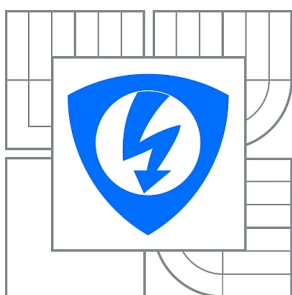




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

BEZDRÁTOVÝ TELEMETRICKÝ SYSTÉM PRO RC MODEL

WIRELESS TELEMETRY SYSTEM FOR RC MODEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PETER ČAMAJ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ ŠEBESTA, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Peter Čamaj

ID: 125390

Ročník: 3

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Bezdrátový telemetrický systém pro RC model

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte rozbor řešení telemetrického systému pro bezdrátový přenos palubních veličin z RC leteckého modelu. Zaměřte se na výběr vhodného bezlicenčního komunikačního systému a senzory palubních veličin. Vyberte vhodné základní komponenty systému. Navrhněte komplexní obvodové zapojení palubní jednotky a pozemní jednotky včetně návrhu plošných spojů. Sestavte obě jednotky a proveďte základní oživení. Sestavte řídicí firmware mikrokontrolérů jednotek. Prakticky ověřte funkčnost systému a stanovte jeho parametry.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BURKHARD, M. C pro mikrokontroléry. Praha: BEN - technická literatura, 2003.

[2] Sensors Selector Guide [Online]. Freescale Semiconductor, 2009. Dostupné na:
<http://www.freescale.com/files/shared/doc/selector_guide/SG1010.pdf>

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 25.5.2012

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Šebesta, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Táto práca sa venuje návrhu a realizácii bezdrôtového telemetrického systému, ktorý je špeciálne určený pre použitie v modeli lietadla na diaľkové ovládanie. Rieši softwarovú aj hardwarovú realizáciu telemetrického systému, ktorý je schopný bezdrôtovo odosielať namerané palubné veličiny, ktoré sa následne prehľadne zobrazujú pomocou LCD displeja, a tak isto aj reprezentujú zvukovo.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

telemetria, bezdrôtové meranie, Atmel, RC model lietadla, meranie rýchlosti, meranie prúdu, meranie výšky

ABSTRACT

This project deals with design and realization of wireless telemetry system, which is special used in model of plane on remote control. It solves software and hardware realization of the telemetry system, which is able to wirelessly transmit the measured cockpit values, which are clearly displayed on LCD and also represented by sound.

KEYWORDS

telemetry, wireless measuring, Atmel, RC model of plane, velocity, current measurement, altitude measurement

ČAMAJ, P. *Bezdrátový telemetrický systém pro RC model*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2012. 37 s., 11 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Šebesta, Ph.D.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému „Bezdrátový telemetrický systém pro RC model“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej 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 bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tohto projektu som neporušil autorské práva tretích osôb, hlavne 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 Zb., vrátane možných trestne právnych dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení § 152 trestného zákona č. 140/1961 Zb.

V Brne dňa

.....

(podpis autora)

POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce doc. Ing. Jiří Šebesta, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

V Brne dňa

.....

(podpis autora)

OBSAH

Zoznam Obrázkov	vi
Zoznam tabuliek	viii
Úvod	1
1 Rozmanité podoby telemetrie	2
1.1 Možné podoby telemetrie	2
1.2 Výber modelu	3
1.2.1 Popis zapojenia lietadla	4
1.3 Výber fyzikálnych veličín zaujímavých na meranie.....	5
2 Spôsoby merania palubných veličín	6
2.1 Meranie elektrického napätia.....	6
2.2 Meranie elektrického prúdu	7
2.2.1 Vznik Hallovho javu	7
2.3 Meranie tlaku	8
2.4 Meranie výšky.....	8
2.5 Meranie rýchlosti	9
2.5.1 Pitotova trubica	9
2.6 Meranie zrýchlenia	10
2.7 Určenie globálnej polohy.....	10
2.8 Meranie teploty	11
3 Návrh telemetrického systému	12
3.1 Návrh na úrovni funkčných blokov	12
3.1.1 Vysielacia časť telemetrie.....	12
3.1.2 Prijímacia časť telemetrie	14
4 Možnosti realizácie systému	15
4.1 Napäťové úrovne	15
4.2 Bezdrôtový prenos	15
4.2.1 XBee –PRO.....	16
4.3 Platforma STAX	16

4.3.1	Mikrokontroler Atmel ATxmega128a3 [9]	17
4.3.2	Voľba napät'ovej referencie	18
4.4	Meranie napätia.....	19
4.5	Meranie zrýchlenia	20
4.5.1	Akcelerometer MMA7660FC [12]	21
4.6	Meranie výšky.....	21
4.6.1	Barometrický senzor tlaku BMP085 [14].....	21
4.7	Meranie prúdu.....	22
4.7.1	Hallový senzor elektrického prúdu ACS758LCB-100B-PFF-T [15] ..	22
4.8	Meranie rýchlosti	24
4.8.1	Piezorezistívny snímač tlaku MPXV5004GP [16]	24
4.9	Napájanie celého systému.....	26
4.9.1	Regulátor napätia s veľmi nízkym poklesom napätia KF50BD	27
4.9.2	Regulátor napätia s veľmi nízkym poklesom napätia LP3874 [13] ...	27
4.10	Zobrazovacia časť	28
4.10.1	Znakový LCD DE-LM00 [18].....	28
5	Popis riadiacich programov telemetrie	29
5.1	Popis programu pre vysielaciu časť	29
5.1.1	Popis merania výšky	30
5.2	Popis programu pre prijímaciu časť	32
6	Popis zariadenia a stanovenie jeho parametrov	33
6.1	Popis vysielacej časti telemetrie	33
6.2	Popis prijímacej časti telemetrie	34
6.3	Parametre zariadenia.....	35
7	Záver	37
	Literatúra	38
	Zoznam symbolov, veličín a zkratiek	40
	Zoznam príloh	41

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1.1 Bloková schéma zvukovej telemetrie	2
Obr. 1.2 Bloková schéma opticko-zvukovej telemetrie s možnosťou diaľkového spustenia.....	3
Obr. 1.3 Model Skyfun určený pre telemetriu	3
Obr. 1.4 Palubné zapojenie elektroniky.....	4
Obr. 2.1 Princíp kvantovania prevzaté z [1]	7
Obr. 2.2 Princíp funkcie Hallovhov javu prevzaté z [2]	8
Obr. 2.3 Pitotova trubica a jej princíp prevzaté z [4].....	10
Obr. 3.1 Bloková schéma vysielacej časti	13
Obr. 3.2 Bloková schéma prijímacej časti	14
Obr. 4.1 Diagram prenosu XBee prevzaté z [7]	16
Obr. 4.2 Usporiadanie vývodov ATxmega128a3 prevzaté z [10]	18
Obr. 4.3 Schéma zapojenia referenčného zdroja LM4040AIM3.....	19
Obr. 4.4 Návrh sústavy deličov v programe Micro-Cap.....	20
Obr. 4.5 Konfigurácia výstupovBMP085 prevzaté z [14]	22
Obr. 4.6 Zapojenie meracieho obvodu s BMP085.....	22
Obr. 4.7 Konfigurácia vývodov prevzaté z [15]	23
Obr. 4.8 Zapojenie meracieho obvodu s ACS758LCB	23
Obr. 4.9 MPXV5004Ga jeho usporiadanie vývodov prevzaté z [16].....	24
Obr. 4.10 Zapojenie experimentálneho merania rýchlosti.....	25
Obr. 4.11 Výstupné napätie tlakového senzora v závislosti na rýchlosti	25
Obr. 4.12 Závislosť výstupného napätia na tlaku prevzaté z [16]	26
Obr. 4.13 Zapojenie meracieho obvodu s MPXV5004GP	26
Obr. 4.14 Konfigurácia vývodov KF50B prevzaté z [17]	27
Obr. 4.15 Zapojenie obvodu KF50B	27
Obr. 5.1 Popis funkcie vysielacej časti telemetrie	30
Obr. 5.2 Formát paketu odosielaných dát do RF modulu	30
Obr. 5.3 Popis funkcie tlakového senzora BMP085	31
Obr. 5.4 Popis funkcie prijímacej časti telemetrie.....	32
Obr. 6.1 Vyhotovenie vysielacej časti telemetrie	33

Obr. 6.2 Vyhotovenie prijímacej časti telemetrie	34
Obr. 6.3 Zobrazenie štatistických hodnôt veličín v prijímacej časti.....	35

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 4.1 Parametre jednotlivých meracích obvodov	15
--	----

ÚVOD

Slovo telemetria by sa dalo aproximovať pojmom bezdrôtové meranie. Preto sa táto práca venuje hlavne problematike merania a získavania fyzikálnych veličín vzdialeného prostredia. Konkrétne sa bude jednať o model lietadla, ktorý sa pohybuje vo vzdušnom prostredí. Je poháňaný elektromotorom a je ovládaný pomocou rádiovkej súpravy zo zeme.

Práca má mať hlavne budúce uplatnenie v rôznych modeloch, preto je dbaný veľký ohľad na merané veličiny, ktoré vie modelár prakticky využiť. Tak isto je potrebné systém navrhnuť tak, aby bol vhodný pre použitie v rôznych modeloch a ponúkal budúcu rozšíriteľnosť.

Merat' sa má predovšetkým napätie palubného akumulátora, vďaka ktorému funguje celý systém ovládania. Takisto je zaujímavá aj hodnota prúdu z batérie do regulátora, na základe ktorej sa dá určiť výkon motora a spotreba celého systému v rôznych letových režimoch. Veľmi nápomocná vie byť tiež výška modelu nad zemou a na základe sledovania jej zmeny je možné lepšie vyhl'adať termické prúdenia v atmosfére. Tieto veličiny a rôzne ďalšie sú pomocou bezdrôtového modulu prenesené na zem, kde sú zobrazené a uchované pre ďalšie vyhodnotenie. Analýzou nameraných veličín je možné ovplyvniť vyladenie palubných komponentov do bodu, ktorý je pre každý model jedinečný.

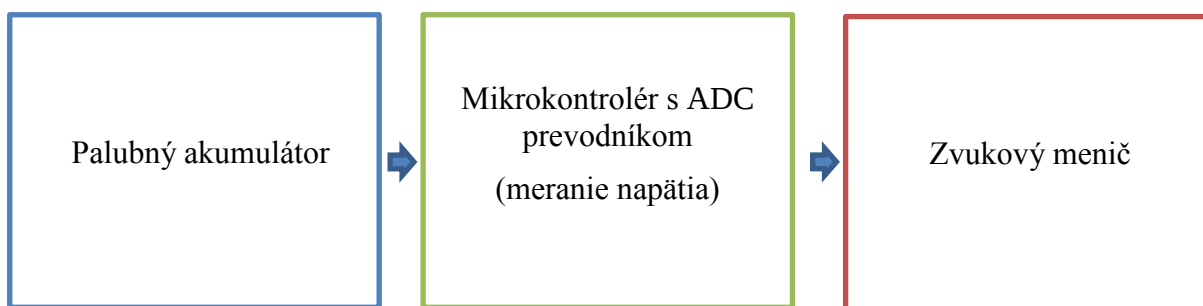
Práca je koncipovaná do 6. kapitol, v ktorých je problematika diaľkového merania a jeho implementovania do praxe postupne rozvíjaná od teórie, ktorá je pomerne stručná, až po samotnú realizáciu hardwarovej a softwarovej časti. Tak isto je v práci zahrnutá technická dokumentácia.

1 ROZMANITÉ PODOBY TELEMETRIE

Táto kapitola je venovaná prehľadu telemetrických zariadení, určených pre modely lietadiel ovládaných pomocou rádiovkej súpravy (RC). Ďalej je venovaná výberu modelu a fyzikálnym veličinám, ktoré sú zaujímavé pre meranie.

1.1 Možné podoby telemetrie

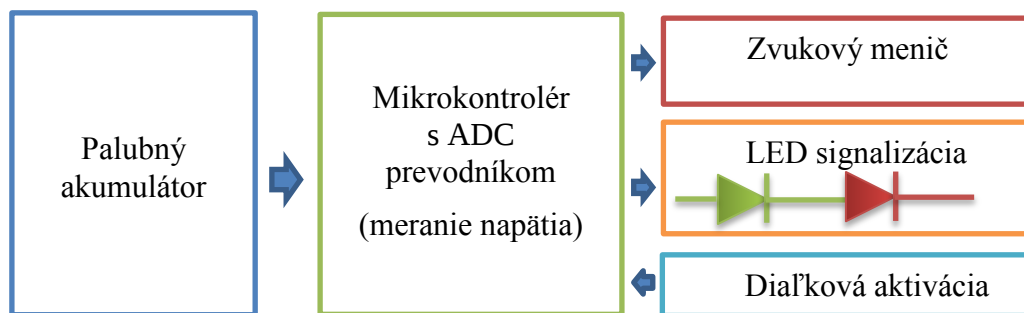
Hlavnou úlohou telemetrie je poskytnúť pilotovi lietadla modelu informácie o stave palubných veličín. Ako najjednoduchšia možná telemetria je zvuková signalizácia blížiaceho sa vybitia palubného akumulátora. Jej princíp je veľmi jednoduchý. Analógovo-digitálnym prevodníkom (ADC) by bolo sledované napätie batérie a pri prekročení určitej zvolenej hranice by došlo k zvukovej reprezentácii, že napätie batérie kleslo pod určitú hranicu. S ďalším klesaním napätia batérie by zvukový menič vydával naliehavejší tón.



Obr. 1.1 Bloková schéma zvukovej telemetrie

Zvuková telemetria je užitočná, ale dosah zvuku je limitovaný výkonom zvukového meniča. Ďalším jednoduchým spôsobom telemetrie, je kombinácia zvukovej telemetrie s optickou. Pomocou LED diód rôznej farby je možné tiež reprezentovať napätie palubného akumulátora. Zelená LED dióda by značila, že batéria má bezpečné napätie a červená by naopak značila kritické napätie. Takto zostrojený telemetrický systém sa dá ešte vylepšiť pridaním nevyužitého kanálu RC vysielača a potrebnú signalizáciu spustiť len vo chvíli, keď sa model nachádza vo vhodnej pozícii pre viditeľnosť. Bloková schéma takejto telemetrie je na Obr. 1.2.

Táto práca je však venovaná pokročilejšej verzii telemetrie, ktorá bude merať široké spektrum palubných veličín a bude ich následne bezdrôtovo posielat' na zem, kde budú zobrazené a takisto zvukovo vyhodnotené.



Obr. 1.2 Bloková schéma opticko-zvukovej telemetrie s možnosťou diaľkového spustenia

1.2 Výber modelu

Telemetria sa nedá implementovať do každého modelu a to zväčša kvôli veľkosti, ale aj kvôli váhe. Preto je dobré pri výbere alebo návrhu lietadla zohľadniť aj miesto, kde bude telemetria umiestnená a či sa už aj tak do elektronikou plného trupu lietadla naozaj zmestí. Vybrané lietadlo s názvom SKYFUN poskytuje veľa priestoru pre telemetriu a ostatnú elektroniku.

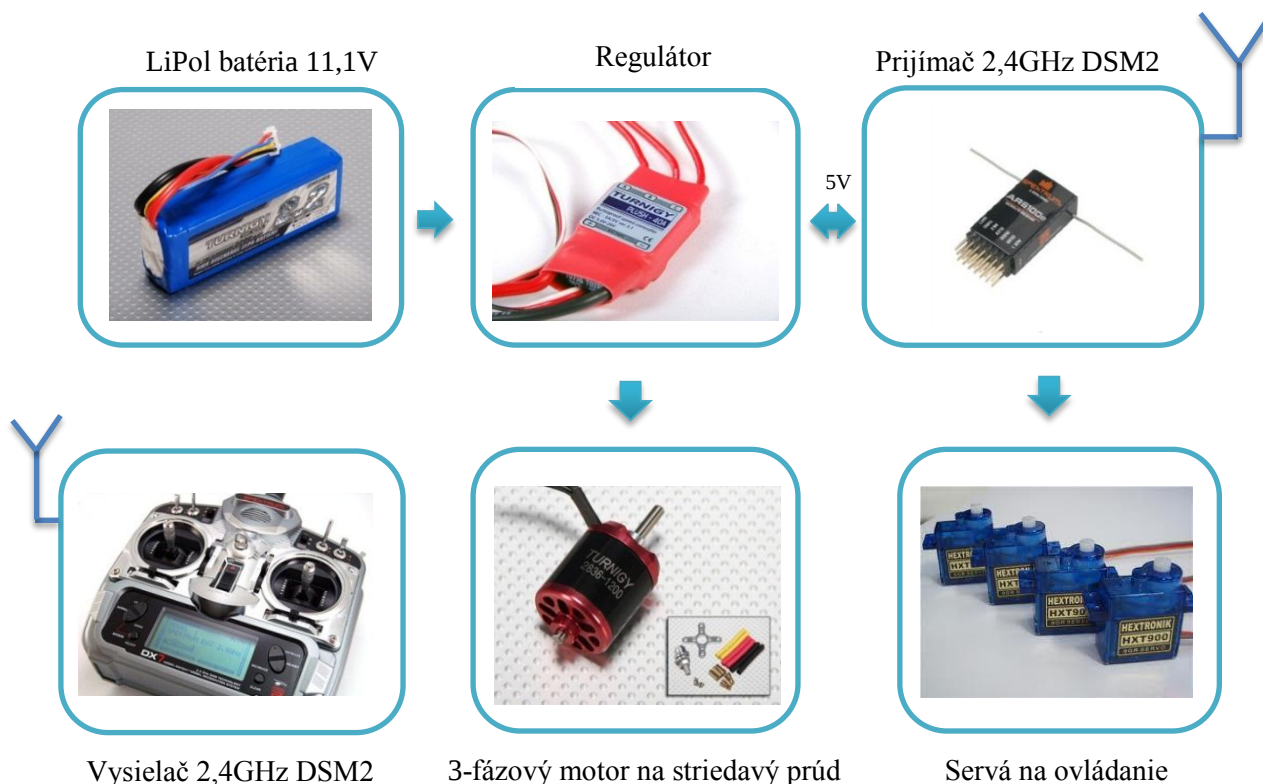


Obr. 1.3 Model Skyfun určený pre telemetriu

1.2.1 Popis zapojenia lietadla

Základom každého RC modelu je RC súprava, ktorá prenáša naše pohyby na páčkach na sled digitálnych dát, ktoré sú následne bezdrôtovo prenesené do prijímača, kde sa následne spracujú a prijímač vygeneruje potrebné PWM pulzy servom a regulátoru. O napájanie sa stará 3článok Líthium polymérovej (LiPol) batérie, ktorý má malý vnútorný odpor a tým pádom je schopný dodať veľké vybíjacie prúdy, ktoré sú pri spojení s 3-fázovým motorom s veľkou účinnosťou nevyhnutné. Regulátor v dnešnej dobe už využíva vlastný mikrokontrolér, ktorý umožňuje nastaviť veľké množstvo parametrov regulácie, ale poskytuje aj určitú ochranu pre batérie a to tak, že pri prekročení určenej hranice napätia odpojí funkciu motora. Okrem regulovania otáčok motora sa stará ešte aj o napájanie prijímača 5V (obvod BEC).

V budúcnosti bude model vybavený dvojicou gyroskopov, ktoré pomôžu zvýšiť stabilitu lietadla v nízkych preletoch nad zemou vo vysokej rýchlosti (ochrana voči vplyvom vetra). Celkový princíp zapojenia je zrejmý z Obr. 1.4.



Obr. 1.4 Palubné zapojenie elektroniky

1.3 Výber fyzikálnych veličín zaujímavých na meranie

Objekt merania bude v tomto prípade rádiovým riadeným model poháňaný elektromotorom, ktorý sa pohybuje vo vzdušnom prostredí. Je preto dôležité zvoliť si veličiny, ktoré sú užitočné a zaujímavé pre meranie a to tieto:

- **elektrické napätie** – vyjadruje rozdiel elektrického potenciálu dvoch bodov a predstavuje potrebnú energiu na premiestnenie elektrického náboja medzi dvoma bodmi v určitom elektrickom poli. Základná jednotka je Volt [V]. V tejto práci sa bude jednať o napätia jednotlivých článkov LiPol batérie.
- **elektrický prúd** – reprezentuje množstvo elektrického náboja, ktorý pretečie vodičom za jednotku času. Základná jednotka je Ampér [A]. Toto meranie bude merať prúd tečúci medzi batériou a regulátorom.
- **rýchlosť** – vyjadruje mieru, akou sa mení poloha telesa v čase. Základná jednotka je meter za sekundu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]. V tomto meraní sa bude merať rýchlosť voči vzduchu, v ktorom sa lietadlo pohybuje.
- **zrýchlenie** – zavádzame ako deriváciu vektora rýchlosti podľa času. Základná jednotka je meter za sekundu na druhú [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$].
- **atmosférický tlak (barometrický tlak)** - je to tlak spôsobený atmosférou planéty Zem. Je vyvolaný tiažou vzduchového stĺpca siahajúceho od nadmorskej výšky, ktorú meriame, až po hornú hranicu atmosféry. Základná jednotka je Pascal [Pa]. V tejto práci ho využijeme na určenie výšky medzi modelom a pilotom.
- **globálna poloha** – je definovaná pomocou zemepisnej dĺžky a šírky a taktiež pomocou nadmorskej výšky. V tomto prípade bude zobrazovať pohyb lietadla na mape.
- **čas** - vyjadruje interval medzi dvoma udalosťami alebo dobu trvania deja. Základnou jednotkou je sekunda [s]. V tejto práci bude zaujímavé zaznamenávať, čas letu a čas chodu motora.

2 SPÔSOBY MERANIA PALUBNÝCH VELIČÍN

Táto kapitola je venovaná spôsobu merania fyzikálnych veličín. Spomedzi veľkého množstva metód merania jednotlivých veličín, boli zvolené najvhodnejšie, na základe prihliadnutia na niektoré aspekty, ktoré sú popísané. Tak isto je kladený dôraz aj na praktické využitie nameranej veličiny.

2.1 Meranie elektrického napätia

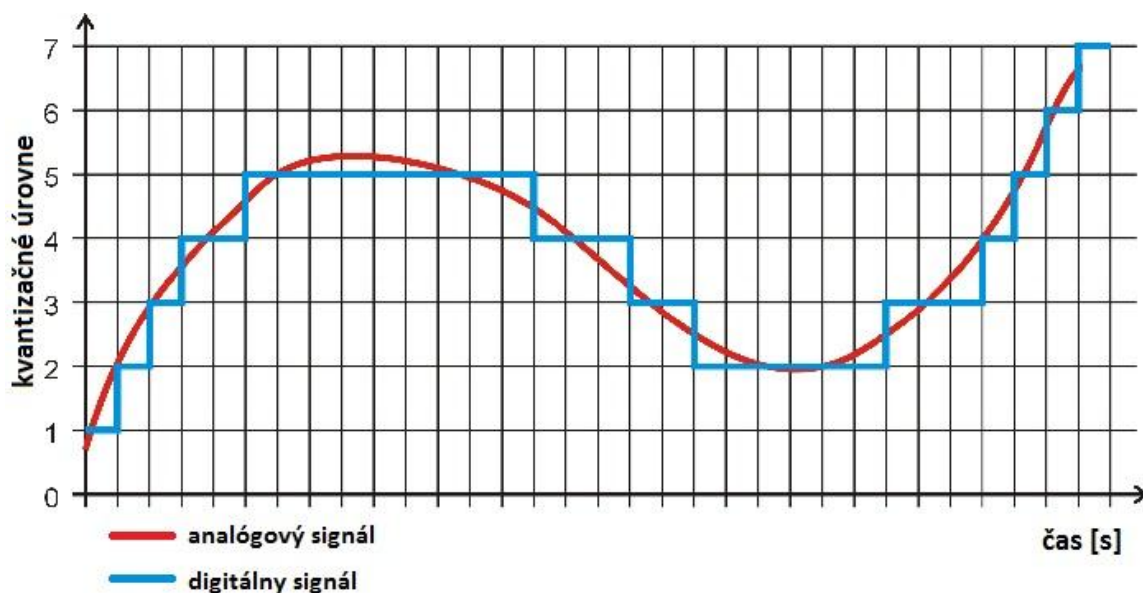
Zvolený bol spôsob merania napätia pomocou analógovo-digitálneho prevodníka (ďalej ADC) , z dôvodu, že je najdostupnejší a poskytuje vysokú presnosť. Funkciou ADC je vstupnú hodnotu analógového signálu premeniť na n-bitové číslo, ktoré reprezentuje nameranú hodnotu v digitálnej podobe. Jeho rozlišovacia schopnosť je daná množstvom bitov, na ktoré prevodník aproximuje analógovú hodnotu, napríklad pre 12 bitov ADC platí, že schopný rozložiť vstupný analógový signál na $2^{12} = 4096$ rôznych úrovní.

Pri ADC prevode je použitý princíp kvantovania (Obr. 2.1), kde sa jedná o priradenie digitálnej hodnoty, ktorá korešponduje s hodnotou analógového signálu na vstupe ADC. Presnosť merania sa dá charakterizovať ako chyba kvantizácie, ktorá udáva veľkosť odchýlky digitálnej hodnoty od tej skutočnej analógovej.

Rýchlosť A/D prevodu reprezentuje časový interval , ktorý je potrebný na získanie ďalšej digitálnej hodnoty. Aplikácia využíva 12bitový prevodník, ktorý zabezpečuje vysokú presnosť merania.

Meranie napätia má v tejto práci veľkú dôležitosť, lebo Lipol akumulátory sú veľmi citlivé na podbitie pod napätie 3V alebo prebitie nad napätie 4,2V, kedy môže dôjsť minimálne k skráteniu životnosti akumulátora (zníženie množstva nabíjacích cyklov), ale aj k úplnému poškodeniu akumulátora. Batérie sa zapájajú zväčša do série, ale často aj paralelne a reálne sa zaťažujú odoberaným prúdom, často až 50- krát väčším (50C), ako je ich kapacita. Týmto nešetrným zaobchádzaním dochádza v sade k značnému rozbalancovaniu článkov. Z tohto dôvodu môže ľahko dôjsť k podbitiu jedného z článkov a následnému poškodeniu celej sady a v konečnom dôsledku rozbitiu modelu (odstavenie napájania prijímača). Pre tieto skutočnosti je potrebné merať napätie akumulátora, a to nielen celkového napätia, ale napätia každého článku osobitne.

Meranie napätia slúži aj k vyhodnoteniu signálov z vyšších senzorov (prúd, rýchlosť), ktoré na svojom výstupe vyprodukujú napätie, ktoré odpovedá určitej hodnote (prúdu, tlaku).



Obr. 2.1 Princíp kvantovania prevzaté z [1]

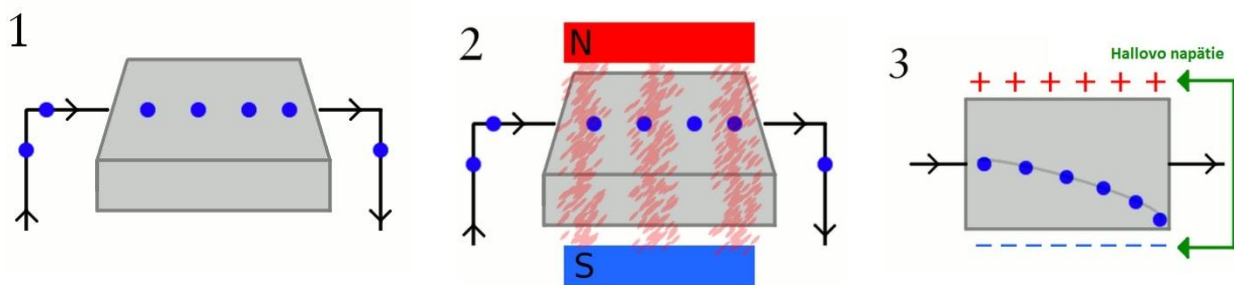
2.2 Meranie elektrického prúdu

Toto meranie by mohlo byť realizované pomocou merania úbytku napätia na elektrickom odpore, čo však nie je vhodné riešenie, keďže v modeloch sa môžeme dostať na hodnoty prúdov prekračujúce 100A.

Zvolený spôsob merania prúdu je založený na princípe Hallovho javu. Touto metódou je tak isto možné dosiahnuť vysokú presnosť. Výhody spočívajú hlavne v tom, že sa jedná o bezkontaktné meranie, ktoré nemá vplyv na meraný obvod, neprodukuje tepelné straty a poskytuje meranie vysokých prúdov.

2.2.1 Vznik Hallovho javu

1. Keď elektrický prúd prechádza materiálom, elektróny (Obr. 2.2 časť 1), modré guľôčky, sa pohybujú v priamom smere.
2. Vložením tohto materiálu do magnetického poľa, dôjde k pôsobeniu poľa na elektróny. Lorentzova sila, ktorá na ne pôsobí, vyvolá odchylenie lineárnych dráh elektrónov. Táto elektromagnetická sila vzniká pri prietoku prúdu materiálom.
3. V konečnom dôsledku dôjde k ohybu dráh, čo spôsobí rozdiel potenciálov (napätie- zelená šípka Obr. 2.2 časť 3). Veľkosť tohto napätia je priamo úmerná veľkosti elektrického prúdu a sily magnetického poľa [2].



Obr. 2.2 Princíp funkcie Hallovho javu prevzaté z [2]

V telemetrii hrá meranie prúdu veľkú úlohu. Hlavne pri dosiahnutí čo najväčšej účinnosti motora je potrebné zvoliť správne stúpanie a veľkosť vrtule a tým v konečnom dôsledku ovplyvniť množstvo odoberaného prúdu. Snahou modelára je dosiahnuť čo najlepší koeficient odoberaného prúdu k ťahu motoru, nájdením najvhodnejšieho pásma účinnosti motora. Keďže sa toto meranie prevažne prevádza na zemi, nie je presné, lebo pri pohybe modelu vo vzduchu nastanú iné podmienky pre vrtuľu a motor a tým pádom nebudú výsledky korešpondovať s hodnotou nameranou na zemi. Preto je meranie pomocou telemetrie najvhodnejšie. Ďalšou dôležitou hodnotou je tiež spotrebovaná energia, ktorá sa dá na základe merania prúdu v čase prepočítať na spotrebované Ah a v konečnom dôsledku nám táto hodnota umožní urobiť si predstavu, koľko energie sa ešte nachádza v batérii a koľko nám zostáva času pre chod motora.

2.3 Meranie tlaku

Tlak obecné predstavuje silu, ktorá pôsobí na jednotku plochy. V tejto práci bude na základe hodnoty tlaku určovaná výška modelu nad zemou od miesta štartu, a tak isto aj jeho rýchlosť voči vzduchu. V dnešnej dobe poznáme nasledovné typy senzorov merania tlaku [3]:

- **Absolútne** – tento typ senzora meria tlak vzhľadom k dokonalému vákuu
- **Diferenciálne** – meria rozdiel medzi dvoma alebo viacerými tlakmi
- **Manometre** – meria pomer k definovanému atmosférickému tlaku

V tejto práci je použitý absolútny senzor na určenie výšky modelu nad zemou a diferenciálny pre určenie rýchlosti lietadla.

2.4 Meranie výšky

Pre meranie výšky je použitý senzor absolútneho typu, ktorý s vysokou presnosťou dokáže zmerať výšku modelu nad zemou vzhľadom na bod štartu. Výška modelu sa bude dať určiť na základe zmeny atmosférického tlaku, ktorá sa dá reprezentovať v metroch.

Pri lietaní, hlavne s vetroňmi, je potrebné pre čo najdlhšie udržanie sa vo vzduchu vyhľadávať stúpavé termické prúdenia v atmosfére. Ako najlepšou pomôckou pri hľadaní termických bublín je barometer, ktorý vie presne zmerať zmenu výšky. Túto zmenu je najlepšie potom reprezentovať zvukovo a to tak, že keď model stúpa, dôjde k zvýšeniu intenzity tónu zvukového meniča (Vario). V modelárskej praxi sa toto meranie využíva aj na súťažiacich, kde je obvod nastavený tak, aby po prekročení dopredu určenej výšky vypol funkciu motora a tým pádom zabezpečil všetkým súťažiacim rovnakú východiskovú pozíciu pre let.

2.5 Meranie rýchlosti

Použitie akcelerometra pre meranie rýchlosti modelu lietadla nie je možné, keďže akcelerometer meria zrýchlenie voči zemi. Model sa ale pohybuje vo vzdušnom prostredí, ktoré vplýva na jeho rýchlosť. Na lietadlo pôsobí vietor, ktorý môže značne spomaliť/ zrýchliť pohyb lietadla voči zemi. To isté platí aj o meraní pomocou GPS. Pre určenie presnej rýchlosti, a to voči vzduchu, proti ktorému sa model pohybuje, je potrebné pre meranie použiť Pitotovu trubicu.

2.5.1 Pitotova trubica

Meranie pomocou Pitotovej trubice je založené na princípe náporového (dynamického) tlaku vzduchu v ústi trubice, nasmerovanej proti prúdiacemu vzduchu. Tlak, ktorý vznikne nie je závislý od priemeru trubice, ale je závislý od druhej mocniny rýchlosti. Rýchlosť by sa dala vyjadriť nasledovne:

$$v = \sqrt{\frac{2(p_c - p_s)}{\rho}} \quad (1.1.)$$

kde ρ je hustota vzduchu v manometre, p_c je celkový tlak a p_s je statický tlak [4].

Ako je zrejmé z Obr. 2.3, je možné Pitotovu trubicu používať v rôznych nadmorských výškach, keďže výsledná hodnota tlaku je určená na základe diferencie medzi náporovým a statickým tlakom.



Obr. 2.3 Pitotova trubica a jej princíp prevzaté z [4]

2.6 Meranie zrýchlenia

Na meranie zrýchlenia je najvhodnejšie použiť akcelerometer. Akcelerometer meria v jednotkách g, kde g predstavuje gravitačné zrýchlenie, ktoré má v našich zemepisných šírkach hodnotu rovnú približne číslu $9,81 \text{ m.s}^{-2}$. V dnešnej dobe poznáme veľké množstvo akcelerometrov, ktoré pracujú na rôznych princípoch, napríklad: Piezoelektrické, Kapacitné, Magnezistívne, založené na Hallovo jave, MEMS (Mikro-Electro Mechanický Systém)...

V tejto aplikácii je použitý akcelerometer MEMS ktorý sa v mikroelektronike najčastejšie používa. Poskytuje miniatúrne rozmery, vysokú citlivosť, rozsiahly frekvenčný rozsah a veľký dynamický rozsah [5].

Ako bolo spomínané pri meraní rýchlosti, nie je vhodné tento senzor použiť pre určenie rýchlosti. Sledovanie akcelerácie v osiach x, y, z je možné využiť na meranie preťaženia v jednotlivých manévroch. Ďalšie využitie je v istej kompenzácii chýb, ktoré môžu nastať pri meraní rýchlosti modelu pomocou Pitotovej trubice. V neposlednom rade tiež sledovaním zrýchlenia v osi z, ktoré v kombinácii s barometrom môže tvoriť veľmi presný Variometer.

2.7 Určenie globálnej polohy

Označuje sa ako GPS – Globálny Pozičný Systém (Global Position System). Tento systém pozostáva minimálne z 24 družíc na obežnej dráhe Zeme a riadiaceho strediska na zemi a z užívateľského prijímača. Tento systém dokáže pracovať všade okolo planéty Zem v rámci pokrytia satelitného signálu. Hlavnou funkciou GPS je určovanie zemepisnej polohy, ktorá je daná zemepisnou šírkou, dĺžkou a nadmorskou výškou.

Dnešné GPS systémy pracujú s vysokou presnosťou a to až na jednotky metrov(3m). V súčasnosti je možné GPS ale využiť pre určenie ďalších parametrov ako sú:

- Dátum
- Čas
- Rýchlosť voči zemi
- Azimut pohybu voči geografickému pólu...

GPS nie je v tejto práci použité, ale telemetrické zariadenie je konštruované tak, aby sa v budúcnosti tento systém dal rozšíriť o GPS modul. V tomto rozšírení spočíva význam hlavne k zaznamenaniu letovej trajektórie do pamäti a následne jej zobrazení na PC v satelitnej mape. Ďalšiu možnosť využitia je pri zrealizovaní autonómneho lietajúceho modelu, ktorý by bol riadený len pomocou senzorov a jeho navigácia by bola realizovaná na základe GPS a prenos dát riešený cez GSM sieť.

2.8 Meranie teploty

V dnešnej dobe je na trhu široké spektrum teplomerov, ktoré v podstate fungujú na zmene fyzikálnych vlastností materiálu v závislosti od teploty. Čím ďalej zaujímavejšie sa stávajú digitálne obvody, ktoré poskytujú miniatúrne rozmery, ale vysokú presnosť. Ako výstup majú priamo binárne číslo, ktoré predstavuje hodnotu teploty. Meranie teploty poskytuje barometrický senzor .

V meraní teploty v modeli nespočíva veľký význam. Zaujímavým bodom merania teploty je napríklad elektromotor, ktorého teplotu by však nebolo možné merať priamo, ale len pomocou laserového teplomeru, ktorý dokáže zmerať teplotu motoru pod záťažou. Toto meranie je však lepšie spraviť na zemi špeciálnym teplomerom určeným na tento účel.

3 NÁVRH TELEMETRICKÉHO SYSTÉMU

V tejto kapitole je sústredená návrhu systému, ktorý bude čo najviac spĺňať požiadavky, ktoré sú spomínané v prechádzajúcej kapitole a takisto požiadavky v tejto kapitole.

3.1 Návrh na úrovni funkčných blokov

Bezdrôtový telemetrický systém bude pozostávať z 2 prvkov (vysielacia a prijímacia časť), ktoré medzi sebou bezdrôtovo komunikujú.

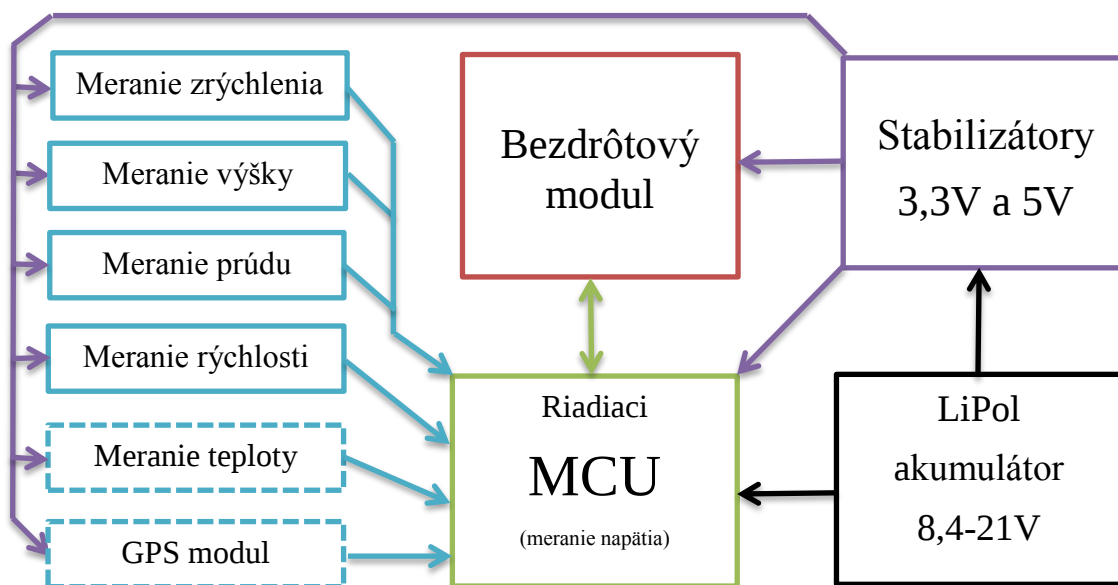
3.1.1 Vysielacia časť telemetrie

Dá sa považovať za mozog celého systému, keďže všetky výpočty je potrebné urobiť pred vyslaním dát do prijímača.

Pri návrhu systému bolo prihliadané na nasledovné požiadavky:

- **Váha** – Musí byť čo najnižšia. Čím má systém vyššiu váhu, tým dôjde k zvýšeniu plošného zaťaženia modelu a v konečnom dôsledku k zníženiu kľzavosti modelu a k horším letovým vlastnostiam. Z tohto dôvodu je použitá SMD technológia súčiastok.
- **Rozmery** – Moderné modely sú vyhotovené tak, aby miesto pre batériu a elektroniku bolo presné takmer na milimetre. Preto musí systém byť čo najmenší. So zväčšovaním rozmerov taktiež musí narásť potrebné miesto pre umiestnenie telemetrie a v konečnom dôsledku dôjde k zvýšeniu aerodynamického odporu.
- **Napät'ové úrovne** – aby celý systém správne pracoval, je systém napät'ovo zladený.
- **Napájanie** – Výber prebehol medzi tromi rôznymi spôsobmi napájania. Ako jedna z možností by bolo pridanie vlastného akumulátora čisto len pre napájanie telemetrie, čo by však znamenalo ďalšie navýšenie hmotnosti a rozmerov, preto je tento spôsob nevhodný. Ďalšou možnosťou sa ukázalo napájanie z prijímača, ktorý poskytuje 5V výstup, lenže toto napätie nie je úplne stabilné, pretože je využívané aj pre napájanie serva a v konečnom dôsledku môže dôjsť preťaženiu obvodu BEC regulátoru. Preto teda ako najvhodnejší spôsob napájania je zvolená palubná LiPol batéria, ktorá je pripojená k telemetrii cez balancovací konektor. Cez tento konektor bude aj merané napätie jednotlivých článkov.
- **Stabilita napájania** – je veľmi dôležitá pre dosiahnutie vysokej presnosti merania. Nestabilita by spôsobila značné kolísanie nameranej hodnoty.
- **Rozsahy veličín zaujímavých pre meranie** – keďže poznáme, v akom prostredí sa bude telemetria pohybovať, dá sa predpokladať v akých rozsahoch sa namerané fyzikálne veličiny budú pohybovať.

- **Prenosová rýchlosť** – Je vybraný komunikačný systém, ktorý splňuje maximálnu predpokladanú prenosovú rýchlosť v bitoch za sekundu (baud).
- **Vysielací výkon** – bola stanovená maximálna vzdialenosť, na akú je potrebné bezdrôtovo preniesť dáta. Táto vzdialenosť súvisí s hranicou viditeľnosti modelu, kedy pilot stratí očný kontakt s modelom. Toto nastane približne vo vzdialenosti 500 m od miesta štartu. Situácia, že model lietadla sa stratí pilotovi z dohľadu je bežná, hlavne pri súťažnom letaní, a vtedy môže telemetria pomôcť pilotovi zorientovať sa, prípadne pomocou GPS dohľadať uletený model. Z týchto dôvodov je zvolený bezdrôtový modul s výkonom 100mW (dosah podľa výrobcu okolo 1500m).



Obr. 3.1 Bloková schéma vysielacej časti

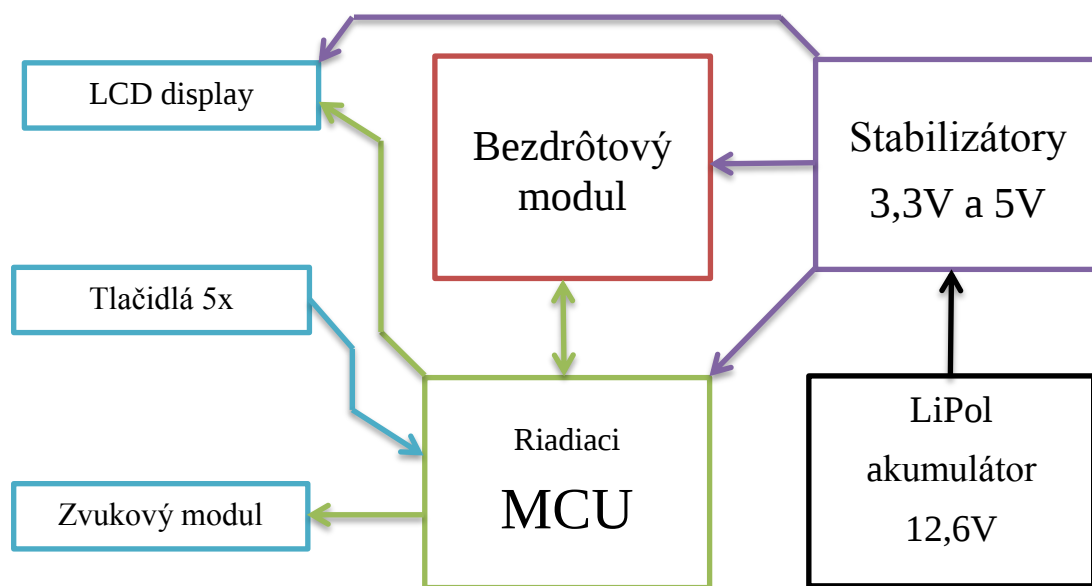
Pozn. k Obr. 3.1: čiarkovaná čiara značí, že pri návrhu kompletného zapojenia bolo počítané s budúcim pridaním týchto modulov.

3.1.2 Prijímacia časť telemetry

Aby dostávalo meranie zmysel, je potrebné prijaté dáta spracovať a následne ich rozumne zobrazit', prípadne uchovať pre ďalšie vyhodnocovanie.

Pri návrhu prijímacej časti boli zvážené nasledujúce faktory:

- **Váha** – Nie je potrebné až tak prísne dbať na hmotnosť zariadenia, ale nízka hmotnosť bude len výhodou.
- **Rozmery** – Pri návrhu DPS bolo zvážené budúce umiestnenie prijímacej časti (držiak na RC súprave Spektrum DX7). Tak isto je potrebné navrhnuť puzdro, ktoré bude zariadenie chrániť pred priamym vplyvom prostredia, v ktorom bude zariadenie využívané.
- **Napájanie** – Ako najlepší spôsob napájania bol vybraný akumulátor, ktorý sa nachádza priamo v RC súprave a poskytuje vysokú kapacitu a vhodné napätie.
- **Napät'ové úrovne** – tak isto ako vo vysielacej časti, aj v prijímacej bolo potrebné zladiť napät'ové úrovne. Keďže pre LCD bude vyžadované napätie 5V, bolo potrebné použiť dva stabilizátory.
- **Zobrazovacia jednotka** – Ako zobrazovaciu jednotku je možné použiť napríklad počítač, grafický či znakový LCD. V tomto prípade kvôli jednoduchosti je vybratý znakový LCD o 20 znakov v 4 riadkoch.
- **Ovládanie** – Pre prehľadnejší prístup k nameraným údajom a k ich uloženým hodnotám je telemetria vybavená tlačidlami.
- **Zvuková signalizácia** – Je veľmi dôležitým prvkom celej telemetry. Keďže väčšinu času sa musí pilot sústreďovať riadením modelu, nie je možné často sledovať LCD, a preto je použitá zvuková signalizácia kritického napätia a tiež je zvukom reprezentované stúpanie modelu (Vario).



Obr. 3.2 Bloková schéma prijímacej časti

4 MOŽNOSTI REALIZÁCIE SYSTÉMU

Pri výbere komponentov telemetrie boli zvážené nasledujúce faktory: spôsob merania danej veličiny, presnosť merania, mechanické prevedenie, dostupnosť komponentov na trhu a v neposlednom rade cena. Vybrané a kupované súčiastky sú zväčša kúpené z <http://farnell.com/>.

4.1 Napät'ové úrovne

Ako bolo spomínané, je potrebné celé zariadenie napät'ovo zladit'. Z Tab. 4.1 je zrejmé, že pre správne fungovanie systému sú potrebné 2 stabilizátory.

Komponent	Napájanie [V]	Prúd [mA]	Výstup	Označenie
Akcelerometer	2,4-3,6	0,047	3 - osi $\pm 1,5$ [g]	MMA7660FC
Výškomer	1,8-3,6	0,005	300-1100 [hPa]	BMP085
Meranie rýchlosti	4,75-5,25	10	0-3,92 [kPa]	MPXV5004GP
Prenos 2,4GHz	2,7-3,6	270	USART	XBEE-PRO
Stabilizátor 3,3V	2,5-7	800	3,3 [V]	LP3874
Stabilizátor 5V	5,4-20	1000	5 [V]	KF50BD-TR
Senzor prúdu	3-5,5	10	± 100 [A]	ACS758LCB-100B-PFF-T
LCD	5	-	-	HD44780
Bzučiak	3-20	14	85 [dB]	KPEG222A

Tab. 4.1 Parametre jednotlivých meracích obvodov

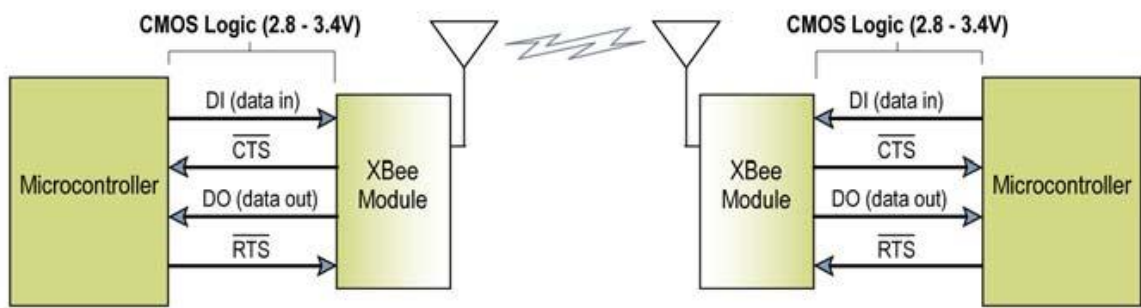
4.2 Bezdrôtový prenos

Kľúčovou vlastnosťou tohto systému je bezdrôtová komunikácia. Preto bol kladený veľký dôraz na výber bezdrôtovej časti. Táto časť sa značne prejavila aj na cene celého zariadenia a to až cez 50% celkovej sumy. Vysielačie pásma v SR a ČR určuje všeobecné oprávnenie, ktoré vydal telekomunikačný úrad [6]. Pre účely telemetrie sú vhodné nasledovné frekvenčné pásma 433MHz, 868MHz alebo 2,4 GHz. Pre zmienené pásma je na trhu široké spektrum integrovaných obvodov. V frekvenčnom pásme 433MHz a 868MHz sú to hlavne moduly od firmy Aurel. Tieto moduly so sebou však prinášajú aj niekoľko nevýhod a to hlavne k nutnosti použitia vlastného protokolu pre prenos dát, kde by bolo potrebné ošetriť chyby kódovania, čo by v konečnom dôsledku značne skomplikovalo vývoj riadiaceho programu. Ďalšou nevýhodou je iba polovičný dosah oproti vybraným modulom a nutnosť voľby vhodnej antény. V pásme 2,4GHz sú na trhu dostupné moduly od firmy Nordic Semiconductor, ktoré však neponúkajú dostatočný vysielač výkon. Preto padla konečná voľba na modul od firmy Digi.

4.2.1 XBee –PRO

Najvhodnejší RF modul od firmy Digi s označením XBee-PRO, ktorý komunikuje s mikrokontrolérom cez USART a poskytuje nasledovné parametre [7]:

- Vysielacie pásmo 2,4 GHz
- Dosah - v budove 100 m,
- v otvorenom priestranstve 1500 m
- Odber pri vysielaní: 270 mA (@3,3 V)
- Odber pri prijímaní: 55mA (@ 3,3 V)
- Odber v nečinnom režime: < 10 μ A
- Citlivosť prijímača: - 100dBm
- Vysielací výkon: 100mW (20dBm)
- Dátová rýchlosť: 250 Kb/s



Obr. 4.1 Diagram prenosu XBee prevzaté z [7]

XBee bolo nakonfigurované pomocou programu X-CTU. Bolo potrebné nastaviť adresovanie, aby vedel prijímač komunikovať s vysielateľom. Vysielateľ bol nastavený ako koncové zariadenie a jeho cieľová adresa bola nastavená sériové číslo prijímača a to 407AD6A0. Prijímač bol nastavený ako koordinátor s cieľovou adresou: 406A906D. V oboch zariadeniach bol rámec USART nastavený nasledovne: 115200-8-N-1.

4.3 Platforma STAX

Táto platforma bola vyvinutá v Slovenskej technickej univerzite v Bratislave a od ostatných platform na trhu sa líši predovšetkým k určeniu pre miniatúrne zariadenia. Pre svoje rozmery, ale aj široké spektrum využitia bola zvolená ako mozog celého telemetrického systému. Táto platforma poskytuje nasledujúce možnosti [8]:

- Mikrokontroler: Atmel ATxmega128a3
 - plne vyvedené porty A, B a C
 - vyvedené ďalšie periférie
 - 3x UART
 - SPI
 - I2C
- Periférie:

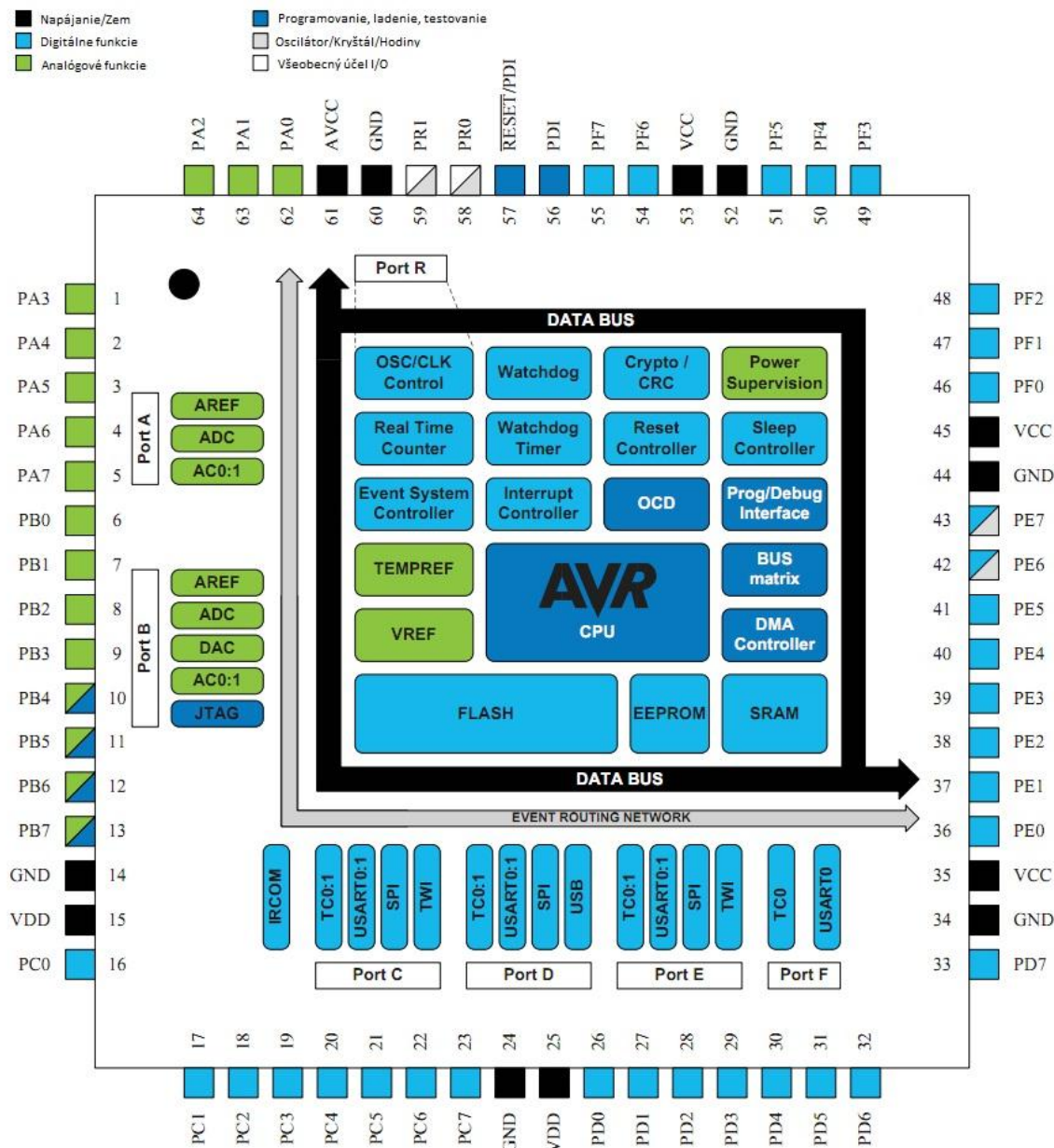
- Tlačidlo Reset
- User tlačidlo
- Slot na μ SD kartu
- 6-bitový 3D akcelerometer
- RGB Led
- Bluetooth (btm-330)
- USB komunikácia cez ATmega8u2
- Rozmery: 42x51 mm.

Tieto parametre sú vysoko postačujúce pre aplikáciu a poskytujú aj budúce zdokonalenie zariadenia, ako napríklad možnosť ukladať namerané dáta na μ SD kartu. Zaujímavé by bolo aj využitie funkcie bluetooth, ktorá bude v budúcnosti využitá na zlepšenie zobrazovacej časti telemetrie, kde by došlo k načítaniu nameraných dát pomocou Android/iOS tabletu/smartphonu a ich zobrazeniu na veľkom LCD s vysokým rozlíšením a kvalitným grafickým prostredím. Obe časti telemetrie obsahujú vývojový kit STAX s mikrokontrolerom ATxmega128a3, ktorý sa mi podarilo získať zdarma. Celkové obvodové zapojenie platformy je možné nájsť v prílohe A.1.

4.3.1 Mikrokontroler Atmel ATxmega128a3 [9]

- Vysokovýkonný 8bitový mikrokontroler s veľmi nízkou spotrebou energie
- 128KB programovej Flash pamäte
- 2KB EEPROM pamäti
- 8KB RAM pamäti
- 32MHz vnútorný oscilátor
- Napájacie napätie: 1,6-3,6 V
- Rozhrania:
 - dva krát I2C
 - sedem krát USART
 - Master/Slave SPI sériové rozhranie
 - dva 8 kanálové, 12 bitové, 2MSPS ADC prevodníky
 - dvoj kanálový, 12 bitový, 1MSPS DAC prevodník
 - 22 PWM kanálov
 - sedem 16-bitových časovačov/počítadiel
 - USB 2.0 rozhranie
 - štyri analógové komparátory
 - externé prerušenie na všetkých I/O výstupoch
 - programovateľný časovač Watchdog s vlastným oscilátorom
 - ...
- Špeciálne funkcie:
 - Reštart po výpadku energie a programovateľná detekcia poklesu pracovného napätia
 - Kalibrovateľný interný RC oscilátor
 - päť režimov spánku

Hlavnou funkciou mikrokontroleru bude spracovať analógový signál a premeniť ho na 12 bitovú hodnotu. ADC vstupy sa budú využívať pre meranie napätia článkov batérie, ale aj k vyhodnoteniu signálov z vyšších senzorov (prúd, rýchlosť), ktoré na svojom výstupe vyprodukujú napätie ktoré odpovedá určitej hodnote prúdu, tlaku. Ďalej budú využité aj vstupy I2C a USART.



Obr. 4.2 Usporiadanie vývodov ATxmega128a3 prevzaté z [10]

4.3.2 Voľba napät'ovej referencie

V systéme je využívaných 7 ADC vstupov mikrokontroléru. Pri návrhu je potrebné zvoliť si referenčné napätie, podľa ktorého bude mikrokontrolér vyhodnocovať nameranú hodnotu vstupného analógového signálu. ATxmega128a3 poskytuje

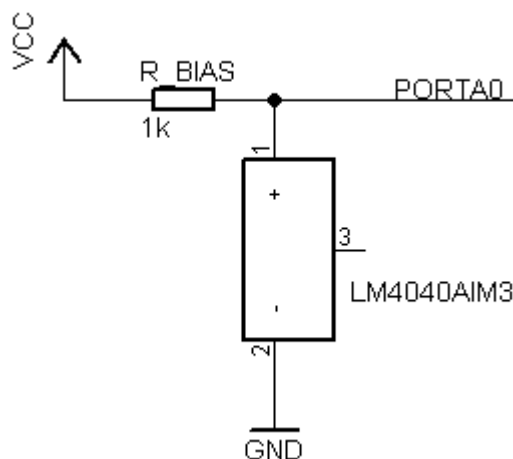
nasledovné možnosti voľby napät'ovej referencie [9]:

- Vnútoraná 1V
- Interná $V_{CC}/1,6V$
- Externá referencia na porte A a B

Vnútoraná referencia (1V) je veľmi nízka a interná $V_{CC}/1,6V$ (3,3/1,6) nie je tiež vhodná. Kvôli kolísaniu napätia V_{CC} bolo potrebné zvoliť presný referenčný zdroj. Ten bol zvolený LM4040AIM3, ktorý ponúka referenčné napätie 2,5V s toleranciou 0,1%. Táto napät'ová referencia je určená na použitie bez externých kapacitorov medzi kladným a záporným pólom. Pre stabilitu napätia je potrebné použiť obmedzovací odpor R_{BIAS} . Pre hodnotu odporu R_{BIAS} platí nasledujúci vzťah:

$$R_{BIAS} = \frac{V_{CC} - V_{OUT}}{I_L + I_{IN}} = \frac{3,3 - 2,048}{1 \cdot 10^{-3} + 0,2 \cdot 10^{-3}} = 1043 \Omega \quad (1.2.)$$

kde R_{BIAS} predstavuje obmedzovací odpor, V_{CC} je vstupné napätie, V_{OUT} je výstupné referenčné napätie, I_L je výstupný prúd do mikrokontrolera, I_{IN} je vstupný prúd do referenčného zdroja [11].



Obr. 4.3 Schéma zapojenia referenčného zdroja LM4040AIM3

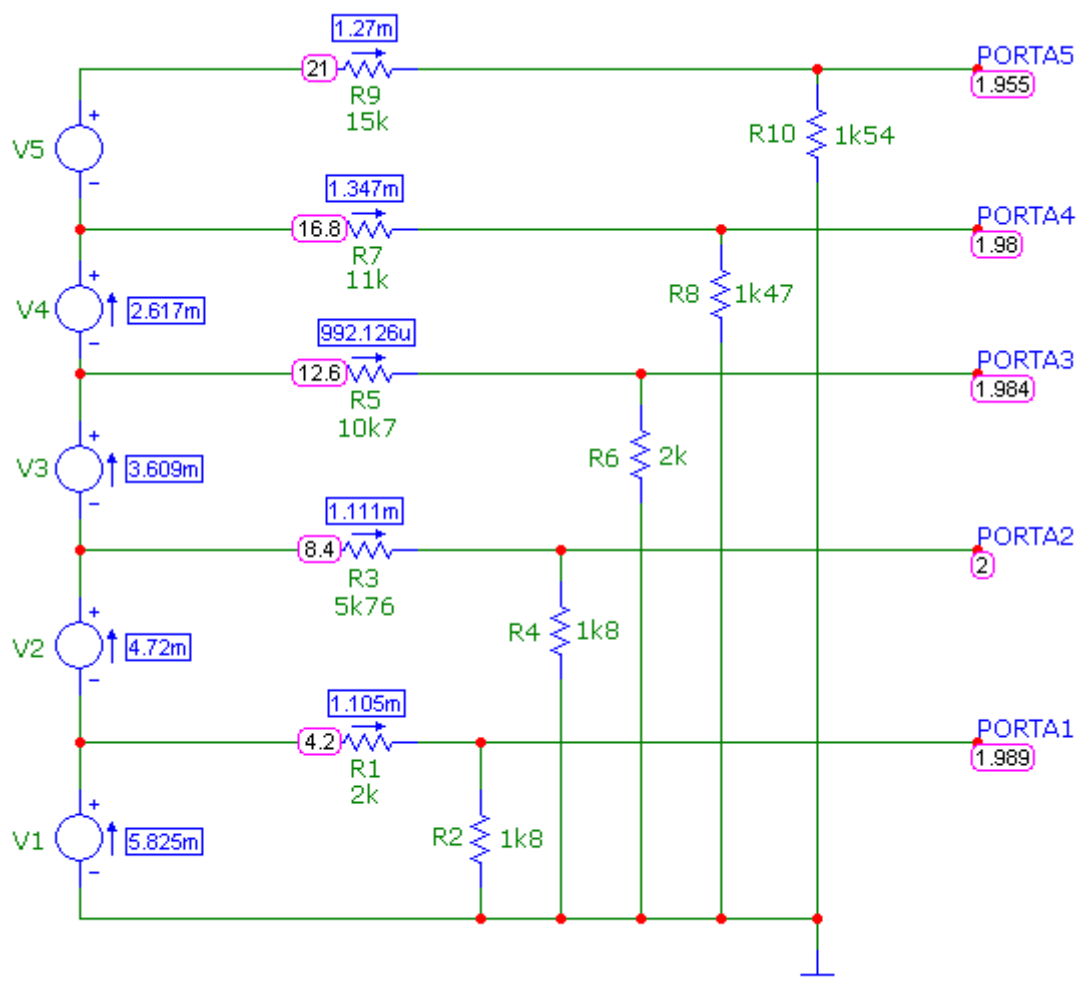
4.4 Meranie napätia

Pre meranie napätia je použitý 12 bitový ADC prevodník, ktorý je nastavený pre meranie len kladného napätia, preto ponúka až 4096 rôznych úrovní pre meranie napätia od 0V do 2,5V, teda je schopný rozoznať každú zmenu napätia o 0,6mV. Meraný bude palubný LiPol akumulátor. Tento akumulátor dosahuje maximálne napätie na článok 4,2V a používa sa v sériovom zapojení dvoch až piatich článkov. Napätie 4,2V nie je možné zmerať priamo, keďže je použitý referenčný zdroj s hodnotou 2,5V. Preto je potrebné pred vstup do ADC prevodníku zaradiť odporový delič napätia, ktorého hodnoty odporov boli vybrané z ponuky predajcu. V tomto prípade bola použitá odporová rada E192 a odpory s dovolenou toleranciou $\pm 0,1\%$. Pre hodnotu výstupného napätia platí:

$$U_{výst} = U_{vst} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 4,2 \cdot \frac{1800}{2000 + 1800} = 1,989 \text{ V} \quad (1.3.)$$

kde $U_{výst}$ je výstupné napätie z deliča, ktoré bude vstupovať do ADC vstupu mikrokontrolera, U_{vst} je napätie na vstupe deliča z batérie, R_1 a R_2 sú odpory deliča.

Keďže je zariadenie koncipované tak, aby zvládlo pracovať s rôznymi zapojeniami LiPol akumulátorov a to až do zapojenie 5 článkov do série, kde bude napätie mať hodnotu 21V. Celý návrh je na Obr. 4.4.



Obr. 4.4 Návrh sústavy deličov v programe Micro-Cap

4.5 Meranie zrýchlenia

Spočiatku nebolo s použitím akcelerometra počítané, ale keďže ho vývojový kit ponúka, môže nájsť určité uplatnenie aj v tomto systéme. Napríklad pri sledovaní akcelerácie v osiach x, y, z je ho možné využiť na meranie preťaženia počas letových manévrov. Ďalšie využitie je v istej kompenzácii chýb, ktoré môžu nastať pôsobením rôznej

tiažovej sily na senzory. V neposlednom rade tiež sledovaním zrýchlenia v ose z , ktoré v kombinácii s barometrom môže tvoriť veľmi presný Variometer.

4.5.1 Akcelerometer MMA7660FC [12]

- Digitálny výstup na I2C
- Rozsah napájacieho napätia: 2,4 - 3,6 V
- Nízka spotreba energie maximálne: 47 μ A
- 3-osí MEMS senzor $\pm 1,5$ g
- Odolnosť do 10 000 g
- Rozmery len 3mm x 3mm x 0,9mm v DFN puzdre

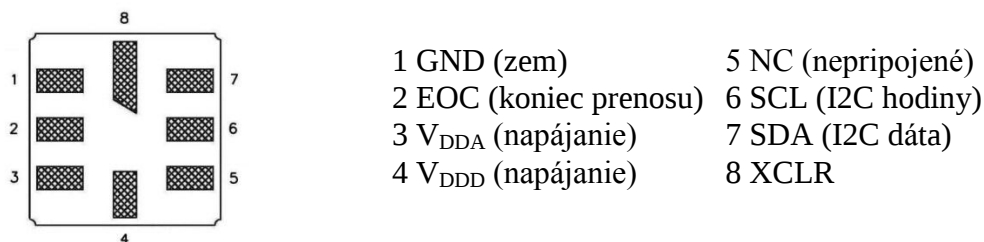
Keďže je už súčasťou vývojového kitu nebude tu zobrazené jeho presné zapojenie. Toto všetko je ale možné nájsť v prílohe A.1.

4.6 Meranie výšky

Na trhu je malé množstvo senzorov pre meranie atmosférického tlaku. Pre použitie nie je podstatný rozsah meraných tlakov, ale hlavne presnosť, s akou je senzor schopný určiť tlak. Výber prebehol medzi tromi senzormi. Ako prvý MPX4115A, ktorý ale ponúka citlivosť 45,9mV/kPa, čo by ponúklo pre túto aplikáciu veľmi nepresné meranie. To isté platí aj pre MP3H6115A s citlivosťou 27mV/kPa. Tieto dva senzory sú zrejme určené do skutočných lietadiel, ktoré prekonávajú oveľa väčšie výškové rozdiely. Preto padol výber jednoznačne na BMP085, ktorý v najpresnejšom režime dokáže zaznamenať zmenu výšky každých 25cm.

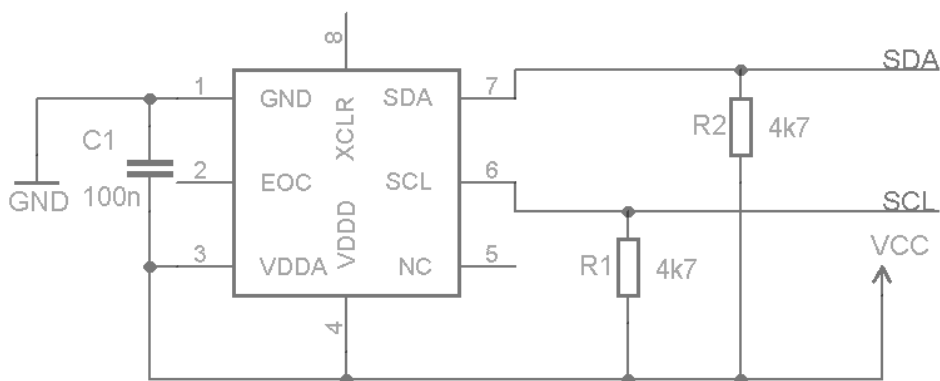
4.6.1 Barometrický senzor tlaku BMP085 [14]

- Meranie tlaku v rozsahu 300 do 1100hPa (+9000m ... -500m nad hladinou mora)
- Presnosť: 0,03 hPa (0,25m)
- Rozsah napájacieho napätia: 1,8-3,6V
- Digitálny dvojvodičový I2C rozhranie do 3,4MHz
- Ultránízka spotreba energie maximálne: 5 μ A
- Plne kalibrovateľný
- Zahŕňa merač teploty
- Veľmi malé rozmery: 5x5mm a vysoký len 1,2mm



Obr. 4.5 Konfigurácia výstupov BMP085 prevzaté z [14]

Merací obvod je zapojený podľa Obr. 4.6. Obsahuje dva Pull-up odpory, potrebné pre držanie vysokej úrovni na I2C rozhraní. Výpočet výšky nad zemou je zdokumentovaný v kapitole 5.1.1.



Obr. 4.6 Zapojenie meracieho obvodu s BMP085

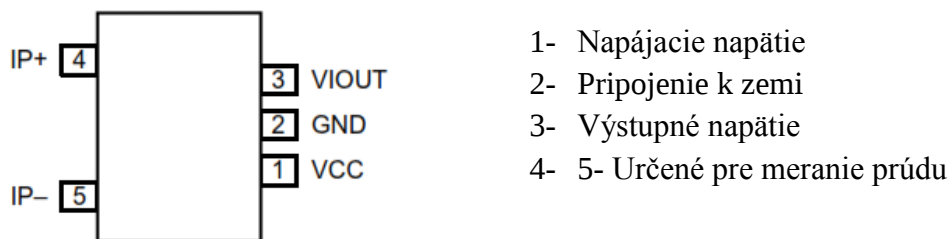
4.7 Meranie prúdu

Na trhu je veľké množstvo senzorov prúdu, ale málo z nich ponúka meranie vysokých prúdov. Model, pre ktorý je tento senzor konštruovaný, má maximálny odber okolo 40A. Tento senzor dimenzovaný vyššie na 100A pre budúce použitie v modeli s vyšším odberom. Keďže unipolárna verzia senzora ACS758 nebola pre Európu ešte v predaji, padol výber na bipolárnu verziu.

4.7.1 Hallový senzor elektrického prúdu ACS758LCB-100B-PFF-T [15]

- Úplne integrovaný, tepelne zosilnený, lineárny senzor prúdu založený na princípe Hallovho javu s celkovým odporom vodivej cesty 100μΩ
- Rozsah meraného prúdu: ± 100 A
- Rozsah napájacieho napätia: 3,0 – 5,5 V
- Citlivosť: 20mV/A
- Spotreba prúdu: 10mA
- Rozsah pracovných teplôt: -40°C až +150 °C

- Šírka pásma: 120kHz



Obr. 4.7 Konfigurácia vývodov prevzaté z [15]

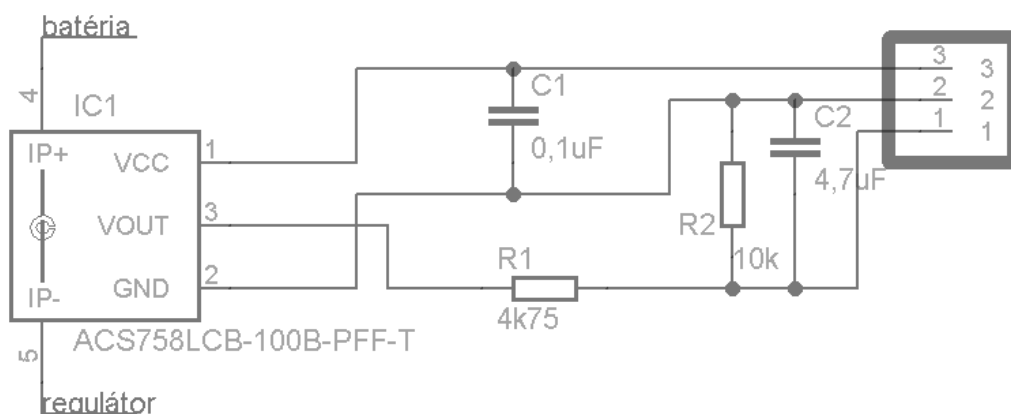
Tento senzor je v prevedení bipolárnej verzii. Nulová hodnota prúdu nastane vtedy, keď na výstupe V_{out} bude napätie $V_{CC}/2$, teda $3,3/2 = 1,65$ V. S rastúcim prúdom bude napätie V_{out} rásť až do 90% hodnoty napätia V_{CC} , teda do hodnoty napätia $U_{90\%V_{CC}} = 2,97$ V. Keďže bude využívaný celý rozsah napätia V_{out} , ktorý je väčší ako napäťová referencia, je potrebné na výstup V_{out} zaradiť odporový delič napätia, ktorého hodnoty odporov sú určené nasledovne:

$$U_{OUT} = U_{90\%V_{CC}} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 2,97 \cdot \frac{10000}{4750 + 10000} = 2,01 \text{ V} \quad (1.4.)$$

Kde U_{OUT} je výstupné napätie z deliča, ktoré bude vstupovať do ADC vstupu mikrokontroléra, $U_{90\%V_{CC}}$ je maximálne napätie na výstupe senzora, R_1 a R_2 sú odpory deliča.

Na výstupe je tiež zaradený antialiasingový filter, ktorý je zvolený ako filter dolná priepusť s medzným kmitočtom $f_{medz} = 10$ Hz. Tento filter zabráni rušeniu o kmitočtoch väčších ako 10Hz. Hodnoty prvkov RC filtru sú vypočítané nasledovne:

$$C_2 = \frac{1}{2\pi \cdot f_{medz} \cdot R_1 \parallel R_2} = \frac{1}{2\pi \cdot 10 \cdot 3220} = 4,943 \mu F \quad (1.5.)$$



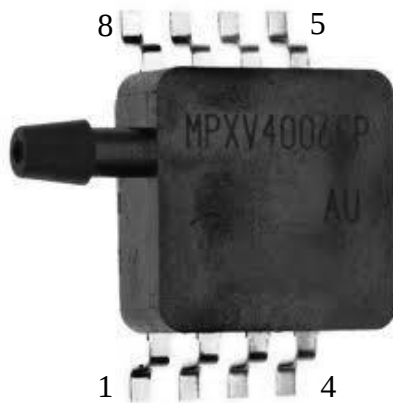
Obr. 4.8 Zapojenie meracieho obvodu s ACS758LCB

4.8 Meranie rýchlosti

Pre určenie merania rýchlosti bolo problematické vybrať vhodný senzor. Na trhu sa podaril nájsť iba jeden, s ktorým by bolo možné merať rýchlosť voči vzduchu s pomerne vysokou presnosťou.

4.8.1 Piezorezistívny snímač tlaku MPXV5004GP [16]

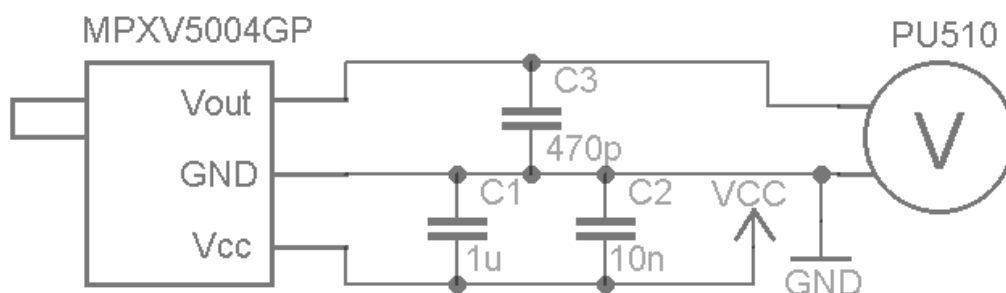
- Rozsah merania tlaku 0 – 3,92kPa
- Citlivosť 1V//kPa
- Rozsah napájacieho napätia 4,75 – 5,25V
- Spotreba prúdu 10mA
- Rozsah pracovných teplôt -30 - +85 °C
- Kalibrovateľný



- 1,5,6,7,8- nepripojené
- 2- Napájacie napätie
- 3- Pripojenie k zemi
- 4- Výstupné napätie

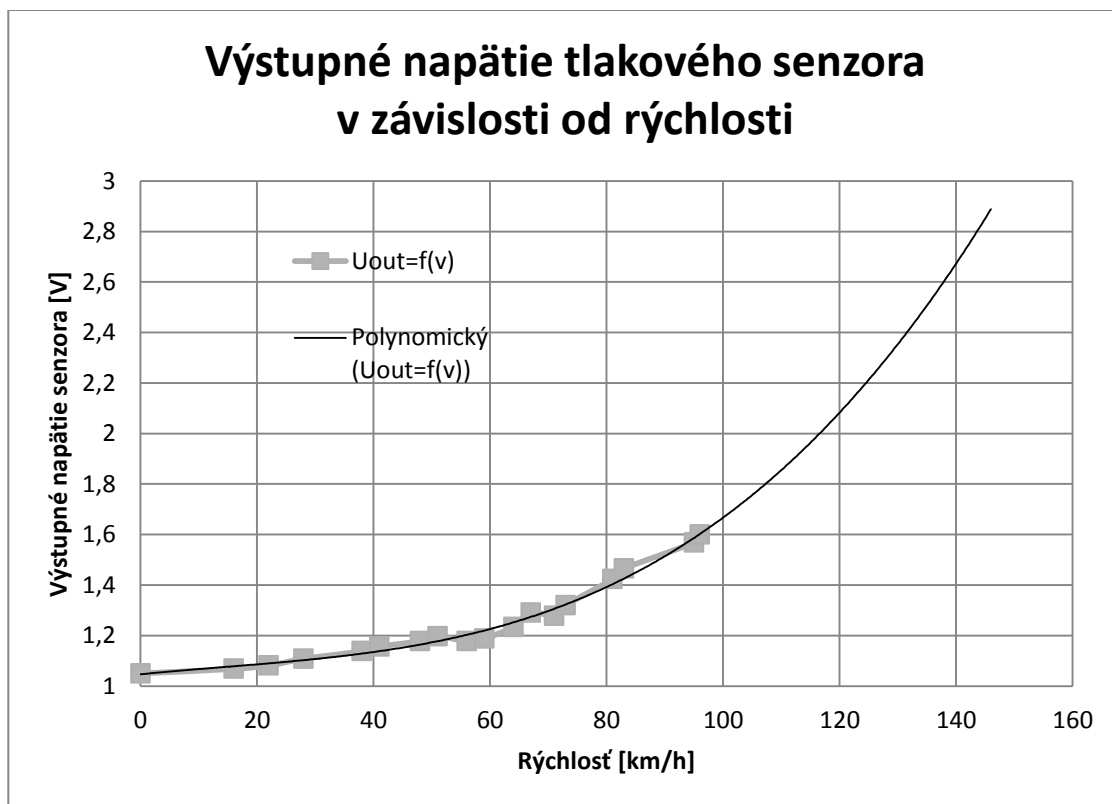
Obr. 4.9 MPXV5004G a jeho usporiadanie vývodov prevzaté z [16]

Do ústia senzora je zaradená Pitotova trubica (bužírka) , ktorá musí predovšetkým presne priliehať na vstup senzora, keďže jej úlohou je prenášať náporový tlak na ústie senzora. Samotná citlivosť senzora 1V/kPa o vhodnosti použitia v leteckom modeli veľa nepovie, bolo potrebné podrobiť tento senzor meraniu. Experimentálne meranie prebehlo pomocou automobilu v bezveternom počasí pri teplote -4°C. Aby sa zabránilo parazitnému obtekaniu vzduchu okolo obrysu automobilu, bola Pitotova trubica umiestnená na tyči z dĺžkou 2m. Jej výstup bol pred obrysom auta. Meraný obvod bol zapojený podľa Obr. 4.10. Rýchlosť automobilu bola určovaná pomocou GPS navigácie MIO C520 a výstupné napätie zo senzora bolo merané digitálnym voltmetrom PU510. Samotné odčítanie však nebolo možné kvôli rýchlym zmenám rýchlosti a výstupného napätia. Preto bolo GPS a voltmeter umiestnený vedľa seba a pomocou videozáznamu bol sledovaný priebeh, ktorý bol po meraní spracovaný na počítači.



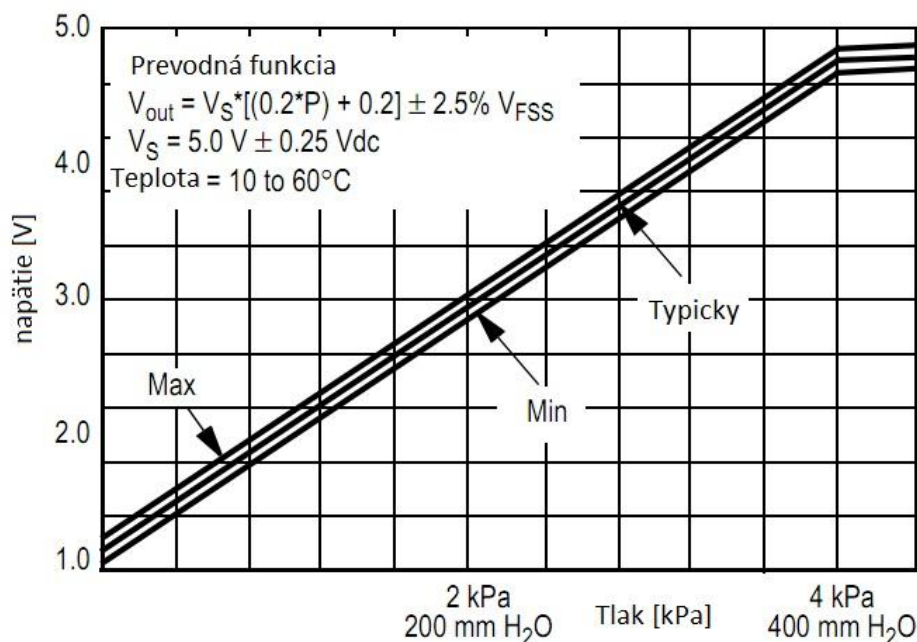
Obr. 4.10 Zapojenie experimentálneho merania rýchlosti

Chyby merania sú spôsobené nie úplne presnou hodnotou rýchlosti, určenou GPS navigáciou, a taktiež nie úplne presným voltmetrom, ale pre testovacie účely malo meranie dostatočnú presnosť. Jeho výsledok je graficky znázornený na Obr. 4.11. Z grafu je zrejmé, že sa jedná o kvadratickú závislosť napätia od rýchlosti. Toto meranie potvrdilo teoretické predpoklady. Pre meranie platí, že s rastúcou rýchlosťou sa presnosť merania zvyšuje keďže náporový tlak rastie s druhou mocninou rýchlosti. Meranie v automobile prebehlo do rýchlosti 96 km/h. Senzor je určený do modelu, ktorého rýchlosť dosahuje aj 120km/h. Preto bola nameraná krivka preložená polynomicou krivkou, ktorá predpokladá budúce správanie senzora pri vyšších rýchlostiach.



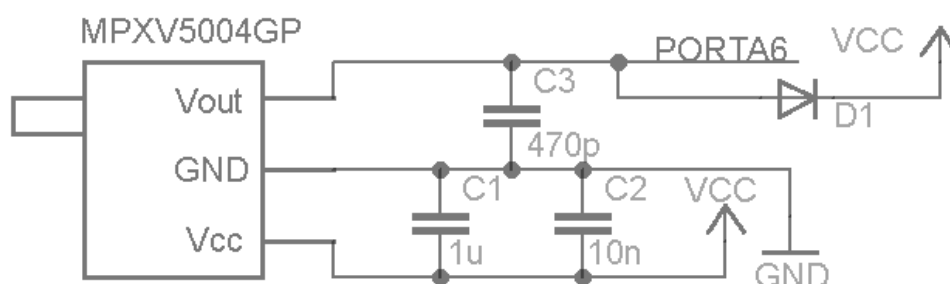
Obr. 4.11 Výstupné napätie tlakového senzora v závislosti na rýchlosti

Ako je zrejmé z Obr. 4.12 senzor môže na výstupe dosiahnuť až napätie 4,8V, preto je výstup pripojený cez diódu na V_{CC} . Pri prekročení hodnoty výstupného napätia nad hodnotu V_{CC} dôjde presmerovaniu výstupu senzoru s MCU do V_{CC} .



Obr. 4.12 Závislosť výstupného napätia na tlaku prevzaté z [16]

Senzor je zapojený podľa Obr. 4.13. Toto zapojenie je možné použiť do rýchlosti približne 122 km/h. Pre použitie pre väčšie rýchlosti bude potrebné na jeho výstup zaradiť odporový delič napätia.



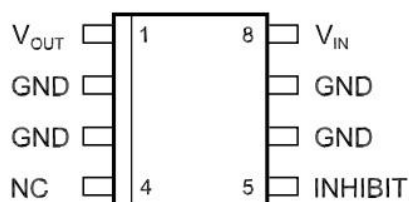
Obr. 4.13 Zapojenie meracieho obvodu s MPXV5004GP

4.9 Napájanie celého systému

Ako už bolo spomínané, celý systém sa bude napájať z palubného LiPol akumulátora. Pre funkčnosť systému ale postačí aj 2 článok LiPol (8,4V). Celý predpokladaný odber zariadenia je okolo 500mA, preto je použitý zdroj KF50BD s maximálnym trvalým výstupným prúdom 1A.

4.9.1 Regulátor napätia s veľmi nízkym poklesom napätia KF50BD-TR [17]

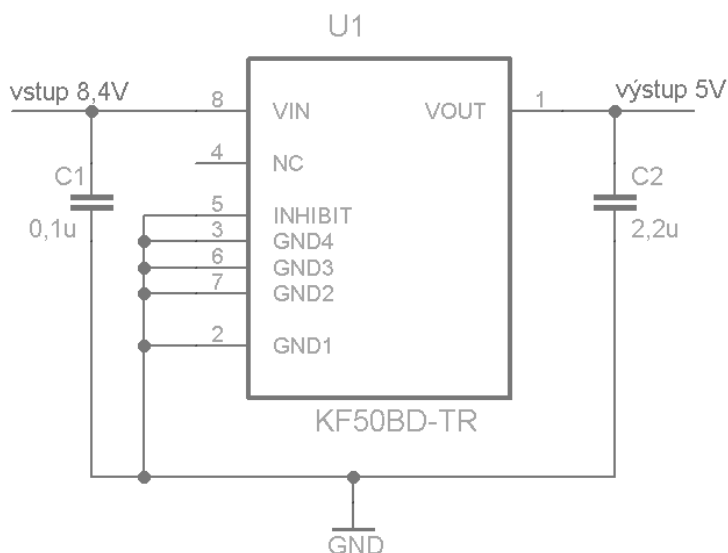
- Výstupné napätie: 5 V
- Rozsah vstupného napätia: 5,4 – 20 V
- Presnosť výstupného napätia: $\pm 2\%$
- Maximálny trvalý výstupný prúd: 1 A
- Maximálna vnútorná spotreba: 12mA
- Rozsah pracovnej teploty: -40 až +85 °C
- Možnosť pridania vypínača
- Miniaturne SMD puzdro SOIC



- 1- Napájacie napätie
- 2,3,6,7- Pripojenie k zemi
- 4- Nepripojené
- 5- Pripojenie k vypínaču
- 8- Výstupné napätie

Obr. 4.14 Konfigurácia vývodov KF50B prevzaté z [17]

Tantalové kondenzátory C1 a C2 zabezpečia stabilitu výstupného napätia. Bez ich použitia by mohol výstupné napätie z regulátora značne kmitať.



Obr. 4.15 Zapojenie obvodu KF50B

4.9.2 Regulátor napätia s veľmi nízkym poklesom napätia LP3874 [13]

Platforma ponúka aj stabilizátor na 3,3V, ktorý slúži okrem napájania kitu aj pre napájanie ďalších senzorov a bezdrôtového prenosu. Samotné napájanie pre tento

stabilizátor je privedený z ďalšieho regulátora na napätie 5V. Tento regulátor má nasledovné parametre:

- Výstupné napätie: 3,3 V
- Presnosť výstupného napätia: $\pm 1,5\%$
- Maximálny trvalý výstupný prúd: 0,8 A
- Maximálna vnútorná spotreba: 6mA
- Rozsah pracovnej teploty: -40 až +120 °C

4.10 Zobrazovacia časť

Všetky namerané hodnoty budú zobrazené na znakovom LCD s 20 znakmi v štyroch riadkoch. Tieto LCD sú obľúbené hlavne z dôvodov jednoduchosti riadenia a to pre ich integrovaný radič, ktorý sa sám postará o buďenie displeja. Pre ovládanie LCD sú použité tlačidlá, ktoré umožnia pohyb v menu nameraných hodnôt. Pri výbere LCD rozhodla nízka cena a tak isto výborne pozorovacie uhly ktoré ponúka.

4.10.1 Znakový LCD DE-LM00 [18]

- Napájacie napätie: 5V
- Formát displeja: 20 znakov v 4 riadkoch
- Modré pozadie
- Biele podsvietenie
- Široký pozorovací uhol
- Rozsah pracovnej teploty: - 20°C až +60°C
- Veľkosť zobrazovacej časti: 76mm X 26mm

Pripojenie je realizované pomocou 4 bitovej komunikácie a troch riadiacich signálov (E, R/W, RS). Takisto pomocou potenciometra je možné regulovať jas LCD.

5 POPIS RIADIACICH PROGRAMOV TELEMETRIE

Táto kapitola sa venuje popisu riadiacich programov pre mikrokontroléry v prijímacej a vysielačej časti. Ich funkciu popisujú vývojové diagramy. Programovanie vývojovej platformy je vykonané priamo cez virtuálny sériový port prostredníctvom USB pomocou funkcie bootloaderu. Rovnako ako kompilátor sú aj ostatné nástroje potrebné na vývoj založené na základe otvoreného zdrojového kódu. Na vývoj bol použitý Eclipse IDE (Integrated development enviroment) v spojení s AVR Eclipse zásuvným modulom. Ako programátor bola použitá aplikácia AVRDude. Platforma ponúka realizovanú komplexnú softwarovú knižnicu s názvom Xlib, ktorá vie poskytnúť všetkým modulom inicializáciu rozhraní, spracovanie prerušení a základné vstupno/výstupné operácie.

5.1 Popis programu pre vysielačiu časť

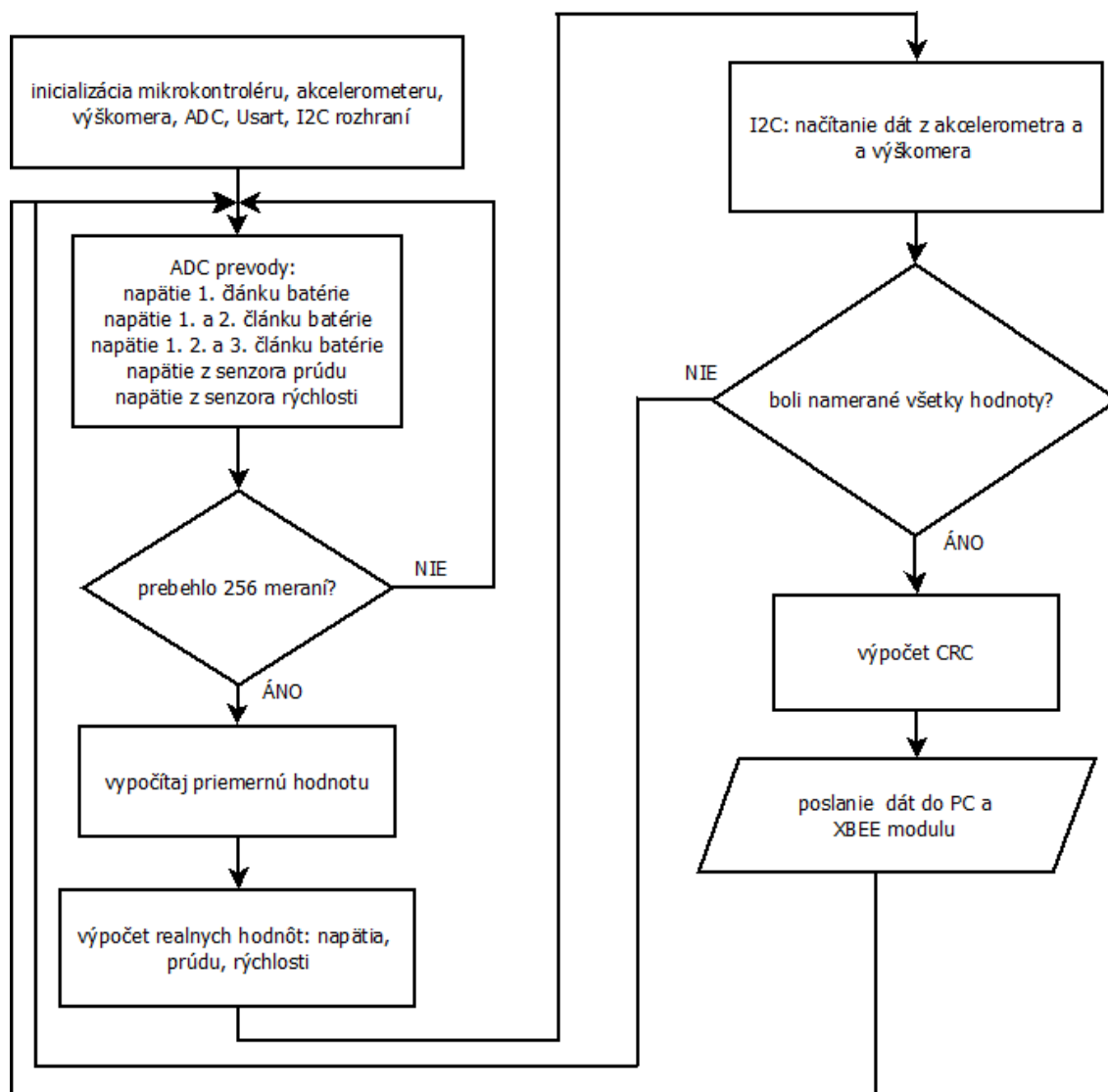
Vývojový diagram na Obr. 5.1 stručne popisuje funkciu riadiaceho programu pre mikrokontrolér vo vysielačej časti telemetrie.

Po inicializácii všetkých potrebných využívaných rozhraní, začína A/D prevodník vykonávať postupne 256 meraní na piatich rôznych portoch, na ktoré sú privedené napätia akumulátorov, a tiež výstupné napätia zo senzorov prúdu a rýchlosti. Pre zabezpečenie 256 meraní je kontrolované prerušenie o dokončení A/D prevodu na danom porte. Po prebehnutí potrebného množstva prevodov je vypočítaná priemerná nameraná hodnota, ktorá je ďaleko presnejšia ako keby vykonali len jedno meranie.

Keď máme pripravenú priemernú 12-bitovú hodnotu z A/D prevodníka, je potrebné túto hodnotu prepočítať na hodnotu reálneho napätia, prípadne pri senzoroch prúdu a rýchlosti hodnotu napätia prepočítať na výslednú hodnotu prúdu a rýchlosti. Výsledné hodnoty sú uložené ako float.

Ďalšie 2 senzory sú pripojené cez dvojvodičové I2C rozhranie. Hodnoty načítané z akcelerometra o pôsobení gravitačnej sily v osiach x, y, z, nie sú ďalej spracovávané a sú to 6-bitové hodnoty, ktoré nám priamo vráti senzor. Senzor pre meranie tlaku, na základe ktorého sa počíta výška modelu nad zemou, pracuje trochu zložitejšie, preto je popísaný presnejšie v 5.1.1.

Keď máme pripravené všetky výsledné hodnoty, ktoré potrebujeme, pošleme ich cez USART0 do terminálu na PC, kde si ich môžeme kontrolovať. Následne je zo všetkých 27 odosielaných bajtov vypočítaná cyklická kontrola (CRC), ktorá sa pridá do rámca odosielaných údajov. Tak isto sa CRC vykoná na prijímacej strane a hodnoty sa porovnajú a tým sa zabezpečí veľmi nízka chybovosť prenosu. Rámec, ktorý je prenášaný do Xbee modulu cez USART2 je na Obr. 5.2 a každá bunka v ňom predstavuje 8-bitovú hodnotu. Každé poslanie dát je tiež signalizované RGB LED diódou a to vtedy, keď preblikne zo zelenej farby na červenú.



Obr. 5.1 Popis funkcie vysielacej časti telemetrie



Obr. 5.2 Formát paketu odosielaných dát do RF modulu

5.1.1 Popis merania výšky

Meranie nadmorskej výšky je realizované pomocou tlakového senzora BMP085, ktorý je k mikrokontroléru pripojený cez I2C rozhranie. Princíp merania výšky popisuje diagram na Obr. 5.3.

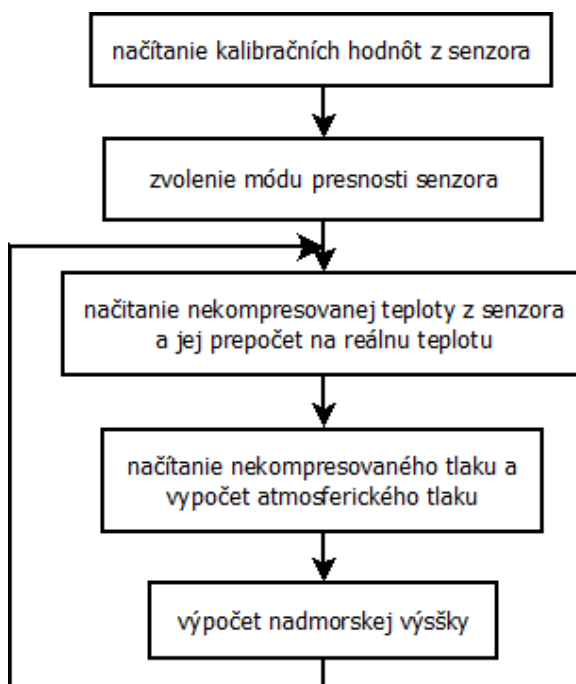
Najprv sa zo senzora načítajú kalibračné údaje, ktoré hrajú rolu pri výpočtoch teploty a tlaku. Senzor môže pracovať v rôznych režimoch, ktoré vplývajú na jeho presnosť, ale aj energetickú spotrebu a tak isto aj čas, za ktorý je senzor schopný previesť jedno meranie. Režim senzoru sa nastavuje pomocou premennej OSS

(Oversampling setting), ktorá môže nadobúdať tieto hodnoty:

- **0** pre režim nízkej spotreby, kedy je senzor schopný rozoznať každú zmenu výšky o 0,5m (0,06hPa)
- **1** pre štandardný režim, kedy je senzor schopný rozoznať každú zmenu výšky o 0,4m (0,05hPa)
- **2** pre režim s vysokou presnosťou, kedy je senzor schopný rozoznať každú zmenu výšky o 0,3m (0,04hPa)
- **3** pre režim s veľmi vysokou presnosťou, kedy je senzor schopný rozoznať každú zmenu výšky o 0,25m (0,03hPa)

V programe bolo OSS zvolené na 1, z dôvodu postačujúcej presnosti a nízkej doby merania.

Následne je zo senzora načítaná nekompresovaná teplota, ktorá sa prepočíta na hodnotu reálnej teploty. Výpočet teploty je nutné spraviť pred meraním tlaku, pretože jej hodnota je potrebná pri výpočte tlaku. Tak isto sa načíta hodnota nekompresovaného tlaku a pomocou nej a teploty sa dopočíta na základe algoritmu z katalógového listu, hodnota atmosférického tlaku.



Obr. 5.3 Popis funkcie tlakového senzora BMP085

Pomocou atmosférického tlaku môžeme určiť nadmorskú výšku pomocou vzorca:

$$V = 44330 \cdot \left(1 - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{1}{5,255}}\right) \quad (1.6.)$$

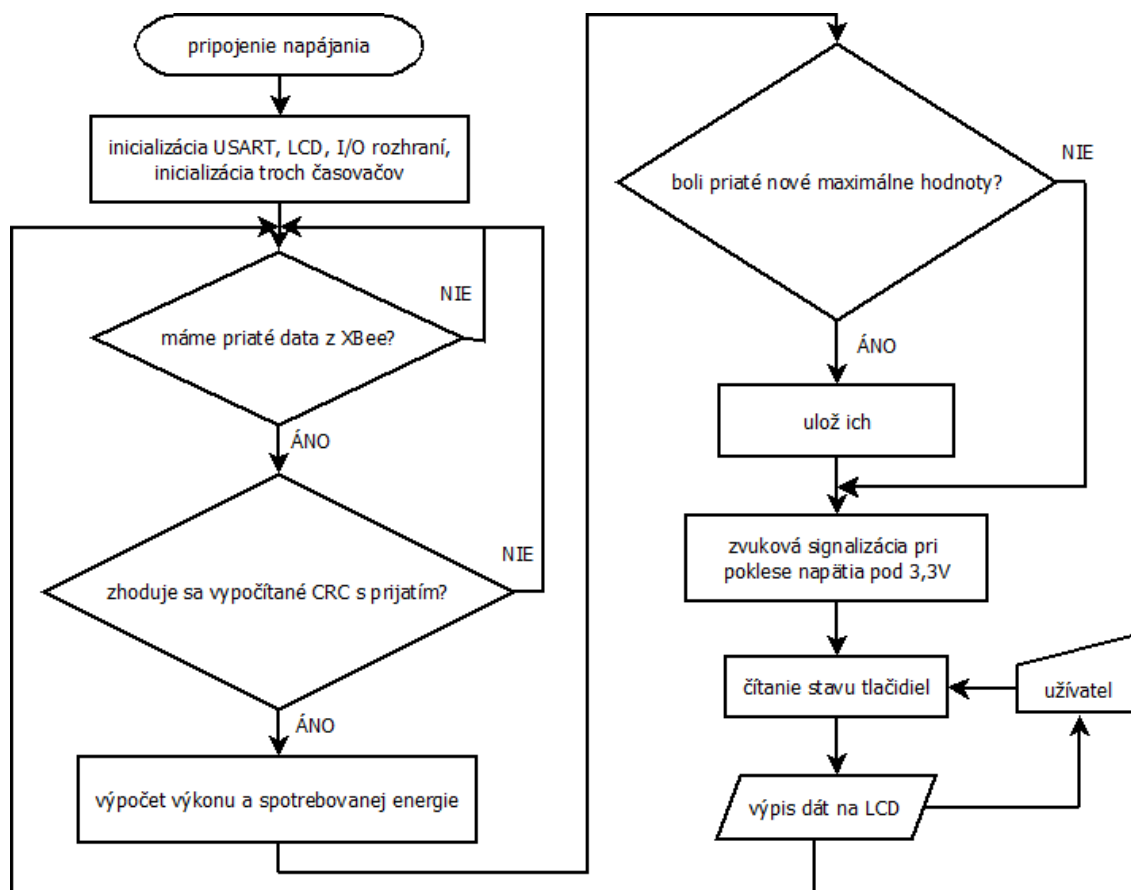
kde V predstavuje nadmorskú výšku, p je aktuálna hodnota tlaku, ktorú sme zmerali a $p_0=101325 \text{ Pa}$, je priemerná hodnota tlaku na hladine mora.

Pre pilota je však zaujímavá výška modelu nad zemou od miesta, kde

vyštartoval. Preto je pri inicializácii vysielacej časti zameraná výška, ktorá je uvažovaná ako nulová a ďalšími meraniami sa počíta len zmena od tejto hodnoty.

5.2 Popis programu pre prijímaciu časť

Obr. 5.4 ilustruje činnosť riadiaceho programu pre prijímaciu časť telemetrického systému. Po pripojení LiPol akumulátora, sú inicializované všetky potrebné rozhrania a vnútorné periférie MCU a systém čaká na prijatie správneho paketu. Po prijatí celého paketu je vypočítaný CRC a následne porovnaný s prijatým a v prípade zhody, boli dáta prijaté správne a sú ďalej spracúvané. Najprv sa dáta spätne poskladajú do premenných a následne sa z hodnôt prúdu a napätia vypočíta výkon. Tak isto sa sledujú maximálne hodnoty výkonu, rýchlosti, prúdu a výšky, ktoré sa ukladajú do štatistík pre neskoršie zobrazenie. Pomocou časovača sa tiež počíta každú sekundu hodnota spotrebovanej energie z batérie do regulátora.



Obr. 5.4 Popis funkcie prijímacej časti telemetrie

Ďalšou dôležitou funkciou je zvuková reprezentácia kritických hodnôt napätia. Preto je naprogramovaná funkcia s názvom „beep“, ktorá nastavuje časovač a umožňuje nastaviť široké spektrum zvukových signálov pre rôzne účely. Napríklad je zvukovo reprezentované poklesnutie napätia ktoréhokoľvek článku pod 3,3V, čo je hodnota, ktorá vraví pilotovi, aby čím skôr pristál.

Systém tiež obsahuje 5 tlačidiel, ktoré okrem pohybu v menu nameraných

hodnôt, umožňujú aj nastaviť a spustiť časovač. Nastavuje sa dvoma tlačidlami, ktoré zvyšujú/znižujú hodnotu požadovaného času a následným spustením časovača ďalším tlačidlom, dôjde k dekrementácii nastavenej hodnoty každú sekundu a navyše celú minútu pípne bzučiak. Po vypršaní požadovaného času, dôjde k väčšiemu množstvu pípnutí. Toto je užitočná funkcia napríklad pri súťaži, kedy má pilot presne daný čas, kedy má pristáť.

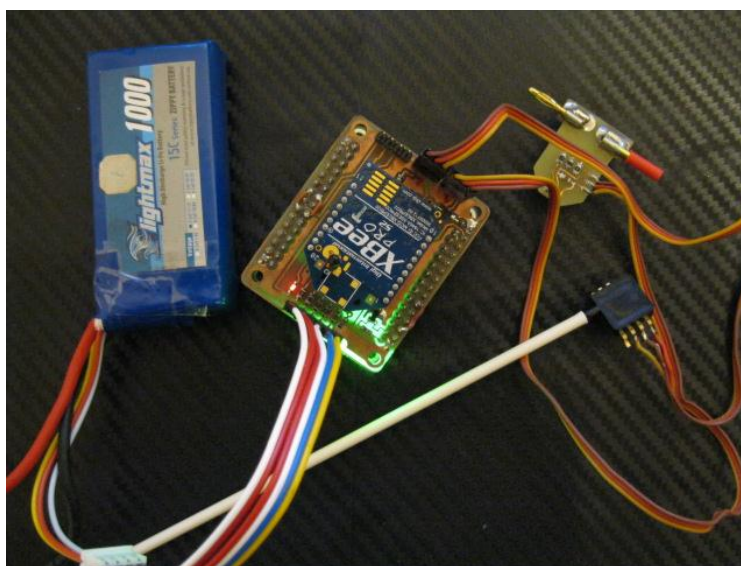
Na konci cyklu dochádza k výpisu všetkých prijatých vypočítaných hodnôt na LCD a systém opäť čaká na prijatie nového paketu.

6 POPIS ZARIADENIA A STANOVENIE JEHO PARAMETROV

Posledná kapitola je venovaná popisu vysielacej aj prijímacej časti telemetrie, a to po konštrukčnej stránke. Popísané je tiež menu prijímača a tiež možnosť jeho nastavenia. Ďalej sa venuje presnosti merania, ktoré senzory reálne dosahujú.

6.1 Popis vysielacej časti telemetrie

Vysielacia časť je tvorená 3 doskami plošného spoja, ktoré sú medzi sebou prepojené. Návrh dosiek bol robený v programe Eagle. Súčiastky boli použité len v SMD puzdrách, z dôvodu miniatúrnej veľkosti a váhy a to najčastejšie v prevedení puzdier 0805. O výrobu DPS sa postarala dielňa na Ústave rádioelektroniky, za čom im veľmi pekne ďakujem. Prúdový senzor je na samostatnej doske z dôvodu, že ho je potrebné umiestniť priamo medzi batériu a regulátor a pripojenie k hlavnej doske je realizované pomocou klasického 2,54mm konektoru. Senzor na meranie diferenčného tlaku je tiež pripojený cez konektor a je ho potrebné v lietadle umiestniť tak, aby sa z neho dala Pitotova trubica vyviesť von z modelu.



Obr. 6.1 Vyhotovenie vysielacej časti telemetrie

6.2 Popis prijímacej časti telemetrie

Prijímacia časť je koncipovaná na 3 dosky plošného spoja, ktoré sú medzi sebou prepojené pomocou konektorov. Pri návrhu dosiek bolo myslené na budúce umiestnenie zariadenia do krabičky Obr. 6.2, ktorá sa bude dať umiestniť na pult RC súpravy. Z krabičky je vyvedená 5dBi anténa, ktorá sa k Xbee pripája cez U.FL konektor. Tak isto je z boku urobený otvor pre privedenie napájania, ale aj umožňuje pripojenie mini USB kábla pre programovanie a prístup k microSD karte. Nad LCD je umiestnených 5 tlačidiel, ktoré sú tiež vyvedené.

V prvom riadku LCD sú zobrazené hodnoty jednotlivých článkov batérie vo Voltoch. V ďalšom pri písmene **I**: je zobrazená hodnota prúdu v Ampéroch a vedľa nej pod písmenom **S**: je rýchlosť modelu v km/h. **V**: predstavuje výšku modelu nad zemou v metroch a **T**: nastaviteľné stopky. Posledný riadok obsahuje hodnotu spotrebovanej energie z batérie v mAh (mili-Ampér-hodinách) a **W**: je hodnota aktuálneho výkonu vo Wattoch.



Obr. 6.2 Vyhotovenie prijímacej časti telemetrie

Po stlačení tlačidla s názvom **MENU** sa dostávame na ďalšiu obrazovku Obr. 6.3, ktorá obsahuje štatistické hodnoty, ale aj umožňuje nastaviť časovač, na základe ktorého sú naprogramované stopky. Nastavenie stopiek je možné pomocou tlačidiel + a –, kde jedno stlačenie tlačidla predstavuje zmenu o 10 sekúnd a spustenie nastane po stlačení tlačidla **START**.



Obr. 6.3 Zobrazenie štatistických hodnôt veličín v prijímacej časti

V prvom riadku sú vytlačené aktuálne hodnoty z akcelerometra a to pôsobenie gravitačnej sily v osiach x, y a z. Druhý riadok obsahuje hodnotu maximálneho prúdu, ktorý bol prijatý a tiež názov modelu. V ďalšom riadku je zobrazená hodnota maximálnej prijatej výšky a aktuálne nastavenie stopiek. Posledný riadok obsahuje údaje o prijatej maximálnej rýchlosti a maximálnom výkone. Stredné tlačidlo nie je zatiaľ využité, ale v budúcnosti bude sprístupňovať dáta uložené na microSD karte.

6.3 Parametre zariadenia

Výsledné zariadenie spĺňa tieto parametre:

- Rozmery: vysielacia aj prijímacia časť dosahujú veľkosť 42x51mm. Pre tieto rozmery je možné zariadenia bezproblémovo umiestniť v modeli lietadla.
- Vysielací výkon: výsledné zariadenie bolo osadené v modeli a prakticky otestované na vzdialenosť 500m (zmerané na mape). Telemetria aj riadenie modelu fungovalo bezproblémovo. Výsledná vzdialenosť, na akú je možné

telemetricky prenášať dáta je ale určite väčšia (výrobca RF modulov udáva 1500m).

- Meranie napätia palubných akumulátorov: charakteristika každého vstupu A/D prevodníka bola nameraná na presnom prístroji METEX MXD-4660a. Na základe merania funkcie vstupného napätia do A/D prevodníka na bitovej hodnote, boli určené konštanty, pomocou ktorých je počítaná výsledná hodnota napätia. Napätie prvého článku je možné merať s presnosťou približne 1,25mV (súvisí s hodnotou LSB), meranie napätia druhého článku s presnosťou približne 2,5mV a tretieho 3,75mV.
- Meranie prúdu: tak isto bola pomocou kliešťového ampérmetra CDM600 nameraná funkcia prúdu na bitovej hodnote A/D vstupu MCU. Na základe merania bola určená konštanta, pomocou ktorej sa počíta výsledná hodnota prúdu. Senzor je schopný zaznamenať každú zmenu prúdu o 72mA.
- Meranie rýchlosti: pre meranie platí, že s rastúcou rýchlosťou sa presnosť merania zvyšuje, keďže náporový tlak rastie s druhou mocninou rýchlosti. Merať rýchlosť je možné od 2,82km/h a s rastúcou rýchlosťou sa postupne presnosť merania zvyšuje. Maximálna rýchlosť, ktorú je senzor schopný zmerať bez napäťového deliča, je 122,2km/h.
- Meranie výšky: o toto meranie sa stará digitálny senzor, ktorý je nastavený v takom režime, aby dokázal určiť výšku s presnosťou podľa výrobcu na 0,4m. Reálne však nameraná hodnota kolíše okolo $\pm 2\text{m}$.

7 ZÁVER

Cieľom tejto práce bolo navrhnúť bezdrôtový telemetrický systém pre model lietadla s rádiovým riadením. V práci bolo písané o spôsobe merania palubných veličín, a tak isto o ich možnom praktickom využití v praxi. Požiadavky stanovené v kapitole 3.1 boli čo najviac dodržané pri návrhu a výbere komponentov. Bolo otestované a vyhodnotené meranie rýchlosti pomocou Pitotovej trubice.

Tiež bolo potrebné zvládnuť prácu s veľkým množstvom katalógov, na základe ktorých bolo tvorené obvodomé zapojenie systému. Pre správnu funkciu systému boli vypočítané hodnoty súčiastok. Bolo navrhnuté komplexné obvodomé zapojenie vysielacej a prijímacej časti, ktoré je priložené v prílohách A.2 a A.8. Celé zariadenie bolo koncipované na štyri DPS (prílohy: A.3, A.6, A.9, A.12). DPS boli osadené SMD súčiastkami a ich vyhotovenie je v prílohe B.

Po vyladení hardwarovej časti systému, došlo k tvorbe softwaru pre Xmega 128a3 a to dvoch riadiacich programov pre vysielaciu aj prijímaciu časť. V prvej fáze vývoja bolo potrebné realizovať meranie všetkých zvolených veličín. Po prepočítaní veličín do finálnej podoby bolo potrebné nakonfigurovať XBee moduly tak, aby vedeli medzi sebou komunikovať. V druhej fáze bola tvorená prijímacia časť, ktorá ponúka okrem zobrazenia aktuálne prijatých údajov, aj ukladanie maximálnych údajov, a tiež možnosť nastavenia stopiek. V tretej fáze vývoja došlo už len k postupnému vyladovaniu riadiacich programov až do štádia, v akom sú teraz.

Budúce možné rozšírenie vidím hlavne v softwarovej časti zariadenia a to v možnosti ukladania dát na microSD kartu a možnosti ich analyzovať na PC. Ďalší vývoj bude smerovať hlavne k zobrazovacej časti telemetrie a to využitiu funkcie bluetooth, ktorú ponúka platforma, pomocou ktorej by došlo k prenosu dát do smartphonu, kde by bolo možné údaje graficky zobraziť a reprezentovať aj syntetizátorom reči. Právé spojením so smartphonom má byť aj využité GPS, pre ktoré má systém pripravený vstup, ale zatiaľ nie je využívaný.

LITERATÚRA

- [1] VALÚCH, Daniel. *Digitálne signály* [online]. Posledná revízia 10.09.2002 [cit. 24-12-2011]. Dostupné na WWW: <http://www.radia.sk/citaren/ako-funguje-radio/668_digitalne-signaly.html>.
- [2] WOLFORD, Chris. *Hall-EffectSensor* [online]. Posledná revízia 30.09.2011 [cit. 24-12-2011]. Dostupné na WWW: <<http://www.explainthatstuff.com/hall-effect-sensors.html>>.
- [3] WIKIPÉDIA. *Pressure senzor* [online]. Posledná revízia 03.12.2011 [cit. 24-12-2011]. Dostupné na WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Pressure_sensor>.
- [4] WIKIPÉDIA. *Pitotova trubica* [online]. Posledná revízia 14.07.2009 [cit. 24-12-2011]. Dostupné na WWW: <http://sk.wikipedia.org/wiki/Pitotova_trubica>.
- [5] OMEGA. *Introduction to Accelerometers* [online]. [cit. 24-12-2011]. Dostupné na WWW: <<http://www.omega.com/prodinfo/accelerometers.html>>.
- [6] ČESKÝ TELEKOMUNIKAČNÝ ÚŘAD. *Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/03.2007-4 k využívání rádiových kmitočtů a provozování zařízení krátkého dosahu* [online]. Posledná revízia 05.03.2007 [cit. 25-12-2011]. Dostupné na WWW: <http://www.ctu.cz/1/download/OOP/Rok_2007/VO_R_10_03_2007_4.pdf>.
- [7] DIGI. *Xbee/Xbee-PRO RF Modules* [online datasheet]. Posledná revízia 23.09.2009 [cit. 24-12-2011]. Dostupné na WWW: <http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000982_B.pdf>.
- [8] STAXWIKI. *STAX platform* [online]. Posledná revízia 23.06.2011 [cit. 25-12-2011]. Dostupné na WWW: <http://wiki.staxplatform.org/staxwiki/STAX_platform>.
- [9] ATMEL. *8-bit AVR XMEGA A Microcontroller* [online datasheet]. Posledná revízia 12/2009 [cit. 25-12-2011]. Dostupné na WWW: <http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc8077.pdf>.
- [10] ATMEL. *8/16-bit Atmel XMEGA A3U Microcontroller* [online datasheet]. Posledná revízia 07/2011 [cit. 25-12-2011]. Dostupné na WWW: <<http://www.farnell.com/datasheets/1503981.pdf>>.
- [11] ANALOG DEVICES. *Precision Micropower Shunt Mode Voltage References* [online datasheet]. Posledná revízia 12/2007 [cit. 25-12-2011]. Dostupné na WWW: <http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/ADR5040_5041_5043_5044_5045.pdf>.
- [12] FREESCALE SEMICONDUCTOR. *MMA7660FC* [online datasheet]. Posledná revízia 11/2009 [cit. 25-12-2011]. Dostupné na WWW: <http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7660FC.pdf?pspll=1>.
- [13] TEXAS INSTRUMENTS. *LP3871/LP3874* [online datasheet]. Posledná revízia 09/2006 [cit. 25-12-2011]. Dostupné na WWW:

- <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lp3871.pdf>>.
- [14] BOSCH. *BMP085* [online datasheet]. Posledná revízia 18.10.2009 [cit. 25-12-2011]. Dostupné na WWW: <<http://www.sparkfun.com/datasheets/Components/General/BST-BMP085-DS000-05.pdf>>.
- [15] ALEGRO. *ACS758xCB* [online datasheet]. Posledná revízia 25.03.2011 [cit. 25-12-2011]. Dostupné na WWW: <http://www.allegromicro.com/en/Products/Part_Numbers/0758/0758.pdf>.
- [16] FREESCALE SEMICONDUCTOR. *MPXV5004* [online datasheet]. Posledná revízia 02/2008 [cit. 25-12-2011]. Dostupné na WWW: <http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPXV5004G.pdf>.
- [17] STMICROELECTRONICS. *KFxxB* [online datasheet]. Posledná revízia 09/2009 [cit. 25-12-2011]. Dostupné na WWW: <http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00000970.pdf>.
- [18] SURE ELECTRONICS. *DE-LM005* [online datasheet]. [cit. 25-12-2011]. Dostupné na WWW: <<http://www.sure-electronics.net/mcu/display/DE-LM005.pdf>>.

ZOZNAM SYMBOLOV, VELIČÍN A ZKRATIEK

LCD – Liquid Crystal Display (displej z tekutých kryštálov)
RC – Radio Control (rádiové ovládanie)
ADC – Analog to Digital Converter (analogovo-digitálny prevodník)
LED – Light-Emitting Diode (dióda emitujúca svetlo)
PWM – Pulse-Width Modulation (pulzne šírková modulácia)
GPS – Global Positioning System (globálny pozičný systém)
MEMS – Micro-Electro-Mechanical Systems (mikro-elektro-mechanické systémy)
PC – Personal Computer (osobný počítač)
GSM – Global System for Mobile communications (globálny systém pre mobilnú komunikáciu)
SMD – Surface Mount Devices (zariadenie pre povrchovú montáž)
USART – Universal Synchronous Asynchronous Receiver/Transmitter (synchronný a asynchronný prenos)
SPI – Serial Peripheral Interface (názov štandardu sériovej zbernice)
I2C – Inter-Integrated Circuit (názov štandardu sériovej zbernice)
USB – Universal Serial Bus (názov štandardu sériovej zbernice)
RGB – Red, Green, Blue (červená, zelená, modrá)
MCU – a Micro Controller Unit (mikrokontrolér)
I/O – In-Out (vstupne výstupný)
CRC – Cyclic Redundancy Check (kontrola cyklickým kódom)
 v – rýchlosť
 ρ – hustota vzduchu v manometre
 p_c – celkový tlak
 p_s – statický tlak
 R_{BIAS} – obmedzovací odpor
 V_{CC} – vstupné napätie
 V_{OUT} – výstupné referenčné napätie
 I_L – výstupný prúd do mikrokontroléra
 I_{IN} – vstupný prúd do referenčného zdroja
 U_{vyst} – výstupné napätie z deliča
 U_{vst} – napätie na vstupe deliča z batérie
 R_1 a R_2 – odpory deliča
 $U_{90\%VCC}$ – maximálne napätie na výstupe prúdového senzora
 f_{medz} – medzný kmitočet

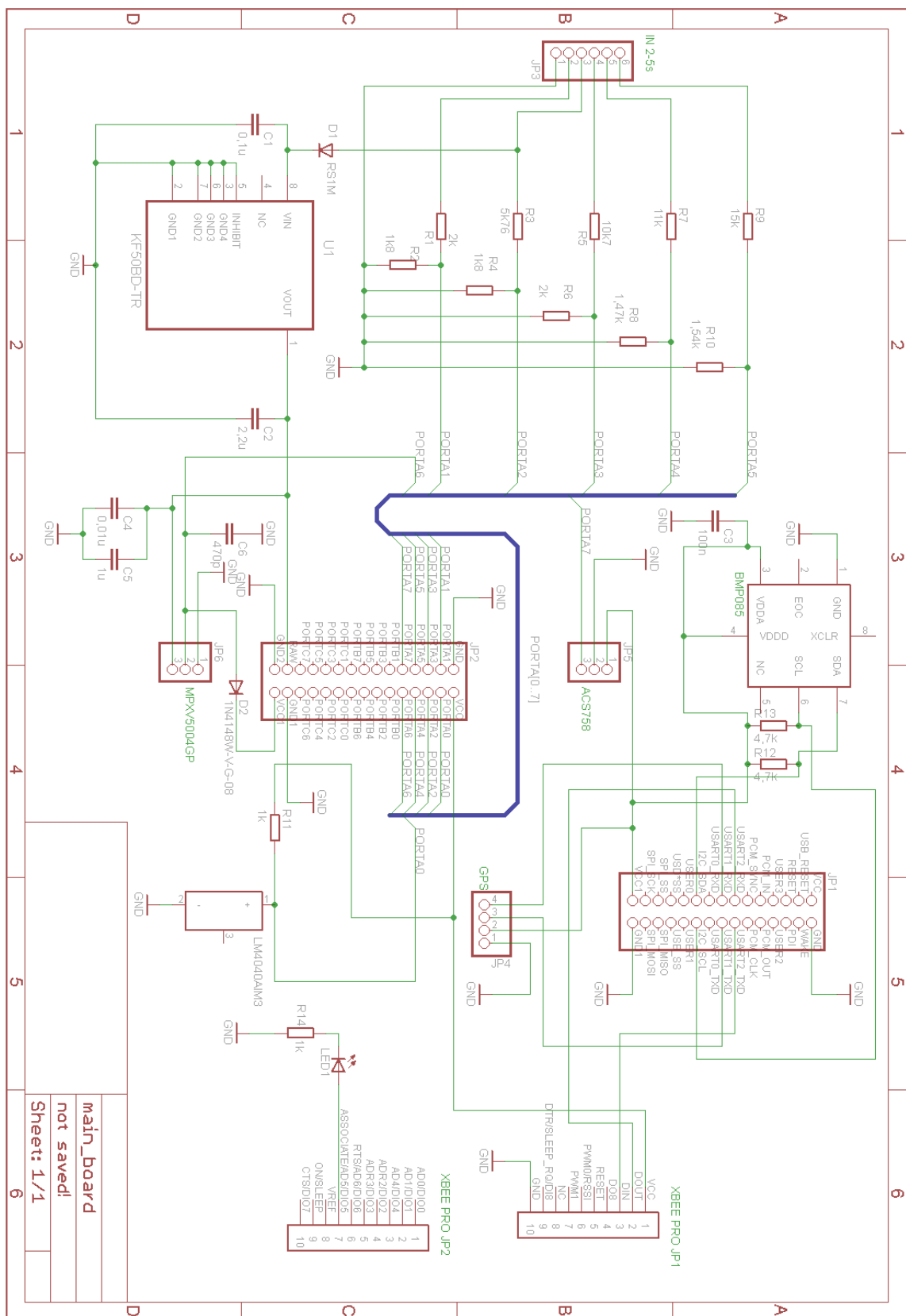
ZOZNAM PRÍLOH

A	Návrh zariadenia	42
A.1	Obvodové zapojenie platformy STAX	42
A.2	Obvodové zapojenie vysielacej časti	43
A.3	Doska plošného spoja vysielacej časti	44
A.4	Osadzovací výkres vysielacej časti	44
A.5	Obvodové zapojenie prúdového senzora	44
A.6	Doska plošného spoja prúdového senzora	45
A.7	Osadzovací výkres prúdového senzora	45
A.8	Obvodové zapojenie prijímacej časti	46
A.9	Doska plošného spoja prijímacej časti	47
A.10	Osadzovací výkres prijímacej časti	47
A.11	Obvodové zapojenie tlačidlového modulu	48
A.12	Doska plošného spoja tlačidlového modulu	48
A.13	Osadzovací výkres tlačidlového modulu	48
B	Vyhotovenie zariadenia	49
B.1	Vyhotovenie hlavnej dosky vysielacej časti	49
B.2	Vyhotovenie prúdového senzora	49
B.3	Vyhotovenie vysielacej časti	50
B.4	Vyhotovenie hlavnej dosky prijímacej časti	50
B.5	Vyhotovenie prijímacej časti	51
B.6	Výsledná podoba telemetrie osadená v lietadle	51
C	Zoznam príloh priložených na DVD	52

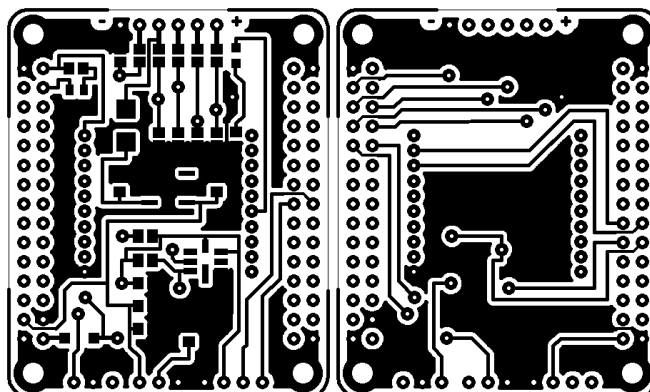
A.1 Obvodové zapojenie platformy STAX



A.2 Obvodové zapojenie vysielacej časti

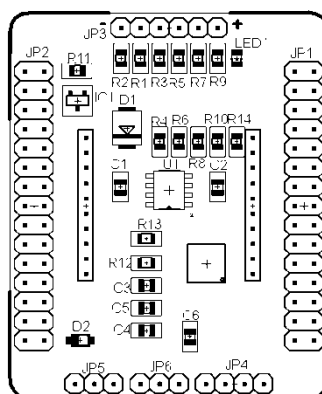


A.3 Doska plošného spoja vysielacej časti

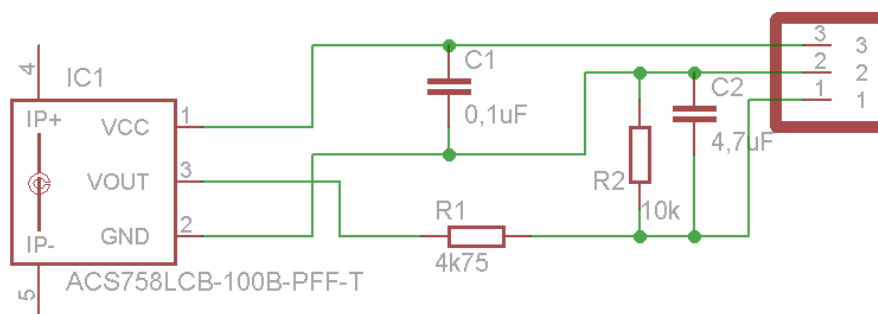


Rozmery dosky 42x51 [mm], mierka M1:1 (Vľavo strana súčiastok, vpravo strana spojov)

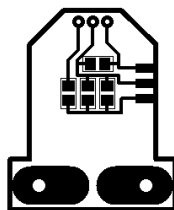
A.4 Osadzovací výkres vysielacej časti



A.5 Obvodové zapojenie prúdového senzora

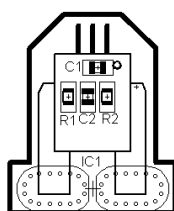


A.6 Doska plošného spoja prúdového senzora

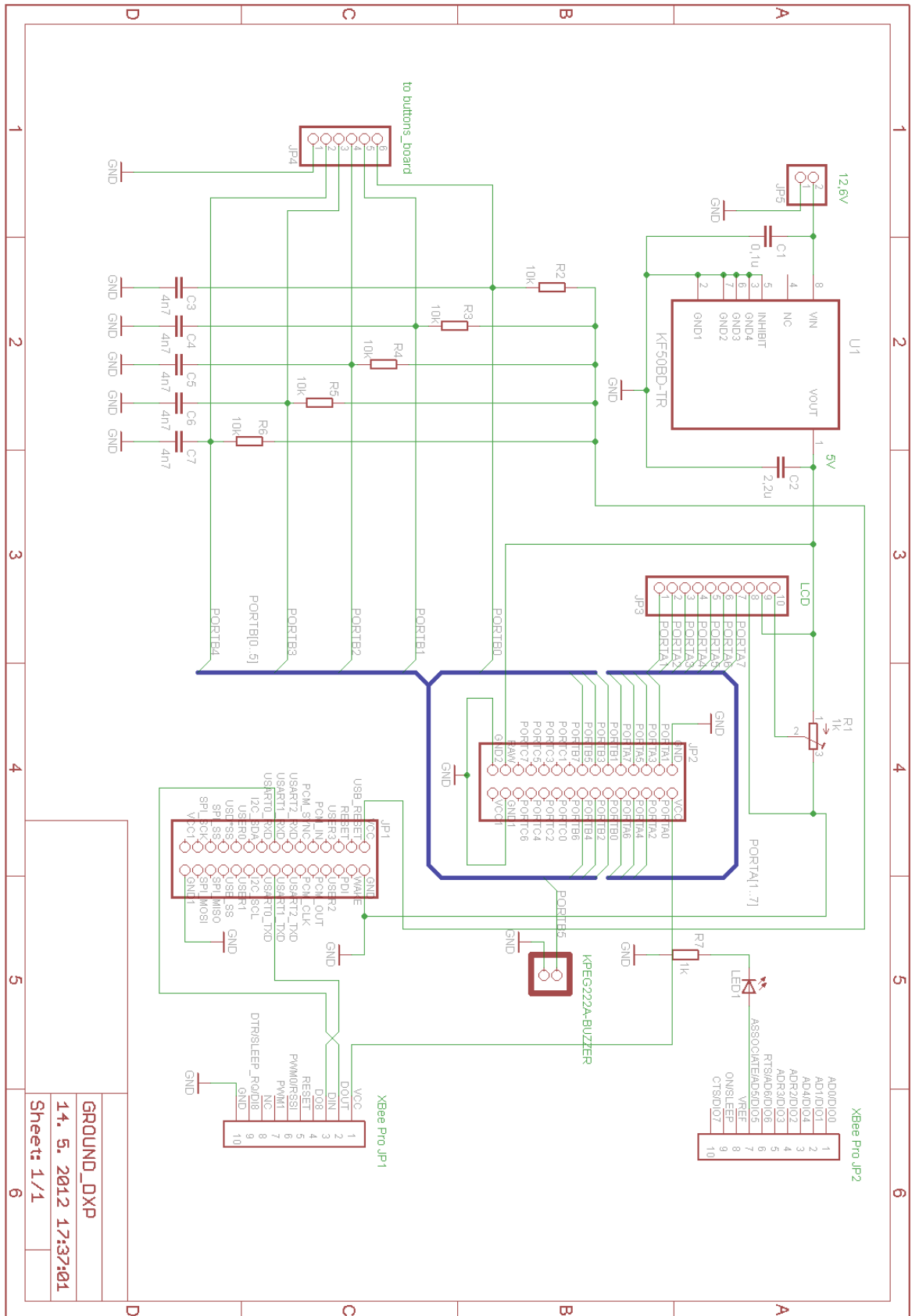


Rozmery dosky 22x27 [mm], mierka M1:1

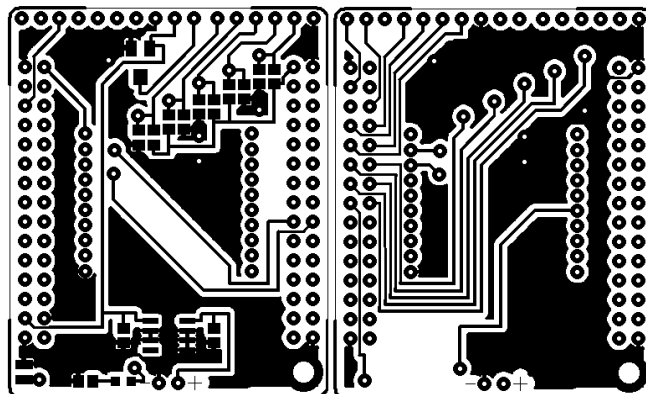
A.7 Osadzovací výkres prúdového senzora



A.8 Obvodové zapojenie prijímacej časti

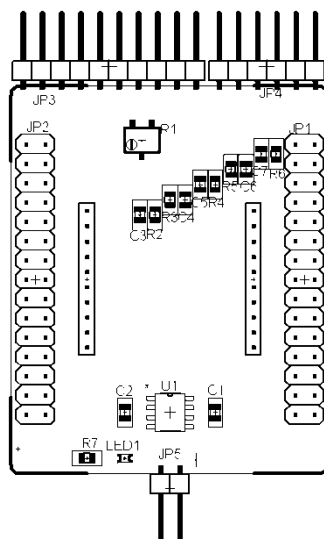


A.9 Doska plošného spoja prijímacej časti

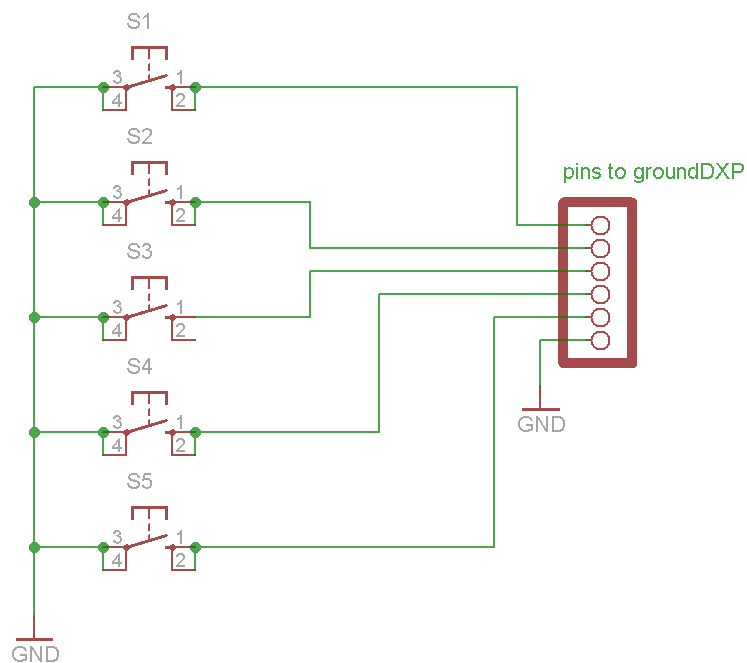


Rozmery dosky 42x51 [mm], mierka M1:1 (Vľavo strana súčiastok, vpravo strana spojov)

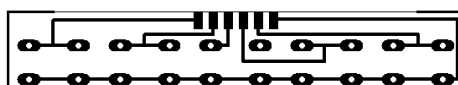
A.10 Osadzovací výkres prijímacej časti



A.11 Obvodové zapojenie tlačidlového modulu

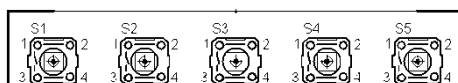


A.12 Doska plošného spoja tlačidlového modulu



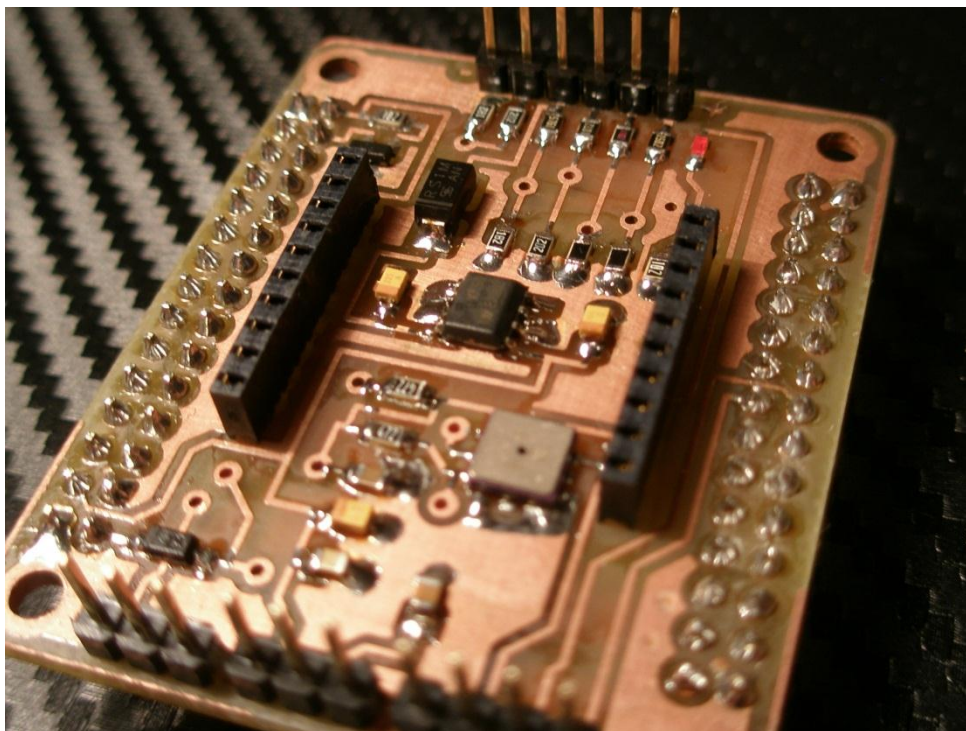
Rozmery dosky 60x10 [mm], mierka M1:1

A.13 Osadzovací výkres tlačidlového modulu

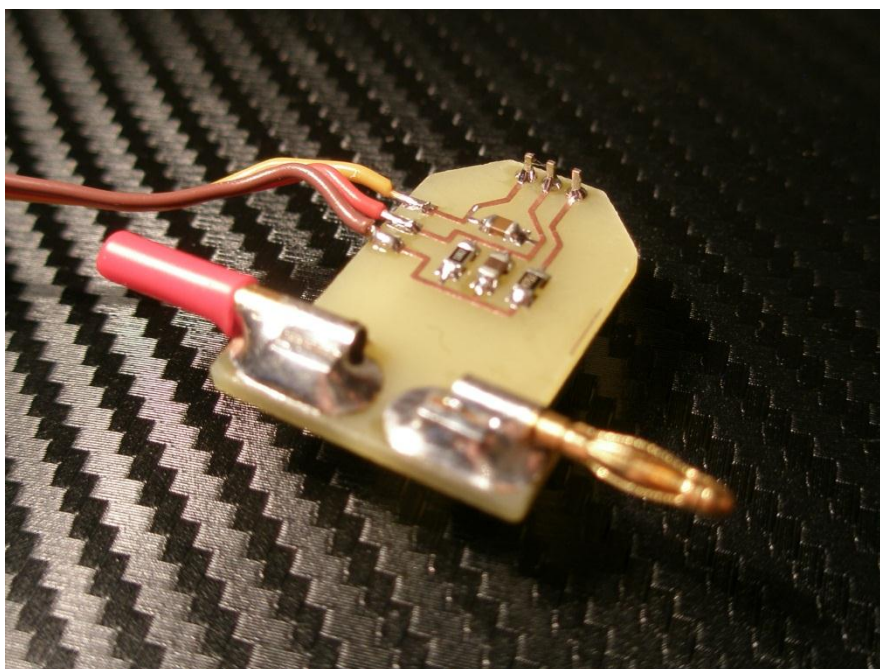


B VYHOTOVENIE ZARIADENIA

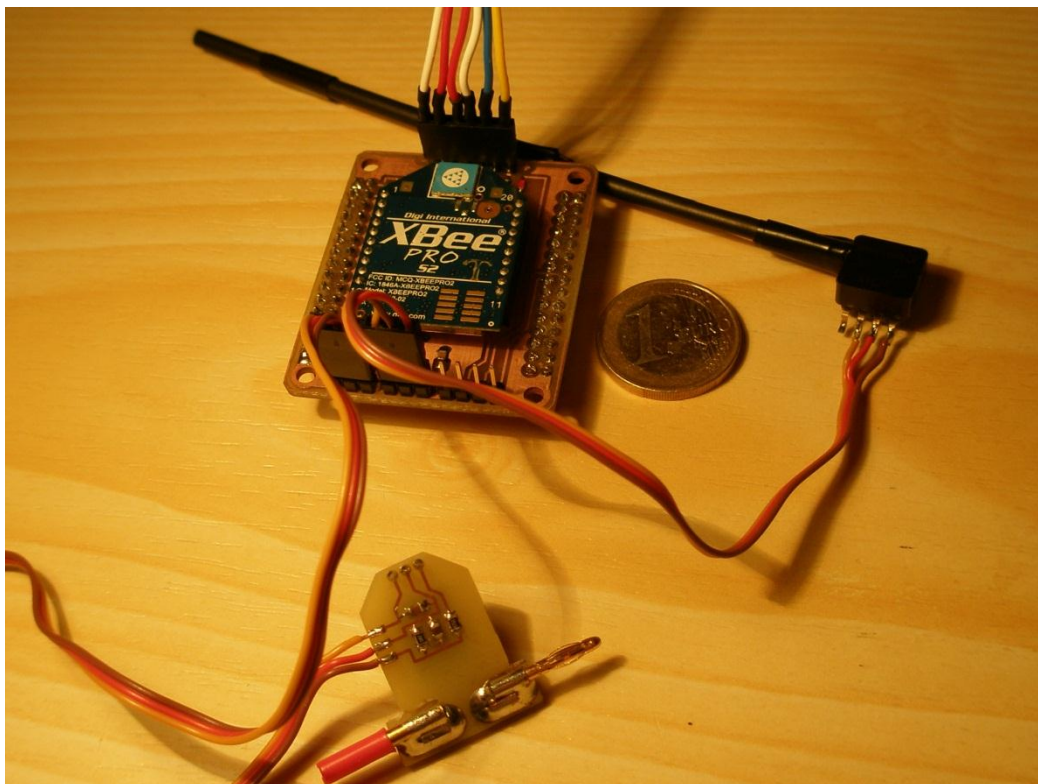
B.1 Vyhotovenie hlavnej dosky vysielacej časti



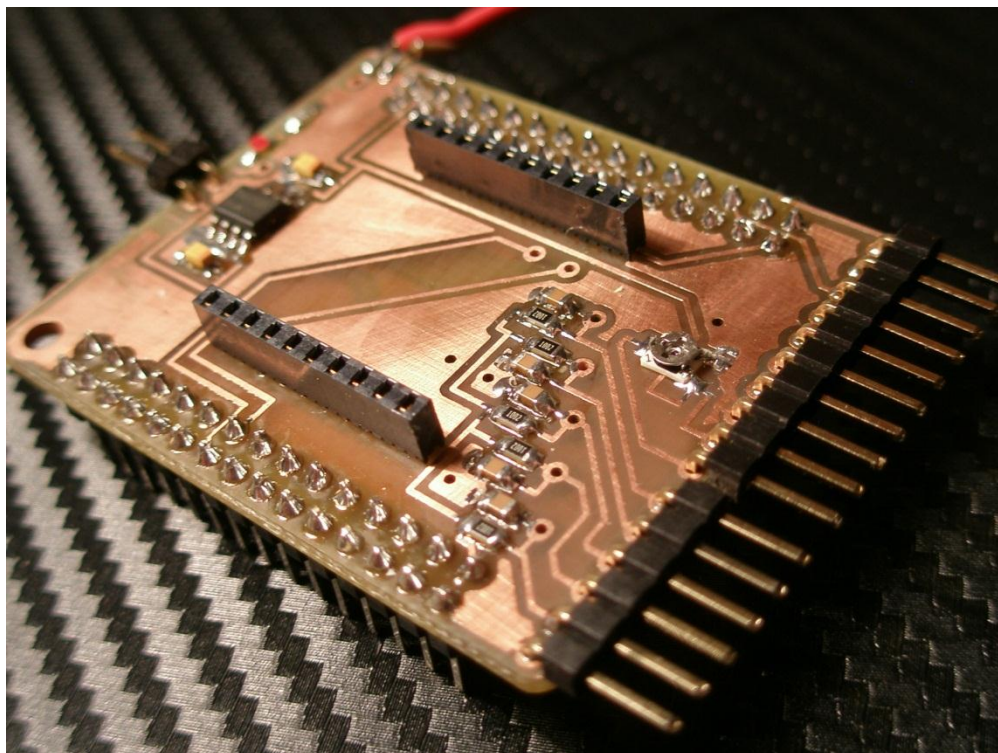
B.2 Vyhotovenie prúdového senzora



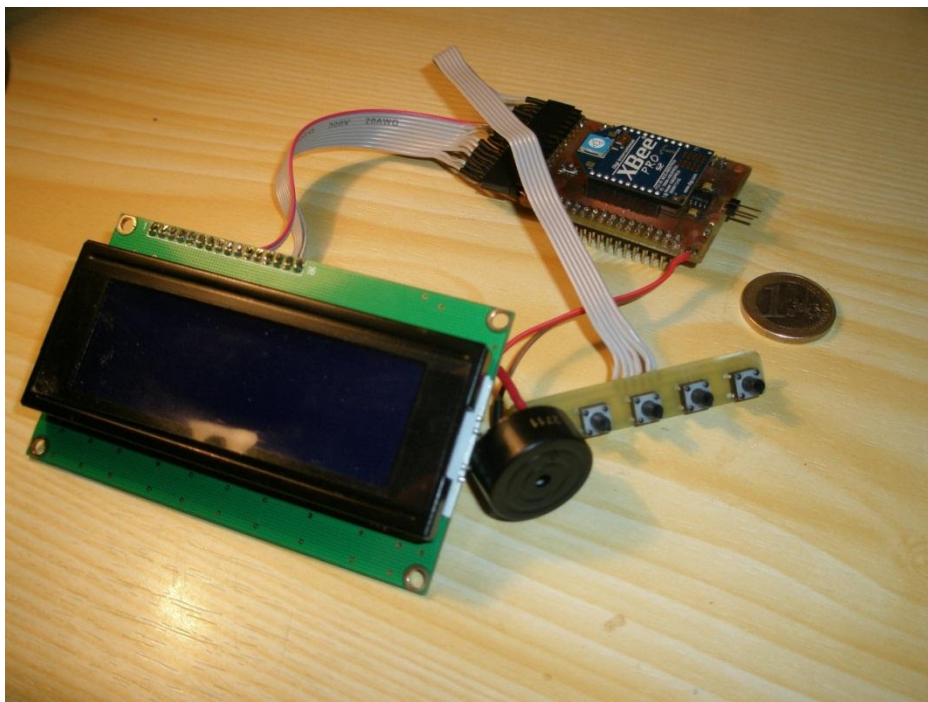
B.3 Vyhotovenie vysielacej časti



B.4 Vyhotovenie hlavnej dosky prijímacej časti



B.5 Vyhotovenie prijímacej časti



B.6 Výsledná podoba telemetria osadená v lietadle



C ZOZNAM PRÍLOH PRILOŽENÍCH NA DVD

- Elektronická verzia práce vo formáte PDF v adresári /PDF
- Vytvorené zdrojové súbory v Eclipse v adresári /Source
- Vytvorené dosky plošného spoja v Eagle v adresári /DXP
- Vykonané merania v Excely v adresári /Excel
- Fotodokumentácia v adresári /Photos
- Vybrané katalógové listy v adresári /Datasheets