

# **Návrh senzoru pro systém přenosu telemetrie**

## **A Proposal for a Sensor System for The Transmission of Telemetry**

Bc. Michal Jelínek

---

Diplomová práce  
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal Jelínek**  
Osobní číslo: **A13313**  
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**  
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Návrh senzoru pro systém přenosu telemetrie**  
Téma anglicky: **A Proposal for a Sensor System for The Transmission of Telemetry**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte literární rešerši na téma přenos telemetrie.
2. Analyzujte hardwarové prvky vhodné pro realizaci telemetrického systému.
3. Zvolte vhodné komponenty pro telemetrický systém požadovaných vlastností.
4. Navrhněte a vytvořte prototyp rádiově řízeného modelu s integrovaným systémem přenosu telemetrie.
5. Ověřte funkčnost stabilizačního systému a ověřte výsledky.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Akcelerometry. CVUT: FELD [online]. 2015 [cit. 2015-01-28]. Dostupné z: <http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34SES/prednasky/08%20Akcelerometry.pdf>.
2. CERNY, Michal. RC Revue: Stabilizacni systemy pro modely letadel. Praha: RCR, s.r.o., 2013, XIV., c. 4. ISSN 1213-130X.
3. HAJEK, Tomas. SNIMACE NAKLONU. Brno, 2007. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=8655](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=8655). Bakalarska prace. VUT Brno.
4. I2C Guide. Texas Instruments [online]. 2011 [cit. 2015-01-09]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/sg/sszc003c/sszc003c.pdf>.
5. MZK Servis [online]. 2013 [cit. 2015-01-08]. Dostupné z: <http://www.mzkservis.cz/index.php>.
6. NXP I2 C-bus solutions. NXP [online]. 2011 [cit. 2015-01-09]. Dostupné z: <http://www.nxp.com/documents/leaflet/75017144.pdf>.
7. VANA, Vladimir. Mikrokontrolery ATMEL AVR: programovani v jazyce C : popis a prace ve vyvojevem prostredi CodeVisionAVR C. 1. vyd. Praha: BEN – technicka literatura, 2003, 215 s. ISBN 80-730-0102-0.

Vedoucí diplomové práce:

**doc. Mgr. Roman Jašek, Ph.D.**

Ústav informatiky a umělé inteligence

Datum zadání diplomové práce:

**12. ledna 2015**

Termín odevzdání diplomové práce:

**15. května 2015**

Ve Zlíně dne 6. února 2015

doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.  
*děkan*



doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.  
*ředitel ústavu*

### **Prohlašuji, že**

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

### **Prohlašuji,**

- že jsem na diplomové/bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně 25. 5. 2015

  
.....  
podpis diplomanta

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá možností přenosu telemetrie z pohybujícího se modelu. Jsou popsány důvody, proč je nutné přetížení hlavně letícího modelu brát vážně. V teoretické části je popsána historie RC techniky, senzory vhodné pro měření přetížení, ale i další senzory vhodné pro telemetrické účely. Dále se teoretická část zabývá popisem komunikačních rozhraní mezi senzory a řídicím mikropočítačem.

V praktické části je řešena důležitost měřit přetížení a praktický vliv na zanedbání tohoto vlivu. Poté se práce zabývá tvorbou prototypu senzoru pro měření přetížení v letadle. Pro účely této práce byl vytvořen rozebíratelný prototyp senzoru přetížení na platformě Arduino, který je popsán v závěrečné kapitole.

Klíčová slova:

přetížení, akcelerometr, senzor, mikropočítač, Arduino, RC ovládání, ATMEL, stabilizace

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the possibility of telemetry transmission from a moving model. In this thesis the reasons why it is necessary to take the overload especially of flying model seriously is described. In the theoretical part the history of RC technology, suitable sensors for measuring overload and also other sensors appropriate for telemetry purposes are mentioned. The theory involves the chapter describing the communication interface between the sensors and the control microcomputer as well.

In the experimental part the importance of measuring overloading and the practical impact of ignorance of this phenomenon is discussed. Further the thesis deals with the construction of a sensor prototype for detection an overload of the plane. For the purposes of this thesis the dismountable prototype of overload sensor was created on the Arduino platform and described in the final chapter.

Keywords:

overload, accelerometer, sensor, microcontroller, Arduino, radio control, ATMEL, stabilization

Zde bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Mgr. Romanu Jaškovi, Ph.D za jeho rady a vstřícné jednání, které mi poskytoval během návrhu a vytváření tohoto projektu.

Dále mé přítelkyni za jazykovou pomoc a rady při vypracovávání práce.

Motto:

„Nic není objeveno a zároveň hned dokonalé.“

Cicero Marcus Tullius

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 HISTORIE RC TECHNIKY</b> .....	<b>11</b>
1.1 ANALOGOVÉ SYSTÉMY .....	11
1.1.1 AM .....	11
1.1.2 FM .....	12
1.2 DIGITÁLNÍ SYSTÉMY.....	13
1.2.1 Frequency Hopping Spread Spectrum .....	14
1.2.2 Direct Sequence Spread Spectrum .....	14
<b>2 SENZORY</b> .....	<b>15</b>
2.1 MĚŘENÍ PŘETÍŽENÍ .....	15
2.1.1 Akcelerometr.....	16
2.1.2 Tenzometr .....	17
2.2 MĚŘENÍ DALŠÍCH VELIČIN .....	18
2.2.1 Analogový teploměr.....	18
2.2.2 Digitální teploměr .....	19
2.2.3 Měření proudu a napětí .....	19
<b>3 KOMUNIKAČNÍ KANÁLY MEZI POČÍTAČEM A SENZOREM</b> .....	<b>21</b>
3.1 I <sup>2</sup> C SBĚRNICE .....	21
3.2 PULSE WIDTH MODULATION - PWM.....	22
3.3 USB .....	24
3.4 SERIAL PERIPHAL INTERFACE .....	27
3.5 PULZNĚ POLOHOVÁ MODULACE .....	28
<b>4 PROGRAMOVÁNÍ MIKROPOČÍTAČŮ</b> .....	<b>30</b>
4.1 HARDWARE .....	30
4.2 SOFTWARE .....	32
4.2.1 Arduino .....	32
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>35</b>
<b>5 MĚŘENÍ PŘETÍŽENÍ V RC TECHNICE</b> .....	<b>36</b>
5.1 NEBEZPEČNÍ POŠKOZENÍ VLIVEM VYSOKÉHO G.....	36
5.2 LEGISLATIVA.....	37
<b>6 NÁVRH PROTOTYPU</b> .....	<b>39</b>
6.1 PRINCIP ČINNOSTI.....	39
6.2 VOLBA KOMPONENT.....	39
6.2.1 Procesor Atmel Atmega 328P .....	39
6.2.2 Akcelerometr MMA8452Q.....	40
6.2.3 RC Systém MZK.....	41
6.2.4 LCD jednotka .....	41
6.2.5 RC regulátor otáček DSYS .....	41
<b>7 PRAKTICKÁ KONSTRUKCE</b> .....	<b>43</b>

7.1	HARDWAROVÉ ZAPOJENÍ.....	43
7.2	VÝROBA PLOŠNÉHO SPOJE.....	44
7.3	SOFTWAREVÉ ŘEŠENÍ.....	46
7.3.1	Princip programu.....	46
7.3.2	Ovládání periferií.....	47
7.3.3	Vlastnosti programu.....	47
7.4	DEMONSTRAČNÍ STOJAN.....	48
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>50</b>
	<b>ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....</b>	<b>51</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>53</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>56</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>57</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>58</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>59</b>

## ÚVOD

Od dob prvních RC systémů prošlo ovládání obrovským vývojem. Svěřit dřívějším ovládacím prvkům a RC soupravám dnešní letadla by si asi nikdo nedokázal představit. Dlouhá léta se zde provozovala analogová zařízení, které spolehlivostí moc neoplývala a vyžadovala kromě kvalitní instalace komponentů i dodržování pravidel provozu na letišti nebo jiných setkání. V analogovém pásmu je zřetelné i omezení maximálního počtu proporcionálně ovládaných funkcí vysílače. Každý kanál musí mít vyhrazené frekvenční pásmo. Jeli-kož celý přenosový kanál má 10kHz, tak každý ovládaný prvek musí mít v tomto kanálu vyhrazený svůj prostor. Obvykle se analogovými vysílačkami dalo ovládat až 8 funkcí.

Dnešní digitální 2,4GHz soupravy jsou vybaveny spoustou technologií, které zajišťují jak komfortní ovládání modelu, tak bezpečnost pro model i okolí. Významnou roli zde hraje princip FHSS, kdy by prakticky nemělo docházet k zarušení vysílače. Další pokročilé funkce toto zabezpečení ještě zvyšují díky ověření, zda je frekvence volná. V poslední době je trend přenos telemetrických dat zpět na vysílač. Pilot má tak například informaci kolik náboje má v akumulátorech a je tak minimalizováno riziko nehody v důsledku vybitých akumulátorů.

Měření přetížení, kterému je tato práce věnována, je veličina, která dosud v modelářské praxi je poměrně přehlížena, ale přitom velice důležitá. Díky tomu, že pilot zná síly, které na model působí, je schopen zvolit konstrukci, která odolá těmto silám. Největší nebezpečí vysokého přetížení v modelu je ulomení křídla, ale vážné je i poškození trupu vlivem znásobení hmotnosti akumulátorů nebo nádrže na palivo. Díky snímači s automatickou funkcí omezení výchylky a snížení hodnoty přetížení je možné předcházet fatálním následkům na zdraví a majetku.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 HISTORIE RC TECHNIKY

Modelářská praxe je známá už ze středověku, kdy si tehdejší konstruktéři lodí stavěly modely lodí a ověřovali si jejich vlastnosti, předtím než se pustili do stavby velké lodi. Na přelomu 19. a 20. století se objevují první skutečná letadla a rozjíždí se i letecké modelářství. Zprvu se jednalo o volné modely, které konstruktéři vypouštěli z kopce a pak je hledali někde v polích. O pár let později se začali objevovat první spalovací motory. Tehdy se jednalo o benzinové motory s jiskřivou svíčkou. Letadla vybavená tímto motorem už dosahovala poměrně značné rychlosti a stávalo se, že uletěly z místa vzletu i několik kilometrů. Do meziválečné doby je tedy možné datovat první pokusy o řízené lety modelů letadel. Jednalo se o tzv. upoutané modely. Letadlo bylo uvázáno na lanku a létalo okolo „pilota“. Tento systém se zatím nedá nazývat RC, ale bez tohoto mezikroku by vývoj k RC nebyl možný. Po druhé světové válce se začínaly objevovat první rádiové soupravy, nebo spíše plány na jejich konstrukci. Jednalo se o analogové jednokanálové soupravy s elektronkami. Zpočátku se pracovalo na různých frekvencích, ale později se stanovilo pásmo 27 MHz. Toto pásmo postupně dosáhlo svého limitu a modeláři začali používat i další analogové pásma. 35 MHz pro letadla a 40MHz pro lodě a auta. Po roce 2000 se začíná rozmáhat technologie 2,4 GHz, která dnes prakticky dominuje mimo jiné i díky možnosti přenosu telemetrických dat zpět k pilotovi [1].

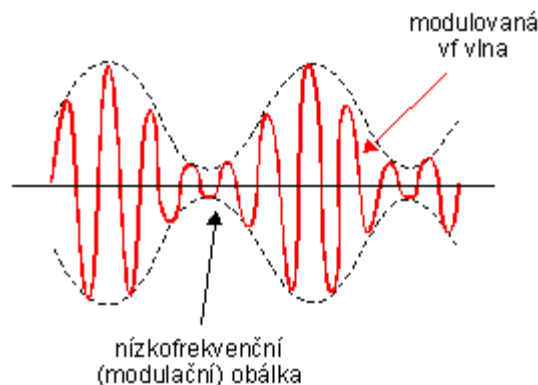
### 1.1 Analogové systémy

V počátcích RC techniky se používaly téměř výhradně analogové soupravy, využívající amplitudové nebo frekvenční modulace v pásmech 27 MHz, 35 MHz a 40 MHz.

#### 1.1.1 AM

Amplitudová modulace je nejstarší modulací. Princip amplitudové modulace byl znám už na počátku 20. století. Amplitudově modulovaný signál je nejméně kvalitní z dostupných variant modulací. Je náchylný na atmosférické a elektrické interference. Základní vlastností je konstantní frekvence nosné vlny a mění se pouze amplituda podle modulačního signálu.

$$i(t) = A_0 [ 1 + \alpha \cdot \cos(\omega_M t) ] \cos(\omega_N t) \quad (1)$$



Obr. 1 Amplitudová modulace [2]

Rovnice (1) je matematické vyjádření modulovaného signálu. Signál vzniká jako součin nosné vlny a modulovaného signálu.

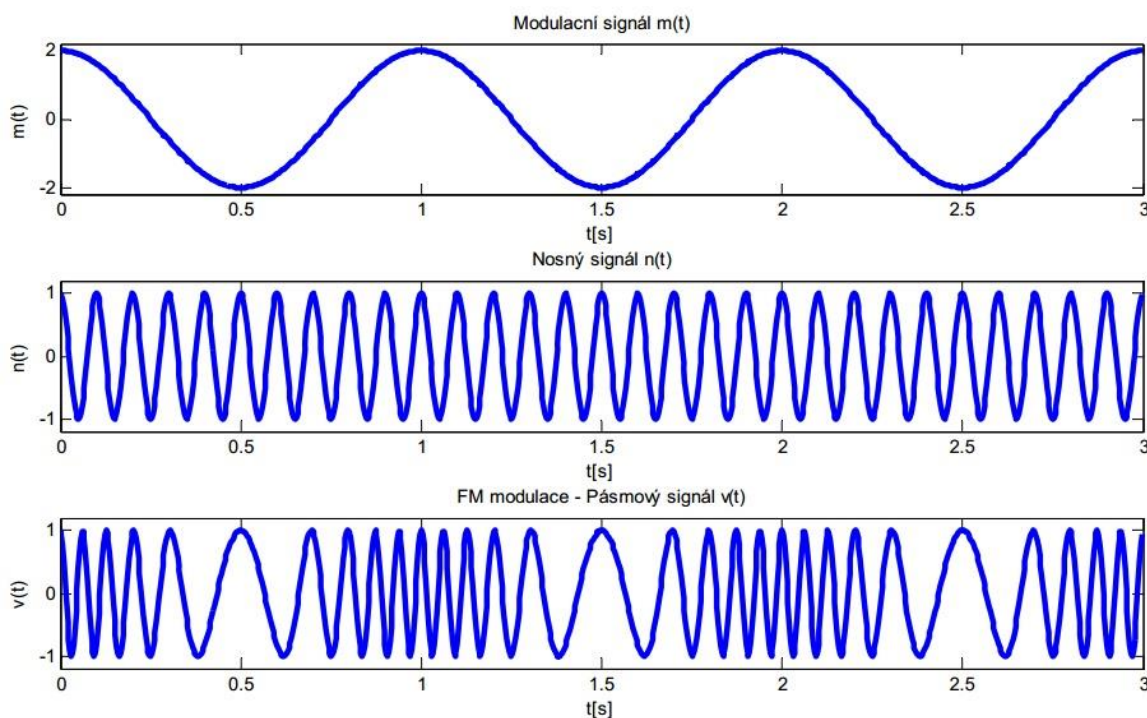
AM poslechové rádio v České republice vysílá hlavně ČRo 1 na frekvenci 270 kHz z vysílače Topolná u Uherského Hradiště, dále 693 kHz Liblice a 954 kHz Ještěd. Bohužel amplitudově modulovaná rádia lze kvalitně přijímat na delší vzdálenosti pouze v noci kvůli určitým změnám v atmosféře.

### 1.1.2 FM

Frekvenční modulace byla ještě donedávna hojně používána v RC technice. Dnes už se pásma 35 MHz a 40 MHz, která byla pro modelářské účely vyhrazena, téměř opustila a je zde radiový klid. Proto někteří starší modeláři toto pásmo opět začínají využívat.

Frekvenční modulace je výhodnější než amplitudová modulace. Signál je odolnější proti rušení právě díky tomu, že amplituda se i při nízkém vybuzení modulačním signálem nemění. Z toho plyne i další výhoda demodulace velmi nízkého napětového signálu.

Frekvenční modulace na rozdíl od amplitudové modulace má stejnou amplitudu po celou dobu vysílání. Mění se pouze frekvence podle modulovaného signálu. Ovšem konstrukce demodulátoru pro frekvenční modulaci je komplikovanější než pro amplitudovou modulaci.



Obr. 2 Frekvenční modulace [3]

Na obrázku (Obr. 2) je znázorněné, jak vypadá modulovaný signál metodou frekvenční modulace. Je patrné, že v případě minimální (záporné) fáze modulačního signálu je výsledný signál „řidší“ a v případě maximální fáze je „hustší“. Kvalitu frekvenčně modulovaného signálu je možné prakticky ověřit při příjmu AM modulovaném signálu například z vysílače Topolná u Uherského Hradiště na 270 kHz a porovnat ho s jakýmkoliv FM rádiem.

## 1.2 Digitální systémy

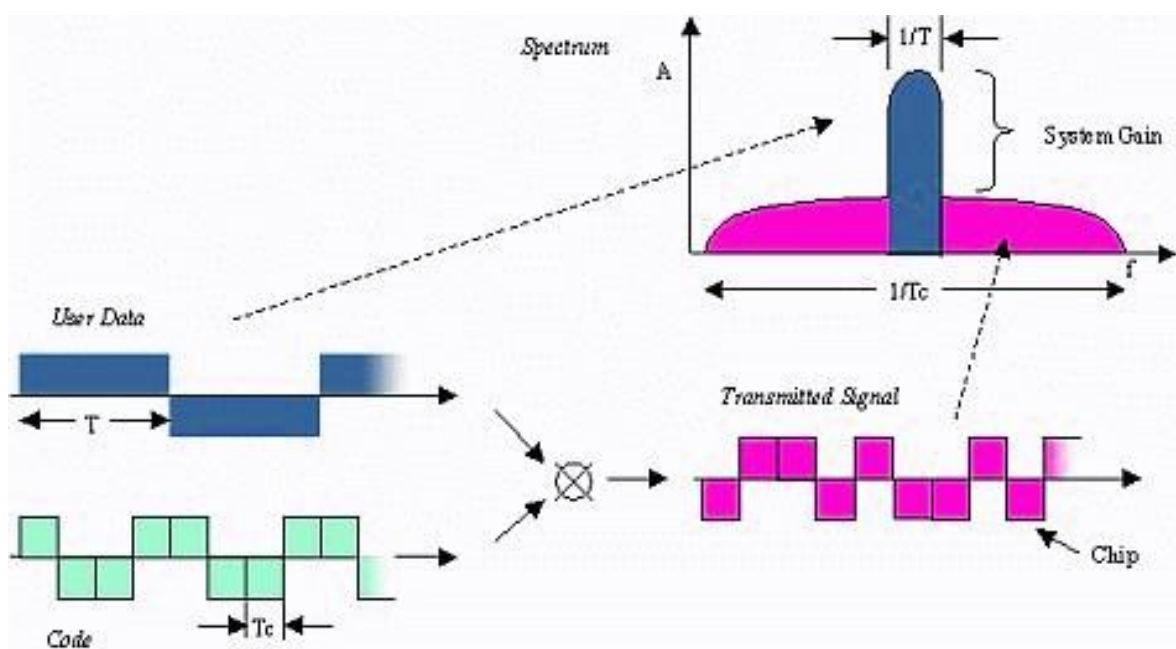
Jednoduché digitální systémy byly použity už v souvislosti FM modulací, a to PCM, pulsní kódová modulace. Hlavní roli na poli digitálních RC technologií hraje pásmo 2,4 GHz.

### 1.2.1 Frequency Hopping Spread Spectrum

Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS), česky přenos signálu s frekvenčním přeskokem. Tato technologie zajišťuje, že data budou posílána na více nosných frekvencích, typicky po jednom bitu, ale je možné provést přeskok i v rámci jednoho bitu. V případě, že data nebyla správně odeslána, dojde k novému odeslání na nové frekvenci, pokud jsou dostupné doprovodné technologie. Běžná frekvence přeskoků je až 20 přeskoků za sekundu. Každá následující frekvence je vybrána podle speciálního algoritmu. Maximální přenosová rychlost je až 3 Mbit/s [4].

### 1.2.2 Direct Sequence Spread Spectrum

Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS), česky přímé rozprostřené spektrum. V RC technice moc nepoužívané. Data jsou rozprostřena přímo do části spektra s určitou redundancí pomocí speciálních kódů. Signál je tak méně citlivý na rušení. Na rozdíl od technologie FHSS se tady nosná frekvence nemění. Na spektrálním analyzáru se signál jeví jako šum a příjemce musí znát kód, podle kterého data vznikala. Technologie byla poprvé použita v roce 1940 armádou. Dnes se používá hlavně pro WiFi sítě a GPS. Maximální rychlost při použití technologie u IEEE 802.11b je 11 Mbit/s [5].



Obr. 3 DSSS [6]

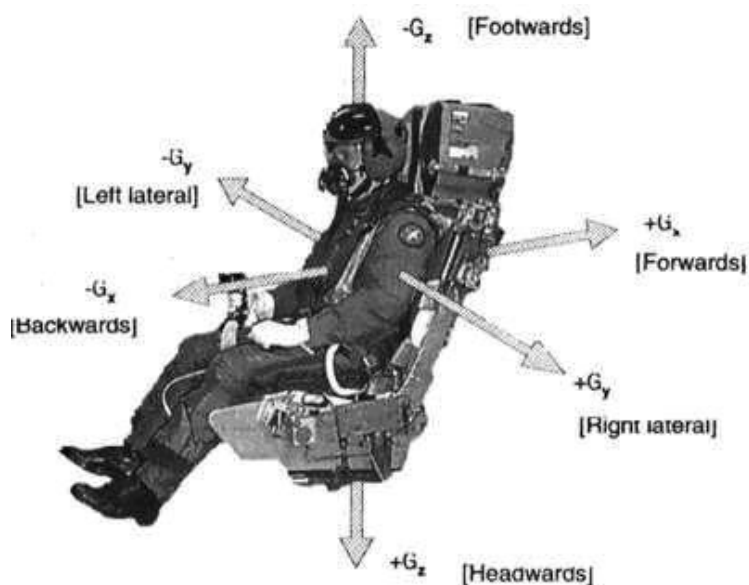
## 2 SENZORY

Senzory jsou jako smyslové orgány u živých organismů. Snímají elektrické i neelektrické veličiny a převádějí na elektrické signály, se kterými je mikro počítač schopný pracovat. Senzory jsou buď digitální, nebo analogové. Pro použití s mikro počítačem je u analogových senzorů nutný A/D převodník. Ten může být integrovaný v mikro počítači. Je ovšem nutné zajistit odpovídající parametry vstupu podle doporučení výrobce mikro počítače. Jedná se hlavně o veličiny vstupní impedance, napěťové rozpětí, pull-up rezistory a další vlastnosti. A/D převodník nepřímo určuje i rozlišovací schopnost senzoru. 8bitový převodník je schopný rozlišit pouze 256 stavů což pro některé aplikace může být málo a proto je vhodné volit širší kapacitu převodníku vzhledem k požadované aplikaci.

Digitální senzory mají A/D převodník už integrovaný v pouzdře a posílají do mikro počítače digitální data. Obvykle jsou ve tvaru PWM nebo mohou využívat některý z protokolů pro strojovou komunikaci jako je I<sup>2</sup>C, ISP nebo jiný speciální komunikační kanál.

### 2.1 Měření přetížení

Přetížení je neelektrická veličina, která znamená, kolikanásobek zemské přitažlivosti na těleso působí. Při volném pádu, kdy na těleso nepůsobí žádné další síly, se jedná o hodnotu 1 g, což je  $9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ . Ze vzorce je zřejmé, že se jedná o zrychlení.



Obr. 4 Směry přetížení

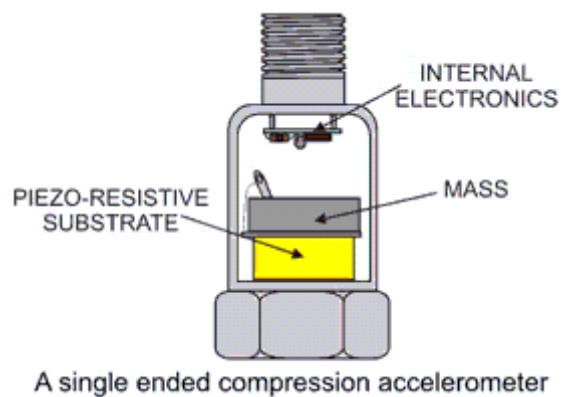
Přetížení může mít mnoho podob, podle toho, kterým směrem je orientován vektor zrychlení. Vektor zemské přitažlivosti působí vždy do středu země. Nejlepší zvládá člověk boční zrychlení. Stále ještě dobře člověk zvládá přetížení  $+G_x$  podle Obr. 4. Problém je v tomto případě v tlačení na hrudník, z čehož plyne obtížné dýchání. V tomto směru je schopen člověk přežít až 12 G. Naprosto nejhorší pro člověka je přetížení  $-G_z$ , kdy síla tlačí od nohou směrem k hlavě. Už při  $-2 G_z$  dochází k nesnesitelné bolesti hlavy, při  $-3 G_z$  může docházet k poškození očních cév a krvácení do spojivek. Při  $-5G_z$  nastává zmatenost až bezvědomí eventuálně smrt. Důvodem je pravděpodobně nahrnutí krve do mozku, který reaguje snížením srdečního tepu, které může vést až k zástavě srdce [7].

### 2.1.1 Akcelerometr

Akcelerometr je senzor, který měří zrychlení. Může se jednat o statické zrychlení působením zemské gravitace, nebo dynamické zrychlení způsobené pohybem nebo vibracemi, například seizmická aktivita nebo pohyb po kružnici. Akcelerometrem se dá určit směr pohybu vzhledem k osám nebo náklon tělesa. Dnes se běžně akcelerometrem vybavují chytré telefony, tablety a některé moderní automobily.

Toto zařízení může být typu piezoelektrický akcelerometr, piezorezistivní akcelerometr a akcelerometr s proměnnou kapacitou. V akcelerometru je piezokrystal, který vlivem zrychlení generuje napětí. Toto napětí se poté pomocí A/D převodníku převede na digitální hodnotu a pošle mikropočítači ke zpracování. Piezoelektrickým akcelerometrem nelze měřit statické zrychlení. Má velkou teplotní závislost. Používá se k měření vysokých hodnot dynamického zrychlení. Až 20 000 g ( $1 \text{ g} = 9,82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ) [8] [9].

Piezorezistivní nebo také piezoodporový akcelerometr měří zrychlení na základě prodlužování nebo zkracování piezoodporového elementu. Funguje na principu tenzometru. V integrovaných piezoodporových akcelerometrech je síť vyleptaných piezoodporových snímačů zapojených do Wheatsonova můstku. Tímto akcelerometrem je možné měřit změny zrychlení od 0,1 Hz. V omezené míře je možné ho použít i k měření statického zrychlení. Výhodou těchto akcelerometrů je jejich nízká cena, velká přesnost, mechanická odolnost a snadná integrace elektroniky a snímačů do jednoho čipu [9].



*Obr. 5 Piezodoporový akcelerometr [9]*

Kapacitní akcelerometr funguje podobně jako deskový kondenzátor. Vlivem pohybu dojde k posunutí pouzdra senzoru. Senzor umožňuje měřit kladná i záporná, statická i dynamická zrychlení. Uspořádání je podobné předchozím variantám akcelerometru, jeho součásti jsou pevný obal, pružné vnitřní prostředí a konkrétní element. Zde se jedná o dvě pevné desky a jednu pohyblivou desku. Tak vzniknou dva kondenzátory, které tvoří dělič pro dva obdélníkové signály stejné amplitudy, které jsou od sebe posunuté o  $180^\circ$ . Při pohybu dojde ke změně dělicího poměru a elektronika z tohoto posunutí určí směr a velikost zrychlení [10].

### 2.1.2 Tenzometr

Tenzometr je možné chápat jako variantu piezodoporového akcelerometru. V modelářské praxi je možné tenzometr použít pro měření deformací konstrukce vlivem přetížení. Je to součástka, která mění svůj elektrický odpor v závislosti na mechanickém namáhání – piezorezistivní jev. Tenzometr je nutné nalepit na snímané těleso, které se vlivem vnějších sil deformuje. Snímač je obvykle lehký s malými rozměry, ale odolný k poškození. Nevýhodou je teplotní závislost, kterou je třeba kompenzovat. První objevy, které vedly k vývoji tenzometru, je možné datovat už do roku 1856 v souvislosti se jménem Lorda Kelvina, který zjistil, že rezistivita kovů závisí na mechanickém namáhání. V roce 1938 byl v USA použit drátkový tenzometr, který našel uplatnění hlavně v leteckém průmyslu. O 14 let později přišel fóliový tenzometr a o další dva roky později polovodičový tenzometr. V roce 1948 byl první tenzometr vyroben také v ČSR v podniku Aero.

Kovové tenzometry mívají drátky o průměru cca 0,01 mm, které jsou přilepeny na nevodivý materiál a jejich konce jsou s přívodními vodiči svařeny. Na změnu odporu u kovového tenzometru má vliv pouze rozměr, jak vysvětlí rovnice (2).

$$R = \frac{\rho \times l}{S} \quad (2)$$

$R$  je odpor,  $\rho$  je konstanta měrného elektrického odporu materiálu,  $l$  je délka vodiče a  $S$  jeho průměr. Je tedy patrné, že na odporu se podílí pouze změna délky a průměru vodiče.

Rovnice (3) je poměr mezi délkou vodiče a jeho deformací.

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l} \quad (3)$$

Výsledná rovnice (4) pak vypadá takto:

$$\Delta R = R \times k \times \varepsilon \quad (4)$$

Kde  $k$  je konstanta vyjadřující vlastnosti tenzometru – jeho citlivost. Obvykle je tato hodnota okolo 2 [11].

Na základě změny odporu je vyhodnocovací zařízení, například mikropočítač, spočítat síly které byly k deformaci nutné. Výpočetní rovnici, která zohledňuje mimo jiné i teplotní závislost a další parametry udává výrobce tenzometru v datovém listu.

## 2.2 Měření dalších veličin

Tyto veličiny nejsou přímo podstatou práce, ale je vhodné je zmínit. Informace z těchto senzorů mohou pomoci při kompenzaci teplotních změn a jiných podmínek. Z komerčního hlediska může být integrace doplňkového senzoru v jednom pouzdře s hlavním senzorem výhodou. V modelářské praxi dokonce velice vítaná, protože je důležité při konstrukci letadla dbát na co nejnižší hmotnost při co nejvyšší tuhosti a pevnosti konstrukce.

### 2.2.1 Analogový teploměr

V elektronice jsou analogové teploměry založeny nejčastěji na změně odporu nebo výstupního elektrického napětí v závislosti na teplotě. Tato závislost je dána přesným vzorcem, který výrobce uvádí v dokumentaci. Výhoda těchto senzorů je jejich cena při odběru už několika kusů v řádu jednotek korun a jejich snadné použití. Při instalaci těchto senzorů

je nutné dbát na správnou kalibraci a při konstrukci na ovlivnění výsledného odporu vlivem příliš dlouhých vodičů, studeného spoje a nevhodně zvoleného umístění. Dnes je ovšem trend digitálních technologií a mnoho vývojářů se dává spíše směrem digitálních senzorů.

### 2.2.2 Digitální teploměr

Výstupem digitálního teploměru jsou binární data. Podle typu to může být PWM, které se hodí pro zpracování v MCU nebo jiné komunikační rozhraní. Použití teploměrů umožňuje konstruktérovi získávat data o teplotě systému a okolí a zabránit tak například poškození vlivem přehřátí. Principiálně se jedná o analogový teploměr digitalizovaný přímo v konkrétním čipu, kde je integrovaný buď termočlánek nebo termistor, který je přes A/D převodník digitalizován. Rozlišení A/D převodníku by pro precizní měření mělo být minimálně 12 bit, tedy rozlišení 4096 hodnot. Termistor je v čipu zapojen přes odporový dělič, kterým je možné kalibrovat celý teploměr. Jak plyne z popisu, digitální teploměr ke své činnosti musí být napájen. Obvykle se používá referenční napětí 5 V, ale někteří výrobci umožňují použít i jiné napětí. Pro správnou funkci je nutné zajistit stabilní napájení stanovené výrobcem [12].

Na trhu existují teploměry, které jsou již z výroby kalibrované a není nutné do dat, které jsou z těchto teploměrů získávána nijak zasahovat. Cena těchto teploměrů je při odběru už jednoho kusu v řádu desetikorun, ale i více. Výhodou digitálního teploměru a v podstatě všech digitálních zařízení je možnost zapojit na jeden vstup mikropočítače více zařízení a zvýšit tak užitnou hodnotu zařízení.

### 2.2.3 Měření proudu a napětí

Na základě informací i napětí a proudu v palubním systému je schopen pilot reagovat a zabránit tak havárii a možným újmám na zdraví a majetku. Nízké napětí lze měřit pomocí A/D převodníku přímo v mikropočítači, ale pro vyšší je nutné použít odporový dělič a snížit rozsah na úroveň, kterou je mikropočítač schopný měřit.

Měření proudu je obtížnější a provádí se pomocí bočnicku a Ohmova vzorce (5)

$$I = \frac{U}{R} \quad (5)$$

Měření proudu je tedy převedeno na měření napětí, které prochází přes známý odpor, při známém napětí. Vyhodnocovací algoritmus v měřícím zařízení nebo mikropočítači přepočítá získaná data na hodnotu proudu. Na základě údajů o napětí a proudu je následně možné pilota informovat o příkonu motoru, při zadání křivek účinnosti i o výkonu. Pilot poté může reagovat na chování motoru korekcí plynové páky. Velice snadno se může stát, že motor pracuje za příkonovým doporučením výrobce a nastává riziko poškození vinutí a možnost havárie s nepříjemnými následky.

### 3 KOMUNIKAČNÍ KANÁLY MEZI POČÍTAČEM A SENZOREM

Většina elektronických zařízení jsou tzv. modulární. To znamená, že komponenty zařízení plní nějakou funkci, podle základních pravidel informačních systémů, tedy příjem dat, zpracování dat a jejich interpretace. Data, které jedna komponenta vyprodukuje, předává další a ta je dále zpracovává. Na komunikaci mezi jednotlivými komponentami výrobci elektroniky vyvinuli různé komunikační kanály. Mnoho komponent je dnes již schopno komunikovat po kanálech konkurenčních výrobců. To mimo jiné usnadňuje práci i amatérským konstruktérům, kteří musí kombinovat součástky více výrobců. Při rozhodování o volbě komunikace může hrát roli i následné nasazení výsledného projektu v závislosti na požadavcích na rychlost komunikace, vzdálenosti vedení a dalších parametřů.

#### 3.1 I<sup>2</sup>C sběrnice

I<sup>2</sup>C jsou určeny pro snadnou implementaci interface mezi programy v jazyce C a různými obvody podporující sběrnici I<sup>2</sup>C od firmy Philips. Název je odvozen z anglického Inter-Integrated Circuit (I-squared-C). Některá literatura uvádí označení TWI (Two wire interface). Vyvinut byl v roce 1982 s 100kHz frekvencí umožňující mód „standard“. I<sup>2</sup>C je typu master-slave. Master (mikropočítač) generuje SCL hodinový signál v případě, že data posílá master i v případě, že data posílá slave. Zahájení i ukončení komunikace inicializuje Master. Spojení master-slave je tvořeno pomocí dvou vodičů. Na jednom vodiči se přenáší hodinové signály SCL a na druhém SDA (synchronous data), která slouží k přenosu dat. Data mohou být přenášena v několika rychlostních módech dle následující *Tab. 1*.

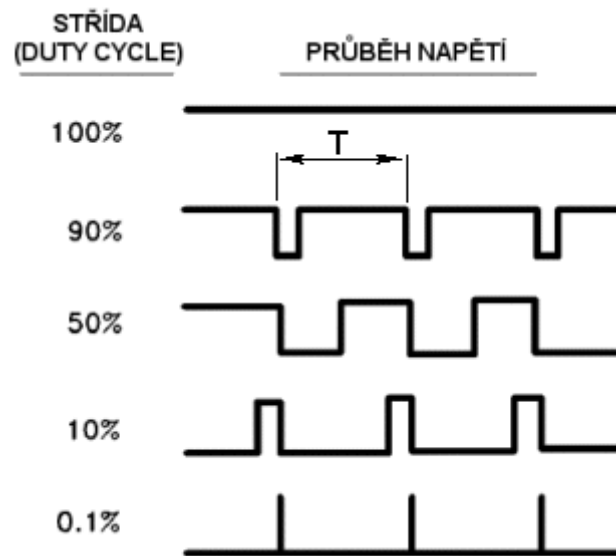
*Tab. 1 Rychlostní módy I<sup>2</sup>C*

mód	přenosová rychlost
standard	0 – 100 Kbps
fast	0 – 400 Kbps
fast-mode plus	0 – 1 Mbps
high-speed	0 – 3,4 Mbps
ultra fast-mode	0 – 5 Mbps

I<sup>2</sup>C umožňuje propojení až 128 zařízení pomocí dvou vodičů. Každé zařízení musí mít přidělenou individuální adresu, kterou je možné softwarově změnit. Tato adresa má buď 7, nebo 10 bitů. Maximální délka vodičů je dána nejvyšší přípustnou kapacitou spojení 400 pF. Každý vodič musí být připojen pull-up rezistorem ke kladnému napětí. V první fázi komunikace vyše MCU signál „Start“. To je sestupná hrana SDA při jedničce signálu SCL. Tím se aktivují všechny připojená zařízení. Poté následuje další signál „Address“ a informace zda chce MCU číst nebo zapisovat. Ostatní zařízení vyčkávají, než budou MCU vyzvány k přenosům. Kontaktované zařízení pošle MCU signál ACK, potvrzující že připraveno vysílat a může začít přenos dat. MCU ukončuje spojení signálem „Stop“ [13] [14]. Každý přenesený bajt je potvrzen jedním bitem ACK.

### 3.2 Pulse width Modulation - PWM

Pulzně šířková modulace je princip přenosu signálu pomocí binární logiky zapnuto/vy-pnuto, neboli log.1 a log.0. Informace je přenášena pomocí střídavy tedy poměru mezi oběma stavy, který vyjadřuje v procentech. 100 % zapnuto znamená, že signál má hodnotu pouze 1, naopak pokud je hodnota 0 %, signál má hodnotu pouze 0. Tento princip se využívá k řízení motorů, osvětlení a jiných elektronických zařízení. Podle doby, po kterou je na vodičích hodnota 0 a 1, určíme otáčky motoru nebo intenzitu osvětlení. Jedná se v podstatě o vytnutí a zapnutí rychle za sebou. Pomocí PWM je možné řídit jak napětí, tak proud. PWM je výhodné použít u řízení výkonných stejnosměrných strojů. U silového nasazení PWM je možné dosáhnout vyšší účinnosti stroje i v nízkých otáčkách. Princip PWM je možno využít i optickou cestou. To znamená LED diodu rozsvítit a zhasnout podle požadavku řídicího elementu. Perioda PWM se pohybuje v řádu sekund, ale častěji v milisekundách. To je případ řízení modelářského serva. Na něj se přivádí signál šířky od 1ms do 2 ms, kde neutrál, poloha kdy je servo schopno se natočit o stejný úhel doleva i doprava, je na hodnotě 1,5 ms. Frekvence signálu je 50 Hz což odpovídá periodě 20 ms [15].



Obr. 6 PWM [16]

PWM v mikropočítačích může být generováno buď speciálním interním obvodem, nebo ho lze naprogramovat na softwarové úrovni. U hardwarově generovaného PWM se do frekvenční děličky přivádí hodinový signál  $f_{osc}$ . Dělicí konstanta se musí nastavit v příslušném řídicím registru procesoru. Základní hodinový signál může být buď generován vnitřním oscilátorem, nebo externě krystalovým oscilátorem, případně jiným zdrojem. U mikropočítačů je vhodné používat především krystalové oscilátory pro jejich relativní jednoduchou aplikaci a odolnost proti vnějším vlivům jako je teplota. PWM je potom aplikováno čítačem, který sleduje vydělený hodinový signál a porovnává ho s hodnotou v registru PWM. Pokud se hodnoty shodují, na výstup je zapsána log.0. Pokud jsou hodnoty odlišné je na výstupem log.1. Z popisu tedy plyne, že perioda je konstantní a je dána frekvencí hodinového signálu. Střída se nastavuje pomocí registru pro PWM [16]. Hodnota zapsaná do registru nabývá hodnot podle šířky pásma čítače vyhrazeného pro PWM. Typicky je u 8bitového čítače hodnota 0 až 255, kde 255 znamená 100 % výstupu je log.1. V důsledku hraje šířka pásma čítače roli při preciznosti nastavení otáček. U 8 bitového čítače je k dispozici pouze 255 poloh při regulaci stejnosměrných motorů nebo osvětlení. Při užití 16bit čítače je k dispozici už 65535 poloh což odpovídá rozlišení 0,0015 %.

### 3.3 USB

USB, zkratka pro „Universal Serial Bus“ rozhraní se během posledních let stalo zcela běžnou součástí počítačů a další spotřební elektroniky včetně televizí, videorekordérů nebo kávovarů. Zkratku lze volně přeložit jako „Univerzální sériová sběrnice“, z čehož plynou výhody i nevýhody této technologie. Dříve používané RS232 a paralelní porty se dnes používají jen minimálně ve speciálních průmyslových případech. I to nebude mít pravděpodobně dlouhého trvání a výrobci se budou orientovat právě na Universal Serial Bus, tedy USB.

USB je specifikováno v několika verzích. Je zcela běžné, že každá další revize přináší zvýšení přenosové rychlosti, ale i možnost napájet proudově více náročné zařízení. Pro běžného uživatele je nejdůležitějším údajem právě rychlost rozhraní.

Tab. 2 Rychlosti USB

<b>maximální přenosová rychlost</b>	<b>označení</b>	<b>specifikace</b>
1,5Mbps	Low speed	USB 1.0
12Mbps	Full speed	USB 1.1
480Mbps	High speed	USB 2.0
5Gbps (10Gbps)	Super Speed	USB 3.0
10Gbps	Super Speed+	USB 3.1

Do verze 2.0 byly používány pouze čtyři vodiče, stejně jako například na LAN, od verze 3.0 je použito už devět nebo jedenáct vodičů, podle toho zda se jedná o běžné USB 3.0 nebo napájené USB 3.0. Napájení je +5 V a proudem 500–900 mA, v případě použití jako nabíječky například pro mobilní telefon, tablet nebo jiné periferie a s použitím externího zdroje je možné dosáhnout až 5 A. Sériová sběrnice umožňuje připojení až 127 zařízení za sebou – v sérii. Tuto vlastnost využívala a stále využívá hlavně společnost Apple, kdy jejich klávesnice měly už v devadesátých letech dva vstupy na USB. Jeden vedl do počítače a na druhé straně byla připojena myš. Maximální funkční délka spojení je až 5 metrů podle zvo-

lené specifikace. K připojení periférií jsou k dispozici různé druhy konektorů lišící se především rozměrem a nepatrně i tvarem. Pro využití rozhraní USB není v podstatě tvar konektoru důležitý, a proto mají například mobilní telefony menší konektory, ale k počítači se připojují konektorem standardní velikosti. Připojené zařízení lze libovolně připojovat a odpojovat i za chodu. Pouze je třeba brát ohled na možné probíhající přenosy.

Do verze 2.0 se používají čtyři vodiče – červený napájení +5 V, černý napájení a signálová zem, zelený signálový vodič D+ a bílý signálový vodič D-. Signály D+ a D- jsou komplementární při přenosu dat. Mohou nabývat stejné úrovně a slouží k signalizaci specifických požadavků. Do verze 1.1 je použita pro přenos dat napěťová úroveň 0–5V. Ve vyšších verzích je použito pro přenos dat proudové smyčky. USB zařízení jsou ovšem zpětně kompatibilní, a pokud jsou připojeny do USB Hubu, potom nižší verze komunikují opět pomocí napěťové úrovně.

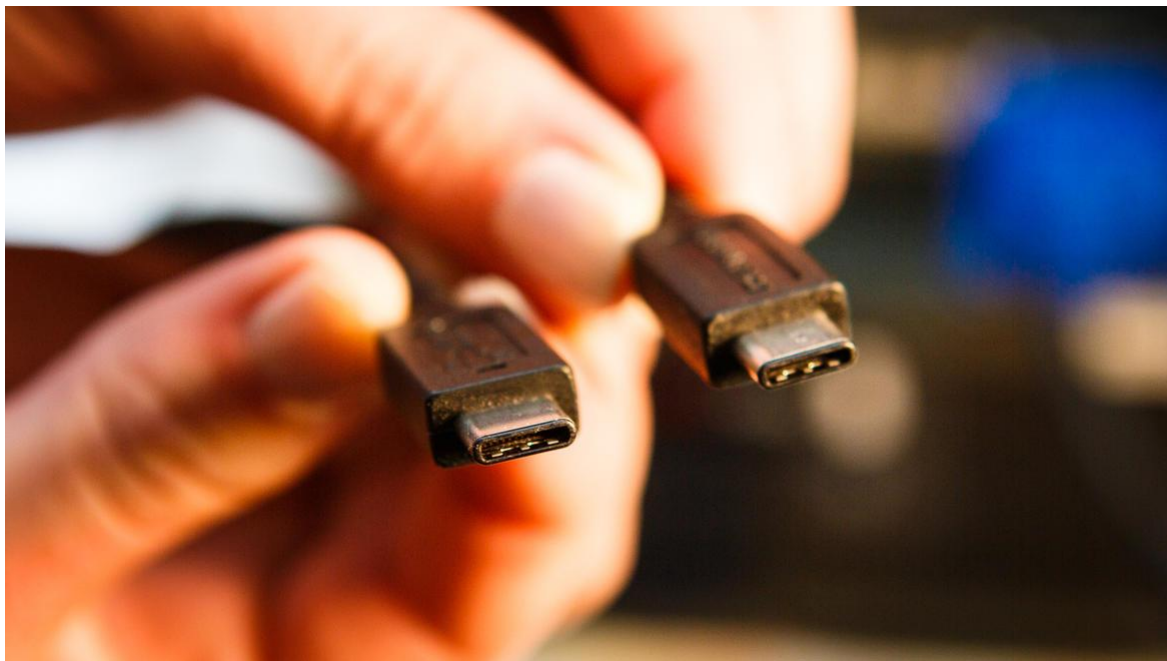
USB specifikace nepoužívá pojmy log.0. a log.1, ale stavy „J“ a „K“. Podle toho, jakou nejvyšší specifikaci zařízení v sérii podporuje, jim odpovídá příslušná napěťová úroveň. Pro připojení USB zařízení se používá kabelů s impedancí 90  $\Omega$ . Oba vodiče jsou na obou koncích zakončeny rezistorem o hodnotě 45  $\Omega$  pro komunikaci podle specifikace High speed (HS). Pro Full speed (FS) a Low speed (LS) má vysílač i přijímač impedanci 45  $\Omega$ . U LS a FS odpovídá hodnotě high +5 V a low 0 V. U High Speed je použita proudová smyčka o velikosti  $\pm 17,77$  mA. Při průchodu proudem spojením vznikne na každém koncovém rezistoru +400 mV nebo -400 mV podle směru, kterým proud prochází.

USB protokol používá tzv. pozitivní potvrzování. To lze chápat, že pokud přijímač obdržel data v pořádku, tak pošle paket ACK. Pokud byla data poškozená, tak je přijímač zahodí a čeká. Když vysílač neobdrží do určité doby potvrzující paket ACK, pošle data znovu [17].

V roce 2009 bylo představeno Wireless USB, které podporuje rychlosti 110 Mbps a 480 Mbps. Dalším vývojovým trendem by mělo být jak zrychlování USB specifikace, tak větší napájecí možnosti. Pomocí USB by se pak dal napájet i celý notebook.

Verze 3.1, která byla představena v roce 2013, byla vyvíjena společně předními podniky na poli spotřební elektroniky. Specifikace počítá se zatížitelností až 100 W, což by mělo umožňovat nabíjet i běžné 15 palcové notebooky. Na rozdíl od předchozích specifikací by USB 3.1 mělo být schopno pracovat až s napětím 20 V. Ve specifikaci se počítá s novým konektorem USB-C, který je podobný micro-USB konektoru. Díky této specifikaci odpadne

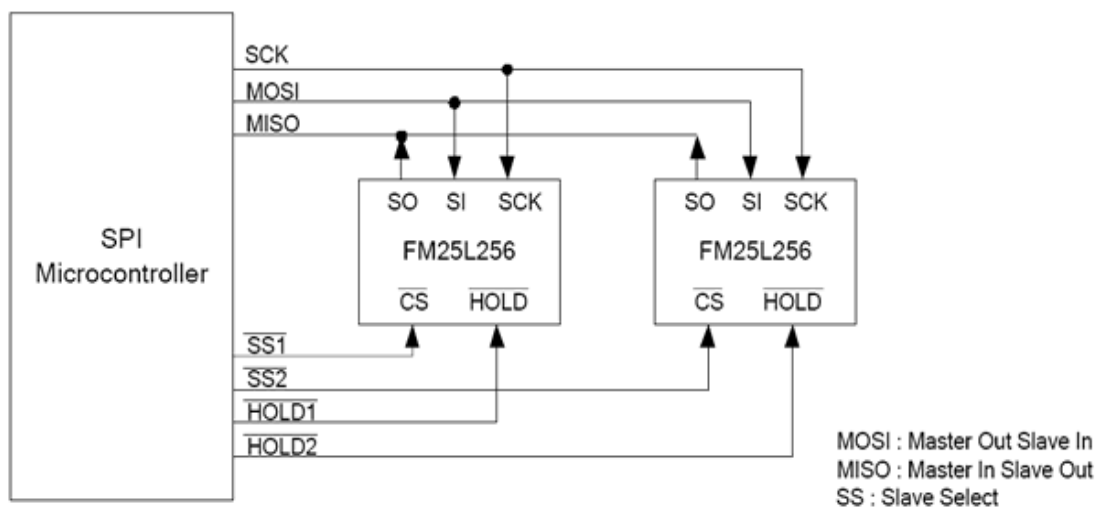
nutnost používat externí zdroj pro napájení náročnějších zařízení. Konektor je oboustranný, takže jedním kabelem je možné nabíjet notebook a ze stejného konektoru vzápětí nabíjet například tablet nebo i jiný notebook. V rámci specifikace je opět zajištěna zpětná kompatibilita s předchozími specifikacemi [18].



*Obr. 7 USB-C konektor [18]*

### 3.4 Serial Peripheral Interface

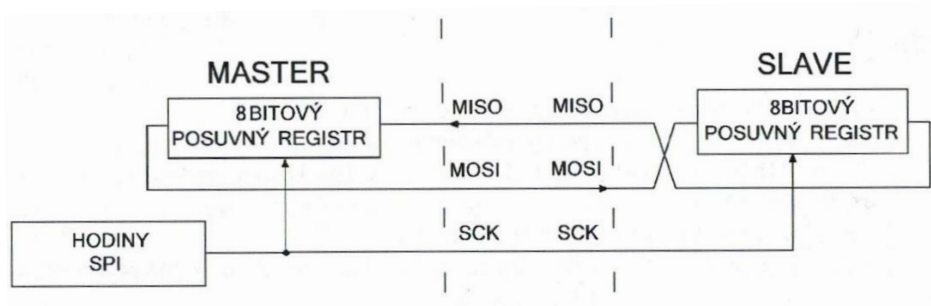
Serial Peripheral Interface bývá označena zkratkou anglického názvu – SPI. Sběrnici vyvinula firma Motorola v osmdesátých letech. V odborných kruzích je považována za jednu z nejperspektivnějších sběrnic v oblasti mikropočítačové techniky. Je založena na čtyřech signálových vodičích a zemnicího vodiče. Tři vodiče – SCK, MISO, MOSI jsou použity vždy, volitelně lze přidat ještě vodič SS nebo SSEL, který slouží pro výběr určitého zařízení na sběrnici.



Obr. 8 Více zařízení na SPI [19]

Hodinový signál pro SCK (Serial Clock) je generován zařízením Master. Obvykle tuto funkci zastává mikropočítač. Specifikace neomezuje maximální rychlost hodinového signálu a je schopna pracovat až na frekvenci 70 MHz, běžně se ovšem používají hodnoty kolem 10 MHz. V porovnání s I<sup>2</sup>C sběrnicí ji tedy můžeme považovat za rychlejší.

Signály MOSI (Master Out/Slave In) a MISO (Master In/Slave Out) propojují posuvné registry řadiče a podřízeného obvodu do kruhu.

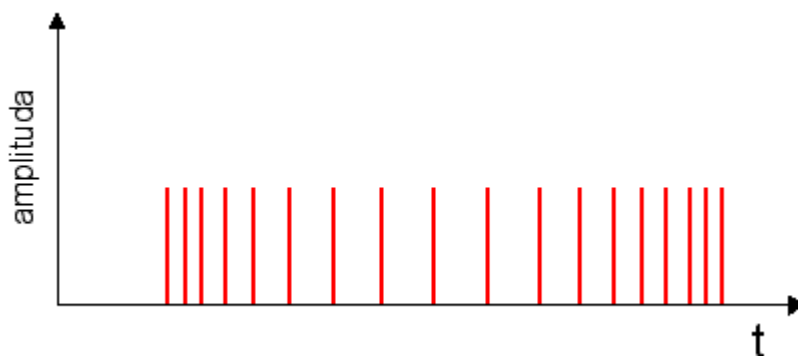


Obr. 9 Řízení SPI [20]

Na základě signálu SS (Slave Select) se provádí výběr konkrétního zařízení, se kterým bude navázána komunikace. To probíhá nastavením signálu SS na log.0. Komunikace spočívá ve vzájemném kopírování posuvných registrů. Na to je potřeba 8 taktů SCK. Rychlost sběrnice tedy dána rychlostí hodinových signálů. Při volbě 10 MHz zdroje SCK je to  $10000000/8$  bitů za sekundu duplexního provozu, což je poměrně slušný výkon [20].

### 3.5 Pulzně polohová modulace

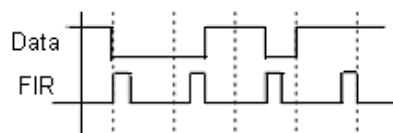
Informace je přenášena formou impulzů, které jsou posunuty od svého pomyslného středu. Tento střed je dán pilovým signálem, který se v průběhu přenosu nemění. Podle výšky vzorku je poté vyhodnoceno posunutí. Informace je tedy dána svou polohou v čase. Nejlépe je to pochopitelné z *Obr. 10*.



*Obr. 10 PPM – pulzně polohová modulace [8]*

S tímto kódováním se často setkáváme u modelářských RC prvků. Tyto prvky využívají frekvenci cca 50 Hz. Během přenosu musí přijímač očekávat specifikovaný signál. To můžeme vysvětlit tak, že pokud se má přenášet informace o signálu pro šest kanálů RC soupravy, tak vysílač vyšle postupně informace pro všech šest kanálů, které přijímač očekává. V podstatě v každé „otočce“ vysílání je nutné poslat i informaci pro kanál RC soupravy, přestože nedošlo k žádné změně. Z principu přenosu je tedy jasné, že taková komunikace je náchylná na rušení během každé „otočky“. Může dojít ke ztrátě nebo zašumění signálů, které je v případě RC ovládání patrné jako vrčení nebo pošukávání serv případně naprosté ztrátě kontroly. Nejdůležitější kanály se řadí do spektra jako první, protože se u nich předpokládá, že projdou s nižším zašuměním nebo poškozením. V oblasti leteckého modelářství to jsou směrová a výšková kormidla.

PPM se používá pro přenos dat technologií infračerveného paprsku při maximální rychlosti až 4 Mbps. Každé 2 bity informace se zakódují do pulsu v jedné ze čtyř možných časových pozic. Této metodě se říká FIR (Fast Infra Red).



Dvojice bitů	PPM
00	1000
01	0100
10	0010
11	0001

Obr. 11 Fast Infra Red [21]

## 4 PROGRAMOVÁNÍ MIKROPOČÍTAČŮ

K programování mikropočítačů je třeba jak softwarové vybavení, tak hardwarové. Dnes jsou mikropočítače prakticky ve všech zařízeních počínaje cyklistickým světlem a konče složitou modelářskou vysílačkou nebo mobilním telefonem. Vzhledem k ceně, možnosti programovatelnosti a relativně snadné implementaci v mnoha aplikacích mají mikropočítače obrovskou budoucnost.

### 4.1 Hardware

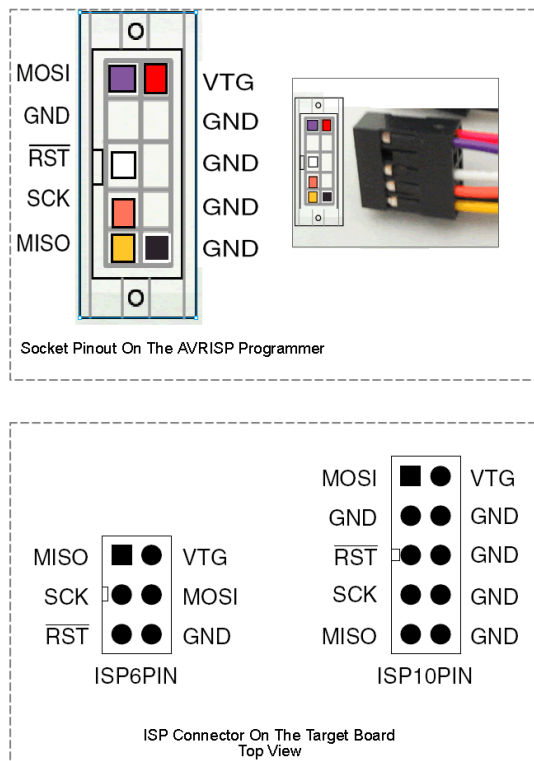
K programování mikropočítačů je třeba program do mikropočítače nějak dostat. K tomu slouží hardwarové moduly a převodníky. Procesory Atmel AVR je možné programovat jak pomocí sériového rozhraní, tak paralelního. Paralelní programování se dnes víceméně nepoužívá. Většina modulů s MCU je dnes velikosti SMD a jsou pevně připájena na desce plošných spojů a jejich vyjmutí pro potřeby programování a opětovné osazení na desku je komplikované. Další problém je samotný paralelní port, protože dnes ho najdeme pouze doplňkově u některých stolních počítačů, ale jinak se už dnes nevyskytuje a je nutné používat různé převodníky.

Programování přes sériovou linku je podstatně jednodušší a častěji využívané. Sice se opět nejedná o programování přes plnohodnotný RS232, ale přes převodník z USB, ale hlavní výhodou je možnost programovat přímo na desce plošných spojů. Velikost programovacího modulu je „USB Dongle“, tedy asi jako obyčejný flash disk. Dongle tvoří mikroprocesor, který překládá program z osobního počítače na sérii impulsů, kterými se mikropočítač programuje. Programovací modul může obsahovat další podpůrné součástky, jako je například obvod FTDI, který má na starosti právě převod z USB na RS232 nebo TTL. Kompatibilita u dnešních počítačů je zaručena především díky specifikaci USB HID, kterou používají například USB myši nebo USB klávesnice, ale i některé skenery.



Obr. 12 USB programátor [22]

Spojení mezi programátorem a mikropočítačem probíhá přes ISP, který je popsán výše. ISP v tomto případě lze chápat i jako „In System Programming“, což je vlastně sériové programování bez nutnosti vyjmout mikroprocesor z obvodu, o kterém je zmínka výše. Využívá se signálů MOSI, MISO, SCK a RESET, který není běžný ve specifikaci sběrnice ISP, ale je to specialita programování mikropočítačů. Signál RESET přepíná mikropočítač z režimu běhu v aplikaci do režimu programování. Pin RESET je možné přepnout i jako běžný I/O pin, ovšem je tím ztracena možnost dalšího programování procesoru. Vrátit procesor do původního stavu lze metodou HVSP, „High voltage serial programming“. Místo běžných 5 V nebo 3,3 V je použito napětí 12 V a pin lze „násilně“ vrátit na původní hodnoty. Chování procesoru se nastavuje v tzv. pojistkách (FUSES).



Obr. 13 AVR ISP konektor [23]

## 4.2 Software

Základním programovým vybavením je vývojové prostředí, ve kterém programátor napíše zdrojový kód a softwarové rozhraní, tzv. linker a kompilátor pro přeložení tohoto kódu a následné poslání přes programovací modul do mikroprocesoru. Vývojové prostředí je nutné volit podle programovacího jazyka. Je trendem přecházet na vyšší programovací jazyky, jako je například jazyk C, C++, C# nebo vyšší jako je Mathematica. Kód v tomto jazyce je po přeložení kompilátorem o něco větší a může být méně efektivní než kód napsaný na nižší úrovni v Assembleru. Kompilátor může používat neefektivní volbu překladu, nemusí po sobě důsledně uklízet paměť a v neposlední řadě je výsledný kód větší. Výhoda programování ve vyšších jazycích spočívá ale v jeho jednoduchosti. Programátor může vytvořit složitý program poměrně jednoduchou cestou a kompilátor tento kód přeloží do strojového kódu zpracovatelného mikropočítačem. U mikropočítačů rodiny AVR je výstupem soubor s příponou \*.hex, který se následně přes komunikační rozhraní programátoru nahraje do mikroprocesoru. Běžná programová paměť 8bit mikroprocesoru je v řádech jednotek až desítek kilobajtů a zápis programu do paměti je tedy rychlý, jak je patrné ze specifikace SPI a použití SCK v řádech až několika desítek MHz.

### 4.2.1 Arduino

Arduino je Italský otevřený projekt vývojového kitu. Je postaven na 8bit mikroprocesoru Atmel. Popularitu si získal svojí intuitivností, rozšiřitelností, kvalitním zpracováním manuálu a instrukcí, širokou základnou zkušených programátorů, kteří neustále posunují hranice využitelnosti osmibitových procesorů. Výrobce tvrdí, že chtěl vytvořit levný, modulární, multiplatformní, snadno programovatelná kit. S cenou okolo 400Kč (v roce 2015) se jedná opravdu o poměrně levný programovatelný kit. V současné době se navíc vyskytuje mnoho klonů z Asie i jiných světových končin za ještě nižší ceny. Nejnovější Arduino Due je vybavené dokonce 32 bitovým procesorem z dílny ARM.

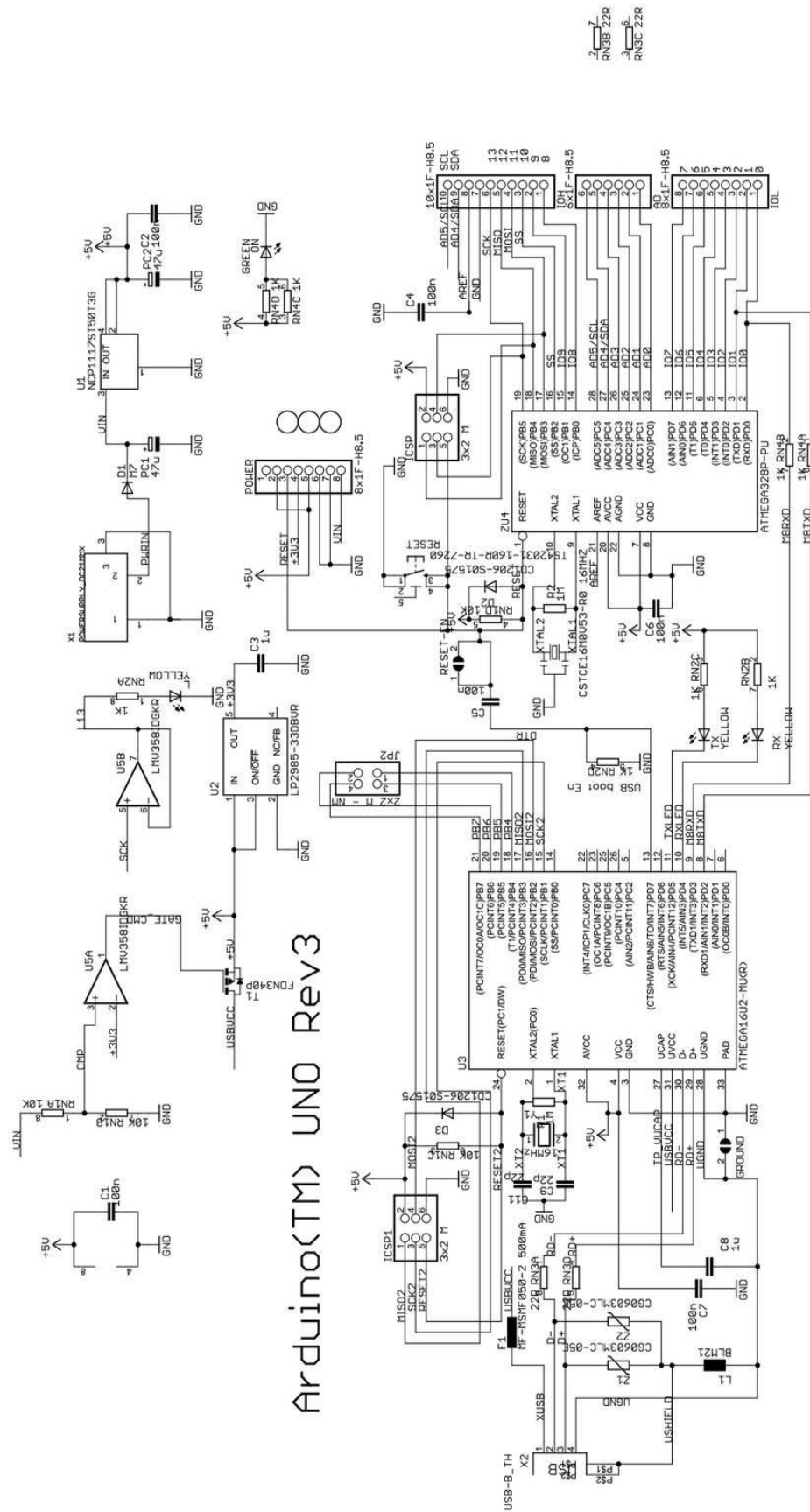
Arduino má vlastní vývojové prostředí, které umožňuje jak programování aplikací vykonávaných kitem, tak nahrání bootloderu do nových kompatibilních mikroprocesorů. Programovací jazyk je upravený jazyk C. Úprava spočívá ve zjednodušení definice vlastností pinů a absence některých dalších definic před spuštěním výkonné části programu. K dispozici je mnoho knihoven, které jsou popsány na webu [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc). Modul má vestavěný

obvod pro programování, stačí tedy pouze připojit USB k osobnímu počítači a nahrát program do modulu.

K dispozici jsou verze s mikropočítačem ve velikosti SMD i klasické velikosti PDIP nebo stavebnice, kdy si musí uživatel napřed osadit předpřipravenou desku plošných spojů dodávanými součástkami. PDIP mikropočítače mohou být vyměněny za jiný kompatibilní mikropočítač, ale je nutné do nich nahrát 0,5KB bootloader. To se provádí standardním programátorem k mikropočítačům Atmel, který se připojí na ICSP konektor a přímo z prostředí Arduina se do kitu nahraje [24].



Obr. 14 Arduino Uno [25]



Obr. 15 Arduino Uno schéma zapojení [25]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 MĚŘENÍ PŘETÍŽENÍ V RC TECHNICE

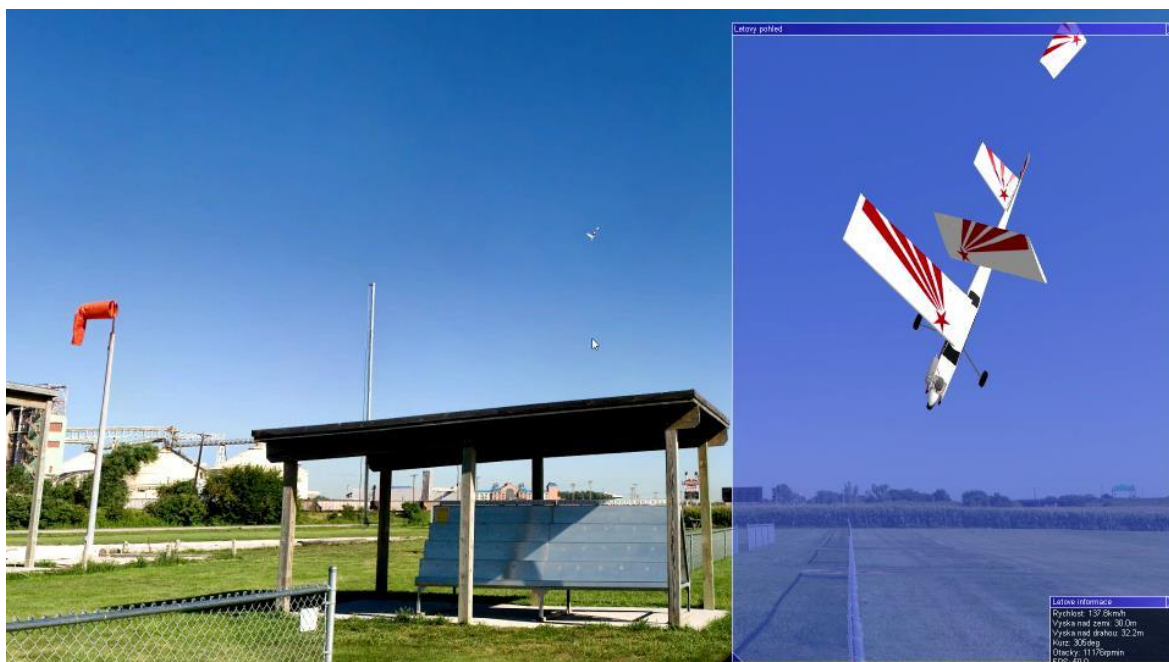
V RC technice modeláře a pilota nezajímají účinky přetížení na člověka, ale hlavně na materiál a na konstrukci modelu. Běžné rekreační modely mohou dosahovat přetížení i více než 10 G, v případě akrobatických modelů ještě mnohem více. Jak již bylo zmíněno v teoretické části, tak G je násobek zemské přitažlivosti. Akumulátor, který na zemi váží například 300 gramů, může v letadle v prudké zatáčce vážit i více než 3 kilogramy. Proto je nutné sledovat hodnoty přetížení i u modelů letadel a nastavit konstrukci a volbu stavebních materiálů těmto podmínkám.

### 5.1 Nebezpeční poškození vlivem vysokého G

Havárie způsobená vlivem nesprávné konstrukce modelu a příliš vysokého přetížení je obvykle fatální pro model a může ohrožovat i diváky okolo vzletové a přistávací plochy. V lepším případě k takové havárii dojde ve výšce, kdy jsou diváci a pilot nějak zareagovat a schovat se před padajícím vrakem. Je prakticky nemožné takové letadlo řídit, protože hlavní důsledek vysokého přetížení bývá ulomené křídlo. Podle konstrukce může upadnout buď celé křídlo v jednom kuse, pokud se jedná například o hornoplošník. Nebo může dojít k upadnutí jen jedné poloviny. To hrozí u středoplošníků a větších letadel, kde jsou křídla dělená a nasazena na centroplán. V případě ulomení obou křídel trup pokračuje rovně a je možné odhadnout místo dopadu. Síla takového nárazu je vyšší než u ztráty pouze jedné poloviny křídla. Letadlo s jednou polovinou křídla jde do vývrtky s nevyzpytatelnou dráhou pádu.

Křídla letadla nejsou nositeli hmotnosti. V modelu zastávají cca 20 % hmotnosti letadla. Po uražení ztrácí velkou část rychlosti a padají relativně pomalu k zemi. Nebezpeční zranění padajícím křídlem není tak kritické jako samotným trupem nebo vrakem s polovinou křídla. Hmotnost trupu je výrazně vyšší hlavně proto, že je zde umístěn motor, akumulátor a všechna další elektronika.

Nebezpečí padajícího letadla mimo jiné tkví v roztočené vrtuli, která je schopna při kontaktu s člověkem způsobit závažné zranění už při velmi malém výkonu motoru.



Obr. 16 Ulomené křídlo vlivem silného přetížení

## 5.2 Legislativa

Modelů letadel se týká hlavně Doplněk X k leteckému předpisu L2, který vydává je na stránkách Letecké informační služby. Registrace pilota letadla většího než 20 kg je však v kompetenci Úřadu pro civilní letectví. Nad těmito dokumenty stojí zákon č. 49/1997 Sb, o civilním letectví, Příloha II nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 216/2008. Tento Doplněk X vstoupil v platnost 1. 3. 2012 a definuje mimo jiné podmínky pro jednotlivé váhové kategorie modelu (viz Tab. 3). Z hlediska této práce je důležité, že i přes instalaci bezpečnostního systému, jak je možné senzor přetížení vnímat není pilot zbaven odpovědnosti za pilotovaný model. V případě, že by mohlo být ohroženo bezpečí letového provozu, osob a majetku je pilot povinen v co nejkratší době ukončit let [26].

Tab. 3 Váhové kategorie modelů

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
max. hmotnost	účel	požadavek	evidence letadla	evidence pilota	praktický a teoretický test pilota	povolení k létání	oprávnění k provádění LP	označení UA: ID štítek/ ID štítek + pozn. značka	min. ve vzdálenosti (m): vzlet, přistání/osoby, stavby/osídlený prostor	pojištění: běžný provoz/LVV (mil. Kč)	dozor	„failsafe“ systém
< 0,91 kg	rekreačně sportovní	ne	ne	ne	ne	nelze	ne/ne	bezpečná	ne/0,25	ne	ne	
	výdělečné, experimentální, výzkumné	ano	ano	ne	ano	ano	ano/ne	bezpečná	pozn. 1	ne	ne	
0,91 kg a < 7 kg	rekreačně sportovní	ne	ne	ne	ne	nelze	ano/ne	bezpečná	ne/1	ne	ano	
	výdělečné, experimentální, výzkumné	ano	ano	ne	ano	ano	ano/ano	bezpečná	pozn. 1	ne	ano	
7–20 kg	rekreačně sportovní	ne	ne	ne	ne	nelze	ano/ne	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	ne/3	ne	ano	
	výdělečné, experimentální, výzkumné	ano	ano	ne	ano	ano	ano/ano	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	pozn. 1	ne	ano	
> 20 kg	rekreačně sportovní	ano	ano	ano	ano	nelze	ano/ne	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	pozn. 1	ano	ano	
	výdělečné, experimentální, výzkumné	ano	ano	ano	ano	ano	ano/ano	bezpečná, ale minimálně 50/100/150		ano	ano	
bezpilotní letadlo provozované mimo dohled pilota		ano	ano	ano	ano	nelze	ano/ano	bezpečná, ale minimálně 50/100/150	pozn. 1	ne	ano	

pozn. 1: dle nařízení 785/2004

## 6 NÁVRH PROTOTYPU

Před realizací případné sériové výroby je třeba vytvořit prototyp. V raných fázích vývoje je vhodné, aby bylo spojení rozebíratelné a upravitelné. Pro to byla zvolena platforma Arduino s nepájivým kontaktním polem, na kterém je možné vyzkoušet všechny alternativy projektu.

### 6.1 Princip činnosti

Základem senzoru přetížení je mikropočítač. Ten má za úkol jednak řešit telemetrii a dále provádět ochranu před nadměrným přetížením a poškozením modelu. Data dostává po I<sup>2</sup>C z digitálního akcelerometru, které zpracovává na interpretovatelnou hodnotu „g“. Tato hodnota je posílání do přijímače, který ji pomocí telemetrie pošle do vysílače a zobrazovací jednotka ji interpretuje.

Stabilizace spočívá v nastavení hodnoty, kdy má zasáhnout omezovač. Při překročení stanované hodnoty přetížení dojde k automatickému omezení výchylky výškového kormidla. Z tohoto důvodu bylo nutné implementovat tři servokonektory. Jeden je pro telemetrii, druhý pro příjem signálu ze země a třetí pro ovládání serva výškového kormidla. Dokud omezovač nezasahuje, tak informace pouze propouští, ale při překročení mezních hodnot jsou data na příjmu ze země a na výstupu pro servo různá.

### 6.2 Volba komponent

Přípravnou fází realizace je volba vhodných komponent. Z datových listů a doporučeného zapojení jednotlivých komponent vyplynou následně nároky na kompletní zapojení, rezervaci portů, rozměry plošného spoje a další důležité konstrukční specifika. Vhodnou volbou komponent je možné celou realizaci zefektivnit a zlevnit.

#### 6.2.1 Procesor Atmel Atmega 328P

Osmibitový procesor od firmy Atmel. V prototypu je ve variantě pouzdra velikosti PDIP, které se v amatérských podmínkách podstatně snadněji osazuje do připravených patič. Další výhodou je snadná vyměnitelnost za jiný mikroprocesor. Je možné využít jak vnitřní

oscilátor, tak externí krystalový nebo jiný oscilátor. Díky tomu, je možné celý plošný spoj zjednodušit. Z názvu 328 se dá vyčíst, že procesor má 32 KB Flash paměti a jedná se o osmibitový procesor. V katalogovém listu jsou dále informace o 2KB RAM paměti a 1 KB EEPROM. Procesor má integrovanou hardwarovou podporu PWM, které se v modelářské praxi hodí. Fyzicky má procesor 23 programovatelných I/O pinů, na které mohou být senzory a komunikační sběrnice připojeny. Výrobce uvádí spotřebu 3,6 mA při taktu 4 MHz a napájení 3 V a teplotě 25 °C. Procesor je však možné provozovat při napětí od 1,8 V do 5,5 V a na frekvenci od 0 do 20 MHz [27].

Procesor umožňuje In-System Programming a je možné tedy updatovat vnitřní program i v pevně zapájeném SMD pouzdře. Tento procesor byl zvolen z důvodu dobré dostupnosti na trhu, malým rozměrům a vynikajícím parametřům co do paměti a počtu programovatelných pinů.

### 6.2.2 Akcelerometr MMA8452Q

Akcelerometr MMA8452Q je malý, nízkonapěťový kapacitní akcelerometr s rozlišením 12 bitů. Výrobce je americká společnost Freescale Semiconductor, odnož Motoroly. Má uživatelsky přepínatelnou stupnici  $\pm 2$  g/ $\pm 4$  g/ $\pm 8$  g. Pro účely modelu bude vhodné zvolit nejvyšší stupnici  $\pm 8$  g s tím, že v případě vyššího přetížení bude automaticky zasahovat stabilizační systém ochrany před poškozením a omezí výchylku výškového kormidla. Samotný akcelerometr je umístěn v 16pinovém QFN pouzdře a má velikost 3 mm x 3 mm x 1 mm. Pro účely prototypu je umístěn na obslužné desce včetně podpůrných obvodů. Komunikace je pomocí I<sup>2</sup>C sběrnice, která se v oblasti senzorů hojně využívá. Pro napájení postačí už 1,95 V. Obvykle je použito napájení 3,3 V, na kterém pracuje většina moderní mikroelektroniky. Energetická náročnost zařízení je zanedbatelných 6  $\mu$  A až 165  $\mu$  A.

Výrobce uvádí jako typické aplikace modulu v mobilních telefonech, laptotech, elektronických čtečkách nebo taky jako ochrana plotnových pevných disků během pádu a dopadu na zem [28].

Pro účely modelu byl zvolen z důvodu dostupnosti, nízké ceně a jednoduché implementaci do projektu. Komunikace po I<sup>2</sup>C je pro Arduino dobře zpracovaná.

### 6.2.3 RC Systém MZK

Firmu MZK založili v roce 1998 Martina a Zdeněk Kotrbovi. Zabývají se především návrhem a výrobou RC techniky. Systém TWIN 2,4 GHz může být součástí jejich vysílače nebo jako VF modul vsazen do téměř libovolného jiného vysílače. V případě této práce je modul TWIN TxF vsazen do vysílače HITEC Optic 6.

Už název značí, že systém pracuje v bez licenčním pásmu 2,4 GHz. Využívá systém RFHSS, což znamená, že využívá celé přidělené spektrum frekvencí daných mezinárodní dohodou, RDTO znamená, že jsou stejná data vysílána vícekrát na více kanálech, pro snížení možnosti příjmu poškozených dat. CSMA je systém, díky kterému je možné používat mnoho vysílačů společně. Vysílač napřed poslechne, zda na vysílané frekvenci někdo už nevysílá a až poté vyšle svoje data. Komunikace mezi modulem a vysílačem využívá PPM.

Systém TWIN podporuje funkci telemetrie na otevřeném protokolu OpenTWIN 1.2. Byl zvolen pro realizaci práce i proto, že výrobce zveřejnil celý přenosový protokol. Díky tomu je možné data zpracovávaná mikroprocesorem zobrazovat na MZK Terminálu. Specifikace protokolu nabízí přenosovou rychlost z přijímače zpět k vysílači 3200 bps (400 bitů za sekundu) [29].

### 6.2.4 LCD jednotka

Z důvodu ladění programu byla použita LCD jednotka. Pro práci na prototypu má smysl, protože je možné v reálném čase zobrazovat data, které mikropočítač zpracovává. V ostrém provozu už použita nebude. Jednotka je složena z běžného LCD displeje 1602 a modulu I<sup>2</sup>C. 1602 znamená 16 znaků ve dvou řádcích. Modul pracuje jako expandér I/O pinů mikroprocesoru. Použitím I<sup>2</sup>C převodníku se ušetří piny na samotném mikroprocesoru a navíc není v prototypu použito tolik vodičů. Na některé aplikace je možné použít ještě displej velikosti 2004, ale ten zde nemá smysl.

### 6.2.5 RC regulátor otáček DSYS

Stejnoseměrný regulátor otáček od brněnské firmy DSYS, Zdeněk David. Vyrábí se v několika provedeních v závislosti na proudu, na který je dimenzován výkonový tranzistor v regulátoru, případně s ohledem na odolnost proti stříkající vodě. Regulátor od firmy DSYS

byl zvolen pro svoji výbornou pověst mezi modeláři a možnost napájení Ni-xx i Li-xx články. Pro potřeby demonstrace výsledků byl zvolen právě tento regulátor. Varianta stejnosměrného provedení je vhodná pro lepší dostupnost motorů a jejich implementace do stojanu. Výhodou, ale ne nezbytnou funkcí, je hlídání napětí napájecích zdrojů a jejich ochrana proti úplnému vybití. Tato ochrana spočívá v první fázi v akustické signalizaci, snížení výkonu a následném odpojení motoru. Funkce BEC umožňuje napájet regulátor, přijímač a další zařízení stabilizovaným napětím 5 V a proudem 3 A. BEC bude využit pro napájení komponent celého systému [30].

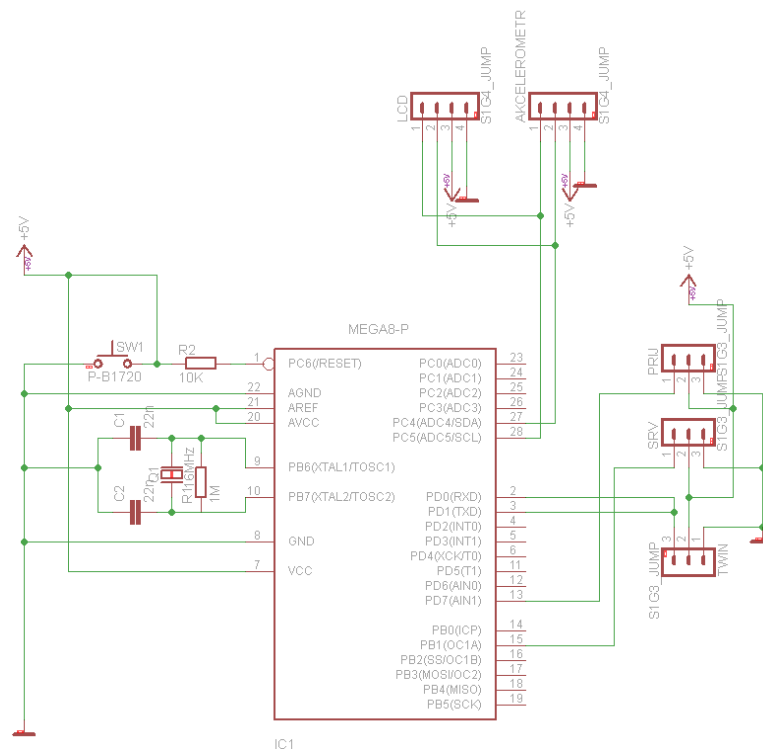
## 7 PRAKTICKÁ KONSTRUKCE

Konstrukci je potřeba rozdělit na dvě části. V první fázi je třeba připravit hardwarovou část. Součástí hardwaru jsou všechny hmatatelné díly projektu. Hlavní částí je mikroprocesorová jednotka – Arduino, akcelerometr, zobrazovací jednotka LCD, baterie, vysílač a přijímač RC, regulátor otáček, motor a demonstrační stojan.

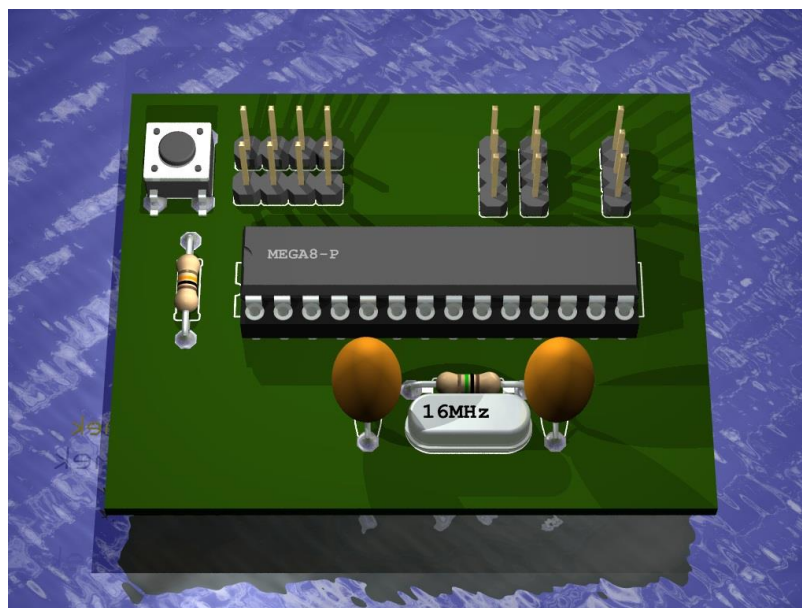
Softwarové součásti jsou nehmatatelného charakteru a tvoří je program v mikroprocesoru. Do softwarové výbavy přijímače, regulátoru otáček a zobrazovací jednotky RC přijímače nebylo zasahováno a jsou v továrním nastavení.

### 7.1 Hardwarové zapojení

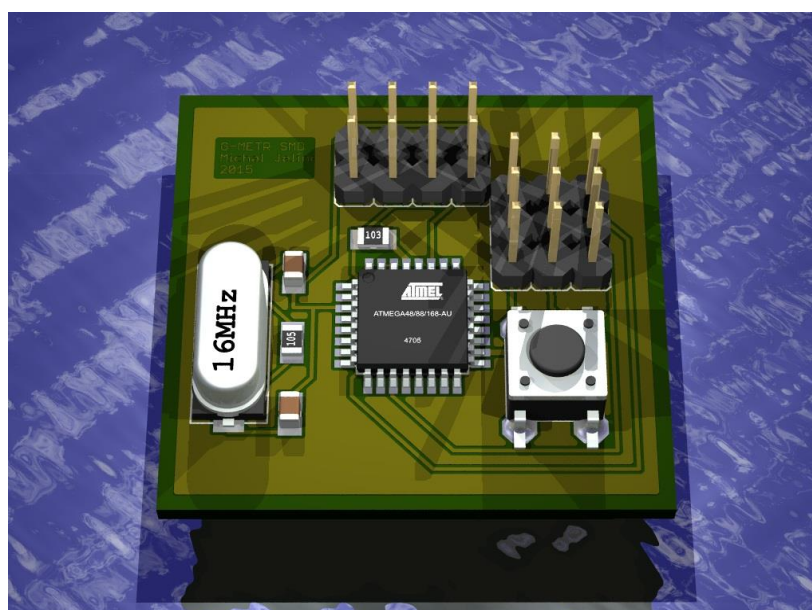
Hlavním komponentem je vývojový kit Arduino, italský projekt, který má za cíl přiblížit programování mikropočítačů širší veřejnosti. Je osazen mikroprocesorem Atmel Atmega v různých provedeních. Základní model Arduino UNO, který je použit pro realizaci projektu, je osazen mikroprocesorem Atmel Atmega 328P s 32KB pamětí. V případě jednoduchosti programu by tento mikroprocesor mohl být nahrazen i procesorem s menší pamětí. Pravděpodobně by mohlo stačit i 16 KB paměti pro ovládací program.



Obr. 17 Schéma zapojení



*Obr. 18 Model plošného spoje PDIP velikosti*



*Obr. 19 Model plošného spoje v SMD velikosti*

## 7.2 Výroba plošného spoje

Plošný spoj umožňuje zmenšit celý modul a snížit náklady na výrobu. V amatérských podmínkách existuje několik variant výroby plošného spoje. Nejzákladnější variantou je ruční kreslení speciálním fixem. Tato metoda je z důvodu použití mikropočítače naprosto

nevhodná. Další metoda vyžaduje laserovou tiskárnu. Motiv plošného spoje se vytiskne s nastavením maximálního množství toneru a na odmaštěný povrch cuprexitu se zažehlí. Po vychladnutí se papír odmočí a na cuprexitu zůstane pouze potisk. Tuto techniku lze použít pro tvorbu poměrně přesných plošných spojů. Omezení je hlavně ve velikosti plošného spoje. Obvykle je v amatérských podmínkách dostupná tiskárna do formátu A4, tedy 297 mm x 210 mm.

Nejmodernější metodou a také nejpresnější je výroba plošného spoje fotocestou. Cuprexit je nastříkán speciálním fotocitlivým lakem. Příprava motivu je podobná jako u metody přenosu toneru. Motiv se tiskne obvykle na průhlednou fólii, ale metoda funguje i s běžným kancelářským papírem nebo pauzovacím papírem. Doporučuje se motiv nechat nějakou dobu ve výparech acetonu nebo ředidla C6000. V místech, kde byl nanesen toner, se začne rozpíjet barva a odstraní se tím možné „šumy“ v potisku. Expozice na ultrafialovém záření je závislá od použitého média (papír, fólie) a výkonu zářiče. U speciálních osvitových jednotek se čas pohybuje v řádech desítek sekund. Při použití LED osvitové jednotky a běžného papíru se čas prodlužuje až na desítky minut. Deska plošného spoje pro senzor přetížení byla exponována cca 5 minut na pauzovacím papíře a s použitím speciálního prosvětlovacího spreje. Osvitová jednotka byla složena z matice 100 UV LED diod.

Po osvitu desky se provádí vyvolání v cca 1% roztoku NaOH (hydroxidu sodného). Některé literární zdroje uvádí koncentraci roztoku až 1,5 %. Pokud je ovšem koncentrace moc vysoká, dojde k odstranění exponovaného motivu a deska se nezdaří. Příliš slabý roztok zase neodstraní žádný lak a spoj je také prakticky nepoužitelný.

Třetí variantou, která se dostává i mezi malosériové produkce je CNC příprava motivu. Příprava probíhá nalakováním cuprexitu ochranným lakem. Postačila by jistě i fixa na plošné spoje. Na počítači se připraví motiv a spustí se tisk. CNC frézka se osadí gravírovacím hrotem odpovídající tloušťky. Tlak na cuprexitovou destičku je třeba naprosto minimální a postačuje prakticky pouze vlastní váha hrotu podpořená slabou pružinou. Princip je odstranit lak v místech, kde dojde k leptání.

Připravený motiv se leptá v chemické lázni. Může se jednat o  $\text{FeCl}_3$  (chlorid železitý) nebo o roztok kyseliny chlorovodíkové a peroxidu vodíku. Podle použité lázně se doba leptání pohybuje od pár desítek sekund do několika desítek minut. Deska plošného spoje pro senzor přetížení byla leptána v pohybující se lázni  $\text{FeCl}_3$  asi 5 minut.

Plošné spoje je potřeba chránit před nežádoucími povětrnostními vlivy pasivací. Nejzákladnější metodou je nalakování desky speciálním lakem na hotové plošné spoje. Tyto laky jsou nejčastěji čiré nebo mají zelenou barvu. Další variantou je chemické nahrazení povrchu mědi jiným kovem. Pro pasivaci desky senzoru přetížení byla zvolena metoda pasivace v roztoku thiosíranu stříbrného ( $\text{Ag}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ).

Následuje vrtání desky. Pro běžné diskrétní součástky je použitý vrták o průměru 0,8 mm upevněného na mikrovrtáče. Pro větší součástky, jako jsou stabilizátory napětí nebo svorkovnice a konektory, se používá vrták průměru 1,2 mm.

K osazení desky je nutné použít odpovídající technické vybavení, ideálně tedy pájecí stanici s termostatem kvůli přepalování pájky. Před osazením každé součástky byla použita pájecí kapalina. Jedná se o roztok chloridu zinečnatého s lihem. Chlorid zinečnatý může být nahrazen i jiným materiálem, například kalafunou. Pájecí kapalina upraví vzlínavost cínu a spoje jsou kvalitní. Integrované obvody jsou náchylné k poškození statickou elektřinou, proto jsou osazené v patičkách až po dokončení osazování. Díky použití patice je možné integrovaný obvod snadno nahradit jiným [24].

### 7.3 Softwarové řešení

Program byl vytvořen ve vývojovém programu Arduino. Vzhledem k použití 32KB procesoru není tato volba co do paměťových nároků omezující. Arduino se programuje upraveným jazykem C. Úprava jazyka je především ve zjednodušení definice přístupu k perifériím a jednotlivým pinům mikroprocesoru. Jazyk, který dozná takové úpravy, je možné považovat za vyšší formu jazyka. Bohužel každá vyšší forma jazyka nese kromě komfortu programování i negativní vlastnost ve formě náročnosti na paměť mikroprocesoru.

#### 7.3.1 Princip programu

Program vychází z příkladu prodejce akcelerometru. Jako první bylo řešeno čtení dat z akcelometru. Jelikož se jedná o tříosý akcelerometr, tak výrobce předpokládá práci se všemi těmito osami. Pro účely senzoru přetížení byla zvolena osa Y, tudíž program ostatní dvě osy zanedbává. Data z akcelerometru nejsou okamžitě interpretovatelná a musí se přepočítat do podoby, které uživatel bude rozumět.

S už upravenou hodnotou pracuje jak stabilizační – omezující – část, tak telemetrická část programu. Stabilizace je řešena jako omezení výchylky směrového kormidla. Proto jsou hardwarově integrované dva konektory. Program má uvedenou mezní hodnotu přetížení, kterou nesmí překročit. V každé otočce programu kontroluje změřenou hodnotu přetížení s nastavenou hodnotou. Pokud je nastavená hodnota vyšší než naměřená, tak prochází signál z vysílače pro směrové kormidlo nepozměněn. Signál z vysílače je interpretován jako PWM s periodou od 900 ms do cca 1500 ms. V případě překročení mezní hodnoty přetížení dojde ke zkrácení periody podle matematického vzorce.

Telemetrické části byla uzpůsobena specifikace sběrnice UART na 19200 baud, 8 datových bitů, sudá parita a 2 stop bity. Specifikace protokolu OpenTWIN dodaná firmou MZK bohužel dostatečně nevysvětluje, jak by měla komunikace probíhat. V principu by se mělo jednat o to, že při zapnutí přijímače a senzoru se senzor představí, že je online. Poté bude pravidelně posílat hodnotu přetížení přijímači, který ji pošle do terminálu na zemi. V této části by měla být specifikována interpretace dat na terminálu. Komunikace by měla probíhat obousměrně.

### 7.3.2 Ovládání periferií

Jsou implementovány hlavičkové soubory *Wire.h* pro ovládání I<sup>2</sup>C sběrnice, *LiquidCrystal\_I2C.h* pro LCD displej a *Servo.h* pro řízení PWM. Na I<sup>2</sup>C je připojen akcelerometr. Většina dnes prodávaných komponent tuto sběrnici používá. Díky volbě této sběrnice i pro LCD displej je možné použít stejně piny mikropočítače pro obě periferie. *Servo.h* umožňuje číst signál z přijímače a převést ho na číselnou hodnotu, se kterou může program pracovat. Po vyhodnocení je zase hodnota převedena na PWM signál a poslána na servo ovládání výškového kormidla.

### 7.3.3 Vlastnosti programu

Program začíná vložením hlavičkových souborů, definicí proměnných a přístupů k registru akcelerometru. Z uživatelských proměnných jsou to proměnné pro práci se servo impulsy a definice mezní hodnoty přetížení, při které zasahuje omezovač.

Ve funkci *Setup* probíhá inicializace sériové linky pro telemetrický přenos a informování programátora při ladění programu. Inicializace odpovídá podmínkám specifikace

OpenTwin. Dále probíhá inicializace akcelerometru a LCD displeje. Pro připojení serva byl zvolen pin 9 Arduina.

*Loop* je smyčka, do které program po provedení funkce *Setup* přeskočí a v té funguje až do vypnutí systému. Na začátku smyčky je získávání údajů z akcelerometru a převod na hodnoty, které jsou pro uživatele čitelné.

Zbytek smyčky *Loop* se zabývá stabilizační omezující funkcí při přílišném přetížení. Dojde k změření impulsů z přijímače a jejich vyhodnocení. Vždy je nutné před startem provést kalibraci maximální a minimální výchylky. Jelikož délka impulsu stále kolísá, bylo nutné vyřešit nastavení hystereze, která je v případě programu  $\pm 3^\circ$ . Při této hodnotě bylo testovací servo naprosto v klidu a přesto byla zachována dostatečná přesnost a rychlá odezva na pokyn od uživatele. Knihovna *Servo.h* standardně nepracuje s délkou impulsů, ale s úhlem výchylky serva. Proto je nutné délku impulsů přemapovat na hodnoty 0–180.

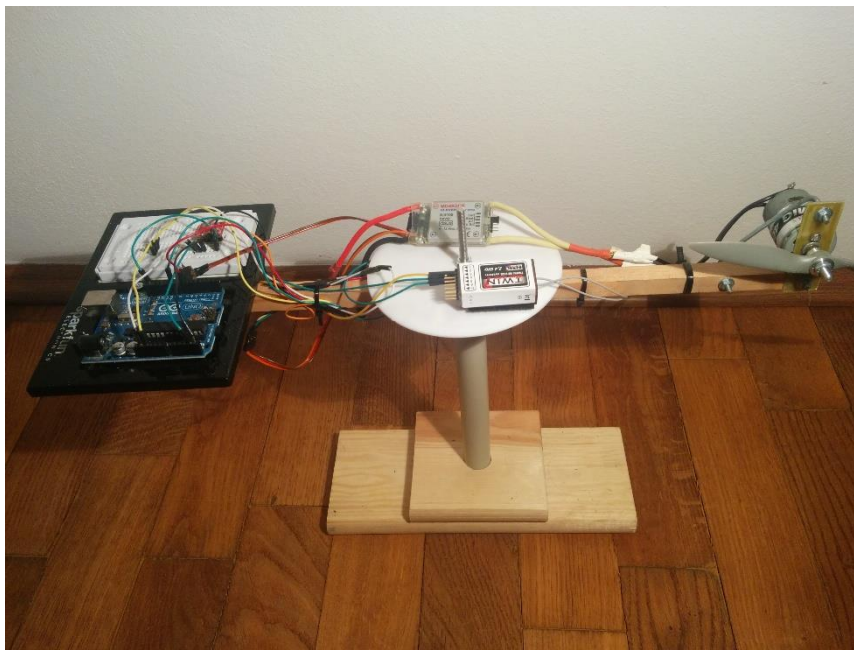
Na závěr smyčky je omezovač výchylky při překročení přetížení. Maximální výchylka se nastavuje v hlavičce programu, i když pro komerční provoz by bylo vhodnější umožnit toto nastavení samotnému uživateli. Algoritmus pro omezování výchylky počítá s dynamickou změnou rychlosti změny výchylky. V případě velkého přetížení je zásah poměrně rychlý a může každou otočku smyčky snížit výchylku serva až o  $7^\circ$ . Pokud je nastavena maximální povolená hodnota přetížení blízká technickým možnostem akcelerometru, tak je zásah méně znatelný.

Následují funkce, které si ze smyčky *Loop* volá akcelerometr. Jsou to funkce inicializace akcelerometru, přepínání registrů pro čtení a zápis dat.

## 7.4 Demonstrační stojan

Pro ověření funkčnosti systému byl vytvořen demonstrační stojan. K vyvolání přetížení je vhodné zvolit kruhový pohyb. Inspirací byl dětský kolotoč. Na jedné straně je umístěn senzor přetížení v podobě celého modulu Arduino. Protiváhou je stejnosměrný motor s vrtulí. Stojan se skládá z dřevěné základny, do které byl vyvrtán otvor 20 mm pro usazení trubky. Trubka byla osazena kuličkovými ložisky, aby byl minimalizován třecí odpor a ramena stojanu se mohla lehce otáčet. Jako hřídel byla zvolena závitová tyč o průměru 5 mm. Tyč je pevně ukotvena v trubce maticí a zajišťovací maticí. Celkově jsou ložiska k sobě stahována maticemi na obou stranách trubky. V horní části je přišroubován hranol. Ramena

tohoto hranolu je nutné co nejlépe vyvážit, protože může být dosahováno relativně vysokých otáček a mohlo by dojít k zhroucení celého stojanu. Nad otočnými rameny stojanu je umístěn plastový kruh na umístění elektroniky, kterou není nutné vystavovat kruhovému pohybu.



*Obr. 20 Demonstrační stojan*

## ZÁVĚR

Cílem práce bylo navrhnout a vytvořit prototyp zařízení pro přenos telemetrie. Z dostupné literatury byly vybrány informace související s tématem. V teoretické části je rozbor senzorů vhodných pro dodávání informací užitečných pro uživatele. K těmto senzorům jsou zpracovány možnosti komunikace s řídicím prvkem, nejčastěji mikropočítačem. Z kapitoly o akcelerometrech vyplynulo, že pro použití v letadlech se více hodí piezorezistivní akcelerometr, protože je schopný lépe zpracovávat statické přetížení. Zvolený piezokapacitní akcelerometr měří nárůst přetížení během zahájení manévru vyvolávajícím přetížení a při delším souvislém manévru by nemusel podávat spolehlivé informace. Určitě by stálo za to vyzkoušet měření přetížení tenzometrem nalepeným například na křídla letadla. Volba vývojového kitu Arduino byla dobrá. Tato platforma je schopna splnit všechny podmínky dané specifikací OpenTWIN.

Sériově dodávaný procesor Atmega 328P není plně využitý. Uživatelský kód má přibližně 8 KB a bootloader Arduina dalších 0,5 KB. Zbývá proto mnoho prostoru pro případné rozšíření. Použitý akcelerometr dává možnost posílat pilotovi RC modelu například informaci o poloze letadla, zda letí přirozeně podvozkem k zemi, nebo zda je letadlo nějak vytočené.

Pro systém byl vytvořen demonstrační stojan. Jsem si vědom, že stojan nemůže nahradit reálné podmínky ve vzduchu, ale je schopen pozměnit hodnoty přetížení. Pro demonstraci stabilizační funkce by stačilo změna přetížení jen o pár desetin g. Bylo by nutné nastavit mezní hodnotu na hodně blízkou přirozeného gravitačního zrychlení země.

Co se týče telemetrie, tak musím konstatovat, že ze zveřejněné specifikace OpenTWIN 1.2 firmou MZK není možné telemetrii implementovat. V programu je provedená příprava inicializace sběrnice, která je jasná. V práci je popsán princip, jak by měla celá telemetrie fungovat. Dostupná literatura zná pouze zlínskou firmu MGM, která dokázala vytvořit senzor pro MZK Twin, ale o pozadí tohoto vývoje není nic známo. Je pravděpodobné, že obě firmy spolu sdíleli své know-how. Firma MZK si OpenTWIN nechala vypracovat externě. Přesnou funkčnost systému zná pouze jediný člověk a ten ještě není interní pracovník MZK. Je škoda, že firma MZK zahodila příležitost, která se jí naskytla v době uvedení systému na trh v roce 2010. V té době byla jedna z prvních, která přišla s myšlenkou umožnit široké veřejnosti vytvořit vlastní senzory. Bohužel za těchto pět let byl vytvořen pouze jeden funkční senzor implementovaný v regulátorech MGM.

## ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

The aim of this theses were design and construction a prototype for the transmission of telemetry. From the available literature information related to the topic were selected. The theoretical part contains the description of sensors suitable for providing user with useful information. These information is supplied by ways of communication with the control element, typically a microcomputer. The chapter devoted to accelerometers showed that the piezo-resistive accelerometer is more suitable for use in aircraft because of its better ability of processing static overload. Selected piezo-capacitive accelerometer measures the increase in overload during an opening maneuver causing overload; with longer continuous maneuver it would not be able to submit reliable information. Definitely, it would be worthy trying measuring of overload performed by tenzometer taped to the wing of an aircraft. The selection of Arduino development kit was a good choice. This platform is able to meet all the requirements given by OpenTWIN specifications.

Standardly provided processor ATmega 328P is not fully utilized. User code has approximately 8 KB and Arduino bootloader 0.5 KB. Therefore there remains much space for eventual expansion. The accelerometer that is used allows providing the pilot of RC model with information e.g. about the aircraft's position, whether it naturally flies with landing gear orientated to land or whether the aircraft is somehow rotated.

For the system the demonstration stand was constructed. I am aware of the fact, that the stand cannot substitute the real conditions in the air, but it is able to change the values of the overload. To demonstrate the stabilizing function the overload change about only a few tenths of "g" would be enough. It would be necessary to set a threshold to value very close to the real gravitational acceleration of the earth.

Regarding telemetry, so I have to state that published specifications of OpenTWIN 1.2 by MZK Company did not allow telemetry implementation. The bus initialization was performed according to OpenTWIN specification. In the thesis, principles of telemetry functioning is described. Available literature sources give information on MGM Company in Zlín, which could construct a sensor for MZK Twin, but a background of this development is not published. Probably, both the companies share their know-how between themselves. MZK Company had OpenTWIN developed externally. Only one person knows the exact functionality of the system and unfortunately, he is not an internal MZK employee. Regrettably, the MZK Company threw away the opportunity that arose at the time when the system

was launched, in 2010. At that time, the MZK Company was one of the first companies who came up with the idea to allow general public to construct their own sensors. Unfortunately, for those five years only one functional sensor implemented in the controllers of MGM Company was constructed.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] *RC Soupravy* [online]. 2006 [cit. 2014-12-05]. Dostupné z: <http://www.pelikandaniel.com/?sec=page&id=15>
- [2] STUDNIČKA, RNDR., CSC., Jaroslav. *Elektronika* [online]. Praha, 1998 [cit. 2014-12-05]. Dostupné z: [http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/elektronika/kap5/5\\_1.html](http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/elektronika/kap5/5_1.html)
- [3] MACHÁČEK, Zdeněk a Pavel NEVŘIVA. *Modulované signály* [online]. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012, 1 CD-ROM [cit. 2014-12-05]. ISBN 978-80-248-2600-4. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FEI/MS/Modulovane%20signaly.pdf>
- [4] *Futaba RC* [online]. 2010 [cit. 2014-12-06]. Dostupné z: <http://www.futabarc.com/technology/fhss.html>
- [5] *Direct-sequence spread spectrum* [online]. 2014 [cit. 2014-12-06]. Dostupné z: [https://www.princeton.edu/~achaney/tmve/wiki100k/docs/Direct-sequence\\_spread\\_spectrum.html](https://www.princeton.edu/~achaney/tmve/wiki100k/docs/Direct-sequence_spread_spectrum.html)
- [6] *DSSS* [online]. 2005 [cit. 2014-12-06]. Dostupné z: <http://www.telecomabc.com/d/dsss.html>
- [7] *Letecký lékař* [online]. 2015 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://www.leteckylekar.cz/kapitoly-z-letecke-mediciny/49-pretizeni-overload-gravity.html>
- [8] Akcelerometry. *ČVUT: FELD* [online]. 2013 [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: <http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34SES/prednasky/08%20Akcelerometry.pdf>
- [9] *Principy akcelerometrů* [online]. 2007 [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/search/hw/Principy%20akcelerometr%C5%AF>
- [10] HÁJEK, Tomáš. *SNÍMAČE NÁKLONU*. Brno, 2007. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=8655](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=8655). Bakalářská práce. VUT Brno.
- [11] HOŠEK, ING., Petr. *Měření malých deformací pomocí odporových tenzometrů* [online]. LIBEREC, 2010 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=11&ved=0CGoQFjAK&url=http%3A%2F%2Fwww.fm.tul.cz%2Fesf0247%2Findex.php%3Fdownload%3D724&ei=hIRDVY-faBML3Uu2agYAK&usg=AFQjCNH8JBhQeAIQIEea9TXP-dYbU5mbPnA&sig2=laqP3F-CmNwJ5w6pDFTR->

w&bvm=bv.92291466,d.d24&cad=rja. Výukový materiál. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI.

- [12] Jak se navrhuje digitální teploměr. *Www.hw.cz* [online]. 2010 [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/jak-se-navrhuje-digitalni-teplomer.html>
- [13] I2C Guide. *Texas Instruments* [online]. 2011 [cit. 2013-04-09]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/sg/sszc003c/sszc003c.pdf>
- [14] NXP I2 C-bus solutions. *NXP* [online]. 2011 [cit. 2013-04-09]. Dostupné z: <http://www.nxp.com/documents/leaflet/75017144.pdf>
- [15] Řízení serva. *HW.cz* [online]. 2009 [cit. 2013-04-09]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/novinky/rizeni-serva.html>
- [16] PWM. *www.dhservis.cz* [online]. 2013 [cit. 2013-04-19]. Dostupné z: <http://www.dhservis.cz/psm.htm>
- [17] USB - Universal Serial Bus. URBIŠ, Hynek. *FIT VUT Brno: www.usb.org* [online]. 2002 [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: <http://www.fit.vutbr.cz/study/courses/PZ2/public/TEXTY/USB.pdf>
- [18] USB-C. *Cnet.com* [online]. 2015 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.cnet.com/pictures/usb-type-c/>
- [19] Paměti SPI. *Www.hw.cz* [online]. 2005 [cit. 2013-04-23]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/soucastky/pameti-spi-fram-od-firmy-ramtron.html>
- [20] VÁŇA, Vladimír. *Mikrokontroléry ATMEL AVR: programování v jazyce C : popis a práce ve vývojovém prostředí CodeVisionAVR C*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2003, 215 s. ISBN 80-730-0102-0.
- [21] Fast Infrared. RICHTR, Tomáš. *Mobilní komunikace* [online]. 2002 [cit. 2013-04-27]. Dostupné z: <http://tomas.richtr.cz/mobil/bezdrat.htm>
- [22] *Thomas Fischl Homepage* [online]. 2015. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://www.fischl.de/usbasp/>
- [23] AVRISP User Guide. <Http://www.digikits.com/> [online]. 2007 [cit. 2013-04-28]. Dostupné z: [http://www.digikits.com/avrisp\\_cd/avrisp\\_user\\_guide.htm](http://www.digikits.com/avrisp_cd/avrisp_user_guide.htm)
- [24] JELÍNEK, Michal. *Směrový stabilizační systém*. Zlín, 2013. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce: Ing. Jan Dolinay, PhD.
- [25] ARDUINO. Arduino Home Page [online]. 2015 [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://www.arduino.cc>

- [26] *Letecká informační služba* [online]. 2012 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>
- [27] *DATASHEET ATMEGA328P* [online]. 2013 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: [http://www.atmel.com/Images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P\\_datasheet.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet.pdf)
- [28] *Datasheet MMA8452Q* [online]. 2013 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Accelerometers/MMA8452Q-rev8.1.pdf>
- [29] *Systém TWIN* [online]. 2005 [cit. 2014-12-06]. Dostupné z: [http://www.mzkservis.cz/files/files/twin\\_tx.pdf](http://www.mzkservis.cz/files/files/twin_tx.pdf)
- [30] *DSYS* [online]. 2015 [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: [www.dsys.cz](http://www.dsys.cz)

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

AM	Amplitudová modulace
FM	Frekvenční modulace
PCM	Pulsní kódová modulace
FHSS	Frequency hopping spread spectrum, česky přenos signálu s frekvenčním přeskokem
DSSS	Direct sequence spread spectrum, česky přímé rozprostřené spektrum
RDTO	Redundant Data Transmission Overlay
CSMA	Carrier Sense Multiple Access – detekce nosné
RC	Radio control – rádiové ovládání
FeCl <sub>3</sub>	Chlorid železitý
Ni-xx	Akumulátory založené na niklu
Li-xx	Akumulátory založené na lithiu

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obr. 1 Amplitudová modulace [2]</i> .....	12
<i>Obr. 2 Frekvenční modulace [3]</i> .....	13
<i>Obr. 3 DSSS [6]</i> .....	14
<i>Obr. 4 Směry přetížení</i> .....	15
<i>Obr. 5 Piezoodporový akcelerometr [9]</i> .....	17
<i>Obr. 6 PWM [16]</i> .....	23
<i>Obr. 7 USB-C konektor [18]</i> .....	26
<i>Obr. 8 Více zařízení na SPI [19]</i> .....	27
<i>Obr. 9 Řízení SPI [20]</i> .....	27
<i>Obr. 10 PPM – pulsně polohová modulace [8]</i> .....	28
<i>Obr. 11 Fast Infra Red [21]</i> .....	29
<i>Obr. 12 USB programátor [22]</i> .....	30
<i>Obr. 13 AVR ISP konektor [23]</i> .....	31
<i>Obr. 14 Arduino Uno [25]</i> .....	33
<i>Obr. 15 Arduino Uno schéma zapojení [25]</i> .....	34
<i>Obr. 16 Ulomené křídlo vlivem silného přetížení</i> .....	37
<i>Obr. 17 Schéma zapojení</i> .....	43
<i>Obr. 18 Model plošného spoje PDIP velikosti</i> .....	44
<i>Obr. 19 Model plošného spoje v SMD velikosti</i> .....	44
<i>Obr. 20 Demonstrační stojan</i> .....	49

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1 Rychlostní módy I<sup>2</sup>C .....</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 2 Rychlosti USB .....</i>	<i>24</i>
<i>Tab. 3 Váhové kategorie modelů .....</i>	<i>38</i>

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I. Zdrojový kód programu

**PŘÍLOHA P I: ZDROJOVÝ KÓD PROGRAMU**

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h> //hlavičkový soubor LCD
#include <Wire.h> // Hlavičkový soubor I2C sběrnice
#define MMA8452_ADDRESS 0x1D // nastavení adresy pro akcelerometr
LiquidCrystal_I2C lcd(0x20,16,2); //adresa a typ LCD
#include <Servo.h> //knihovna pro ovládání serva

#define OUT_X_MSB 0x01 //nastavení přístupu k registrům
#define XYZ_DATA_CFG 0x0E
#define WHO_AM_I 0x0D
#define CTRL_REG1 0x2A
#define GSCALE 8 // Nastavení celkové stupnice

Servo ovladac; //objekt ovladač

int ovladacPin = 9;

int vstup = 7; //pin pro vstup z přijímače
unsigned long delka; //proměnná délky impulsu
int minimum =1500; //minimální délka impulsu (pojištění, hodnota bude určitě nižší)
int maximum = 0; //maximální délka impuslu
int impuls; //převedení délka impulsu
int prumer = 90; //nastavení neutrálu
float pretizeni; //pomocná proměnná pro přetížení
int mez=2; //mezní hodnota přetížení
```

```
void setup()
{
  Serial.begin(19200,SERIAL_8E2); //zapnutí sériové sběrnice shodné s OpenTWIN speci-
  fikací
  Serial.println("Akcelerometr připraven");
  Wire.begin(); //Inicializace I2C sběrnice
  initMMA8452(); //Inicializace akcelerometru
  ovladac.attach(9); // připojení serva na pin 9
  //lcd.init();// inicializuje displej

  /*pro potřeby ladění
  lcd.backlight(); // zapne podsvětlení
  lcd.setCursor(0,0); //nastavení kurzoru na první pozici, první řádek
  delay(20); // čekání 20ms na provedení všech úkonů
  lcd.print("Pretizeni Gz: ");
  */
}

void loop()
{
  int accelCount[3]; // pole pro uložení hodnot z akcelerometru
  readAccelData(accelCount); // čtení všech tří os
```

```
float accelG[3]; // přepočet na hodnoty g pro všechny osy
for (int i = 0 ; i < 3 ; i++)
{
    accelG[i] = (float) accelCount[i] / ((1<<12)/(2*GSCALE)); // aktuální hodna g pro každou
jednotlivou osu
}

// Při odkomentování budou zobrazovány všechny hodnoty g pro všechny osy
//for (int i = 0 ; i < 3 ; i++)
pretizeni=(accelG[2]);

/* část pro ladění programu - zobrazuje přetížení na sériové lince a LCD displeji
{
    Serial.print(accelG[2], 2); // odeslání hodnoty g pro osu z. Při nahrazení [2] hodnotou [i] a
odkomentování budou zobrazeny všechny hodnoty g
    Serial.print("\t"); // Tabulátor pro výpis všech hodnot. Při použití pouze hodnoty osy "z"
nevadí pokud je aktivní.
    lcd.setCursor(0,1); //nastavení kurzoru na první pozici v druhém řádku
    lcd.print(pretizeni);
    lcd.print(" g");
}
Serial.println();
//delay(10);// zpoždění, tak aby bylo možné data číst
*/
delka = pulseIn(vstup, HIGH); //měření délky impulsu
if (delka < minimum) //nastavení mnimální šířky impulsu
{
```

```
minimum = delka;
}

if (delka > maximum) //nastavení maximální šířky impulsu
{
maximum = delka;
}

impuls = map(delka, minimum, maximum, 0, 180); //přemapování délky impulsu na hodnoty 0 až 180

//uklidnění serva
if (prumer+3 <= impuls )
{
prumer = impuls;
}

if (impuls < prumer-3)
{
prumer = impuls;
}

if (pretizeni > mez) //stabilizační algoritmus
{
prumer = prumer - (pretizeni-mez); //algoritmus, který každou otočku cyklu zmenší výchylku a sníží hodnotu přetížení

delay(50); //zpoždění před dalším přepočtem zásahu omezovače - při rychlosti 72km/h letadlo uletí cca 1 metr
}
```

```
    ovladac.write(prumer); //zápis polohy ovladače (0-180 stupňů)
}

void readAccelData(int *destination)
{
    byte rawData[6]; // x/y/z surová data z akcelerometru

    readRegisters(OUT_X_MSB, 6, rawData); // čtení 6 surových dat z akcelerometru a uložení
    v poli

    //Smyčka pro přepoččet dat z 12bit ADC převodníku pro všechny osy.
    for(int i = 0; i < 3 ; i++)
    {
        int gCount = (rawData[i*2] << 8) | rawData[(i*2)+1]; // Sloučení dvou 8 bitových registrů
        do jednoho 12 bitového čísla

        gCount >>= 4;

        if (rawData[i*2] > 0x7F)
        {
            gCount = ~gCount + 1;

            gCount *= -1;
        }

        destination[i] = gCount; //Zápis hodnot gCount do pole.
    }
}

// Inicializace registrů akcelerometru - údaje z datového listu Freescale

void initMMA8452()
```

```
{  
byte c = readRegister(WHO_AM_I); // Čtení WHO_AM_I registru  
if (c == 0x2A) // WHO_AM_I by se mělo nacházet na 0x2A  
{  
Serial.println("Akcelerometr je připraven..");  
}  
else  
{  
Serial.print("Akcelerometr se nepovedlo pripojit: 0x");  
Serial.println(c, HEX);  
while(1) ; // smyčka pro opakované připojení akcelerometru  
}  
MMA8452Standby(); // Musí být v pohotovostním režimu pro změnu registrů  
// Nastavení kompletní stupnice do 8g  
byte fsr = GSCALE;  
if(fsr > 8) fsr = 8; //Ověření  
fsr >>= 2;  
writeRegister(XYZ_DATA_CFG, fsr);  
//Nastavení obnovovací frekvence akcelerometru. Standardně 800Hz.  
MMA8452Active(); // Aktivace čtení  
}  
  
// Musí být v pohotovostním režimu pro změnu registrů  
void MMA8452Standby()  
{
```

```
byte c = readRegister(CTRL_REG1);  
writeRegister(CTRL_REG1, c & ~(0x01)); //Mazání aktivního bitu při přechodu do režimu  
pohotovosti  
}
```

// Nastavení do aktivního stavu. Nutné pro zápis výstupních dat.

```
void MMA8452Active()  
{  
    byte c = readRegister(CTRL_REG1);  
    writeRegister(CTRL_REG1, c | 0x01); //Nastavení aktivního bitu pro začátek příjmu.  
}
```

// Čtení bytesToRead postupně, start zápisu addressToRead do pole

```
void readRegisters(byte addressToRead, int bytesToRead, byte * dest)  
{  
    Wire.beginTransmission(MMA8452_ADDRESS);  
    Wire.write(addressToRead);  
    Wire.endTransmission(false); //Konec přenosu, udržování spojení  
    Wire.requestFrom(MMA8452_ADDRESS, bytesToRead); //Dotaz na další data  
    while(Wire.available() < bytesToRead); //Potvrzení dat, které byla očekávána  
    for(int x = 0 ; x < bytesToRead ; x++)  
        dest[x] = Wire.read();  
}
```

```
// Čtení jednotlivých bitů z addressToRead a vrácení zpátky jako bitu.
```

```
byte readRegister(byte addressToRead)
```

```
{
```

```
    Wire.beginTransmission(MMA8452_ADDRESS);
```

```
    Wire.write(addressToRead);
```

```
    Wire.endTransmission(false); //Konec přenosu, udržování spojení
```

```
    Wire.requestFrom(MMA8452_ADDRESS, 1); //Dotaz na 1 bit
```

```
    while(!Wire.available()) ; //Čekání na data, které se mají vrátit
```

```
    return Wire.read(); //Vrácení dat jako bity
```

```
}
```

```
// Zápis jednotlivých bitů (dataToWrite) do addressToWrite
```

```
void writeRegister(byte addressToWrite, byte dataToWrite)
```

```
{
```

```
    Wire.beginTransmission(MMA8452_ADDRESS);
```

```
    Wire.write(addressToWrite);
```

```
    Wire.write(dataToWrite);
```

```
    Wire.endTransmission(); //Konec přenosu
```

```
}
```