorická sila (resp. napätie) [30]. Toto indukované napätie má opačnú polaritu ako napätie dodávané do vinutia (podľa Lenzovho zákona) [30]. Veľkosť

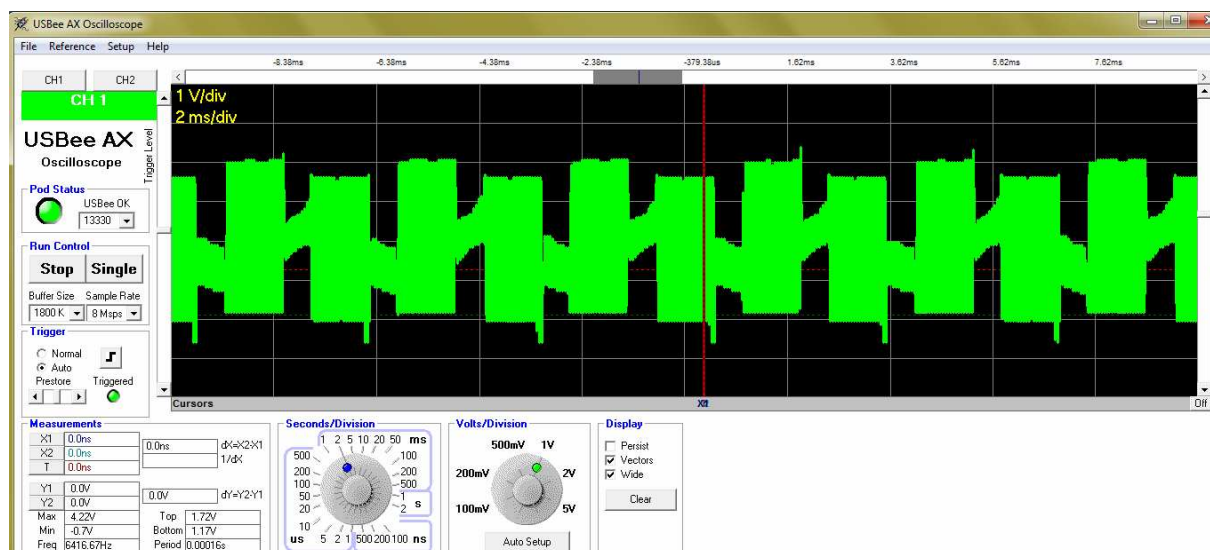
spätneho elektromotorického napätia je špecifická pre každý konkrétny motor [30]. Závisí predovšetkým na týchto troch parametroch motora [30]:

- počet závitov statorového vinutia,
- uhlová rýchlosť rotora,
- intenzita magnetického poľa permanentných magnetov rotora.

Priebeh spätneho elektromotorického napätia je na nasledujúcom obrázku je naznačený farebne u všetkých troch fáz. [30] K lepšej ilustrácii reálnej podoby signálov slúži obrázok **Obr. 4.6** zobrazujúci výstup osciloskopu pripojeného k jednej z fáz motora na výstupe regulátora motorov realizovaného v rámci tejto práce.



Obr. 4.5 Spätne elektromotorické napätie trojfázového synchronného motora [30]



Obr. 4.6 Jedna fáza trojfázového synchronného motora zobrazená na osciloskope

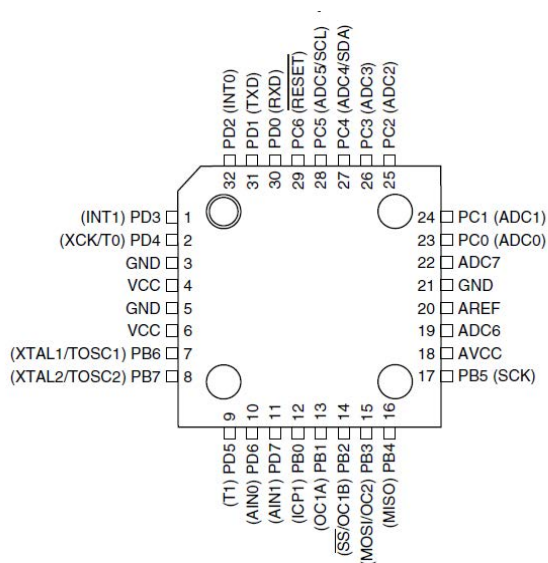
V ideálnom prípade časovania komutácie dosahuje spätné elektromotorické napätie polovicu napájacieho napätia práve v polovici daného kroku vždy u plávajúcej fázy [30]. V tomto prípade je účinnosť motora najvyššia [30]. Existuje viacero spôsobov snímania úrovne napätia generovaného plávajúcou fázou [30]. Bližšie sú, rovnako ako konkrétna implementácia, popísané ďalej v tejto práci.

4.2 Mikrokontrolér a logické obvody

Jadro regulátora elektromotorov predstavuje mikrokontrolér Atmega8. V regulátore motorov plní nasledujúce úlohy:

- riadi komutáciu elektromotora pomocou sústavy logických obvodov a trojice tranzistorových mostíkov,
- kontroluje prúd odoberaný motorom,
- kontroluje teplotu tranzistorov riadiacich motor,
- kontroluje stav nabitia akumulátora a signalizuje ho pomocou dvojice LED diód,
- komunikuje s obvodom pre riadenie letu prostredníctvom I²C zbernice (slave),
- komunikuje s PC prostredníctvom USART zbernice (iba pre účely vývoja),
- komunikuje s AVR programátorom prostredníctvom SPI zbernice (iba pre účely vývoja).

To všetko musí prebiehať dostatočne rýchlo na to, aby bol robot schopný stabilného letu. Do úvahy pripadá použitie širokej škály dostupných mikrokontrolérov od rôznych výrobcov. Rozhodol som sa pre 8-bitový mikrokontrolér Atmega8 v SMD puzdre TQFP od firmy Atmel, pretože s ním už mám predchádzajúce skúsenosti a zároveň spĺňa veškeré požiadavky na túto aplikáciu.



Obr. 4.7 Mikrokontrolér Atmega8 v puzdre TQFP32 [3]

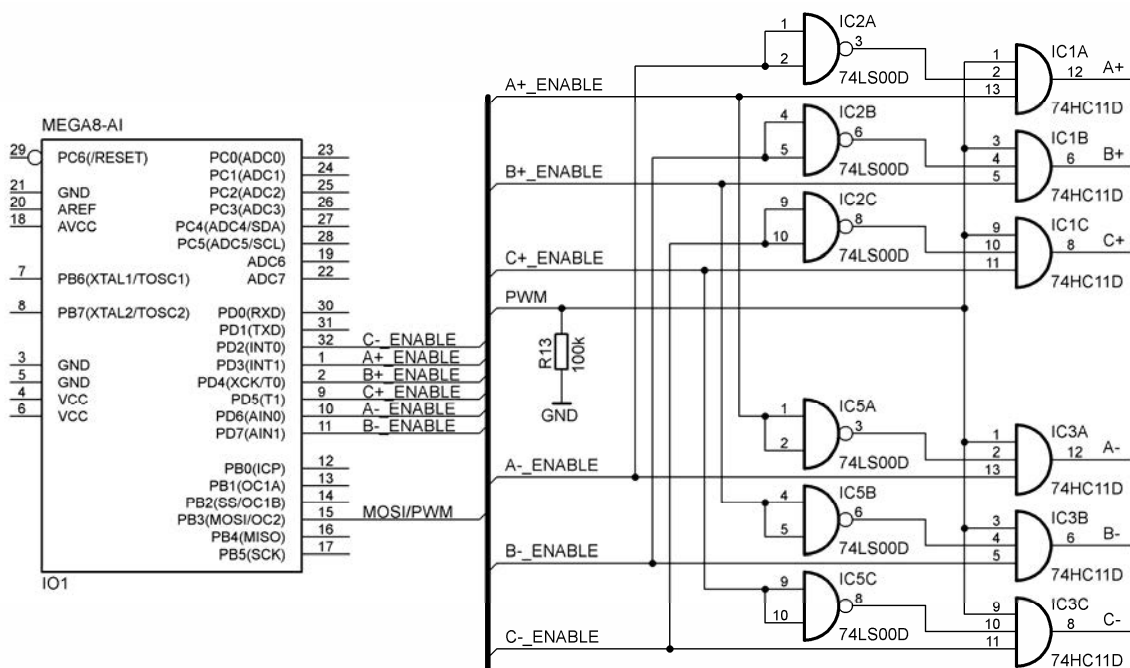
Atmega8 umožňuje komunikáciu po zberniciach I²C a USART a je vybavený 10 bitovým AD prevodníkom [3], ktorý zaručí meranie vybitia akumulátora, meranie prúdu odoberaného motorom i teploty. Umožňuje taktovanie externým oscilátorom až do kmitočtu 16 MHz [3].

Základné vlastnosti mikrokontroléru Atmega8 [3]:

- napájacie napätie: 4,5 – 5,5 V
- taktovacia frekvencia: až do 16 MHz
- CPU: 8-bitové AVR
- vnútorná FLASH pamäť: 8 kB
- vnútorná SRAM pamäť: 1 kB
- vnútorná EEPROM pamäť: 512 B
- programovanie: ISP
- dva 8 bitové čítače/časovače a jeden 16 bitový
- watchdog, 10 bitový 8 kanálový AD prevodník
- jednotky USART, SPI, TWI (podpora I²C)
- 23 programovateľných vstupno-výstupných pinov

Každý motor má cievky spínané dvojicami výkonových tranzistorov samostatne riadených mikrokontrolérom [8]. Tie je možné riadiť priamo mikrokontrolérom [8]. Nevýhodou však je, že by sa tým zvýšili požiadavky na počet PWM kanálov mikrokontroléru. Konkrétne by išlo minimálne o tri samostatné kanály, jeden pre každý tranzistorový mostík (resp. pre jeden z tranzistorov každého mostíku).

To som sa rozhodol vyriešiť použitím logických obvodov AND s tým, že k riadeniu motora poslačuje jeden PWM kanál mikrokontroléru. PWM o kmitočte 20 kHz vstupuje do trojice hradiel AND pre kladnú a trojice pre zápornú polaritu. Použil som trojvstupové hradlá 74HC11D [34]. To zaručí, že daná fáza motora bude pripojená napr. ku kladnému pólu iba v prípade, že: a) je aktívny Enable výstup Atmega8 pre pozitívnu polaritu danej fázy, b) do hradla vstupuje PWM signál, c) Enable signál pre negatívny pól danej fázy je neaktívny (privedený na hradlo AND cez inverter vytvorený z NAND hradna 74LS00D [37] spojením vstupov). To znižuje nároky na riadiaci mikrokontrolér a zároveň slúži ako ochrana spínacích tranzistorov. Zabezpečuje, že nenastane skrat súčasným zopnutím oboch polarít na rovnakej fáze. Na nasledujúcom obrázku je časť schémy zapojenia vyvinutého regulátora zobrazujúca myšlienku kombinácie mikrokontroléru a logických obvodov.



Obr. 4.8 Mikrokontrolér a logické obvody pre riadenie komutácie motora

Pre správnu komutáciu motora tak, ako ju popisujú obrázky **Obr. 4.4** a **Obr. 4.5** sú jednotlivé enable výstupy mikrokontroléru nastavené podľa nasledujúcej tabuľky.

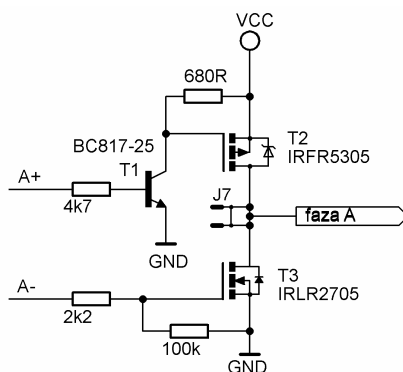
Krok	Enable A+	Enable A-	Enable B+	Enable B-	Enable C+	Enable C-
1	1	0	0	1	0	0
2	0	0	0	1	1	0
3	0	1	0	0	1	0
4	0	1	1	0	0	0
5	0	0	1	0	0	1
6	1	0	0	0	0	1

Tab. 4.2 Log. stavy enable výstupov mikrokontroléru pre jednotlivé kroky komutácie

4.3 Mostíkové spínače

Spínanie cievok synchronného striedavého motora tak, ako je to popisované v kapitole vyššie umožňujú mostíkové spínače osadené unipolárnymi tranzistormi. Tie sú priamo riadené mikrokontrolérom cez logické obvody. Každá cievka musí fungovať v troch stavoch: pripojená ku kladnému pólu napájania, pripojená k zápornému pólu napájania, alebo plávajúca [8]. To je možné dosiahnuť dvojicou tranzistorov, z ktorých prvý pripája cievku ku kladnému pólu napájania a druhý k zápornému. V prípade, že nie je zopnutý ani jeden z týchto tranzistorov, zostáva príslušná cievka plávajúca. Každý synchronný striedavý motor má tri cievky, čomu zodpovedá šesť spínacích tranzistorov [8].

Zapojenie mostíkového spínača pre spínanie jednej cievky je zobrazené na nasledujúcom obrázku. Vstupmi A+ a A- sú výstupy riadiaceho logického obvodu AND popisovaného vyššie. Výstup „faza A“ predstavuje pripojenie k jednej z troch fáz motora.

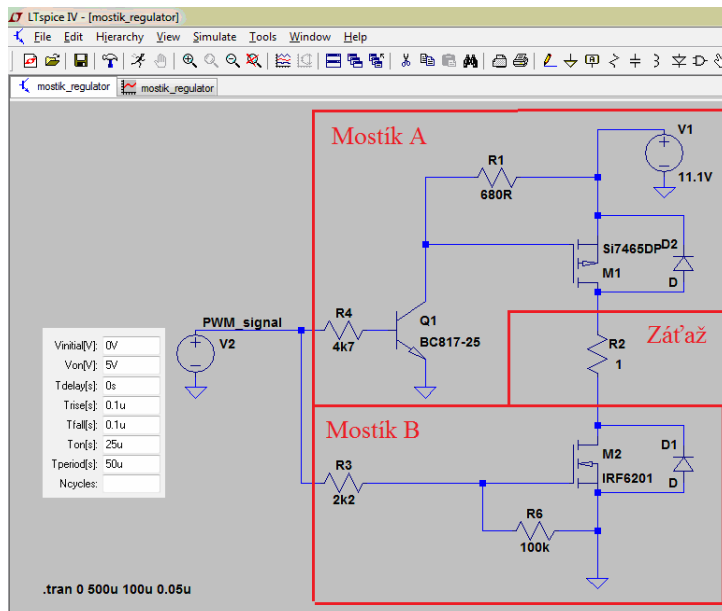


Obr. 4.9 Schéma zapojenia mostíkového spínača

Bipolárny tranzistor NPN v zapojení so spoločným emitorom (T1) na obrázku **Obr. 4.9** slúži k obráteniu fázy [9] riadiaceho PWM signálu a k správne mu vybudeniu MOSFET tranzistoru. Bez prítomnosti T1 by totiž MOSFET tranzistory neboli otvorené v rovnakom čase. to vyplýva z vlastností unipolárnych tranzistorov typu N a P. Jeden z nich by bol totiž zopnutý pri kladnej logickej úrovni PWM a druhý naopak pri nulovej logickej úrovni PWM signálu. Existuje ešte iný spôsob ako tento problém ošetriť a to použitím logického invertoru pre jednu z PWM vetví na obrázku **Obr. 4.8**.

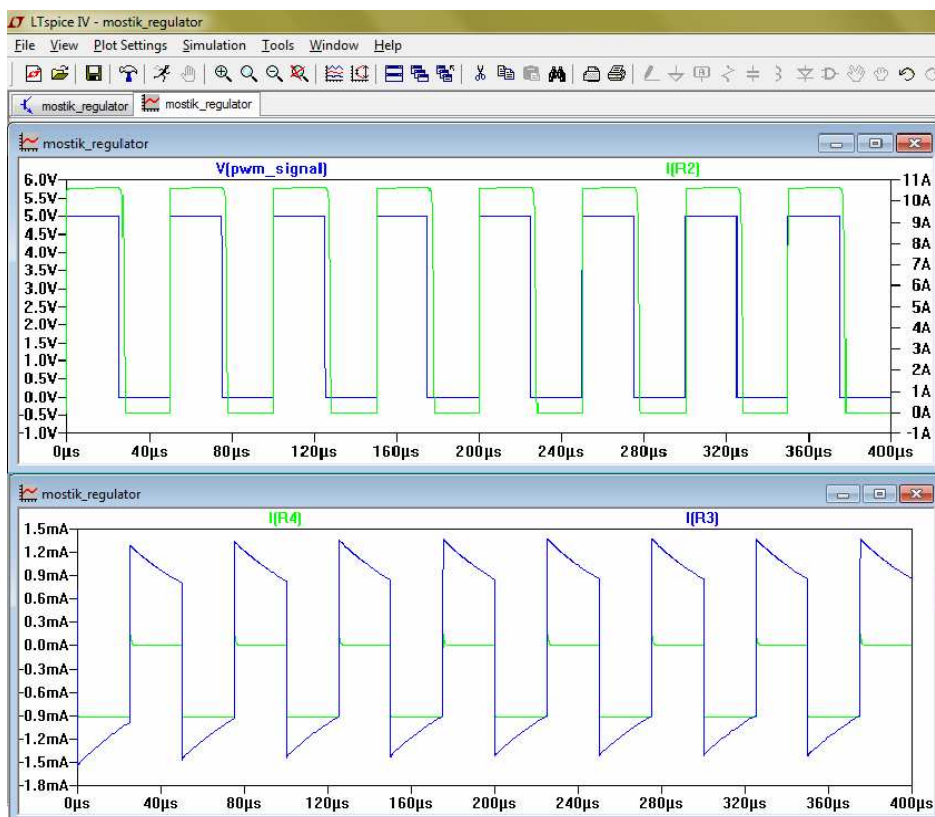
Pre odladenie správnej funkcie mostíkových spínačov som použil simuláciu v programe LTspice. Nasledujúci obrázok zachytáva schému zapojenia tranzistorového mostíku v simulácii. Typ MOSFET tranzistorov, ktorý som hodlal použiť v regulátore motorov nebol v LTspice dostupný, preto som použil tranzistory s podobnými vlastnosťami.

Pre zjednodušenie som v simulácii použil iba jeden mostík. Medzi tranzistormi je odporová záťaž nahradzujúca dve do série zapojené vinutia motora. Vinutie motora samozrejme nejde reálne jednoducho nahradiť rezistorom. Ja som sa ale zameriaval na správne spínanie tranzistorov, preto som použil iba jednoduchú rezistorovú záťaž. Vrchná časť mostíku predstavuje polovicu jedného mostíka a spodná časť polovicu iného mostíka.



Obr. 4.10 Tranzistorový mostík zakreslený v simulačnom programe LT Spice

Maximálna prúdová zaťažiteľnosť logických obvodov 74HC11D použitých ku riadeniu spínacích MOSFET tranzistorov je 4 mA [34]. V prípade prekročenia tejto hodnoty by došlo k neodvratnému poškodeniu hradla. Preto som rezistory R3 a R4 na obrázku **Obr. 4.10** nadimenzoval tak, aby k tomu nedošlo. Prúd týmito rezistormi a teda aj výstupom hradiel je zobrazený v dolnom grafe na obrázku **Obr. 4.11**.



Obr. 4.11 Výsledky simulácie tranzistorového mostíka

Vrchý graf na obrázku **Obr. 4.11** zobrazuje riadiaci PWM signál a výstupný prúd tranzistorového mostíka tečúci cez záťaž R2 o hodnote 1 Ω . Z grafu je viditeľné, že mostík pracuje správne a prúd na výstupe kopíruje impulzy riadiaceho PWM signálu.

Prúdový odber motora zaťaženého 10 palcovou vrtuľou pri maximálnych otáčkach je až 14.5 A_{RMS} [16]. Zároveň sú jednotlivé tranzistory spínané PWM signálom o kmitočte 20 kHz. To predstavuje vysoké nároky na použité tranzistory. Rozhodol som sa použiť unipolárne tranzistory v SMD prevedení. To hlavne z dôvodu, aby nebolo nutné použitie chladiča, ktorý z hľadiska rozmerov a dodatočnej hmotnosti neprichádza u airborne robota príliš do úvahy. Puzdro DPAK použitých tranzistorov využíva ku svojmu chladeniu priamo plochu plošného spoja pod tranzistorom. Ako doplnkovú ochranu tranzistorov proti prehriatiu som ich doplnil termistorom pre približné meranie ich teploty. Toto meranie je podrobne popísané ďalej v tejto kapitole.

Ďalším dôležitým parametrom zvolených tranzistorov na ktorý som sa zameril je čo najnižší odpor R_{ds}.

Zvolené unipolárne tranzistory a ich parametre:

IRLR2705 [23]

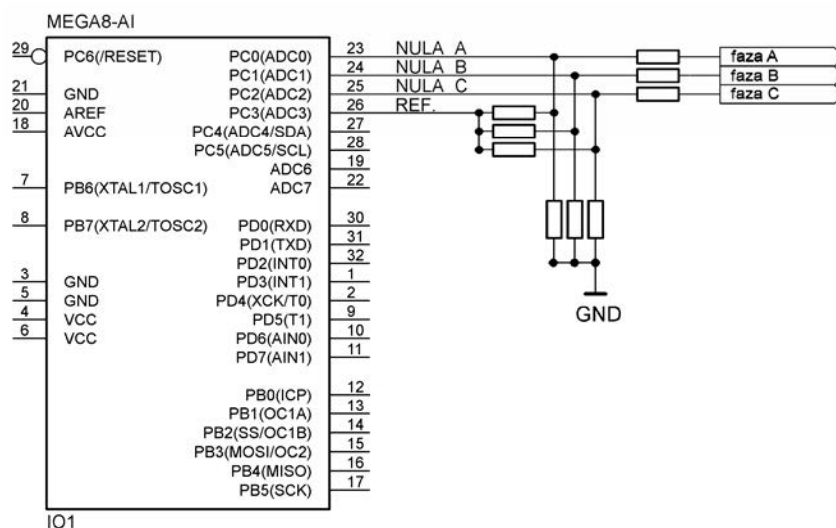
- unipolárny MOSFET tranzistor, N-kanál s ochrannou diódou
- Id_{ss} = 28A
- U_{ds} = 55V
- U_{gs} = 16V
- P_d = 68W
- R_{ds} = 40 m Ω
- puzdro: DPAK

IRFR5305 [22]

- unipolárny MOSFET tranzistor, P-kanál s ochrannou diódou
- Id_{ss} = 31A
- U_{ds} = 55V
- U_{gs} = 20V
- P_d = 110W
- R_{ds} = 65 m Ω
- puzdro: DPAK

4.4 Komparátor pre časovanie komutácie

Ako som popísal vyššie, možností ako snímať spätné elektromotorické napätie plávajúcej cievky motora je viacero [30]. Prvou z nich je použitie troch jednoduchých odporových deličov pre snímanie napätia každej z fáz motora pomocou AD prevodníku mikrokontroléru [30] tak, ako to popisuje nasledujúca schéma. Nevýhodou tejto metódy však je, že jednoduchý hardvér kladie vyššie nároky na obslužný program mikrokontroléru. Signál vstupujúci do odporových deličov je totiž zašumený PWM signálom spínajúcim tranzistory.



Obr. 4.12 Snímanie prechodu plávajúcej fázy nulou pomocou odporových deličov

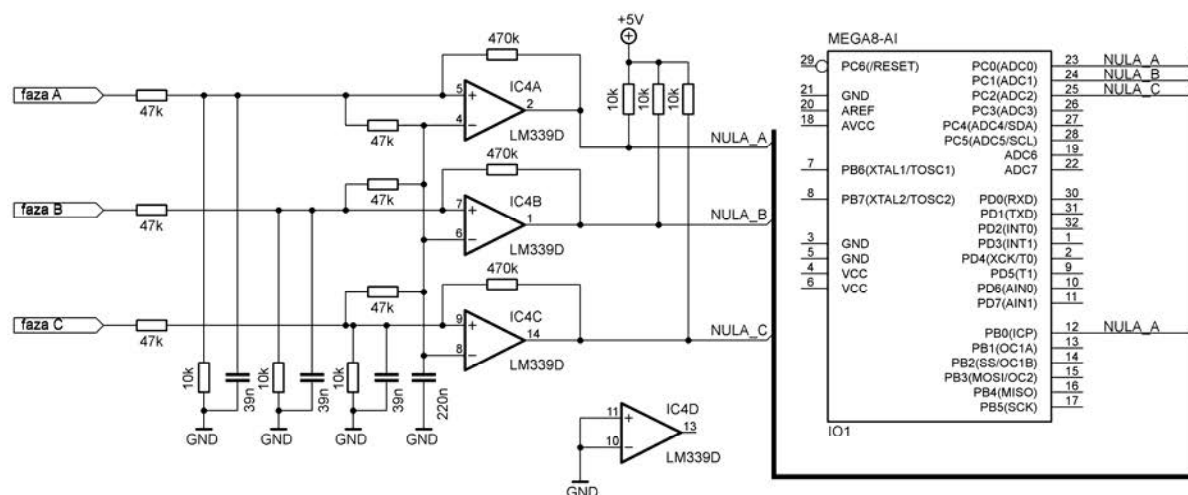
Predchádzajúci obrázok zachytáva ešte jednu dôležitú skutočnosť. Zobrazuje totiž použitie referencie ku ktorej sa napätie merané deličmi na jednotlivých fázach vzťahuje.

Teoreticky by prechod nulou mal nastávať v polovici hodnoty napájacieho napätia. To je však údaj závislý na parametroch konkrétneho motora, hodnote napájacieho napätia, aktuálnom prúdovom odbere motora atď [30]. V prípade motora, ktorý nemá všetky tri vinutia úplne identické sa referencia rovná polovici napájacieho napätia nedá použiť.

Preto je vhodnejšia referencia vytvorená z trojice rezistorov z ktorých je každý pripojený na jednu fázu motora tak, ako to popisuje obrázok **Obr. 4.12**. Bod v ktorom sú všetky tri rezistory spojené predstavuje virtuálny stredový uzol trojfázového motora [30]. Ten býva u klasických trojfázových motorov na sieťové napätie vyvedený v podobe štvrtého vodiča, u modelárskych motorov však nie.

Druhým spôsobom ako snímať okamih prechodu nulou plávajúcej fázy je použitie komparátoru ktorý sa preklápa v okamihu prechodu nulou [30]. Rozhodol som sa pre túto metódu, pretože kladie menšie nároky na obslužný program mikrokontroléru.

Napätie jednotlivých fáz vstupuje do analógového komparátoru LM339D. V regulátore sú použité tri komparátory, každý pre jednu fázu. Vo chvíli, keď hodnota indukovaného napätia dosiahne polovicu hodnoty napájacieho napätia, zmení sa hodnota na výstupe komparátoru pripojeného na vstup Atmega8. Pre mikrokontrolér to znamená, že potrebujeme prepnúť napájanie fáz na nasledujúci krok. Myšlienku použitia komparátoru zachytáva nasledujúci obrázok.



Obr. 4.13 Snímanie prechodu plávajúcej fázy nulou pomocou komparátoru

V regulátore motorov sa nachádzajú tri totožné komparátory, ako ich zobrazuje obrázok vyššie. Ich výstupy sú pripojené na vstupy AD prevodníku (resp. PortuC 0 až 2) a na pin ICP. Toto zapojenie poskytuje určitú univerzálnosť. Je možné realizovať na ňom dva spôsoby riešenia obslužného programu.

Prvým z nich je využitie AD prevodníku ku sledovaniu okamihu preklopenia komparátoru. Výhodou je možnosť sledovať prechod nulou u všetkých fáz. Nevýhodou je väčšia zložitosť obslužného softvéru a potreba neustále prestavovať časovače/čítače.

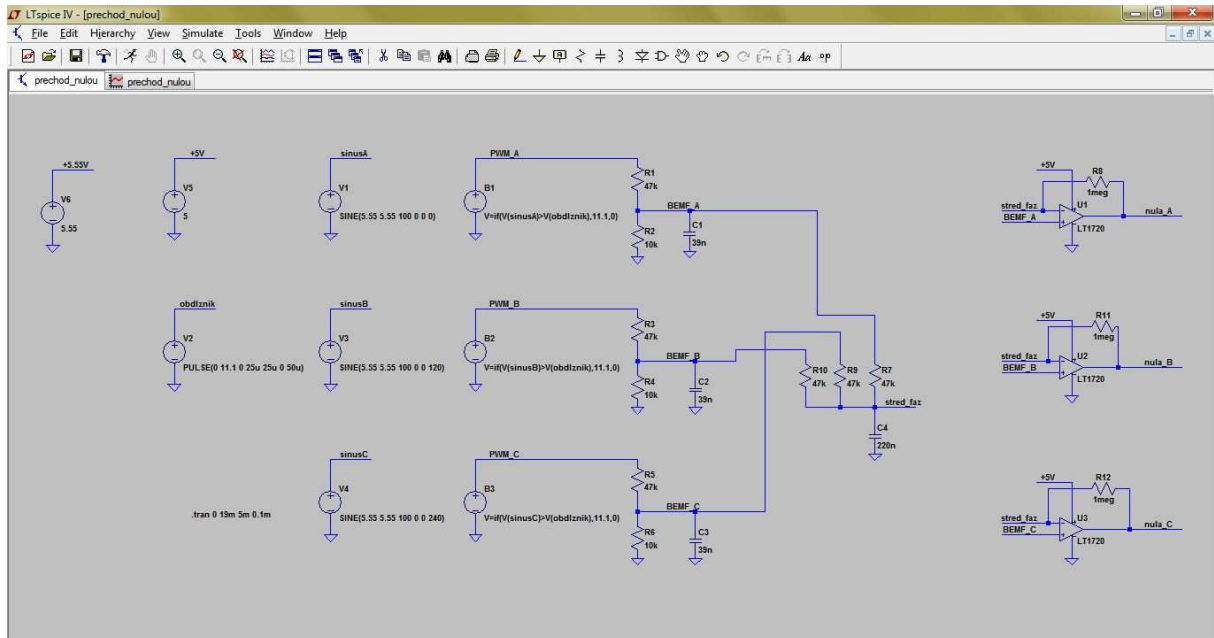
Druhý spôsob je o niečo elegantnejší pri využití poznatku, že doba trvania každého kroku komutácie je rovnaká (resp. ideálne by mala byť). Preto mikrokontrolér sníma výstup komparátoru pre fázu A pinom ICP (Timer/Counter1 Input Capture Pin, [3]). Pin ICP slúži k zastaveniu čítania čítača/časovača 1. Reaguje podľa nastavenia na nábežnú alebo zostupnú hranu. Pre túto aplikáciu je potrebné u kroku komutácie 2 reagovať na zostupnú (**Obr. 4.5**), u kroku 5 naopak na nábežnú hranu (**Obr. 4.5**).

K časovaniu komutácie motora by teoreticky stačil jeden časovač/čítač mikrokontroléru Atmega8. V okamihu prepnutia kroku komutácie napr. na krok 2 (**Obr. 4.5**) by obslužný program zároveň spustil časovač. V okamihu preklopenia komparátoru by v prerušení zastavil čítač. Nameraná časová hodnota predstavuje polovicu intervalu trvania každého kroku komutácie. Ten istý časovač by bol použitý znova pre meranie rovnakého časového intervalu a následné prepnutie na nasledujúci krok komutácie. V ďalších dvoch krokoch, kedy by boli plávajúce fázy B a C, by bol dvojnásobok nameraného času použitý znova. Až potom by bola plávajúca opäť fáza A, čítač by bol použitý k meraniu nového komutačného času a celý proces by sa opakoval. Toto by však fungovalo iba v ideálnych podmienkach. V prípade zohľadnenia hysterézie komparátoru a časového oneskorenia ktoré na vstupe komparátoru vzniká prítomnosťou filtračného kondenzátora 39 nF je jasné, že preklopenie komparátoru zo stavu 0 na 1 a naopak nenastáva presne v polovici jednotlivých krokov komutácie.

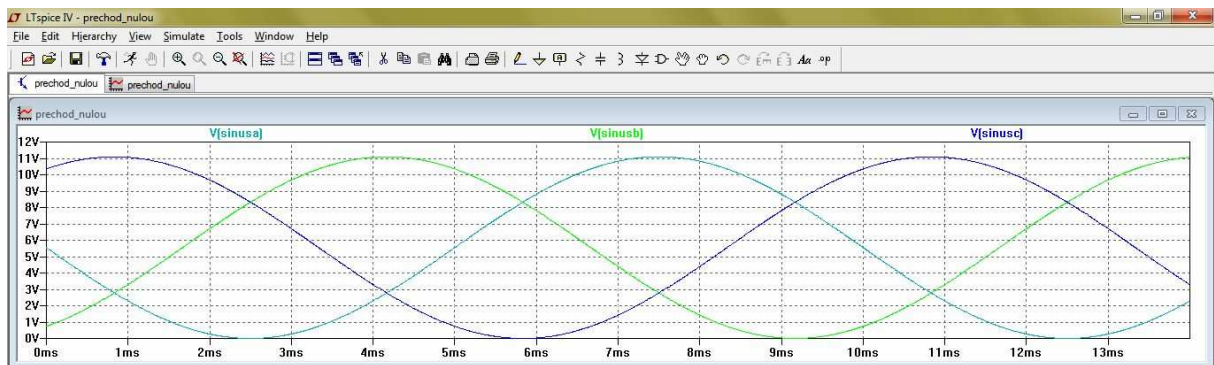
Z toho dôvodu som sa rozhodol využiť dva čítače/časovače. Mikrokontrolér Atmega8 ponúka celkovo tri (dva 8-bitové a jeden 16-bitový). Prvý z nich je využitý na generovanie PWM signálu. Zostávajú práve dva. Jeden z nich je použitý pre meranie času do preklopenia komparátoru, druhý k samotnému časovaniu jednotlivých krokov komutácie.

K ladeniu hodnôt jednotlivých súčiastok komparátoru som sa rozhodol využiť simuláciu. Rovnako ako v prípade tranzistorových spínačov fáz som použil nástroj LT Spice.

Pre zjednodušenie simulácie som výstup trojice fáz motora nahradil trojicou PWM signálov ktorých strieda je riadená sínusovkami [28] so vzájomným fázovým posunom 120° [8]. Schéma zapojenia zo simulačného programu LT Spice je na nasledujúcom obrázku. Ďalší obrázok potom zobrazuje tri sínusovky o amplitúde 11,1V (napätie akumulátora vrtuľníku) s offsetom 5,55V a vzájomným fázovým posunom 120° .

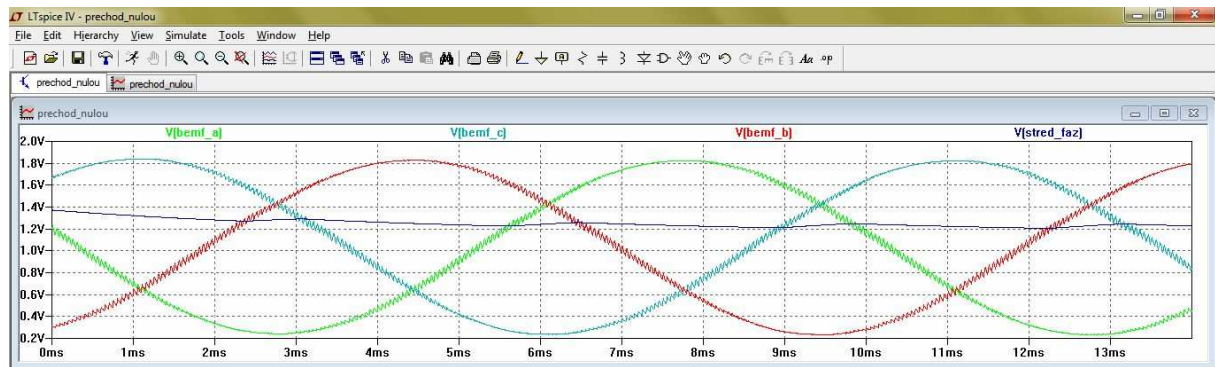


Obr. 4.14 Komparátor pre časovanie komutácie zakreslený v LT Spice



Obr. 4.15 Sínusovky predstavujúce jednotlivé fázy

Tieto tri sínusovky sa v podobe zašumenej PWM signálom vyskytujú práve na troch fázach motora. K ich snímaniu som použil odporové deliče doplnené o filtračný kondenzátor zobrazené v schéme na obrázku **Obr. 4.13**. Napätie na výstupe trojice odporových deličov je na nasledujúcom obrázku označené ako $V(\text{bemf_a})$, $V(\text{bemf_b})$ a $V(\text{bemf_c})$. Napätie na výstupe referencie (tá je spomenutá na začiatku tejto kapitoly) je označené $V(\text{stred_faz})$.



Obr. 4.16 Spätne elektromotorické napätia a referencia vstupujúce do komparátorov

Preklopenie komparátoru zo stavu 0 na 1 nastáva, keď má signál na neinvertujúcom vstupe OZ vyššiu napätovú úroveň ako referenčný signál pripojený na neinvertujúci vstup OZ [7]. V opačnom prípade sa výstup komparátoru preklolí z úrovne 1 na 0 [7]. Graf zobrazujúci snímanú sínusovku fázy A a výstup príslušného komparátoru je na nasledujúcom obrázku.



Obr. 4.17 Preklopenie komparátoru v okamihu prechodu nulou

Z grafu vyššie je viditeľné, že preklopenie komparátoru zo stavu 1 na 0 korešponduje s okamihom, kedy signál na fáze A nadobúda hodnotu polovice napájacieho napätia, teda nastáva prechod nulou. U preklopenia v opačnom prípade však už signály nekorešpondujú. To je spôsobené jednak hystereziou komparátoru ktorú je možné o niečo znížiť odstránením spätnej väzby. K tomu som však pristupovať nechcel, pretože u komparátoru bez zavedenej spätnej väzby hrozí jeho rozkmitanie. Druhým faktorom ktorý spôsobuje tento posun je kondenzátor pripojený na výstup odporového deliču pre sledovanie spätneho elektromotorického napätia. Bez tohoto kondenzátoru by komparátor opäť kmital a zapojenie by nefungovalo. Znížením jeho hodnoty je možné isté vylepšenie avšak za cenu, že preklopenie komparátoru bude sprevádzané množstvom zákmitov.

Veľkou komplikáciou je totiž, že komparátor nieje určený na určitý konkrétny kmitočet ale pre široký rozsah kmitočtov závislý na otáčkach motora. Z toho dôvodu je voľba vhodnej kapacity zmieneného kondenzátoru tak, aby spôsobil čo najmenší fázový posun spätného elektromotorického napätia oproti požadovanej sínusovke a zároveň aby čo najviac obmedzil zákmity pri preklopení komparátoru.

Komparátor je aj v prípade výstupu zachyteného na obrázku Obr. 4.17 možné k časovaniu komutácie využiť. Stačí totiž poznať jeden okamih prechodu nulov za celých 6 krokov komutácie. Čas každého kroku sa využitím metódy s časovačom/čítačom uvedenej vyššie v tejto kapitole odmeria raz a následne sa použije v ďalších piatich krokoch. Potom sa odmeria nový čas komutácie atď.

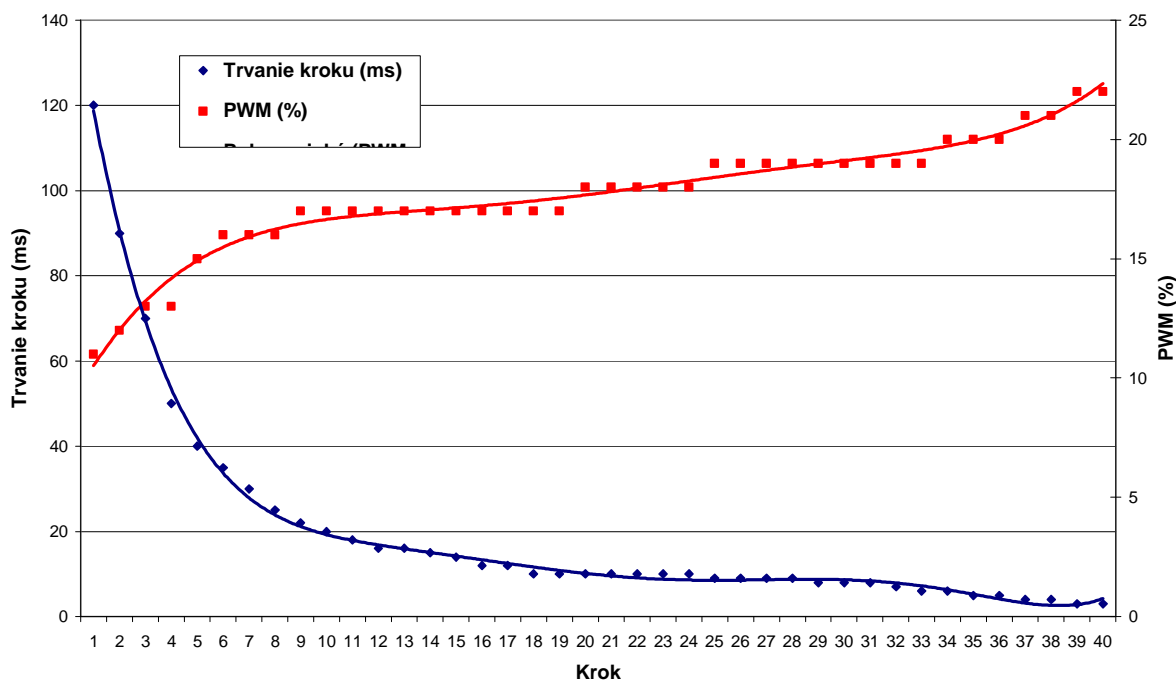
4.5 Rozbeh motora

K tomu, aby sa na cievke rotujúcej v magnetickom poli naindukovalo dostatočné napätie a aby začal fungovať komparátor určený k časovaniu komutácie motora je potrebné dosiahnuť určité otáčky motora [40]. V prípade motorov s Hallovými senzormi alebo v prípade snímania fyzických otáčok motora tento problém nenastáva. U motorov použitých v tejto práci však miktokontrolér nemá žiadnu spätnú väzbu z rotora. To že sa otáča magnetické pole statora spínaním jednotlivých cievok ešte neznamená že sa otáča aj rotor.

K počiatočnému roztočeniu sa u trojfázových motorov a regulátorov popisovaných v tejto práci využíva štartovacia sekvencia krokov z ktorých každý nasledujúci krok komutácie trvá kratší čas a zároveň sa zvyšuje strieda riadiaceho PWM signálu [40]. Štartovacia sekvencia je pre každý motor, dokonca pre každú kombináciu motor-vrtuľa jedinečná. Je úlohou každého vývojára nájsť správny spôsob ako motor rozbehnúť. Niektoré motory požadujú lineárne skracovanie intervalu jednotlivých krokov komutácie pri štarte, iné zasa exponenciálne [40]. Záleží to na konkrétnom motore [40]. Nasledujúca tabuľka a graf zobrazujú štartovaciu sekvenciu použitú pre rozbeh motora naprogramovanú v regulátore vyvinutom v rámci tejto práce.

Krok	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trvanie kroku (ms)	120	90	70	50	40	35	30	25	22	20
PWM (%)	11	12	13	13	15	16	16	16	17	17
Krok	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Trvanie kroku (ms)	18	16	16	15	14	12	12	10	10	10
PWM (%)	17	17	17	17	17	17	17	17	17	18
Krok	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Trvanie kroku (ms)	10	10	10	10	9	9	9	9	8	8
PWM (%)	18	18	18	18	19	19	19	19	19	19
Krok	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Trvanie kroku (ms)	8	7	6	6	5	5	4	4	3	3
PWM (%)	19	19	19	20	20	20	21	21	22	22

Tab. 4.3 Zmena trvania kroku a striedy riadiaceho PWM signálu pre rozbeh motora



Obr. 4.18 Zmena trvania kroku a striedy riadiaceho PWM signálu pre rozbeh motora

4.6 Meranie prevádzkových podmienok

4.6.1 Meranie stavu akumulátora

U airborne robota je neustála kontrola aktuálneho stavu vybitia akumulátora mimoriadne dôležitá. Z hodnoty napätia akumulátora je totiž možné určiť zostávajúcu dobu letu. V prípade, že hodnota napájacieho napätia klesne pod určenú hodnotu, mikrokontrolér zníži otáčky jednotlivých motorov tak, aby kopter bezpečne dosadol na zem. To zároveň slúži ako ochrana článkov samotného akumulátora proti poškodeniu nadmerným vybitím. Stav akumulátora zároveň signalizuje dvojica vysoko svietivých SMD LED diód, červená a zelená. Tie sú umiestnené na spodnej strane dosky plošných spojov a indikujú tri stavy: zelená = akumulátor je plne nabitý, zelená + červená = akumulátor je čiastočne vybitý, červená = akumulátor je úplne vybitý.

Akumulátor pozostáva z troch článkov Li-pol zapojených do série. Menovité napätie každého z článkov je 3,7V. Kolísa podľa stavu vybitia článku v rozsahu 3,0V až 4,2V, čo pre akumulátor s tromi článkami znamená pokles napätia od 12,6V pri plnom nabití, až po 9,0V pri úplnom vybití [17].

Meranie hodnoty napätia akumulátora zabezpečuje AD prevodník mikrokontroléru Atmega8. Aby bolo možné merať hodnotu tohoto napätia použitým AD prevodníkom, je nutné jeho zníženie. K tomu slúži jednoduchý odporový delič s rezistormi R_x a R_y . Referenčné napätie AD prevodníku mikrokontroléru je 5V. Aktuálnu hodnotu napätia na vstupe AD prevodníku môžeme určiť podľa vzťahu [24]:

$$U_{ADC} = U_{BAT} \cdot R_y / R_x + R_y \quad (V) \quad (1)$$

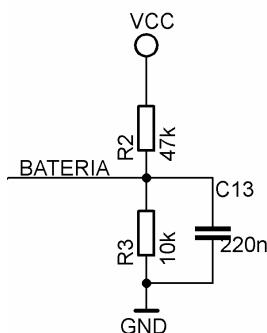
kde: U_{ADC} - napätie na výstupe deliča (V)

U_{BAT} - napätie akumulátora (V)

R_x - odpor rezistoru R2 (Ω)

R_y - odpor rezistoru R3 (Ω)

Presnosť merania závisí od reálnej hodnoty odporu oboch rezistorov, od rozlíšenia AD prevodníku a od veľkosti kvantizačného šumu. Použité rezistory majú toleranciu 5%, rozlíšenie 10-bitového prevodníka je 4,9 mV a hodnota kvantizačného šumu je $\pm 0,5$ LSB. Jedná sa o hodnoty tak malé, že ich nieje potrebné pri určovaní stavu vybitia akumulátora uvažovať.



Obr. 4.19 Odporový delič pre meranie stavu akumulátora

Kondenzátor o hodnote 220 nF pripojený k výstupu odporového deliča slúži k odfiltrovaní šumu o kmitočte 20 kHz [7] spôsobeného PWM signálom spínajúcim záťaž (motor) pripojenú na akumulátor.

4.6.2 Meranie prúdového odberu motora

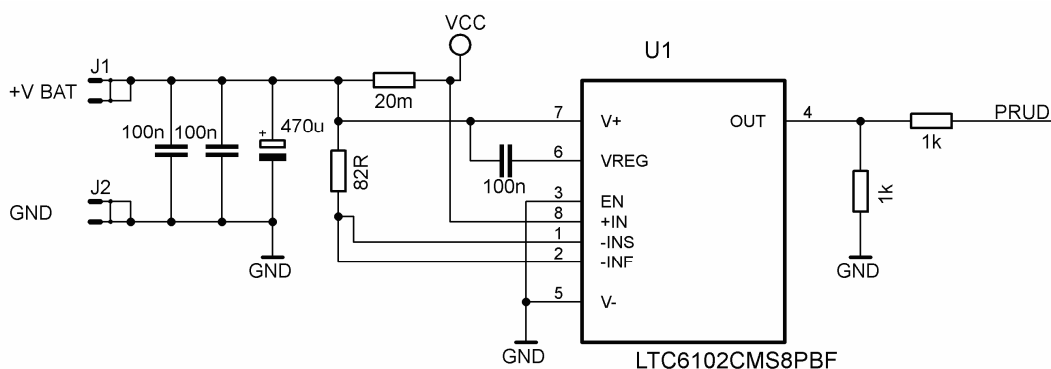
Väčšina komerčne dostupných regulátorov motorov meranie prúdového odberu motora neposkytuje. Ja som sa však rozhodol merať motorom odoberaný prúd z akumulátora a to hlavne z dvoch dôvodov.

Prvým z nich je možnosť hodnotu prúdového odberu prepočítať na aktuálny ťah každého z rotorov podľa grafu uvedeného v kapitole 7.1 Meranie ťahu vrtulí. Týmto meraním som totiž zistil vzťah medzi odoberaným prúdom a ťahom pre danú kombináciu vrtule a motora v celom ich pracovnom rozsahu.

Druhým dôvodom je bezpečnosť. Každý motor má maximálny prúdový odber na menovitom napätí udaný výrobcom. V prípade motorov použitých v tejto práci to je 14,5 A_{RMS} . Ak dosiahne prúdový odber vyššiu hodnotu, regulátor môže otáčky motora obmedziť prípadne motor vypnúť z dôvodu ochrany regulátora a akumulátora pred poškodením nadprúdom.

K meraniu prúdu som sa rozhodol použiť integrovaný obvod LTC6102. Ten je zapojený podľa odporúčania výrobcu [27]. Obvod funguje ako prevodník prúd/napätie. K

meraniu jednosmerného prúdu využíva úbytok napätia na bočníku. Schéma zapojenia obvodu pre meranie jednosmerného prúdu je na nasledujúcom obrázku.



Obr. 4.20 Zapojenie obvodu pre meranie jednosmerného prúdu

Prevodový pomer prúd/napätie obvodu LTC6102 je možné vypočítať podľa katalogového listu výrobcu [27]:

$$U_{OUT} = R_{OUT} / R_{IN} \cdot V_{SENSE} \quad (2)$$

kde: U_{OUT} - napätie na výstupe obvodu LTC6102 (V)
 R_{OUT} - odpor rezistoru medzi výstupom LTC6102 a zemou (Ω)
 R_{IN} - odpor rezistoru medzi + pólom napájania LTC6102 a pinmi -INS, -INF (Ω)
 V_{SENSE} - úbytok napätia na bočníku (Ω)

Zo vzťahu uvedeného vyššie som vychádzal pri návrhu merania prúdu pre regulátor motorov. Za maximálne výstupné napätie som zvolil hodnotu 5V, pretože do nej je schopný pracovať AD prevodník mikrokontroléru Atmega8. Za maximálny prúd ktorý budem chcieť merať som zvolil hodnotu 20A. Zvolil som vhodný bočník s odporom 20 m Ω a maximálnym stratovým výkonom 5W. Poslednou zvolenou hodnotou bol odpor 1 k Ω na výstupe LTC6102. Všetky hodnoty som dosadil do vzťahu (2):

$$U_{OUT} = (R_{OUT} / R_{IN}) \cdot V_{SENSE} \quad (V)$$

$$5V = (1 \text{ k}\Omega / R_{IN}) \cdot 20 \text{ m}\Omega \cdot 20A$$

$$R_{IN} = 82 \Omega \quad (\text{pre } U_{OUT} = 4,878V)$$

Prevodník by teda mal merať jednosmerný prúd o maximálnej hodnote tesne cez 20A s prevodovým pomerom 244 mV/ 1A. Obvod som sa rozhodol pre overenie predpokladanej funkčnosti odsimulovať ešte v simulačnom programe LT Spice. Počas simulácie som zistil, že obvod skutočne meria prúd s prevodovým pomerom 244 mV/A. To však platí iba po hodnotu tesne cez 15A. Výstup LTC6102 totiž rastie po hodnotu 3,7 V a ďalej sa už nezvyšuje. Obvod by bol teda schopný merania iba do 15A.

Preto som sa rozhodol upraviť návrh tak, aby pri prúde motorom 20A bola hodnota na výstupe LTC6102 nižšia ako 3,7 V. Síce tým príde ku zníženiu presnosti merania, avšak je tým možné dosiahnuť požadovaný rozsah. Nové hodnoty som znovu dosadil do vzťahu (2):

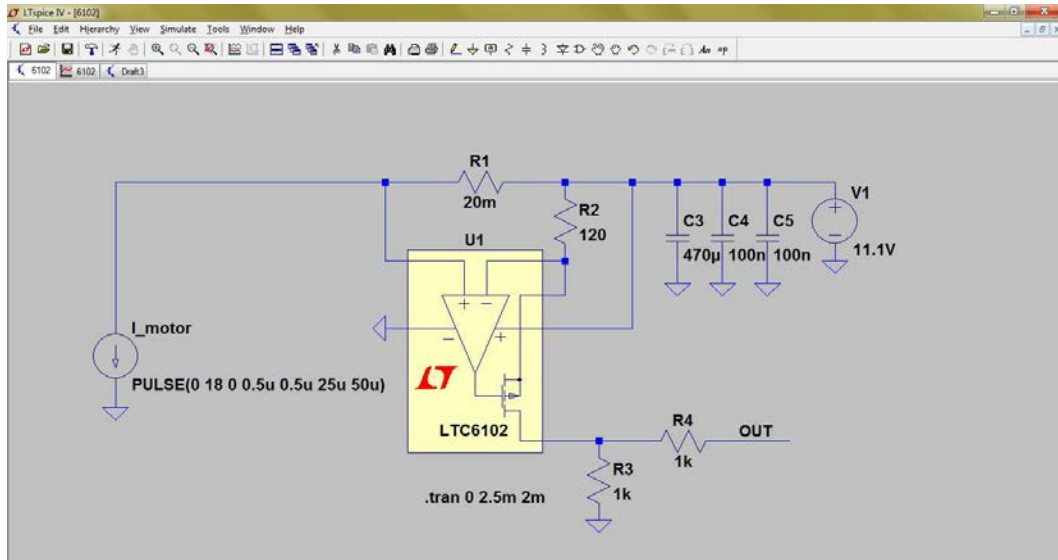
$$U_{OUT} = (R_{OUT} / R_{IN}) \cdot V_{SENSE} \quad (V)$$

$$3.7V = (1 \text{ k}\Omega / R_{IN}) \cdot 20 \text{ m}\Omega \cdot 20A$$

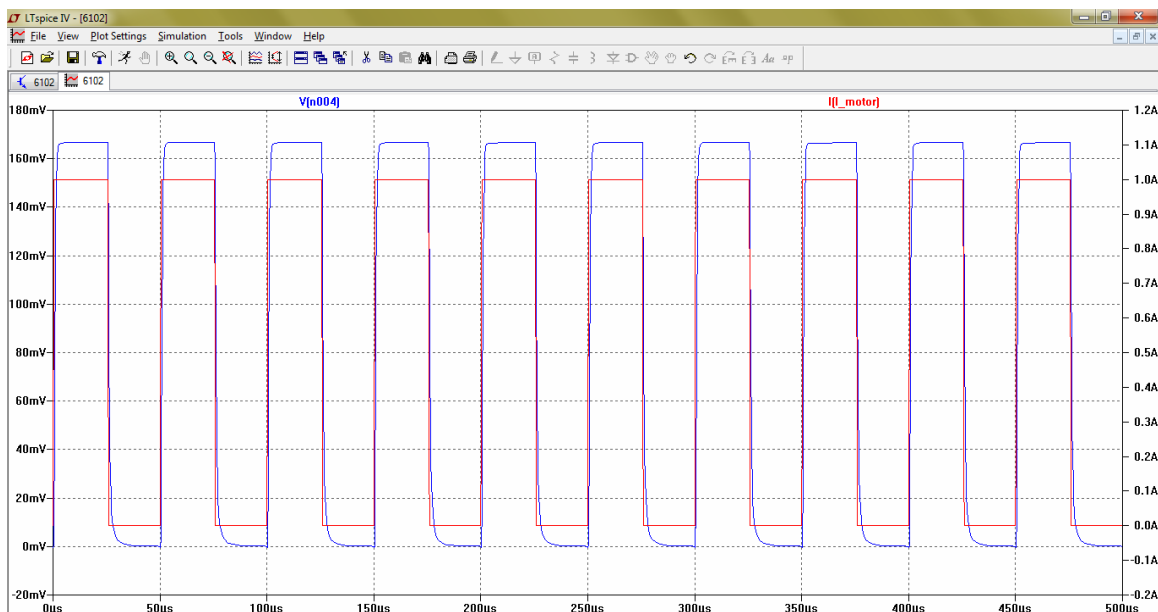
$$R_{IN} = 120 \Omega \text{ (pre } U_{OUT} = 3,33V)$$

Obvod je teda po prepočítaní schopný merania prúdu do hodnoty 22,2 A s prevodovým pomerom 166,7 mV/A. To pre vstup 10 bitového AD prevodníku Atmega8 s rozlíšením 4,9 mV plne postačuje. Obzvlášť keďže ide iba o orientačné meranie v zmysle: prúdový odber motora ešte vyhovuje alebo prúdový odber motora je nad povolenou hranicou.

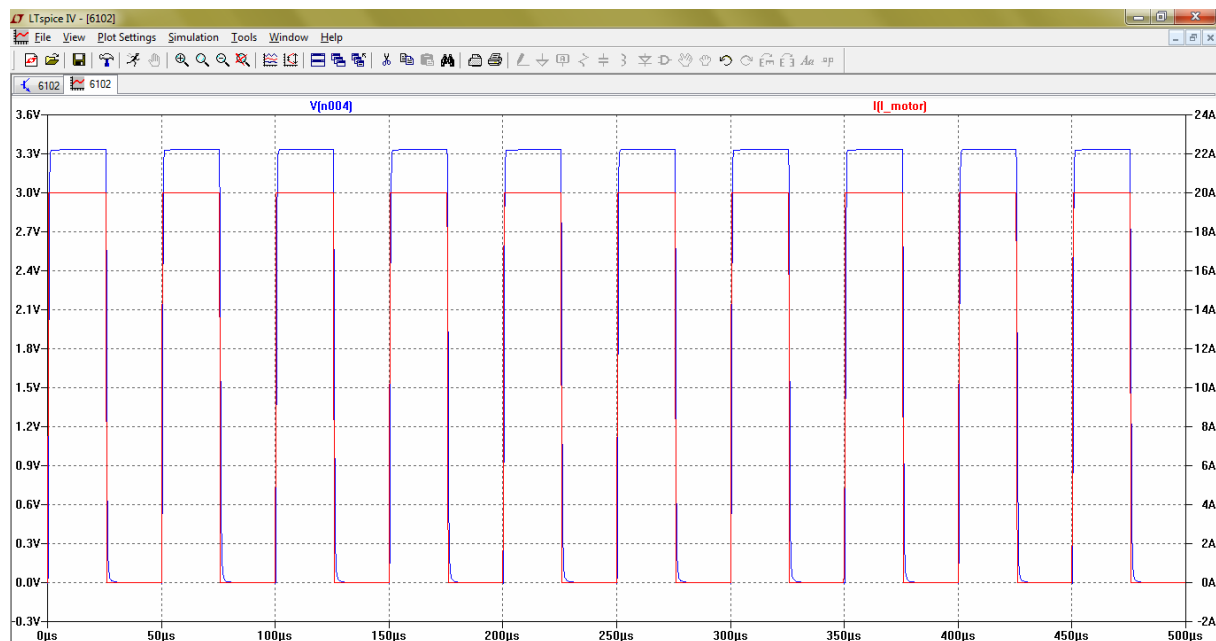
Na nasledujúcich obrázkoch je achytená schéma zapojenia obvodu pre meranie prúdu zakreslená v programe LT Spice, ďalej simulácia pre prúd 1A a pre prúd 20A.



Obr. 4.21 Obvod pre meranie prúdu zakreslený v simulačnom programe LT Spice



Obr. 4.22 Priebeh meraného prúdu a výstupu LTC6102 pre prúd 1A



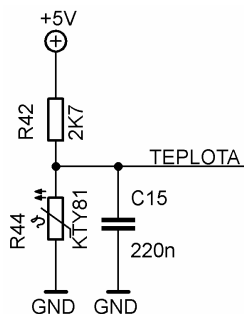
Obr. 4.23 Priebeh meraného prúdu a výstupu LTC6102 pre prúd 20A

Vzhľadom k tomu, že prúdový odber motora má vplyvom PWM signálu spínajúceho výkonové tranzistory obdĺžnikový priebeh o kmitočte 20 kHz, má rovnakú podobu aj výstup prevodníku prúd/napätie LTC6102. Tento signál by bolo možné vyhladiť dolnou priepusťou (integračným článkom) pripojenou medzi výstup LTC6102 a vstup AD prevodníku Atmega8. Ja som sa rozhodol tento problém vyriešiť v obslužnom programe tak, že v programe sú do poľa ukladaných niekoľko posledných nameraných dondôt a do úvahy je braná najvyššia z nich.

4.6.3 Meranie teploty spínacích tranzistorov

Kontrola teploty spínacích tranzistorov rovnako ako meranie prúdu zvyčajne nieje súčasťou modelárskych regulátorov motorov. Ide však o dôležitú súčasť regulátora prispievajúcu k jeho bezpečnej prevádzke. Ak by totiž došlo k prehriatiu MOSFET tranzistorov, hrozilo by ich poškodenie, prípadne aj poškodenie akumulátora a zrútenie stroja.

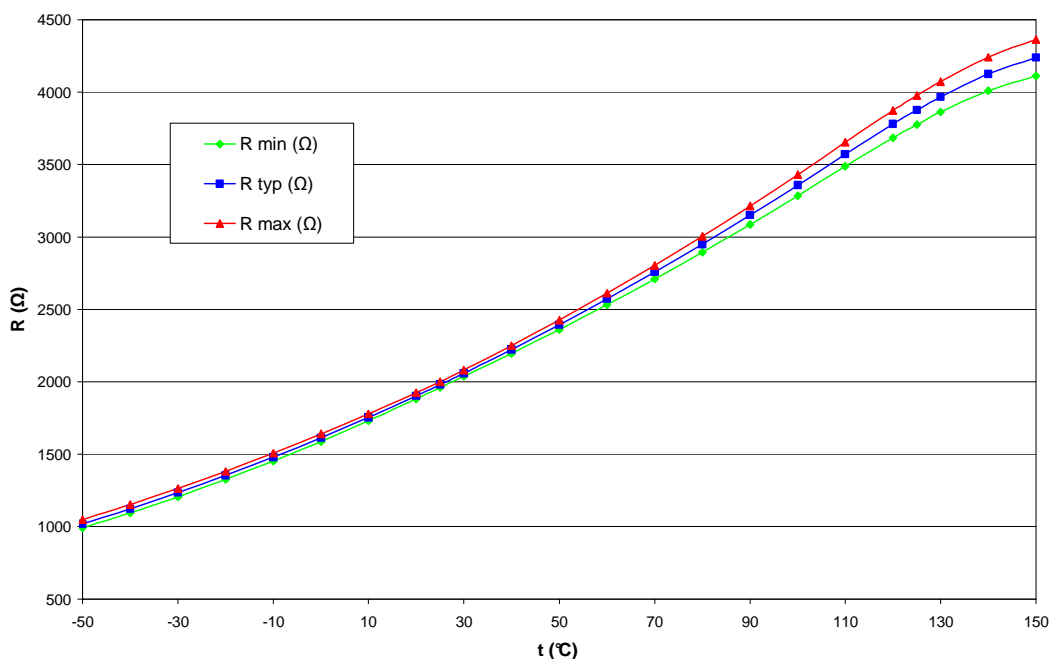
K meraniu teploty slúži odporový delič skladajúci sa z rezistoru s pevnou hodnotou 2,7 k Ω a termistoru KTY81/220. výstup deliča je pripojený na jeden zo vstupov AD prevodníku mikrokontroléru Atmega8. Ten je doplnený o paralelne pripojený kondenzátor 220 nF pre odfiltrovanie rušenia o kmitočte 20 kHz, ktoré sa vplyvom PWM signálu môže v obvode vyskytovať. Termistor KTY81 je termistor s kladným súčiniteľom odporu z čoho vyplýva, že jeho elektrický odpor sa zvyšuje s narastajúcou teplotou [9]. Tým dochádza aj k zvyšovaniu napätia na výstupe odporového deliča. Hodnotu napätia na výstupe deliča pre meranie teploty môžeme určiť podľa vzťahu (1) uvedeného v kapitole **4.2.3 Meranie stavu akumulátora**.



Obr. 4.24 Odporový delič s termistorom pre meranie teploty

Presnosť merania teploty závisí od presnosti napájacieho napätia 5V, od reálnej hodnoty odporu rezistoru s pevnou hodnotou v deliči, od presnosti použitého termistoru, od rozlíšenia AD prevodníka a od veľkosti kvantizačného šumu. Rozlíšenie 10-bitového prevodníka mikrokontroléru je 4,9 mV a hodnota kvantizačného šumu je $\pm 0,5$ LSB.

Hodnota odporu termistoru KTY81/220 sa podľa údajov výrobcu [35] pohybuje pre rozsah teploty -50 až 150°C od $970\ \Omega$ do $4\ 237\ \Omega$ ako to zachytáva nasledujúci graf. Bol vytvorený s použitím hodnôt z katalógového listu KTY81.

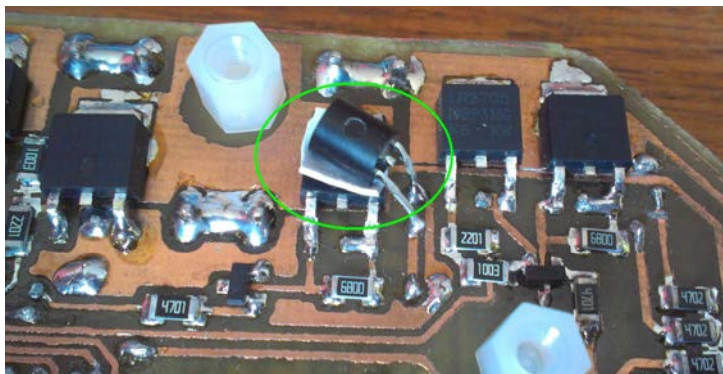


Obr. 4.25 Závislosť odporu termistoru KTY81/220 na teplote [35]

Ako je vidieť z grafu vyššie, k faktorom ovplyvňujúcim presnosť merania prispieva aj rozptyl odporu termistoru pri danej teplote v rozsahu R_{MIN} až R_{MAX} . Meranie teploty spínacích tranzistoroj je však iba orientačné v zmysle dvoch stavov: teplota ešte vyhovuje, teplota už nevhovuje. Preto jednoduché riešenie s termistorom plne postačuje.

V prípade prekročenia teploty približne 80°C začne regulátor automaticky znižovať otáčky rotoru a zároveň sa rozblíka varovná červená LED dióda na spodnej strane regulátora viditeľná zospodu na letiacom vrtuľníku.

Pre zlepšenie prenosu teplota z tranzistoru na termistor som použil teplovodivú podložku určenú pre umiestnenie medzi chladič a chladenú súčiastku. Mimoriadne dôležité je aj to, aby bol termistor dostatočne pritlačený na plochu tranzistoru pod ním. Z dôvodu zjednodušenia mechanického riešenia merania teploty tranzistorov je termistor umiestnený iba na jednom z nich. Všetky tranzistory sú totiž zaťažované rovnako a aj ich vnútorný odpor je veľmi podobný, pre to sa zahrievajú približne rovnako. Dva tranzistory v strede plošného spoja o niečo viac, pretože z tohoto miesta je horší odvod tepla. Termistor je umiestnený práve na jednom z nich.



Obr. 4.26 Umístění termistoru pro měření teploty tranzistorů na vyrobené desce

4.7 Doska plošných spojov

Dosku plošných spojov som vzhľadom ku zložitosti zapojenia navrhol ako obojstrannú. Jej tvar som prispôbil tvaru nosnej konštrukcie quadkopteru. Jej stredová časť má tvar pravidelného osemuholníku. Regulátor motorov má tvar polovice tohoto osemuholníku. V hotovom vrtulníku sú teda štyri regulátory umiestnené v dvoch dvojiciach nad sebou. Rozmery dosky plošných spojov sú 125 x 55 mm. Jej návrh je spolu s osadzovacím plánom uvedený v prílohe C.

Dosku plošných spojov som vytvoril metódou nažehlenia predlohy z laserovej tlačiarne. Následne som ju leptal v roztoku chloridu železnatého. Povrch hotovej dosky som ošetril ochrannou vrstvou a následne osadil všetky súčiastky. Cesty, ktoré sú viac prúdovo namáhané som pocínovať. Fotografia vyrobeného prototypu regulátora motorov sa nachádza v prílohe D.

4.8 Vrtule

Voľba vrtule sa odvíja od výberu motora. Pri nevhodnej voľbe vrtule dochádza buď k nevyužitiu výkonu motora, čo sa prejaví nízkym ťahom, alebo naopak k jeho preťažovaniu [41], čím sa skrátí letová doba na jedno nabitie akumulátora a zároveň sa skraca životnosť motora.

Väčšina vrtulí používaných v leteckom modelárstve je dvojlistá, ale používajú sa aj troj a viac listé. Dvojlisté vrtule sú obľúbené hlavne z toho dôvodu, že sú relatívne lacné.

Majú aj vyššiu účinnosť [41]. Zvyšovaním počtu listov totiž účinnosť klesá, pretože viac energie sa spotrebuje na to, aby jednotlivé listy prerážali vzduch [41]. Najvyššiu účinnosť dosahuje jednolistá vrtuľa s protizávažím, ale tá sa v praxi nikde nevyskytuje [41]. Pri použití viaclistej vrtule platí všeobecné pravidlo, že pridaním každého listu by sa mal znížiť priemer vrtule [41].

U kopterov sa používajú vrtule z PVC alebo z uhlíkových vlákien. Dôležité je, aby bol daný typ vrtule vyrábaný v ľavotočivej i pravotočivej verzii. U leteckých aj modelárskych vrtulí je zažitou jednotkou priemeru aj stúpania palec (2,54 mm).

4.8.1 Parametre zvolených vrtulí

Pre vyvíjané zariadenie som zakúpil dva typy vrtulí od výrobcu GWS – trojlistý typ o priemere 7 palcov a stúpaní 3,5 palca a dvojlistý typ o priemere 10 palcov a stúpaní 4,5 palca. Obe vrtule sú vyrobené z PVC.



Obr. 4.27 Vrtule GWS

Vrtule je nutné pevne, bezpečne a zároveň s dokonalým vyvážením spojiť s hriadeľom elektromotora. K tomu som použil hliníkové kužely, opäť využívané v leteckom modelárstve.



Obr. 4.28 Hliníkové vrtulové kužele

4.9 Záver kapitoly 4

Vývoj regulátora motorov popísaný v tejto kapitole bol pre mňa novou skúsenosťou a naozaj veľa som sa počas neho naučil.

Na začiatku vývoja som sa vybral nesprávnou cestou a pokúšal som sa navrhnúť jeden regulátor pre riadenie všetkých štyroch motorov. Nesprávne som chápal princíp riadenia trojfázových modelárskych motorov – vzťah medzi striedou PWM signálu a krokovaním komutácie motora. Tento regulátor som doviedol až do štádia vyrobeného a osadeného plošného spoja. Až v priebehu programovania som pochopil, že moje predpoklady boli nesprávne.

Z toho som sa však poučil. Naštudoval som si väčšie množstvo dostupnej dokumentácie popisujúcej použité motory a spôsob práce s nimi. Väčší dôraz som dal na simulácie k čomu som úspešne použil voľne dostupný program LT Spice. Po zamyslení sa nad reálnymi prevádzkovými podmienkami som pridal možnosť merať prúdový odber motoru a teplotu spínacích tranzistorov.

K návrhu hardvéru som pristupoval so snahou zjednodušiť vývoj obslužného programu mikrokontroléru Atmega8. Úspešne som navrhol a implementoval myšlienku použitia logických obvodov k riadeniu tranzistorov spínajúcich jednotlivé fázy. Vďaka tomu som sa počas oživovania regulátora vyhol ich poškodeniu.

Snaha zjednodušiť vývoj softvéru ma viedla k návrhu komparátora pre sledovanie prechodu nulou plávajúcej fázy. Predpokladal som, že jednoduchšie bude nechať meranie času komutácie na komparátore a nespomaľovať a nekomplikovať ním softvér. Praktická realizácia komparátora tak, aby pracoval s dokonalou presnosťou však nieje jednoduchá. To vyplýva z faktu, že kmitočet signálu ktorý spôsobuje preklápanie komparátora sa pohybuje v širokom rozsahu. Je totiž priamo úmerný otáčkam motora.

Komparátor musí plniť protichodné požiadavky: kapacita na vstupe by mala byť čo najvyššia aby účinne filtrovala zákmitý PWM signálu. Ten totiž spôsobuje preklápanie komparátora rovnakým kmitočtom a znemožňuje detekciu prechodu nulou. Zároveň by táto kapacita mala ale byť aj čo najnižšia, aby nespôsobovala fázový posun medzi signálom na jej vstupe a signálom na jej výstupe (teda vstupe komparátora). Tento fázový posun totiž spôsobuje oneskorenie preklopenia komparátora oproti okamihu skutočného prechodu nulou. Ďalšou komplikáciou je hysterezia operačného zosilňovača spôsobujúca, že sa komparátor preklápa s iným oneskorením zo stavu L na H ako zo stavu H na L. K detekcii skutočného okamihu prechodu nulou som využíval osciloskop. Prvý kanál som pripojil k jednej z fáz motora a ten druhý na výstup príslušného komparátora. Týmto spôsobom som ladil nedostatky komparátora.

Regulátor motorov je funkčný, avšak musím priznať že komparátor nepracuje stopercentne a potreboval by ešte upraviť. Keby som však začínal návrh znovu, neváhal by som si priplatiť za motory opatrené hallovými senzormi. S nimi by fungoval aj regulátor navrhnutý v tejto práci s tým, že výstupy Hallových senzorov by stačilo pripojiť na výstup komparátora a ten z regulátora odstrániť.

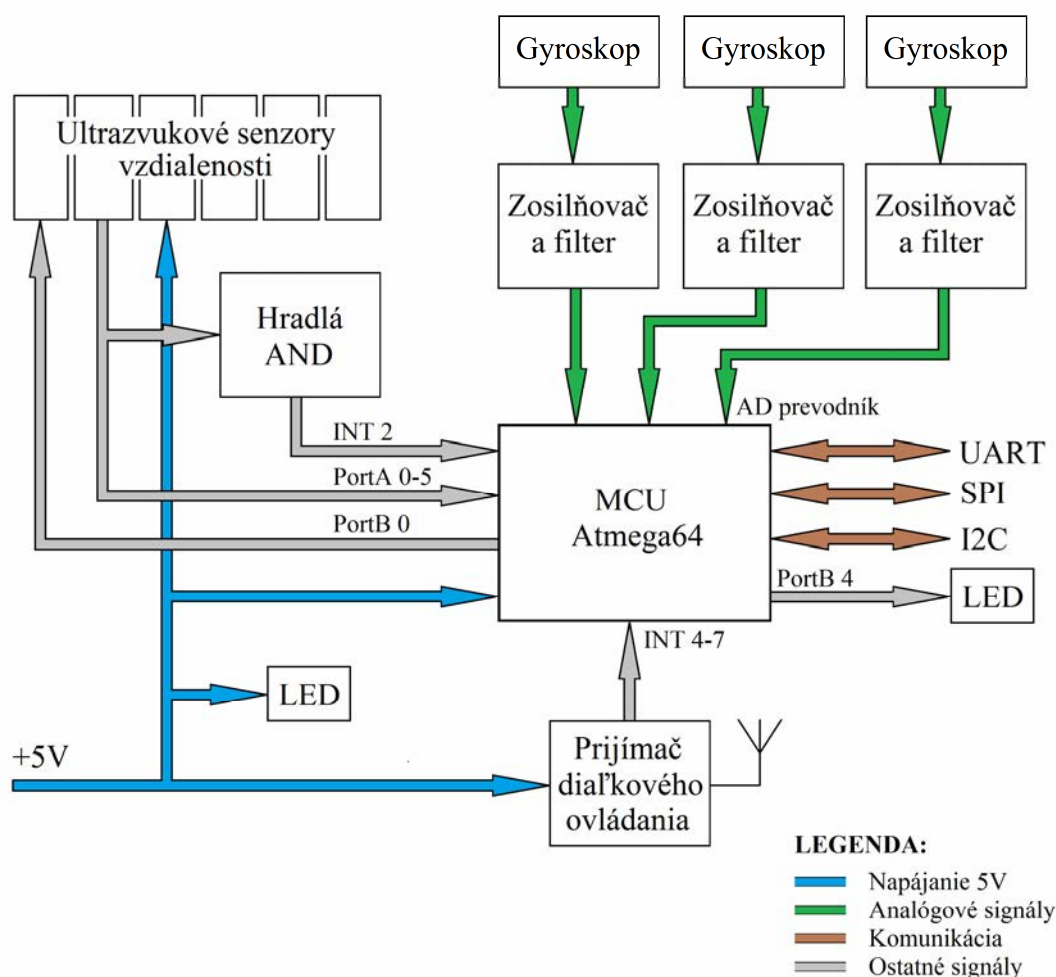
Motory s Hallovými senzormi majú ešte jednu veľkú výhodu. Pri bezsenzorovej komutácii ktorú som v tejto práci použil totiž regulátor pracuje iba s magnetickým poľom statoru. To všetko za predpokladu, že rotor toto pole nasleduje. Ak sa motor však z nejakého dôvodu nerozbehne, prípadne sa zastaví o prekážku, bezsenzorová komutácia sa o tom nedozvie. Naopak Hallove senzory informujú regulátor o skutočnej aktuálnej fyzickej polohe rotora.

5. Obvod pre riadenie letu

Veškeré najdôležitejšie spracovanie dát pre správnu funkciu quadkopteru sa odohráva práve v obvode pre riadenie letu. Ten plní vo vrtuľníku nasledujúce úlohy:

- kontroluje náklon robota vo všetkých troch osiach voľnosti,
- spracúva PWM signály z prijímača diaľkového ovládania,
- spracúva signály z ultrazvukových senzorov vzdialenosti,
- komunikuje s regulátormi motorov prostredníctvom I²C zbernice (master),
- komunikuje s PC prostredníctvom USART zbernice (iba pre účely vývoja),
- komunikuje s AVR programátorom prostredníctvom SPI zbernice (iba pre účely vývoja).

Bloková schéma obvodu pre riadenie letu vyvinutého v rámci tejto práce je na nasledujúcom obrázku.



Obr. 5.1 Bloková schéma obvodu pre riadenie letu

Jednotlivé bloky blokovej schémy sú ďalej podrobne popísané v tejto kapitole.

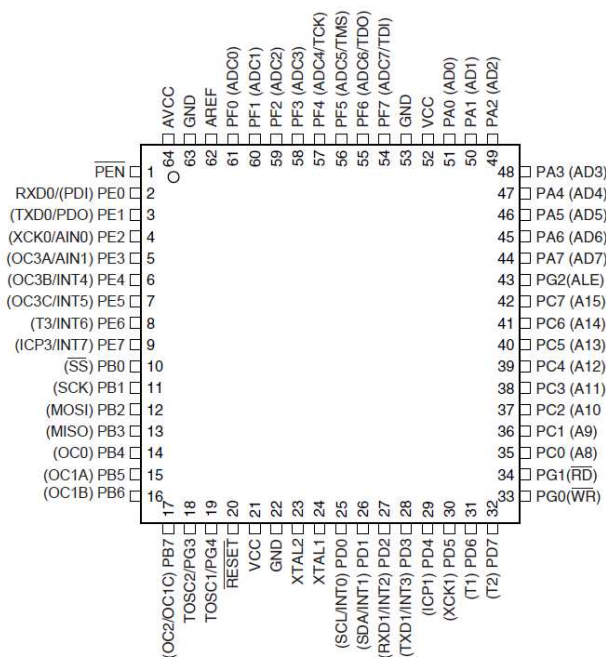
5.1 Mikrokontrolér

Aby dokázal quadcopter pružne reagovať na povely obsluhy, automaticky regulovať svoju polohu v troch stupňoch voľnosti a zároveň sa dokázal vyhnúť prekážkam, musí byť použitý mikroprocesor schopný obsluhovať všetky senzory v reálnom čase. Nasledujúca tabuľka zachytáva prehľad periférií pripojených k centrálnemu mikroprocesoru.

Názov	Komunikačné rozhranie
Regulátory motorov	I ² C
Gyroskopy	AD prevodník
Diaľkové ovládanie	časovač/čítač
Ultrazvukové senzory	časovač/čítač

Tab. 5.1 Prehľad periférií

Tieto požiadavky spĺňa rada mikrokontrolérov. Ja som sa rozhodol použiť niektorý z produktov AVR firmy Atmel, pretože s nimi mám predchádzajúce skúsenosti. Do úvahy prichádzajú typy ATmega16, ATmega32, ATmega48, ATmega64, ATmega88, ATmega128, ATmega168 a ďalšie. K realizácii riadiacej dosky som vybral jeden z výkonnejších mikrokontrolérov ATmega, typ ATmega64 v puzdre TQFP64.



Obr. 5.2 Mikrokontrolér Atmega64 v puzdre TQFP64 [2]

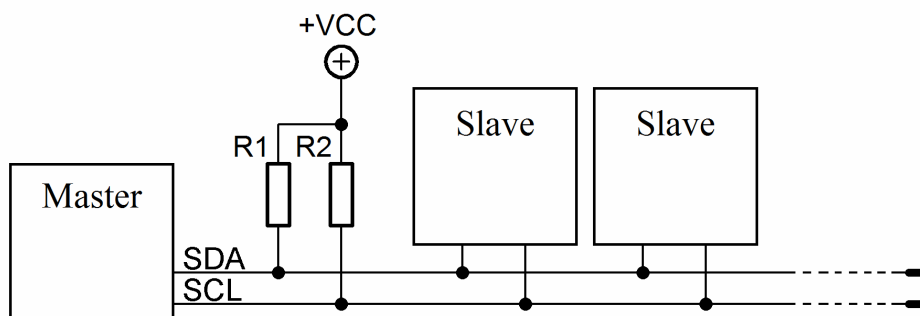
Základné vlastnosti mikrokontroléru ATmega64 [2]:

- napájacie napätie: 4,5 – 5,5 V
- taktovacia frekvencia: až 16 MHz
- CPU: 8-bitové AVR
- vnútorná FLASH pamäť: 64 kB
- vnútorná SRAM pamäť: 4 kB
- vnútorná EEPROM pamäť: 2 kB
- programovanie: JTAG, ISP
- dva 8 bitové čítače/časovače a dva 16 bitové
- watchdog, 10 bitový AD prevodník
- jednotky USART, SPI, TWI (podpora I²C)

5.1.1 Zbernica I²C

V popisovanom návrhu quadkopteru zabezpečuje I²C zbernica komunikáciu medzi obvodom pre riadenie letu a jednotlivými regulátormi motorov. U mikrokontrolérov firmy Atmel je nazývaná aj TWI zbernica (Two-wire Serial Interface) [2]. Ide o zbernicu podporujúcu komunikáciu medzi až 128 zariadeniami (pri splnení podmienky, že kapacita zbernice neprekročí hodnotu 400 pF) [13]. V jednom okamihu však môže vysielat' iba jedno zariadenie [13]. Každé zo zariadení má priradenú jedinečnú 7 bitovú adresu [13]. Komunikácia prebieha v režime Master – Slave [13].

Ako už názov napovedá, komunikácia prebieha využitím iba dvoch vodičov: SDA a SCL [13]. Vodič SDA slúži na samotný prenos dát, kým vodič SCL slúži pre distribúciu hodinového signálu pre správne časovanie komunikácie [13]. Generovanie hodinového signálu zabezpečuje zariadenie Master [13]. V tomto prípade mikrokontrolér Atmega64 v obvode pre riadenie letu. K nemu sú pripojené štyri zariadenia Slave – mikrokontroléry Atmega8 v jednotlivých regulátoroch motorov. K vodičom SDA a SCL musia byť pre správnu funkciu zbernice pripojené pullup rezistory ku kladnému pólu napájacieho napätia [2]. Nasledujúci obrázok popisuje principiálne zapojenie I²C zbernice.



Obr. 5.3 I²C zbernica

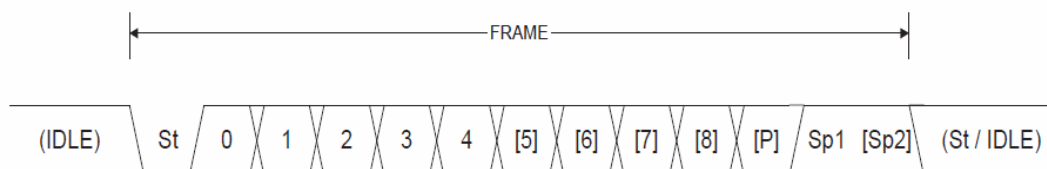
5.1.2 Zbernica USART

V obvode pre riadenie letu som sa rovnako ako pre regulátory motorov rozhodol využiť komunikáciu po USART zbernici ktorú umožňujú mikrokontroléry Atmega [17, 18]. Zbernica nieje využívaná pri normálnej funkcii obvodov, ale iba počas vývoja. Vďaka výpisu užitočných dát do konzoly prostredníctvom USART som mal počas vývoja obslužných programov prehľad o ich funkcii.

Klasická sériová linka štandardu RS-232 je z dôvodu svojej jednoduchosti ešte stále často využívaným komunikačným rozhraním pre komunikáciu medzi dvoma zariadeniami [21]. Ide o dvojstavovú zbernicu podporujúcu synchronný i asynchronný prenos dát. Napät'ové úrovne sú nasledujúce [21]:

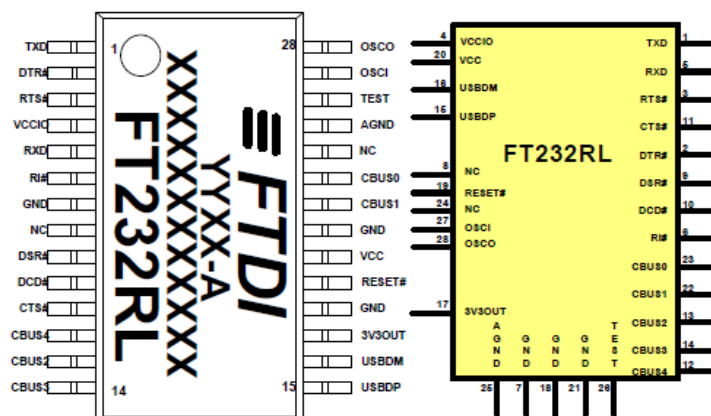
- Logická 0: 5 až 15 V (vysielač), 3 až 25 V (prijímač)
- Logická 1: -15 až -5 V (vysielač), -25 až -3 V (prijímač)

K asynchronnej komunikácii postačujú dva vodiče Rx a Tx (a samozrejme spoločná zem) [21]. Štandard definuje maximálnu vzdialenosť medzi zariadeniami 15 m, prípadne kapacitu vedenia maximálne 2500 pF [21]. Základný rámec prenášaných dát pozostáva zo štart bitu, 8 (voliteľne 5) dátových bitov, parity (parita je voliteľná) a jedného či dvoch stop bitov [2].



Obr. 5.4 USART sériový rámec [3]

Použitý mikrokontrolér Atmega64 (resp. Atmega8 v prípade regulátorov motorov) umožňuje komunikáciu USART s logikou LV-TTL. USART sa od RS-232 líši iba napät'ovými úrovňami logických stavov. Preto som použil externý prevodník USART-USB (virtual COM port). K tomuto účelu sa vyrábajú špecializované čipy. Ja som zvolil typ FT232RL od firmy FTDI Chip a zapojil som ho podľa odporúčania výrobcu [10].



Obr. 5.5 Obvod FT232RL od firmy FTDI Chip [10]

Keďže prevodník nieje súčasťou quadkopteru a slúži iba pre účely vývoja, nenavrhol som dosku plošných spojov. Prevzal som návrh z [10]. Dosku plošných spojov som umiestnil do vhodnej krabičky, z ktorej som vyviedol dve signalizačné LED diódy (pre Rx a Tx) a konektory pre pripojenie do USB portu PC a do dosky plošných spojov obvodu pre riadenie letu (alebo regulátora motorov).

Komunikácia medzi obvodom pre riadenie letu (resp. regulátormi motorov) a PC prebieha s nasledujúcimi parametrami:

- Symbolová rýchlosť: 9600 bit/s
- Počet dátových bitov: 8
- Počet stop bitov: 1
- Parita: žiadna

5.2 Senzory

Systém senzorov je základom každého kopteru. Inak by robot nedokázal dosiahnuť stabilitu počas letu. Túto stabilitu zaručuje inerciálna navigácia využitím inerciálnych senzorov ako gyroskopy a akcelerometre [33]. Princíp inerciálnej navigácie spočíva v tom, že systém neustále meria hodnoty zrýchlenia a natočenia kopteru a pokiaľ je známa počiatočná poloha, dokáže stabilizačným algoritmom upraviť polohu stroja do žiadanej pozície [33]. Praktická realizácia tejto metódy nieje celkom jednoduchá, pretože žiadny použitý senzor nieje nekonečne presný [33]. Pri diskretnom vzorkovaní dát zo senzorov má vplyv na chybu zároveň perióda vzorkovania a počet úrovní.

Realizovaný quadkopter je okrem inerciálnych senzorov (trojice gyroskopov) vybavený aj proximitnými senzormi, ktoré poskytujú varovanie o prítomnosti prekážok [33]. Konkrétne ide o šesť ultrazvukových senzorov vzdialenosti umožňujúcich pohyb robota v interiéri.

5.2.1 Gyroskopy

Ide o senzory určené k meraniu uhlového zrýchlenia [33]. Keď na výstup gyroskopu zaradíme integračný článok, dostaneme na jeho výstupe hodnotu uhlu pootočenia okolo počiatočnej osi [33]. Potreba integrácie výstupu však predstavuje určitú nevýhodu, pretože je zaťažená integračnou chybou a odchýlka vypočítaného uhlu náklonu senzoru od reálneho uhlu náklonu neustále narastá. Preto je nevyhnutná počiatočná kalibrácia gyroskopu a po určitom (krátkom) čase je potreba znovu kalibrovať gyroskopy.

Rozhodol som sa jednoosé SMD gyroskopy ENC-03R od japonského výrobcu MuRata. Ich najdôležitejšie parametre sú zhrnuté v nasledujúcej tabuľke.

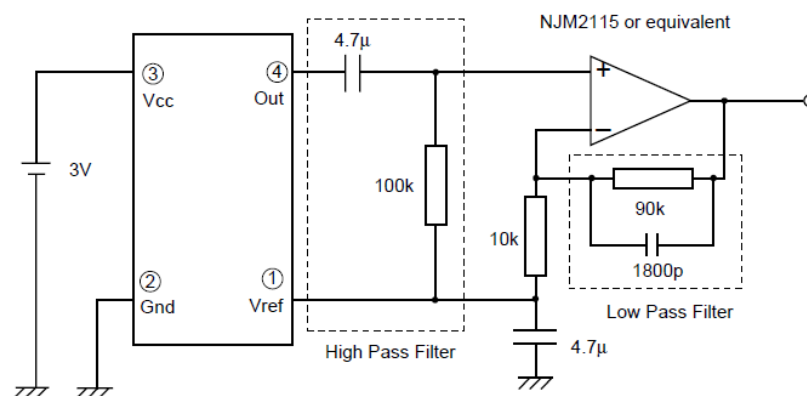
Napájacie napätie (V)	2,7 – 5,25
Maximálna uhlová rýchlosť (°/s)	+/- 300
Výstupné napätie pri uhlovej rýchlosti 0°/s (V)	1,35
Rozlíšenie (mV/°/s)	0,67
Odozva (Hz)	50

Tab. 5.2 Parametre gyroskopu MuRata ENC-03R [32]

Ide o mechanický gyroskop [32]. Tento gyroskop využíva zákon zachovania momentu hybnosti [39]. Funguje tak, že vo vnútri pevného kovového obalu sa nachádza rotujúci disk [39]. Kovový obal gyroskopu sa môže oproti rotujúcemu disku v jednej osi oboma smermi pohybovať [39]. Na výstupe gyroskopu je potom prítomná hodnota uhlovej rýchlosti prevedená na napätie [32].

V realizovanom quadkopteri sú umiestnené celkovo tri gyroskopy. Každý z meria náklon v jednej osi – roll, pitch a yaw.

Vzhľadom k veľmi nízkemu rozlíšeniu použitých gyroskopov (iba 0,67 mV/°/s) je nevyhnutné výstup gyroskopu ešte pred privedením na vstup AD prevodníku mikrokontroléru zosilniť. K tomu som použil operačný zosilňovač LM324D. Jeho výhodou je, že ponúka až štyri hradlá v rámci jedného puzdra a pracuje aj pri napájacom napätí 5V. Výrobca gyroskopu ENC-03R uvádza v katalógovom liste principiálne zapojenie zosilňovača doplneného o hornopriepustný a dolnopriepustný filter [32].



Obr. 5.6 Zapojenie gyroskopu MuRata ENC-03R podľa katalógového listu výrobcu [32]

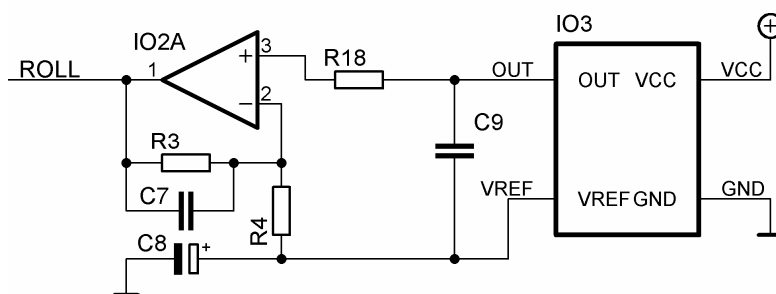
Toto zapojenie som upravil ho podľa potrieb tejto aplikácie. Odstránil som kondenzátor na výstupe gyroskopu. Ten totiž prepúšťa iba striedavú zložku signálu. Pri použití asymetricky napájaného operačného zosilňovača to však znamená, že na výstupe OZ by bola prítomná iba kladná polvlna vstupného signálu. Gyroskop by preto fungoval iba v jednom smere pootočenia, v opačnom však nie. Následne som odstránil aj rezistor o hodnote 100 kΩ, pretože bez kondenzátoru stráca význam (hornopriepustný filter).

Kondenzátor pripojený medzi zem a referenčný vstup gyroskopu som zanechal. Slúži totiž k tomu, aby OZ zosilňoval iba striedavú zložku signálu a nie jednosmernú. Výstupný offset 1,35 V gyroskopu zostane zachovaný, na výstupe OZ sa zvýši iba jeho amplitúda. Úpravou pomeru rezistorov na invertujúcom vstupe a v spätnej väzbe som nastavil zosilnenie operačného zosilňovača tak, aby bolo čo najväčšie a zároveň nepresahovala amplitúda

výstupného signálu hodnotu offsetu 1,35 V. Došlo by totiž k orezávaniu špičiek v zápornej polvlne výstupného sínusového singálu. Filtračný kondenzátor v spätnej väzbe OZ som zanechal.

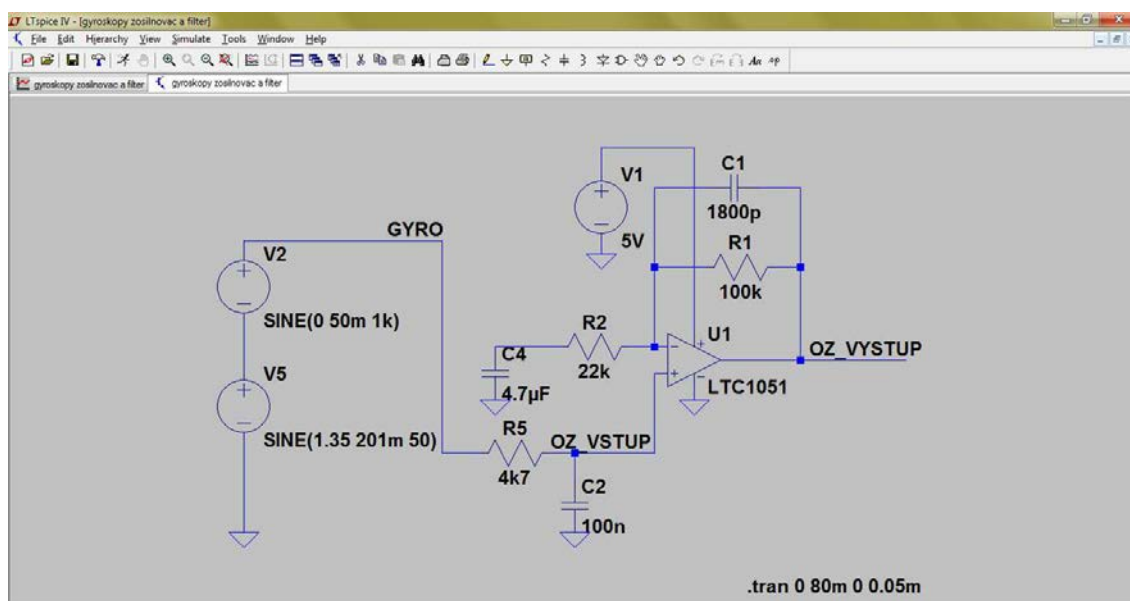
Na výstup gyroskopu (neinvertujúci vstup OZ) som pridal integračný článok RC slúžiaci k obmedzeniu šumu vyšších kmitočtov namodulovaných na kmitočte 50 Hz na výstupe gyroskopu.

Zapojenie jedného z gyroskopov so zosilňovačom a filtrom v obvode pre riadenie letu je na nasledujúcom obrázku. Všetky tri gyroskopy sú zapojené rovnako, rozdiel je iba v ich fyzickom umiestnení na doske plošných spojov.



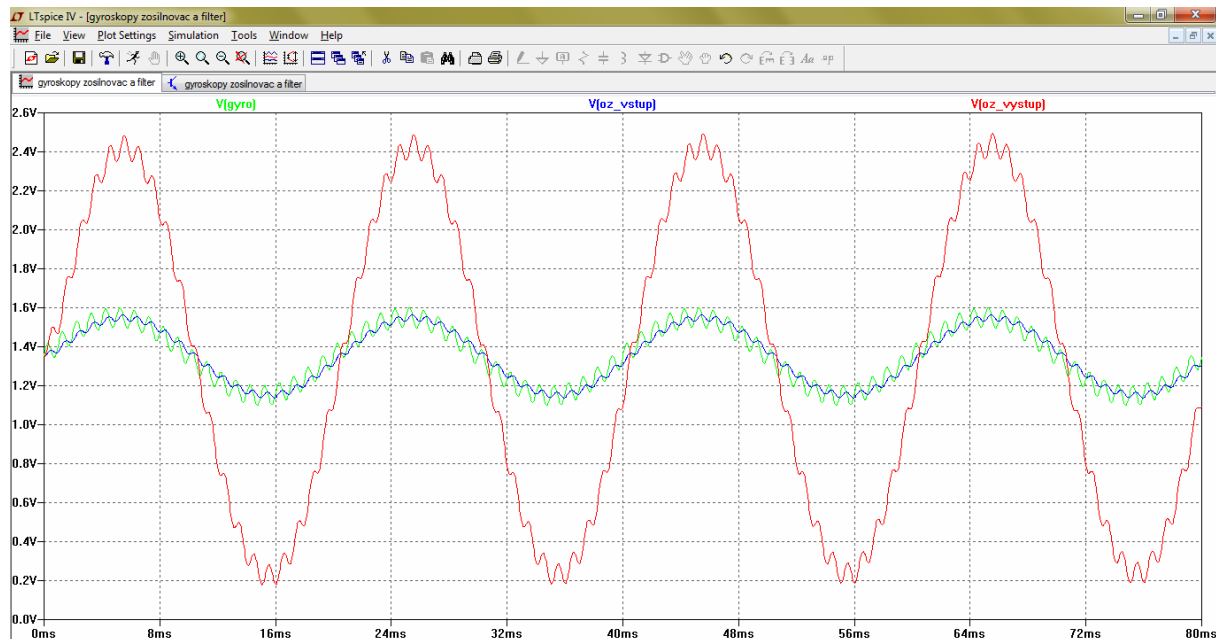
Obr. 5.7 Zapojenie gyroskopu MuRata ENC-03R v kombinácii s operačným zosilňovačom

Funkcionalitu zapojenia som overil opäť simuláciou s využitím programu LT Spice. Gyroskop som nahradil sínusovým zdrojom signálu o amplitúde 201 mV ($300 \text{ }^\circ/\text{s} \cdot 0,67 \text{ mV}^\circ/\text{s}$), jednosmernej zložke s hodnotou 1,35 V a kmitočte 50 Hz (odozva). Predstavuje teda gyroskop pri maximálnej uhlovej rýchlosti. Do série s ním som pridal ešte jeden sínusový zdroj signálu s amplitúdou 50 mV a kmitočtom 1 kHz bez jednosmernej zložky. Ten predstavuje prítomnosť šumu na výstupe gyroskopu. Schéma zapojenia zakreslená v simulačnom prostredí LT Spice je na nasledujúcom obrázku.



Obr. 5.8 Zosilňovač a filter výstupného signálu gyroskopu zakreslený v LT Spice

Nasledujúci graf zobrazuje sťažený signál na výstupe gyroskopu $V(\text{gyro})$, rovnaký signál vyhladený dolnopriepustným RC filtrom $V(\text{oz_vstup})$ na vstupe OZ a signál zosilnený na výstupe operačného zosilňovača $V(\text{oz_vystup})$. tento signál vstupuje do AD prevodníku mikrokontroléru Atmega64.



Obr. 5.9 Signály na výstupoch gyroskopu, RC filtru a operačného zosilňovača

Pôvodne mal gyroskop podľa údajov výrobcu rozlíšenie $0,67 \text{ mV}/^\circ/\text{s}$. Operačný zosilňovač má zosilnenie dané vzťahom [7]:

$$A_{OZ} = 1 + (R2 / R1) \quad (3)$$

kde: A_{OZ} - napätie zosilnenie neinvertujúceho operačného zosilňovača (-)
 $R2$ - odpor rezistoru v spätnej väzbe operačného zosilňovača (Ω)
 $R1$ - odpor rezistoru medzi neinvertujúcim vstupom OZ a zemou (Ω)

V prípade použitých rezistorov je hodnota zosilnenia rovná 5,545. Z toho vyplýva, že nový zosilnený výstup gyroskopu má rozlíšenie $3,715 \text{ mV}/^\circ/\text{s}$. To je stále hodnota relatívne nízka, ale dá sa s ňou už o niečo lepšie pracovať. Pri použití internej referencie AD prevodníku Atmega64 je rozlíšenie prevodníku $2,5 \text{ mV}$. Z toho vyplýva možnosť merať náklon robota vo všetkých troch osiach s krokom približne $0,67^\circ$. To je hodnota, ktorá je už pre stabilizáciu quadkopteru postačujúca.

5.2.2 Ultrazvukové senzory

Ultrazvukové senzory pracujú na kmitočtoch okolo 40 kHz [33]. Ide o zvuk s tak vysokým kmitočtom, že ho ľudské ucho nedokáže vnímať [39]. Senzor vysiela krátke impulzy a tie sa odrazené od okolitých prekážok vracajú k prijímaču [11]. Vďaka tomu, že šírenie zvuku je vo vzduchu relatívne pomalé, je doba medzi vyslaním a príjmom odrazeného signálu výrazne vyššia ako napr. u použitia optických senzorov. Preto je možné dosiahnuť dobrú presnosť merania bez extrémnych nárokov a obslužnú elektroniku [33]. Na základe fázového posunu vyslaného a odrazeného ultrazvukového signálu je možné určiť vzdialenosť prekážky od senzoru [11].

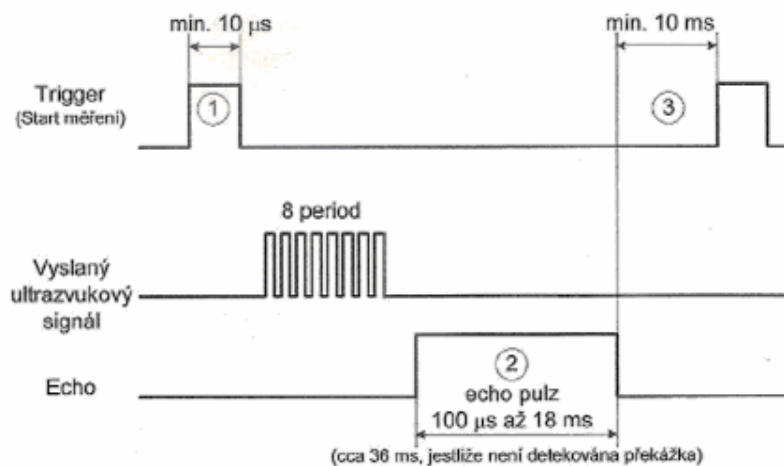
Pre realizáciu quadkopteru som vybral senzor HC-SR04. Pracuje s napájacím napätím 5 V. Efektívny vyžarovací uhol senzoru je, ako uvádza výrobca, 15° [11].



Obr. 5.10 Ultrazvukový senzor vzdialenosti HC-SR04

Spracovanie výstupu zo senzoru mikrokontrolérom je relatívne jednoduché. Senzor disponuje vstupom TRIG, na ktorý je potreba priviesť spúšťací impulz o trvaní 10 μ s [11]. Následne senzor vyšle krátky ultrazvukový signál. Po jeho odraze od prekážky a zaznamenaní sa na výstupnom pine senzoru objaví krátky ECHO impulz. Časový okamih t medzi spúšťacím a echo signálom podáva informáciu o vzdialenosti prekážky podľa vzťahu [11]:

$$l = t/58 \text{ (cm, } \mu\text{s)} \quad (4)$$



Obr. 5.11 Signály ultrazvukového senzoru HC-SR04 [33]

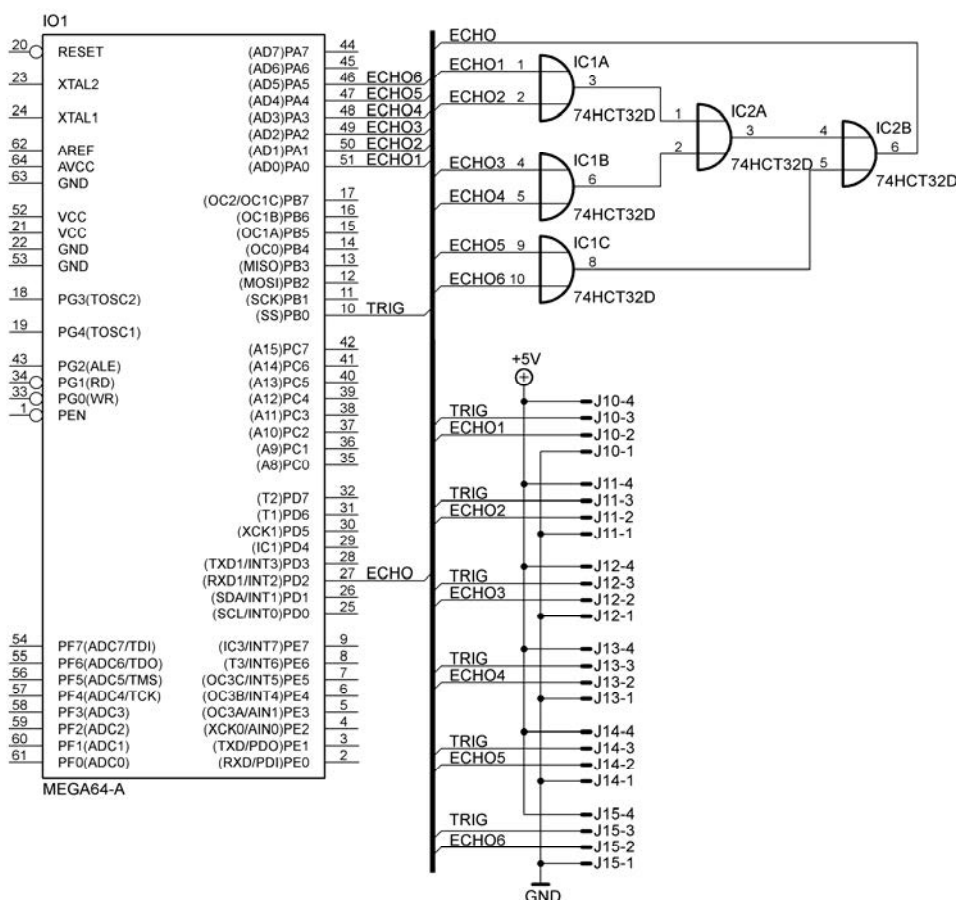
Na robotovi je použitých spolu až šesť ultrazvukových senzorov vzdialenosti HC-SR04. Výrobca uvádza rozsah 2 cm až 500 cm [11]. Meraním som ale overil, že spoľahlivo fungujú v rozsahu približne 10 cm až 300 cm. Jeden je umiestnený na spodnej strane robota,

aby kontroloval výšku pri lete nízko nad zemským povrchom (teda maximálne vo výške 300 cm). Ďalší na vrhnej strane robota, aby pri použití v budove robot dokázal kontrolovať svoju vzdialenosť od stropu. Vzdialenosť od prekážok v horizonte kontroluje štvorica senzorov umiestnených na jednotlivých ramenách robota.



Obr. 5.12 Umiestnenie ultrazvukového senzoru na ramene quadkoptera

Obsluha šesticice senzorov v zmysle: „vyšli spúšťací signál a následne čakaj na odozvu všetkých senzorov“ by však spomaľovala beh obslužného programu mikrokontroléru Atmega64. Z toho dôvodu som sa rozhodol upraviť zapojenie senzorov tak, aby quadkopter reagoval na prekážku, ktorá je k nemu najbližšie. To znamená, že od príslušného senzoru príde ECHO signál najskôr. K tomu som využil konštrukciu z logických hradieľ OR ktorú zachytáva nasledujúci obrázok.



Obr. 5.13 Mikrokontrolér a logické obvody pre obsluhu ultrazvukových senzorov

U hradla OR totiž stačí, aby na jednom zo vstupných pinov nastal stav log. 1 a tento stav sa objaví aj na výstupe. Pre spracovanie šiestich signálov je potreba aspoň päť hradieľ, ako to zobrazuje nasledujúci obrázok. Mikrokontrolér vyšle jeden spoločný signál TRIG, ten aktivuje všetkých šesť ultrazvukových senzorov. U senzoru, ktorý je prekážke najbližšie sa na výstupe pinu ECHO objaví hodnota log. 1. Tá sa prenesie do hradieľ OR, následne na ich výstup a ten aktivuje externé prerušenie na pine INT2 mikrokontroléru. Obslužný program následne v prerušení vyčíta hodnotu portu A. Podľa toho, ktorý pin portu A je v logickej 1 je jasné, z ktorého ultrazvukového senzoru upozornenie na prekážku prišlo.

Pri súčasnom použití viacerých ultrazvukových senzorov môže dochádzať k interferencii medzi odrazenými signálmi z jednotlivých senzorov. Tento jav je nazývaný aj krížový odraz [33]. Najvhodnejším spôsobom riešenia tohoto problému by bola sériová obsluha jednotlivých senzorov. To by však spomalovalo beh obslužného programu mikrokontroléru Atmega64. Interferenciu je možné odstrániť alebo aspoň výrazne obmedziť vhodným umiestnením senzorov na robota [33]. Sensory umiestnené na vrtuľníku popisovanom v tejto práci sú vzájomne pootočené vždy minimálne o 90°. Presnosť merania ultrazvukových senzorov môže byť negatívne ovplyvnená aj prítomnosťou vibrácií pochádzajúcich od rotorov.

Možné chyby merania vplyvom vibrácií a vzájomnej interferencie signálov z jednotlivých senzorov som sa rozhodol obmedziť tým, že obslužný program mikrokontroléru nepoužíva k určaniu vzdialenosti prekážky iba poslednú nameranú hodnotu. Priemeruje hodnoty z viacerých posledných meraní.

5.3 Doska plošných spojov

Dosku plošných spojov som vzhľadom ku zložitosti zapojenia navrhol ako obojstrannú o rozmeroch 75x75 mm. Súčasťou návrhu je aj malá doska plošných spojov o rozmeroch 13x15 mm, na ktorej je umiestnený jeden z gyroskopov. Táto malá DPS je umiestnená kolmo k hlavnej doske, aby bolo možné merať náklon robota aj vo zvislej osi voľnosti. Doska plošných spojov spolu s osadzovacím plánom sú uvedené v prílohe G.

5.4 Záver kapitoly 5

Ako stojí vyššie v tejto kapitole, obvod pre riadenie letuje najdôležitejšou časťou quadkopteru. Táto kapitola však popisuje iba vývoj hardvéru. Po správnosti by v tejto kapitole, prípadne v nasledujúcej malo byť odvodenie, výpočet a simulácia matematického modelu kopteru pre správne naprogramovanie regulácie pomocou inerciálnych senzorov. Rozsah tejto diplomovej práce je však tak veľký, že pre vývoj regulátora motorov som do tohoto bodu ani nedostal.

Táto práca predstavuje moje prvé praktické zoznámenie sa s gyroskopmi. Ako som v priebehu vývoja a ladenia zistil, gyroskopy MuRata ENC-03R sú silne teplotne závislé. Túto závislosť by bolo vhodné kompenzovať. Rovnako ich rozlíšenie 0,67 mV/°/s je veľmi nízka hodnota. Operačným zosilňovačom sa mi podarilo túto hodnotu zvýšiť, nie však veľmi. Nevýhodou je zároveň že so zosilnením užitočného signálu dochádza súčasne aj k zosilňovaniu šumu. Preto som pridal na výstup gyroskopu RC filter ktorý situáciu o niečo

zlepšil. Keby som však navrhoval obvod pre riadenie letu znovu, použil by som iné gyroskopy. Zvolil by som typ so zabudovaným AD prevodníkom s vyšším rozlíšením ako je 10 bitov prevodníku v Atmega64. V prípade použitia napr. I²C komunikácie by výrazne zjednodušila návrh.

Gyroskopy by bolo vhodné doplniť aj o akcelerometre. S použitím gyroskopov totiž kopter dokáže udržať vodorovnú polohu, avšak ak je napríklad súčasne odnášaný vetrom, zariadenie o tom nemá informácie. Práve tento problém by akcelerometre odstránili.

Kladným príspevkom k obvodu pre riadenie letu je sústava ultrazvukových senzorov vzdialenosti. Predstavujú bezpečnostný prvok jednak pre operátora aj pre stroj samotný. Ultrazvukové senzory majú nevýhodu hlavne v tom, že detekujú v podstate iba prekážky kolmo k nim. Pri návrhu tohoto zariadenia som však počítal s tým, že ide o stroj diaľkovo ovládaný človekom a ultrazvukové senzory predstavujú iba určitú výpomoc.

6. Napájanie

Napájacia sústava quadkopteru pozostáva z dvoch hlavných častí, teda z akumulátora a napájacieho zdroja pre napájanie riadiacej elektroniky.

6.1 Akumulátor

U airborne robota je nevyhnutné jeho napájanie z akumulátorov. Tie však nemôžu byť príliš veľké, ani ťažké. Robot by mal na jedno nabitie fungovať aspoň niekoľko minút. Pri výbere vhodného akumulátora zohľadňujeme niekoľko najdôležitejších požiadaviek [33]:

- cena
- hmotnosť a rozmery
- kapacita
- maximálna prúdová zaťažiteľnosť
- rýchlosť samovybíjania
- počet nabíjajúcich cyklov

Pri výbere konkrétneho typu akumulátora som sa nechal inšpirovať leteckým modelárstvom. Hodnotu menovitého napätia som zvolil v závislosti od použitých motorov. Tie sú dimenzované na napájacie napätie 11,1 V [16]. Zvolil som trojčlánkový Li-pol akumulátor o menovitom napätí jedného článku 3,7 V [33]. Zaujímavosťou Li-pol akumulátorov je možnosť ich zapuzdrenia do nekovových obalov, čo je z hľadiska hmotnosti veľká výhoda [33].

Priamo z akumulátora sú napájané iba štyri trojfázové motory. Ostatné časti quadkopteru pracujú s nižším napájacím napätím o hodnote 5 V a sú napájané z malého napájacieho zdroja.

Predpokladaný maximálny prúdový odber použitých trojfázových motorov je podľa údajov výrobcu až 58 A (4 x 14,5 A) [16]. Maximálna prúdová zaťažiteľnosť akumulátora musí mať určitú rezervu voči tejto hodnote. Použitý akumulátor má prúdovú zaťažiteľnosť označenú ako 30C, čo znamená, že z akumulátora môžeme konštantne odoberať prúd o hodnote až 240 A [17]. Postup výpočtu je nasledujúci [17]:

$$I_{\max} = C \cdot \text{Discharge (A, Ah, c)} \quad (5)$$

Kapacitu akumulátora 8000 mAh som zvolil v závislosti od výsledkov merania ťahu a prúdového odberu motorov, ktoré je popisované nasledujúcej kapitole tejto práce. Táto voľba je mimoriadne dôležitá, pretože s narastajúcou kapacitou akumulátora narastá aj jeho hmotnosť. Tým narastá prúdový odber motorov a zhoršujú sa letové vlastnosti robota. Hodnota 8000 mAh je kompromisom medzi potrebnou kapacitou a nežiadúcou hmotnosťou. Všetky dôležité parametre akumulátora sú zhrnuté v nasledujúcej tabuľke.

Kapacita (mAh)	8000
Napätie (V)	11,1
Počet článkov	3
Max. vybíjací prúd (c)	30
Dĺžka (mm)	169
Výška (mm)	69
Šírka (mm)	27
Celková hmotnosť (g)	644

Tab. 6.1 Parametre akumulátora [17]



Obr. 6.1 Akumulátor [17]

6.2 Palubný napájací zdroj 5V

Akumulátor poskytuje napätie o menovitej hodnote 11,1V, ktorého hodnota kolíše v závislosti od vybíjania, a to v rozsahu 9V až 12,6V [17]. Pre mikroprocesor a ďalšie obvody na palube quadkopteru je nevyhnutná prítomnosť stabilizovaného napájacieho napätia o hodnote 5V, ktorú zaručí malý stabilizovaný jednosmerný napájací zdroj.

Úpravu napätia z hodnoty 11,1V na 5V je možné realizovať viacerými spôsobmi. Ponúkajú sa dve najvhodnejšie riešenia, a to použitie lineárneho stabilizátoru, alebo spínaného stabilizátoru. Z hľadiska účinnosti a teda aj nižšej spotreby a dlhšej letovej doby robota je vhodnejší spínaný stabilizátor.

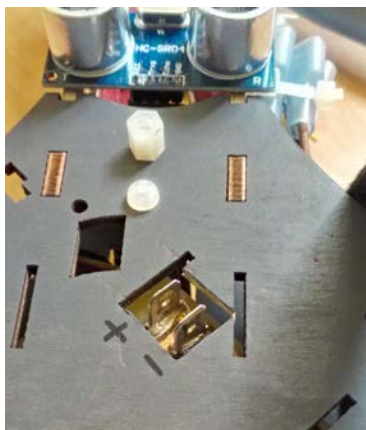
Rozhodol som sa pre step-down menič s integrovaným obvodom LM2575 v puzdre TO-263. Tento obvod potrebuje ku svojej funkcii iba minimum súčiastok. Je spínaný kmitočtom 52 kHz a z jeho výstupu s napätím 5V môžeme odoberať prúd do hodnoty 1A, čo je postačujúce [38].

Pri návrhu zapojenia palubného napájacieho zdroja som vychádzal z katalógového zapojenia obvodu LM2575 [38]. To je doplnené o konektory faston 6,3mm pre distribúciu napájania do ďalších modulov a o spínač S1 slúžiaci k zapnutiu/vypnutiu celého robota. Kompletná schéma zapojenia palubného napájacieho zdroja je uvedená v prílohe I.

Dosku plošných spojov som, vzhľadom k jednoduchosti zapojenia, navrhol ako jednostrannú s rozliatou med'ou. Jej rozmery sú 55x55 mm. Cestičku spájajúcu kladné napájacie póly batérie a regulátora motorov bolo nutné dimenzovať na maximálny odber až 58A. Z toho dôvodu má šírku 5 mm a je aj dodatočne pocínovaná.

Návrh dosky plošných spojov spolu s osadzovacím plánom sú uvedené v prílohe K.

Dvojica konektorov faston 6,3 mm je osadená zo spodnej strany, pretože tu je na robotovi umiestnený akumulátor. Ilustruje to nasledujúci obrázok. Medená plôška pod integrovaným obvodom LM2575 slúži ako chladič.



Obr. 6.2 Detail konektorov pre pripojenie akumulátora na spodnej strane robota

Na vyrobenom napájacom zdroji som realizoval meranie záťažovej charakteristiky, účinnosti a výstupného zvlnenia pri plnom zaťažení. Podrobný popis a výsledky týchto meraní obsahuje kapitola 7.4 Charakteristiky napájacieho zdroja 5V.

7. Merania

7.1 Meranie ťahu vrtulí

Pre návrh quadkopteru je nutné poznať prúdový odber použitých motorov a ťah vrtulí. Od týchto parametrov sa odvíja návrh tranzistorových mostíkov u regulátora motorov, voľba kapacity akumulátora a fyzické rozmery konštrukcie. Od toho závisia aj možné účely použitia robota [42].

Pre tento účel som zostrojil jednoduché zariadenie v podobe vyváženej páky s rotorom na jednej strane a digitálnou váhou na strane opačnej. Páka má pomery ramien 1:1. K meraniu prúdu som použil dvojicu ampérmetrov – jednosmerný a striedavý. Ako striedavý ampérmeter som použil digitálny multimeter Goldstar DM-441B od výrobcu LGPrecision. Ako jednosmerný ampérmeter poslúžil batériový digitálny typ METEX M-3270D s možnosťou merania jednosmerných prúdov až do 20 A. Výslednú true RMS hodnotu prúdu som vypočítal podľa nasledujúceho vzťahu [24]:

$$I_{RMS} = \sqrt{I_{ss}^2 + I_{str}^2} \text{ (A)} \quad (6)$$

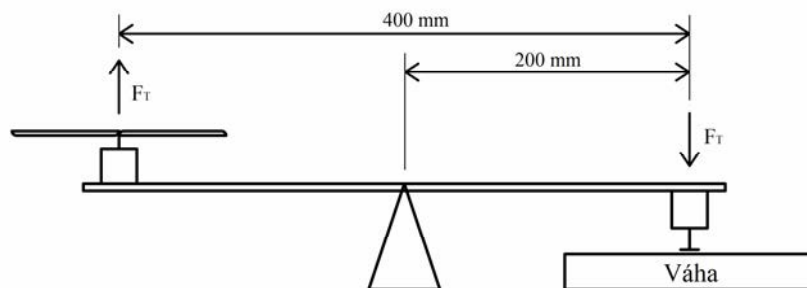
kde: I_{RMS} – efektívna hodnota prúdu (A)
 I_{ss} – hodnota jednosmerného prúdu (A)
 I_{str} – hodnota striedavého prúdu (A)

Princíp merania je jednoduchý. Postupne sú zvyšované otáčky rotora a odčítaná hmotnosť z digitálnej váhy, na ktorú tlačí opačná strana páky. Meranie som realizoval pre dva rôzne typy vrtulí GWS – dvojlistý a trojlistý typ popisované vyššie.

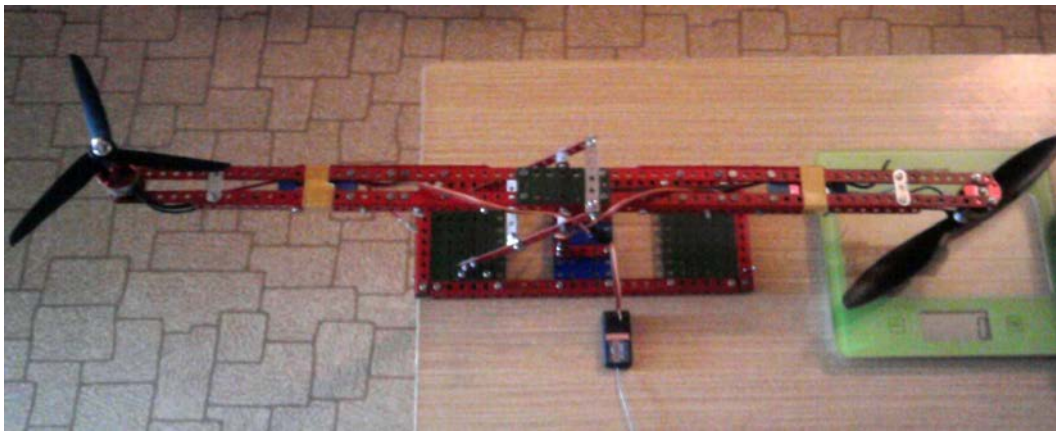
Sila ťahu vrtule je kolmá k zemskej rovine a je možné ju určiť podľa vzťahu:

$$F_T = m \cdot g \text{ (N)} \quad (7)$$

kde: F_T – ťahová sila vrtule (N)
 m – hmotnosť indikovaná váhou (g)
 g – tiažové zrýchlenie 9,81 (m.s⁻²)



Obr. 7.1 Nákres prípravku pre meranie ťahu vrtulí



Obr. 7.2 Prípravok pre meranie ťahu vrtulí

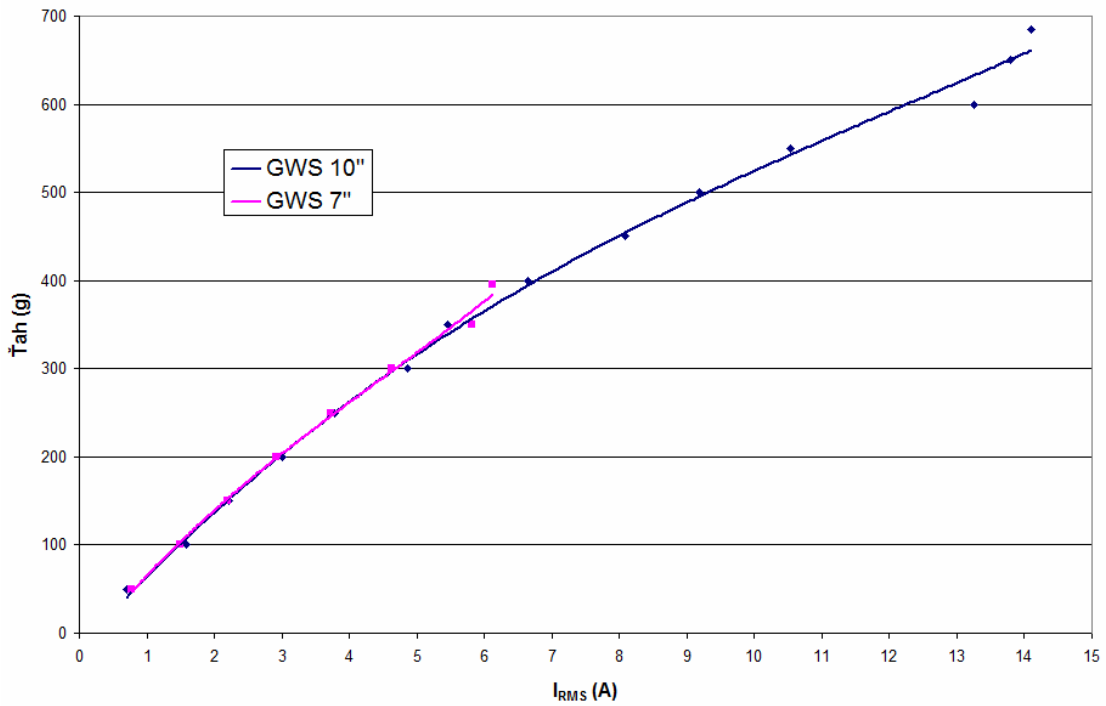
Pri meraní som k regulácií motorov použil zakúpený modelársky regulátor TowerPro w18A, pretože regulátor motorov popisovaný v tejto práci nebol v čase merania dokončený. Priebehy oboch vrtulí som meral dva krát a do výpočtov som použil priemer hodnôt získaných z týchto dvoch meraní. Namerané a vypočítané hodnoty sú zhrnuté v nasledujúcich tabuľkách a grafoch.

Ťah (g)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	685
Ft (N)	0,49	0,98	1,47	1,96	2,45	2,94	3,43	3,92	4,46	4,91	5,40	5,89	6,38	6,72
I~ (A)	0,37	0,86	0,96	1,33	1,58	1,83	1,98	2,09	1,97	1,79	1,69	1,36	1,43	1,57
I= (A)	0,59	1,33	1,99	2,71	3,44	4,52	5,09	6,30	7,84	9,01	10,40	13,18	13,73	14,02
Irms (A)	0,69	1,58	2,21	3,01	3,78	4,87	5,46	6,64	8,09	9,18	10,53	13,24	13,80	14,11

Tab. 7.1 Namerané a vypočítané hodnoty ťahu vrtule GWS 10“

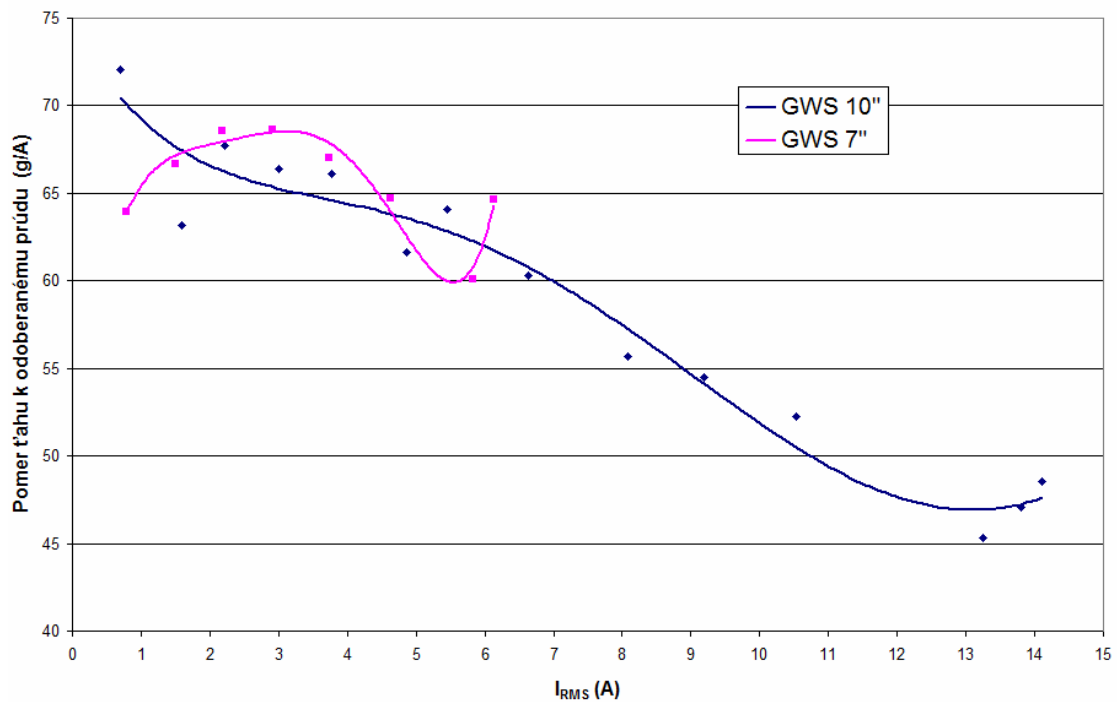
Ťah (g)	50	100	150	200	250	300	350	396
Ft (N)	0,49	0,98	1,47	1,96	2,45	2,94	3,43	3,89
I~ (A)	0,40	0,77	1,06	1,22	1,24	0,88	0,61	0,39
I= (A)	0,68	1,29	1,92	2,65	3,52	4,55	5,79	6,12
Irms (A)	0,78	1,50	2,19	2,92	3,73	4,63	5,82	6,13

Tab. 7.2 Namerané a vypočítané hodnoty ťahu vrtule GWS 7“



Obr. 7.3 Závislosť ťahu vrtulí na odoberanom prúde

Jednotlivé namerané priebehy som aproximoval polynómom 3. rádu. Trojlistá vrtuľa GWS 7" dosiahla maximálny ťah 396g. V meraní som teda ďalej nepokračoval a prúd (otáčky motora) som ďalej nezvyšoval. Dvojlistá vrtuľa GWS10" dosiahla maximálny ťah až 685g. Priebeh závislosti ťahu na odoberanom prúde je v prípade oboch vrtulí takmer totožný.



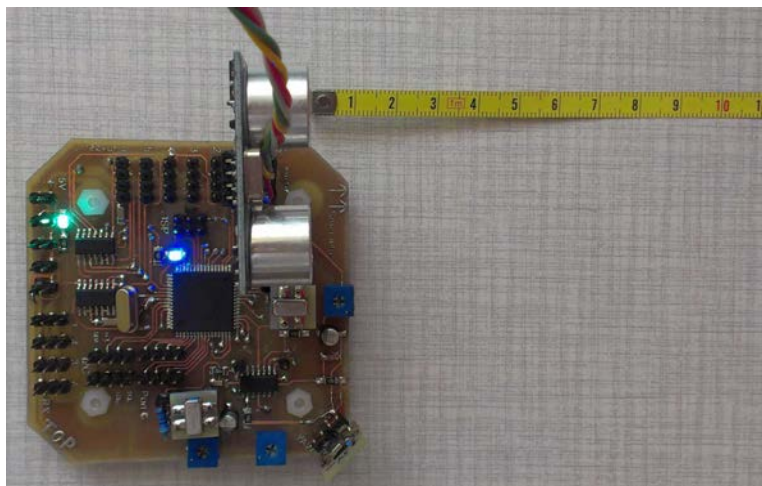
Obr. 7.4 Pomer ťahu k odoberanému prúdu v závislosti na prúde

Graf uvedený vyššie ilustruje, ako sa s narastajúcim odoberaným prúdom vyvíja účinnosť, resp. pomer ťahu na odoberanom prúde. Priebehy som aproximoval polynómom 5. rádu. Vrtuľa GWS 7“ má priebeh podobný reálnym leteckým vrtuliam s viditeľným maximom približne v strede charakteristiky [41]. U vrtule GWS 10“ je jasne vidieť, ako jej efektívnosť s narastajúcim odoberaným prúdom, a teda aj otáčkami, takmer lineárne klesá. To nieje práve ideálne. Vhodnejšia by bola vrtuľa s priebehom podobným typu GWS 7“.

7.2 Meranie dosahu a presnosti ultrazvukových senzorov

Ako udáva výrobca ultrazvukových senzorov HC-SR04, merací rozsah senzorov je 2 cm až 500 cm [11]. Ja som sa však rozhodol realizovať meranie na vyrobenom hardvéri navrhnutom v rámci tejto práce. Jednak z dôvodu overenia správnej funkcie obslužného programu mikrokontroléru, aj z dôvodu overenia zapojenia a presnosti samotného senzoru.

Obvod som položil na stôl dostatočne dlhý pre potreby merania. K stolu som pre možnosť merať vzdialenosť prekážky od senzoru pripevnil inštalatérsky meter. Obvod pre riadenie letu som spojil s počítačom a prostredníctvom USART rozhrania som sledoval namerané hodnoty vzdialenosti prekážky od senzoru. Výstupnú hodnotu senzoru som v PC zobrazoval so zaokrúhnením na celú hodnotu v cm. Detail obvodu so senzorom a prilepeným metrom je na nasledujúcom obrázku. Meranie som realizoval iba pre jeden senzor s predpokladom, že vzhľadom k tomu že senzory sú totožné, budú aj ich charakteristiky totožné.



Obr. 7.5 Meranie dosahu a presnosti ultrazvukových senzorov

Porovnaním hodnoty udanej obvodom pre riadenie letu a reálnej vzdialenosti prekážky nameranej metrom som zistil, že ultrazvukový senzor HC-RS04 meria v prípade prekážky kolmej k senzoru spoľahlivo v rozmedzí približne 10 cm až 300 cm. Po vzdialenosti 170 cm je meranie veľmi presné, v rozmedzí 170cm až uvedených 300 cm sa objavuje odchýlka. Tá však nepresahuje 10 cm. Na hranici okolo 300 cm sa na výstupe ultrazvukového senzoru začínajú objavovať náhodné nesprávne hodnoty a na senzor sa už nedá spoľahnúť.

V prípade že prekážka zvierá s rovinou kolmou k senzoru uhol okolo 30° , hodnoty merania sa zhoršia. Meranie je veľmi presné do vzdialenosti približne 120 cm a s odchýlkou 5 až 10 cm použiteľné do vzdialenosti okolo 190 cm. Pri vyššej vzdialenosti prekážky je meranie už nespoľahlivé. Pri zvýšení uhlu prekážky na rovinu kolmú so senzorom až na 45° sa parametre merania ešte zhoršujú. To vyplýva z použitia ultrazvuku k meraniu vzdialenosti. Zvuk sa totiž pri príliš veľkom uhle prekážky neodráža späť smerom k senzoru [33].

Podľa očakávania, ultrazvukový senzor nenapĺňa parametre uvedené v katalógovom liste výrobcu, avšak pre detekciu prekážok (stien, podlahy a stropu) v interiéri plne postačujú.

Vplyv na presnosť ultrazvukových senzorov má aj teplota vzduchu [33]. Tá totiž ovplyvňuje hustotu vzduchu a tým rýchlosť šírenia zvukových vln v danom prostredí. Predpokladá sa však s prevádzkou quadkoptera v interiéri, prípadne v exteriéri počas priaznivého počasia. Preto nepôjde o výrazné zmeny prevádzkovej teploty, ktoré by ovplyvňovali presnosť merania.

7.3 Meranie dosahu diaľkového ovládania

Dosah diaľkového ovládania je pre bezpečnú prevádzku airborne robota mimoriadne dôležitým parametrom. Pri strate signálu z diaľkového ovládania sa zariadenie začne chovať nepredvídateľne a nasleduje jeho zrušenie. Preto je veľmi dôležité mať jasnú predstavu o dosahu použitej modelárskej sústavy diaľkového ovládania pozostávajúcej z vysielача HobbyKing HK-T4A V2 (Mode 1) a prijímača HobbyKing HK-TR6A pracujúcej na kmitočte 2,4 GHz [15].

Meranie som realizoval na ulici v zástavbe s množstvom stromov. Je možné predpokladať, že na voľnom priestranstve môže byť dosah o niečo väčší. Dosah diaľkového ovládania totiž ovplyvňujú prekážky ako budovy a stromy nachádzajúce sa medzi vysielачom a prijímačom a taktiež prítomnosť wifi sietí v budovách a ich tesnom okolí.

K určeniu vzdialenosti vysielача a prijímača som použil GPS lokalizáciu. Na mape som zaznačil polohu prijímača a potom polohu vysielача v okamihu, keď začal prijímač prijímať s výpadkami. Priama vzdialenosť medzi týmito dvoma miestami je **180m**.

Je to rozhodne nižší dosah ako u drahších profesionálnych zostáv modelárskeho diaľkového ovládania. Je to však hodnota plne postačujúca, pretože z tejto vzdialenosti už operátor nedokáže spoľahlivo ovládať stroj nakoľko ho už nevidí dostatočne detailne. rovnako nemožno predpokladať že stroj bude lietať v tak veľkých výškach.

7.4 Charakteristiky napájacieho zdroja 5V

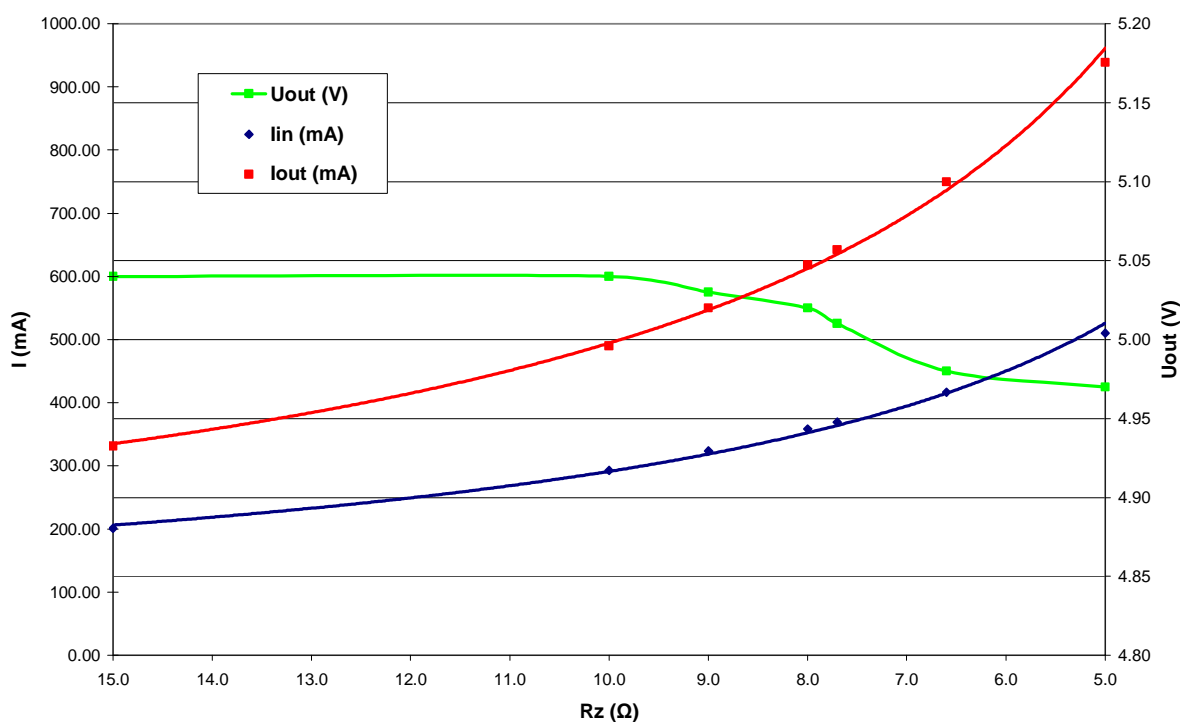
7.4.1 Zát'azová charakteristika

Zát'azová charakteristika je najdôležitejším parametrom napájacieho zdroja. Zát'azovú charakteristiku spínaného napájacieho zdroja navrhnutého v rámci tejto práce som meral s použitím niekoľkých výkonových rezistorov s rôznymi hodnotami odporu. Tie som postupne pripájal na výstup zdroja.

K napájaniu zdroja som použil akumulátor popisovaný v kapitole 6.1 Akumulátor. Napätie na vstupe aj výstupe zdroja som meral batériovým digitálnym multimetrom Protek 506. K meraniu vstupného prúdu z akumulátora som použil batériový digitálny multimeter UNI-T UT33A a k meraniu výstupného prúdu zdroja rovnako batériový digitálny multimeter, typ Agilent U1252A.

Rz (Ω)	Iout (mA)	Uout (V)	Pout (W)	Iin (mA)	Uin (V)	Pin (W)	Účinnosť (%)
15,0	331,5	5,04	1,67	201,0	11,16	2,24	74,48
10,0	490,2	5,04	2,47	292,5	11,16	3,26	75,69
9,0	549,9	5,03	2,77	323,9	11,16	3,61	76,52
8,0	618,1	5,02	3,10	358,3	11,16	4,00	77,60
7,7	642,1	5,01	3,22	369,1	11,16	4,12	78,10
6,6	749,6	4,98	3,73	416,4	11,16	4,65	80,33
5,0	938,5	4,97	4,66	510,3	11,16	5,69	81,90

Tab. 7.3 Meranie záťažovej charakteristiky spínaného napájacieho zdroja 5V



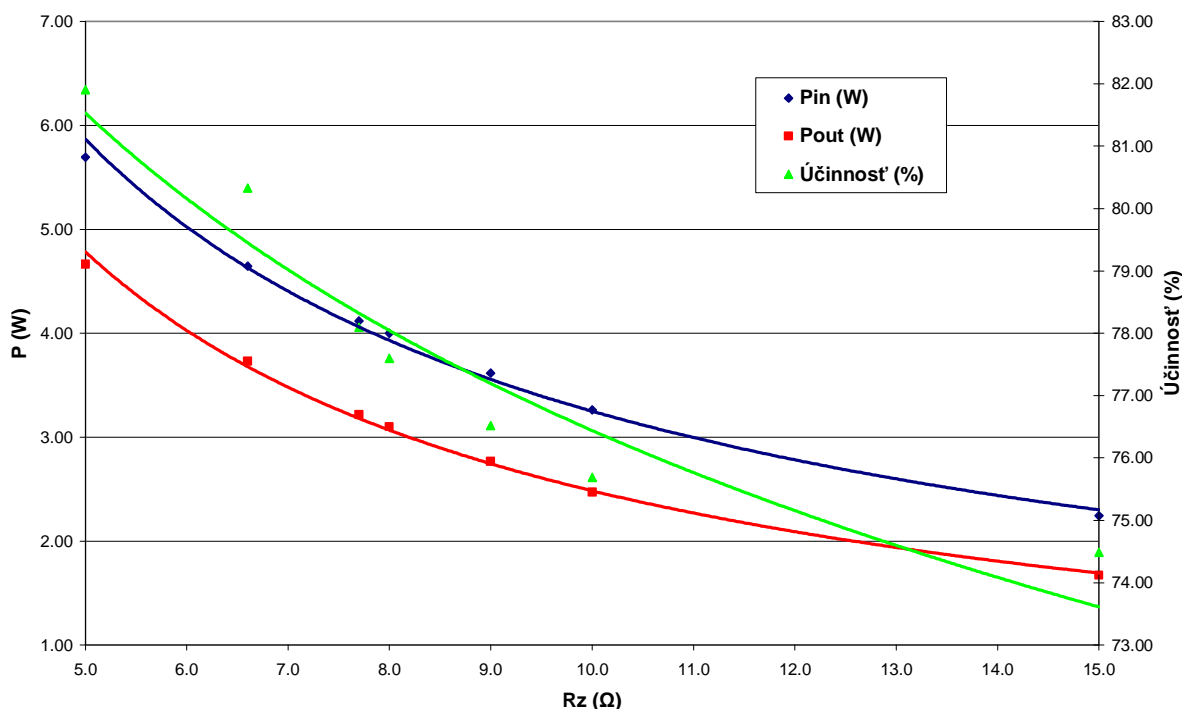
Obr. 7.6 Záťažová charakteristika spínaného napájacieho zdroja 5V

Z hodnôt uvedených v grafe vyššie je možné vypočítať účinnosť podľa vzťahu [38]:

$$\text{Účinnosť} = (P_{\text{OUT}} / P_{\text{IN}}) \cdot 100 \quad (\%) \quad (8)$$

kde: P_{OUT} - výkon na výstupe napájacieho zdroja (W)
 P_{IN} - výkon na vstupe napájacieho zdroja (W)

Výkon na vstupe a výstupe zdroja spolu s účinnosťou sú zobrazené na nasledujúcom grafe.



Obr. 7.7 Účinnosť spínaného napájacieho zdroja 5V

Z nameraných hodnôt je vidieť, že zdroj funguje správne. Pri takmer plnom výstupnom prúde nastal pokles napätia z hodnoty 5.04 V naprázdno na 4.97 V, čo je iba 70 mV. Účinnosť je rovnako dobrá. Je závislá na záťaži a pohybuje sa v zozmedzí 74,5 % až 81,9 % pri meraní som približne kontroloval aj teplotu integrovaného obvodu LM2575. Ten sa vďaka vysokej účinnosti zahrieval iba minimálne aj pri plnej záťaži pripojenej niekoľko minút.

7.4.2 Zvlnenie výstupného napätia

Zvlnenie výstupného napätia zdroja býva najvyššie pri plnej záťaži výstupu [7]. Pre spínaný napájací zdroj s výstupom +5V navrhnutý v rámci tejto práce to predstavuje pripojenie záťaže o hodnote 5 Ω. Na nasledujúcom obrázku je hodnota zvlnenia výstupného napätia pri pripojení tejto záťaže na výstup. Hodnota výstupného prúdu ktorú som meral multimetrom Agilent U1252A bola v čase merania výstupného zvlnenia 938,5 mA.



Obr. 7.8 Zvlnenie výstupného napätia zdroja pri plnej záťaži

Nameral som hodnotu zvlnenia $21,6 \text{ mV}$ Pk-Pk. Pri výstupnom napätí $4,97\text{V}$ je to $0,435\%$, čo je výborná hodnota. Súhlasí aj s meraním uvedeným v katalógovom liste výrobcu [38].

8. Ekonomické zhodnotenie

Pri návrhu štvorrotorového vrtuľníku v tejto práci som bral do úvahy aj finančnú stránku projektu. Stroj som vyvíjal v prvom rade pre vlastné potreby a tak som musel aj veškeré finančné náklady spojené s nákupom potrebného náradia a pomôcok, jednotlivých komponentov vrtuľníku, elektronických súčiastok a chemických prípravkov pre domácu výrobu a osadenie plošných spojov. To sa v zásadnej miere premietlo do výberu komponentov ako sú nosná konštrukcia, diaľkové ovládanie, motory a vrtule, tranzistory použité v regulátoroch motorov a v prvom rade do voľby gyroskopov

Táto kapitola predstavuje porovnanie nákladov na hardvér robota zostrojeného v rámci tejto práce s inými komerčne dostupnými zostavami. V týchto nákladoch sú zahrnuté iba súčiastky a komponenty ktoré som použil vo finálnej verzii výrobku, nezachytáva náklady spojené s vývojom (čas, energie, poškodené a nepoužité súčiastky a komponenty).

Popis	Typové označenie	Počet ks	Cena/kus	Cena
Nosná konštrukcia	Quadcopter frame V1	1	300 Kč	300 Kč
Diaľkové ovládanie	HobbyKing 2.4Ghz, 4Ch	1	1.200 Kč	1.200 Kč
Motory	FC 28-22, 1200kv	4	140 Kč	560 Kč
Vrtule	GWS 10"	4	50 Kč	200 Kč
Akumulátor	ZIPPY Flightmax 8 Ah	1	860 Kč	860 Kč
Ultrazvukové senzory	HC-SR04	6	100 Kč	500 Kč
Ochranný kryt		1	0 Kč	0 Kč
Regulátor motorov		4	800 Kč	3.200 Kč
Obvod pre riadenie letu		1	1.000 Kč	1.000 Kč
Spínaný zdroj 5V		1	120 Kč	120 Kč
Nabíjačka LiPo	Turnigy Accucel-6	1	460 Kč	460 Kč
Celková cena				8.400 Kč

Tab. 8.1 Cenový prehľad materiálu na zostavenie quadkopteru navrhnutého v tejto práci

Pre porovnanie, quadcopter od nemeckého výrobcu MikroKopter vychádza 1000 Eur, či je približne 27.000 Kč [31]. Ide o zostavu, ktorá neobsahuje akumulátor, diaľkové ovládanie a nabíjačku pre akumulátor [31]. Ide o najlacnejšiu zostavu od uvedeného výrobcu.

Existujú však aj výrazne ekonomickejšie riešenia. Jedným z prvých úspešných projektov je AR.Drone od francúzskeho výrobcu Parrot. Aktuálne je v predaji verzia 2.0 [36]. Tá vychádza 331 Eur, teda približne 8.940 Kč. Ide o typ ovládaný zariadeniami iPhone/iPad. Nevýhodou je teda potreba vlastniť jedno z týchto zariadení. Na druhej strane možnosť ovládať kopter naklonením telefónu a prenos obrazu z kamery robota do iPhone/iPadu je zaujímavá.

Existuje aj množstvo neznačkových riešení. Niekoľko z nich je dostupných na internetovej stránke Hobbyking.com [18]. Ich ceny sa pohybujú v rozmedzí od 20 USD (približne 400 Kč) až po 2.296 USD (približne 46.000 Kč) [18] v závislosti od úplnosti zostavy a fyzických rozmerov quadkopteru.

9. Záver

V predloženej diplomovej práci sa mi v podarilo zhrnúť základné informácie o airborne robotoch nazývaných koptery, a to od histórie, cez prehľad a charakteristiku typov, až po objasnenie princípu ich letu.

Ďalej som predstavil všetky konštrukčné časti, ktoré sa som rozhodol použiť pri realizácii robota. Niektoré z popisovaných častí som zakúpil už hotové (nosnú konštrukciu, vysielateľ aj prijímač diaľkového ovládania, motory, vrtule a akumulátor). U niektorých komponentov by vlastná výroba ani nebola možná. Pôvodne zakúpený akumulátor s kapacitou 2700 mAh som musel, ako sa ukázalo pri meraní ťahu a prúdového odberu motorov, nahradiť typom s väčšou kapacitou.

Iné konštrukčné časti som navrhol sám, konkrétne regulátory motorov, obvod pre riadenie letu a spínaný palubný napájací zdroj pre zabezpečenie prítomnosti napájacieho napätia o hodnote 5V.

Regulátory motorov predstavujú najviac prínosnú časť tejto práce. Existuje mnoho projektov zaoberajúcich sa vývojom quadkoptera, väčšinou ale počítajú so zakúpenými modelárskymi regulátormi určenými do RC lietadiel. Táto práca však vývoj regulátora detailne popisuje. Regulátory sú funkčné, hoci komparátor pre správnu detekciu prechodu nulou plávajúcej fázy by potreboval upraviť, prípadne doladiť. Ideálne by bolo použitie motorov s Hallovými senzormi. Vďaka ich použitiu by nebolo potrebné používať uvedený komparátor. Táto problematika je bližšie rozobraná v Závere kapitoly 4.

Pri návrhu obvodu pre riadenie letu som sa poučil, že finančná úspora pri nákupe gyroskopov bola nevýhodná. Použitie gyroskopy MuRata RNC-03R sú totiž silne teplotne závislé a majú nízku napäťovú úroveň výstupného signálu. Ten som zosilnil operačným zosilňovačom. Ak by som však tento obvod navrhoval znova, siahol by som po gyroskopoch niekoľko krát drahších, ale ušetril by som množstvo času na vývoj a získal by som spoľahlivejší produkt. Doplnil by som aj akcelerometre ktoré som pôvodne vynechal z dôvodu úspory. Táto problematika je bližšie rozpísaná v Závere pre kapitolu 5.

Projekt som stihol do tohoto okamihu priviesť do štádia kedy je navrhnutý hardvér a fungujú jednotlivé dôležité časti obslužného softvéru: integrácia signálu z gyroskopov a následný výpočet náklonu vo všetkých troch osiach, komunikácia s diaľkovým ovládaním, detekcia prekážok a meranie vzdialenosti k nim pomocou ultrazvukových senzorov, I²C komunikácia v režime Master pre obvod pre riadenie letu a v režime Slave pre regulátory motorov. Funguje, hoci nie stopercentne aj komutácia motorov. Jednotlivé tieto časti však niesú spojené a stroj zatiaľ nelietá.

Pri praktickom meraní ťahu vrtulí uvedenom v kapitole č.7 som overil, že pri použití vrtule GWS o priemere 10“ má každý motor maximálny ťah až 685g. Z toho vyplýva, že štvorica rotorov dosiahne ťah až 2700g. Po odvážení robota vyplýva, že stroj unesie minimálne 1000g, čo umožní pripevnenie kamery, alebo rôznych meracích zariadení.

Predložená práca predstavuje základ na ktorom sa dá ďalej stavať, z možností ďalšieho vývoja by som rád uviedol: logovanie preletenej trasy pomocou GPS, obsluhu ramena s kamerou, meranie dosiahnutej výšky pomocou senzoru tlaku vzduchu, po doplnení vhodného vysielateľa aj odosielanie letových údajov operátorovi. Nehovoriac o možnostiach autonómneho letu. Ak by existovala táto možnosť, mohol by v budúcnosti niektorý zo študentov FEKT VUT v Brne na moju diplomovú prácu nadviazať a vo vývoji quadkoptera pokračovať.

Literatúra

- [1] APOSTOLO, G. *The illustrated encyclopedia of helicopters*. Bonanza Books, 1984
- [2] Atmel. *Katalógový list ATmega64* [online]. Dostupné z WWW: http://www.atmel.com/Images/Atmel-2490-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega64-L_datasheet.pdf.
- [3] Atmel. *Katalógový list Atmega8* [online]. Dostupné z WWW: <http://www.atmel.com/images/doc2514.pdf>.
- [4] Atmel. *Using the TWI module as I²C master* [online]. Dostupné z WWW: <http://www.atmel.com/Images/doc2564.pdf>.
- [5] Atmel. *Using the TWI module as I²C slave* [online]. Dostupné z WWW: <http://www.atmel.com/Images/doc2565.pdf>.
- [6] BLAHA, P., VAVŘÍN, P. *Řízení a regulace 1*. Brno: VUT Brno: 2005. 214 s.
- [7] BRANČÍK, L; DOSTÁL, T. *Analogové elektronické obvody*. Brno: FEKT VUT, 2007
- [8] BROWN, W. *Brushless DC motor control made easy*. Microchip Technology Inc., 2002
- [9] BRZOBOHATÝ, J; MUSIL, V; BAJER, J; BOUŠEK, J. *Elektronické součástky*. Brno: FEKT VUT, 2002
- [10] Chiptron. *Převodník USB-UART s FT232RL (Converter USB to UART)* [online]. 2013. Dostupné z WWW: http://www.chiptron.petus.cz/articles.php?article_id=13.
- [11] Elecfreaks. *Katalógový list HC-SR04* [online]. Dostupné z WWW: <http://elecfreaks.com/store/download/HC-SR04.pdf>.
- [12] FEDRA, Z. *Výsledné projekty předmětu MMIA* [online]. 2013. Dostupné z WWW: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/MIA>.
- [13] FRÝZA, T; FEDRA, Z; POVALAČ, A; PROKOPEC, J. *Mikroprocesorová technika a embedded systémy. Přednášky* [online]. 2011. Dostupné z WWW: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~fryza/>
- [14] FTDI Chip. *Katalógový list FT232RL* [online]. Dostupné z WWW: http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf.
- [15] HobbyKing. *2.4Ghz 4Ch Tx & Rx V2 (Mode 1)* [online]. 2011. Dostupné z WWW: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=8337.
- [16] Hobbyking. *FC 28-22 Brushless Outrunner 1200kv* [online]. 2011. Dostupné z WWW: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewitem.asp?idproduct=5354.
- [17] Hobbyking. *Lithium Polymer (LiPo) Basics* [online]. Dostupné z WWW: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/lipo_basics.asp.

- [18] Hobbyking. *Multi-rotors & parts-> RTF/PNF/ARF* [online]. Dostupné z WWW: http://hobbyking.com/hobbyking/store/_592_501_Multi_Rotors_Parts-RTF_PNF_ARF.html.
- [19] HobbyKing. *Quadcopter Frame V1* [online]. 2011. Dostupné z WWW: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_16583_HobbyKing_Quadcopter_Frame_V1.html.
- [20] Hobbyking. *ZIPPY Flightmax 8000mAh 3S 30C* [online]. 2011. Dostupné z WWW: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewItem.asp?idProduct=16225.
- [21] HW server. *Program terminal pro komunikaci přes RS-232* [online]. Dostupné z WWW: <http://rs232.hw.cz/#Terminal>.
- [22] International rectifier. *Katalógový list IRFR5305* [online]. Dostupné z WWW: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irfr5305.pdf>.
- [23] International rectifier. *Katalógový list IRLR2705* [online]. Dostupné z WWW: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irlr2705.pdf>.
- [24] JAKUBOVÁ, I; KOLKA, Z; KOVÁŘOVÁ, J; PETRŽELA, J. *Elektronické praktikum*. Brno: FEKT VUT, 2007
- [25] KOČÍ, P.; FOJTÍK, D. *Řízení vícevrtulové helikoptéry*. STROJÁRSTVO, MEDIA/ST s.r.o., 2010, s. 1-5.
- [26] LIANG, O. *Types of Multicopter* [online]. 2013. Dostupné z WWW: <http://blog.oscarliang.net/types-of-multicopter>.
- [27] Linear Technology. *Katalógový list LTC6102* [online]. Dostupné z WWW: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/6102fd.pdf>.
- [28] Linear Technology. *Ltspice IV User Manual* [online]. 2009, 206 s. Dostupné z WWW: <http://ecee.colorado.edu/~mathys/ecen1400/pdf/scad3.pdf>.
- [29] MANN, B. *C pro mikrokontroléry*. BEN - technická literatura, Praha, 2003
- [30] Microchip Technology Incorporated. *Sensorless BLDC motor control using a Majority Function* [online]. 2008. Dostupné z WWW: http://www.microchip.com/stellent/groups/SiteComm_sg/documents/DeviceDoc/en543044.pdf.
- [31] MikroKopter. *MK Basicset Quadro XL Starter* [online]. Dostupné z WWW: https://www.mikrocontroller.com/index.php?main_page=product_info&cPath=80&products_id=731.
- [32] MuRata. *Katalógový list ENC-03R* [online]. Dostupné z WWW: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/191258/MURATA/ENC-03R.html>.

- [33] NOVÁK, P. *Mobilní roboty - pohony, senzory, řízení*. BEN - technická literatura, Praha, 2005
- [34] NXP Semiconductors. *Katalógový list 74HC11* [online]. Dostupné z WWW: <http://www.farnell.com/datasheets/1245673.pdf>.
- [35] NXP Semiconductors. *Katalógový list KTY81* [online]. Dostupné z WWW: <http://www.farnell.com/datasheets/1503771.pdf>.
- [36] Parrot shop. *AR.Drone 2.0* [online]. Dostupné z WWW: https://www.parrotshopping.com/cz/p_parrot_listing.aspx?f=3377.
- [37] Texas Instruments. *Katalógový list 74LS00* [online]. Dostupné z WWW: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74s00.pdf>.
- [38] Texas Instruments. *Katalógový list LM2575* [online]. Dostupné z WWW: <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/lm1575.pdf>.
- [39] SKÁCEL, M. *Senzorický subsystém pro venkovní robot*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 50 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Luděk Žalud, Ph.D.
- [40] STMicroelectronics. *BLDC motor start routine for the ST72141 microcontroller*. Microcontroller Division Applications, 2000. 18s.
- [41] THEODORSEN, T. *Theory of Propellers*. McGraw-Hill, New York, 1948
- [42] ŽALUD, L. *Robotika*. (Přednášky) Brno: FEKT VUT, 2010

Zoznam príloh

- Príloha A:** Schéma zapojenia regulátora motorov
- Príloha B:** Zoznam súčiastok regulátora motorov
- Príloha C:** Doska plošných spojov regulátora motorov
- Príloha D:** Prototyp regulátora motorov
- Príloha E:** Schéma zapojenia obvodu pre riadenie letu
- Príloha F:** Zoznam súčiastok obvodu pre riadenie letu
- Príloha G:** Doska plošných spojov obvodu pre riadenie letu
- Príloha H:** Prototyp obvodu pre riadenie letu
- Príloha I:** Schéma zapojenia napájacieho zdroja 5V
- Príloha J:** Zoznam súčiastok napájacieho zdroja 5V
- Príloha K:** Doska plošných spojov napájacieho zdroja 5V
- Príloha L:** Prototyp napájacieho zdroja 5V
- Príloha M:** Prototyp quadkopteru