UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Telemetrie pro modely letadel

Petr Starý

Bakalářská práce
2013

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Petr Starý**
Osobní číslo:	**I08321**
Studijní program:	**B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Komunikační a mikroprocesorová technika**
Název tématu:	**Telemetrie pro modely letadel**
Zadávající katedra:	**Katedra elektrotechniky**

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je navrhnout zařízení pro analýzu letu letadlového modelu. Zařízení by mělo být schopno měřit základní údaje jako je rychlost, výška, stav baterií, případně některé další veličiny jako je kvalita signálu atd. V případě detekce kritických hodnot, jako například vybití baterií pod určitou mez by měl modul být schopen optické/akustické signalizace. Měřené veličiny je potřeba v průběhu letu ukládat anebo posílat zpět na zem pomocí bezdrátového přenosu. Teoretická část práce se bude zabývat problematikou měření jednotlivých veličin, možnostmi zpracování, napájení modelů, popisem signálů požívaných v modelech. Praktická část se bude zabývat návrhem jednoduchého telemetrického modulu pro letadlo s indikací kritických stavů.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

RIPKA, P.; TIPEK, A. Master Book of Sensors. Praha : BEN, 2003. ISBN 0-12-752184-4 Stanislav Ď.; Marcel K.Senzory a měřicí obvody; Praha : Vydavatelství ČVUT, 1999 ISNB 80-01-02057-6

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavel Rozsíval**
Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **21. prosince 2012**
Termín odevzdání bakalářské práce: **10. května 2013**

prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan

L.S.

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 29. března 2013

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 29.8. 2013 Petr Starý

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Pavlu Rozsívalovi za vedení mé práce, za pomoc a rady při zpracovávání. Dále bych velmi rád poděkoval rodině, která mne podporovala na studiích a věřila mi přes všechny útrapy uplynulých let. Pro mne nejdůležitější osoba, která si zaslouží můj velký dík a zvěčnění v této práci, je Aneta Vaňková, bez které bych se nikdy nedostal tak daleko.

Anotace

Teoretická část obsahuje popis modelu letadla a základní problematiku letu. Dále obsahuje popis měřitelných veličin důležitých pro fázi letu, jako je výška, rychlost, zrychlení a způsoby jejich měření. Součástí práce je také popis typů akumulátorů, servo motorů (včetně signálů týkajících se jejich ovládání), popis typů signálu jimiž se modely ovládají a základní parametry vybraných součástek. Praktická část se zabývá návrhem jednoduchého telemetrického zařízení, které je schopno zpracovat data ze senzorů.

Klíčová slova

Telemetrie, RC model, barometr, akcelerometr, GPS

Title

Telemetry for airplanes.

Annotation

The theoretical part includes description of an airplane model and the basic flight issues. Furthermore it includes description of measurable magnitudes which are important for the phase of flight, such as the altitude, the speed, the acceleration and their measurment methods. Part of the thesis is also description of accumulator types, servo motors (including signals relating to their control), description of signals for the plane control and basic parameters of chosen components. Practical part deals with the simple concept of the telemetric device, which is able to process data from sensors.

Keywords

Telemetry, RC models, barometer, accelerometer, GPS

Obsah

Seznam zkratek ... **8**

Seznam obrázků ... **9**

Seznam tabulek ... **9**

Úvod ... **10**

1 Modely letadel ... **12**

1.1 Popis letadla ... 12

1.1.1 Vrtule ... 12

1.1.2 Trup ... 12

1.1.3 Křídlo ... 13

1.1.4 Podvozek ... 16

1.1.5 Příčné kormidlo, výškové kormidlo, směrovka a klapky ... 16

1.2 Akumulátory a baterie ... 16

1.3 Modelářská serva ... 19

3 Měřitelné veličiny - výška ... **22**

3.1 Měření výšky barometrem ... 22

4 Měřitelné veličiny - rychlost ... **25**

4.1 Měření rychlosti Pitotovu trubicí ... 25

4.2 Měření rychlosti radarem ... 26

5 Měřitelné veličiny - zrychlení ... **27**

6 Měřitelné veličiny pomocí GPS ... **30**

7 Telemetrie ... **33**

7.1 Obory telemetrie ... 33

7.1.1 Zemědělství ... 33

7.1.2 Vodní hospodářství ... 33

7.1.3 Obrana a vesmírné programy ... 33

7.1.4 Vojenské zpravodajství ... 33

7.1.5 Energetické monitorování ... 34

7.1.6 Motoristické závody ... 34

7.1.7 Zdravotnictví ... 34

7.1.8 Studium živočichů ... 34

7.2 Signály používané v modelech ... 35

7.2.1 Amplitudová modulace ... 36

7.2.2 Frekvenční modulace 37
7.2.3 Pulzně Polohová Modulace 38
7.2.4 Pulzně Kódovaná Modulace 38
7.2.5 Rozprostřené spektrum 2,4GHz 38
8 Použité součástky 40
8.1 Měření rychlosti pomocí MPXV5004DP 40
8.2 Měření výšky pomocí MPL115A1 41
8.3 Měření zrychlení pomocí MPU6000 42
8.4 Měření proudu pomocí ACS758LCB-050U-PFF-T 43
9 Praktická realizace 45
Závěr 46
Literatura 52
Příloha A - Obsah CD 54

Seznam zkratek

ASCII	American Standard Code for Information Interchange
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
GPS	Global Position System
LiIon	Lithium-iontový
LiPo/LiPol	Lithium-polymerový
MEMS	Micro Elektro-Mechanical System
MKO	Monostabilní klopný obvod
NiCd	Nikl-kadmiový
NiMH	Nikl-metal hydridový
PWM	Pulse width modulation
RC	RadioControlled

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Popis základních částí letadla[1] 12
Obrázek 2 - Průřez křídlem [8] 13
Obrázek 3 - Bernoulliho efekt[2] 14
Obrázek 4 - Proudnice kolem křídla[3] 14
Obrázek 5 - Proudnice při nakloněném křídle[3] 15
Obrázek 6 - Síly dle Newtonova zákona 15
Obrázek 7 - Kapacita článku při konstantním vybíjení pro 21°C [4] 18
Obrázek 8 - LiPol baterie používaná pro RC modely [6] 19
Obrázek 9 - PWM signál a jeho vliv na servo [5] 20
Obrázek 10 - Blokové schéma zpětné vazby[5] 21
Obrázek 11 - Modelářské servo[5] 21
Obrázek 12 - Graf závislosti atm. tlaku na nadmořské výšce při 15°C a vlhkosti 0% 22
Obrázek 13 - Konstrukce integrovaného barometru [23] 24
Obrázek 14 - Princip Pitotovy trubice [11] 26
Obrázek 15 - Struktura akcelerometru [12] 29
Obrázek 16- Proces vyhodnocování u akcelerometru [24] 29
Obrázek 17 - GPS RADIONOVA® - M10264 [13] 30
Obrázek 18 - Grafické naznačení principu AM [18] 36
Obrázek 19 - PPM [17] 38
Obrázek 20 - MPXV5004DP [18] 40
Obrázek 21 - Doporučené zapojení napájení a výstupu [19] 41
Obrázek 22 - Graf závislosti výstupního napětí na tlaku [19] 41
Obrázek 23 - MPL115A1 [19] 42
Obrázek 24 - Blokové schéma MPL115A1 [19] 42
Obrázek 25 - MPU6000 [18] 43
Obrázek 26 - ACS758LCB-050U-PFF-T [21] 44
Obrázek 27 - Typické zapojení senzoru pro měření proudu [21] 44
Obrázek 28 - Vývojový diagram programu 45
Obrázek 29 - Schéma zapojení 48
Obrázek 30 - Vygenerovaný obrázek desky z programu Eagle 49
Obrázek 31 - Vrstva Top 49
Obrázek 32- Vrstva Bottom 49

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Parametry akumulátorů[5] 17
Tabulka 2 - Provozní kmitočty 34

Úvod

Pro suchozemského tvora jako je člověk, nepředstavuje pohyb po souši žádný problém. Historie však jasně nasvědčuje tomu, že pohyb s pevnou půdou pod nohama nebyl tak docela naplňující a naši předci se již v době před více než 8000lety začali poohlížet po jiné možnosti dopravy. Tím je myšlen samozřejmě pohyb po vodě. Ještě před objevením kovových nástrojů lidé dokázali opracovat velké kmeny stromů do tvarů připomínajících takové lodě, kterými se přepravujeme i dnes. Dlouhými staletími vývoje člověk svojí zručností tyto přepravní prostředky vylepšoval, avšak pohled vzhůru ho stále mohl naplňovat pouze bázní a zvědavostí.

Trvalo to neuvěřitelných 7000let než se našel někdo, kdo byl natolik všímavý a pokusil se sestrojit první kluzák. V 11.století benediktinský mnich Eilmer dokázal na takovém zařízení urazit vzduchem 200 metrů. Po něm následoval veřejnosti již více známý Leonardo da Vinci, který svými náčrtky a zařízeními všeho druhu fascinuje dodnes. Ten však podle dostupných informací úspěšný let neučinil. Zřejmě k tomu všemu ještě chyběly znalosti, které učinil až v roce 1738 matematik původem ze Švýcarska Daniel Bernoulli. Ten objevil princip vztlaku, díky němuž bratři Wrightové v 90.letech 19.století sestrojili křídlo, které má v průřezu tvar kapky a umožňovalo plně kontrolovaný let. Díky motoru, jehož poháněná vrtule měla tvar právě takových křídel, dokázali dosáhnout rychlosti, která byla nezbytná pro vznik vztlaku a 17.prosince 1903 jejich letadlo urazilo za 12 sekund 36 metrů.

Takto si člověk podmanil pohyb na vodě a ve vzduchu. Avšak podle historického vývoje můžeme říci, že letecká doprava potřebovala hlubší znalosti prostředí kolem nás a není tedy tak docela jednoduchá, ani bezpečná. Pokud se totiž pohybujeme v letadle, velmi těžko odhadneme rychlost a to jak vzletovou, tak i přistávací. Nemůžeme přistát při maximální rychlosti, kvůli konstrukci podvozku, a ani není tak docela bezpečné před přistáním rychlost snižovat a doufat, že letadlo se ještě udrží ve vzduchu. To vše muselo bezpodmínečně vést k vývoji zařízení, která by tuto naši neschopnost dokázala bezpečně nahradit.

Dnes je ovšem letecká doprava na takové technologické úrovni, že by pro studijní účely bylo velmi těžké dosáhnout kvality nezbytné pro bezpečný provoz. Hlavně co se týká součástek, které jsou volně dostupné na trhu.

Tato práce se tedy orientuje na problematiku rozvíjejícího se modelářství. Pojednává o celé stavbě leteckých modelů, jejich jednotlivých částí, a fyzikálních zákonech, které na letadlo působí během letu, například dva různé pohledy na vliv udržení se letadla ve vzduchu. Dále vysvětluje ovládání jednotlivých dílů letadla pomocí servo motorů, jejich stavbu, jaký signál je pro ovládání nezbytný a jak servo tyto signály zpracovává. V souvislosti se servo motory je probrána i problematika napájení, jaké existují typy akumulátorů a jejich vzájemné porovnání.

Nezbytností pro kompletní přehled o stavu modelu letadla za letu, je vědět jeho výšku nad terénem, rychlost a zrychlení. Práce se také zabývá probráním problematiky měření těchto veličin a to nejenom z pohledu praktického užití pro RC modely, ale i pro skutečná letadla kvůli celkovému pohledu na věc.

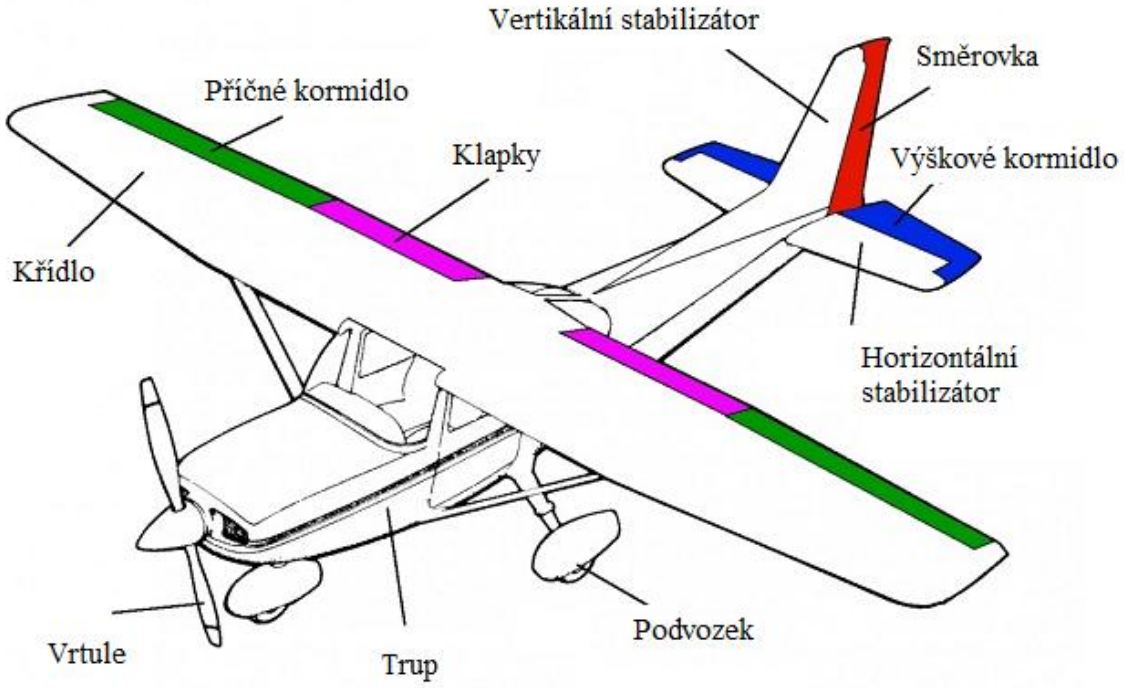
Jelikož zkratka RC znamená v překladu rádiem řízené, jsou probrána i jednotlivá frekvenční pásma pro jejich ovládání dle historického vývoje a výhod.

Samozřejmostí je popis jednotlivých komponent užitých k praktické realizaci zařízení a popis jejich základních parametrů.

1 Modely letadel

Jak je popsáno v úvodu, téma této práce je telemetrie letadel orientována na problematiku RC modelů. Tudíž její součástí by měl být i základní popis takového modelu a problematika letu.

1.1 Popis letadla



Obrázek 1 - Popis základních částí letadla[1]

1.1.1 Vrtule

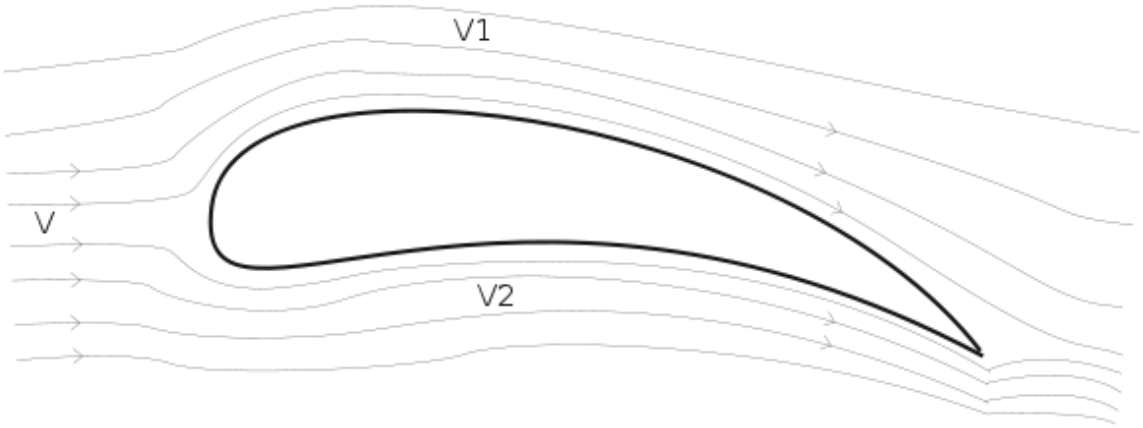
Vrtule je poháněná motorem letadla a její funkce je přeměna energie rotačního pohybu na tah. Její speciální tvar (podrobněji popsán u tvaru křídla) zaručuje dopřední pohyb.

1.1.2 Trup

Trup letadla, či také tělo letadla, zajišťuje spojení všech částí (křídla, ocas,aj.). U modelů samozřejmě musí být schopen pojmout motor, rádiový systém, akumulátory a další součástky, které se umisťují do trupu, či na trup (například fotoaparát). Důležitým faktorem těchto součástek je samozřejmě jejich váha, která ovšem závisí na každém modelu a jeho výkonu.[1]

1.1.3 Křídlo

Specifický tvar křídla byl vyvíjen od samého počátku letectví. Díky fyzikálním silám na něj působících, vzniká na křídle vztlak, který je absolutně nezbytný pro udržení letadla ve vzduchu.V oblasti fyziky existuje celý obor, který se zabývá touto problematikou, a tím je aerodynamika.[8]



Obrázek 2 - Průřez křídlem [8]

Avšak říci, že na křídle vzniká vztlak a považovat problém za vyřešený, by bylo až moc jednoduché. Ve skutečnosti existují dva úhly pohledu, kterými by se dal tento fyzikální úkaz popsat.

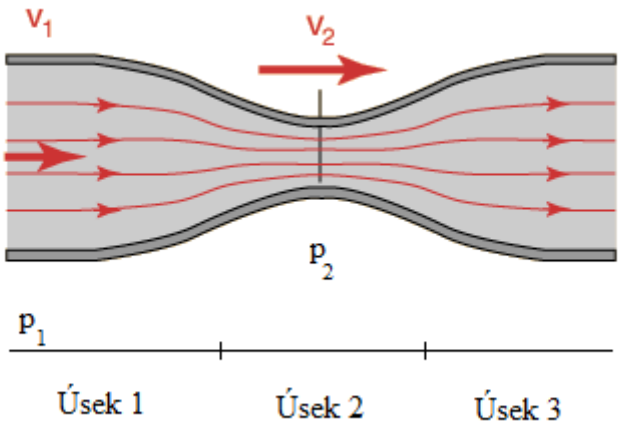
Popis pomocí Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice (1.1.3.1) popisuje chování ideální kapaliny s ohledem zachování energie v mechanice tekutin (kapalin a plynů). Pro homogenní gravitační pole tato rovnice zní:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho {v_1}^2 + \rho g h_1 = p_1 + \frac{1}{2}\rho {v_2}^2 + \rho g h_1 \qquad (1.1.3.1)$$

kde p_1, p_2- tlak kapaliny v úsecích
$\frac{1}{2}\rho v_1, \frac{1}{2}\rho v_2$ - člen představující kinetickou energii,
ρ - hustota kapaliny
v_1, v_2 - rychlost proudění v úsecích
$\rho g h_1, \rho g h_2$ - člen vyjadřující potenciální energii

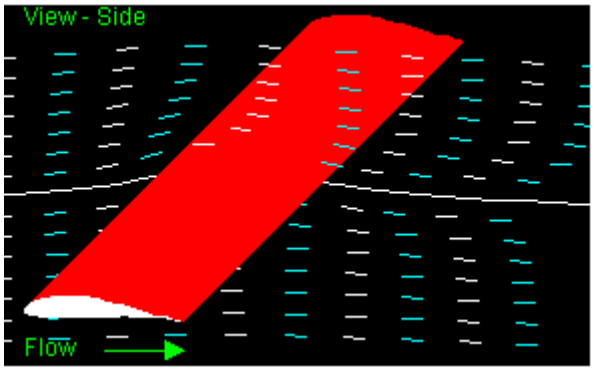
Pro úplnou představu, co tato rovnice říká, je dobré si prohlédnout následující obrázek (Obrázek 3).



Obrázek 3 - Bernoulliho efekt[2]

Pokud tedy máme takovouto trubici, kterou proudí plyn určitou rychlostí v_1, má hustotu ρ a tlak $p_1$ve výšce h, dokážeme vypočítat levou stranu rovnice. Jelikož platí zákon zachování energie, levá strana rovnice se musí rovnat pravé straně rovnice. V úseku 2 (Obrázek 3) je menší průřez trubice, kapalina zde musí proudit rychleji (aby protekl stejný objem) - velikost členu v_2 se zvyšuje. Zákonitě s tím musí klesat tlak v tomto úseku[1].

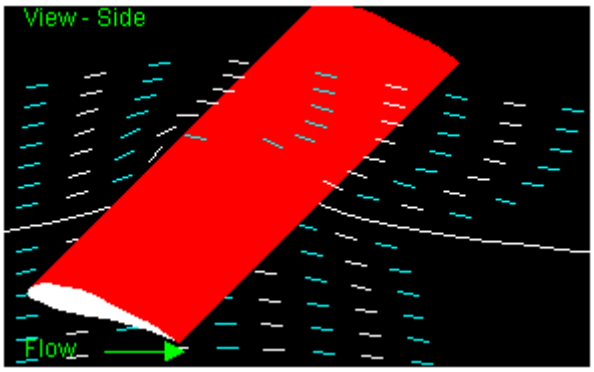
Tato rovnice ovšem neplatí pouze pro trubici a pohyb kapaliny v ní, ale můžeme jí aplikovat i u pohybu vzduchu podél křídla. Na obrázku 2 je možné vidět, že horní strana křídla je delší než spodní. Můžeme si tedy představit, jak se proud vzduchu při setkání s křídlem rozdělí, jeden proud bude sledovat spodní (kratší) stranu a druhý horní (delší) stranu. Aby se oba tyto proudy spojili, musí vzduch sledující delší stranu proudit větší rychlostí, tím však podle definice Bernoulliho rovnice bude působit menším tlakem oproti spodní straně. Tak vznikne na křídle vztlak, který bude tlačit směrem vzhůru.



Obrázek 4 - Proudnice kolem křídla[3]

[1] Při zvyšování rychlosti proudící kapaliny může tlak klesnout natolik, že se ho dá využít například pro odsávání. Tento jev se nazývá hydrodynamický paradox a setkáme se s ním například u rozprašovačů.

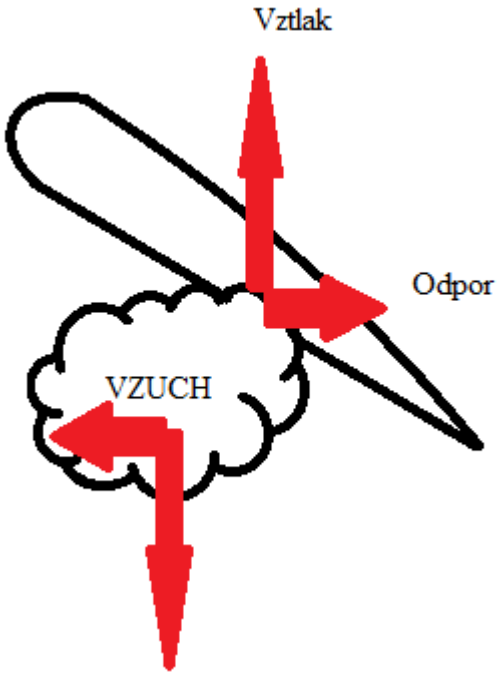
Tato teorie má ovšem i pár nedostatků. Letadlo bratří Wrightů mělo praktický plochá křídla, vyvstává tedy otázka, jak na nich mohl vznikat vztlak, když nebyla jedna strana delší než druhá.Navíc pokusy také ukázaly, že pokud křídlo natočíme směrem vzhůru(Obrázek 5), proudy vzduchu se ve skutečnosti nesetkají (jako je tomu na obrázku 4). Bernoulliho rovnice ovšem platí a na vysvětlení těchto jevů potřebujeme třetí Newtonův zákon. [2][8][9]



Obrázek 5 - Proudnice při nakloněném křídle[3]

Popis pomocí Newtonova pohybového zákona - zákon akce a reakce

Třetí zákon zní: "Proti každé akci, vždy působí stejná reakce." Pomocí obrázku 5 se tento jev dá popsat. Vzduch proudící pod křídlem je zpomalen a tlačen směrem dolů a podle Newtonova zákona, právě ve chvíli, kdy začne působit tato síla, vznikne na křídle síla opačná a stejné velikosti - reakční síla, jejíž složky bychom mohli popsat jako vztlak a odpor. Pro nejjednodušší představu slouží Obrázek 6. [8][9]



Obrázek 6 - Síly dle Newtonova zákona

Mohlo by se zdát, že obě teorie se navzájem vylučují, a když platí třetí Newtonův zákon, tak Bernoulliho rovnice je chybná. Ve skutečnosti tomu tak ale není, vzduch který proudí přes delší horní stranu křídla je skutečně rychlejší a působí menší tlakem. Pouze se v ní uvažuje, že oba proudy vzduchu se setkají. Obě tyto teorie jsou totiž správné, musí se však popisovat pro dané podmínky. Pokud si totiž představíme letadlo letící "vzhůru nohama", tak podle Bernoulliho efektu by se muselo zřítit k zemi, zde se však uplatňuje už zákon z druhé části. Pilot pomocí kormidel musí letadlo umístit do takového úhlu, aby proudící vzduch sílů působící směrem dolů minimálně vyrovnal a letadlo dokázalo letět rovně.

1.1.4 Podvozek

Tato část letadla samozřejmě slouží k jedinému účelu, a to bezpečnému návratu letadla po vypuštění. U některých menších RC modelů může být podvozek zcela vynechán, jelikož by to mohlo velmi zkomplikovat jak start, tak i přistání. U komplikovanějších modelů letadel se využívá zatažitelného podvozku, díky čemuž se sníží odpor vzduchu a zvýší rychlost letu. [1]

1.1.5 Příčné kormidlo, výškové kormidlo, směrovka a klapky

Příčná kormidla se nachází na stranách křídel a jsou uzpůsobena tak, aby při náklonu doleva a doprava šli proti sobě. Pokud bychom tedy chtěli náklon doprava, pravé kormidlo se musí natočit směrem vzhůru a levé směrem dolů. Tím se vytváří na celé letadlo efekt náklonu a popřípadě i rotace.

Výškové kormidlo je připevněno k horizontálními stabilizátoru a umožňuje pohyb nahoru a dolů, což zapříčiní stoupání respektive klesání letadla. Na stejném principu funguje i směrovka, která však zapříčiňuje pohyb doleva a doprava.

Klapky jsou na bližší straně křídel k trupu. Oproti příčným kormidlům se pohybují současně jedním směrem, mohou být sklopené dolů, či rovnoběžně s letadlem. Jejich účel je vytváření odporu vzduchu a tedy zpomalení letadla, čímž se zvýší i jeho schopnost manévrovat. Využití nacházejí při startech a přistání. Ovšem takovýto díl se na většině RC modelů nenajde. Existují však detailní zmenšené repliky skutečných letadel, kde i tuto plochu, pro drtivou většinu malých modelů, najdeme. [1]

1.2 Akumulátory a baterie

Přítomnost akumulátorů(resp. baterií) v modelu letadla je naprosto zřejmá. Slouží jako zdroj elektrické energie pro všechny elektrické součástky v letadle. Samozřejmostí jsou servo motory, které budou probrány v následující kapitole, ale také pro samotné telemetrické zařízení.

Existuje mnoho typu akumulátorů, některé z těch co se používají pro RC modely, budou probrány na další straně. Daly by se také použít baterie (primární článek), ale podstata vzniku elektrické energie je nevratná chemická reakce (při pokusu o nabití baterie by

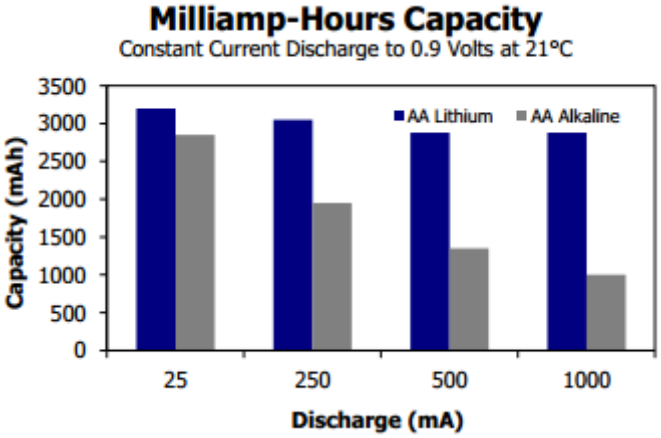
mohlo dojít až k explozi článku), oproti tomu akumulátory(sekundární články) se dají nabíjet a použít znovu.

Při výběru vhodného článku je důležité vědět všechny potřebné parametry, jako je například maximální proudová zatížitelnost, velikost vnitřního odporu, rychlost samovybíjení, životnost, teplotní podmínky okolí, kapacita a jelikož akumulátory jsou nabíjitelné, tak počet nabíjecích cyklů a zda je přítomen paměťový efekt. Jelikož také chceme, aby se akumulátor vešel do modelu, musí se zvážit rozměry a váha.

Baterie je možné zakoupit v rozličných tvarech a velikostech pro nejrůznější účely. Od těch nejmenších kulatých velikosti knoflíku (například do hodinek), až po velké obdélníkové s napětím 9V. K nejstarším typům baterií patří zinko-uhlíkové a zinko-chloridové články. U uhlíkové je elektrolytem chlorid amonný a u chloridové je to chlorid zinečnatý. Elektrická energie vzniká rozpouštěním zinku v daném elektrolytu. U starších uhlíkových se v průběhu vybíjení spotřebovává zinek a vytváří se voda, za určitých situací se může vrstva zinku natolik snížit, kdy v něm vznikne díra. Jelikož je obal celého článku tvořen právě zinkem, nastane vytečení elektrolytu (ve kterém je právě velké množství vody) a následně může dojít k poškození přístroje. Z tohoto důvodu byl vyvinut nový typ článku, zinko-chloridový. Chemická reakce využívá vzniklé vody v elektrolytu a je spotřebována. I tyto baterie však byly nahrazeny dnes nejrozšířenějším typem - alkalickým článkem. Ocelový válec, který je uzavřen na obou stranách niklovou destičkou, obsahuje katodu z oxidu manganičitého a anodu z práškového zinku v elektrolytu hydroxidu draselného.Chemická reakce a konstrukce dávají článku delší životnost, větší proudovou zatížitelnost a nižší samovybíjení než u předchozích typů. Dalším primárním zdrojem vyššího napětí než u těchto typů je lithiový článek. Předchozí baterie jsou schopné dodávat napětí cca 1,5V, lithiový článek může 1,5V až 3,7V. Za tím stojí lithiová anoda s velkým ionizačním potenciálem a katoda nejčastěji z práškového disulfidu železnatého smíchaného s uhlíkem. Vyšší napětí, proud, lepší proudová zatížitelnost a kapacita, to jsou vlastnosti, kterými jsou lithiové články lepší než alkalické[2]. Na obrázku 7 (str. 17) je možné si povšimnout, že při vybíjení vyšším proudem 1A jsou lithiové články schopné dodávat lepší kapacitu (cca 2900mAh u lithiových oproti 1000mAh u alkalických).

Hlavní přednost akumulátorů již byla zmíněna. Zatímco všechny neobnovitelné články probrané výše jsou po vybití potřeba zlikvidovat, sekundární články se dají nabíjet stále dokola (počet nabití je ovšem limitován), a proto je pole jejich využití širší, než baterií. Mobilní telefony, notebooky a v neposlední řadě články pro RC modely (lodě, automobily, helikoptéry, letadla,atd.), zde všude se můžeme s akumulátory setkat. Stejně jako u primárních článků, existuje i u sekundárních mnoho typu a konstrukcí. Dlouhou dobu patřil mezi nejrozšířenější články Nikl-kadmiový akumulátor (NiCd), jehož článek je schopen dodávat napětí 1,2V. Dnes se však již nepoužívá a to kvůli toxicitě kadmia. Mezi jeho výhody patřilo například to, že se mohl skladovat ve vybitém stavu, provozuschopnost za nízkých teplot a dlouhá životnost. Samovybíjení takové článku je přibližně 10%/měsíc.

[2] Existuje však nebezpečí, že při zkratu se vlivem velkých proudů baterie zahřeje a může explodovat. Tomu se dá předejít vložením bezpečnostním prvků, jako jsou ventily či tepelné pojistky.



Obrázek 7 - Kapacita článku při konstantním vybíjení pro 21°C [4]

S podobnostmi k NiCd se řadí Nikl-metal hydridový akumulátor (NiMH). NiMH akumulátoru hlavní přednosti jsou napříkladnepoužívání toxických materiálů a oproti NiCd přibližně dvojnásobná kapacita. Avšak v porovnání s kadmiovým akumulátorem je markantní změna v samovybíjení, které činí až 30%/měsíc při pokojových teplotách. Ačkoliv i tyto akumulátory jsou na ústupu, používají se stále ve vysílačkách a mobilních telefonech, apod.

Lithium-polymerový (Li-Pol,LiPo) akumulátor je v porovnání s NiCd a NiMH relativně novým přírůstkem na poli sekundárních článků. Jeho popularita však raketově stoupá hlavně díky rozvoji mobilních telefonu. Samovybíjení je velmi malé, činí přibližně 5%/měsíc a napětí článku je3,7V. Malé rozměry a váha, velká kapacita a množství nabíjecích cyklů, provozuschopnost v teplotách -10 až 50°C, to jsou hlavní důvody proč se používá nejen právě u mobilních telefonů, ale i u RC modelů. Oproti předchozím typům je potřeba s nimi zacházet s větší opatrností. Při zkratování může dojít ke vznícení i výbuchu a pokud napětí na článku klesne pod úroveň 2,7V může dojít k nenávratnému poškození akumulátoru. Proto se do zařízení implementují systémy kontrolující stav baterie a při poklesu na hraniční úroveň minimálně ohlásí kritický stav, či zařízení automaticky vypnou a tím zabraní dalšímu vybíjení.

Lithium-iontové (Li-Ion) akumulátory jsou chemickým principem velmi podobné typu LiPo . Oproti NiCd akumulátorům je hustota energie 3x vyšší (Tabulka 1), nabíjecích cyklů se může provést přibližně 1200 a i ostatními parametry a vlastnostmi je podobná LiPo akumulátoru. Hodnota napětí by neměla klesnout pod 2,8V, skladování v nabitém i vybitém stavu se nedoporučuje (ideální stav pro skladování je 40% nabití-3x delší) a použití je limitováno teplotou, kterou zařízení vydává a teplotou okolí, neboť je velmi závislý na okolní teplotě. Nebezpeční použití je však u těchto baterií vysoké, společnosti vyrábějící mobilní telefony a notebooky měly velké problémy s tímto typem baterií. V prosinci roku 2006 výrobci jako Dell, Sony, Apple, Lenovo, Panasonic, Toshiba, Hitachi, Fujitsu a Sharp se museli vypořádat s reklamacemi 10 milionů vadných kusů akumulátorů

pro notebooky, kde kvůli chybám při výrobě docházelo k nebezpečí zkratu. Roku 2007 musela společnost Lenovo stáhnout 205 000 baterií kvůli nebezpečí výbuchu a Nokia 47 milionů baterií kvůli přehřívání a také možnosti výbuchu. Tyto problémy zapříčinily to, že 16. května 2012 byly ve Spojených státech zakázány zásilky obsahující tyto baterie. Proto (stejně jako u LiPo) je nezbytné do nich implementovat ochranné prvky. [5][8][9]

Tabulka 1 - Parametry akumulátorů [5]

Typ akumulátoru	**NiCd**	**NiMH**	**LiPo**	**LiIon**
Napětí článku [V]	1,2	1,2	3,7	3,6
Hustota energie [Wh.kg^{-1}]	140	180	250	200
Samovybíjení[%/měsíc]	10	30	<5	5-10
Počet nabíjecích cyklů	1000	800	2000	400-1200
Rychlonabíjení	15 min	30 min	1h	1h

Obrázek 8 - LiPol baterie používaná pro RC modely [6]

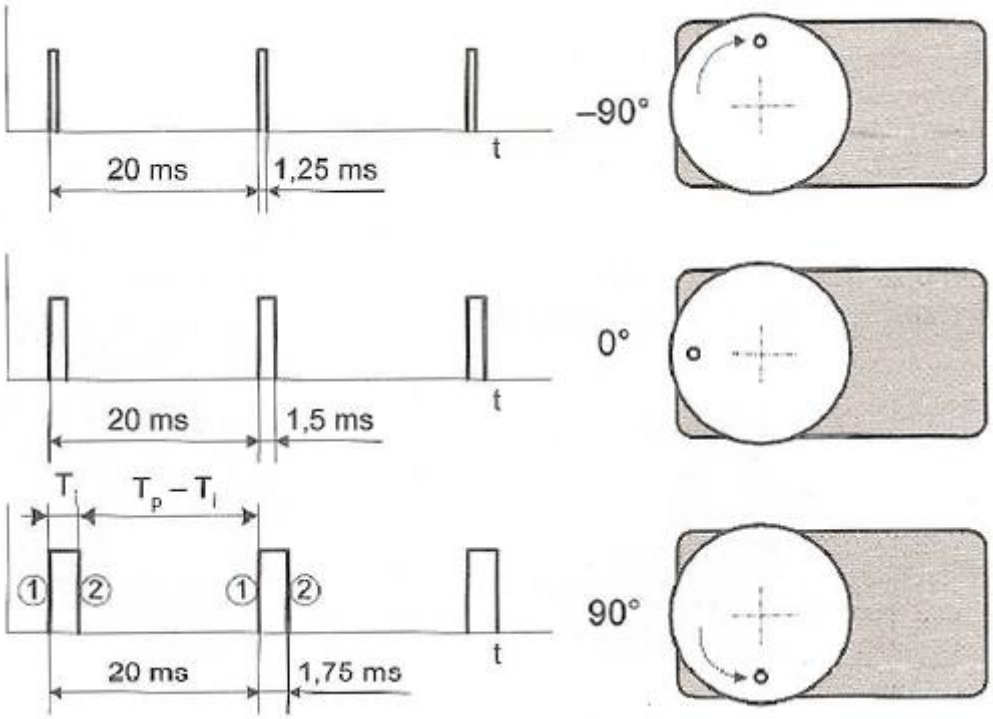
1.3 Modelářská serva

V kapitole 1.2 Akumulátory a baterie jsou zmíněny servo motory, která jsou napájena zdrojem elektrické energie v modelu. Na rozdíl od motorů, jejichž výstupní hřídel se otáčí o 360°, úhel otočení hřídele servo motoru je omezen (zpravidla ±90°) a napájení bývá dle typu v rozmezí 4,6 - 6V. Malé rozměry, jednoduché ovládání, široká škála použití, nejenom tedy pro ovládání směrovek, kormidel, ale také kontrola nad podvozkem, spouští fotoaparátu, aj.

Ovládání se provádí pomocí kabelu s konektorem, skládajícího se ze tří vodičů. Každý vodič má jinou funkci, je tedy důležité je nezaměnit. Červenou barvou je označen kabel

napájecí (Vcc), černý kabel uprostřed jezem (GND) a poslední je pro přívod signálu, kterým se servo řídí (černá/bílá/modrá/žlutá).

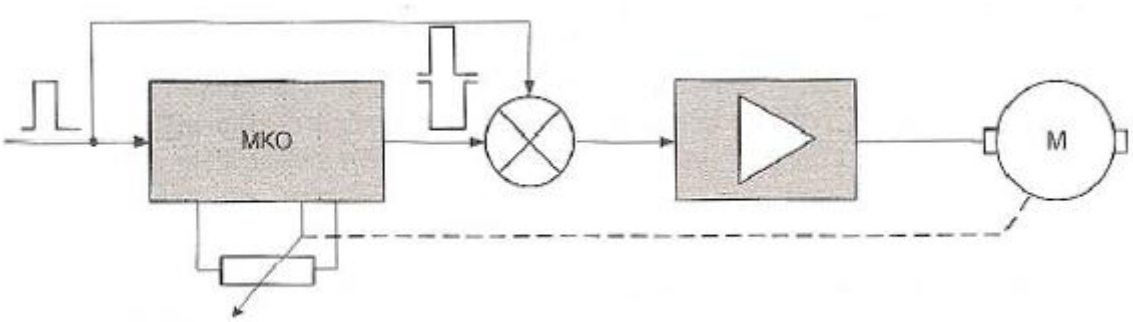
Řídící signál pro elektroniku musí mít frekvenci 50-60Hz u analogových servo motorů, 300-400Hz u digitálních a amplituda by se měla pohybovat v obou případech mezi 3 až 5V (všechny parametry záleží na specifikacích výrobku). Pro vysvětlení funkce uvažujme frekvenci 50Hz. Jedna perioda tedy trvá 20ms a informace o tom, na jakou úroveň se má hřídel otočit, je přenášena díky pulzně šířkové modulaci (PWM). Princip PWM spočívá ve střídě signálu, tedy v poměru mezi sepnutým a vypnutým stavem (log.1 a log.0). Podle typu serva je tedy důležitá šířka takového kladného pulzu (Obrázek 9).Máme-li příchozí signál o šířce 1,25ms, motor otočí hřídelí na -90°, 1,75ms naopak na +90° a šířka pulzu 1,5ms na úroveň 0°. [7][5]



Obrázek 9 - PWM signál a jeho vliv na servo [5]

Na Obrázku 11 (strana 21) je příklad takového servo motoru i s popiskem. Elektronika je v servu zodpovědná hlavně za "překlad" vstupního signálu a předávání motoru, který pootočí výstupní hřídel na požadovaný úhel. To probíhá tak, že periodický vstupní signál o dané šířce spustí monostabilní klopný obvod, který vygeneruje impulz odpovídající současné pozici hřídele s opačnou polaritou. Velikost impulzů vstupního a tohoto vygenerovaného signálu se porovnává a výsledný signál projde zesílením přes můstkový spínač a motor otočí hřídelí požadovaným směrem. V této fázi se zde uplatní ještě potenciometr, fungující jako zpětná vazba do monostabilního klopného obvodu. Je totiž napojen na hřídel, takže pro každý úhel otočení existuje přesná hodnota odporu. Tím je zajištěna i měnící se délka impulzu pro aktuální (v tuto chvíli otáčející se) hřídel. Ve chvíli, kdy se délka impulzů

vyrovná, otáčení hřídele se zastaví. Pro celý tento proces je možné uvést blokové schéma (Obrázek 10).[5]



Obrázek 10 - Blokové schéma zpětné vazby[5]

Obrázek 11 - Modelářské servo[5]

3 Měřitelné veličiny - výška

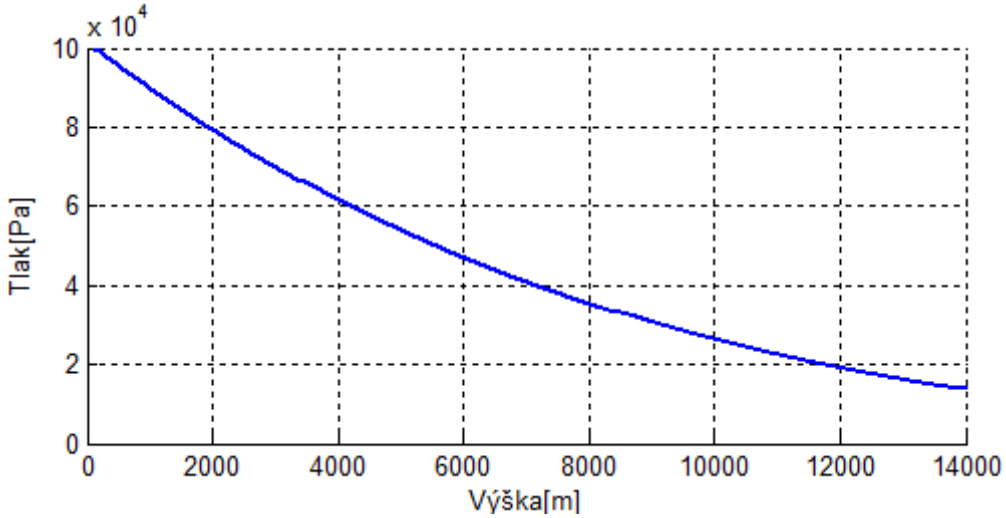
Znát výšku letadla nad terénem je velmi důležitý faktor. Mohlo by se zdát, že ovládání leteckého modelu se provádí pouze zrakovou kontrolou a výška se tedy dá odhadnout. Nicméně technologie je o kus dál než v začátcích leteckého modelářství a za použití UHF vln se dá takový model ovládat i na vzdálenost 30km, včetně obrazu. V takovou chvíli není model na dohled pouhým okem a znát výšku je tedy poměrně důležité.

Výška se dá určit několik způsoby:

-barometr
-radar
-GPS (kapitola 6.)

3.1 Měření výšky barometrem

Na každé místo na Zemi působí hmotnost vzduchu, nacházejícího se ve sloupci nad ním. Síla působení tohoto vzduchu na jednotku plochy se nazývá atmosférický tlak. Se zvyšující se výškou se snižuje množství částic působící na objekt a atmosférický tlak se tedy snižuje. Na úrovni hladiny moře je tak tlak největší, v průměru je to přibližně 1,03kg na plochu jednoho centimetru čtverečného (1,03kg.cm-^{2}), což v jednotkách tlaku odpovídá hodnotě 101 325Pa (101,325kPa). Atm. tlak se zvyšující se výškou ovšem neklesá lineárně a jeho hodnota závisí na teplotě, vlhkosti vzduchu a taky na poloze. Podle sestaveného vertikálního barického stupně se dá říci, že v nízkých výškách po každých osmi metrech stoupání klesne tlak o jeden hektopascal. Aby barometr naměřil stejný pokles nad úrovní 1800m.n.m., musí se výška změnit už o 10m a nad 7300m.n.m. je to 20m. Tyto naměřené údaje se ovšem dají vyjádřit matematicky (3.1.1), protože mění-li se nadmořská výška aritmetickou řadou (o stejně dlouhé úseky), klesá atmosférický tlak řadou geometrickou. Avšak jak bylo již zmíněno, teplotní závislost je velká, 8 metrů pro pokles o 1hPa je při teplotě 0°C, pro +10°C je potřeba vystoupat 8,3metrů. [23]



Obrázek 12 - Graf závislosti atm. tlaku na nadmořské výšce při 15°C a vlhkosti 0%

Pokud tedy naměříme přesnou hodnotu tlaku barometrem a chceme vypočítat výšku, platí následující vztah:

$$h = \frac{T_0}{T_{GRAD}} . (1 - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{T_{GRAD} . \frac{R}{g}}) \quad (3.1.1)$$

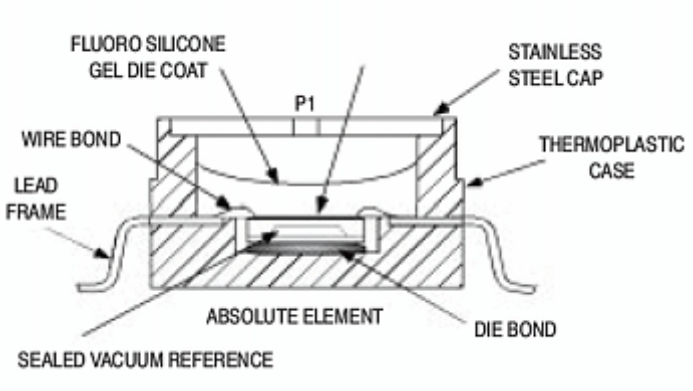
kde h- výsledná výška [m]
T_0-teplota v nulové výšce (288,15[K] = 15°C)
T_{GRAD}-Teplotní gradient (0,0065[K/m])
p-naměřený tlak v takové výšce, kterou chceme dopočítat [Pa]
p_0-tlak ve výšce 0m.n.m (101325 [Pa])
R-plynová konstanta (287,052[J/kg.K])
g-gravitační zrychleni (9,81[m.s^{-2}])

Toto vše však platí, chceme-li znát nadmořskou výšku, v případě modelářství by taková informace byla zbytečná, jelikož je důležitá výška nad terénem.

Tato absolutní hodnota výšky se nazývá úroveň QNH (Nautical High), ve které se počítá právě i s aktuálními parametry vzduchu, na letišti tedy bude ukazovat nadmořskou výšku letiště (AMSL-above mean sea level). V praxi se dá proto použít i úroveň QFE (Field Elevation), u níž se nastaví referenční hodnota tlaku, od které se s měnícím tlakem vypočítá přesná hodnota výšky. V krátkém časovém úseku (např. doba letu modelu) se parametry vzduchu mění velmi málo a vypočítaná hodnota je tedy přesná. Pro letadla se však zavádí ještě pojem letová hladina. Jak bylo poznamenáno, tlak na různých místech na Zemi není ve stejných výškách shodný. Z toho důvodu, se pro bezpečnost ve vzdušném prostoru, nastaví dohodnutá úroveň tlaku (101325Pa), od které se počítají tyto letové hladiny, které jsou pro všechny stejné, tím bude zajištěn dostateční vertikální rozestup letadel.

K takovému měření tlaku se dnes používá aneroid. Jež je tvořen stupnicí, ukazující hodnotu tlaku, na kterou je přenášena aktuální hodnota ručičkovým ukazatelem, připojeným na kovovou vzduchoprázdnou krabičku s tenkou stěnou, jež je vlivem atm. tlaku deformována.

Použití analogového měřícího přístroje by ovšem v telemetrii nebylo vhodné. Zde využíváme elektrických čidel, která hodnotu tlaku převedou na signál, který je možné dál zpracovávat. Princip funkce těchto čidel je založen podobně jako aneroid, to znamená, že je zde dutina s vakuem, která je na jedné straně uzavřená pružnou membránou. Působením atmosférického tlaku se povrch této membrány ohýbá a tlak, který vyvíjí, se uplatňuje při piezorezistivním jevu. Ten spočívá v tom, že odpor hlavně polovodičových materiálů se mění v závislosti na jejich namáhání (tlakem). Takže na výstupu barometru bude elektrický signál, který se A/D převodníky převede na digitální signál, ten už je bez obtíží upravován algoritmy procesoru na hodnotu tlaku, či výšky. [23]



Obrázek 13 - Konstrukce integrovaného barometru [23]

3.2 Měření výšky radarem

Radar využívá šíření elektromagnetických vln, které se v prostoru odrazem mění svůj směr a některé se odrazí zpět ke zdroji. A právě tento odražený signál, nazývaný také echo, je možné dále zpracovat a určit tak výšku objektu nad zemí. Pokud totiž vyšleme elektromagnetickou vlnu a změříme přesný čas, můžeme počkat na příchod odraženého signálu a změřit dobu trvání. Pakliže tento údaj známe, můžeme vypočítat vzdálenost objektu od radaru. Určení výšky touto metodou můžeme považovat ze velmi přesné a používá hlavně jako doplněk k výškoměru. [10]

4 Měřitelné veličiny - rychlost

Určení rychlosti patří mezi základní charakteristiky pohybu, kdy se jedná o změnu polohy tělesa v čase. Není to však pohyb náhodným směrem, ani náhodnou velikostí, proto je rychlost vektorová veličina, kterou dělíme na průměrnou a okamžitou.

Průměrná rychlost nám udává jak velkou vzdálenost urazí objekt za jednotku času. A přesně tomu i odpovídá vztah, pro určení průměrné rychlosti:

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t} \tag{4.0.1}$$

přesněji můžeme ještě zapsat:

$$\overrightarrow{v_p} = \frac{\overrightarrow{s_{(t1)}} - \overrightarrow{s_{(t2)}}}{t_1 - t_2} \tag{4.0.2}$$

Okamžitou rychlostí charakterizujeme právě pohyb v daném nekonečně krátkém časovém okamžiku. Jedná se tedy o první derivaci dráhy podle času.[8]

$$v = \frac{d\vec{s}}{dt} \tag{4.0.3}$$

Pro měření rychlosti u letadla se dají využít tři různé způsoby:

- Pitotova trubice
- radar
- GPS (kapitola 6.)

4.1 Měření rychlosti Pitotovu trubicí

Počátkem 18. století Henri Pitot vynalezl měřící přístroj, který dokáže určit rychlost proudění kapalin a plynů měřením jejich tlaku, vyvolávaný pohybem. Skládá se ze spojených dvou trubic, kdy každá z nich má vodorovné a svislé rameno. Rameno na vodorovné úrovni má otvory do stran a svislé rameno tedy ukazuje volnou hladinu. Oproti tomu vodorovné rameno druhé trubice má otvory ve směru proti proudu vzduchu a díky tomu kapalina ve svislém rameni ukazuje hladinu ovlivněnou tímto proudícím vzduchem (hydrodynamická). Rychlost tohoto proudícího vzduchu se přepočítává z rozdílů tlaků těchto dvou úrovní za pomoci Bernoulliho rovnice. [8][11]

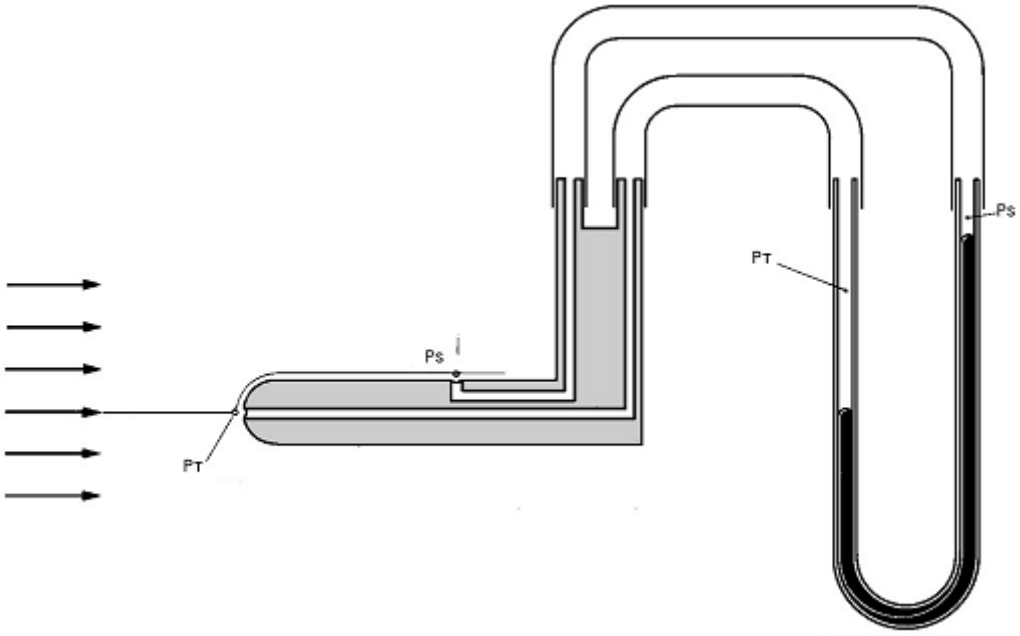
Celkový tlak se vypočítá jako:

$$p_t = p_s + (\frac{\rho v^2}{2})$$

A rychlost proudění vyjádříme jako:

$$v = \sqrt{\frac{2(p_t - p_s)}{\rho}}$$

kde p_t-celkový tlak
p_s-statický tlak
ρ-hustota kapaliny
v-rychlost



Obrázek 14 - Princip Pitotovy trubice [11]

4.2 Měření rychlosti radarem

Stejně jako u měření výšky (3.2) se dá radaru využít i při měření rychlosti, pouze se uvažuje jinak o odrazu elektromagnetických vln. Vysíláme-li totiž vlny o frekvenci *f*, vlivem pohybu (při pohyblivém přijímači a pohyblivém vysílači) přijímaná frekvence bude mít jinou frekvenci Δf . Tento jev objevil rakouský fyzik Christian Doppler v první polovině 19.století, podle něj byl také pojmenován a je znám do dnes jako "Dopplerův jev". Při přibližování je frekvence nižší a při oddalování je vyšší. Na základě těchto informací můžeme vypočítat: [8][9]

Pro zdroj signálu o frekvenci f_0 pohybujícího se směrem k/od stacionárního přijímače:

$$f = f_0\left(\frac{v}{v+v_{s,r}}\right) \qquad (4.2.1) \qquad\qquad f = f_0\left(\frac{v}{v-v_{s,r}}\right) \qquad (4.2.2)$$

Pakliže se pohybuje přijímač ke stacionárnímu vysílači, vztah bude:

$$f = f_0\left(1 + \frac{v_0}{v}\right)$$

kde v_0- rychlost přijímače; kladná pro přibližování, záporná pro oddalování
$v_{s,r}$- rychlost zdroje vůči pozorovateli
v- rychlost šíření vln v daném prostředí

5 Měřitelné veličiny - zrychlení

Zrychlení je fyzikální veličina, která se používá k charakterizování rychlosti hmotného tělesa, konkrétně se jedná o změnu hodnoty rychlosti v čase. Pokud je uvažováno těleso pohybující se konstantní rychlostí, jeho zrychlení je nulové. Dále je charakterizováno jako vektor, jelikož má jak směr, tak i velikost. Může být kladné a záporné, kdy se potom jedná a zpomalení. Ve spojitosti s pohybem hovoříme o zrychlení jako o časové změně mechanického pohybu, můžeme ho totiž chápat i v chemii jako změna rychlosti chemické reakce, aj. Rozlišujeme dva druhy zrychlení, okamžité a průměrné a označujeme je písmenem *a* (z anglického acceleration). [8][9]

Okamžité zrychlení je stejně jako okamžitá rychlost charakterizována v nekonečně krátkém úseku. Jedná se tedy o první derivaci rychlosti podle času:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \tag{5.0.1}$$

Průměrné zrychlení se uvádí jako podíl změny rychlosti za změnu času (daného okamžiku):

$$\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} \tag{5.0.2}$$

Pokud ovšem uvažujeme, že pohyb není přímočarý, nýbrž že se těleso pohybuje například po křivce, zrychlení je potom rozloženo mezi velikost tečny k trajektorii pohybu a směru normály kolmé k trajektorii pohybu:

$$a = a_t + a_n \tag{5.0.3}$$

zrychlení potom vypočítáme jako:

$$a = \sqrt{{a_t}^2 + {a_n}^2} \tag{5.0.4}$$

Základní jednotkou zrychlení je $m.s^{-2}$. Nejznámější hodnotou v tomto tvaru je gravitační zrychlení, které má hodnotu 9,81 $m.s^{-2.}$ Avšak pro schopnost rozlišovat akceleraci ve vztahu k volnému pádu v závislosti právě na tomto gravitačním zrychlení, zavádí se jednotka *g*. Hodnota jednoho *g* se rovná zrychlení vyvolaného gravitačním polem Země a označujeme ho g_n (9,80665 $m.s^{-2}$).

Měření zrychlení akcelerometrem

Akcelerometrem rozumíme elektronickou součástku, která je schopná měřit zrychlení. Stejně jako součástky na měření výšky využívají i akcelerometry piezoelektrického jevu. Tedy schopnosti měnit elektrické vlastnosti na mechanickém namáhání. Moderní akcelerometry jsou známy pod zkratkou MEMS, tedy micro electro-mechanical systems. Jedná se tedy o co nejmenší možnou součástku, která je však plně schopná vykonávat svojí funkci. Technologie výroby umožňuje měřit akceleraci ve všech třech osách pohybu.

Cestou k měření zrychlení je využívání mikroskopických struktur krystalu, které při působení akceleračních sil začnou generovat napětí. Jiným způsobem je měření změny kapacity. K určení kapacity kondenzátoru využíváme vztah:

$$C_0 = \varepsilon_0 . \varepsilon . \frac{S}{d} = \varepsilon_S \frac{1}{d} \quad (5.0.5)$$

kde $\varepsilon_S = \varepsilon_0 . \varepsilon . S$ (kde S je plocha elektrod)
ε - permitivita prostředí oddělujících desky kondenzátoru
S - plocha elektrod
d -vzdálenost obou elektrod

Změna jakéhokoli parametru v tomto vzorci (5.0.5) vyvolá změnu celkové kapacity kondenzátoru a variace těchto tří proměnných se využívá v MEMS senzorech. Například jako jsou chemické senzory a senzory vlhkosti vzduchu založené na změně ε, akcelerometry jsou založeny na změnách d či S . Typický MEMS akcelerometr se skládá z pohyblivého části z odolné hmoty s deskami, která je připojena pomocí mechanického systému zavěšení na referenční rámec, jak je znázorněno na Obrázku 15(strana 29). Pohyblivé desky a pevné vnější lamely představují kondenzátory. Odchylka této pohyblivé části je měřena za použití rozdílů v kapacitě. Kapacita volného prostoru mezi pohyblivými deskami a dvěma stacionárními lamelami C_1 a C_2 jsou funkcí odpovídající posunutí x_1 a x_2.

$$C_1 = \varepsilon_S . \frac{1}{x_1} = \varepsilon_S \frac{1}{d+x} = C_0 - \Delta C \quad (5.0.6)$$

$$C_2 = \varepsilon . S . \frac{1}{x_2} = \varepsilon_S \frac{1}{d-x} = C_0 + \Delta C \quad (5.0.7)$$

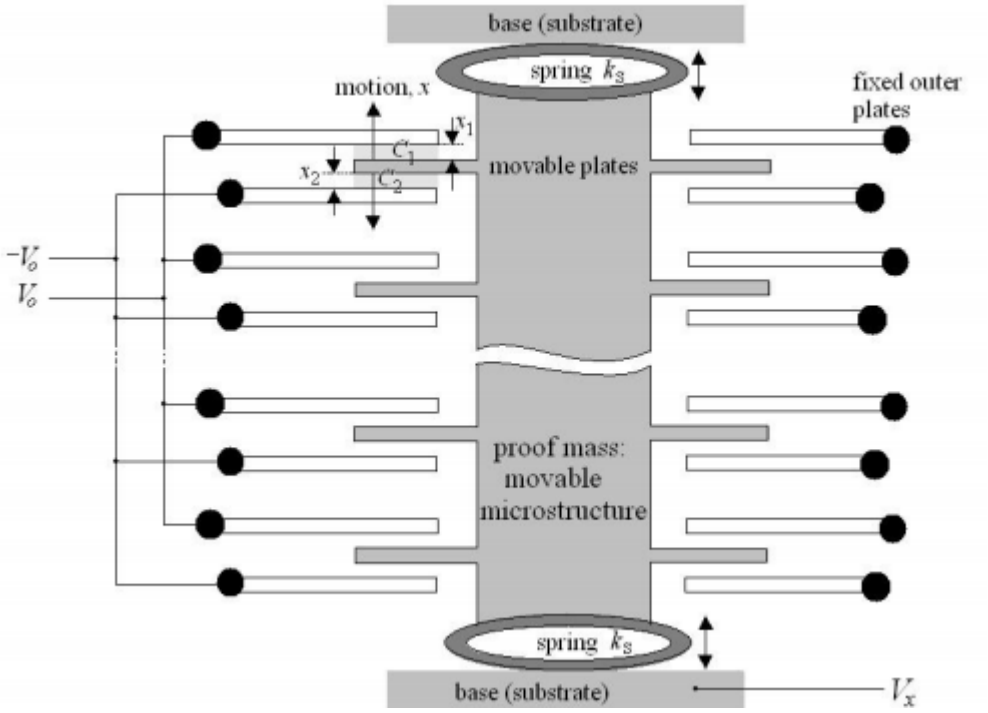
Pokud je zrychlení nulové, kapacitance C_1 a C_2 budou shodné, neboť $x_1=x_2$. Pohyblivá část se uvede do pohybu vyvolaným zrychlením a efekt bude posunutí, což způsobí změnu hodnoty *x* a rozdíl bude:

$$C_2 - C_1 = 2\Delta C = 2\varepsilon_S \frac{x}{d^2+x^2} \quad (5.0.8)$$

Měřením ΔC se zjistí posunutí *x*, které vyřešíme z rovnice:

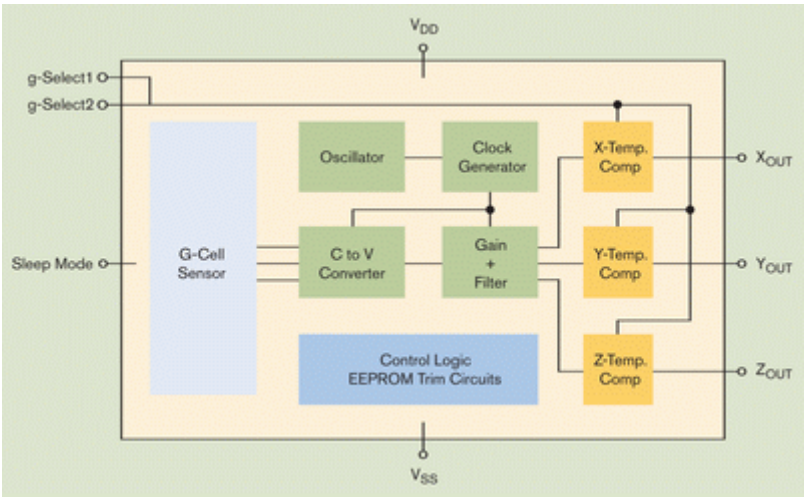
$$\Delta C x^2 + \varepsilon_S x - \Delta C d^2 = 0 \quad (5.0.9)$$

Jak je vidět na Obrázku 15, každý akcelerometr má několik (i desítek) kondenzátorů. Všechny vrchní jsou napojeny v celkovou paralelní kapacitu C_1 a spodní v kapacitu C_2. Jinak by byla kapacita nepatrná k naměření. Tento příklad odpovídá akcelerometrům, které jsou schopny měřit zrychlení v jedné ose pohybu=1D akcelerometry. Pokud bychom chtěli měření ve dvou osách, musí se k této struktuře přidat ještě jedna pootočená o 90°. Složitější už je konstrukce 3D akcelerometru měřícího v XYZ osách pohybu, k předchozím dvěma se musí přidat totiž ještě výšková struktura a umožňující kapacitní měření zrychlení v ose Z. [12]



Obrázek 15 - Struktura akcelerometru; pohyblivá část je uchycena pomocí pružin (k_s -konstanta pružiny). Pohybovat se může pouze nahoru a dolů. [12]

Akcelerometry měří tedy kapacitu, kterou však dále převádí na změnu napětí a na lineární výstupní hodnoty. Ta je řízena číslicovou logikou spínání kondenzátorů generátorem spínacího hodinové signálu. Tak se tato změna hodnoty kapacity převede na změnu napětí, které se linearizuje a filtruje a je na něm prováděna kompenzace vlivu teploty, aby hodnoty byly co nejpřesnější. Výsledný signál upravený tímto způsobem je na závěr ještě zesílen. Celý tento proces se provádí pro každou osu zvlášť a je naznačen na Obrázku 16.



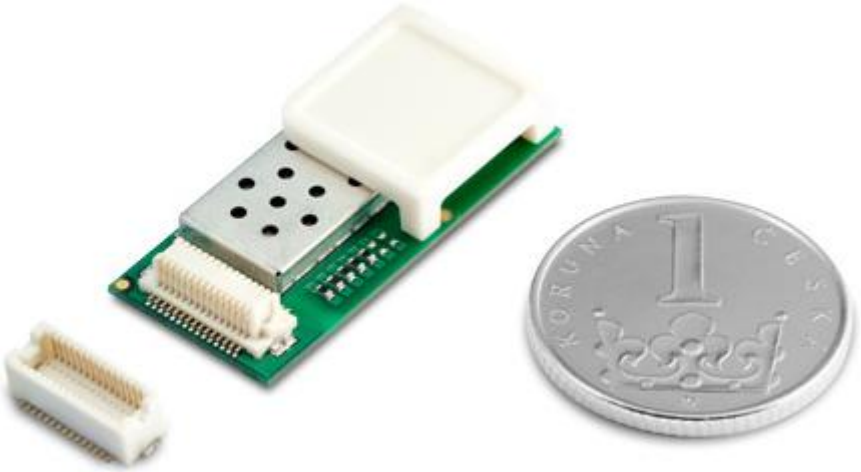
Obrázek 16- Proces vyhodnocování u akcelerometru [24]

6 Měřitelné veličiny pomocí GPS

Global Positioning System, dnes spíše známe jako GPS, je vojenský globální systém pro určování polohy a času za pomoci družic. V současnosti je systém GPS řízen vládou Spojených států amerických, avšak Evropská unie má v běhu vlastní program s názvem Galileo. Signál ze satelitů je dostupný všem, ne každý však má právo využívat dané frekvence, proto jsou dána omezení pro určité skupiny obyvatel/společnosti. Například všem dostupné je civilní pásmo, které vysílá na frekvenci L1 (1575,42MHz), tento signál přijme a dekóduje běžně dostupné GPS moduly. Informace která je možno získat se týká polohy, pohybu a času. Vylepšení je v pásmu pro armádní účely L1 a L2 (1227,62MHz), kde je signál kódovaný a oproti běžnému satelitu využívají signálu ze směrové antény, který je schopný pokrýt území několik stovek kilometrů na šířku. Signál je tedy až 100x silnější než u běžných GPS vysílačů a přesnost jednotlivých parametrů je tedy mnohem vyšší než u volně dostupného signálu.

Družice vysílají nepřetržitě zprávy, které obsahují informace o přesném čase a přesné poloze, kdy byla zpráva vyslána. Přijímač tohoto GPS signálu každou zprávu vyhodnotí a spočítá vzdálenost od každého satelitu a určí polohu pomocí navigačních rovnic. Logicky ovšem vyplývá, že pro určení co nejpřesnější polohy (zeměpisné šířky a délky), je zapotřebí co nejvetší možné množství různých družic. Zpravidla pro polohu stačí tři různé satelity, pokud ovšem chceme i nadmořskou výšku, minimální počet budou čtyři. Při pohybujícím se přijímačí se tyto zpracovavné zprávy mohou výborně využít pro vypočítání rychlosti.

V pásmu L1 je možné dosáhnout přesnosti kolem 5m. Jak bylo zmíněno, pásmo L2 je šifrováno a určeno výhradně pro armádu, zde se však přesnost pohybuje až na několik cm. [8][9]



Obrázek 17 - GPS RADIONOVA® - M10264 [13]

V zařízeních se používají GPS moduly, jeden takový je uveden na Obrázku 17. Svými malými rozměry se ideálně hodí do přenosných zařízení, která jsou napájena z baterie.

Jedná se o integrovaný modul, který přijímá v pásmu L1 GPS. To tedy znamená volně dostupné informace, bez nutnosti jakýchkoli dalších výdajů. Napájení bývá přibližně kolem 3,6V s malou spotřebou a pro šetření energie je možnost i úsporných režimů. Volně dostupné moduly pro dané pásmo komunikují prostřednictvím NMEA0183 protokolu. [14]

NMEA0183

Protokol NMEA (National Marine Electronics Association) byl vytvořen hlavně pro komunikaci mezi vojenskými zařízeními. Tento protokol je již vylepšená verze předchozích protokolů (0180 a 0182) a nově se přechází na protokol NMEA 2000. Umožňuje rozesílání dat od vojenského zařízení do počítačů a jiných zařízení. GPS moduly tohoto protokolu využívají k posílání dat, která se posílají ve formě zprávy s danou strukturou.

$GPGGA, 170834, 4124.8963, N, 08151.6838, W, 1, 05, 1.5, 280.2, M, -34.0, M, *75

$ -každá zpráva začíná tímto symbolem, aby bylo možné jednoduše identifikovat začátek nově příchozí zprávy.

GP- je označení, že zpráva je z GPS přijímače. Druhů těchto označení je mnoho, jelikož zprávy mohou být různě dlouhé pro jednotlivá zařízení a přenášená informace se může týkat něčeho jiného či být v jiném tvaru (například RA - informace z radaru). Délka tohoto identifikátoru jsou 1 až 2 znaky.

GGA- Kód mající vždy 3 znaky, určuje o jaký typ zprávy se jedná. GGA je označení pro zprávu obsahující informace o poloze, výšce, množství satelitů a přesném čase. Těchto kódů existuje velké množství, mezi nejpoužívanější patří například GLL (Geografická poloha obsahující zeměpisnou délku, šířku a čas), GSA (identifikaci jednotlivých použitých satelitů, jejich geometrické rozmístění v prostoru-využití pro rozptyl přesnosti), VTG (informace o rychlosti v uzlech a kilometrech za hodinu).

Každý další údaj je oddělen čárkou tak, aby se dekódování těchto zpráv mohlo jednoduše provést za pomoci ASCII tabulky (čárka má hodnotu 44 decimálně a 2C hexadecimálně). Na závěr přijde symbol *, který říká, že následující údaj bude kontrolní součet všech znaků ve zprávě.

Z této příkladové zprávy tedy vyčteme následující údaje:

GPGGSA - údaje týkající se GPS a tedy určení formátu následující zprávy.
170834 - přesný čas 17:08:34
4124.8963, N - zeměpisná šířka - 41° 24.8963' s.š
08151.6838, W- zeměpisná délka - 81° 51.6838' z.d.
1 - kvalita spojení

05 - počet používaných satelitů
1.5-relativní přesnost v horizontálním směru
280.2 - nadmořská výška v metrech nad mořem
75- kontrolní součet určený pro možnost kontroly chyby přenosu

Kdybychom chtěli údaje o rychlosti pohybu, použijeme protokol NMEA0183 s tří místným kódem VTG. Ten by mohl být například ve tvaru:

$GPVTG,054.7,T,034.4,M,005.5,N,010.2,K*48

Kde 005.5,N znamená rychlost pohybu po zemi v uzlech a 010.2,K rychlost pohybu v kilometrech za hodinu.

Zpracování takové zprávy je tedy pouze otázkou dobrého dekódování v programovacím softwaru a správné interpretace těchto dat. [14][22]

7 Telemetrie

Telemetrií rozumíme bezdrátový přenos naměřených dat na určitou vzdálenost. Tento pojem vztahujeme hlavně k přenosu pomocí rádiového nebo infračerveného signálu. Je také dobré poznamenat, že obor telemetrie není pouze ovládání modelů, ale bereme-li tento pojem více ze široka, hovoříme o každodenním využití, jehož výsledky nás obklopují a jsou nezbytné.

7.1 Obory telemetrie

7.1.1 Zemědělství

Aby bylo zemědělství co nejvíce výnosné, je důležité, aby byly dostupné informace týkající se počasí a půdy. Meteorologické stanice hrají hlavní roli v prevenci nemocí a přesném zavlažování. Pomocí bezdrátového přenosu posílají důležitá data do hlavních stanic, kde jsou dále zpracovávána. Jedná se například o teplotu a vlhkost vzduchu, informace o srážkách a vlhkosti listů (potřebných pro modely předpovídající nemoci), sluneční radiaci a rychlosti větru, někdy také vlhkost půdy, která je důležitá pro pochopení vsakování vody do půdy a kořenů pro záležitosti zavlažování.

7.1.2 Vodní hospodářství

Ve vodním hospodářství je funkce telemetrie lépe odhadnutelná, než například v zemědělství. Funkce reálného sledování je zde ovšem více nepostradatelná. Měří se zde kvalita vody a vlastnosti proudu. Mezi nejdůležitější parametry sledované telemetricky můžeme zařadit rychlost proudu a velikost průtoku řek. Díky nim můžeme vhodným zpracováním dat zareagovat na hrozící nebezpečí například v období záplav.

7.1.3 Obrana a vesmírné programy

V tomto odvětví má telemetrie nemalý význam, ale i také rozsah. Od řízení raket pro armádní účely, vesmírných raket, ropných věží a chemických továren. Umožňuje zde totiž automatický monitoring, upozorňování a ukládání dat nezbytné pro bezpečnost a efektivitu. Společnosti s vesmírným programem jako je NASA (National Aeronautics and Space Administration), ESA (European Space Agency), aj., používají telemetrii pro sběr dat z vesmírných raket a satelitů (u takovýchto projektů je samozřejmě důležité nejenom data přijímat, ale i odesílat, tak aby například satelit prováděl potřebné úkony - duplexní spojení).

7.1.4 Vojenské zpravodajství

Užití telemetrie pro armádní účely má nezměrný význam. Například pro Spojené státy a Velkou Británii fungovala telemetrie jako zdroj informací, když Sovětská armáda testovala rakety. Pro tyto účely měly Státy zřízenou základnu v Iránu. Sověti ovšem po zjištění, že jsou jejich data shromažďována, začali signál z testování raket kódovat.

O armádním zpravodajství je možno samozřejmě napsat o mnoho více, avšak to není předmětem této práce.

7.1.5 Energetické monitorování

V továrnách, budovách a domech je odběr systémů vytápění, ventilace a klimatizace monitorován na několika místech, dohromady jsou společné parametry (jako například teplota) pomocí telemetrie přeneseny do centrály. Všechna data jsou shromažďována a vyhodnocována pro efektivní využití či přesměrování energie. Tyto systémy také umožňují naplánování údržby, což za jistých okolností může být i spořivým krokem.

7.1.6 Motoristické závody

Telemetrie je klíčovým faktorem v moderních závodech motorových vozidel. Technici jsou schopni zpracovat rozsáhlá množství dat nasbíraná během testování nebo závodu a využít je k doladění vozidla pro optimální výkon. Systémy některých sérií závodů, jako je například Formule 1, se staly tak pokročilými, že dokážou vypočítat čas potencionálního kola, které závodník jede. Příklady některých užitečných měření závodního auta jsou tří-osé akcelerometry, teploměry, rychlost otáčení kol, aj. Vše co udělá pilot formule se také zaznamenává, aby tým měl přístup jeho osobnímu výkonu a v případě nehody podklady pro řešení viny.

Existuje i tzv. dvoucestná telemetrie, která umožňuje technikům přístup ke kalibracím vozu v reálném čase i během závodu na trati. Ta však byla v roce 2003 zakázána.

7.1.7 Zdravotnictví

Telemetrie v medicíně je používána pro pacienty (tzv. biotelemetrie), kteří mají potíže se srdeční aktivitou například při nebezpečí infarktů. Ti jsou vybavení zařízením, které umožňuje měření, nahrávání a vysílání naměřených údajů. Uložené údaje z měření jsou velmi důležité pro určení diagnózy, ty však zpravidla probíhají až po připojení zařízení k počítači a jejich důkladnému prozkoumání lékaři. Akutní srdeční stavy je však možné indikovat.

7.1.8 Studium živočichů

Telemetrie je používána pro studování života v divočině a je užitečná pro monitorování ohrožených druhů. Konkrétní kusy zvěře jsou vybaveny zařízením, které bezdrátově vysílá nejrůznější druhy dat, počínaje jednoduchými (například údaje o pozici) až po složitější (vybaveny kamerou/fotoaparátem, GPS modulem a dalšími senzory). Nynější technologie umožňují sledování v prostoru, a to nejenom trasu, kterou například žralok urazí, ale i hloubku, do které se ponoří a kolikrát se vynoří na hladinu. Zařízení jsou konstruována tak, aby nijak živočichovi neuškodila a neomezovala například při lovu potravy. [8][9]

7.2 Signály používané v modelech

Stejně jako pro silniční provoz existují pravidla, tak i pro modely jsou určené zásady zacházení. RC modely totiž jsou nejenom drahé, ale také nebezpečné. Při neopatrném zacházení mohou v lepším případě způsobit škodu pouze majiteli modelu a v horším případě škodu na majetku někoho jiného, či dokonce vážná zranění dokonce s následkem smrti. Rychlost otáčení listů vrtule u modelu helikoptéry dosahuje až 12000 otáček za minutu, takovým způsobem se z nich stanou smrtonosné nástroje, ke kterým jsou již nutné i zákonem určené způsoby manipulace. [25]

Tyto zákony se týkají hlavně o přiděleném frekvenčním pásmu, kterým se RC modely řídí. Jak je popsáno v kapitole o servo motorech (1.3 str.18), servo motor přijímá signál, který určuje na jaký úhel má otočit hřídel a dělá to pouze podle příchozího signálu, původ tohoto signálu ovšem musí přijít o pilota. Aby nedocházelo k situacím, kdy model přijímá signál, který nemá (rušení), jsou určeny kmitočty v pásmech 13, 27, 35 a 40Mhz pro provozování modelářských RC souprav. O této skutečnosti rozhodl Český Telekomunikační Úřad všeobecným oprávněním č. VO-R/15/08.2005-27 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení pro dálkové ovládání modelů v pásmech 13MHz až 40MHz. Tato pásma jsou rozdělena do několika kanálů s dostupem 10KHz a musí se tedy zajistit, aby zařízení vysílací a přijímací jednotky komunikovalo pouze spolu a nedocházelo k rušení. Každý modelář tedy musí být v daném pásmu sám, aby neovládal zařízení někoho jiného. Zpravidla je dodržován odstup alespoň ob jeden kanál. Z toho důvodu je vzdušnému prostoru pro řízení RC modelů letadel (a helikoptér) přiřazeno pásmo 35MHz. Žádné další modely nesmí do tohoto pásma vstupovat. Aby byl přenášený signál co nejkvalitnější a odolný proti rušení, musíme ho modulovat, nebo kódovat. [25]

Tabulka 2 - Provozní kmitočty [25]

Ozn.	Provozní kmitočty	Vyzářený výkon	Použití
a	13,560 MHz	100 mW e.r.p.	všechny druhy stanic
b	26,995; 27,045; 27,095; 27,145; 27,195 MHz	100 m W e.r.p.	
c	35,000; 35,010; 35,020; 35,030; 35,040; 35,050; 35,060; 35,070; 35,080; 35,090; 35,100; 35,110; 35,120; 35,130; 35,140; 35,150; 35,160; 35,170; 35,180; 35,190; 35,200; 35,210; 35,220 MHz	1 W e.r.p.	pouze pro modely letadel
d	35,820; 35,830; 35,840; 35,850; 35,860; 35,870; 35,880; 35,890; 35,900; 35,910 MHz	1 W e.r.p.	
e	40,665; 40,675; 40,685; 40,695; 40,715 MHz	100 m W e.r.p.	všechny druhy stanic
f	40,725; 40,735; 40,765; 40,775; 40,785; 40,815; 40,825; 40,835; 40,865; 40,875; 40,885; 40,915; 40,925; 40,935; 40,965; 40,975; 40,985 MHz	1 W e.r.p.	

7.2.1 Amplitudová modulace

Amplitudová modulace (AM) je historicky nejstarší způsob modulace signálu. Spočívá ve změně amplitudy nosné frekvence v závislosti na změně amplitudy modulačního signálu.

Nosnou frekvence vyjádříme vztahem:

$$u_n(t) = N.\cos(\Omega t)$$

kde N-je amplituda nosné
Ω- úhlový kmitočet nosné

a signál, kterým chceme nosnou frekvenci modulovat zapišme jako:

$$u_m(t) = M.\cos(\omega t + \varphi)$$

kde φ - fázový posuv vůči nosné

Amplitudovou modulaci vyjádříme tak, že přidáme signál $m(t)$ k amplitudě nosné. Pak tedy dostaneme vztah:

$$u(t) = [N + M.\cos(\omega t + \varphi)].\cos(\Omega t)$$

$$u(t) = N.\cos(\Omega t) + M.[\cos(\omega t + \varphi).\cos(\Omega t)]$$

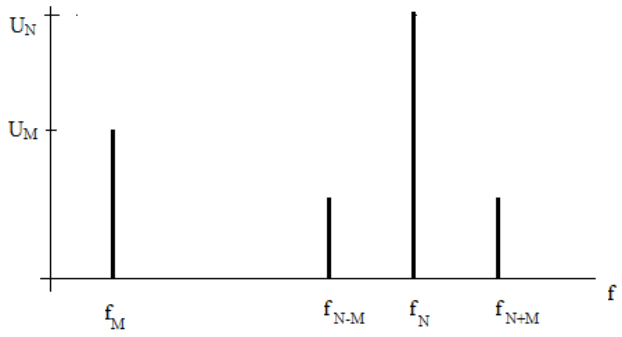
který upravíme podle vztahu:

$$\cos(\alpha).\cos(\beta) = \frac{1}{2}[\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)]$$

a dostaneme výsledný vztah:

$$u(t) = N.\cos(\Omega t) + \frac{M}{2}.\cos(\omega + \Omega)\,t + \frac{M}{2}(\Omega - \omega)t$$

Což je zápis AM, ze které je vidět, že se skládá z nosné, součtové a rozdílového pásma. Grafické naznačení je na Obrázku 18. Tato modulace se však pro velké vlivy rušení v modelářství už používá čím dál tím méně. [8][16]



Obrázek 18 - Grafické naznačení principu AM [18]

7.2.2 Frekvenční modulace

Jako se u AM mění amplituda nosné v závislosti na modulovaném signálu, u FM se dle této závislosti mění frekvence nosné vlny. Informace je zde tedy kódována nikoliv změnou amplitudy, ale frekvence a maximální amplitudě napětí modulačního signálu U_M odpovídá maximální změna frekvence nosné, která se nazývá frekvenčním zdvihem a označujeme ho jako Δf.

Signál nosné s amplitudou U_n , úhlovou frekvencí Ω a fází φ ,můžeme zapsat jako:

$$u_n(t) = U_n.\cos(\Omega t + \varphi)$$

Úhlovou frekvenci jako harmonickou funkci času můžeme vyjádřit jako:

$$\Omega(t) = \Omega + \Delta\Omega\cos(\omega t)$$

kde $\Delta\Omega$ - frekvenční zdvih
ω - úhlová frekvence modulační vlny

Po dosazení do rovnice nosné vlny dostáváme:

$$u_n(t) = U_n \sin\big((\Omega + \Delta\Omega\cos(\omega t))t\big) = U_n \sin\big(\varphi(t,\omega)\big)$$

kde $\varphi(t,\omega)$ - okamžitá fáze napětí

$$\varphi(t,\omega) = \int \Omega(t)dt = \int (\Omega + \Delta\Omega\cos(\omega t))dt = \Omega t + \frac{\Delta\Omega}{\omega}\sin(\omega t)$$

Obvyklý tvar frekvenčně modulované vlny je:

$$u_n = U_n \sin(\Omega t + m_{FM}\sin(\omega t))$$

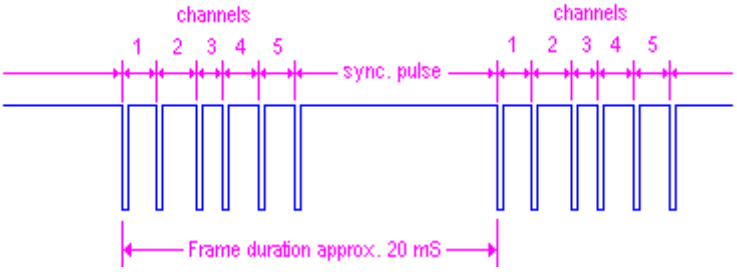
kde u_n-je okamžitá hodnota napětí modulovaného signálu
U_n-amplituda nosné vlny
Ω - úhlová frekvence nosné vlny
ω- frekvence modulační vlny
m_{FM} - modulační index; $m_{FM} = \frac{\Delta\Omega}{\omega} = \frac{2\pi\Delta f}{2\pi f_m}$
Δf - modulační zdvih
f_m-frekvence modulačního signálu

Na rozdíl od amplitudové modulace je FM odolnější vůči rušení a v modelářství se používá od začátku 80.let 20.století. Přestože je odolnější, není odolná úplně, u otáčejících se součástek může vzniknout šum, který přijímač může vyhodnotit jako plnohodnotný signál s užitečnou informací a dojde tak k rušení. Proto mnoho modelářů dává přednost dalším kódováním signálu. [8][17]

7.2.3 Pulzně Polohová Modulace

Neboli PPM využívá série oddělených pulzů v 20ms rámcích (50Hz). Každý tento pulz reprezentuje jeden vstup z vysílače (to znamená každý ovládající prvek pro kontrolu letadla má svůj vlastní pulz). Přijímač tyto pulzy dekóduje a převede je na PWM, které odpovídají pozici serva (více je probráno v kapitole 1.3 na straně 19). Pro lepší představu je uveden Obrázek 19. Série pulzů může tedy odpovídat řetězci informací pro otáčky motoru, směrovku, výškové kormidlo, příčné kormidlo, podvozek, atd.

Celý tento proces se tedy opakuje s frekvencí 50Hz a i zde může dojít k rušení a vzniku falešného nebo naopak chybějícího pulzu. Přijímač tedy v tomto případě pomíchá příchod posloupnosti pro daná serva a dochází k "poškubávání" či může úplně otočit hřídelí k maximální poloze a například i servo poškodit. [20]



Obrázek 19 - PPM [17]

7.2.4 Pulzně Kódovaná Modulace

PCM (Pulse-Code Modulation) je velmi rozšířený druh modulace, který využívá reprezentace analogového signálu ve formě hodnot, kdy každá tato hodnota odpovídá určité amplitudě signálu v daných časových úsecích. V modelářství je tedy pozice každého joysticku, vypínače reprezentována analogovou hodnotou napětí, která je digitalizována A/D převodníkem na 8 či 10 bitové slovo. Pokud máme v modelu 8 nebo 10 servo motorů, odpovídá to 80-100bitové informaci. Tyto užitečné informace se posílají v blocích, které jsou doplněné dalšími doplňkovými funkcemi, jako například Fail Safe (ten automaticky nastaví serva do nastavené pozice, pokud je signál z vysílače ztracen, nebo je nečitelný). Díky kontrolním bitům v balících, přijímač pozná, že došlá informace je vadná a čeká než přijde balík úplný s celou užitečnou informací. Pokud se tak stane, zpracuje ho a informaci předá servo motorům. Proto je PCM na velmi vysoké úrovni oproti předchozím typům a na rušení je velmi odolná. [16][17]

7.2.5 Rozprostřené spektrum 2,4GHz

Ovládání modelů pomocí 2,4GHz pásma je záležitost posledních pár let, přesto se pyšní velkou popularitou a většina modelářů na tuto techniku řízení svých modelů přechází. Pásmo 2,4GHz totiž zahrnuje kmitočty od 2,412GHz do 2,484GHz a dělí se na 14 nezávislých kanálů s odstupem 5MHz (14. kanál je od třináctého o 12MHz). Tímto velkým rozsahem je zaručeno, že signál dosáhne (oproti přenosům v nižších pásmech)

minimálního rušení. A pokud se najdou dva signály na stejné frekvenci, neovlivní se, neboť signály jsou i tak kódované. To však platí pro řízení RC modelů. Ve městech to už tak jednoznačné není a může docházet k ovlivnění, neboť zde je pásmo 2,4GHz zarušené. Proto se například používá i pásmo 5GHz, které není ovlivněno zařízeními pracujícími na 2,4GHz.

Pro přenos v tomto rozprostřeném spektru se využívá hlavně dvou modulací FHSS a DSSS. [16]

FHSS - neboli Frequency Hopping Spread Spectrum spočívá v přeskakování mezi frekvencemi při přenosech bitu či bitů. Může být typu Fast Hopping (FFH) kdy k těmto skokům dochází v průběhu přenosu jednoho bitu, nebo Slow Hopping (SFH) kdy se analogicky přenese několik bitů a ke změně frekvence dojde poté. Definováno je 79kanálů v okolí frekvence 2,4GHz a každý zabírá šířku pásma 1MHz. Ke změně frekvence dochází podle definovaných 22 modelů. FHSS má vlastní inicializační bitovou sekvenci pro přijímač, aby byl schopen rozpoznat příchozí modulační formát a očekávanou délku. Vysoké spolehlivosti dosahuje hlavně tím, že pokud dojde k chybnému přenosu, data se pošlou znovu, ale na jiné nosné frekvenci. Současně v jedné lokalitě může koexistovat teoreticky 26 systémů. [8]

DSSS - Direct Sequence Spread Spectrum je technika přímého rozprostření spektra. To znamená, že celý signál se přenáší na jedné určité frekvenci nosné. Technika přenosu je nahrazení každého bitu užitečné informace pseudonáhodnou sekvencí bitů dle určitého kódu. Celá tato sekvence bitů je potom v podstatě ona užitečná informace obohacená o umělou redundanci (nadbytečnost) rozprostřena do větší části rádiového spektra a tím je zajištěna menší náchylnost vůči rušení. Současně může fungovat více uživatelů, neboť pro ostatní zařízení se tento signál jeví jako šum. Pokud by někdo tento signál chtěl demodulovat, musel byt znát onu pseudonáhodnou sekvenci čísel. [8]

8 Použité součástky

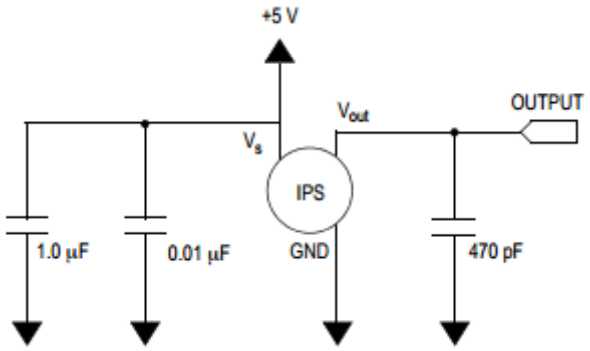
8.1 Měření rychlosti pomocí MPXV5004DP

Zařízení MPXV5004DP patří do série MPXV5004 a MPVZ5004 piezorezistivních integrovaných křemíkových tlakových senzorů. Škála využití těchto zařízení je velmi široká. Připojují se přímo na A/D převodníky (vstupy) mikrokontrolerů či mikroprocesorů. Princip funkce je takový, že se na vrchní trubičku připevní pitotova trubice a měří tedy dynamický tlak a spodní trubička měří tlak statický.[18]

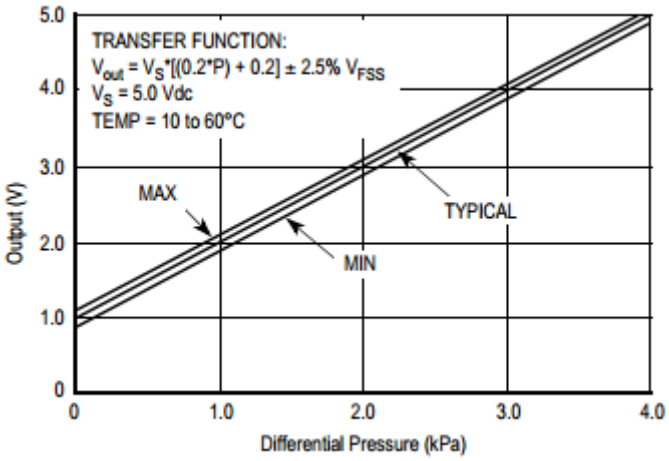
Obrázek 20 - MPXV5004DP [18]

Základní parametry:

- Napájecí napětí: 4,75-5,25 V_{DC} (doporučené je 5V)
- Rozptyl měření tlaku: 0-3,92kPa
- Odběr proudu: 10mA
- Výstup napětí při minimálním měřitelném tlaku: 0,75-1,25 V (typicky 1V)
- Citlivost: 1V/kPa
- Teplotní kompenzace od 10° do 60°C
- Provozní teplota: od 0°C do 85°C
- Maximální měřitelná rychlost: cca 80 m/s (288km/h)



Obrázek 21 - Doporučené zapojení napájení a výstupu [19]



Obrázek 22 - Graf závislosti výstupního napětí na tlaku [19]

Jak je vidět na Obrázku 22, výstupní napětí je závislé na naměřeném tlaku, pro určení toho napětí je využit vztah:

$$V_{OUT} = V_S.[(0{,}2.P) + 0{,}2] \pm 2{,}5\%V_{FSS}$$

kde V_{OUT}-výstupní napětí
V_S-napájecí napětí (5V)
P-naměřený tlak
V_{FSS}-0-100mm H_2O

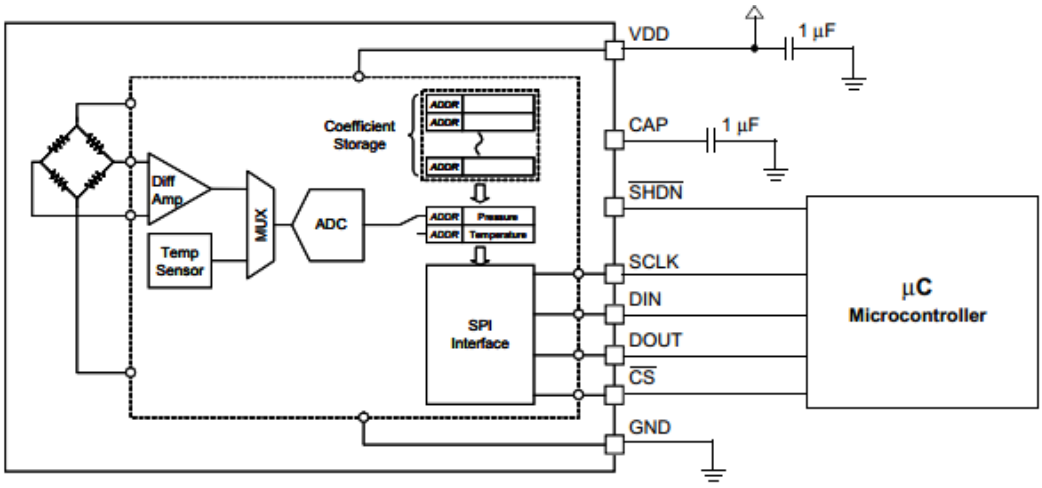
8.2 Měření výšky pomocí MPL115A1

MPL115A1 je MEMS senzor absolutního tlaku s digitálním SPI výstupem. Svými velmi malými rozměry (5x3x1,2mm) se hodí pro přenosná zařízení, náročná na miniaturní součástky. Během plného provozu činí spotřeba 5µA a v režimu spánku pouhý 1µA. Využívá se v barometrech, altimetrech, meteorologických stanicích, pevných discích počítače, apod. [19]

Obrázek 23 - MPL115A1 [19]

Základní parametry:

- Napájecí napětí: 2,375-5,5V
- Měření tlaku v rozsahu: 50kPa až 115kPa
- Přesnost měření: ±1kPa
- Monitorování tlaku a měření teploty
- Provozní teplota: od -40°C do 105°C
- Digitální výstup s 10bitový rozlišením
- Rozsah měřitelné nadmořské výšky: od -301 do 5572m.n.m (atmosférický tlak má při 15°C na úrovni mořské hladiny hodnotu 101,325kPa; senzor tedy může měřit vyšší atm. tlak než je standardní hodnota tlaku; vycházíme ze vzorce 3.1.1 na straně 23)



Obrázek 24 - Blokové schéma MPL115A1 [19]

8.3 Měření zrychlení pomocí MPU6000

MPU6000 je snímač vyroben technologií MEMS, má celkem 6 os pro sledování pohybu. Toto zařízení totiž kombinuje 3 osy pro gyroskop, 3 osy pro akcelerometr a Digital Motion

Processor™, vše v krabičce o rozměrech 4x4x0,9m. Mezi hlavní parametry tohoto zařízení patří 16bitový A/D převodník, který digitalizuje hodnoty z gyroskopu a další tři 16bitové A/D převodníky pro výstupy z akcelerometrů. [18]

Obrázek 25 - MPU6000 [18]

Základní parametry:

- Napájecí napětí: 2,375-3,46V
- Sériové rozhraní: I^2C, SPI
- Rozsah zrychlení: ±2g, ±4g, ±8g, ±16g
- Integrované A/D převodníky mohou současně samplovat akcelerometry bez potřeby multiplexeru
- Odebíraný proud: 500µA
- Mód nízké spotřeby: 10µA při 1,25Hz, 20µA při 5Hz, 60µA při 20Hz a 110µA při 40Hz

8.4 Měření proudu pomocí ACS758LCB-050U-PFF-T

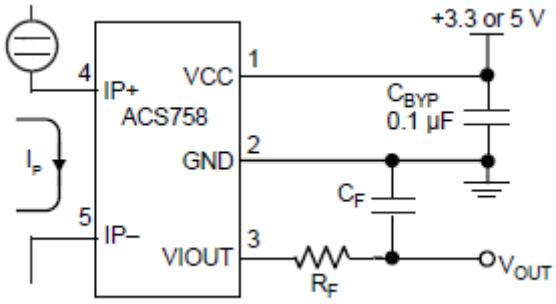
Tento senzor patří mezi senzory proudu, který nabízí ekonomické a přesné řešení pro měření AC a DC proudy. Typické využití nachází v ovládání motoru, zdrojích napětí, DC-DC konvertorech a invertorech. Dokáže naměřit proud 50A s citlivostí přibližně 60mV/A. A doba vzestupné hrany výstupního napětí s příchodem vstupního proudu odpovídá 3µs. Oproti ostatním typům však tento nabízí měření proudu pouze jedním směrem (Unidirectional). [21]

Základní parametry:

- Napájecí napětí: 3-5,5V (doporučené 5V)
- Odebíraný proud: 10mA (max. 13,5mA)

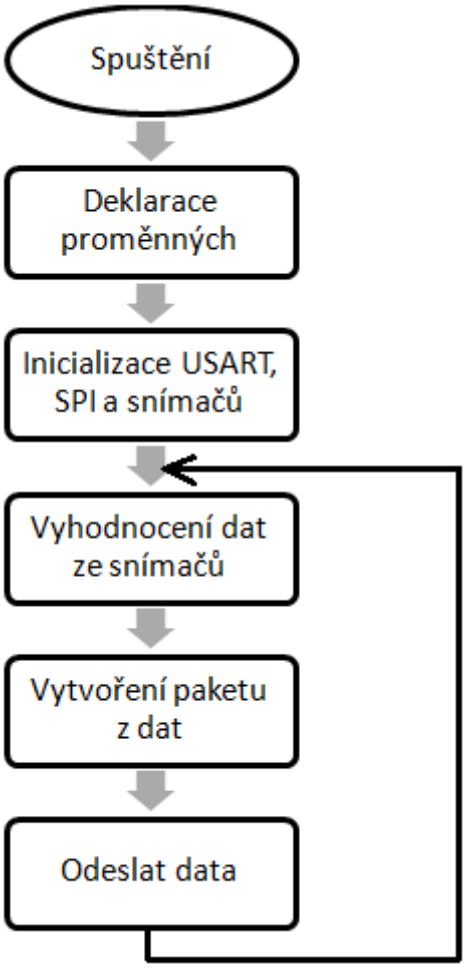
- Odpor vodivé cesty: 100μΩ
- Výstupní napětí v nečinnosti (vstupní proud 0A): 0,6V (může kolísat ±25mV)
- Maximální měřitelný proud: +50A
- Citlivost: 60mV/A
- Provozní teplota: od -40°C do 150°C

Obrázek 26 - ACS758LCB-050U-PFF-T [21]



Obrázek 27 - Typické zapojení senzoru pro měření proudu [21]

9 Praktická realizace



Obrázek 28 - Vývojový diagram programu

Na vývojovém diagramu je postup programu, určeného pro toto zařízení. Za povšimnutí stojí část s vyhodnocením dat ze snímačů. Zde se načítají hodnoty například z A/D převodníků ve formě čísla v rozmezí 0-1023. Konkrétní kód s popisky je možné si prohlédnout:

```
void initAD()
{
        ADMUX=(1<<REFS0)|(1<<ADLAR);
        ADCSRA=(1<<ADEN)|(1<<ADPS0)|(1<<ADPS1)|(1<<ADPS2);
}
```

Tato metoda je nazvána initAD, návratová hodnota není žádná (void), pouze nastavuje registr ADMUX (multiplexer převodníků). Bit ADLAR například nastavuje, aby výsledek konverze byl zarovnán v 8 bitovém rámci doleva (defaultně je řazen doprava). Další řádek kódu obsahuje zápis do registru ADCSRA, kde zápis do bitu ADEN povoluje A/D převodník (v 0 je neaktivní).

Dalším zajímavým příkladem kódu je "vytažení" dat z převodníku. To můžeme provést například:

```
char ZmerAD(char ktery) //
{
	int x,y;
	ADMUX=(1<<REFS0)|(1<<ADLAR)|ktery;
	ADCSRA=(1<<ADEN)|(1 <<ADSC)|(1<<ADPS0)|(1<<ADPS1)|(1<<ADPS2); //division
factor 128
	while(!(ADCSRA & (1<<ADIF)));	//ADIF udava jestli je registr s udajem
plny 1=je; byla provedena konverze
	x=(int)ADCL; //nahraje se cislo z registru ADCL
	y=(int)ADCH; //nahraje se cislo z registru ADCH
	ADCSRA|=(1<<ADIF);
	return (x>>6)|(y<<2);
	//_delay_ms(5);
}
```

Tato metoda již návratovou hodnotu má, tou je `char`. Nejdříve si deklarujeme proměnné, těmi jsou celá čísla x a y. Nyní je možné si všimnout jisté změny zápisu v zápisu do registru ADMUX, kde přibyl jeden parametr "ktery". Tímto parametrem totiž nastavíme konkrétní převodník pro čtení hodnoty. Dala by se vytvořit metoda pro každý převodník zvlášť, ale toto je mnohem efektivnější a je to využito v další části kódu. Návratovou hodnotou je 10bitový `char`.

```
char ZmerNapetiBaterie() //kontrola napeti zda neni pod urovni 900=2,9V (832 je
minimum=2,7V)
{

	int krit=900;
	char clanek1=ZmerAD(2);
	char clanek2=ZmerAD(3);
	char clanek3=ZmerAD(4);
	if((clanek1||clanek2||clanek3)<=krit)
	{
		return 1;
	}
	else {return 0;}
}
```

V této části kódu je využita předchozí metoda pro volání konkrétního převodníku (`char clanek1=ZmerAD(2);`) Tím změříme převodníky ADC2, ADC3 a ADC4 a hodnota se uloží do proměnných typu `char`. Podmínkou `if` se ověří, zda některá hodnota na článku neklesla pod určenou hodnotu 900, což odpovídá napětí 2,9V na článku. Tato hodnota byla určena z důvodu včasného varování. Pokud se vyhodnotí, že napětí je na nižší úrovni, metoda vrátí hodnotu 1 (v opačném případě 0) typu `char`.

```
char stavbaterie=ZmerNapetiBaterie();
```

Tento údaj lze považovat za indikaci kritického stavu, který je pro praktičnost potřeba přenést k pilotovi, kde se na přijímacím zařízení vyhodnotí příchozí informace a indikuje se kritický stav, například rozsvícení LED diody.

Dalším zajímavým příkladem kódu je měření rychlosti pomocí MPXV5004DP:

```
int ZmerRychlost()
{
	char napetizad=ZmerAD(0);  //načte hodnotu mezi 0-1023 (reálně ale nikdy
neklesne pod 1V-datasheet)
	//int napetizad=600;  //pro testování
	double napeti=(3.3/1024)*napetizad;
	double tlak=(((napeti/3.3)-0.2)/0.2);
	double rychlost=sqrt((2000*tlak)/1.2041);
	double rychlostvkmh=rychlost*3.6;
	int vysledek;
	vysledek=round(rychlostvkmh); //zaokrouhlení na celé km/h
	return vysledek; //vrati integer
}
```

Tato součástka je totiž přímo připojena na A/D převodník a ten přepočítá vstupní hodnotu napětí na číslo. Toto číslo je ovšem potřeba přepočítat na rychlost, což se udělá následovně:

$$U_{OUT} = \frac{U_{NAP}}{1024}.N$$

kde N je hodnota naměřená převodníkem.

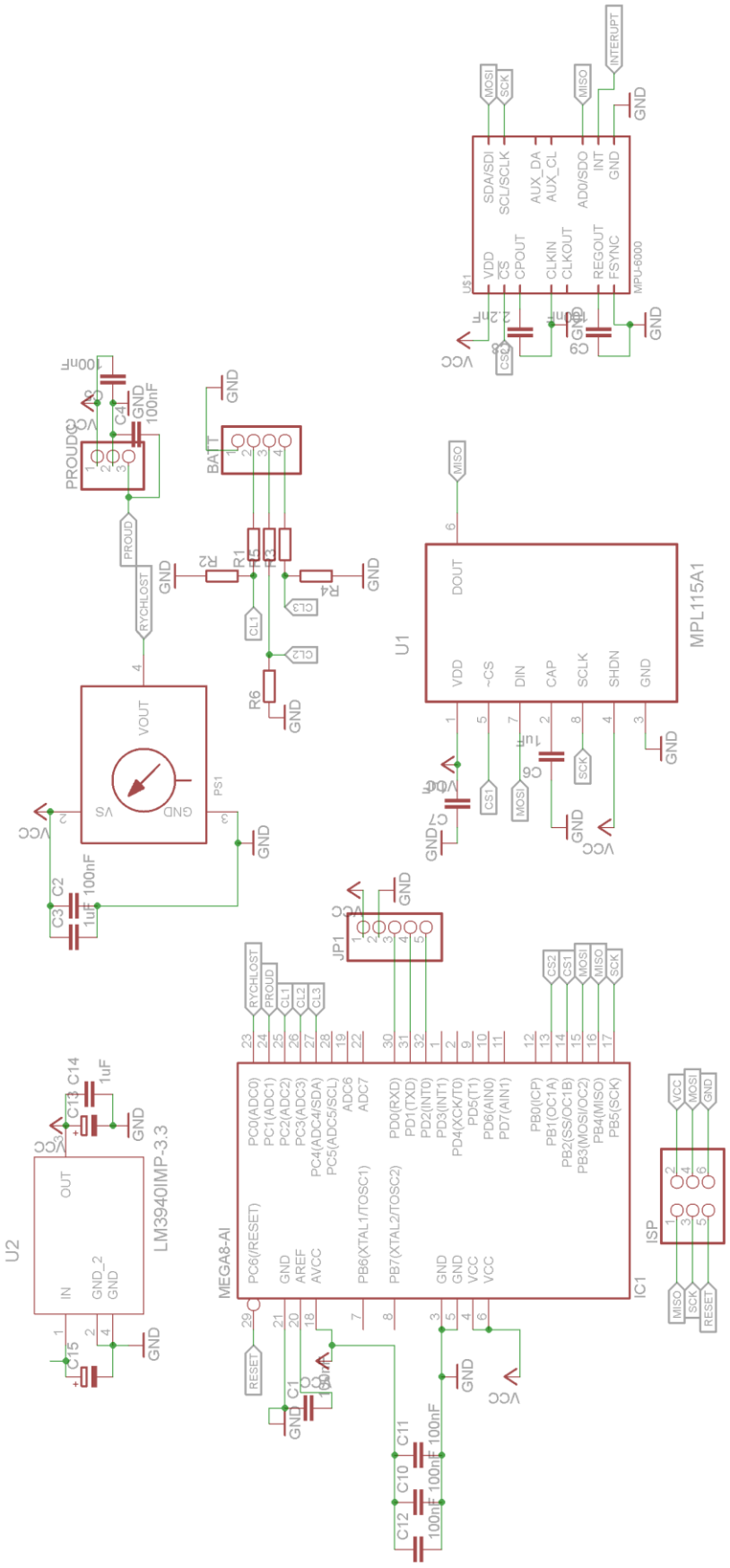
Nyní je tedy známá hodnota výstupního napětí, ta je ovšem ještě potřeba převést na tlak, potažmo rychlost. K tomu slouží vzorec uvedený v datasheetu pro konkrétní zařízení:

$$U_{OUT} = U_{NAP}.(0{,}2.P - 0{,}2)$$

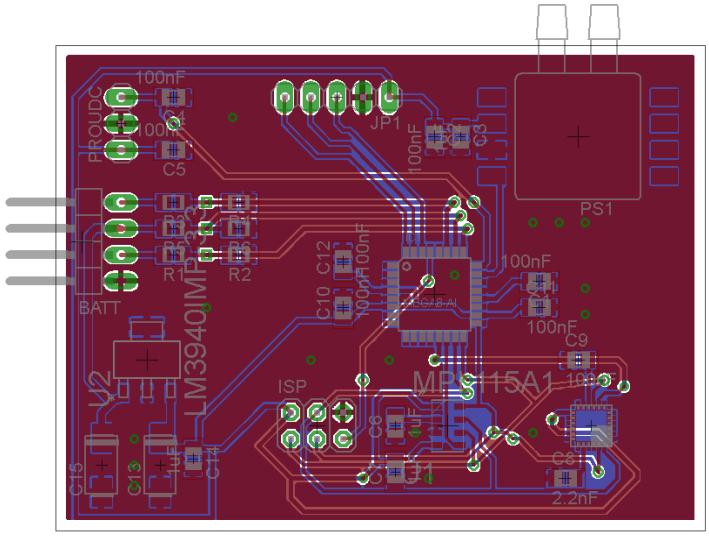
Vyjádřením hodnoty proměnné P dostaneme naměřenou hodnotu tlaku, kterou podle rovnice Pitotovy trubice je možno přepočítat na rychlost proudícího média.

$$v = \sqrt{\frac{2(p_t - p_s)}{\rho}}$$

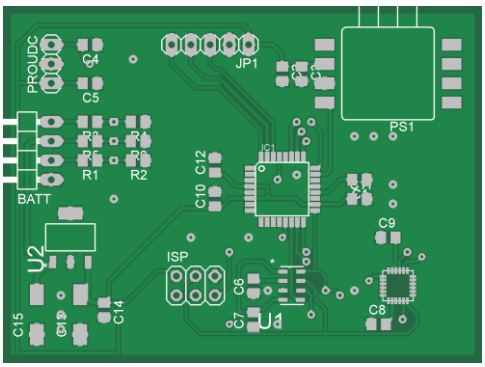
Pro ověření správnosti kódu byla použita proměnná `int napetizad;` Jelikož při napájecím napětí 3,3V je výstup maximálního měřitelného tlaku 3,23V, jednoduše spočítáme, že tato hodnota bude na 10bitovém A/D převodníku odpovídat stavu 1002. Pokud toto číslo zadáme do algoritmu, vyjde nám rychlost 80[m/s], kterou poté ještě převádíme na jednotky [km/h] zaokrouhlené na celé číslo a posíláme zpět jako výsledek metody.



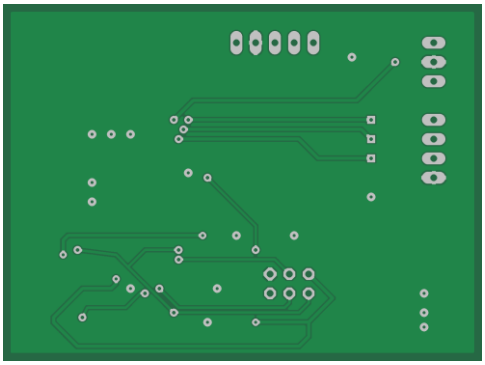
Obrázek 29 - Schéma zapojení



Obrázek 30 - Vygenerovaný obrázek desky z programu Eagle



Obrázek 31 - Vrstva Top



Obrázek 32- Vrstva Bottom

Na obrázku 29(strana 48) je možné si prohlédnout schéma zapojení desky. Za povšimnutí stojí součástka nazvaná U2 LM3940IMP-3.3, což je napěťový stabilizátor, který provádí konverzi vstupního napětí na požadovanou hodnotu. Dále PS1, tak je nazván tlakový senzor, který je lépe vidět na obrázku 29, jedná se tedy o MPXV5004DP, což je lehce identifikovatelné dle obrysů. Součástka MPU-6000 je akcelerometr, který je zapojen na SPI sběrnici stejně jako barometr MPL115A1. Akumulátor (BATT) se skládá ze 3 článků

LiPo. A ty jsou připojeny přes děliče napětí přímo na A/D převodníky MCU (Mega8), jehož rozsah je 1024 hodnot. Hodnota 1024 odpovídá AREF a tedy hodnotě 3,3V. Jak je probráno v teoretické části práce, hodnota napětí na článku nesmí klesnout pod úroveň 2,7V, jinak dojde k jeho poškození. Napětí 2,7V bude na A/D převodníku odpovídat hodnotě 837 ($\frac{1024}{3,3}.2,7$).

Závěr

V teoretické části práce jsou rozebrány základní předpoklady letu, například jaké jsou důvody vzniku vztlaku na křídlech a tedy jeho udržení ve vzduchu za užití Bernoulliho rovnice a Newtonova třetího zákona. Dále probrán princip fungovaní servo motorů, typy akumulátorů a měření nejdůležitějších veličin, které se v modelářství využívají.

Úkolem praktické části bylo vyhotovení jednoduchého telemetrického zařízení pro analýzu letu letadlového modelu, které je schopno měřit základní údaje jako je právě výška, rychlost, zrychlení a stav baterií. Stav baterie je dán hodnotou napětí, které je na jednotlivých článcích. Za využití analogově-digitálních převodníků je stav baterií monitorován a převáděn na digitální hodnotu. Softwarově je potom tato skutečnost řešena úsekem kódu, který zaznamená pokles pod kritickou úroveň. Záznam je poté možno převést například po sériové lince, ten by řešil na přijímací jednotce, která by vyhodnotila příchozí sekvenci a provedla indikaci kritického stavu, například rozsvícením LED diody. Zařízení je tedy schopné měřit kritický stav, ale po uvážení bylo rozhodnuto, že nejlepším způsobem bude, když se tato skutečnost oznámí k pilotovi na zem. Z časových důvodů bohužel nebylo možné zařízení vyzkoušet.

Do budoucna by bylo jistě zajímavé zkonstruovat zařízení pracující na rádiovém přenosu a moci naměřená data skutečně poslat k pilotovi. Zhotovení tohoto zařízení vyšlo na přibližně 2100Kč.

Literatura

[1] Start Flying RC. *Parts of an Airplane.* [Online] [Citace: 2. 8 2013.] http://www.startflyingrc.com/theory/planeparts/.

[2] HyperPhysics - Georgia State University. *Bernoulli Equation.* [Online] [Citace: 2. 8 2013.] http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/pber.html.

[3] National Aeronautics and Space Administration. *Airplane.* [Online] [Citace: 3. 8 2013.] http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/lift1.html.

[4] Energizer. *Product datasheet.* [Online] [Citace: 2. 8 2013.]

[5] **Novák, Petr.** *Mobilní roboty-pohony,senzory,řízení.* Praha : BEN, 2005. ISBN 80-7300-141-1.

[6] Pelikan Daniel. [Online] [Citace: 3. 8 2013.] http://www.pelikandaniel.com/?sec=product&id=60869.

[7] **Lazaridis, Giorgos.** PCBHeaven. *How RC Servos Works.* [Online] 19. 6 2009. [Citace: 3. 8 2013.] http://pcbheaven.com/wikipages/How_RC_Servos_Works/.

[8] ***Wikipedie otevřená encyklopedie.*** [Online] [Citace: 2. 7 2013.] cs.wikipedia.org/.

[9] ***The Free Encyclopedia.*** [Online] [Citace: 2. 8 2013.] http://en.wikipedia.org/.

[10] **Wolff, Christian.** Radiotutorial.eu. [Online] [Citace: 3. 8 2013.] http://www.radartutorial.eu/01.basics/rb12.en.html.

[11] Cybermanin Wordpress. *AirBus AF447: Tubes Pitot.* [Online] 8. 6 2009. [Citace: 5. 8 2013.] http://cybermanin.wordpress.com/2009/06/08/airbus-af447-tubes-pitot-22/.

[12] **Andrejašič, Matej.** Faculty of Mathematics nad Physics. *Seminarji.* [Online] 19. 3 2008. [Citace: 4. 8 2013.] http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2007_2008/MEMS_accelerometers-koncna.pdf.

[13] Spezial electronic. *Antenova.* [Online] [Citace: 5. 8 2013.] http://www.spezial.cz/antenova/gps-modul-antenova-radionova-m10264.html.

[14] **Baddeley, Glenn.** Global Positioning System. *NMEA sentence information.* [Online] 24. 5 2011. [Citace: 8. 18 2013.] http://home.mira.net/~gnb/gps/nmea.html.

[15] **Ludvík, Novotný.** Mojehobby. *Základní pojmy z RC světa.* [Online] 29. 11 2004. [Citace: 15. 8 2013.] http://www.mojehobby.cz/magazin/detail.php?idclanku=15.

[16] **Salt, John.** RC helicopter fun. *Spread Spectrum Radios, PCM Radios, FM Radios, AM Radios.* [Online] 3 2011. [Citace: 15. 8 2013.] http://www.rchelicopterfun.com/spectrum-radios.html.

[17] Model Aircraft. *Beginners' Guide.* [Online] [Citace: 15. 8 2013.] http://adamone.rchomepage.com/guide1.htm#uplink.

[18] ArduPlane. *Using an Airspeed Sensor.* [Online] 23. 3 2013. [Citace: 16. 8 2013.] https://code.google.com/p/ardupilot-mega/wiki/Airspeed.

[19] ***All datasheet.*** [Online] 2003-2012. [Citace: 29. 8 2013.] http://www.alldatasheet.com/.

[20] InvenSense. *MPU-6000/6050.* [Online] 2013. [Citace: 16. 8 2013.] http://www.invensense.com/cn/mems/gyro/mpu6000.html.

[21] Allegro MicroSystems. [Online] 9. 4 2013. [Citace: 16. 8 2013.] http://www.allegromicro.com/en/Products/Part_Numbers/0758/0758.pdf.

[22] **Betke, Klaus.** Tronico. [Online] 5 2000. [Citace: 15. 8 2013.] http://www.tronico.fi/OH6NT/docs/NMEA0183.pdf.

[23] **Vojáček, Antonín.** *Elektronické výškoměry = MEMS barometry.* [Online] 10. 9 2011. [Citace: 4. 8 2013.] http://automatizace.hw.cz/elektronicke-vyskomery-mems-barometry.

[24] **Vojáček, Antonín.** Jak pracují nové 3D MEMS akcelerometry Freescale? [Online] 30. 4 2007. [Citace: 5. 8 2013.] http://www.hw.cz/soucastky/jak-pracuji-nove-3d-mems-akcelerometry-freescale.html.

[25] Všeobecné oprávnění č. VO-R/15/08.2005-27. [Online] 27.7 2005 [Citace: 17.8. 2013] http://www.svazmodelaru.cz/new_smcr/rckmit.pdf

Příloha A - Obsah CD

Bakalářská práce - Adresář obsahující elektronickou verzi dokumentu v pdf

Eagle - Adresář obsahující schéma zapojení a návrh desky plošného spoje