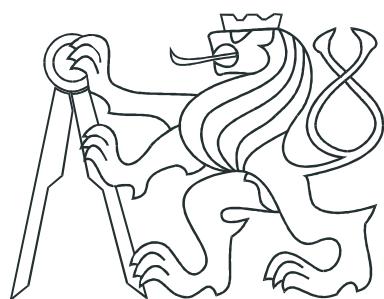


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ  
KATEDRA ŘÍDICÍ TECHNIKY



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Orientace v prostředí



Praha, 2005

Jan Wohlgemuth

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze literaturu uvedenou v přiloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb. , o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

---

podpis

## **Poděkování**

Děkuji především vedoucímu diplomové práce Doc.Ing. Jiřímu Bayerovi za vedení diplomové práce a za cenné rady při její realizaci. Dále děkuji Ing. Pavlu Růžičkovi za konzultace týkající se návrhu řídicí elektroniky. A v neposlední řadě děkuji i svým rodičům a příbuzným za podporu a trpělivost během tvorby této diplomové práce.

# **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá řízením modelu vzducholodě a její orientací v prostoru. Model je vybaven soustavou motorů a modelářských serv pro řízení modelu a řadou senzorů, pomocí nichž je vyhodnocována poloha a přítomnost překážek. Nejdůležitějšími senzory jsou ultrazvukový dálkoměr pro určení vzdálenosti k překážce a elektronický kompas pro určení natočení modelu. Model pomocí řídicího mikrokontroléru PIC komunikuje bezdrátově s řídicím osobním počítačem za pomocí komunikačních modulů Bluetooth. Reprezentace naměřených dat, zpracování a jejich vizualizace se uskutečňuje v nadřízeném PC. Osobní počítač data vyhodnotí a pošle řídicí příkazy podřízenému mikrokontroléru. Model za pomocí řídicího PC postupně prozkoumává prostor a nová data přispějí ke zkvalitnění výsledné mapy prostředí. Projekt byl realizován jako demonstrace bezdrátové komunikace v řízení.

# **Abstract**

This master thesis presents control of an airship model, its orientation and localization in the space. Model is equipped with several motors and servo-mechanismus for the model movement control. There are sensors for a location determination and a barrier detection. The most important sensors are ultrasonic range meters for measuring distance to the barrier and electronic compass for measuring model angular position. Through a microcontroler PIC model communicates with the superior personal computer using wireless communication modules Bluetooth. A representation of the measured data, data processing and visualisation is realized on superior personal computer. After a data processing the computer transmits control sequences to the slave microcontroler. The model by moving through the explored space measures distances to barriers. New data contribute on an improvement of the space map. Project is a demonstration of wireless communication in automation.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Model</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Popis modulů</b>	<b>5</b>
3.1	Řídicí modul . . . . .	6
3.1.1	Popis použitých obvodů . . . . .	6
3.1.1.1	Mikrokontrolér PIC16F873 . . . . .	6
3.1.1.2	Převodníky úrovně 5V-3.3V . . . . .	9
3.1.1.3	Dekodér adresy 74HCT138 . . . . .	9
3.1.1.4	Multiplexer 74HC4052 . . . . .	10
3.1.2	Komunikační protokol . . . . .	11
3.2	Napájení modelu . . . . .	14
3.2.1	Napájecí modul . . . . .	14
3.2.1.1	Zdroj 5V . . . . .	14
3.2.1.2	Zdroj -5V . . . . .	15
3.2.1.3	Zdroj 3.3V . . . . .	15
3.2.1.4	Zdroj 16V . . . . .	16
3.2.1.5	Měření spotřeby a napětí jednotlivých článků . . . . .	16
3.2.1.6	Kontrola maximálního povoleného proudu . . . . .	17
3.2.2	Akumulátory . . . . .	18
3.2.3	Nabíječka . . . . .	18
3.3	Ultrazvukový dálkoměr . . . . .	20
3.3.1	Fyzikální rozbor problému . . . . .	20
3.3.2	Odrazivost jako vlastnost povrchu . . . . .	21
3.3.3	Způsob měření . . . . .	21
3.3.4	Maximální a minimální vzdálenost, rozlišení, přesnost . . . . .	27
3.4	Akcelerometr, inklinoměr . . . . .	28

3.5	Kompas . . . . .	30
3.5.1	Komunikační protokol . . . . .	30
3.5.2	Formát parametrů . . . . .	30
3.5.3	Příkazy a komunikační rámce . . . . .	32
3.6	BlueTooth . . . . .	37
3.6.1	Připojení Bluetooth modulu k PC . . . . .	37
3.7	Modul řízení serv . . . . .	38
3.7.1	Mikrokontrolér PIC16F819 . . . . .	39
3.7.2	Komunikační protokol . . . . .	40
<b>4</b>	<b>Popis programu</b>	<b>41</b>
4.1	Bluetooth-PIC . . . . .	45
4.2	Program řídicího počítače . . . . .	46
<b>5</b>	<b>Orientace v prostředí</b>	<b>47</b>
5.1	Zpracování signálu z ultrazvukových dálkoměrů . . . . .	47
5.1.1	Regulace výšky . . . . .	51
5.2	Plánování trasy . . . . .	52
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>53</b>
<b>Literatura</b>		<b>54</b>
<b>A</b>	<b>Obsah přiloženého CD</b>	<b>57</b>
<b>B</b>	<b>Obrazová příloha</b>	<b>58</b>
<b>C</b>	<b>Seznam součástek</b>	<b>64</b>

# Seznam obrázků

2.1	Model, umístění akčních členů a senzorů . . . . .	3
2.2	Model, umístění akčních členů a senzorů, detail . . . . .	4
3.1	Blokové schéma elektroniky . . . . .	5
3.2	Mikrokontrolér PIC16F873 . . . . .	7
3.3	Blokové schéma mikrokontroléru PIC16F873 . . . . .	8
3.4	Blokové schéma dekodéru 74HC138 . . . . .	9
3.5	Schéma zapojení zdroje 5V (část schématu z přílohy B.2) . . . . .	14
3.6	Schéma zapojení zdroje -5V (část schématu z přílohy B.2) . . . . .	15
3.7	Schéma zapojení zdroje 3.3V (část schématu z přílohy B.2) . . . . .	15
3.8	Schéma zapojení zdroje 16V (část schématu z přílohy B.2) . . . . .	16
3.9	Přístrojový zesilovač . . . . .	17
3.10	Schéma zapojení dohlížecího obvodu . . . . .	18
3.11	Schéma zapojení nabíječky Li-Ion článků . . . . .	19
3.12	modul ultrazvukového dálkoměru . . . . .	21
3.13	Zapojení CM555 jako AKO . . . . .	21
3.14	Frekvenční charakteristiky přijímače při buzení vysílače . . . . .	22
3.15	Frekvenční charakteristika zesilovače U1 . . . . .	23
3.16	Frekvenční charakteristika zesilovače U2 . . . . .	23
3.17	Frekvenční charakteristika obou stupňů . . . . .	24
3.18	Schéma zapojení modulu ultrazvukového dálkoměru . . . . .	25
3.19	Průběhy signálů dálkoměru . . . . .	26
3.20	Směrová charakteristika vysílače . . . . .	26
3.21	Schéma zapojení akcelerometru . . . . .	28
3.22	Diagram měření periody . . . . .	28
3.23	Měření náklonu . . . . .	29
3.24	Schéma připojení akcelerometrů a kompasu k řídícímu modulu . . . . .	29
3.25	Vysílání z hostitelského zařízení do V2Xe . . . . .	36

3.26	Vysílaní z V2Xe do hostitelského zařízení . . . . .	36
3.27	Modul PWM . . . . .	38
3.28	Mikrokontrolér PIC16F819 . . . . .	39
3.29	Blokové schéma mikrokontroléru PIC16F819 . . . . .	40
4.1	Stavový diagram řídícího programu . . . . .	42
4.2	Stavový diagram zpracování dat sériového kanálu . . . . .	44
5.1	Ultrazvukový dálkoměr, přímý odraz . . . . .	48
5.2	Ultrazvukový dálkoměr, odraz pod úhlem . . . . .	48
5.3	Ultrazvukový dálkoměr, více překážek . . . . .	49
5.4	Lokální mapa, vizualizace naměřených dat . . . . .	50
5.5	Lokální mapa, vizualizace naměřených dat . . . . .	50
5.6	Identifikace, přechodová charakteristika výška . . . . .	51
5.7	Regulace výšky . . . . .	51
B.1	Schéma zapojení řídícího modulu . . . . .	59
B.2	Schéma zapojení napájecího modulu . . . . .	60
B.3	Schéma zapojení vývojového kitu . . . . .	61
B.4	MAX 608, step-up/step-down modifikace . . . . .	62
B.5	Vizualizace naměřených dat z dálkoměrů . . . . .	63

# Seznam tabulek

3.1	Pravdovostní tabulka dekodéru 74HC138 . . . . .	10
C.1	Seznam součástek, Modul řízení motorů a serv PWM . . . . .	65
C.2	Seznam součástek, Ultrazvukový dálkoměr . . . . .	66
C.3	Seznam součástek, Řídicí modul . . . . .	67
C.4	Seznam součástek, Napájecí modul . . . . .	68
C.5	Seznam součástek, Napájecí modul(pokračování) . . . . .	69
C.6	Seznam součástek, Modul akcelerometru . . . . .	69
C.7	Seznam součástek, Modul připojení el. kompasu a akcelerometrů . . . . .	69

# Kapitola 1

## Úvod

Model vzducholodě, plněný technickou směsí helia, je nadnášen. Model je řízen pomocí akčních členů - motorů s vrtulemi. Pro zpětnou vazbu řízení jsou využívány senzory pro určování vzdálenosti a polohy. Cílem bylo nalézt způsob, jak určovat polohu modelu, nalézt vhodný postup a použitelné senzory při splnění podmínek minimální váhy a spotřeby. Nosnost modelu je limitována na 500g elektroniky s akumulátory. Při hledání senzorů přicházely v úvahu zařízení a senzory optické či akustické a moduly globální navigace(GPS). Zařízení GPS (Global Positioning System) je však pro malou rozlišitelnost měření nepoužitelné, přesnost určení polohy je 3-8m. GPS také není možné používat v budovách. Další metody měření vzdálenosti - optické, jsou založeny na měření doby mezi vysláním a přijetím odraženého paprsku. Vzhledem k vysoké rychlosti šíření světla, jsou kladený vysoké nároky na výkonnost elektronického zařízení. Hmotnost zařízení je značná (u laserových dálkoměrů několik set g). V porovnání s laserovými dálkoměry je hmotnost infračervených dálkoměrů nízká. Maximální měřitelná vzdálenost pomocí infračerveného dálkoměru je pouze 1-3m. Akustické metody měření vzdáleností dosahují lepších výsledků, zařízení je lehké, dosah je až 10m. Mají však řadu nevýhod, jako teplotní závislost rychlosti zvuku či nemožnost měření v členitém prostoru kvůli vícenásobným odrazům a citlivost na hluk či vibrace. Pro určování polohy v prostoru byly použity ultrazvukové dálkoměry, dva pro určování vzdálenosti v horizontální rovině, další dálkoměr pro měření výšky modelu a čtvrtý dálkoměr slouží pro detekci překážek pod modelem. Elektronický kompas slouží pro určení natočení modelu vůči Zemi a akcelerometry pro stanovení zrychlení. Jeden akcelerometr(inklinoměr) určuje naklonění modelu(naklonění špička-ocas), druhý akcelerometr slouží k určení zrychlení ve směru vpřed a v bok. Naměřené hodnoty senzorů slouží pro zpětnou vazbu řízení. Model komunikuje bezdátově pomocí modulu Bluetooth s osobním počítačem, který

naměřené hodnoty vyhodnotí a provede řízení modelu pomocí implementovaných řídicích příkazů.

Diplomová práce je rozdělena do šesti kapitol.

**První kapitola** nás seznamuje s obsahem diplomové práce, cílem a rozborem možností řešení. **Druhá kapitola** popisuje model, jeho parametry, umístění akčních členů a senzorů. **Třetí kapitola** popisuje řídicí elektroniku potřebnou pro řízení modelu, vyhodnocování polohy a detekci překážek. **Čtvrtá kapitola** nás seznamuje s programovou problematikou. Popisuje funkci programu mikrokontroléru a funkci řídicího programu v osobním počítači. **Pátá kapitola** řeší orientaci v prostoru, zpracování a vyhodnocení dat. Poslední **šestá kapitola** obsahuje zhodnocení výsledků diplomové práce.

# Kapitola 2

## Model

Heliem plněný model vzducholodi poháněný stejnosměrnými motory s vrtulemi je opatřen řadou senzorů k určování přítomnosti překážek a stanovení polohy modelu v prostoru.

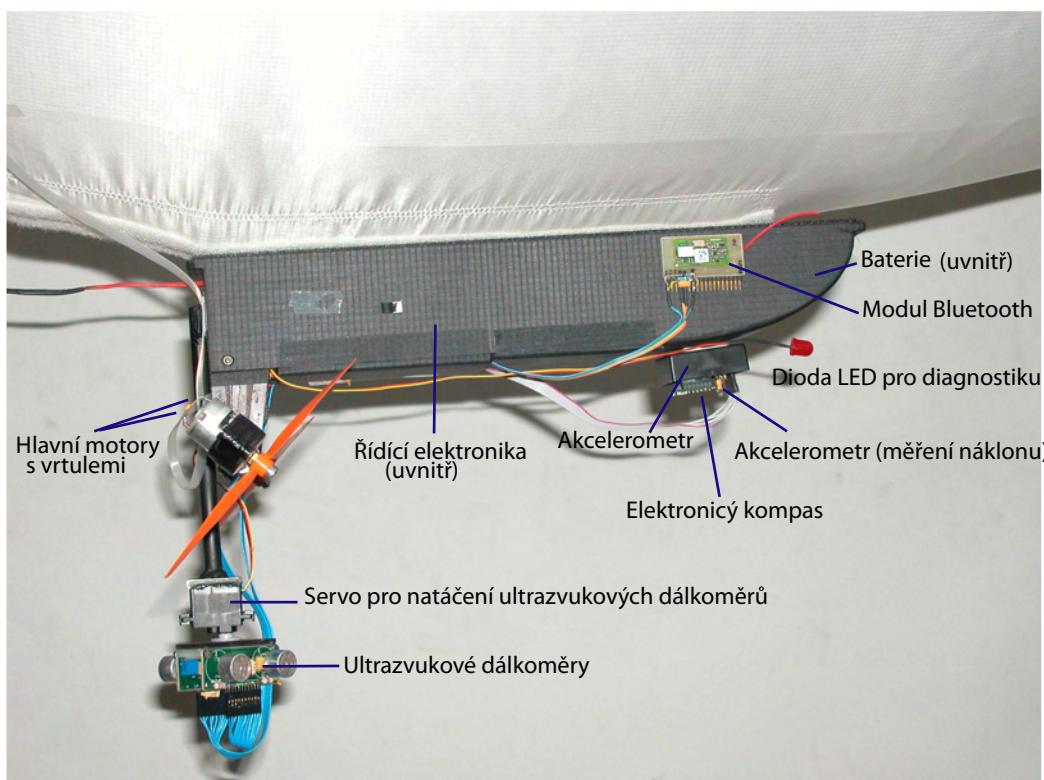


Obrázek 2.1: Model, umístění akčních členů a senzorů

Na spodní části modelu jsou umístěny 2 hlavní motory s vrtulemi. Pomocí modulu PWM je řízena rychlosť otáčení rychlostních motorov a tím i rychlosť pohybu modelu. Hlavní motory jsou umístěny na otočné hřídelce spojené se servem. Tím je

možno řídit směr natočení hlavních motorů a tím i směr pohybu modelu(dopředu, dozadu, nahoru a dolu). Horizontální otočení modelu je možno řídit motorem ve stabilizačním křídle na zadní části.

Plnící směs, pomocí níž je model nadlehčován, časem ubývá. Je nutné doplňovat takové množství plynu(plnící směsi), aby se model začal vznášet s plným zatížením, včetně vyvažovacího závaží. Závaží slouží k nastavení vzducholodě do polohy, ve které je gondola(box pod vzducholodí s elektronikou) ve vodorovné poloze.



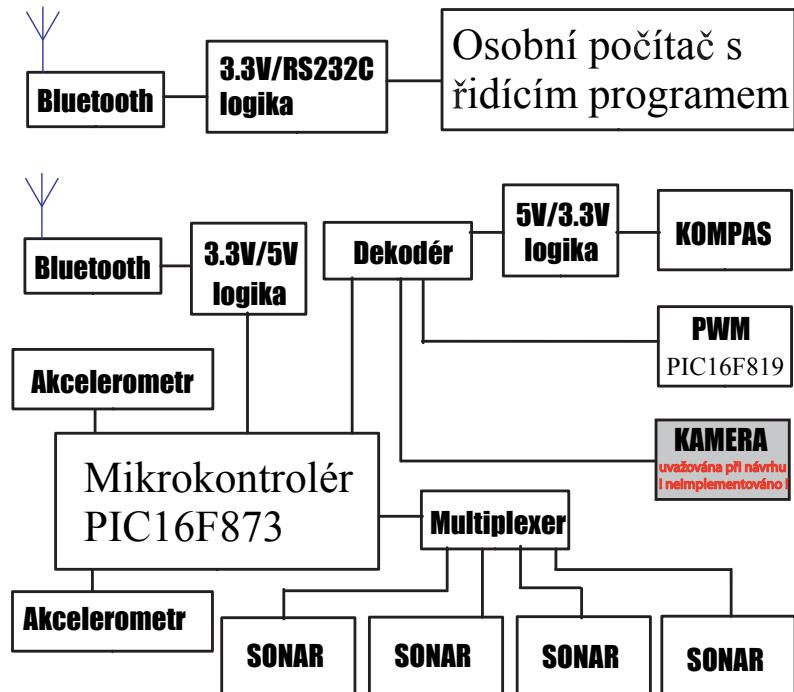
Obrázek 2.2: Model, umístění akčních členů a senzorů, detail

Všechny senzory umístěné pod gondolou vyžadují pro svou správnou činnost a přesné měření vodorovnou polohu. Pokud je gondola ve vodorovné poloze, měří senzory s minimální chybou. Kompas měří složku magnetického pole rovnoběžnou se Zemí, pokud není ve vodorovné poloze je třeba zjistit jeho úhel odklonu od vodorovné polohy akcelerometrem a kompasem naměřenou hodnotu korigovat přepočtem. Ultrazvukové dálkoměry je také nutné používat ve vodorovné poloze, aby nedocházelo ke zkreslování výsledků vlivem úhlu dopadajícího ultrazvukového signálu.

# Kapitola 3

## Popis modulů

Následující schéma (obr. 3.1) blokově popisuje zapojení zařízení. Hlavním prvkem je řídicí mikrokontrolér PIC. Mikrokontrolér přijímá data od komunikačního modulu Bluetooth, zpracovává přijatá data, řídí funkci senzorů (akcelerometr, sonar-ultrazvukový dálkoměr, kompas) a ovládá akční členy (serva, rychlostní motory) pomocí modulu PWM. Komunikační modul připojený k řídicímu modulu komunikuje s nadřízeným komunikačním modulem, který je spojen s osobním počítačem. Osobní počítač slouží k vyhodnocování přijatých dat, zpracování a plánování trasy.



Obrázek 3.1: Blokové schéma elektroniky

## 3.1 Řídicí modul

Řídicí modul (viz příloha obr. B.1) slouží pro řízení komunikace mezi modulem Bluetooth, umístěném v modelu a přídavnými periferiemi, jako jsou: modul řízení serv, kompas a kamera (uvažována při návrhu elektroniky, nepoužita) připojenými pomocí Motorola SPI kompatibilního rozhraní (viz obr. 3.25, 3.26 a lit. [11]). Dále modul zpracovává signál ze senzorů a řídí odměry pomocí senzorů. Modul je vybaven mikrokontrolérem PIC16F873 s hodinovou frekvencí 3.6864 MHz. Konektory J2, J4, J8, J10 slouží pro připojení ultrazvukových dálkoměrů. Ty jsou pomocí integrovaného obvodu U2(74HCT4052) multiplexovány a signál od vybraného dálkoměru je zpracován procesorem. Procesor je vybaven SPI rozhraním (sériový synchronní komunikační kanál). Pomocí integrovaného obvodu U1(74HC138) jsou adresována jednotlivá SPI zařízení připojená k rozhraní. Procesor je napájen napětím 5V, kamera (zatím nepoužita) a kompas jsou napájeny napětím 3.3V a proto je nutné napětové úrovně mezi mikrokontrolérem a periferiemi konvertovat pomocí převodníků úrovně (integrovaný obvod 74LVC1G125). Pro zjištování stavu baterií je cyklicky prováděno měření napětí a odebíraného proudu pomocí AD převodníků v procesoru. Bluetooth modul komunikuje pomocí sériového kanálu a k procesoru je připojen rovněž pomocí převodníků úrovní. Napájecí napětí Bluetooth modulu je spínáno P-MOSFET tranzistorem, tím je zaručena jeho programová inicializace a je umožněn jeho reset.

### 3.1.1 Popis použitých obvodů

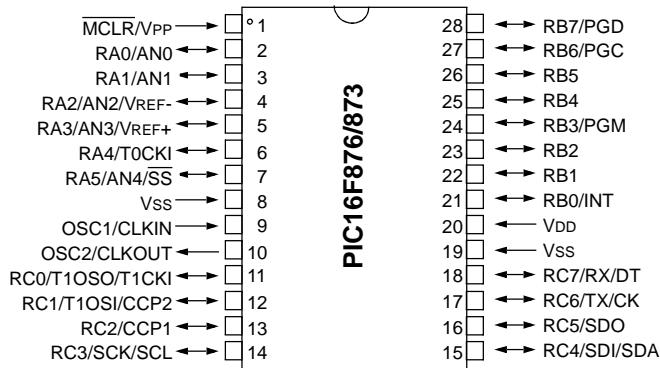
V následujících podkapitolách jsou popsány integrované obvody použité v řídicím modulu.

#### 3.1.1.1 Mikrokontrolér PIC16F873

Mikrokontrolér je jeden z hlavních prvků řídící elektroniky modelu. Při výběru procesoru byl kladen důraz na splnění podmínek: sériový kanál pro připojení modulu Bluetooth, komunikační kanál SPI pro připojení dalších periferií (kompas, kamera), nízká spotřeba, minimální velikost, hmotnost a dostupnost vývojového prostředí. Tyto podmínky splnil mikrokontrolér PIC16F873 (3.2 od firmy Microchip).

Architektura obvodu je RISC (Reduced Instruction Set Computer), je založena na předpokladu, že četnost použití složitých instrukcí je tak malá, že se nevyplatí pro ně plýtvat plochou na čipu a v případě potřeby jsou nahrazeny posloupností jednoduchých instrukcí. Instrukční sada obsahuje 35 jednoduchých instrukcí. Doba

vykonání instrukce, s vyjímkou komunikace s pamětí, trvá 1 strojový cyklus. Vnitřní struktura mikrokontroléru je zobrazena na obr. 3.3. Mikrokontrolér má celkem 22 vstupně-výstupních vývodů rozdělených do tří portů A až C. Zápisem do konfiguračních registrů těchto portů se určí, který vývod bude vstup a který výstup. Vývody portu A je možno nakonfigurovat jako vstup A/D převodníku, nebo jako

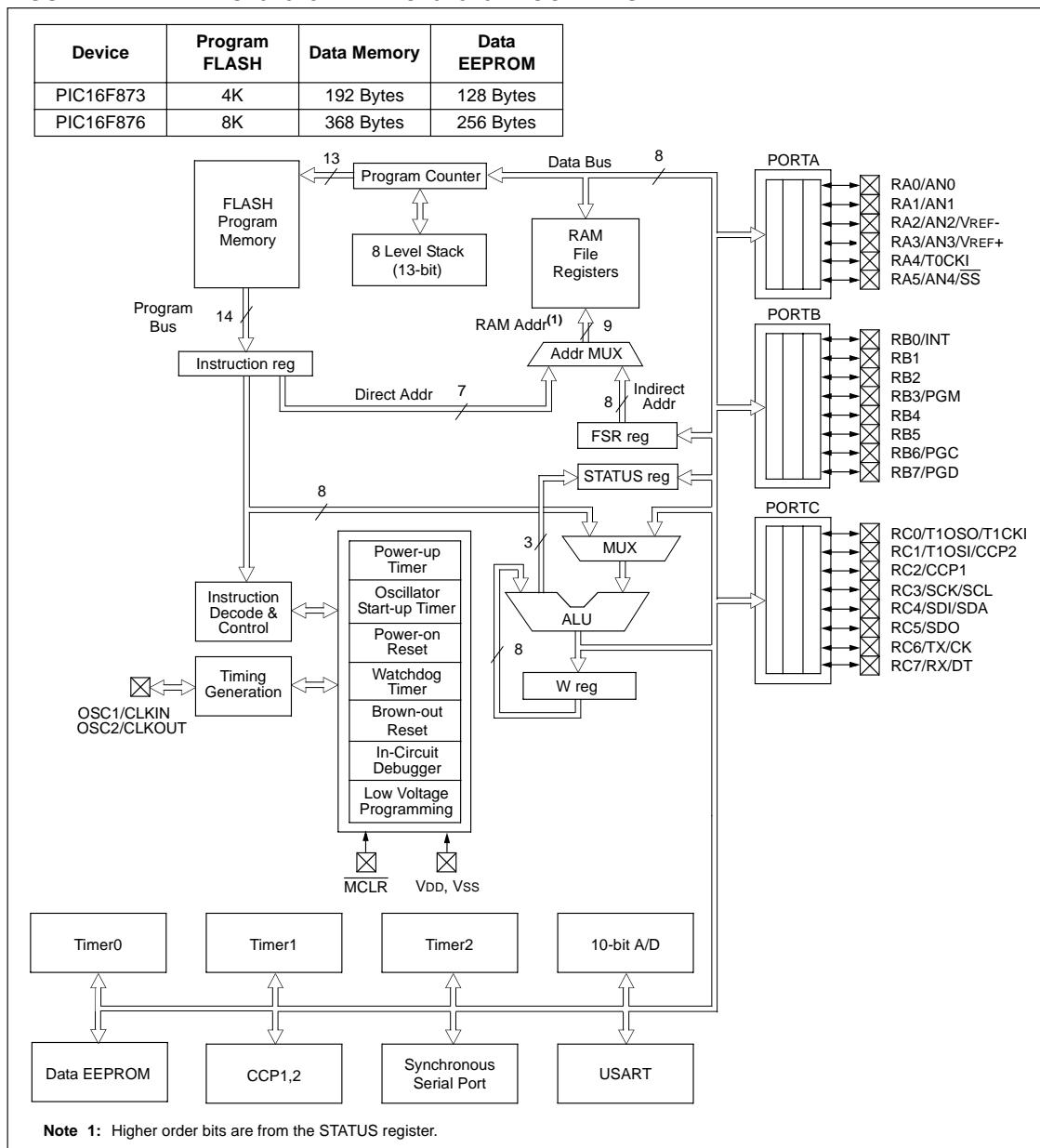


Obrázek 3.2: Mikrokontrolér PIC16F873

digitální vstupy či výstupy. Vývody portů B a C je možné nakonfigurovat jen jako digitální vstupy či výstupy. U portu B je možno konfigurací určit, zda budou k vývodům připojeny vnitřní odpory připojené na napájecí napětí.

Mikrokontrolér má na svém čipu paměť rozdělenou na paměť programu a na paměť dat. Paměť programu je typu FLASH s velikostí 4096 bytů. Paměť dat je rozdělena na rychlou paměť RAM o velikosti 192 bytů a na paměť EEPROM o velikosti 128 bytů.

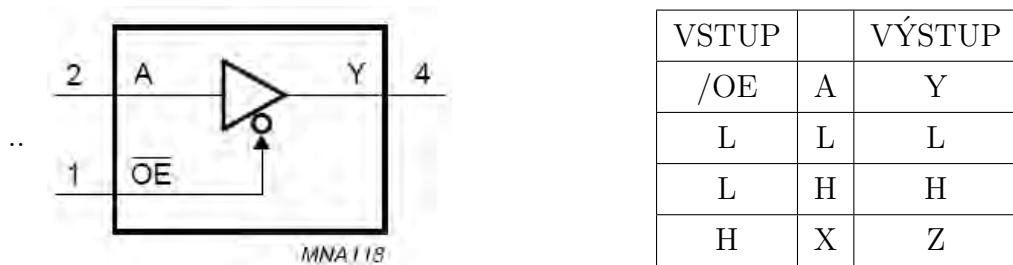
Mikrokontrolér má dva komunikační kanály. První je univerzální synchronní-asynchronní vysílač-přijímač (USART - Universal Synchronous-Asynchronous Receiver Transmitter), druhý je synchronní sériový port, který lze nakonfigurovat jako komunikační rozhraní pro sběrnici SPI nebo IIC (viz [11]). Rozhraní USART lze nastavit pomocí konfiguračních registrů jako plně duplexní asynchronní systém, jehož prostřednictvím mikrokontrolér může komunikovat se zařízeními jako je osobní počítač. Rozhraní synchronního sériového portu konfigurované jako SPI nebo IIC může být nastaveno jako zařízení nadřízené či podřízené. Sběrnice SPI je použita pro komunikaci s moduly pro řízení serv a kompasu. Obvod obsahuje 3 čítače-časovače, TIMER0, TIMER1 a TIMER2. Čítač-časovač TIMER0 a TIMER2 je 8 bitový, TIMER1 je 16ti bitový.



Obrázek 3.3: Blokové schéma mikrokontroléru PIC16F873

### 3.1.1.2 Převodníky úrovně 5V-3.3V

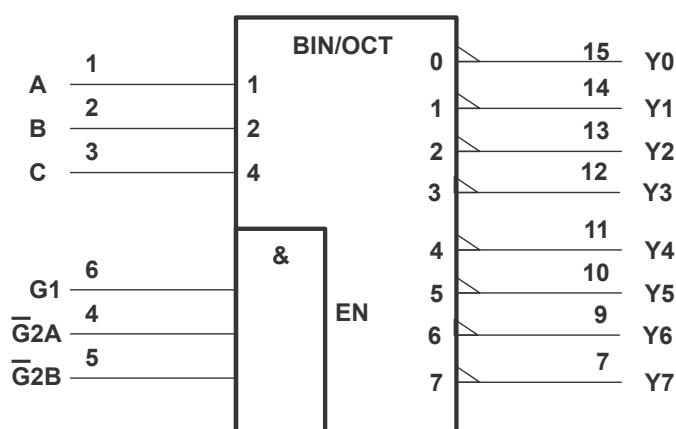
Elektronický kompas, Bluetooth a akcelerometry jsou napájeny napětím 3.3V, je třeba provést konverzi napětových úrovní, neboť procesor je napájen napětím 5V. Ke konverzi napětových úrovní slouží integrovaný obvod 74LVC1G125. Obvod má široký rozsah napájecích napětí (1.65-5.5V) a vstup obvodu dovoluje připojit napětí až 5V. Třístanový výstup může být řízen vstupem /OE (Output Enabled). Vysoká úroveň na vstupu /OE způsobí přepnutí obvodu do stavu vysoké impedance a tím odpojení výstupu.



Blokové schéma, pravdivostní tabulka obvodu 74LVC1G125

### 3.1.1.3 Dekodér adresy 74HCT138

Podle vstupní adresy na vstupech A,B,C je aktivován jeden z výstupů Y do log. úrovně 0(L), ostatní výstupy jsou v log. úrovni 1(H). Toto platí za podmínky aktivování obvodu správnou kombinací signálů G. Pokud obvod není aktivován, jsou všechny výstupy v log. úrovni 1(H).



Obrázek 3.4: Blokové schéma dekodéru 74HC138

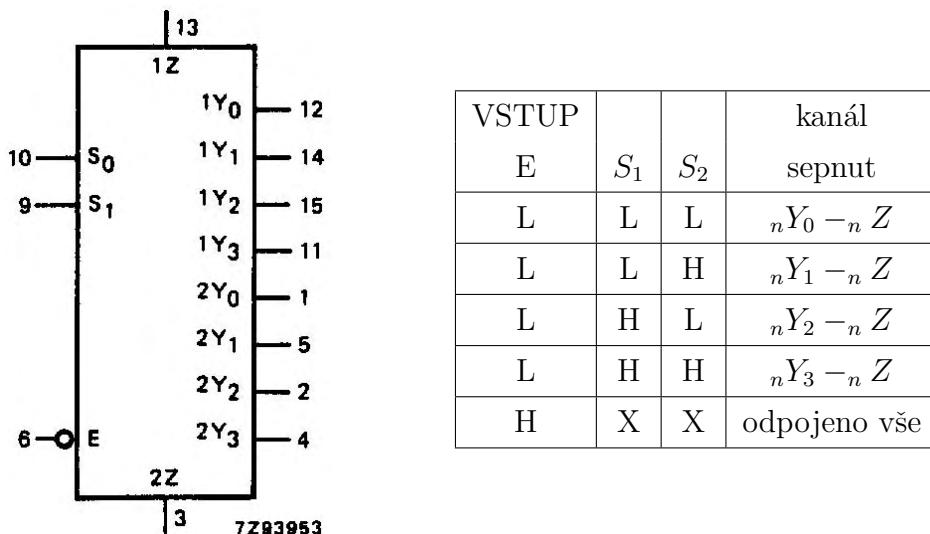
Následující pravdivostní tabulka popisuje funkci obvodu.

$G_1$	$G_{2A}$	$G_{2B}$	C	B	A	$Y_0$	$Y_1$	$Y_2$	.	$Y_7$
X	H	X	X	X	X	H	H	H	.	H
X	X	H	X	X	X	H	H	H	.	H
L	X	X	X	X	X	H	H	H	.	H
H	L	L	L	L	L	L	H	H	.	H
H	L	L	L	L	H	H	L	H	.	H
H	L	L	L	H	L	H	H	L	.	H
H	L	L	L	.	.	.	.	.	.	H
H	L	L	H	H	H	H	H	H	.	L

Tabulka 3.1: Pravdivostní tabulka dekodéru 74HC138

### 3.1.1.4 Multiplexer 74HC4052

Obvod slouží pro výběr jednoho ze čtyř ultrazvukových dálkoměrů. Obvod se chová jako analogový spínač, který podle vstupní adresy na vstupech  $S_0, S_1$  sepne vývod  $nZ$  (1Z,2Z) s vývodom  $nY_N$  vybraným adresou. Podmínkou je aktivování vstupu E (aktivován log. 0).



### 3.1.2 Komunikační protokol

Zařízení pracuje v režimu master-slave, kde řídicí PC posílá pomocí Bluetooth příkazy, které mikrokontrolér provádí a posílá zpět jako odpověď rámce s daty.

**Standartní příkazový rámec** má tvar:



kde XX udává adresu zařízení 1 až 7, LL počet bytů následujících dat bloku data.

Odpověď od mikrokontroléru je rámec formátu:

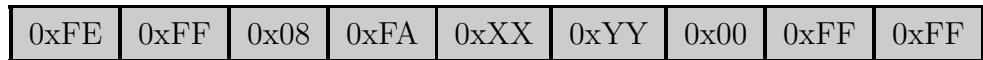


0xFE,0xFF jsou synchronizační znaky začátku rámce, XX udává adresu zařízení (adresa je o 7 vyšší než u vysílacího rámce, tedy 8 až 0x0E) ,byty 0xFF,0xFF rámec ukončují.

**PWM: (0x01)** Tento rámec slouží pro řízení modulu serv a motorů PWM. XX udává číslo serva, parametr YY jeho natočení v rozsahu 0-255.



Odpověď na tento příkaz je rámec:



kde XX udává číslo serva, parametr YY jeho natočení v rozsahu 0-255.

**KOMPAS: (0x03)** Tento rámec slouží pro čtení naměřených dat a kalibraci kompasu. Komunikační protokol elektronického kompasu je popsán v samostatné kapitole.



LL udává délku následujícího bloku data.

Odpověď je rámec s daty:



**ADC: (0x04)** Tento rámec je použit pro řízení odměrů AD převodníky, pro zjišťování stavu energie.

0x04	0x01	0xXX
------	------	------

Následující tabulka udává popis parametru XX:

0xXX	převodník
0x00	zastavení měření
0x01	AN0 - proud
0x02	AN1 - napětí akumulátoru1
0x04	AN3 - napětí akumulátoru2(přičíst 0.6V)

Odpovědí je rámec s daty:

0xFE	0xFF	0x0B	0xd1	0xd2	0xFF	0xFF
------	------	------	------	------	------	------

kde d1, d2 jsou 2 byty dat 10-ti bitového AD převodníku. Byte d1 je vyšší, d2 nižší.

**SONAR: (0x05)** Tento rámec slouží pro spuštění odměru ultrazvukovým dálkoměrem.

0x05	0x01	0xXX
------	------	------

Následující tabulka udává popis parametru XX

0xXX	sonar	mód	parametr odpovědi
0x00		zastavení měření	0x0A
0x01	1	cyklický odměr	0x0B
0x02	2	cyklický odměr	0x0C
0x03	3	cyklický odměr	0x0D
0x04	4	cyklický odměr	0x0E
0x05	1	jeden odměr	0x0F
0x06	2	jeden odměr	0x10
0x07	3	jeden odměr	0x11
0x08	4	jeden odměr	0x12

Odpovědí je rámec s daty:

0xFE	0xFF	0x0C	0xXX	0xd1	0xd2	..dn	0xFF	0xFF
------	------	------	------	------	------	------	------	------

XX udává adresu a mód ultrazvukového dálkoměru, d1,d2..dn jsou naměřená data, v pořadí nižší byte, vyšší byte.

**AKCELEROMETRY: (0x06)** Tento rámec spouští odměr zrychlení vybraného akcelerometru.

0x06	0x01	0xXX
------	------	------

XX udává číslo akcelerometru, který má spustit měření, 1 pro rychlostní akcelerometr, 2 pro náklonoměr. Odpovědí je rámec s daty:

0xFE	0xFF	0x0D	0xXX	0xd1	0xd2	..	0xd7	0xd8	0xFF	0xFF
------	------	------	------	------	------	----	------	------	------	------

kde XX udává akcelerometr 1, nebo 2, následující tabulka popisuje význam jednotlivých bytů. Význam T1,T2 Xout, Yout popisuje obr. 3.22

data	popis
d1	Xout H T1
d2	Xout L T1
d3	Yout H T1
d4	Yout L T1
d5	Xout H T2-T1
d6	Xout L T2-T1
d7	Yout H T2-T1
d8	Yout L T2-T1

**SERVISNÍ OBSLUHA: (0x07)** Tento rámec slouží pro ovládání komunikace. Po

0x07	0x01	0x00
------	------	------

přijetí tohoto rámce dojde k rozvázání spojení, komunikační modul se inicializuje a je ve stavu čekání na spojení od MASTERA. Tento příkaz nemá žádnou odpověď.

Na straně PC při rozvázání spojení mezi moduly, modul připojený k PC vyšle do počítače paket Disconnect (viz komunikace Bluetooth).

## 3.2 Napájení modelu

Napájecí zdroj (viz příloha obr. B.2) je tvořen měničem DC/DC firmy Maxim([15]). Zdroj vytváří napěťové úrovně 5V, 3.3V, -5V, 16V ze dvou baterií LiPol. Napětí 5V slouží pro napájení procesoru PIC, polohových serv a sonarů. Procesor má sice rozsah napájecího napětí 2-5.5V, takže by bylo možné procesor napájet napětím 3.3V, ale použitý programátor ICD neumožnuje programování a ladění pro napětí jiné než 5V. Napětí 3.3V slouží pro napájení modulu Bluetooth, kompasu a akcelerometrů. Napětí -5V slouží pro napájení operačních zesilovačů v modulech ultrazvukových dálkoměrů. Napětí 16V slouží pro buzení ultrazvukových senzorů.

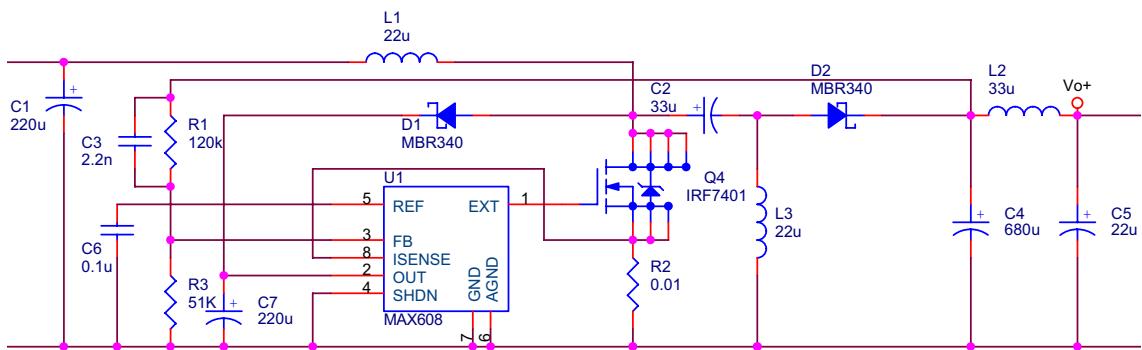
### 3.2.1 Napájecí modul

#### 3.2.1.1 Zdroj 5V

MAX608 je nízkonapěťový zvyšující měnič(step-up), s rozsahem napájecího napětí 1.8V-16.5V. Zdroj (obr. 3.5) byl původně navrhnut pro práci s NiMH akumulátory, u kterých se napětí baterie akumulátorů pohybovalo v rozmezí 4-6V, bylo tedy nutné použít měnič, který by byl schopen jak napětí snižovat, tak i zvyšovat. Katalogové zapojení ( viz lit. [17] ) bylo rozšířeno pro práci obvodu v módu step-down (viz. obrazová příloha B.5, a lit. [16]). Výstupní napětí je nastaveno pomocí děliče  $R_1, R_3$ .

$$R_1 = R_3 \left( \frac{V_{OUT}}{V_{ref}} - 1 \right), \quad (3.1)$$

kde  $V_{ref} = 1.5V$ . Pro snížení zvlnění výstupního napětí byl použit filtr  $L_2, C_5$ .



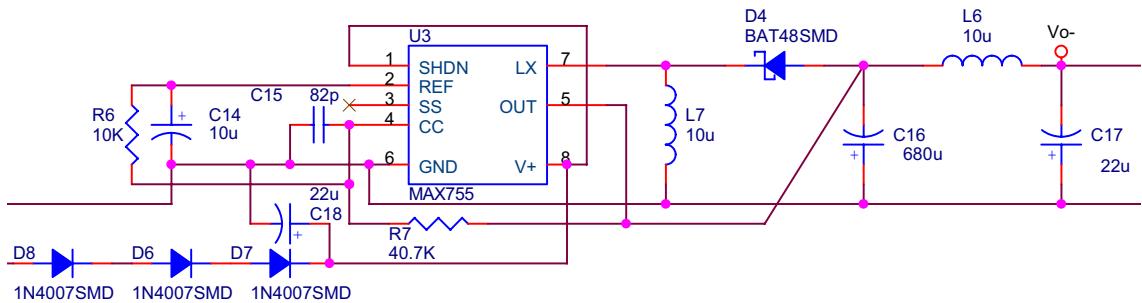
Obrázek 3.5: Schéma zapojení zdroje 5V (část schématu z přílohy B.2)

### 3.2.1.2 Zdroj -5V

MAX755 je CMOS invertující měnič s vnitřním tranzistorem MOSFET (viz lit. [18]). Obvod pracuje v rozsahu napájecího napětí 2.7-9V, s omezením

$$V_{in} \leq 11.7 - abs(V_{out}). \quad (3.2)$$

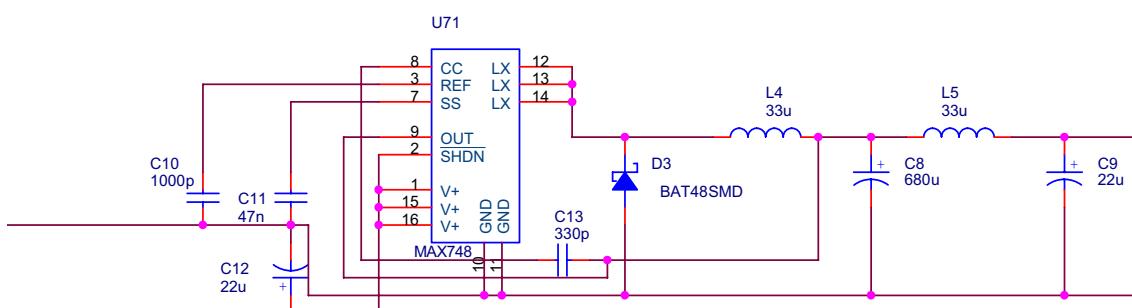
Tedy  $V_{in} \leq 6.7V$ ,  $V_{in}$  však dosahuje maximálních hodnot 8.4V, bylo tedy nutno vstupní napětí snížit nejméně o 1.7V pomocí sériového zapojení diod D6,D7,D8, které napětí sníží o  $3 \times 0.6V$ . Pro snížení zvlnění výstupního napětí byl použit filtr  $L_6, C_{17}$ .



Obrázek 3.6: Schéma zapojení zdroje -5V (část schématu z přílohy B.2)

### 3.2.1.3 Zdroj 3.3V

MAX748A je CMOS snižující měnič, s rozsahem vstupních napětí 3.3V-16V a maximálním výstupním proudem 500mA (viz lit. [19]). Výstupní napětí je filtrováno pomocí  $L_5, C_9$ .



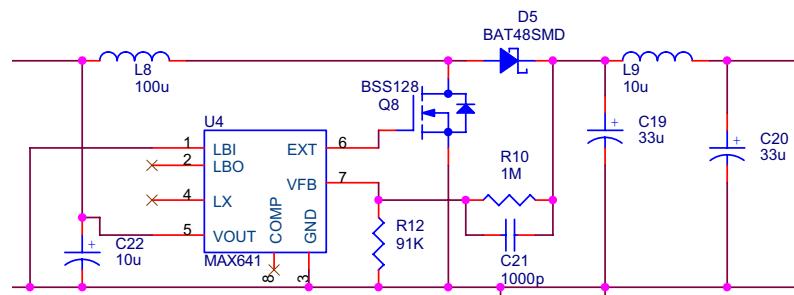
Obrázek 3.7: Schéma zapojení zdroje 3.3V (část schématu z přílohy B.2)

### 3.2.1.4 Zdroj 16V

MAX641 je zvyšující měnič bez vnitřního spínacího tranzistoru(viz lit. [20]). Výstupní napětí je nastaveno děličem  $R_{10}, R_{12}$ ,

$$R_{10} = R_{12} \left( \frac{V_{out}}{1.31} - 1 \right). \quad (3.3)$$

Výstupní napětí je filtrováno pomocí  $L_9, C_{20}$ .



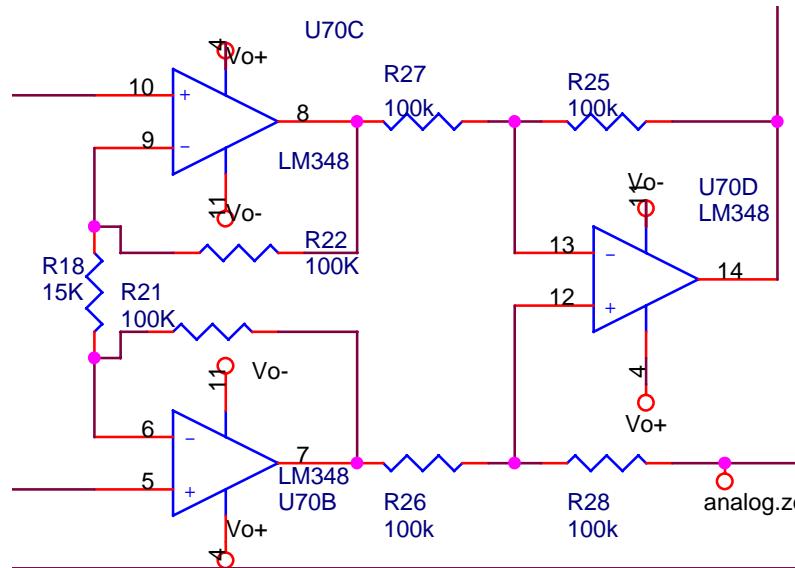
Obrázek 3.8: Schéma zapojení zdroje 16V (část schématu z přílohy B.2)

### 3.2.1.5 Měření spotřeby a napětí jednotlivých článků

Pro zjištění přibližné doby, po kterou bude model ještě schopen fungovat, než dojde k odpojení baterií ochranným obvodem, je prováděno cyklické měření napětí a proudu.

Pravidelným odměrem napětí jednotlivých baterií a protékajícího proudu je zjištován stav energie.

Napětí prvního akumulátoru je zjištováno přímo A/D převodníkem za ochranou diodou D1 na procesorové desce. Dioda D1 slouží jako spínač, při odpojení akumulátorů ochranným obvodem by se bez použití diody D1 objevilo záporné napětí na vstupu procesoru. Úbytek napětí na diodě je nutno programově kompenzovat. Napětí druhého akumulátoru je získáno pomocí diferenčního zesilovače U70A, se zesílením 1. Odebíraný proud protéká snímacím rezistorem  $R_{13}$ , úbytek napětí je zesílen přístrojovým zesilovačem tvořeným operačními zesilovači U70B, U70C, U70D, a měřen A/D převodníkem.



Obrázek 3.9: Přístrojový zesilovač

Zesílení přístrojového zesilovače je dáno vztahem:

$$U_{vystup} = U_{R13} \cdot \frac{R_{25}}{R_{27}} \cdot \left(1 + \frac{2R_{22}}{R_{18}}\right) \quad (3.4)$$

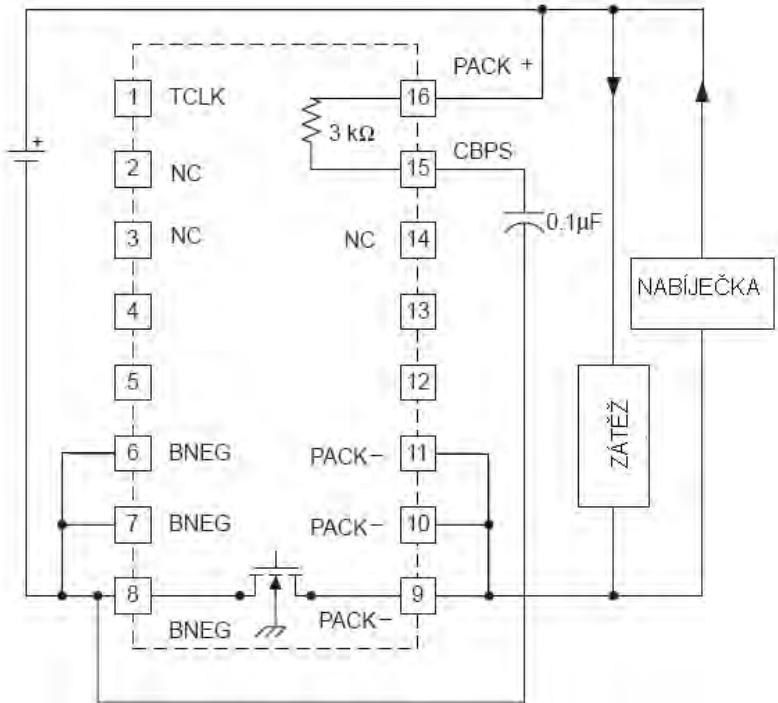
za předpokladu:

$$R_{25} = R_{28}, R_{27} = R_{26}, R_{21} = R_{22}.$$

Zesílení přístrojového zesilovače je 14.33. Procházející proud 1A způsobí na snímacím odporu  $0.1\Omega$  úbytek napětí 0.1V a zesilovač toto napětí zesílí na 1.433V.

### 3.2.1.6 Kontrola maximálního povoleného proudu

Obvod UCC3952-DP slouží jako ochranný obvod pro Li-Ion a Li-Pol baterie. Zajišťuje ochranu akumulátoru před přílišným nabíjením a přílišným vybitím. Zajišťuje ochranu před nadproudem a zkratem. Při proudu vyšším než 3A obvod odpojí vnitřní MOS-FET tranzistorem akumulátor od zátěže. Obvod měří úbytek na vnitřním snímacím rezistoru, a proto není možné nastavit maximální hodnotu výstupního proudu.



Obrázek 3.10: Schéma zapojení dohlížecího obvodu

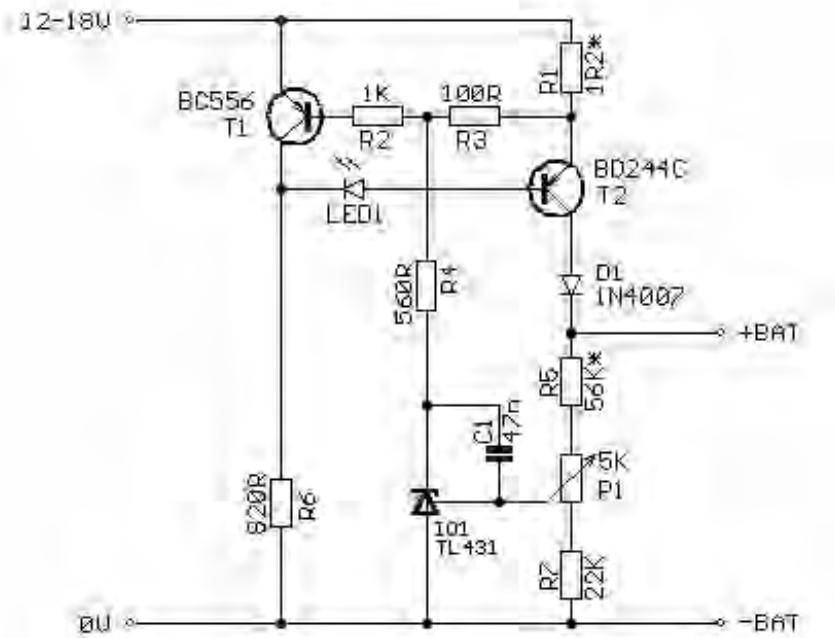
### 3.2.2 Akumulátory

Pro napájení modelu jsou použity 2 akumulátory Li-Pol SLPB396495H s kapacitou 2000mAh. Akumulátor má nízkou hmotnost (43g) a malé rozměry 64 x 95 x 6,4mm. Akumulátory mohou dodávat proud 6-10x vyšší než jmenovitý proud 2000mA. Akumulátor je opatřen modulem ochranného obvodu, který hlídá baterii. Obvod zajišťuje ochranu před přebitím, podvybitím, prevenci před nadproudem. Ochrana před přebitím zastaví nabíjení, pokud napětí článku přesáhne 4.3V. Při snížení napětí článku pod 2.7V, dojde k odpojení zátěže. Ochranný obvod je napájen neustále, jeho spotřeba by měla být minimalizována na 0.5  $\mu$ A nebo méně.

### 3.2.3 Nabíječka

Nabíječka pro akumulátory Li-Pol je postavena podle článku [10]. Základním prvkem zapojení je IO1 - referenční zdroj napětí TL431. Jako stabilizátor proudu pracují tranzistory T1 a T2. Nabíjecí proud protéká přes odpor R1. Pokud úbytek napětí na tomto odporu přesáhne asi 0,6 V, začne se pomocí T1 omezovat proud tranzistorem T2. Hodnota odporu R1 tedy určuje nabíjecí proud. Výstupní napětí je řízeno již zmíněným obvodem TL431. Jeho velikost určuje dělič napětí na výstupu

( R5,R7,P1). Součástky R4, C1 zamezují rozkmitání obvodu. LED dioda indikuje proud báze T2, který je úměrný výstupnímu proudu. Jas diody postupně klesá a tím indikuje stav nabíjení hlavně v konečné fázi. Dioda D1 zamezuje vybíjení nabíjené baterie při nepřítomnosti napájecího napětí. Zapojení nepotřebuje žádnou ochranu na vstupu proti přepólování, je proti němu odolné. Pokud při nepřipojeném akumulátoru svítí jasně LED, je vstupní napětí nabíječe nižší, než je třeba.



Obrázek 3.11: Schéma zapojení nabíječky Li-Ion článků

Tranzistor T2 musí mít dostatečně velký chladič. Jedinou činností je nastavení přesné hodnoty výstupního napětí. Ta je u běžných Li-ion 4,20 V na článek. Napětí nastavujeme bez zátěže. Popsaný nabíječ pro správnou funkci potřebuje napájecí napětí minimálně asi 7 V. Pokud dojde k poklesu vstupního napětí pod tuto hodnotu, může se na výstupu nabíječe objevit napětí větší než nastavené a může dojít k poškození nabíjené baterie.

### 3.3 Ultrazvukový dálkoměr

Ultrazvukový dálkoměr pracuje na principu měření doby odrazu mezi vysláním a přijetím ultrazvukového signálu.

#### 3.3.1 Fyzikální rozbor problému

Rychlosť zvuku  $c$  je dána vztahem:

$$c = \sqrt{K/\rho}. \quad (3.5)$$

Modul objemové pružnosti  $K$  je definován vztahem:

$$K = -V \frac{dP}{dV}. \quad (3.6)$$

Při rychlých změnách tlaků a objemů ve vzduchové vlně nestačí docházet k vyrovnávání teplot a změna je adiabatická, je třeba při závislosti  $P(V)$  vycházet z rovnice adiabaty (viz lit. [2](2.3.39)). Pro  $K$  tedy dostaváme

$$K = \kappa P. \quad (3.7)$$

Celkový tlak  $P$  můžeme napsat jako hodnotu barometrického tlaku  $b$  (která mnohonásobně převyšuje tlakové změny ve zvukovém vlnění dané akustickým tlakem  $p$ ). Jako výsledný vzorec tedy dostaváme:

$$c = \sqrt{\kappa \cdot \frac{b}{\rho}}. \quad (3.8)$$

Pro rychlosť zvuku ve vzduchu při teplotě  $0^\circ\text{C}$  a tlaku  $b = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ , po dosazení  $\kappa = 1.4$  (dvouatomové plyny),  $\rho_0 = 1.293 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  vychází  $c_0 = 331,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Rychlosť  $c$  je dána tlakem a hustotou  $\rho$ . Obě tyto veličiny jsou však spolu svázány ve stavové rovnici ideálního plynu (viz lit. [2]), a vzduch za ideální plyn můžeme dobře považovat. Dosazením do stavové rovnice ideálního plynu dostaváme výsledný vztah:

$$c = \sqrt{1 + \gamma \cdot t}, \quad (3.9)$$

kde  $\gamma = 1/T_0$  a  $T_0 = 273,15 \text{ K}$  je teplota  $0^\circ\text{C}$  vyjádřena v Kelvinově stupnici teplot. Teplota  $t$  je vyjádřena ve stupních Celsia. Pro  $|\gamma t| \ll 1$ , tedy pro oblasti obvyklých teplot, můžeme odmocninu přibližně linearizovat vztahem:

$$c \cong c_0 \left( 1 + \frac{\gamma}{2} t \right). \quad (3.10)$$

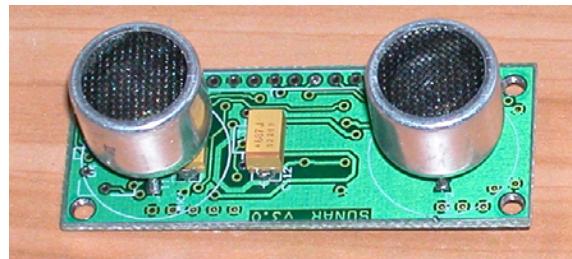
Při změně teploty o  $1^{\circ}\text{C}$  to odpovídá změně rychlosti o  $\Delta c = 0.61\text{m.s}^{-1}$ . Při teplotě  $t=20^{\circ}\text{C}$  tak činí rychlosť zvuku  $c_{20} = 344\text{m.s}^{-1}$ . Toto nám bude sloužit pro výpočet vzdálenosti překážky.

### 3.3.2 Odrazivost jako vlastnost povrchu

Energie od překážky odraženého akustického signálu je závislá na materiálu překážky. Pro některé materiály (porézní, měkké) dochází k vysokému útlumu signálu, energie signálu je nejčastěji přeměnována na energii tepelnou. (viz lit.[5]).

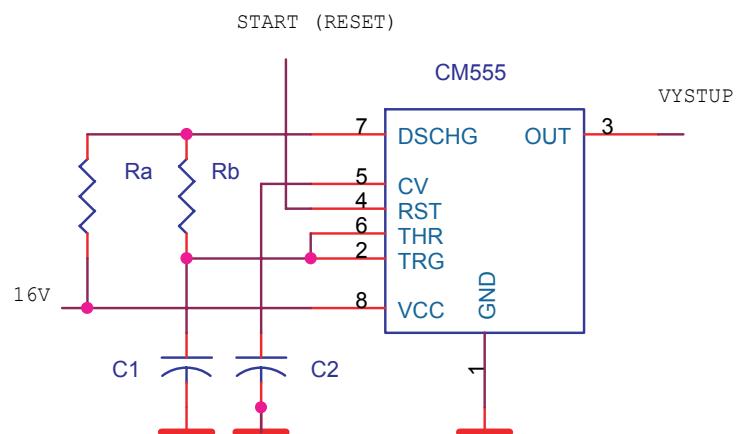
### 3.3.3 Způsob měření

Modul obsahuje ultrazvukový vysílač a přijímač.



Obrázek 3.12: modul ultrazvukového dálkoměru

Vysílač je buzen obvodem CM555 v zapojení AKO, nastavený na frekvenci, pro kterou bude mít signál přijatý ultrazvukovým přijímačem nejvyšší amplitudu.



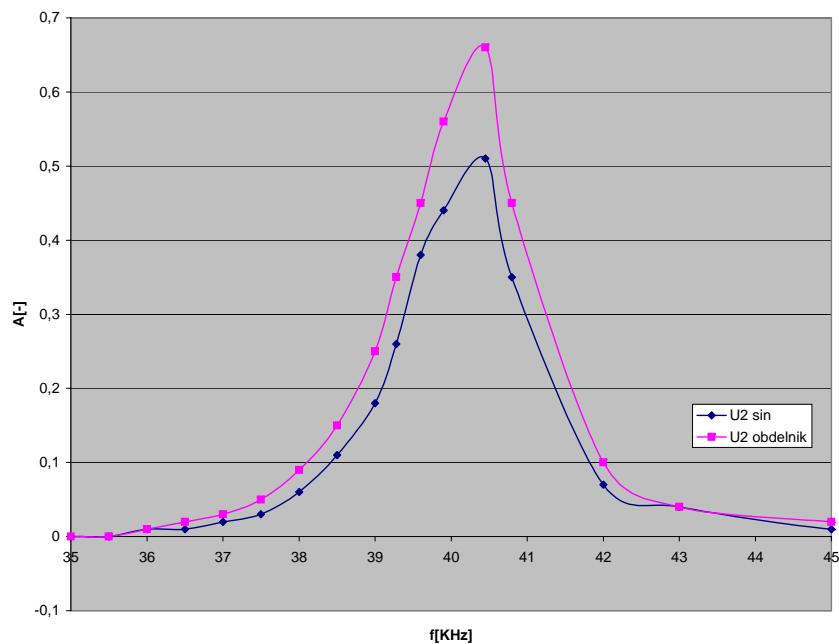
Obrázek 3.13: Zapojení CM555 jako AKO

Perioda signálu je dána vztahem:

$$T = t_H + t_L = 0.693(R_A + R_B)C_1 + 0.693R_B.C_1, \quad (3.11)$$

střídu signálu požadujeme nejlépe 1:1, aby nedocházelo ke zkreslování signálu. Signál START(RESET) slouží pro spuštění kmitání obvodu. V nízké úrovni je funkce obvodu pozastavena, obvod nekmitá. Ke generování signálu dojde po připojení signálu na vysokou úroveň napětí.

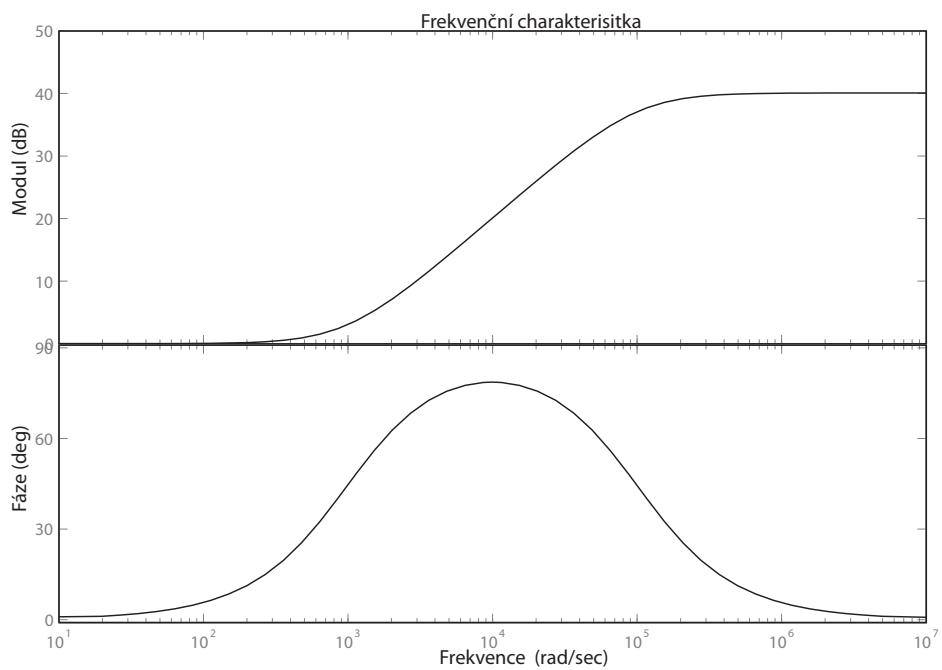
Frekvenční charakteristiky (obr. 3.14) soustavy vysílač-přijímač ukazují závislost amplitudy signálu na přijímači, při buzení vysílače sinusovým a obdélníkovým signálem stejně amplitudy napětí.



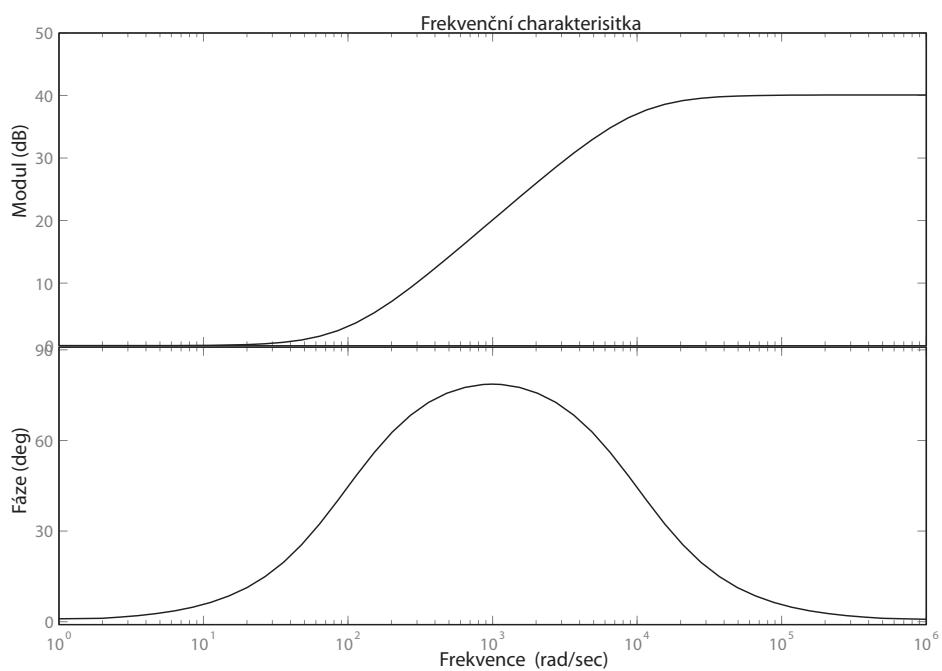
Obrázek 3.14: Frekvenční charakteristiky přijímače při buzení vysílače

Frekvence oscilací se nastavuje pomocí víceotáčkového trimru R116. (viz obr.3.18). Aplitura budícího signálu ultrazvukového vysílače je 16V, maximální výrobcem dovolená hodnota je 20V. Na hodnotě budicího napětí ultrazvukového vysílače je závislý výkon vysílaného akustického signálu a tím i maximální dosah soustavy.

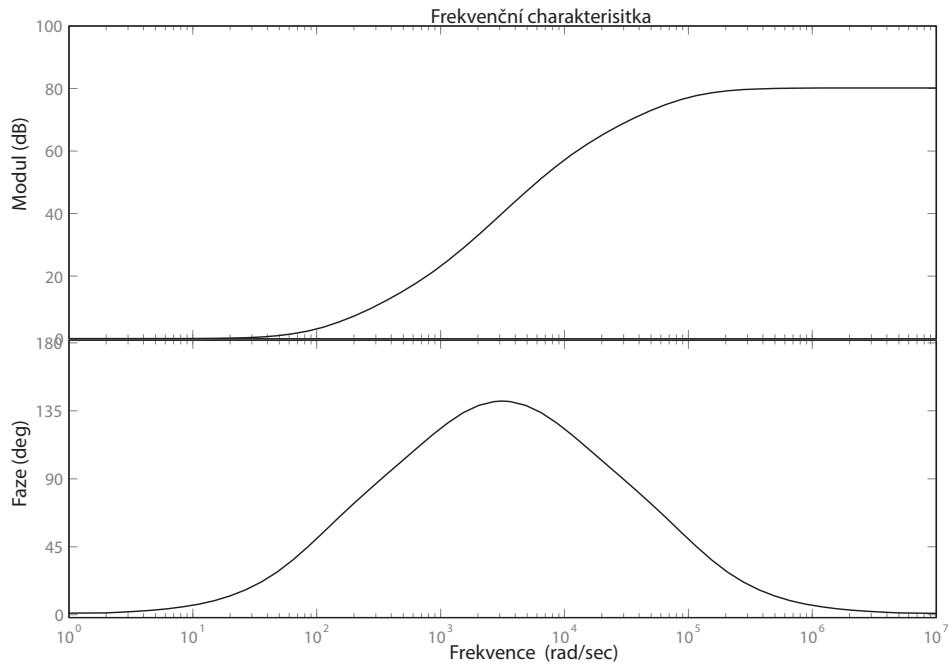
Vyslaný signál je zachycen ultrazvukovým přijímačem, zesílen operačními zesilovači U1,U2 v zapojení **filtr horní propust** (viz obr. 3.15, 3.16, 3.17). Zesílení je úmyslně rozděleno na dva stupně, neboť zesílení reálného operačního zesilovače je limitováno.



Obrázek 3.15: Frekvenční charakteristika zesilovače U1



Obrázek 3.16: Frekvenční charakteristika zesilovače U2



Obrázek 3.17: Frekvenční charakteristika obou stupňů

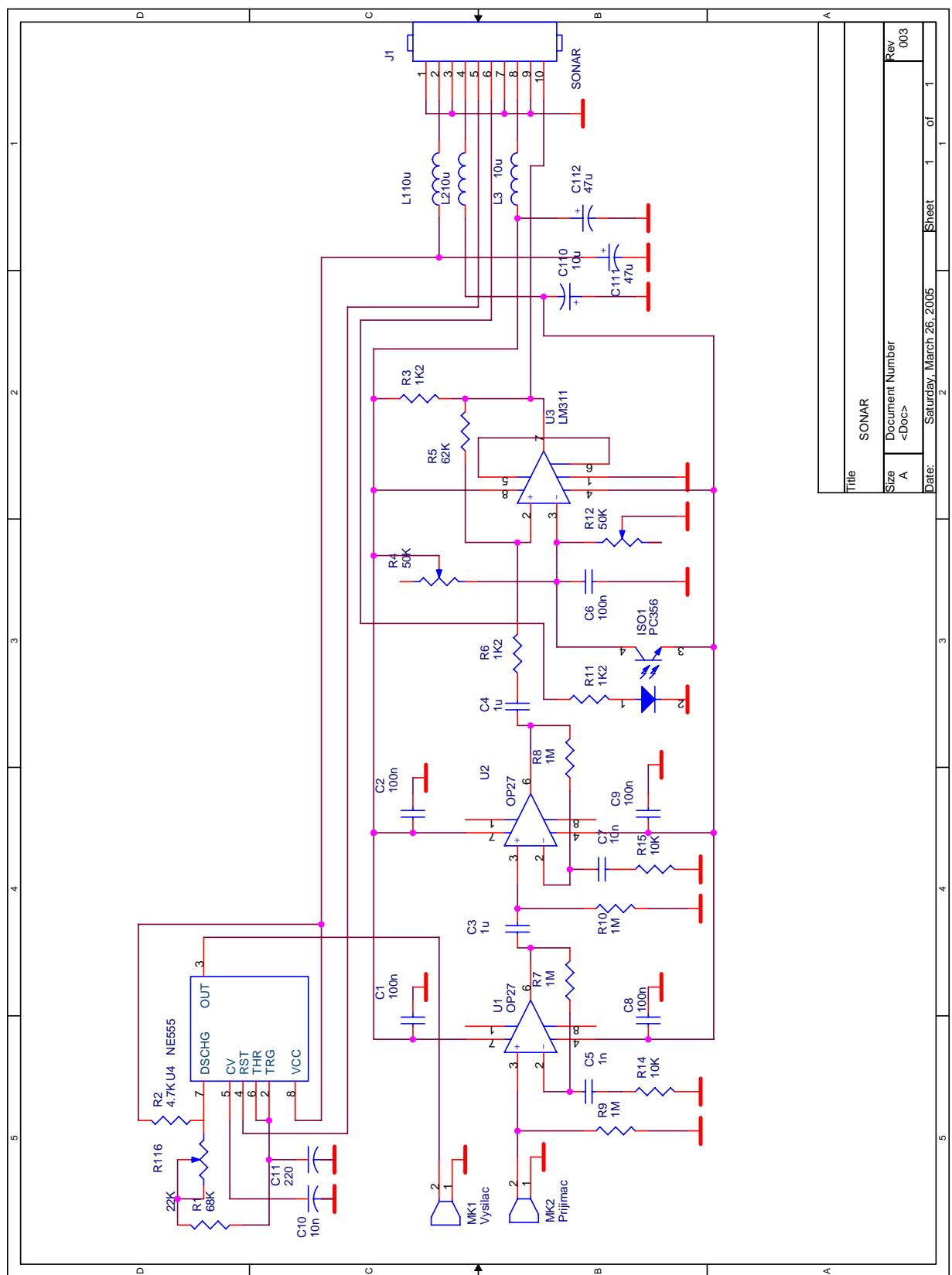
Aplituda zesíleného signálu je porovnána s přednastavenou referenční hodnotou, která je časově proměnná (viz obr. 3.19 průběh 3). Napětí reference je nejdříve nastaveno procesorem na -5V (přes vstup 6 konektoru modulu sepnutím optického oddělovače ISO1), poté je záporné napětí odpojeno a dochází k nabíjení kondenzátoru C6 na napětí dané děličem R4,R12. Napětí  $U_d$  (viz obr. 3.19) udává citlivost zařízení na přijímané signály. Pokud nastavíme tento rozdíl napětí příliš malý bude docházet k vyhodnocení odrazu i při přítomnosti šumu, či vícenásobného odrazu. Pokud tento je tento rozdíl napětí nastaven na příliš velkou hodnotu, nebude zařízení schopno detektovat signál odražený od vzdálené překážky.

K porovnávání aplitudy signálu je použit komparátor LM311 s hysterezí

$$U_H = \frac{R_6}{R_5}(U_{CC} - 0), \quad (3.12)$$

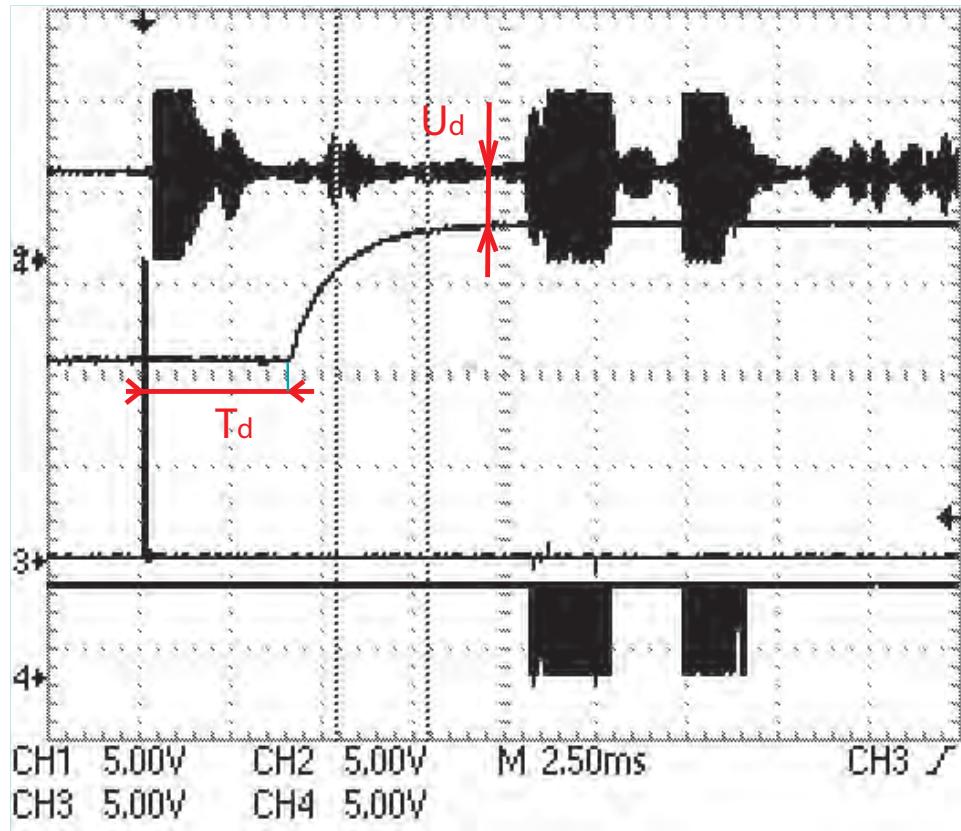
tj. asi 0.1V. Výstup komparátoru je vnitřně zakončen NPN tranzisorem s otevřeným kolektorem, který může být připojen na digitální vstup.

Výstup komparátoru (obr. 3.19, průběh 4) je vyhodnocován mikrokontrolérem, který při každém překlopení komparátoru do úrovni L, generuje přerušení a uloží obsah časovače. Časovač byl před začátkem měření vynulován a jeho hodnota je přímo úměrná času od vyslání signálu.



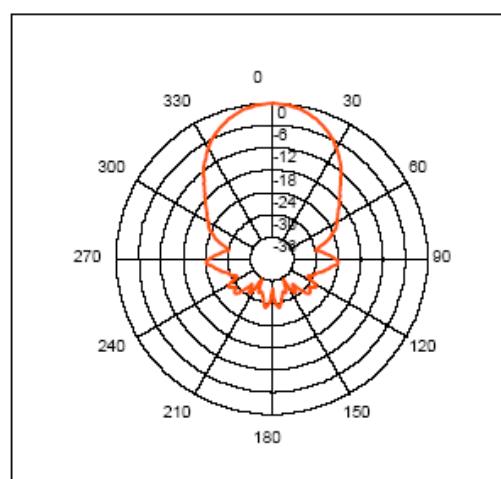
Obrázek 3.18: Schéma zapojení modulu ultrazvukového dálkoměru

Pro jeden modul dálkoměru byly osciloskopem získány následující průběhy(3.19)



Obrázek 3.19: Průběhy signálů dálkoměru

Ultrazvukové senzory jsou směrové, jejich směrová charakteristika je na obr.3.20.



Obrázek 3.20: Směrová charakteristika vysílače

Při zpracování naměřených dat je toto nutno brát v úvahu.

### 3.3.4 Maximální a minimální vzdálenost, rozlišení, přesnost

Vzdálenost  $s$  je dána rychlostí zvuku  $c_{20} = 344m.s^{-1}$ , a dobou  $T$  měřenou časovačem mikroprocesoru. Časování je odvozeno od hodinové frekvence mikrokontroléru. Pro použitý krystalový oscilátor s frekvencí  $f_{osc} = 3.6868MHz$  je frekvence vykonávání strojových instrukcí  $f = f_{osc}/4 = 0.9216MHz$ . Délka vykonávání strojové instrukce je  $T = 1/f = 1,0851\mu s$ . Časovač mikrokontroléru pracuje v módu DIV2 (pokud je aktivní, inkrementuje svůj obsah každou druhou hodinovou jednotku), jeho obsah při měření vzdálenosti tedy již vyjadřuje dobu šíření vlny od vysílače modulu k překážce a dobu po kterou se vlna šíří od překážky zpět k přijímači modulu. Naměřená vzdálenost je dána vztahem:

$$s = c_{20} \cdot N \cdot T, \quad (3.13)$$

kde pro výpočet budeme uvažovat výše zmíněnou rychlosť zvuku pro pokojovou teplotu  $c_{20}$ ,  $N$  je obsah časovače v době detekování překážky a  $T$  je výše zmíněná délka vykonávání strojové instrukce.

**Rozlišení  $s_r$**  metody měření je dáno parametrem  $T$ ,

$$s_r = c_{20} \cdot N \cdot T, \text{ pro } N = 1, \text{ tedy } s_r = 373\mu m. \quad (3.14)$$

**Minimální měřitelná vzdálenost** je dána parametrem  $T_d$  (viz. obr.3.19), dobou za kterou začne nabíjení kondenzátoru C6 (3.18). Tato doba je nastavena v programu mikrokontroléru tak, aby nedocházelo k překlopení komparátoru vlivem přeslechu mezi vysílačem a přijímačem. Ultrazvukový dálkoměr, jehož průběhy jsou na obr.3.19, je schopen detektovat odraz až za dobu cca  $t_d = 6.25ms$  (pro  $T_d = 3.75ms$ ). Minimální vzdálenost, kterou bude tento konkrétní modul schopen měřit bude

$$s_{min} = 6,25 \cdot 10^{-3} \cdot 344 = 2,15m. \quad (3.15)$$

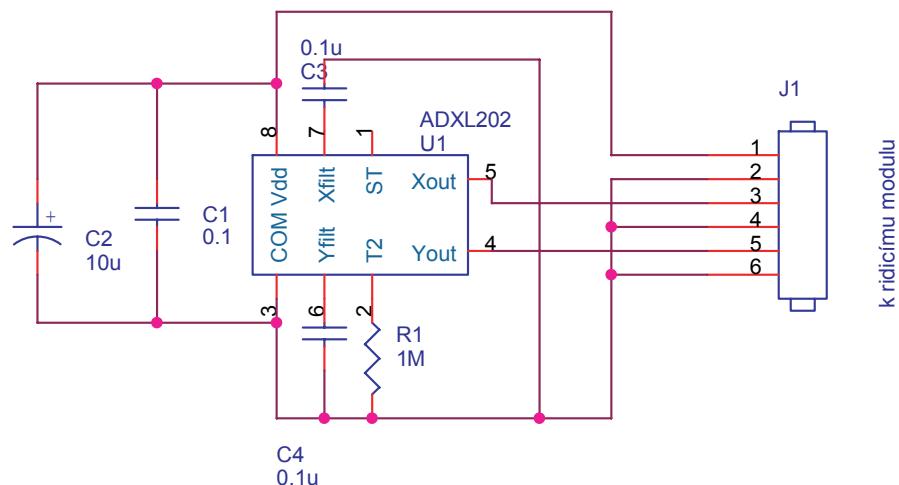
**Maximální měřitelná vzdálenost** je dána maximálním rozsahem časovače. Použitý časovač TIMER1 je 16-ti bitový, jeho rozsah je tedy 0 až  $2^{16} - 1$ , tj. (0-65535). Maximální měřitelná vzdálenost je

$$s_{max} = c_{20} \cdot N \cdot T, \text{ pro } N = 65535, \text{ tedy } s_{max} = 24,46m. \quad (3.16)$$

Toto omezení však není podstané, neboť při měření na velké vzdálenosti dojde dříve k utlumení signálu, nebo signál dopadající na překážku pod úhlem způsobí odražení mimo oblast činnosti ultrazvukového přijímače (vliv úhlu na velké vzdálenosti měření je podstatný).

### 3.4 Akcelerometr, inklinoměr

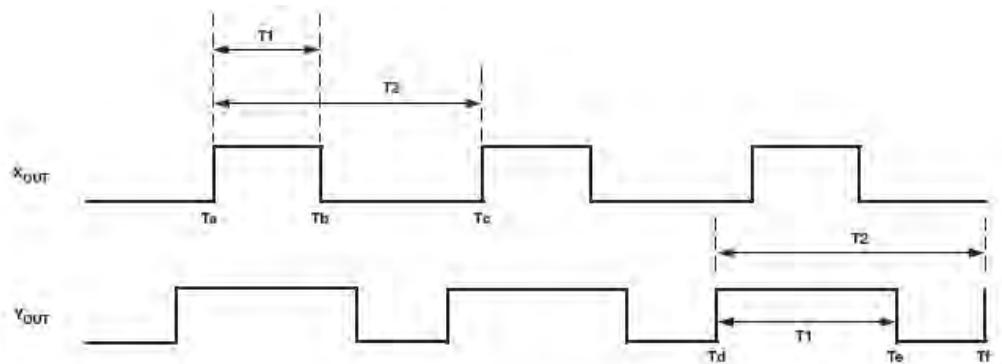
Pro měření zrychlení modelu a statického gravitačního zrychlení(náklon) je použit dvouosý akcelerometr ADXL202AE. Senzor vytváří šířkově modulovaný signál závislý na zrychlení. Senzor je schopen měřit obě pozitivní i negativní zrychlení v rozsahu  $+- 2\text{g}$ . Pomocí rezistoru  $R_1$  je nastavena perioda signálu v rozsahu 0.5ms-10ms ( $T_2 = R_1/125M\Omega = 8\text{ms}$ ).



Obrázek 3.21: Schéma zapojení akcelerometru

Pro zrychlení  $0\text{g}$  je strídá signálu 1:1. Zrychlení je možno získat měřením délky pulzů  $T_1$  a  $T_2$ , vztahem

$$a_{(g)} = (T_2/T_1 - 0.5)/12.5\%. \quad (3.17)$$



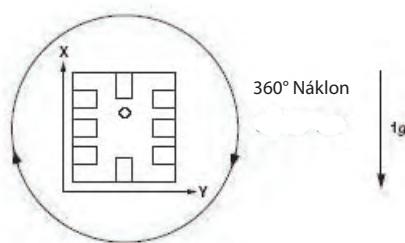
Obrázek 3.22: Diagram měření periody

Pomocí kondenzátorů  $C_3, C_4$  je nastavena šířka pásma (nejnižší detekovatelné zrychlení). Použité kondenzátory 100nF nastavují šířku pásma na 50Hz. Rozlišení měření je dánou délkom  $T_2 = 8ms$  a periodou hodinového signálu čítače(časovače). Pro zrychlení 1g je délka pulzu  $T_1 = 12.5\%T_2 = 1ms$ . Pro periodu hodinového signálu  $T = 1.085\mu s$ , je minimální měřené zrychlení 1.085mg. Pro minimalizování dynamických chyb je doporučeno:

$$\frac{1/T_2}{BW} \geq 2 \quad (3.18)$$

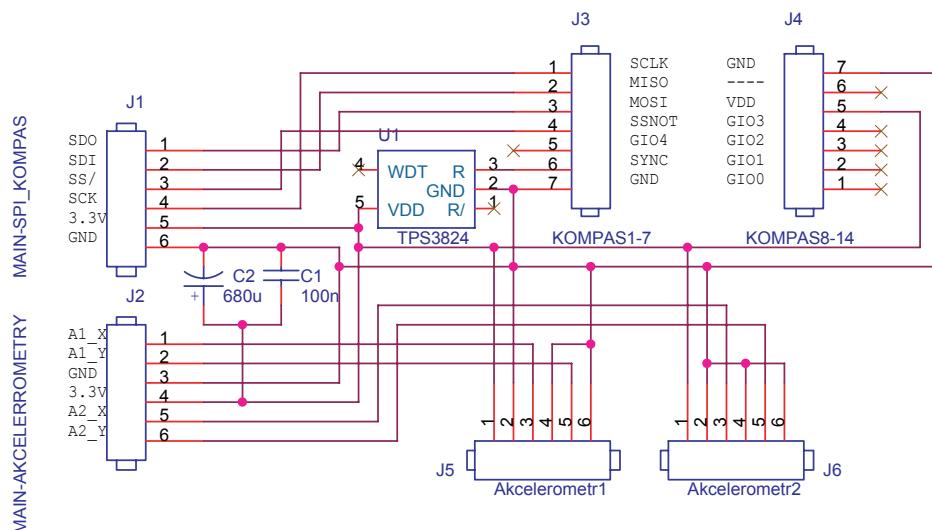
kde BW je výše zmíněná šířka pásma (50Hz).

Následující obrázek ukazuje správné natočení senzoru pro měření gravitačního zrychlení.



Obrázek 3.23: Měření náklonu

Minimální senzorem měřitelný úhel je dán citlivostí senzoru  $17.5\text{mg}/^\circ$ . Minimální detekovatelná změna úhlu je  $0.062^\circ$ .



Obrázek 3.24: Schéma připojení akcelerometrů a kompasu k řídícímu modulu

## 3.5 Kompas

Pro určování natočení modelu byl použit kompas PNI V2Xe. Kompas V2Xe je integrovaný 2-osý kompas a modul pro měření magnetického pole. Obsahuje mikroprocesor pro řízení měření a komunikaci. V2Xe kombinuje magneto-induktivní (MI) senzory a měřicí obvody s velmi nízkou spotřebou a vysokou účinností. MI senzory mění svou indukčnost v rozsahu 100%. Přístup k naměřeným datům je pomocí SPI Motorola kompatibilního rozhraní.

### Parametry kompasu:

spořeba 2mA při napájení 3V(trvale) rozlišení 0.01° přesnost 2° možnost kalibrace rozsah měření magnetického pole 1100 $\mu$  T (11 Gauss) rozlišení měření mg. pole 0.015  $\mu$  T (0.00015 Gauss) rozsah pracovních teplot -20°C - 70°C

### 3.5.1 Komunikační protokol

Následující sekce popisuje datovou strukturu a příkazy potřebné pro komunikaci s V2Xe přes SPI rozhraní

Datový rámec pro základní zprávu

Synchronizace	Typ rámce	Terminátor
0xAA	0xXX	0x00

Datový rámec pro zprávu s daty

Synchronizace	Typ rámce	Volitelná data	Terminátor
0xAA	0xXX	0xXX,0xXX...	0x00

### 3.5.2 Formát parametrů

**Float32** - dle standardu ANSI/IEEE 754-1985, ve formátu BigEndian

S	Exponent	Mantisa
31	30	23 22 0

Hodnota čísla je  $(-1)^S * 2^{(Exponent-127)} * 1.Mantisa$

**SInt32** - 32bit. čísla se znaménkem(dvojkový doplněk). Bit 31 reprezentuje znaménko čísla. Ve formátu BIG ENDIAN má bit 31 nejvyšší váhu, ve formátu LITTLE ENDIAN je pořadí bytů obrácené.



**SInt16** 16 bit. číslo se znaménkem(dvojový doplněk). Bit 15 reprezentuje znaménko, ve formátu BigEndian.



**SInt8** 8-bitové číslo se znaménkem. Bit 7 reprezentuje znaménko.



**UIInt32** 32 bit. číslo bez znaménka



**UIInt16** 16 bit. číslo bez znaménka



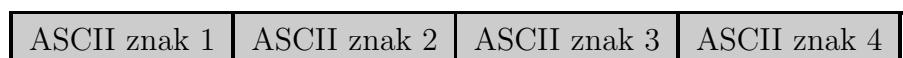
**UIInt8** 8 bit. číslo bez znaménka



**Boolean** 1-byte parametr s hodnotou 0-false,1-true



**FourCharCode** - 4 bytový parametr



### 3.5.3 Příkazy a komunikační rámce

**GetModInfo**(Typ rámce 0x01) Získání informací o modulu. Odpovědí je *ModInfo-Resp* rámec. Tento příkaz nemá parametry.

0xAA	0x01	0x00
------	------	--

**ModInfoResp**(Typ rámce 0x02) Odpověď na příkaz *GetModInfo*. Data obsažená v rámci obsahují 4byty identifikující typ kompasu a 4byty čísla verze firmware.

0xAA	0x02	0x56 0x32 0x58 0x65 0x56 0x32 0x30 0x34 0x00
------	------	--

**SetDataComponents**(Typ rámce 0x03) Tento příkaz nastavuje komponenty, které mají být poslány po přijetí příkazu *GetData*. kde n je počet komponent pro

0xAA	0x03	n	CID1	CID2	CIDn	0x0
------	------	---	------	------	------	-----

přenos a CID je identifikační číslo komponenty.

*XRaw, YRaw* - obsahuje data přečtená z ASIC registrů

Komponenta	CID	Format	Jednotky	Rozsah
XRaw	0x01	SInt32	counts	-32768 až 32767
YRaw	0x02	SInt32	counts	-32768 až 32767
XCal	0x03	Float32		scaled to 1.0
YCal	0x04	Float32		scaled to 1.0
Heading	0x05	Float32	stupně	0.0 -359.9
Magnitude	0x06	Float32		scaled to 1.0
Temperature	0x07	Float32	°C	
Distortion	0x08	Boolean	true/false	
CalStatus	0x09	Boolean	true/false	

*XCal, YCal* - obsahuje kalibrované X a Y složky měřeného vektoru

*Heading* - obsahuje OTOČENÍ(směr) přepočtený z XCal a YCal

*Magnitude* - velikost(abs. hodnota) vypočteno jako  $\sqrt{(XCal^2 + YCal^2)}$  . Jeho hodnota porovnána s kalibrační k vyloučení rušení.

*Temperature* - (teplota) je měřena v vnitřním tepelném čidle v °C s přesností +/-8%

*Distortion* - (zkreslení) indikuje jestli velikost vektoru použitého k výpočtu směru(HEADING) je mimo rozsah 50-150% kalibrační velikosti.

*CalStatus* - indikuje *true* pokud je potřeba modul V2Xe zkalibrovat.

**GetData**(Typ rámce 0x04) Dotaz na data, odpověď je *DataResp* obsahující data z komponent nastavených pomocí *SetDataComponents*. Tento příkaz je bez parametrů.

0xAA	0x04	0x00
------	------	------

**DataResp**(Typ rámce 0x05) Odpověď na příkaz *GetData*, Pořadí komponent odpovídá nastavení pomocí příkazu *SetDataComponents*

**SetConfig** (Typ rámce 0x06) Nastavuje vnitřní parametry, které kompas užívá při kalibraci a při měření. Datový rámcem obsahuje identifikátor parametru následovaný daty specifickými pro daný parametr.

0xAA	0x06	ID	val	0x00
------	------	----	-----	------

Parametr	ID	Format	Jednotky/Rozsah	Přednastaveno
Declination	0x01	Float32	°(-180°,180°)	0°
TrueNorth	0x02	Boolean	true/false	false
CalSampleFreq	0x03	UInt8	1-8(Hz)	8
SampleFreq	0x04	UInt8	0-8(Hz)	0
Period	0x05	UInt8	1-8	5
BigEndian	0x06	Boolean	true/false	true
DampingSize	0x07	UInt8	1-8	1

Declination - (sklon) nastavuje úhel ochylky osy magnetického od severního pólu vztaženého k určitému bodu na zemi. Je měřen v stupních zápaně či východně od pravého severu. Oprava sklonu je docílena uložením hodnoty úhlu, a následnou změnou referenčního směru z magnetického severu na pravý (zemský) sever. Odchylkové úhly se mění v závislosti na pozici na Zemi a velmi pomalu se mění s časem. Pro nejlepší možnou přesnost je možno přednastavit dle: <http://www.ngdc.noaa.gov/cgi-bin/seg/gmag/fldsnths1.pl> v závislosti na zeměpisné délce a šířce.

TrueNorth - nastavuje referenční hodnotu pro měření na pravý nebo magnetický sever. Pokud je hodnota nastavena na *true*, pak odchylka(declination) je použita k měření úhlu od pravého Zemského severu.

CalSampleFreq - vzorkovací frekvence během kalibrování.

SampleFreq - vzorkovací frekvence při zapnutém útlumu.

Period - ASIC perioda. Platné hodnoty ukazuje tabulka.

Hodnota	1	2	3	4	5	6	7	8
Perioda	/32	/64	/128	/256	/512	/1024	/2048	/4096

BigEndian - indikuje pořadí bitů multi-byteových parametrů. Pokud je hodnota *true*, všechny parametry předávané do a z modulu V2Xe jsou ve tvaru BIGENDIAN, pokud je hodnota *false*, jsou ve tvaru LITTLEENDIAN.

DampingSize - indikuje počet naměřených vzorků úhlu(heading), zprůměrovaných a vrácených jako natočení(heading). Počet vzorků je 1-8.

**GetConfig** (Typ rámce 0x07) - dotaz na konfigurační data modulu. Datové pole rámce obsahuje identifikátor parametru. Odpověď je rámec ConfigResp.

0xAA	0x07	0x01	0x00
------	------	------	------

Tento rámec zjišťuje konfiguraci parametru Declination(úhel sklonu)

**ConfigResp**(Typ rámce 0x08) - odpověď na dotaz GetConfig. Datové pole obsahuje identifikátor parametru nasledovaný pro identifikátor specifickým typem proměnné obsahující hodnotu parametru.

0xAA	0x08	0x01	0xXX	0xXX	0xXX	0xXX	0x00
------	------	------	------	------	------	------	------

(předposlední 4 byty reprezentují hodnotu typu Float32 parametru DECLINATION).

**SaveConfig**(Typ rámce 0x09) - uloží konfigurační parametry do paměti EEPROM. Tento příkaz nemá žádný parametr. Také uloží nastavení SetDataComponents a kalibrační informace.

**StartCal**(Typ rámce 0x0A) - Spustí kalibraci, kalibrační vzorkovací frekvence je nastavena pomocí SetConfig:CalSampleFreq rámcem. Tento příkaz nemá žádné parametry.

**StopCal**(Typ rámce 0x0B) - Ukončuje kalibraci, když kalibrační data jsou připravena pro použití při výpočtu úhlu(heading). Kalibrační data nejsou však uložena dokud není přijat příkaz *SaveConfig*. Tento příkaz nemá žádný parametr.

**GetCalData**(Typ rámce 0x0C) - Dotaz na kalibrační data. Modul odpoví komunikačním rámcem *CalDataResp*. Tento příkaz je bez parametrů.

**CalDataResp**(Typ rámce 0x0D) - Odpověď na GetCalData. Struktura rámce je následovná:

Počet Bytů	Uint8	délka dat
X ofset	SInt32	
Y ofset	SInt32	
X zesílení	SInt32	
Y zesílení	SInt32	
Fi	Float32	hodota Fi
Kalibrační velikost(magnitude)	Float32	kalibrační abs. hodnota vektoru

**SetCalData**(Typ rámce 0x0E) - Uloží přednastavená kalibrační data do vnitřní EEPROM paměti modulu. Datová pole tohoto rámce musí obsahovat stejnou strukturu jako CalDataResp. Normální kalibrační proces probíhá po vyslání příkazů *Start-Cal/StopCal*.

Uživatelský interface

Přístup k modulu V2Xe je pomocí hardwarového potvrzování, synchronním sériovým rozhraním kompatibilním se Motorola SPI. Toto rozhraní se skládá z 5 signálů: SCLK, MOSI, MISO, SSNOT, SYNC.

Pin	Jméno	Funkce
1	SCLK	sériový synchronizační hodinový signál
2	MISO	Master In, Slave Out pro modul
3	MOSI	Master Out, Slave In pro modul
4	SSNOT	aktivace modulu
5	GIO4	rezervováno
6	SYNC	vstup pro případnou inicializaci
7	GND	zem (0V)
8	GIO0	rezervováno
9	GIO1	rezervováno
10	GIO2	rezervováno
11	GIO3	rezervováno
12	VDD	hodota Fi
13	—	hodota Fi
14	GND	zem (0V)

Kalibrace kompasu

Kalibrace je proces k oddělení zemského magnetického pole od magnetického pole

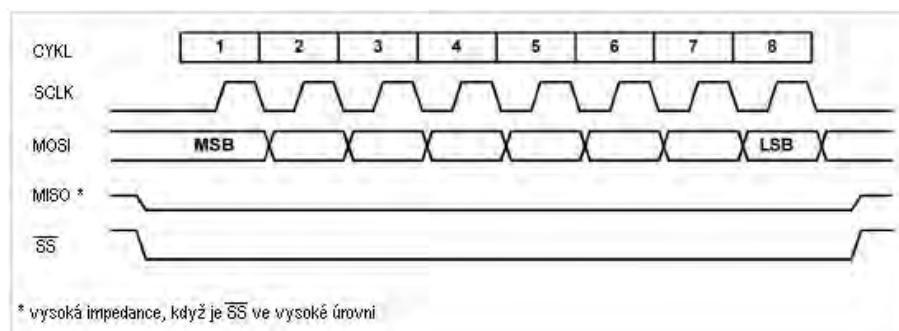
rušení, které vytváří zařízení, na kterém je kompas umístěn.

Proces je popsán následujícím postupem:

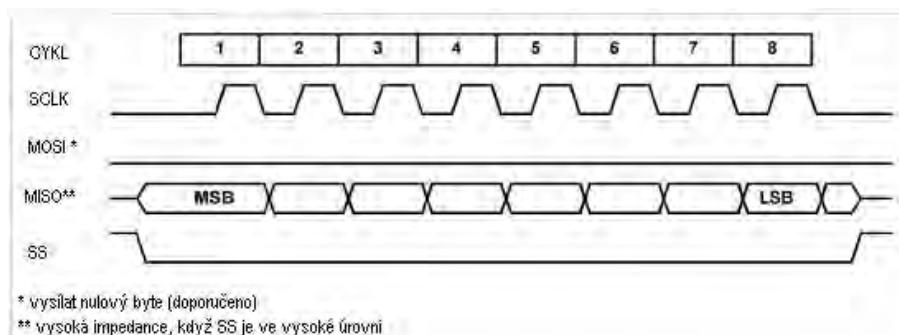
- 1.Umístit jednotku, která má být kalibrována do hostitelského systému
- 2.Nastavit V2Xe na vhodnou pozici
- 3.Poslat *StartCal* příkaz
- 4.Otáčet kompasem 2 otáčky po 360 stupních, při zachování směru otáčení a náklonu.
- 5.Poslat *StopCal* příkaz
- 6.Poslat *SaveConfig* příkaz, k uložení kalibračních údajů do vnitřní paměti.

#### Popis komunikačního rozhraní SPI

SPI je rozhraní typu master-slave, V2Xe je zařízení slave. Řídící zařízení musí zabezpečit požadovaný hodinový signál pro přenesení bytu do a z V2Xe. Signál SS(Slave Select) musí být v nízké úrovni, aby mohlo dojít k přenosu dat. V2Xe komunikuje v poloduplexním módu. Když je V2Xe v přijímacím režimu(čekajícím na platná data), bude vysílat nulové byty když data přijme. Během vysílání, V2Xe ignoruje MOSI signál, ale je doporučeno, aby hostitelský systém vysílal nulové byty.



Obrázek 3.25: Vysílání z hostitelského zařízení do V2Xe



Obrázek 3.26: Vysílaní z V2Xe do hostitelského zařízení

## 3.6 BlueTooth

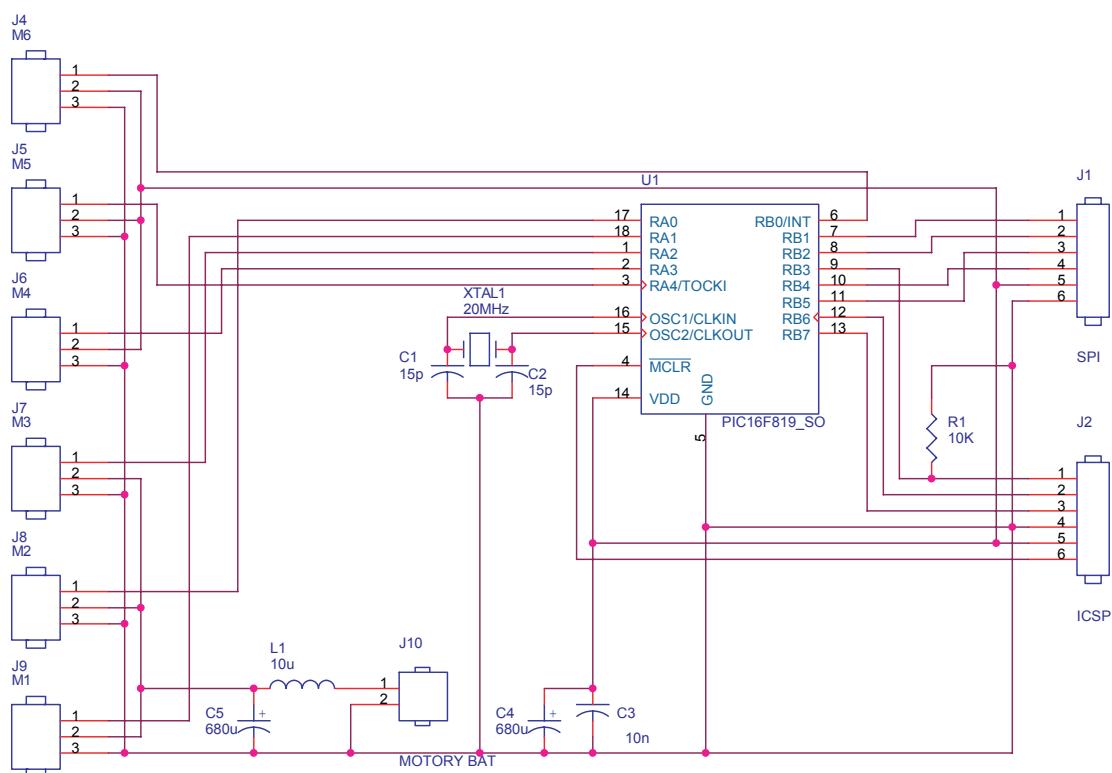
Pro bezdrátovou komunikaci byl použit modul SieMo S50037. Jde o vestavný modul pro jiná zařízení, který poskytne možnost bezdrátové komunikace s okolím. Tento modul tedy není navržen pro přímé připojení k osobnímu počítači (napětové úrovně modulu jsou 0, 3.3V). Je nutné pro připojení k PC napětové úrovně konvertovat.

### 3.6.1 Připojení Bluetooth modulu k PC

Připojení k osobnímu počítači je pomocí vývojového kitu popsaného v [4] (obr. B.3). Ten obsahuje převodník MAX3232CPE sériového portu RS232C na sériový kanál s úrovněmi 3,3V. Připojením přes vývojový kit lze programově měnit pomocí programu *PStool* firmy CSR ([www.csr.com](http://www.csr.com)) parametry modulu, jako je komunikační rychlosť, řízení toku dat, atd (viz. [4]). Modul bluetooth je standartně nastaven na komunikační rychlosť 115.2kBd a hardwarové řízení toku dat (pomocí signálů CTS, RTS). Sériový komunikační rámec je ukončen jedním stop item a neobsahuje paritní bit.

### 3.7 Modul řízení serv

Pro řízení polohových a rychlostních serv byl vytvořen samostatný modul, aby řídící mikrokontrolér nebyl časově zatěžován. Serva jsou řízena pulzně-šířkově modulovaným signálem, kde frekvence signálu udává rychlosť odezvy serva a délka impulzu udává polohu u polohových serv a rychlosť u rychlostních serv. Standartní délka impulzu pro krajní polohy je  $990\mu s$  a  $2010\mu s$ . Frekvence signálu je u modulu nastavena na 20Hz.



Obrázek 3.27: Modul PWM

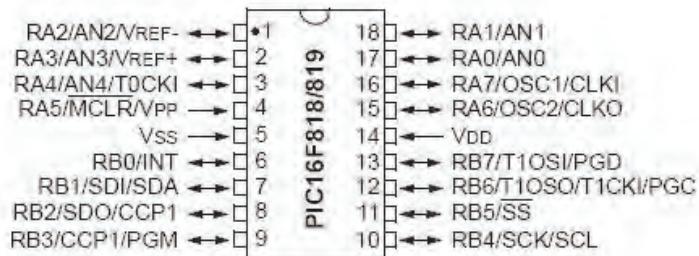
Tři serva jsou napájena ze stabilizovaného napětí 5V, další tři jsou napájena napětím baterie, připojené za ochranným obvodem z důvodu lepší účinnosti a úspory energie (napětí baterie je vyšší a tím je vyšší výkon motorů). Rychlostní serva mají větší rozsah napájecího napětí (4-8V), polohová serva mají rozsah napájecího napětí menší (4-6V).

Pro generování pulzně šířkově modulovaného signálu (PWM) je použit mikrokontrolér PIC16F819 (viz lit. 3.28).

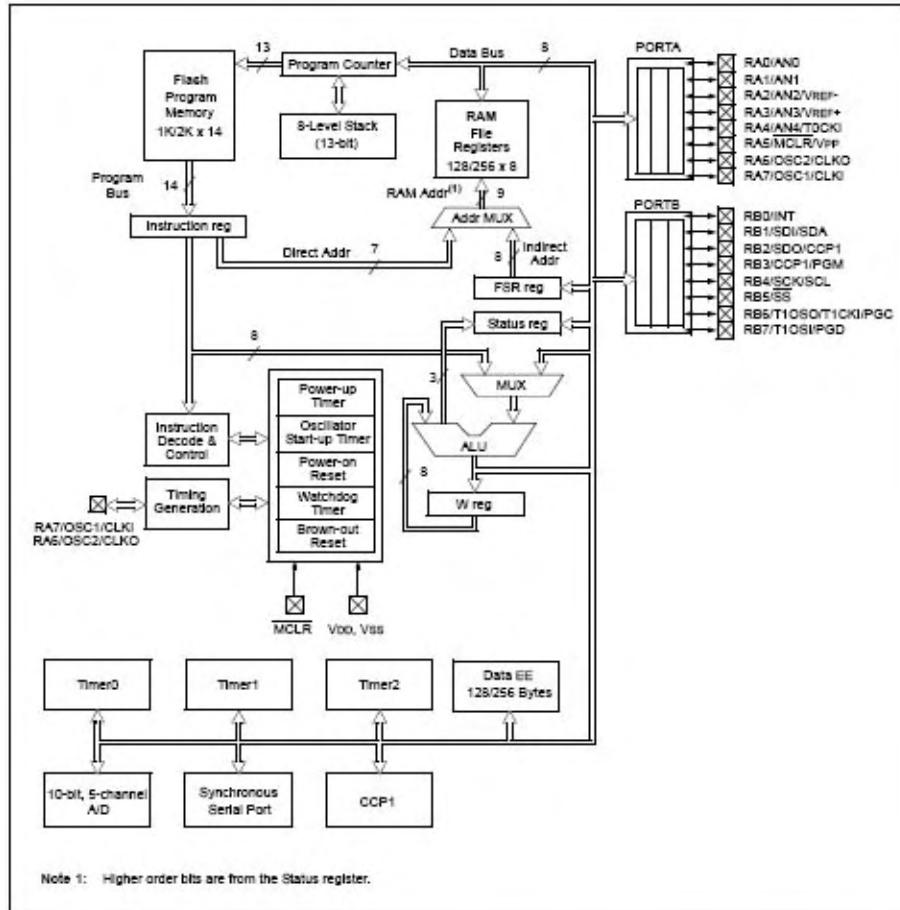
### 3.7.1 Mikrokontrolér PIC16F819

Instrukční sada mikrokontroléru obsahuje 35 jednoduchých instrukcí. Vnitřní struktura mikrokontroléru je zobrazena na obr. 3.29. Mikrokontrolér má celkem 16 vstupně-výstupních vývodů rozdelených do dvou portů A, B. Zápisem do konfiguračních registrů těchto portů se určí, který vývod bude vstup a který výstup. Vývody portu A je možno nakonfigurovat jako vstup A/D převodníku, nebo jako digitální vstupy či výstupy. Vývody portu B je možné nakonfigurovat jen jako digitální vstupy či výstupy. Mikrokontrolér má na svém čipu pamět rozdelenou na pamět programu a na pamět dat. Pamět programu je typu FLASH s velikostí 2K. Pamět dat je rozdělena na rychlou pamět RAM o velikosti 256 bytů a na pamět EEPROM o velikosti 256 bytů. Mikrokontrolér disponuje rozhraním SPI, to může být nastaveno jako zařízení nadřízené či podřízené. Sběrnice SPI je použita pro komunikaci s nadřízeným řídicím modulem. Obvod obsahuje 3 čítače-časovače, TIMER0, TIMER1 a TIMER2. Čítač-časovač TIMER0 a TIMER2 je 8 bitový, TIMER1 je 16ti bitový. Pro časování signálů PWM je použit časovač TIMER2.

18-Pin PDIP, SOIC



Obrázek 3.28: Mikrokontrolér PIC16F819



Obrázek 3.29: Blokové schéma mikrokontroléru PIC16F819

### 3.7.2 Komunikační protokol

Modul komunikuje pomocí SPI Motorola kompatibilního rozhraní. Komunikační rámcem přijatý od nadřízeného modulu vypadá následovně:



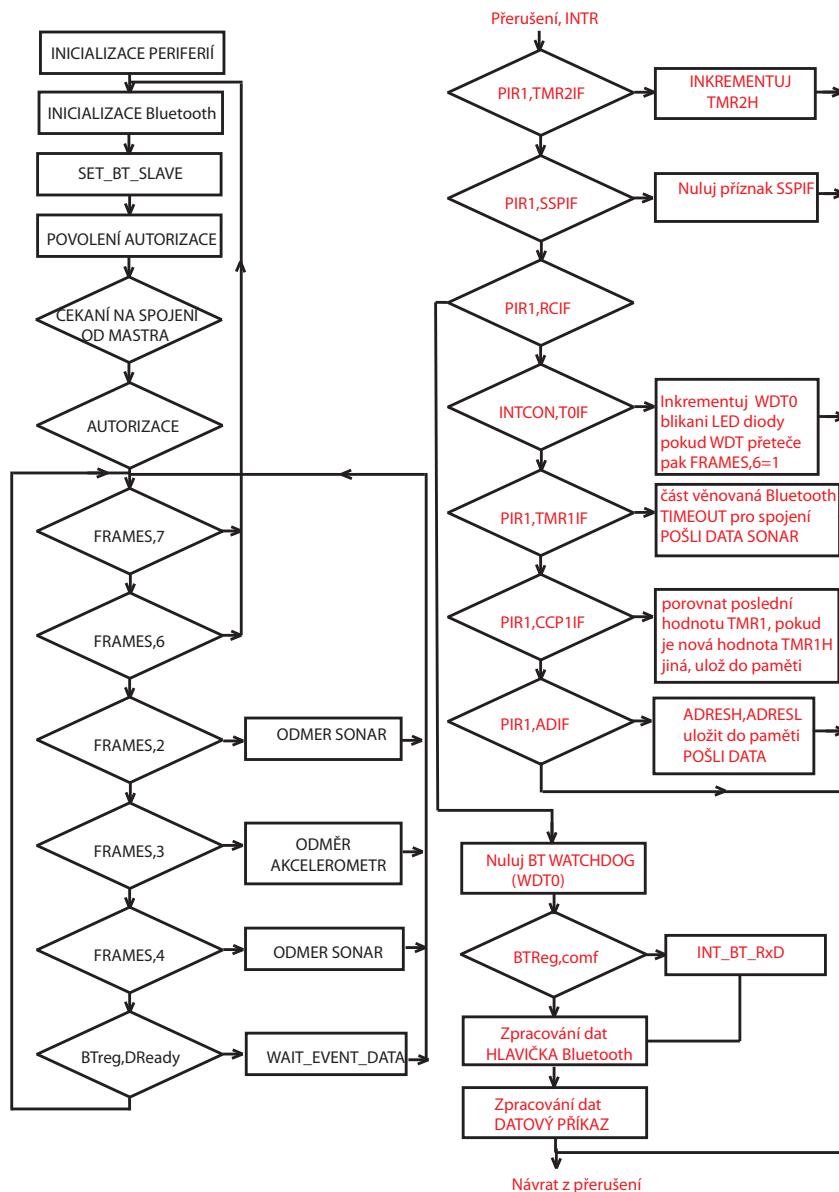
Parametrem XX je číslo serva 0-5, parametr YY udává délku impulzu, zadaný v rozsahu 1-255. Minimální a maximální hodnota parametru YY je pro každé servo individuální, pro správné nastavení krajních poloh. Jako odpověď nadřízenému modulu je shodný rámcem.

# Kapitola 4

## Popis programu

Program řídicího mikrokontroléru lze rozčlenit do částí naznačených na obr. 4.1. Po zapnutí či po resetu je nejdříve provedena inicializace periferií, nastavení přenosové rychlosti a módu činnosti sériového portu pro připojení modulu Bluetooth, SPI rozhraní pro připojení kompasu a modulu PWM. Je provedeno nastavení vstupně/výstupních bran mikrokontroléru, nastavení časovačů a povolení přerušení. V následujícím kroku je zapnuto napájeci napětí pro komunikační modul, a počká se na správnou inicializaci modulu. Modul se nastaví do režimu SLAVE a vyčkává na navázání spojení od nadřazeného modulu MASTER. Po navázání spojení mezi moduly mikrokontrolér vyšle data 01 02 03 04 a čeká na provedení autorizace, na přijetí dat 05 06 07 08 od řídicího počítače. Je spuštěn časovač TIMER0, který kontroluje spojení a při přijetí dat sériovým kanálem je nulován. Pokud data po dobu delší než 16 vteřin nepřijdou např. z důvodu ztráty spojení či zablokováním modulu, je komunikační modul inicializován a opět nastaven do módu SLAVE a vyčkává na příchozí spojení od MASTERA. V hlavní smyčce programu je prováděna kontrola bitů registru *FRAMES*, bitu *DReady* a obsluha přerušení. Bity registru FRAMES určují zda se má zahájit odměr, došlo k přerušení spojení, či zda se čeká na potvrzovací data (Event) od komunikačního modulu. Podrobnější popis komunikace pomocí modulů Bluetooth lze nalézt v [4]. V případě vnějšího přerušení je přerušeno vykonávání programu hlavní smyčky a je provedena obsluha přerušení. Zařízení které vyvolalo přerušení má nastaveno příslušný bit na 1. Při přijetí přerušení od TIMER2 (PIR1,TMR2IF) je inkrementován registr TMR2H. Tím je z osmibitového časovače 16ti-bitový. Tento časovač je použit pro měření periody akcelerometrů. Při příjmu dat SPI zařízením nastaven bit(PIR1,SSPIF) je pouze nulován tento příznak, zpracování dat je prováděno bez využití přerušení. Přijetí dat sériovým kanálem vyvolá přerušení (PIR1,RCIF), dojde k nulování časovače TIMER0 a registru WDT0.

Registr WDT0 slouží k nastavení času po jehož uplynutí dojde k inicializaci modulu Bluetooth. Data přijatá sériovým portem jsou zpracována, jsou odstraněna data sloužící pro komunikační modul(hlavice) a data za hlavičkou jsou byte po bytu zpracována, viz obr.4.2.



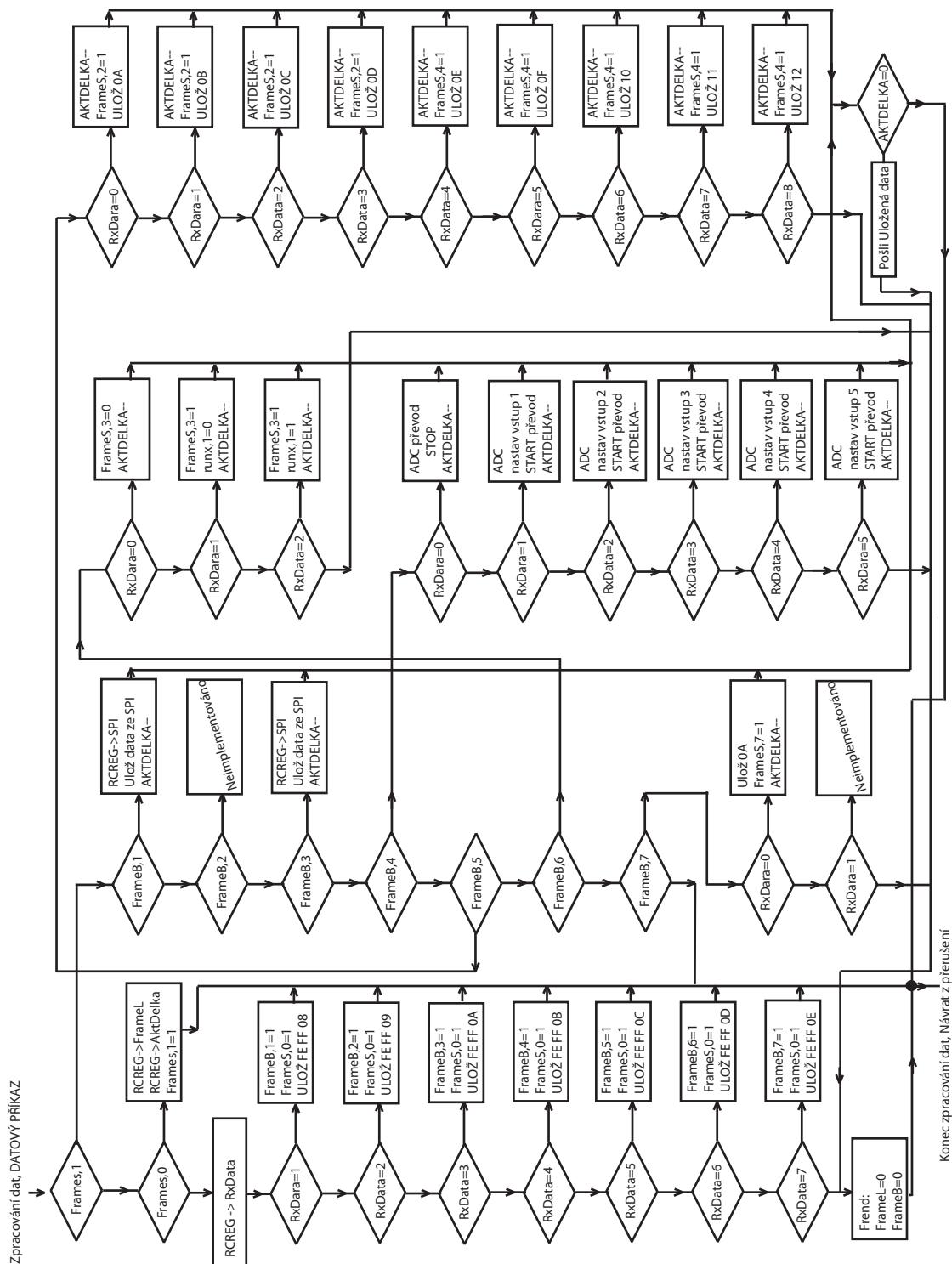
Obrázek 4.1: Stavový diagram řídícího programu

Podle přijatých dat jsou nastaveny bity registru FRAMES pro spuštění odměru dálkoměru a akcelerometru, nebo jsou vyslána data přes SPI k cílovému zařízení. Přerušení časovačem TIMER0 provede inkrementování registru WDT0. Přetečení časovače TIMER0 a zároveň nulová hodnota WDT0 vede k opětné inicializaci ko-

munikačního modulu Bluetooth. Přerušení od časovače TIMER1 (PIR1,TMR1IF) je využíváno při měření ultrazvukovými dálkoměry a při inicializaci modulu Bluetooth. Při měření ultrazvukovým dálkoměrem přerušení od časovače indikuje konec měření a možnost vyslání naměřených dat. Při sestupné hraně na vstupním vývodu 13(RC2/CCP1) mikrokontroléru je vyvoláno přerušení CAPTURE (PIR1,CCP1IF), v jehož obslužné rutině se provede uložení stavu časovače TIMER1 do vnitřní paměti. Stav časovače odpovídá době mezi vysláním ultrazvukového signálu a přijetím signálu odraženého. Bit (PIR1,ADIF) signalizuje, že převod AD převodníkem je u konce a jsou k dispozici data, ty jsou opatřena hlavičkou a vyslána.

Odměr vzdálenosti ultrazvukovým dálkoměrem je spustěn v hlavní smyčce, pokud je nastaven bit (FRAMES,2) nebo (FRAMES,4). Bit (FRAMES,2) spouští cyklické měření, kdy po skončení odměru vzdálenosti a vyslání dat komunikačním modulem je bit nezměněn a měření začíná znova. Bit(FRAMES,4) spouští pouze jeden odměr, po skončení měření je bit nulován. Měření dálkoměrem probíhá následovně: Podle přijatého řídicího příkazu je nastavena adresa multiplexeru 74HC4052 a tím je vybrán jeden z dálkoměrů. Je spuštěn časovač TIMER1, mikrokontrolér vyšle spouštěcí pulz, který aktivuje astabilní klopný obvod CM555. Ten generuje signál kterým je buzen ultrazvukový vysílač. Ultrazvukový přijímač přijme signál, ten je zesílen a je vyhodnocena jeho velikost. Pokud je signál dostatečně silný(přítomnost překážky) dojde k překlopení komparátoru do log. úrovně 0, která vyvolá přerušení CAPTURE mikrokontroléru. Pokud předchozí hodnota časovače TMR1H je různá od nového stavu, je uložena hodnota časovače TIMER1, jinak se neprovádí nic. Postupně jsou uloženy odrazy do paměti, s omezením maximálně 58 odrazů. Při přetečení časovače (cca 60ms) je měření ukončeno a naměřená data opatřena hlavičkou a vyslána komunikačním modulem.

Odměr náklonu, či zrychlení je spuštěno také v hlavní smyčce. Na vstupech připojených k akcelerometrům je detekována nábežná hrana, spuštěn časovač TIMER2 a při příchodu sestupné hrany je hodnota uložena a opět spuštěn. Příchodem další nábežné hrany je měření ukončeno, známe délku periody  $T_1$  a  $T_2 - T_1$  (viz obr. 3.22). Periody měříme pro oba výstupy (osy)akcelerometru.



Obrázek 4.2: Stavový diagram zpracování dat sériového kanálu

## 4.1 Bluetooth-PIC

Pro správu komunikace byla použita knihovna `bt_func.asm`, která je popsána v lit. [4]. Knihovna obsahuje následující makra.

**Define-PIC:** Makro obsahuje všechny definice proměnných, které jsou využívány knihovnou. Dále pak inicializaci všech konstant (adresy bufferů, délky příkazů, adresy příkazů).

**INIT-BT:** Toto makro zajišťuje potřebné nastavení I/O portů, periférií pro sériovou komunikaci, nastavení přerušovacího systému a konfiguraci časovače TIMER1. Dále pak inicializaci všech definovaných proměnných a nulování paměťového bloku pro příjem dat přes UART. Poslední část tohoto makra povolí napájení bluetooth modulu, nastavením logické úrovně 0 na pinu RA4. Následně pak zajistí bezpečný start s časovým zpožděním pro korektní inicializaci, kterou bluetooth modul vyžaduje.

**SET-BT-SLAVE:** Nastavení bluetooth modulu SieMo do stavu slave, aby bylo možné modul nadřízeným modulem nalézt a spojit se sním. K tomu jsou využity HCI příkazy, které jsou popsány v [4]. Definice těchto příkazů jsou umístěny v tabulce na konci hlavního programového kódu(Table-HCI). Při vykonávání instrukcí tohoto makra jsou periférie a přerušovací systém přiděleny knihově BT-func.asm (BTreg,Semf = 1), protože pro odeslání a následnou kontrolu HCI příkazů je využíváno sériového rozhraní mikrokontroléru. K nastavení modulu bluetooth je třeba čtyř HCI příkazů (set event filter, write page scan activity, write inquiry scan activity, write scan enabled).

**CONNECTION?:** Zajišťuje navázání spojení s masterem a to tím způsobem, že ve smyčce čeká na speciální paket, který vyšle modul bluetooth (host controller) mikrokontroléru (host). Ten je následně rozdelen na části a vyhodnocen. Je-li vše úspěšné, je spojení navázáno. Poslední úkol tohoto makra je vypnout scanovací režim modulu SieMo, aby se nehlásil jako slave pro jiný master. To se provede opět příslušným HCI příkazem. Po úspěšném navázání spojení je možné v rámci tohoto makra odeslat přes bezdrátové spojení datový paket a vyčkat na specifickou odpověď od mastera. Tato akce je v programu uvedena pro kontrolu navázaného spojení a lze ji také s výhodou využít jako autorizaci správného mastera. Tuto autorizaci je třeba zapnout před využitím makra CONNECTION? a to nastavením bitu autoriz registru BT-Status (BT-Status ,2). Dojde-li k úspěšnému spojení je od zařízení typu slave poslán požadavek na autorizaci ve formě datového paketu obsahujícího data 01h, 02h, 03h, 04h. Pro úspěšnou autorizaci očekává slave od mastra opět datový

paket v jehož datové části je uložena sekvence 05h, 06h, 07h, 08h. Toto složení autorizačních bajtů je pouze zkušební a lze jednoduše změnit.

## 4.2 Program řídicího počítače

Knihovny použité pro správu spojení a zpracování dat přijatých sériovým portem popisuje paralelně realizovaná diplomová práce [4]. Program využívá několik vláken. První vlákno obsluhuje frontu přijatých dat sériového portu. Při příchodu nových dat jsou tato data pomocí vlákna obsluhy portu přidána na konec bufferu, je vygenerována zpráva, která druhému parsovacímu vláknu dává signál pro spuštění zpracování. Toto vlákno zpracuje a odstraní hlavičku Bluetooth a naplní datovou strukturu zařízení, jehož adresa je definována na počátku datového paketu. Pokud jsou data vyhodnocena jako úplná(obsahující všechny náležitosti), je vygenerována zpráva pro hlavní vlákno, které provede vizualizaci, nebo data zpracuje a použije jako vstup pro regulaci.

# Kapitola 5

## Orientace v prostředí

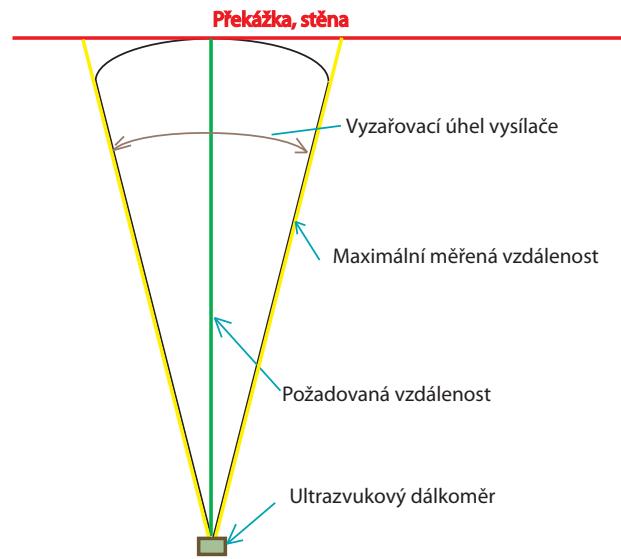
Dva sonary umístěné na servu otočené vůči sobě o  $180^\circ$ , jsou schopné měřit vzdálenost od modelu v horizontální rovině ( $360^\circ$ ) - **scan**, tak si můžeme udělat představu o velikosti, vzdálenosti překážek a členitosti prozkoumávaného prostoru. Při měření v celém rozsahu  $360^\circ$  je nutné, aby byl model v klidu, z důvodu minimalizace zkreslení výsledů měření. Doba trvání odměru je cca 2min. Tato doba je dána jako součet délky trvání odměru (65ms), zpoždění řídicího časovače (min. 150ms - nastaveno kvůli zpracování paketu eventy Bluetooth modulu (viz lit. [4]), o které přesně nevíme za jaký čas po vyslání dat přijde). Doba odměru celého scanu je závislá na velikosti kroku serva, o kolik stupňů je servo natáčeno(tj. do kolika kroků je rozdělena celá otáčka  $180^\circ$ ). Řešením je vytvoření prvního scanu z pevného umístění(např. z doku), tam je pevně umístěn a nedochází ke zkreslení (např. natáčením modelu). Z těchto dat je vytvořena lokální mapa prostoru. Tato mapa je rastrována, tím se zmenší potřebná velikost uchovávaných dat(v řídicím PC).

### 5.1 Zpracování signálu z ultrazvukových dálkoměrů

Při měření je řídicím PC vyslán příkaz pro odměr požadovaným dálkoměrem. Je vyslána akustická vlna, která se po odražení od překážky šíří zpět k modulu, který zaznamená čas mezi vysláním akustické vlny a přijetím odraženého signálu. Modul k PC vyšle naměřená data ve formátu popsaném výše(viz. řídicí modul - komunikační protokol - SONAR). Data jsou přepočtena na vzdálenosti (viz 3.13) vztahem:

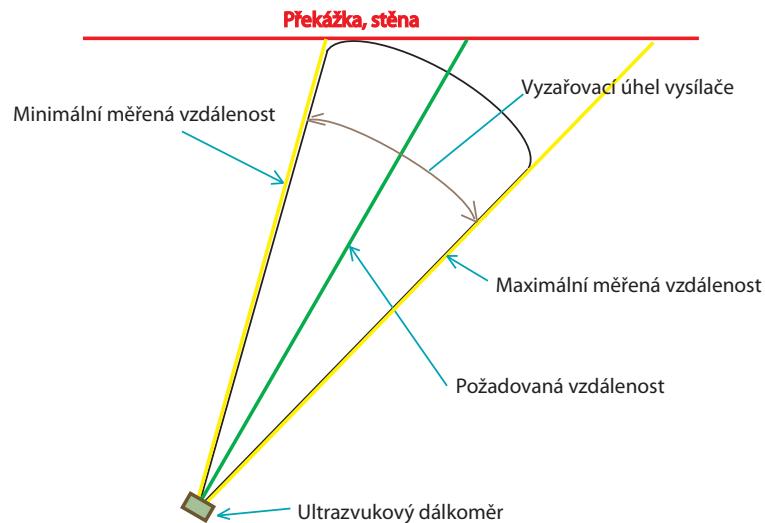
$$s_n = 344 * 1,085 * (d_{2n-1} + d_{2n} * 256) \text{ [\mu m]} \quad (5.1)$$

kde n je pořadové číslo odrazu.



Obrázek 5.1: Ultrazvukový dálkoměr, přímý odraz

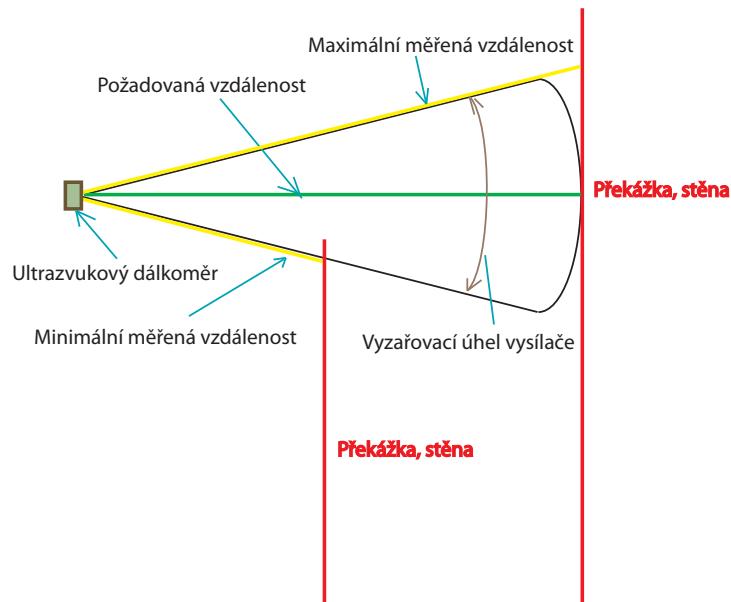
Odraz ultrazvukové akustické vlny závisí na úhlu dopadu signálu(viz. optika [1] a akustika [5]). Modul zaznamenaná několik odrazů jejichž vzdálenost je v intervalu **minimální měřená vzdálenost až maximální měřená vzdálenost** (viz. obr. 5.2). Požadovaná vzdálenost představuje vzdálnost, kterou bychom naměřili, pokud by vyzařovací úhel vysílače byl velmi malý.



Obrázek 5.2: Ultrazvukový dálkoměr, odraz pod úhlem

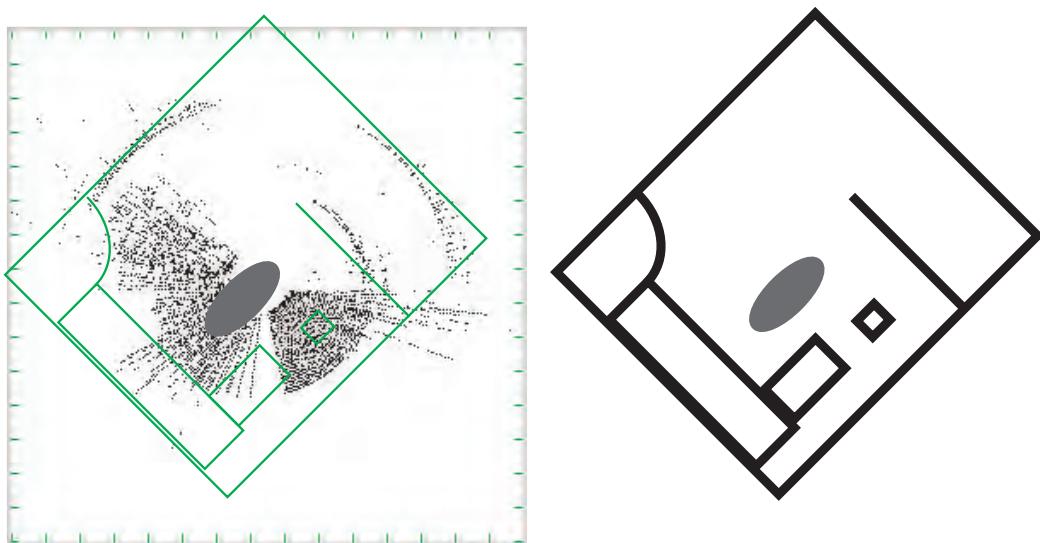
Modul zaznamená odraz ve vzdálenosti **minimální měřená vzdálenost** (odraz od první překážky ve směru šíření akustické vlny), vzdálenosti dalších odrazů jsou v intervalu **požadovaná vzdálenost** až **maximální měřená vzdálenost** (viz. obr. 5.3). **Požadovaná vzdálenost** opět představuje vzdálnost, kterou bychom naměřili, pokud by vyzařovací úhel vysílače byl velmi malý.

Při měření vzdálenosti může docházet k vícenásobným odrazům akustické vlny vlivem přítomnosti překážky ve směru šíření. Ultrazvukový modul je schopen zaznamenat až 29 několikanásobných odrazů.



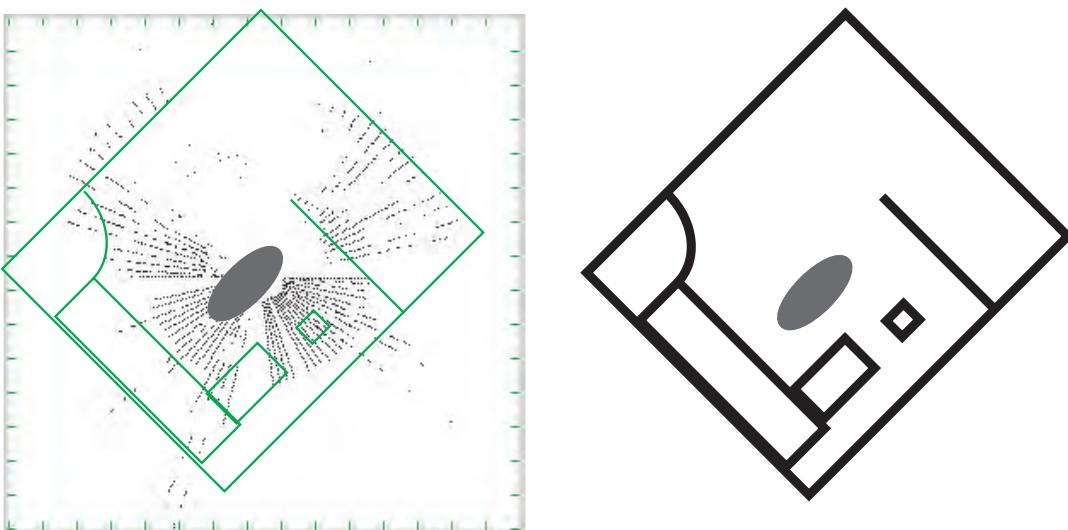
Obrázek 5.3: Ultrazvukový dálkoměr, více překážek

Následující obr. 5.4 zobrazuje naměřená data z dálkoměrů. V měřicím cyklu byl proveden odměr nejdříve jedním, poté druhým dálkoměrem a servo bylo pootočeno o  $2^\circ$ . Po uplynutí doby 500ms byly provedeny další odměry. Tímto způsobem byla měřena vzdálenost mezi otáčejícím se modulem dálkoměru a překážkami na celém rozsahu  $0\text{--}360^\circ$ . Obrázek 5.4 v levé části představuje naměřené vzdálenosti (odrazy - černé body). Měřítko je dáno rastrem (čárky po okraji) 1m/dílek. Model vzducholodi je vyobrazen jako šedá elipsa. V pravé části obrázku 5.4 je zjednodušený model prozkoumávané místonosti s překážkami (stěny, schody, domeček, rameno robotu).



Obrázek 5.4: Lokální mapa, vizualizace naměřených dat

Při zkrácení čekací doby mezi odměry na 200ms (viz obr. 5.5) byl naměřen následující scan.

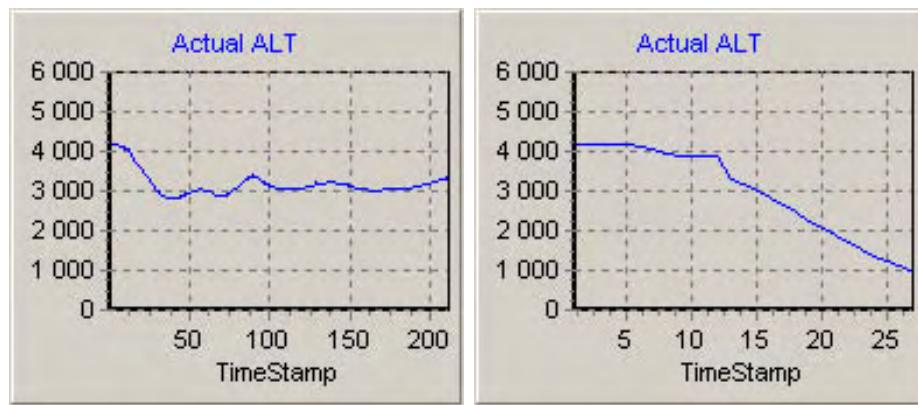


Obrázek 5.5: Lokální mapa, vizualizace naměřených dat

Jsou v modelu místo patrná prázdná místa bez překážek(bílá plocha), kam může směrovat cesta modelu a další průzkum.

### 5.1.1 Regulace výšky

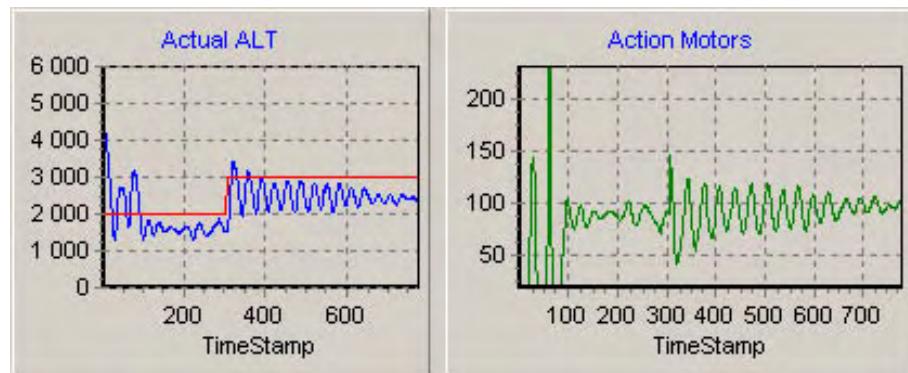
Byl navržen regulátor výšky ovládající otáčky rychlostního motoru. Jako zpětnou vazbu řízení regulátor používá hodnotu vzdálenosti mezi stropem místnosti a modulem ultrazvukového dálkoměru umístěného na vrchní části modelu (obr. 2.1). Konstanty regulátoru lze měnit, byl vyzkoušen jednoduchý regulátor PI. Parametry systému se mění v závislosti na množství plnicí směsi helia, které model nadnáší. Byla zjištována odezva výšky modelu na skok otáček hlavního motoru z 0 na maximální otáčky pro model "vyfouklý" a plně "nafouklý". Následující obrázky (5.6) zobrazují přechodové charakteristiky systému.



Obrázek 5.6: Identifikace, přechodová charakteristika výška

Levý obrázek je přechodová charakteristika "vyfouklého" modelu vzducholodi, napravo "nafouklého".

Následující obrázek (5.7) zobrazuje regulaci výšky modelu. Parametry regulátoru PI jsou  $P=0.055$ ,  $I=0.005$ .



Obrázek 5.7: Regulace výšky

## 5.2 Plánování trasy

Po zapnutí modelu, navázaní komunikačního spojení, umístění modelu na vybrané místo začne měření vzdálenosti modelu od překážek v horizontální rovině (v rozsahu  $360^\circ$ ). Pomocí elektronického kompasu je zjištěno natočení modelu. Hodnota náklonu akcelerometru je použita pro kalibraci kompasu, který by pro přesné měření měl být umístěn ve vodorovné poloze. Kalibrace kompasem měřeného natočení se provede výpočtem:

$$X_p = X_{cal} \cdot \cos \alpha, \quad \delta = \arctg\left(\frac{Y_{cal}}{X_p}\right) \quad (5.2)$$

$X_p$  je přepočtená hodnota složky směrového vektoru  $X_{cal}$ , měřeného el. kompasem,  $Y_{cal}$  je druhou složkou směrového vektoru, úhel  $\alpha$  je úhlem odklonu měřeným inklinometrem,  $\delta$  je již přepočtená hodnota natočení vůči Zemi.

Na základě přijatých dat ultrazvukových dálkoměrů je vytvořena lokální mapa pro dané počáteční umístění. Nyní je možno model řídit požadovaným směrem při udržování požadované výšky a stále měřit přítomnost překážek. Měření vzdálenosti neprobíhá již v rozsahu  $0 - 360^\circ$ , ale v rozsahu  $+/-30^\circ$  ve směru pohybu modelu. To je dostačující k zamezení případné srážky s překážkou. Z výchozí lokální mapy mohou být vytvořeny 2D histogramy(viz. lit [8]), udávající rozložení odrazů v osách x,y. Pokud získáme nový scan překážek a pro toto vytvoříme také 2D histogram, je možné pomocí korelace těchto histogramů získat vzájemné posunutí původních map(scanů). Mapy je však nutné získat pro stejné natočení vzhledem k Zemi(pomocí kompasu). Tato metoda není pro určování polohy nezbytná, jelikož dosah dálkoměrů je dostatečný na to, abychom mohli pomocí stěn určit přibližnou vzdálenost.

# Kapitola 6

## Závěr

Řešení diplomové práce bylo rozděleno na tři části. První část řešení se zabývala návrhem a stavbou řídicí elektroniky modelu. Druhá část se věnovala programu pro mikrokontrolér PIC16F873 umístěném v modelu a třetí část se zabývala přenosem, zpracováním a vizualizací naměřených dat programem v PC. Návrh a realizace elektroniky probíhalo po etapách. Nejdřív probíhal vývoj ultrazvukového dálkoměru. Byly navrženy a postaveny moduly, jejichž dosah je dostačující v testované místnosti K909. Dálkoměry byly nejdříve řízeny mikrokontrolérem PIC16F877 (pomocí řídicích příkazů z PC) a data byla přenášena sériovým portem přímo do PC. Pro tento účel byl navržen a realizován jednoduchý komunikační protokol. Na počítači probíhala vizualizace naměřených dat. Zvolením vhodnějšího mikrokontroléra PIC16F873 v pouzdro SMD s menším(ale dostačujícím) počtem vývodů a menší hmotností byl vytvořen testovací prototyp modulů elektroniky. Byla oddělena funkce řízení serv a motorů vytvořením samostatného modulu. Byly vytvořeny moduly akcelerometrů, pomocí nichž je měřen náklon(statické zrychlení) a zrychlení modelu ve dvou horizontálních osách.

Jako základ pro implementaci bezdrátového přenosu dat byly využity poznatky a postupy popsané v paralelně realizovaná diplomové práci [4], která řešila bezdrátovou komunikaci a přenos dat s využitím technologie Bluetooth, byly využity jako základ pro implementaci bezdrátového přenosu dat. Původně navržený protokol pro sériový přenos dat byl rozšířen a byly implementovány funkce protokolu Bluetooth pro globální přenos dat ze vzducholodě do nadřízeného PC.

V řídicím PC byla vytvořena vizualizace naměřených dat z ultrazvukových dálkoměrů, na základě nichž je prováděno vzdálené řízení.

Lze provést řadu inovací způsobů měřicích metod. Funkci ultrazvukových dálkoměrů by bylo možné zdokonalit směrováním akustické vlny(formováním směrové charak-

teristiky) pomocí kužele či válce umístěného na ultrazvukovém senzoru, čímž dostaneme signál směrový, ale ztrácíme na síle akustického signálu.

Dalším nedostatkem je dlouhá doba vytváření mapy prostředí(scanu). Možností, jak urychlovat tvorbu mapy, je použít v modelu výkonější procesor s velkou kapacitou vnitřní paměti RAM, odměry dálkoměry a natáčení serva řídit automaticky, data uchovávat v této paměti a poslat je řídicímu PC najednou po dokončení celého scanu ( $360^\circ$ ). Dojde tím ke zkrácení doby, po kterou probíhá komunikace a potvrzování dat(eventy od lokálního modulu Bluetooth). Procesor by nemusel vysílat příkazy pro servo a dálkoměry, čekat na potvrzení přijetí řídicího příkazu(event). Doba vytvoření scanu by se zkrátila na 11.7s ( $90 \times 2 \times 65\text{ms} = 11.7\text{s}$ , 90 kroků serva na ot., tj  $2^\circ$  krok, dva dálkoměry, odměr délky 65ms). Data by byla poté vyslána a na potvrzení bylo nutné čekat jen jedenkrát.

Cílem práce bylo nalézt způsob, který umožní modelu vzducholodi orientovat se v prostoru. K tomuto účelu byly použité ultrazvukové dálkoměry, akcelerometry a elektronický kompas. Použitelnost ultrazvukových dálkoměrů je omezena díky nedostatkům senzorů(velký vyzařovací úhel směrové charakteristiky). Dálkoměry lze použít pro detekci kolize s překážkou, osvědčily se také pro vcelku přesné měření výšky(dávající stabilní výsledky), ale pro tvorbu přesnějšího modelu místonosti nejsou vhodné. Při použití akcelerometrů pro určování polohy vycházíme z faktu, že dráha je dána jako dvojný integál zrychlení, kterým se určí přírůstek polohy. Vlivem nedokonalosti senzoru(teplotní drift - i když je senzor nehybný, senzor měří nenulové zrychlení), jsou při integrování chyby tak velké, že jsou údaje nepoužitelné. Elektronický kompas, měřící natočení modelu vůči Zemi je citlivý na elektromagnetické rušení a proto je nutné provádět jeho kalibraci.

Z předešlého je vidět, že měření pozice modelu je zatíženo chybou, která závisí na stacionárních i proměnných parametrech zkoumaného prostoru(tvar místonosti, rozmístění překážek, odrazivost materiálu, akustické a magnetické rušení). Získané výsledky jsou přibližné. Řešením pro zlepšení funkce lokalizace je provedení výše uvedených inovací, či využití nových technologií.

# Literatura

- [1] JELEN, J. (1998). *Fyzika II.* Vydavatelství ČVUT, Praha.
- [2] KUBEŠ, P. a KYNCL, Z. (1999). *Fyzika I.* Vydavatelství ČVUT, Praha.
- [3] KTE-MAGAZÍN PRAKTICKÉ ELEKTRONIKY, č. 5, ROČNÍK V (1997). Vydává KTE Short market - Pavel Krátký, Praha.
- [4] PERMAN, P. (2005). *Diplomová práce Dálkové řízení modelu.*
- [5] JIŘÍČEK, O. (2002). *Úvod do akustiky.* Vydavatelství ČVUT, Praha.
- [6] PUNČOCHÁŘ J. (1997). *OPERACNÍ ZESILOVAČE v elektronice.* Vydavatelství BEN, Praha.
- [7] MORAVEC H. P. a ELFES A. (1985). *High Resolution Maps from Wide Angle Sonar.* The Robotics Institute, Carnegie-Melon University.
- [8] DUCKETT T. a NEHZOW U. (2001). *Mobile robot self-localization using occupancy histograms and a mixture of Gaussian location hypotheses.* Robotics and Autonomous Systems, ELSEVIER.
- [9] DEVANTECH. Dálkoměr SRF04 [online].  
<http://info.hobbyengineering.com/specs/devantech-srf04-tech.pdf>
- [10] ZAJÍC, J. Nabíječka pro modeláře [online].  
<http://www.zajic.cz>.
- [11] MICROCHIP, Mikrokontrolér PIC16F873 [online].  
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/30292c.pdf>
- [12] MICROCHIP, Mikrokontrolér PIC16F819 [online].  
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39598e.pdf>

- [13] PNI CORP., V2Xe Elektronický kompas [online].  
<https://www.pnicorp.com/downloadResource/c40c/manuals/73/V2Xe+Manual.pdf>
- [14] ANALOG DEVICES, Akcel. ADXL202AE [online].  
[http://www.analog.com/UploadedFiles/Data\\_Sheets/70885338ADXL202\\_10\\_b.pdf](http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/70885338ADXL202_10_b.pdf)
- [15] MAXIM [online]. <http://www.maxim.ic-com>.
- [16] MAXIM, APLIKAČNÍ POZNÁMKA MAX608 [online].  
[http://www.maxim.ic-com/appnotes.cgm/appnote\\_number/194](http://www.maxim.ic-com/appnotes.cgm/appnote_number/194).
- [17] MAXIM MAX608 Maxim [online]  
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/MAX608.pdf>
- [18] MAXIM MAX755 Maxim [online]  
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/MAX735-755.pdf>
- [19] MAXIM MAX748A Maxim [online]  
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/MAX748A-MAX763A.pdf>
- [20] MAXIM MAX641 Maxim [online]  
<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/MAX641-MAX643.pdf>

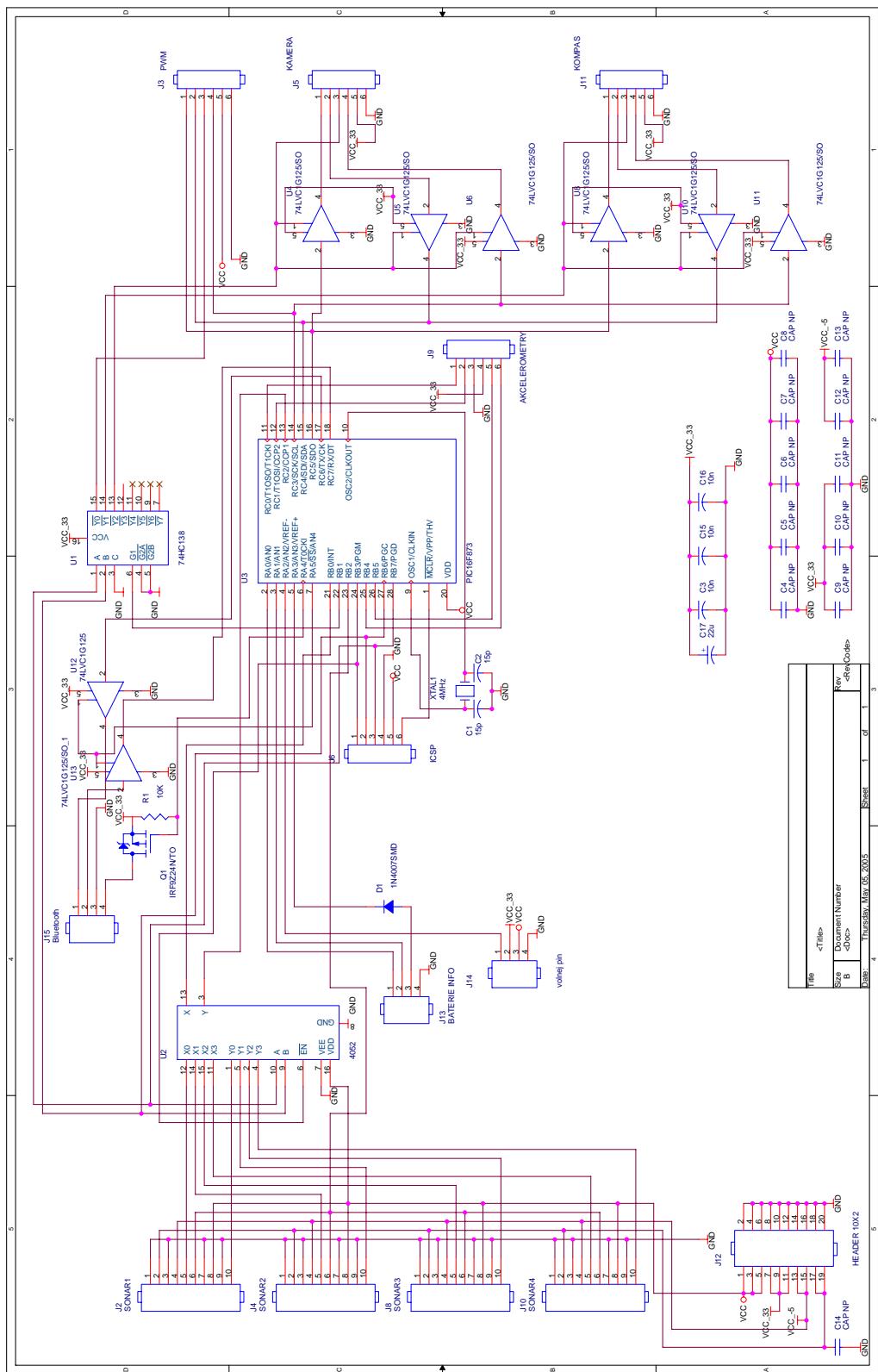
# Dodatek A

## Obsah přiloženého CD

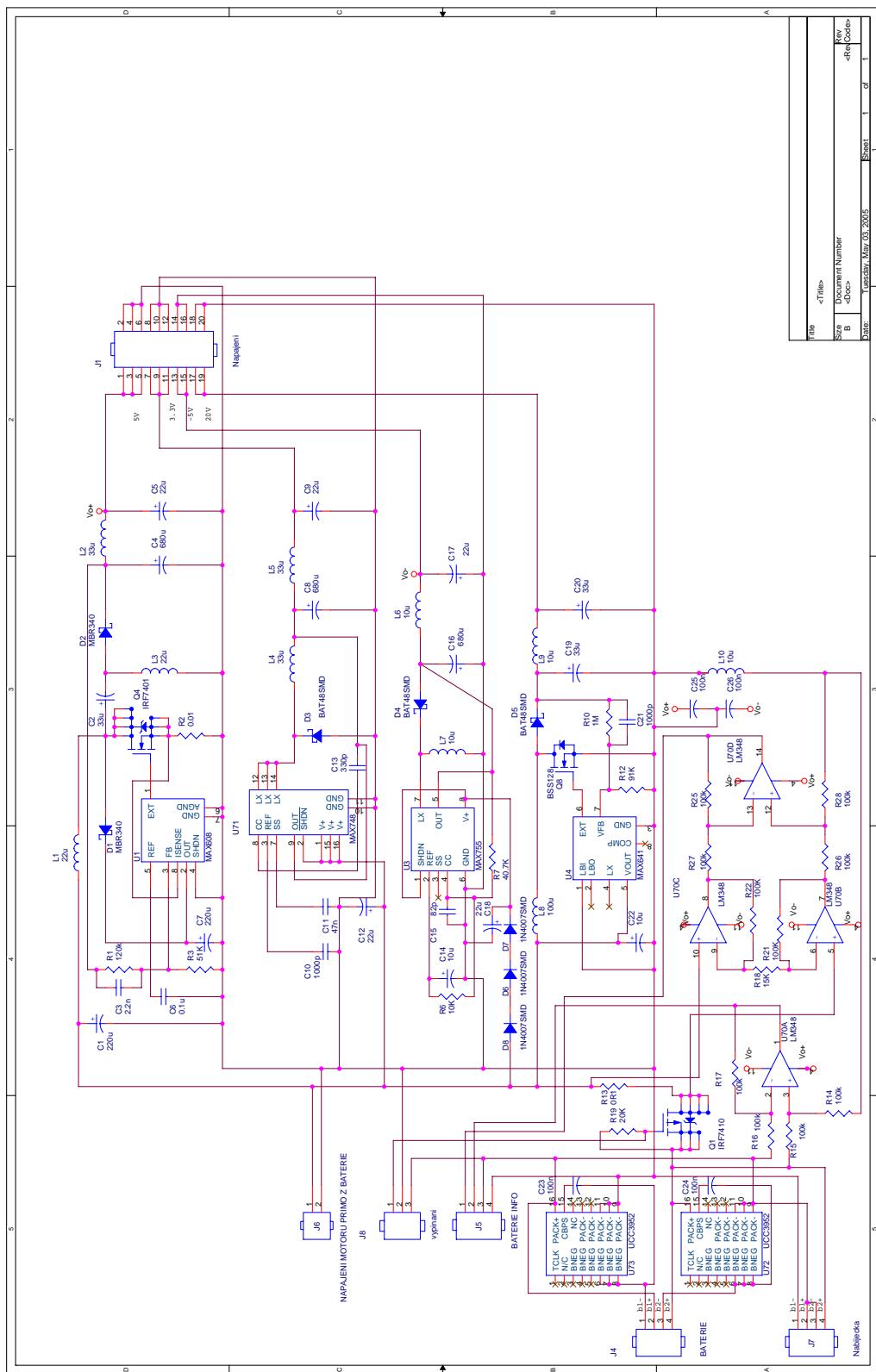
- Zdrojové kódy pro řídící mikrokontrolér  
*/Pic*
- Obslužný program pro řídící počítač  
*/Program*
- Elektronická schémata, desky plošných spojů  
*/OrCad/Main*  
*/Orcad/DcDc*  
*/Orcad/Sonar*  
*/Orcad/PWM*  
*/Orcad/Akcel*
- Dokumentace, datasheety  
*/Doc*  
*/Doc/Akcelerometr*  
*/Doc/Pic*  
*/Doc/Kompas*  
*/Doc/MaximDCDC*

## **Dodatek B**

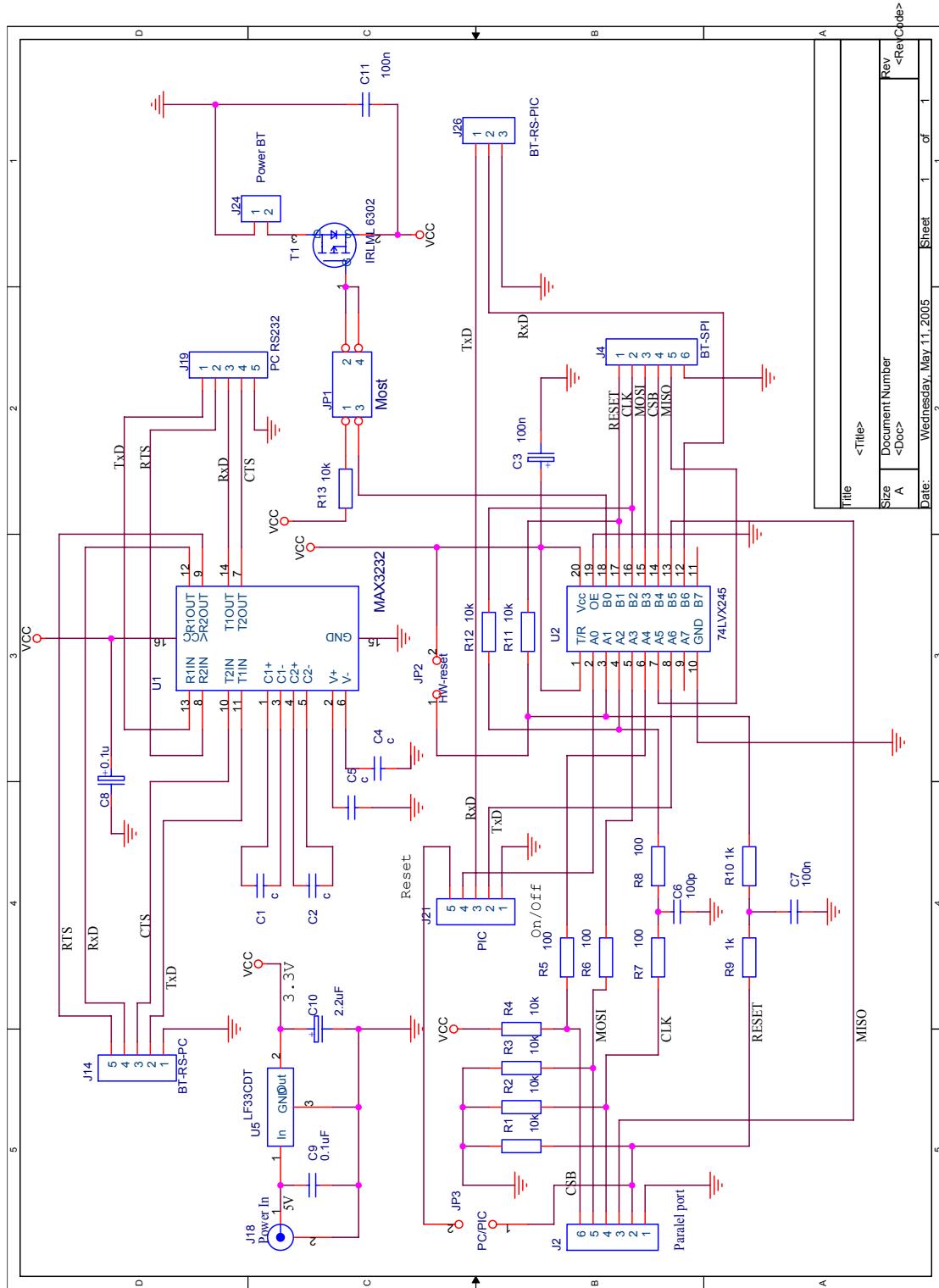
### **Obrazová příloha**



Obrázek B.1: Schéma zapojení řídícího modulu

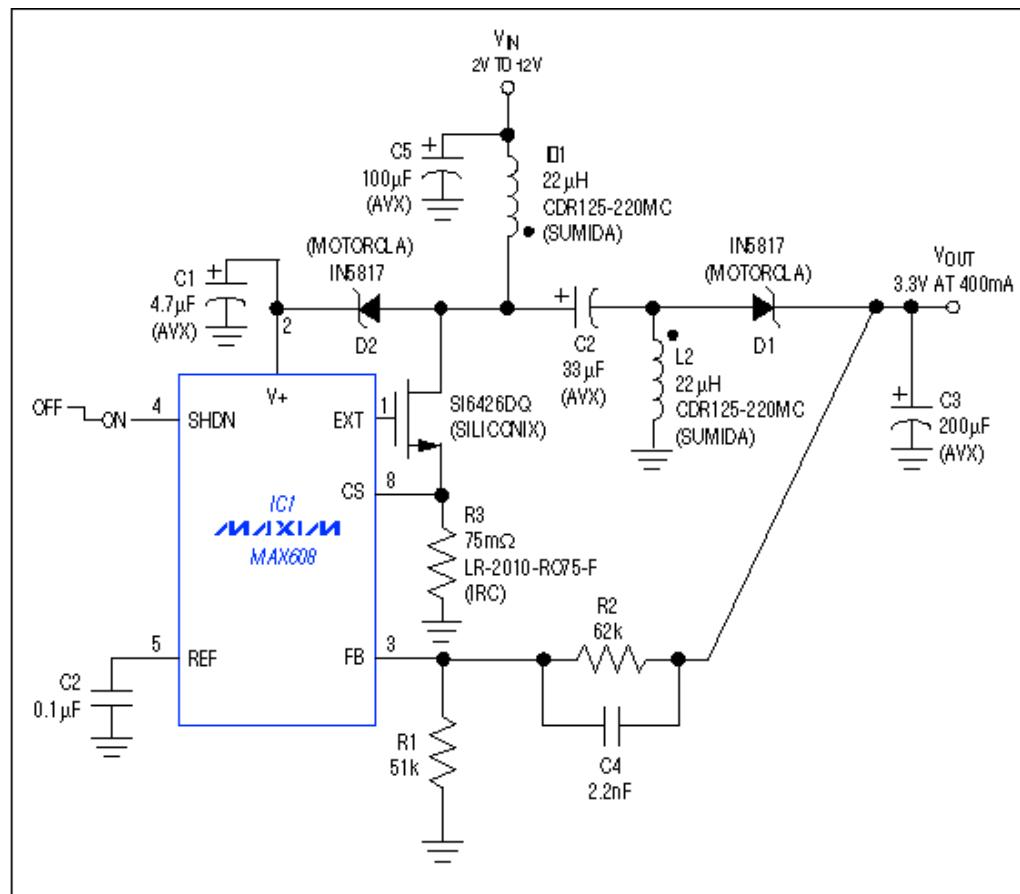


Obrázek B.2: Schéma zapojení napájecího modulu

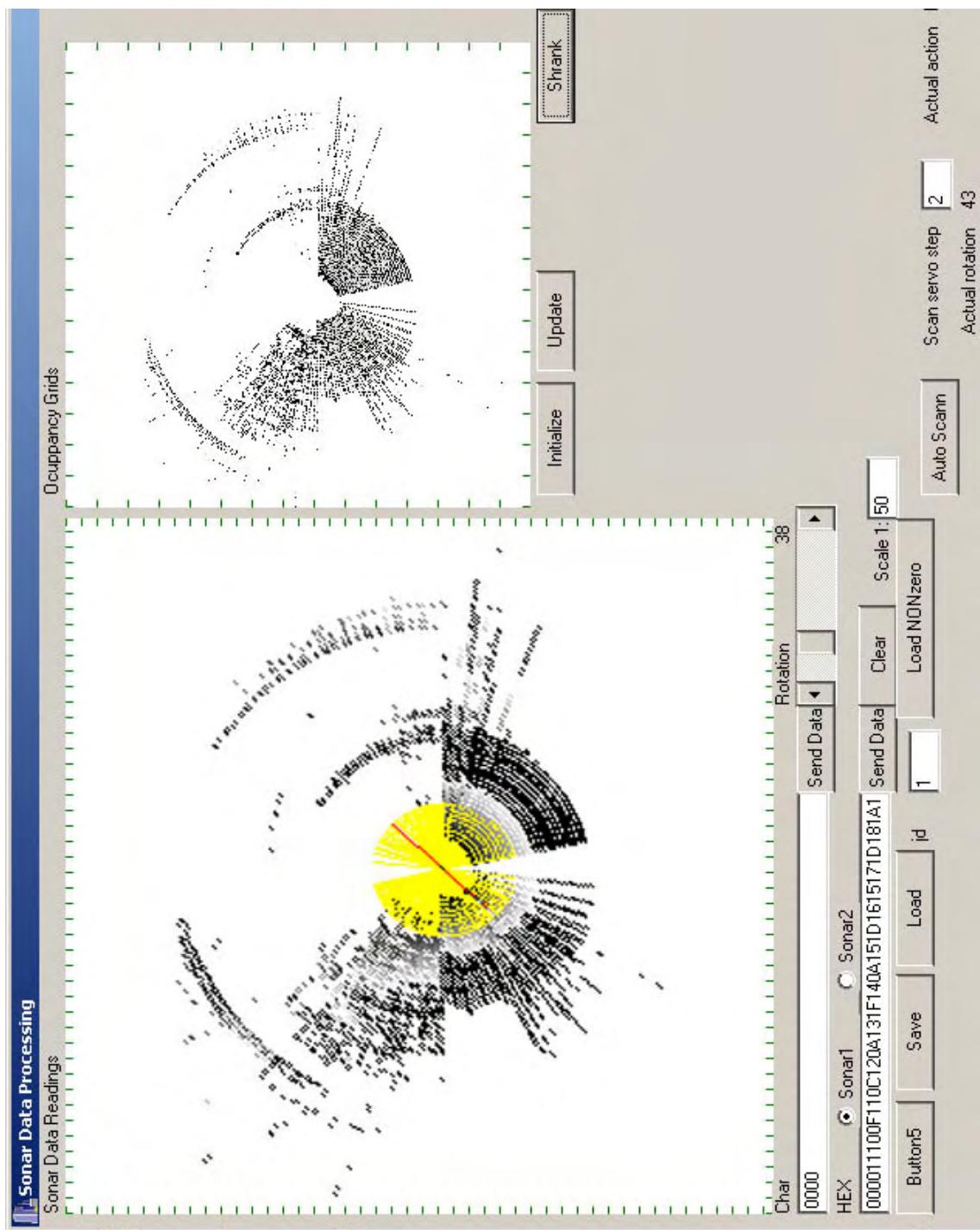


Obrázek B.3: Schéma zapojení vývojového kitu

Obrázek B.4: MAX 608, step-up/step-down modifikace



Obrázek B.5: Vizualizace naměřených dat z dálkoměrů



## **Dodatek C**

### **Seznam součástek**

Reference	hodnota	popis	počet kusů
C2,C1	15p	SMD0805	2
C3	10n	SMD0805	1
C5,C4	680u-6.3V		2
J1	HEADER1x6	SPI	
J2	HEADER1x6	ICSP	
J4	HEADER1x3	M6	
J5	HEADER1x3	M5	
J6	HEADER1x3	M4	
J7	HEADER1x3	M3	
J8	HEADER1x3	M2	
J9	HEADER1x3	M1	
J10	HEADER1x2	MOTORY BAT	
L1	10u	SMD	1
R1	10K	SMD0805	1
U1	PIC16F819SO	SO18	
XTAL1	20MHz	SM	1

Tabulka C.1: Seznam součástek, Modul řízení motorů a serv PWM

Reference	hodnota	popis	počet kusů
C1,C2,C6,C8,C9	100n	SMD0805	5
C4,C3	1u	SMD tant.	2
C5	1n	SMD0805	1
C7,C10	10n	SMD0805	2
C11	220	SMD0805	1
L1,L2,L3,C110	10u	tlumivka axial.	4
C112,C111	47u		2
ISO1	PC356	SMD	1
J1	SONAR	HEADER1x10	1
MK1	UST40T		1
MK2	UST40R		1
R1	68K	SMD0805	1
R2	4.7K	SMD0805	1
R3,R6,R11	1K2	SMD0805	3
R12,R4	50K	SMD0805	2
R5	62K	SMD0805	1
R7,R8,R9,R10	1M	SMD0805	4
R14,R15	10K	SMD0805	2
R116	22K		1
U2,U1	OP27GS	SO8	2
U3	LM311	SMD SO8	1
U4	NE555	SMD SO8	1

Tabulka C.2: Seznam součástek, Ultrazvukový dálkoměr

Reference	hodnota	popis	počet kusů
C2,C1	15p	SMD0805	2
C3,C15,C16	10n	SMD0805	3
C4 až C14	100n	SMD0805	11
C17	22u	SMD tant.	1
D1	1N4007SMD		1
J2	HEADER1x10	SONAR1	1
J3	HEADER1x6	PWM	1
J4	HEADER1x10	SONAR2	1
J5	HEADER1x6	KAMERA	1
J6	HEADER1x6	ICSP	1
J8	HEADER1x10	SONAR3	1
J9	HEADER1x6	AKCELEROMETRY	1
J10	HEADER1x10	SONAR4	1
J11	HEADER1x10	KOMPAS	1
J12	HEADER 10X2		1
J13	HEADER 1x4	BATERIE INFO	1
J14	HEADER 1x4	signalizace LED	1
J15	HEADER 1x6	Bluetooth	1
Q1	IRF9Z24N/TO		1
R1	10K	SMD0805	1
U1	74HC138	SMD SO	1
U2	4052	SMD SO	1
U3	PIC16F873	SMD SO	1
U4-U6,U8,U10-U13	74LVC1G125SO	SOT23-5	8
XTAL1	3.6864MHz	SM	1

Tabulka C.3: Seznam součástek, Řídicí modul

Reference	hodnota	popis	počet kusů
C1,C7	220u/10V	SMD tant.	2
L2,L4,L5,	33u	SMD tl.	3
C2,C19,C20	33u/35V	SMD tant.	3
C3	2.2n	SDM0805	1
C4,C8,C16	680u	6.3V	3
L1,L3	22u	SMD TL.	2
C5,C9,C12,C17,C18	22u/16V		5
C6	0.1u	SDM0805	1
C10,C21	1000p	SDM0805	2
C11	47n	SDM0805	1
C13	330p	SDM0805	1
L6,L7,L9,L10	10u	SMD tl.	4
C14,C22	10u	SMD tant.	2
C15	82p	SDM0805	1
C23,C24,C25,C26	100n	SDM0805	4
D1,D2	MBR340		2
D3,D4,D5	BAT48SMD		3
D6,D7,D8	1N4007SMD		3
J1	HEADER1x4	Napajeni	1
J4	HEADER1x4	BATERIE	1
J5	HEADER1x4	BATERIE INFO	1
J6	HEADER1x2	NAP.MOT.Z.BAT.	1
J7	HEADER1x4	Nabijecka	1
J8	HEADER1x4	vypinani	1
L8	100u	axialni.tl.	1
Q1	IRF7410	SO8	1
Q4	IRF7401	SO8	1
Q8	BSS128	SOT23	1
R1	120k	SDM0805	1
R2	0.01	SDM0805	1
R3	51K	SDM0805	1
R6	10K	SDM0805	1
R7	39K	SDM0805	1
R10	1M	SDM0805	1
R12	91K	SDM0805	1
R13	0R1	drátový 3W	1
R14-R17,R21,R22,R25-R28	100k	SDM0805	10

Tabulka C.4: Seznam součástek, Napájecí modul

Reference	hodnota	popis	počet kusů
R18	15K	SMD0805	1
R19	20K	SMD0805	1
U1	MAX608	SMD SO8	1
U3	MAX755	SMD SO8	1
U4	MAX641	SMD SO8	1
U70	LM348	SMD SO8	1
U71	MAX748	SMD SO16	1
U73,U72	UCC3952	SMD DP	2

Tabulka C.5: Seznam součástek, Napájecí modul(pokračování)

Reference	hodnota	popis	počet kusů
C1	0.1	SMD0805 keram.	1
C2	10u/6.3V	SMD tant.	1
C4,C3	0.1u	SMD0805 keram.	2
J1	HEARDER1x6	k ridicímu modulu	1
R1	1M	SMD0805	1
U1	ADXL202AE	akcelerometr	1

Tabulka C.6: Seznam součástek, Modul akcelerometru

Reference	hodnota	popis	počet kusů
C1	100n	SMD0805 keram.	1
C2	680u/6.3V tant.		1
J1	HEADER1x6	MAIN-SPI KOMPAS	1
J2	HEADER1x6	MAIN-AKCELER	1
J3	HEADER1x7	KOMPAS1-7	1
J4	HEADER1x7	KOMPAS8-14	1
J5	HEADER1x6	Akcelerometr1	1
J6	HEADER1x6	Akcelerometr2	1
U1	TPS3824	SOT23-5	1

Tabulka C.7: Seznam součástek, Modul připojení el. kompasu a akcelerometrů